

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Γεωτεχνικής



National Technical University of Athens  
School of Civil Engineering  
Geotechnical Division

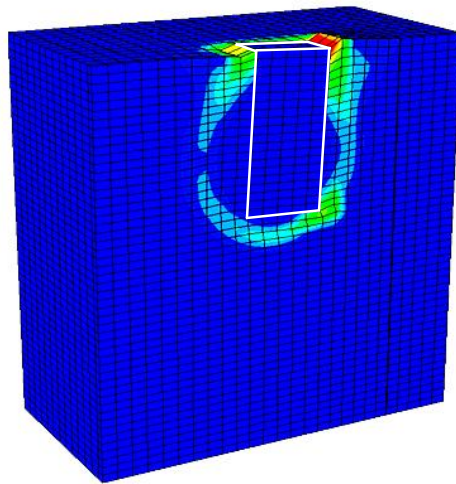
Διπλωματική εργασία

**ΣΟΥΛΙΩΤΗ ΧΡΗΣΤΟΥ**

Επιβλέπων:

**Λέκτορας Ν. Γερόλυμος**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΚΡΟ- ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΦΡΕΑΤΟΣ  
ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**



**DEVELOPMENT OF MACROELEMENT FOR LATERAL RESPONSE OF  
CAISSON FOUNDATION TO STATIC AND CYCLIC LOADING**

Diploma Thesis by

**SOULIOTIS CHRISTOS**

Supervised by  
Lecturer N. Gerolymos

**Ιούλιος 2012**

## **Ευχαριστίες...**

*Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, νιώθω βαθιά την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στη επίτευξη του στόχου αυτού.*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή Γ. Γκαζέτα, καθώς ήταν τιμή μου που συναναστράφηκα μαζί του κατά τα χρόνια των σπουδών μου. Δίχως αμφιβολία, αποτέλεσε (και εξακολουθεί να αποτελεί) συνεχώς την κυριότερη πηγή έμπνευσης για εμένα και ήταν ένας από τους πιο καταλυτικούς παράγοντες που με ώθησαν να ακολουθήσω τον κλάδο της Γεωτεχνικής Μηχανικής.*

*Ευχαριστώ θερμά τον λέκτορα Ν. Γερόλυμο για την συνεργασία που αναπτύξαμε τους τελευταίους μήνες. Η βοήθεια, οι συμβουλές και η συμπαράσταση που μου παρείχε ήταν ιδιαιτέρως σημαντικές για εμένα, δίνοντάς μου διαρκώς την απαιτούμενη υποστήριξη για την εκπλήρωση της εργασίας αυτής.*

*Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον υποψήφιο διδάκτορα Θ. Ζαφειράκο για το χρόνο που μου αφιέρωσε, καθώς με τις συμβουλές και τις υποδείξεις του αποτέλεσε μία επιπλέον ουσιαστική πηγή βοήθειας. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στους υποψήφιους διδάκτορες Π. Τασιοπούλου, Μ. Λώλη και Σ. Γιαννακό για την θερμή υποδοχή και την υπομονή τους κατά την συνύπαρξή μου στον ίδιο χώρο μαζί τους. Τέλος, δεν θα ήθελα να παραλείψω να ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές και φίλους μου για τις σχέσεις που αναπτύξαμε κατά την διάρκεια των σπουδών μας.*

*Ολοκληρώνοντας, νιώθω βαθύτατα την ανάγκη να ευχαριστήσω περισσότερο απ' όλους την οικογένειά μου για την διαρκή στήριξη που μου παρέχει.*



# **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

---

<b><i>ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</i></b> .....	<b>5</b>
1.1 Διάρθρωση και στόχοι της διπλωματικής εργασίας.....	5
1.2 Εισαγωγή στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις .....	8
1.3 Θεμελιώσεις υπό εγκάρσια φόρτιση .....	9
1.4 Θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας .....	14
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>19</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

---

<b><i>ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</i></b> .....	<b>29</b>
2.1 Ορισμός του προβλήματος.....	29
2.2 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων .....	29
2.2.1 Γεωμετρία και ιδιότητες προσομοιώματος .....	29
2.2.2 Κριτήριο διαρροής Von- Mises: θεωρητικά στοιχεία .....	31
2.2.2.1 Τροποποίηση του κριτηρίου διαρροής Von Mises για διαφορετικές εντατικές καταστάσεις.....	33
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>35</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

---

<b><i>ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΒΑΘΙΑ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ</i></b> .....	<b>41</b>
3.1 Ορισμός του προβλήματος.....	41
3.2 Επιλογή σημείου αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων .....	43
3.3 Η μέθοδος των επιβαλλόμενων δυνάμεων.....	45
3.3.1 Εισαγωγή.....	45

3.3.2 Διαδικασία σχεδιασμού των αριθμητικών αναλύσεων .....	46
3.3.3 Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων .....	48
3.3.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων .....	49
3.3.4.1 Το πλεονέκτημα της κανονικοποίησης με τις “καθαρές” αντοχές της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης .....	49
3.3.4.2 Το σχήμα (shape) των καμπυλών αλληλεπίδρασης .....	52
3.3.4.3 Εδαφικοί μηχανισμοί παραλαβής εγκάρσιων φορτίσεων σε επιφανειακές και σε βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις: η φυσική του προβλήματος .....	53
3.4 Η μέθοδος των επιβαλλόμενων μετακινήσεων (Swipe tests) .....	55
3.4.1 Εισαγωγή.....	55
3.4.2 Σχεδιασμός των αριθμητικών αναλύσεων με την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων .....	57
3.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου, αποτελέσματα και σχολιασμός τους .....	58
3.5 Δυναμικό πλαστικοποίησης (plastic potential) .....	61
3.5.1 Εισαγωγή.....	61
3.5.2 Η φυσική σημασία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων .....	63
3.5.3 Χαρακτηριστικά σημεία μέγιστης οριζόντιας δύναμης $Q_{max}$ και μέγιστης ροπής $M_{max}$ .....	67
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>71</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

<b><i>ΕΛΑΦΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ</i></b> .....	<b>133</b>
4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	133
4.2 Ταξινόμηση των χαρακτηριστικών σημείων των καμπυλών αλληλεπίδρασης .....	135
4.3 Μονοτονικές καμπύλες “δύναμης- μετακίνησης” .....	139
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>141</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

---

### ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

#### ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ..... 159

#### 5.1 Εισαγωγή ..... 159

#### 5.2 Προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας φρεάτων σε κατακόρυφη φόρτιση ( $N_u$ )..... 160

#### 5.3 Προσδιορισμός των “καθαρών” αντοχών σε οριζόντια δύναμη ( $Q_u$ ) και σε ροπή ( $M_u$ ) ..... 161

##### 5.3.1 Η επιρροή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u$ ..... 162

##### 5.3.2 Χαρακτηριστικές ιδιότητες των εκφράσεων των “καθαρών” αντοχών..... 164

#### 5.4 Εξίσωση διαρροής του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης.. 165

##### 5.4.1 Βιβλιογραφικά στοιχεία ..... 165

##### 5.4.2 Προτεινόμενες εκφράσεις ..... 166

#### 5.5 Συντελεστής διεύρυνσης των καμπυλών αλληλεπίδρασης ..... 169

#### ΣΧΗΜΑΤΑ ..... 173

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

---

### ΑΝΑΠΤΥΞΗ “ΜΑΚΡΟ- ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ” ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ

#### ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΡΕΑΤΩΝ ..... 187

#### 6.1 Εισαγωγή ..... 187

#### 6.2 Ορισμός του προβλήματος..... 190

##### 6.2.1 Ελαστική συμπεριφορά των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων..... 194

##### 6.2.2 Επιφάνειες διαρροής των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων ..... 197

##### 6.2.3 Νόμος πλαστικής ροής (plastic flow rule)..... 200

##### 6.2.4 Νόμος κράτυνσης (hardening law)..... 201

##### 6.2.5 Σύνταξη του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου ..... 205

#### 6.3 Αποτελέσματα του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου: σύγκριση και σχολιασμός ..... 207

##### 6.3.1 Προτεινόμενες συστάσεις για τις τιμές της χαρακτηριστικής παραμέτρου κράτυνσης $n$ ..... 210

6.4 Ανακυκλική (pushover) φόρτιση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων: το φαινόμενο της κράτυνσης με μειούμενο ρυθμό .....	211
6.4.1 Επεξήγηση του φαινομένου .....	211
6.4.2 Προσομοίωση του φαινομένου μέσω του “μακρο- στοιχείου” .....	216
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>219</b>
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>	
<hr/>	
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</b> .....	<b>255</b>
7.1 Συμπεράσματα .....	255
7.2 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση .....	259
 <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>261</b>

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

---

### 1.1 Διάρθρωση και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (φρέατα) υπό συνδυασμένη εγκάρσια φόρτιση στην κεφαλή τους, η οποία αποτελείται από κατακόρυφη δύναμη  $N$ , οριζόντια δύναμη  $Q$  και ροπή  $M$ . Θεωρώντας αστράγγιστες εδαφικές συνθήκες φόρτισης, αρχικός στόχος είναι η παραγωγή των λεγόμενων “καμπυλών αλληλεπίδρασης” του συστήματος θεμελίωσης, στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Επιπροσθέτως, συγχρόνως με την παραγωγή των καμπυλών αυτών, στοχεύεται και η περιγραφή των φυσικών χαρακτηριστικών που διέπουν το μελετώμενο πρόβλημα των φρεάτων, επεξηγώντας την φυσική σημασία που συνοδεύει τις καμπύλες αλληλεπίδρασης, ενώ, επιπλέον, εξετάζεται η εφαρμοσιμότητα του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής των μετακινήσεων (associated plastic flow rule). Εν συνεχεία, προτείνονται “κλειστές” αναλυτικές εκφράσεις ικανές να περιγράψουν τις αντοχές του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης, καθώς και τις επιφάνειες διαρροής του, αξιοποιώντας κατάλληλα τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Τέλος, είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι οι παραπάνω στόχοι βαδίζουν πιστά στις ανάγκες που αναδύονται από την απαίτηση για την ανάπτυξη ενός καινοτόμου ενιαίου μαθηματικού εργαλείου, γνωστό στην βιβλιογραφία και ως “μακρο- στοιχείο” (“macro- element modeling”). Βασικός στόχος της εργασίας αυτής- εν τέλει- είναι η σύνδεση όλων των παραπάνω επιμέρους στόχων και η ενσωμάτωσή τους στο θεωρητικό υπόβαθρο που εξουσιάζει την διαδικασία σύνταξης του εν λόγω “μακρο- στοιχείου”, το οποίο “υπακούει” στους νόμους που πηγάζουν από την πτυχή της θεωρίας της πλαστικότητας που συσχετίζει την κράτυνση του συστήματος με το παραγόμενο έργο (work- hardening plasticity theory). Με άλλα λόγια, ο απώτερος στόχος της παρούσης διπλωματικής



εργασίας είναι η ορθή αξιοποίηση μιας ογκώδους σειράς τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, με τρόπο τέτοιο που να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική ανάπτυξη του προαναφερθέντος “μακρο- στοιχείου”, με σκοπό την αναπαραγωγή της απόκρισης των φρεάτων υπό εγκάρσια φόρτιση χωρίς την ανάγκη διεξαγωγής οποιασδήποτε πρόσθετης ανάλυσης. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η διάρθρωση της εργασίας ανά κεφάλαιο, όπως αυτά αναπτύσσονται στις σελίδες που ακολουθούν. Στο υπόλοιπο τμήμα του πρώτου κεφαλαίου παρέχεται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση του προβλήματος των εγκαρσίως φορτιζομένων θεμελιώσεων, καθώς και η κατάλληλη εισαγωγή στο υπάρχον θεωρητικό υπόβαθρο για την μελέτη των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος προσομοίωσης του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, δημιουργώντας ένα τριδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Περιγράφονται οι γεωμετρικές και οι μηχανικές ιδιότητες του εν λόγω προσομοιώματος, μαζί με κάποια βασικά θεωρητικά στοιχεία του υιοθετούμενου κριτηρίου διαρροής Von Mises.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται εκτενώς η διαδικασία των αριθμητικών αναλύσεων με την αξιοποίηση του τριδιάστατου προσομοιώματος που δημιουργήθηκε, με σκοπό την παραγωγή των ζητούμενων καμπυλών αλληλεπίδρασης της θεμελίωσης. Αρχικώς, συζητείται η φυσική σημασία της επιλογής του κατάλληλου σημείου αναφοράς για την μέτρηση των δυνάμεων και των μετακινήσεων του συστήματος της θεμελίωσης, και στην συνέχεια αναλύονται οι δύο βασικότερες μέθοδοι της βιβλιογραφίας για την ορθή παραγωγή των αντίστοιχων καμπυλών αλληλεπίδρασης: (α) η μέθοδος των επιβαλλόμενων δυνάμεων και (β) η μέθοδος των επιβαλλόμενων μετακινήσεων. Τέλος, εξετάζεται η ισχύς του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής των μετακινήσεων για τον συγκεκριμένο τύπο θεμελίωσης, και παρέχονται πληροφορίες για την φυσική σημασία που αυτός έχει.

Στο τέταρτο κεφάλαιο καταγράφονται οι κινητοποιούμενοι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης κατά την αστοχία του μελετώμενου συστήματος, οι οποίοι εξαρτώνται αποκλειστικά από την θέση του κάθε εξεταζόμενου σημείου πάνω σε μία

καμπύλη αλληλεπίδρασης. Επιπλέον, εντοπίζεται η σπουδαιότερη επιρροή που έχει στα παραγόμενα αποτελέσματα η ύπαρξη της κατακόρυφης φόρτισης, η οποία είναι ο κύριος παράγοντας που προσδίδει συμμετρικά (ή ασύμμετρα) χαρακτηριστικά στην απόκριση των φρεάτων υπό εγκάρσια φόρτιση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο προτείνονται “κλειστές” αναλυτικές εκφράσεις για την περιγραφή των αντοχών της θεμελίωσης. Πιο συγκεκριμένα, συστήνονται κατάλληλες εκφράσεις για την περιγραφή των “καθαρών” αντοχών των φρεάτων σε οριζόντια δύναμη και σε ροπή (συγχρόνως με την αντίστοιχη έκφραση για την ποσοτικοποίηση της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης σε κατακόρυφη φόρτιση), και , τελικώς, αναπτύσσονται οι κατάλληλες εξισώσεις διαρροής του εξεταζόμενου συστήματος θεμελίωσης.

Στο έκτο κεφάλαιο αναπτύσσεται το ζητούμενο ενιαίο μαθηματικό εργαλείο (“μακρο- στοιχείο”), με σκοπό την αναπαραγωγή της απόκρισης των φρεάτων σε εγκάρσια φόρτιση δίχως την ανάγκη διεξαγωγής νέων και χρονοβόρων τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Αξιοποιώντας τους νόμους που παρέχει η κατάλληλη θεωρία της πλαστικότητας (work- hardening plasticity theory), καθίσταται δυνατή η σύνδεση όλων των συμπερασμάτων και των προτάσεων των προηγούμενων κεφαλαίων, συντάσσεται το εν λόγω “μακρο- στοιχείο”, και εξετάζεται η αποτελεσματικότητά του μέσω της σύγκρισης με τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις. Η σύγκριση αυτή, φανερώνει την ορθότητα ολόκληρης της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, με τα αποτελέσματα που ανακτώνται από το ενιαίο μαθηματικό εργαλείο να συμβαδίζουν απόλυτα με τα αντίστοιχά τους που πηγάζουν από τις αριθμητικές αναλύσεις.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που αποκτήθηκαν στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας, καθώς και τονίζονται οι απαραίτητες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων.

## **1.2. Εισαγωγή στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις**

Στο **Σχήμα 1.1** απεικονίζεται μία προσεγγιστική διακριτοποίηση των πλέον διαδεδομένων- κλασικών τύπων θεμελίωσης που εφαρμόζονται στην πράξη. Συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι περιπτώσεις των επιφανειακών θεμελιώσεων (footing), των πασσάλων (pile) και των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (caisson), με την κάθε μία να έχει τις δικές της συνθήκες εφαρμογής, με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η χρήση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (φρέατα) σε “μαλακά” εδάφη είναι ευρέως διαδεδομένη, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για την θεμελίωση μεγάλων σε όγκο έργων (π.χ. οδικές και σιδηροδρομικές γέφυρες, **Σχήμα 1.2**). Αξιοσημείωτα παραδείγματα είναι η γέφυρα Tagus στην Πορτογαλία (θεμελιωμένη σε ένα θηριώδες φρέαρ 88m ύψους), η γέφυρα στον κόλπο San Francisco- Oakland, οι γέφυρες Williamsburg και Verrazano Narrows στην Νέα Υόρκη, καθώς και η υπερθαλάσσια οδική σύνδεση στο τεχνητό νησί Port στην Ιαπωνία (**Σχήμα 1.3**). Επίσης, στην Ιαπωνία, σχεδιασμός εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων με χρήση φρεάτων (caissons) έχει γίνει και στις γέφυρες του κόλπου του Τόκυο (**Σχήματα 1.4 και 1.5**), καθώς και στην μεγαλύτερη κρεμαστή γέφυρα (suspension bridge) του κόσμου: την γέφυρα Akashi (**Σχήμα 1.6**). Μάλιστα στην περίπτωση της Ιαπωνίας, τα ογκώδη φρέατα έπαιξαν σπουδαίο ρόλο στην επιβίωση αυτών των γεφυρών κατά τον ιστορικό σεισμό του Kobe (1995), όπως αποδείχθηκε εκ των υστέρων. Απ’ την άλλη πλευρά, όμως, στον μνημειώδη αυτό σεισμό, και αντίθετα με την άποψη που επικρατούσε για πολλά χρόνια, τα φρέατα (παρά το τεράστιο μέγεθός τους) έδειξαν περισσότερο “ευάλωτα” παρά “άτρωτα” στις σεισμικές διεγέρσεις, γεγονός που οδήγησε αρκετές κατασκευές θεμελιωμένες σε φρέατα να υποστούν σημαντικές βλάβες (χωρίς, όμως, την κατάρρευσή τους).

Επιπλέον, η μελέτη της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό την συνδυασμένη φόρτιση οριζόντιας δύναμης και ροπής (με την ταυτόχρονη παρουσία, φυσικά, της κατακόρυφης φόρτισης εκ της ανωδομής) είναι σπουδαίας σημασίας και για την θεμελίωση μιας διαφορετικής κατηγορίας έργων Πολιτικού Μηχανικού (και δη του γεωτεχνικού μηχανικού): τα έργα ανοιχτής θαλάσσης (**Σχήμα 1.7**). Στην περίπτωση αυτή, η εγκάρσια φόρτιση (η οριζόντια δύναμη και η ροπή,

δηλαδή) προέρχεται κυρίως από περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. άνεμοι και θαλάσσιοι κυματισμοί) και έχει χαρακτηριστικά ανακυκλικής φόρτισης, αντίθετα με την περίπτωση των γεφυρών όπου η κύρια πηγή εγκάρσιας “φόρτισης” είναι ο σεισμός, με συνέπεια η φόρτιση να διέπεται από δυναμικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, κατά την διάρκεια μιας ισχυρής καταιγίδας, επιβάλλονται στην εγκιβωτισμένη θεμελίωση σημαντικές οριζόντιες δυνάμεις και ροπές ανατροπής, οι οποίες χρήζουν, φυσικά, ασφαλούς παραλαβής, ενώ αναλόγως την έντασής της υπάρχει και η πιθανότητα μεταβολής ακόμα και της κατακόρυφης φόρτισης.

### **1.3 Θεμελιώσεις υπό εγκάρσια φόρτιση**

Η μελέτη της απόκρισης των επιφανειακών, ή ακόμα και των ελαφρά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (στο εξής η αναφορά τους με τον όρο “ρηχές” θεμελιώσεις θα θεωρείται ισοδύναμη) σε εγκάρσια φόρτιση -γενικώς- έχει προσεγγίσει το ενδιαφέρον των ερευνητών εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Ως επακόλουθο αυτού, πολυάριθμες μέθοδοι ποικίλων βαθμών ακρίβειας, αποτελεσματικότητας και πολυπλοκότητας έχουν αναπτυχθεί διαχρονικά. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά η έρευνα επικεντρώθηκε στην κατανόηση και στην περιγραφή της συμπεριφοράς τέτοιων θεμελιώσεων υπό κατακόρυφη φόρτιση, θεωρούμενη ως κύρια λόγω του ιδίου βάρους της κατασκευής [Prandtl 1921; Hill 1950; Skempton 1951]. Με την πάροδο των χρόνων, τα έργα ανοιχτής θαλάσσης ξεκίνησαν να ανθίζουν εξαιτίας της έντονης ανάπτυξης που γνώρισε ο κλάδος της “ενεργειακής βιομηχανίας” (με κύριο προϊόν το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο). Έτσι, η έρευνα γρήγορα επεκτάθηκε και στην μελέτη διαφορετικών συνθηκών φόρτισης, επιβαλλόμενων τόσο στις επιφανειακές όσο και στις “ρηχές” θεμελιώσεις, όπως είναι η επιβαλλόμενη φόρτιση υπό κλίση ή η έκκεντρη φόρτιση [Meyerhof 1953; Hansen 1970].

Παρά τον σημαντικό όγκο, όμως, των πρόσφατων εργασιών σχετικά με τις θεμελιώσεις έργων ανοιχτής θαλάσσης (και την συνεπακόλουθη χρήση των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων που αυτά επιφέρουν), παραδόξως, ένα εντυπωσιακά πολύ μικρό κομμάτι της έρευνας έχει αφιερωθεί μέχρι στιγμής στην μελέτη της απόκρισης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων υπό μονοτονική και

σεισμική φόρτιση [Hutchinson et al. 2004; Silva and Manzari 2008; Gerolymos et al. 2009], οδηγώντας σε ένα σημαντικό κενό. Επιπλέον, παρ' όλο που ακόμα και η μελέτη της σεισμικής απόκρισης των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υποδεικνύει σημαντικό ενδιαφέρον για πάρα πολλά χρόνια, πολύ μικρό κομμάτι της έρευνας έχει εστιάσει στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις- φρέατα. Αντιθέτως, οι ήδη ανεπτυγμένες μέθοδοι της βιβλιογραφίας για την περιγραφή της συμπεριφοράς των (άκαμπτων) ελαφρώς εγκιβωτισμένων- “ρηχών” θεμελιώσεων καθώς και των (εύκαμπτων) πασσάλων, συνήθως, προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε να γίνει δυνατή η εφαρμογή τους και στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, διευρύνοντας το παραπάνω κενό που αναφέρθηκε. Ενδεικτικά, σε αυτήν την κατηγορία των προσαρμοσμένων μεθόδων μπορούν να ταξινομηθούν (“σε αυστηρή χρονολογική σειρά”, [Gerolymos and Gazetas 2006]): η αναλυτική λύση του Tajimi [1969] για κυλινδρική εγκιβωτισμένη θεμελίωση σε συνεχές μέσο υπερκείμενο βράχου, οι προσεγγιστικές αναλυτικές λύσεις των Novak και Beredugo [1972], οι κατάλληλοι σχηματισμοί πεπερασμένων στοιχείων των Kausel και Roesset για κυκλικές θεμελιώσεις σε πολύστρωτο εδαφικό σχηματισμό πάνω από βράχο [1975], η λύση συνοριακών στοιχείων του Dominguez για θεμελιώσεις ορθογωνικής κάτοψης σε ημίχωρο [1978], η ημι- αριθμητική μέθοδος του Tassoulas, εφαρμοσμένη σε εγκιβωτισμένες κυλινδρικές θεμελιώσεις μεταβλητών παράπλευρων υψών [1981], η μέθοδος συνοριακών στοιχείων στον τομέα του χρόνου (time- domain) των Karabalis και Beskos [1986], η υβριδική λύση συνοριακών στοιχείων και πεπερασμένων στοιχείων των Mita και Lucio για τετραγωνικές σε κάτοψη θεμελιώσεις, εγκιβωτισμένες σε ημίχωρο [1989] και η προσεγγιστική αναλυτική λύση για κυλινδρικές θεμελιώσεις, ως επέκταση της εργασίας των Tajimi και Novak, από τον Harada [1981]. Μια από τις πιο συμβατές και ολοκληρωμένες μελέτες για την σεισμική απόκριση τόσο των εύκαμπτων όσο και των άκαμπτων βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων διεξήχθη από τον Saitoh [2001], ο οποίος επέκτεινε κατάλληλα την προσέγγιση του Tajimi [1969], ώστε να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς την ευκαμψία του φρέατος και τα φαινόμενα γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων που εντοπίζονται στην διεπιφάνεια εδάφους- θεμελίου (όπως είναι π.χ. η αποκόλληση- gapping της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης από το περιβάλλον έδαφος). Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, ο Saitoh απέδειξε ότι η παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης του Novak, όσο λογική και να θεωρείται, οδηγεί σε ανακριβή αποτελέσματα.

Επιπλέον, αν και οι περισσότερες από τις δημοσιευμένες εργασίες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρονται σε θεμελιώσεις κυκλικής διατομής, σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων παίζει και το σχήμα τους (σε κάτοψη). Εκτεταμένες μελέτες για την στατική και την δυναμική απόκριση των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων έχουν δημοσιευθεί με κύριο εκφραστή τον Gazetas [Gazetas, Dobry, Tassoulas 1985; Gazetas, Tassoulas 1987(a) και 1987(b); Fotopoulou, Kotsanopoulos, Gazetas, Tassoulas 1989]. Σε αυτές τις δημοσιευμένες εργασίες, μελετάται η απόκριση εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων τυχαίου σχήματος σε κάτοψη (από ορθογωνικές θεμελιώσεις οποιουδήποτε λόγου πλευρών ως και τριγωνικές), χρησιμοποιώντας μία αποτελεσματικά προσαρμοσμένη μέθοδο συνδιασμένων στοιχείων, σε συνδυασμό με τα διάφορα σχετικά αποτελέσματα από την βιβλιογραφία. Έτσι, ο Gazetas και οι υπόλοιποι συμμετέχοντες κατάφεραν να αναπτύξουν “κλειστές”, ημι- αναλυτικές εκφράσεις και διαγράμματα για την ποσοτικοποίηση της δυσκαμψίας και της απόσβεσης των εγκαρσίως φορτισμένων (δηλαδή σε οριζόντια δύναμη και ροπή) θεμελιώσεων τυχαίου σχήματος κάτοψης, εγκιβωτισμένων σε ομογενές έδαφος [Gazetas 1991], λαμβάνοντας υπόψιν- με αδρό τρόπο- ακόμα και την αποκόλληση μεταξύ της θεμελίωσης και του περιβάλλοντος εδάφους. Η επικύρωση και η επιβεβαίωση της ορθότητας κάποιων βασικών εννοιών των παραπάνω μελετών έγινε αργότερα από τους Gadre και Dobry [1998] μέσω πειραμάτων φυγοκεντριστή.

Παρόλα αυτά, οι παραπάνω αναλυτικές εκφράσεις και τα διαγράμματα δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν άμεσα σε πολύστρωτους εδαφικούς σχηματισμούς, ούτε φυσικά να επεκταθούν (έστω και προσεγγιστικά) για χρήση σε μη- γραμμικώς συμπεριφερόμενα εδάφη, πόσο μάλλον για να προσομοιάσουν ρεαλιστικά τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων (όπως είναι η αποκόλληση- gapping, και το ανασήκωμα- uplifting) τα οποία συμβαίνουν υπό ισχυρές συνθήκες φόρτισης (στατικής, ανακυκλικής ή δυναμικής). Επιπλέον, παρά την ευρεία ανάπτυξη και την εκτεταμένη χρήση των διάφορων εμπορικών κωδίκων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την ακριβέστερη μελέτη ισχυρά φορτιζομένων (ιδίως σε σεισμική διέγερση) εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων ορθογωνικού σχήματος σε κάτοψη, σε βαθείς πολύστρωτους εδαφικούς

σηματισμούς, εξακολουθεί να είναι- από πρακτική σκοπιά- απαγορευτικός. Αυτό συμβαίνει διότι, λόγω της γεωμετρίας των συγκεκριμένων θεμελιώσεων, είναι απαραίτητο να διεξαχθούν τριδιάστατες αναλύσεις, με την αντίστοιχη τριδιάστατη διακριτοποίηση, καθιστώντας μη αξιοποιήσιμο το συμπέρασμα (σχετικά) πρόσφατων ερευνών, όπου αναδείχθηκε ότι τόσο οι εδαφικοί μηχανισμοί παραμόρφωσης όσο και οι συνεπαγόμενες φέρουσες ικανότητες των λωριδωτών (strip) και των κυκλικών (circular) θεμελιώσεων είναι πανομοιότυπες [Gourvenec and Randolph 2003; Bransby and Randolph 1999b]. Το γεγονός αυτό, κυρίως, έχει οδηγήσει τους γεωτεχνικούς μηχανικούς να προσεγγίσουν από αρκετές διαφορετικές σκοπιές το θέμα της διερεύνησης της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, με κοινό παρονομαστή την σχεδίαση σε ενιαία διαγράμματα όλων εκείνων των συνδυασμών φόρτισης που οδηγούν στην αστοχία το σύστημα του εδάφους και της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, γνωστά στην βιβλιογραφία και ως “καμπύλες αλληλεπίδρασης” (“interaction diagrams”, [Zaharescu 1961; Ticof 1977]). Η μέθοδος αυτή αξιοποιήθηκε σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, ενώ η λογική της και τα πλεονεκτήματά της αναλύονται λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια.

Ο προσδιορισμός των ακραίων καταστάσεων φόρτισης μιας θεμελίωσης με βάση την παραπάνω μέθοδο (και ενδεχόμενες παραλλαγές της) έχει ήδη ερευνηθεί κατά το παρελθόν τόσο σε αναλυτικές, όσο και σε αριθμητικές μελέτες [Ukritchon et al. 1998; Gourvenec 2004]. Αξίζει να σημειωθεί, πάντως, ότι η πλειοψηφία τέτοιου είδους ερευνών αναφέρεται συντριπτικά σε επιφανειακές και σε ελαφρώς εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις (ποιοτικά για λόγο εγκιβωτισμού  $D/B \leq 1$ ), και κυρίως στον κλάδο της γεωτεχνικής μηχανικής που σχετίζεται άμεσα με τα έργα ανοικτής θαλάσσης (“offshore geotechnical engineering”, [Roscoe and Schofield 1957; Bransby and Randolph 1998; Taiebat and Carter 2000; Gourvenec and Randolph 2003; Gourvenec 2007, 2008; Randolph and Gourvenec 2011]). Συν τοις άλλοις, αποτελεί αντικείμενο συνεχούς ανάπτυξης και ενδιαφέροντος ο προσδιορισμός και η πρόβλεψη των οριακών αντοχών των θεμελιώσεων υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης, στα πλαίσια της κατάλληλης μαθηματικής διατύπωσης των επιφανειών διαρροής (δηλαδή, μέσω εξισώσεων της μορφής:  $f(M, Q, N) = 0$ ), καθώς και η γραφική αναπαράσταση των οριακών αυτών

καταστάσεων μέσω των “επιφανειών αλληλεπίδρασης” στον γενικευμένο χώρο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης  $N$ - οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$  [Bransby and Randolph 1998; Ukritchon et al. 1998; Martin and Houlsby 2001; Taiebat and Carter 2000, 2002; Gourvenec and Randolph 2003; Gourvenec 2004]. Η προσέγγιση αυτή, πάντως, δεν είναι εντελώς νέα στην γεωτεχνική Μηχανική [Roscoe and Schofield 1957], ενώ έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στην μελέτη αντίστοιχων οριακών καταστάσεων, αλλά υπό στραγγιζόμενες συνθήκες φόρτισης, για την περίπτωση των μη- συνεκτικών εδαφών θεμελίωσης [Butterfield and Tiof 1979; Nova and Montrasio 1991; Butterfield and Gottardi 1994].

Επιπρόσθετα, περιορισμένη έρευνα σχετικά με την απόκριση των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων σε αργίλους έχει γίνει, κατά το παρελθόν, μέσω μοντέλων φυσικής κλίμακας [Watson και Randolph 1997; Byrne και Cassidy 2002; Cassidy et al. 2004], τα αποτελέσματα της οποίας, όμως, δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμα στις εξεταζόμενες βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις διότι αναφέρονται σε έναν διαφορετικό τύπο εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, αυτών που είθισται να κατατάσσονται ποιοτικά στην κατηγορία των εύκαμπτων εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, με ευρέως διαδεδομένη χρήση στην βιομηχανία των έργων ανοικτής θαλάσσης. Οι εύκαμπτες εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις (skirted foundations, **Σχήμα 1.8**) αποτελούνται από μία άκαμπτη, επίπεδη πλάκα έδρασης στην κορυφή τους και η οποία συνδέεται περιμετρικά με κατακόρυφα τοιχώματα, που διεισδύουν κατά ένα βάθος εγκιβωτισμού στο έδαφος θεμελίωσης. Συνεπώς, υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με τις άκαμπτες βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις- φρέατα (caissons), καθώς επιτρέπουν επιπλέον μηχανισμούς εδαφικής παραμόρφωσης ανάμεσα στα κατακόρυφα τοιχώματα, με συνέπεια τα σχετικά αποτελέσματα να μην έχουν άμεση εφαρμογή. Παρόλα αυτά, έχει διατυπωθεί η άποψη ότι όταν ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης αποτελείται από πολλά κατακόρυφα τοιχώματα (skirts), τότε είναι αναμενόμενα παρόμοια χαρακτηριστικά απόκρισης με εκείνα των (άκαμπτων) βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, καθώς το έδαφος ανάμεσα στα τοιχώματα περιορίζεται σε τέτοιο βαθμό που να εμποδίζεται η ανάπτυξη των παραπάνω πρόσθετων μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης [Tani and Craig 1995], καθιστώντας τους δύο διαφορετικούς τύπους θεμελίωσης άμεσα συγκρίσιμους.



Τέλος, μια μέθοδος διαφορετικής φύσεως αναπτύχθηκε πρόσφατα από τους Gerolymos και Gazetas [2006] για την ανάλυση των εγκαρσίως φορτισμένων βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, οι οποίοι ανέπτυξαν ένα κατάλληλο και αποτελεσματικό μαθηματικό εργαλείο, με την αντίστοιχη βαθμονόμησή του, με βάση τόσο πειραματικά αποτελέσματα όσο και αντίστοιχες τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Η προτεινόμενη μέθοδός τους βασίζεται στην παραδοχή της ελατηριωτής προσομοίωσης των εδαφικών στοιχείων της διεπιφάνειας εδάφους- φρέατος με ελατήρια τύπου Winkler, τεσσάρων διαφορετικών ειδών (**Σχήμα 1.9**). Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία τους παρέχει σπουδαίες πληροφορίες για την απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, ποικίλων σχημάτων κάτοψης, υπό στατικές, ανακυκλικές και δυναμικές συνθήκες φόρτισης, ακόμα και για εντόνως ανομοιογενείς εδαφικούς σχηματισμούς, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά τόσο την ανελαστικότητα του εδάφους όσο και τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικότητων. Πρόγονος της εκτενούς μελέτης τους μπορούν να θεωρηθούν οι σχετικές εργασίες των Davidson [1982] και Mylonakis [2001].

#### **1.4 Θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας**

Μία τυπική βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση- φρέαρ απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.10**. Η άκαμπτη θεμελίωση έχει πλάτος  $B$ , βάθος εγκιβωτισμού  $D$  και υπόκειται σε συνδυασμένη φόρτιση (στην προκειμένη περίπτωση η φόρτιση συντίθεται από απλή μεταφορά δυνάμεων μέσω μιας άκαμπτης ανωδομής), η οποία αποτελείται, τελικώς, από την κατακόρυφη δύναμη  $V$ , την οριζόντια δύναμη  $H$  και την ροπή  $M$ . Επίσης, στο ίδιο σχήμα ορίζεται και το σημείο αναφοράς των δυνάμεων και των συνεπακόλουθων μετακινήσεων (οριζόντια μετατόπιση  $h$ , κατακόρυφη μετατόπιση  $v$  και στροφή  $\theta$ ), το οποίο λαμβάνεται στην βάση του φρέατος (στα πλαίσια της εργασίας των Yun και Bransby [2007]). Αξίζει να σημειωθεί, πάντως, ότι υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στους ερευνητές ως προς την τοποθέτηση του σημείου αναφοράς, δηλαδή ως προς την θέση όπου μετρούνται τα φορτία και οι μετακινήσεις. Πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι η επιλογή διαφορετικών σημείων επηρεάζει άμεσα το σχήμα των καμπύλων αλληλεπίδρασης [Butterfield and Gottardi 1995; Bransby and Randolph 1998], όπως θα

αναπτυχθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Ενώ στις επιφανειακές θεμελιώσεις έχει επικρατήσει η επιλογή ως σημείου αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων το κέντρο της βάσης τους, στις εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις έχει χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς είτε το κέντρο της μάζας τους [Martin 1994], είτε το κέντρο της βάσης τους [Cassidy et al. 2004], είτε το κέντρο της κορυφής τους (προσεγγιστικά, δηλαδή, στην επιφάνεια του εδάφους, [Byrne and Cassidy 2002]). Επομένως, στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις- φρέατα, ένα βασικό θεωρητικό σημείο είναι η εμφανής δήλωση σχετικά με την τοποθέτηση του σημείου αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων.

Όσον αφορά την φόρτιση του φρέατος, η κατακόρυφη δύναμη  $V$  πηγάζει από την φόρτιση της ανωδομής και το ίδιο βάρος της θεμελίωσης, το οποίο (αντίθετα με τις επιφανειακές ή “ρηχές” θεμελιώσεις), γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι είναι σημαντικού μεγέθους. Η οριζόντια δύναμη  $H$  και η ροπή  $M$  είναι άμεσα συνδεδεμένες μεταξύ τους, ιδιαίτερα στην συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται, όπου θεωρείται ότι εφαρμόζεται οριζόντια δύναμη  $F$  σε δεδομένο ύψος  $l$  πάνω από την κορυφή του φρέατος. Έτσι, στην βάση του φρέατος (και επομένως στο επιλεγμένο σημείο αναφοράς) μεταβιβάζεται- απλοποιητικά- οριζόντια δύναμη  $H = F$  και ροπή  $M = Fl$ . Η προσέγγιση αυτή συμβαδίζει απόλυτα με την φυσική που επιβάλλει το προσομοίωμα του μονοβάθμιου ταλαντωτή (π.χ. για την δυναμική μελέτη της απόκρισης του συστήματος εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης- ανωδομής), και η οποία βρίσκει άμεση εφαρμογή στα προβλήματα των κατασκευών που θεμελιώνονται πάνω σε βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις- φρέατα (π.χ. βάθρο γέφυρας υπό σεισμική διέγερση; θαλάσσια ανεμογεννήτρια υποβαλλόμενη σε φόρτιση λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών). Ας σημειωθεί ότι σε κατασκευές που θεμελιώνονται σε φρέατα η κατακόρυφη συνιστώσα της φόρτισης απέχει κατά πολύ, συνήθως, από την φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης αποκλειστικά σε κατακόρυφη φόρτιση, καθιστώντας ως κρίσιμη την αντοχή της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης έναντι της συνδυασμένης δράσης οριζόντιας δύναμης και ροπής.

Τέλος, για την εξέταση της συμπεριφοράς των θεμελιώσεων υπό συνδυασμένη φόρτιση, οι Zaharescu [1961] και Ticof [1977] πρότειναν τον προσδιορισμό των αντοχών τους έναντι έκκεντρης και υπό κλίση φόρτισης, αναλύοντας την επιβαλλόμενη φόρτιση σε τρεις επιμέρους συνιστώσες: (i) σε κατακόρυφη δύναμη, (ii) σε οριζόντια

δύναμη και (iii) σε ροπή. Οι συνδυασμοί των φορτίσεων που προκαλούσαν την αστοχία της θεμελίωσης καταγράφονταν, με αποτέλεσμα την παραγωγή των επιφανειών αλληλεπίδρασής της, και κατ' επέκταση, των καμπυλών αλληλεπίδρασής της σε οποιοδήποτε από τα τρία κύρια επίπεδα φόρτισης επιθυμείται κάθε φορά: (i) το κύριο επίπεδο οριζόντιας δύναμης  $H$ - κατακόρυφης δύναμης  $V$ , (ii) το κύριο επίπεδο κατακόρυφης δύναμης  $V$ - ροπής  $M$  και (iii) το κύριο επίπεδο οριζόντιας δύναμης  $H$ - ροπής  $M$  (**Σχήμα 1.11**). Αργότερα, η μέθοδος αυτή υιοθετήθηκε από πολλούς ερευνητές, οι οποίοι μελέτησαν επιφανειακές θεμελιώσεις σε άμμο [Georgiadis 1985; Nova and Montrasio 1988, 1991; Ricceri and Simonini 1989] και σε άργιλο [Tan 1990; Martin 1994]. Κατά αυτόν τον τρόπο, η διαστασιολόγηση της θεμελίωσης απλοποιούνταν αρκετά, καθώς αρκούσε ο προσδιορισμός της επιφάνειας αλληλεπίδρασής της, της αναμενόμενης στάθμης συνδυασμένης φόρτισης ανά περίπτωση και η απλή σύγκριση (έστω και γραφική) της “δράσης” με την “αντοχή”.

Με παρόμοιο τρόπο, οι Bransby και Randolph [1999] μελέτησαν το σχήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης μιας ελαφρώς εγκιβωτισμένης- “ρηχής” θεμελίωσης στα τρία κύρια επίπεδα φόρτισης ( $H - V$ ,  $V - M$ ,  $H - M$ ) σε σύγκριση με το ισοδύναμό της επιφανειακό θεμέλιο. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το σχήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης είναι ανεξάρτητο του βάθους εγκιβωτισμού  $D$  (για τον δεδομένο λόγο εγκιβωτισμού που εξέτασαν,  $D/B = 0.167$ ) όταν οι δράσεις επί της θεμελίωσης κανονικοποιηθούν με τις αντίστοιχες “καθαρές” αντοχές τους (δηλαδή:  $V/V_o$ ,  $H/H_o$  και  $M/M_o$ ), δηλαδή τις αντοχές της θεμελίωσης σε ένα δεδομένο εντατικό μέγεθος με μηδενικά τα υπόλοιπα. Έτσι, πρότειναν αναλυτικές εκφράσεις για την περιγραφή της απόκρισης τέτοιων θεμελιώσεων, οι οποίες απαιτούσαν τον προσδιορισμό μόνο των καθαρών αντοχών  $V_o$ ,  $H_o$  και  $M_o$  ανεξάρτητα από τα γεωμετρικά στοιχεία της θεμελίωσης ή τις θεωρούμενες εδαφικές συνθήκες και αντοχές.

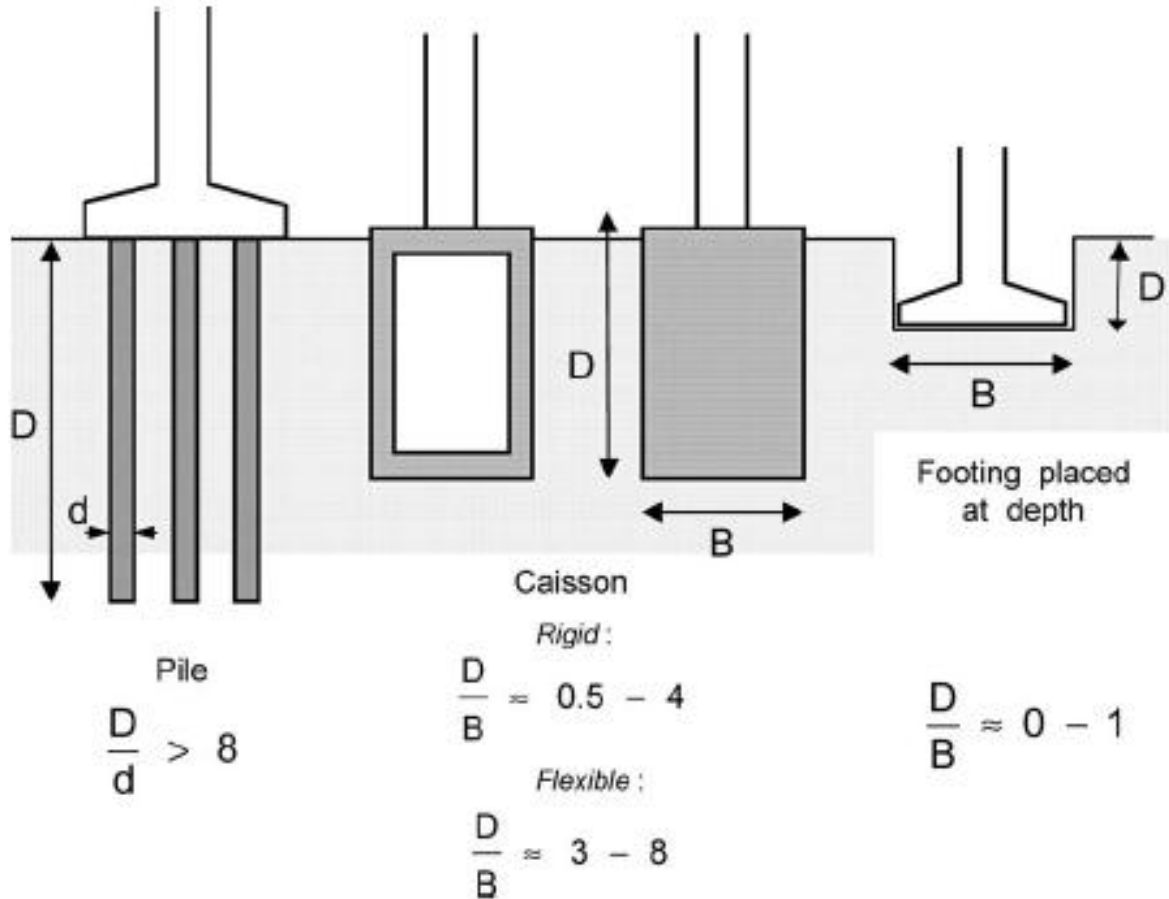
Πιο πρόσφατα, η παραπάνω προσέγγιση σχεδιασμού, μέσω των προτεινόμενων αναλυτικών εκφράσεων, αξιοποιήθηκε από τους Gourvenec και Randolph [2003] με μία μικρή τροποποίηση που αφορούσε την επιρροή της ανομοιομορφίας της εδαφικής αντοχής στο σχήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης, για επιφανειακές θεμελιώσεις σε εδάφη με ποικίλους βαθμούς ανομοιομορφίας της αντοχής τους, καθώς και για θεμελιώσεις διαφόρων σχημάτων σε κάτοψη, οδηγώντας σε πλήρως συμβιβαστά

αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, οι Bransby και Randolph [1999] μελέτησαν μόνο έναν λόγο εγκιβωτισμού (και μάλιστα αρκετά μικρό,  $D/B = 0.167$ ) με συνέπεια τα συμπεράσματά τους να χρήζουν επιβεβαίωσης για μεγαλύτερη ποικιλία λόγων εγκιβωτισμού και εδαφικών συνθηκών. Κάτι παρόμοιο, εξ' άλλου, αποτελεί και ένα από τα αντικείμενα διερεύνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, όπως έχει ήδη σημειωθεί και θα παρουσιασθεί στα κεφάλαια που ακολουθούν.

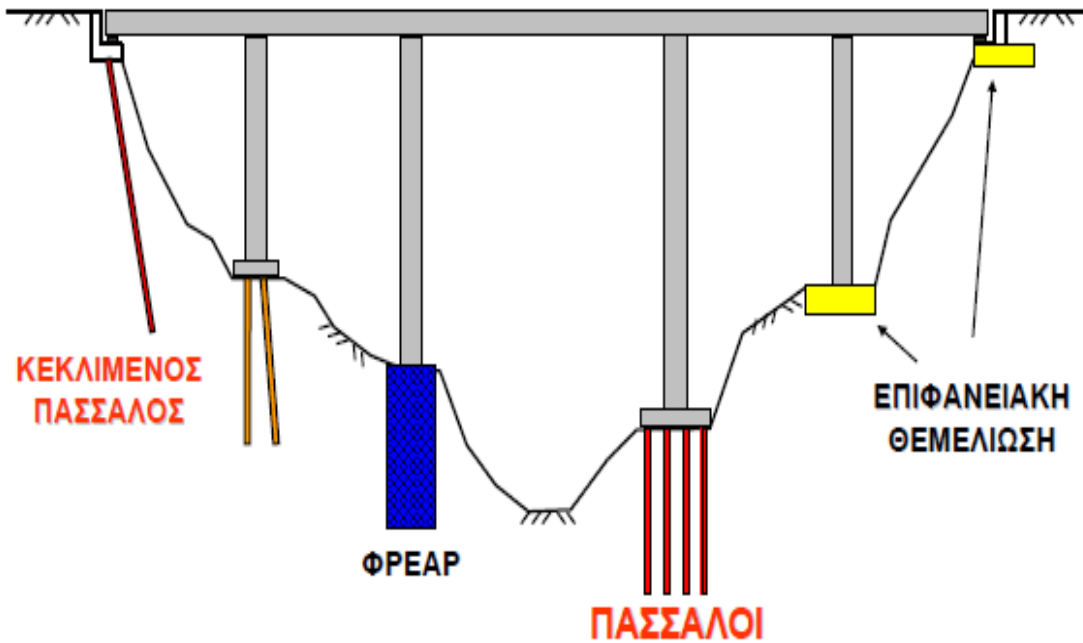


# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΧΗΜΑΤΑ**

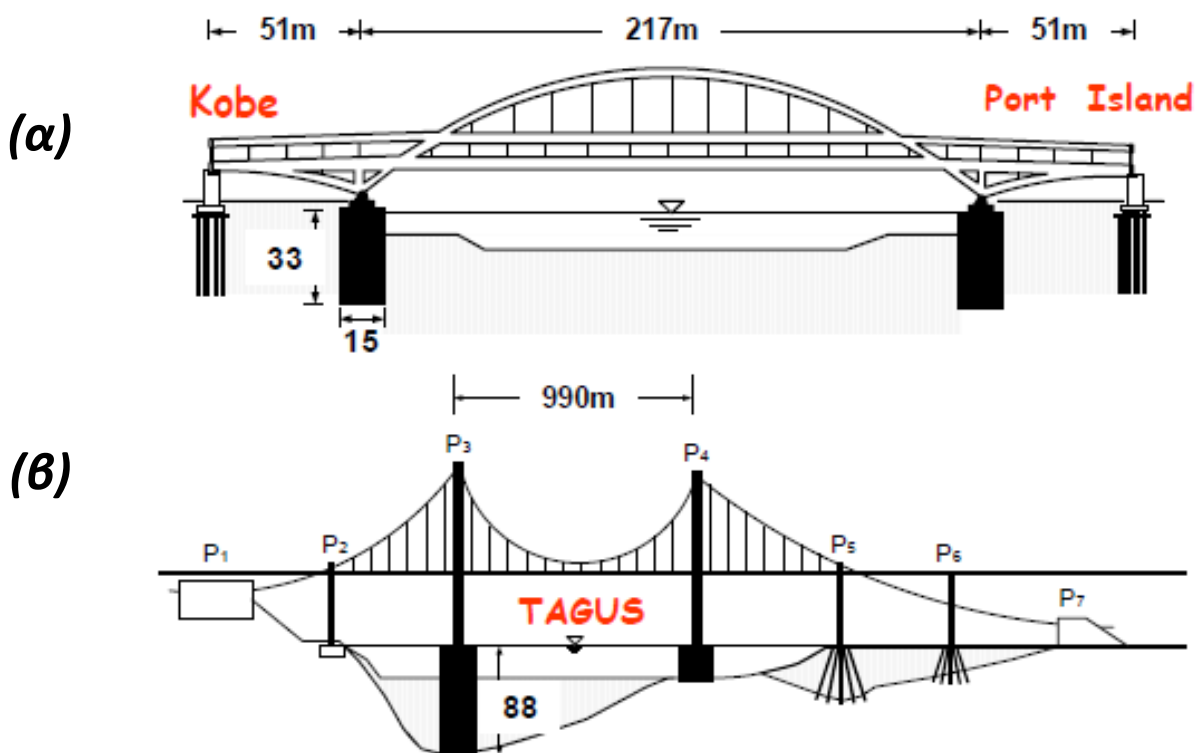
---



**Σχήμα 1.1.** Μία πιθανή προσεγγιστική διακριτοποίηση των συνηθών τύπων θεμελίωσης που σχεδιάζονται στην πράξη. Από αριστερά προς τα δεξιά, έχουμε διαδοχικά: (i) πάσσαλοι, (ii) βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις (εύκαμπτες και άκαμπτες) και (iii) επιφανειακές θεμελιώσεις (ή ελαφρώς εγκιβωτισμένες- “ρηχές” θεμελιώσεις). Η διακριτοποίηση γίνεται αποκλειστικά με βάση την λυγηρότητα ή το βάθος εγκιβωτισμού των επιμέρους στοιχείων τους. Για την περίπτωση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων που εξετάζονται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η ευκαμψία (ή η δυσκαμψία) τους εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως είναι το υλικό κατασκευής τους, το αν είναι συμπαγούς ή κοίλης διατομής καθώς και από την παραμορφωσιμότητα του περιβάλλοντος εδάφους θεμελίωσης.

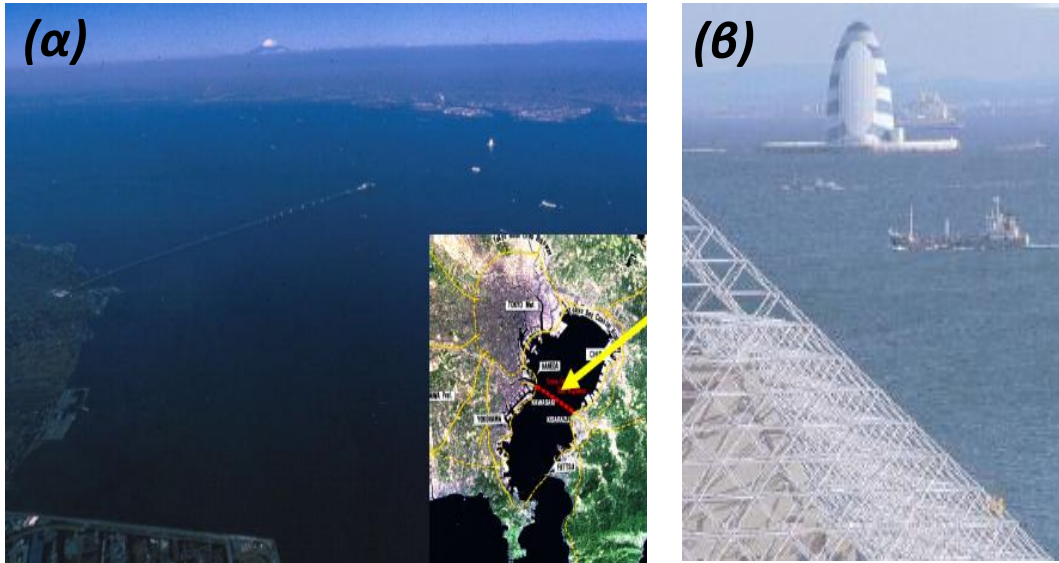


Σχήμα 1.2. Συνήθεις τύποι θεμελίωσης γεφυρών.

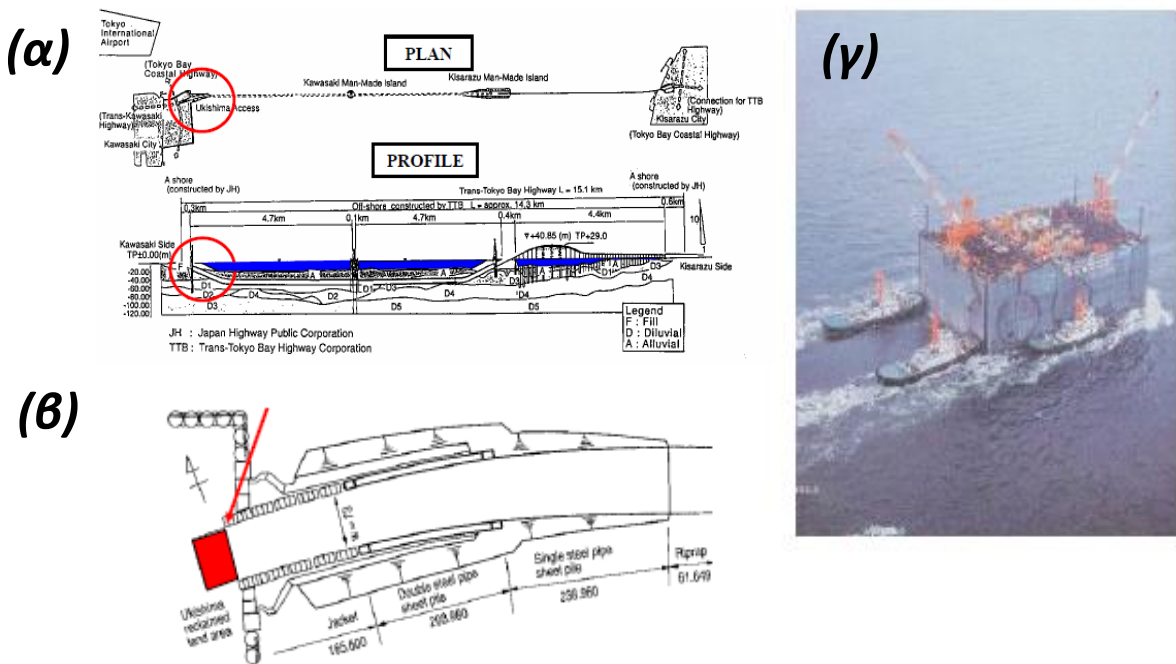


Σχήμα 1.3. Σκαριφηματικές όψεις: (α) γέφυρα υπερθαλάσσιας οδικής σύνδεσης, η οποία συνδέει το τεχνητό νησί Port Island με την πόλη του Kobe (Ιαπωνία) και (β) γέφυρα Tagus, θεμελιωμένη στο θηριώδες φρέαρ 88 μέτρων ύψους (Πορτογαλία).

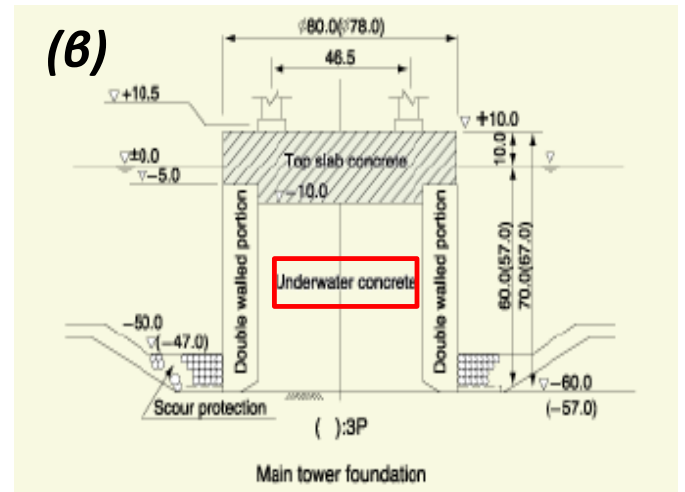


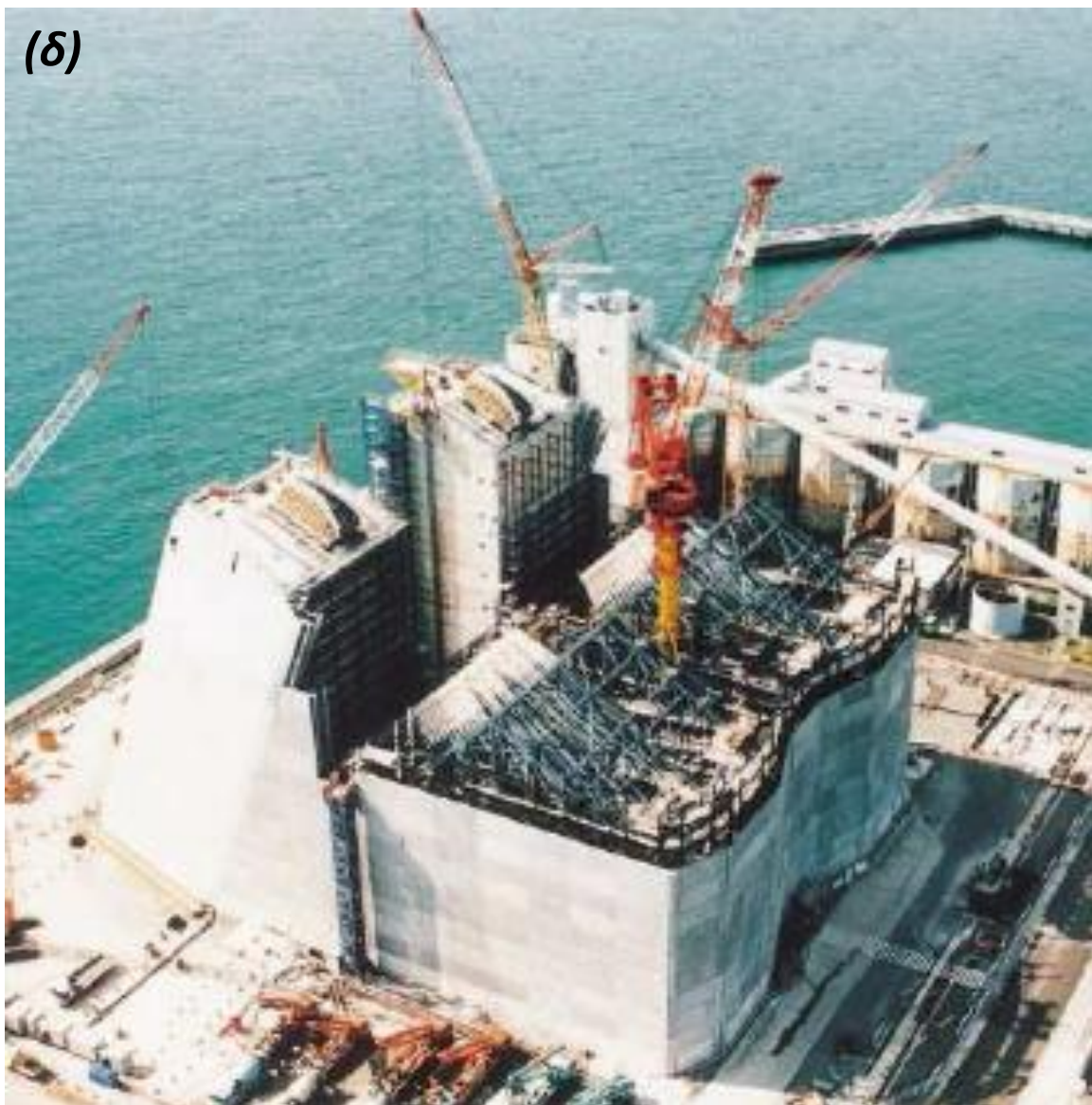


**Σχήμα 1.4.** Η γέφυρα στον κόλπο του Τόκιο (Trans -Tokyo Bay Highway Project). Στην εικόνα (α) απεικονίζεται μία αεροφωτογραφία της γέφυρας, η οποία- συνδυάζοντας την υπερθαλάσσια και την υποθαλάσσια προοπτική της- δικαίως κατατάσσεται ως μία από τις ωραιότερες αισθητικά γέφυρες παγκοσμίως. Στην εικόνα (β) απεικονίζεται η αρχιτεκτονική άποψη του τεχνητού νησιού που κατασκευάστηκε, με σκοπό την επιτυχή σύνδεση της υποθαλάσσιας σήραγγας με την υπόλοιπη γέφυρα [Πηγή: Tatsuoka F., Uchida K. και Ouchi T.].

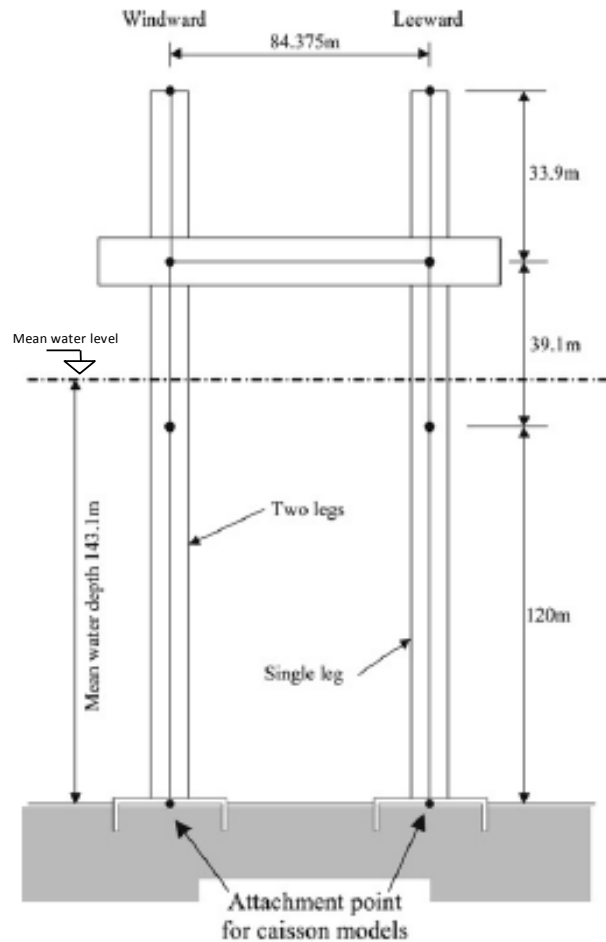


**Σχήμα 1.5.** Η γέφυρα στον κόλπο του Τόκιο (Trans -Tokyo Bay Highway Project). Εικόνα (α): κάτοψη και όψη της συνολικής γέφυρας. Με κόκκινο κύκλο σημειώνεται η σύνδεση με την πόλη Kawasaki; Εικόνα (β): λεπτομέρεια της σύνδεσης με την πόλη Kawasaki (κάτοψη). Στην περιοχή αυτή, εξαιτίας των φτωχών εδαφικών συνθηκών, εγκαταστάθηκε ένα ογκώδες χαλύβδινο φρέαρ, με σκοπό την κατάλληλη θεμελίωση για την έναρξη των εργασιών εκσκαφής της υπόγειας σήραγγας; Εικόνα (γ): το χαλύβδινο φρέαρ θεμελίωσης. [Πηγή: Tatsuoka F., Uchida K. και Ouchi T.].

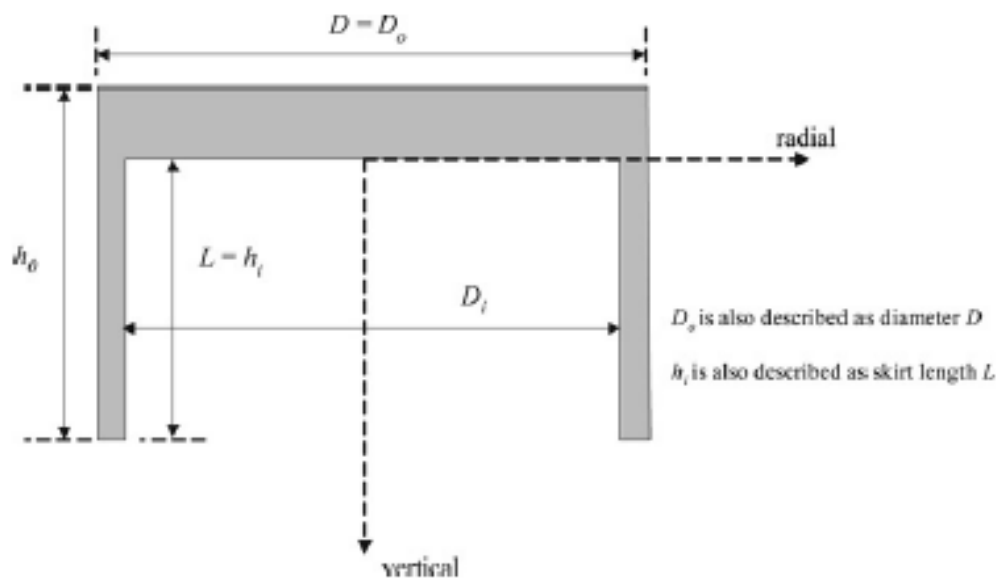




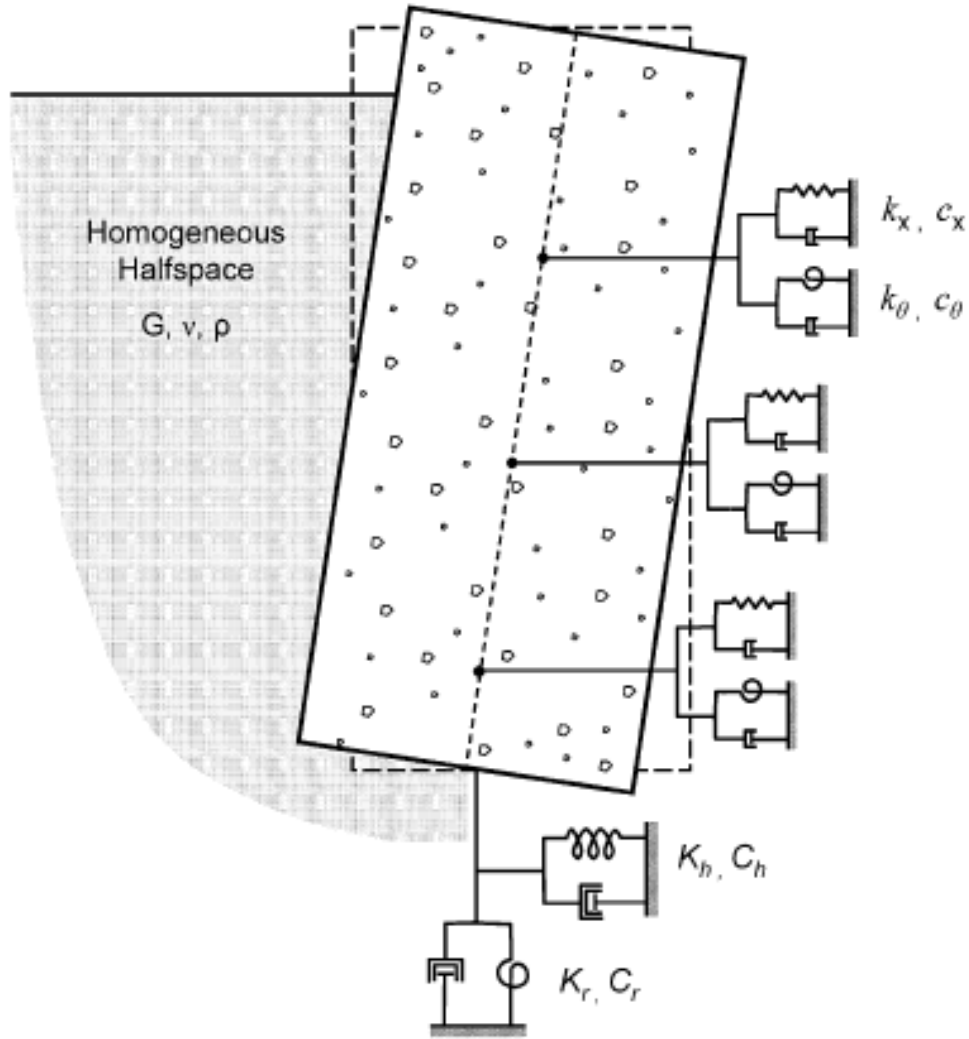
**Σχήμα 1.6.** Η γέφυρα Akashi (Akashi-Kaikyo suspension bridge). Στην εικόνα (α) απεικονίζεται μία αεροφωτογραφία της μεγαλύτερη κρεμαστής γέφυρας του κόσμου. Στην εικόνα (β) φαίνεται μία χαρακτηριστική τομή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ασφαλή θεμελίωση του μεγαλύτερου πυλώνα της γέφυρας, και στην εικόνα (γ) η διαδικασία οδήγησης του χαλύβδινου φρέατος στην θέση θεμελίωσης. Τέλος, στην εικόνα (δ) απεικονίζεται τμήμα της κατασκευής της ανωδομής της θεμελίωσης [Πηγή: Wai Tak Yim, Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2007, 27 April 2007, University of Bath, Bath, UK].



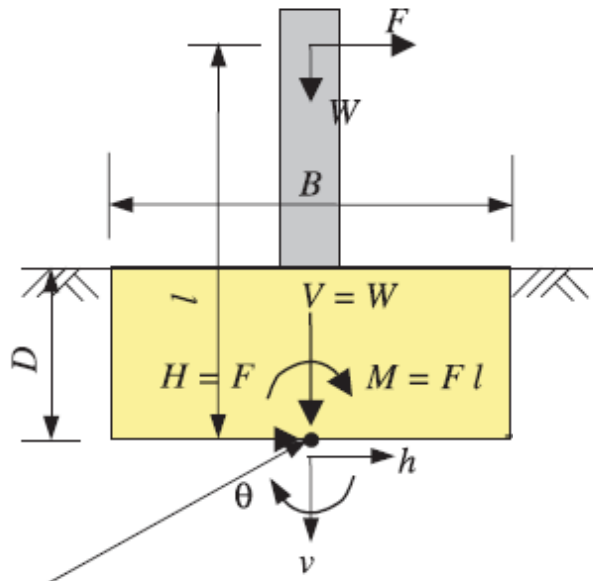
**Σχήμα 1.7.** Τυπική όψη έργου ανοικτής θαλάσσης. Η θεμελίωσή του γίνεται μέσω εύκαμπτων εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (συνήθως).



**Σχήμα 1.8.** Σκαρίφημα εύκαμπτης εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (skirted foundation). Η κυκλική επιφανειακή (άκαμπτη) θεμελίωση διαμέτρου  $D$ , εγκιβωτίζεται μονολιθικά μέσω περιμετρικών κατακόρυφων τοιχωμάτων μήκους  $L$ .



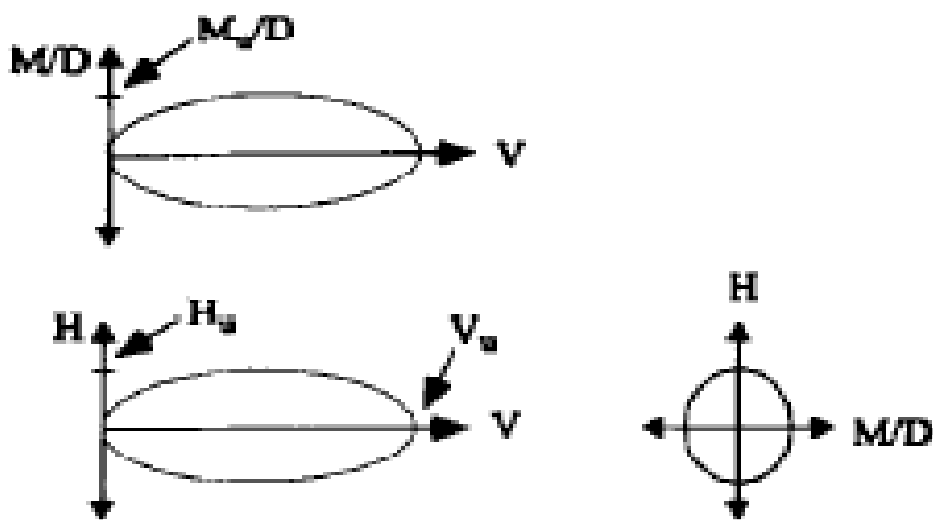
**Σχήμα 1.9.** Το ελατηριωτό προσομοίωμα ανάλυσης τύπου Winkler [Gerolymos and Gazetas 2006], για την μελέτη της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό εγκάρσια φόρτιση, σε ομογενή ημίχωρο (έδαφος μέτρου διάτμησης  $G$ , λόγου Poisson  $\nu$  και πυκνότητας  $\rho$ ). Με  $K$  (ή  $k$ ) συμβολίζονται οι επιμέρους συντελεστές δυσκαμψίας των ελατηρίων και με  $C$  (ή  $c$ ) οι αντίστοιχοι συντελεστές απόσβεσης (στην περίπτωση της μελέτης φορτίσεων δυναμικού χαρακτήρα). Το προσομοίωμα των τεσσάρων τύπων ελατηρίων (και αποσβεστήρων, αντίστοιχα) αποτελείται από: (α) κατανεμημένα μετακινησιακά ελατήρια ( $k_x$ ) κατά μήκος του περιφέρειας του φρέατος, που συσχετίζονται με την οριζόντια εδαφική αντίδραση (ορθές και οριζόντιες διατμητικές εδαφικές αντιδράσεις), (β) κατανεμημένα στρωφικά ελατήρια ( $k_\theta$ ) κατά μήκος του περιφέρειας του φρέατος, που συσχετίζονται με τις στοιχειώδεις ροπές που παράγουν οι κατακόρυφες διατμητικές εδαφικές αντιδράσεις της περιφέρειας, (γ) ένα συγκεντρωμένο μετακινησιακό ελατήριο ( $K_h$ ) στην βάση, συσχετιζόμενο με την οριζόντια διατμητική δύναμη στην βάση της θεμελίωσης και (δ) ένα συγκεντρωμένο στρωφικό ελατήριο ( $K_r$ ) στην βάση, ικανό να συσχετιστεί με την ροπή που παράγουν οι ορθές εδαφικές πιέσεις στην βάση της θεμελίωσης.

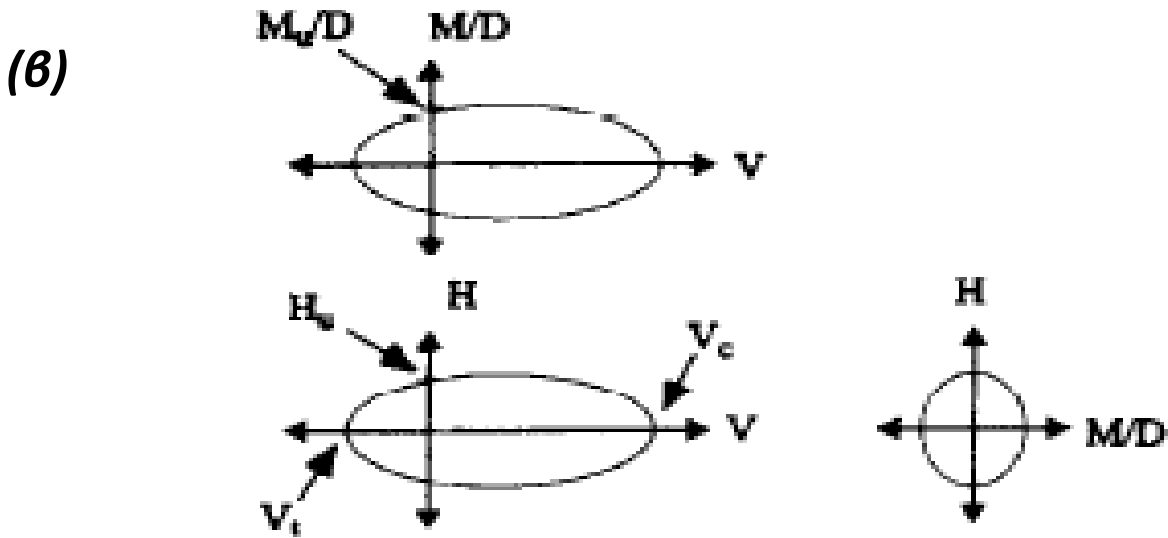


Σημείο αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων

**Σχήμα 1.10.** Τυπική βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση- φρέαρ (caisson). Απεικονίζονται τα γεωμετρικά στοιχεία της θεμελίωσης, και η φόρτίσή της μέσω μίας άκαμπτης ανωδομής [Yun and Bransby 2007].

(α)





**Σχήμα 1.11.** Τα τρία κύρια επίπεδα φόρτισης για την σχεδίαση των καμπυλών αλληλεπίδρασης: (i) το κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- κατακόρυφης δύναμης (επίπεδο  $H - V$ ), (ii) το κύριο επίπεδο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης-ροπής (επίπεδο  $V - M$ ) και (iii) το κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης-ροπής (επίπεδο  $H - M$ ). Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η σύσταση του Martin [1994] και στο σχήμα (β) η σύσταση του Murff [1994]. Η διαφορά των δύο συστάσεων εστιάζεται στο γεγονός ότι ο Murff πρότεινε την εξέταση και τμήματος της εφελκυστικής αντοχής των θεμελιώσεων (δηλαδή για κατακόρυφη φόρτιση αντίθετη των φορτίων βαρύτητας). Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία βαδίζει τα πρότυπα της σύστασης του Martin.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

---

#### **2.1 Ορισμός του προβλήματος**

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, δίδονται τα κύρια χαρακτηριστικά του τριδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις, μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Αναφέρονται διεξοδικά οι γεωμετρικές ιδιότητες του προσομοιώματος και γίνεται μία σύντομη θεωρητική ανασκόπηση του καταστατικού νόμου διαρροής που υιοθετήθηκε για τις αναλύσεις του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης.

#### **2.2 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων**

##### **2.2.1 Γεωμετρία και ιδιότητες προσομοιώματος**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων τετραγωνικού σχήματος κάτοψης  $B \times B$  και βάθους εγκιβωτισμού  $D$ , υποβαλλόμενες σε συνδυασμένη φόρτιση στην κεφαλή τους, αποτελούμενη από: κατακόρυφη δύναμη  $N$ , οριζόντια δύναμη  $Q$  και ροπή  $M$  (**Σχήμα 2.1**). Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται τρεις διαφορετικοί λόγοι εγκιβωτισμού,  $D/B = 1, 2,$  και  $3$  (**Σχήμα 2.2**). Διεξάγονται τριδιάστατες αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS με σκοπό την παραγωγή των καμπυλών αλληλεπίδρασης της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ , για σταθερό κατακόρυφο φορτίο  $N$  και για διαφορετικά βάθη εγκιβωτισμού  $D$ . Εξάλλου, ένας από τους βασικούς στόχους της διπλωματικής εργασίας είναι η



κατάλληλη μαθηματική περιγραφή των παραπάνω καμπυλών αλληλεπίδρασης, αλλά και όλων των υπολοίπων χαρακτηριστικών που διέπουν την συμπεριφορά των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, με απώτερο σκοπό την ενσωμάτωσή τους σε ένα ενιαίο μαθηματικό εργαλείο, στα πλαίσια του “macro- element modeling”. Επιπλέον, στο **Σχήμα 2.1** φαίνεται και μία ενδεικτική προοπτική απεικόνιση του συνολικού καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων, διαστάσεων 5B X 5B X 5B σε μήκος, πλάτος και βάθος, αντίστοιχα, ενώ επίσης απεικονίζεται και το μισό φρέαρ, που προκύπτει από την τομή κατά το ένα από τα δύο ορθογώνια επίπεδα συμμετρίας.

Χρησιμοποιούνται τριδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία συνεχούς μέσου C3D8, τόσο για την προσομοίωση του εδάφους όσο και για την προσομοίωση του φρέατος, με το μοντέλο να αποτελείται (συνολικά) από 31700 τέτοια στοιχεία. Επιβάλλονται κινηματικές δεσμεύσεις μηδενικής μετακίνησης στα σύνορα του καννάβου, με σκοπό την απαγόρευση της εκδήλωσης πεπερασμένων μετακινήσεων στις κατακόρυφες παρειές του μοντέλου, ενώ συγχρόνως το οριζόντιο επίπεδο της βάσης του δεσμεύεται (κινηματικά) έναντι όλων των βαθμών ελευθερίας που επιβάλλει το υιοθετούμενο τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Οι αναλύσεις διεξάγονται αμελώντας τόσο τα φαινόμενα που οφείλονται σε γεωμετρικές μη- γραμμικότητες στην διεπιφάνεια του φρέατος με το περιβάλλον του έδαφος (αποκόλληση- gapping, ανασήκωμα- uplifting, ολίσθηση- slippage), όσο και τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως (φαινόμενα P – δ). Κατά τον παρελθόν, όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή, δεν έχει γίνει εκτενής προσπάθεια για την μαθηματική περιγραφή της απόκρισης των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (και δη των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων) με την γενικότερη έννοια των καμπυλών αλληλεπίδρασης (και σε πλήρη αντίθεση με τις επιφανειακές ή “ρηχές” θεμελιώσεις, όπου η αντίστοιχη έρευνα είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους πληρέστερη σε πλήθος δεδομένων). Συνεπώς, η διπλωματική αυτή εργασία, σε πρώτη φάση, οφείλει να ξεκινήσει από “αρχικό” (όσον αφορά την φυσική του προβλήματος) στάδιο. Επομένως, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η μόνη πηγή μη- γραμμικής, ανελαστικής συμπεριφοράς του προσομοιώματος οφείλεται αποκλειστικά στην μη- γραμμική, ανελαστική συμπεριφορά του ίδιου του εδάφους θεμελίωσης. Τέλος, προκειμένου να διασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στην κεφαλή του φρέατος, οι κόμβοι των συσχετισμένων πεπερασμένων στοιχείων

υποβάλλονται στην κατάλληλη κινηματική σύζευξη μεταξύ τους, ορίζοντας την ανάλογη δέσμευσή τους.

Η συμπεριφορά του εδάφους θεμελίωσης θεωρείται ελαστική-ιδεωδώς πλαστική, υπακούοντας στο κριτήριο διαρροής Von Mises. Το εδαφικό προφίλ που αξιοποιήθηκε στις αναλύσεις αποτελείται από μια τυπική άργιλο (πυκνότητας  $d = 2 \text{ Mgr/m}^3$ ) υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης, με ομοιόμορφη κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  με το βάθος (**Σχήμα 2.3**,  $S_u = 50 \text{ kPa}$ ). Συνεπώς, η αντίστοιχη ισοδύναμη τάση διαρροής Von Mises ισούται με  $S_y = S_u / \sqrt{3} = 86.6 \text{ kPa}$ . Το μέτρο ελαστικότητας της άργιλου ορίστηκε ίσο με  $E = 50 \text{ MPa}$ , εισάγοντας στο σύστημα της θεμελίωσης έναν “δείκτη δυσκαμψίας” της τάξεως του  $E / S_u = 1000$ . Η βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση θεωρείται κατά τις αριθμητικές αναλύσεις ως ένα απολύτως άκαμπτο στερεό σώμα, συγκριτικά με το αργιλικό έδαφος θεμελίωσης, κάτι που επιτυγχάνεται με την ορθή επιλογή ενός λόγου των μέτρων ελαστικότητας των δύο υλικών (σκυροδέματος και άργιλου, δηλαδή) της τάξεως του 3000 ( $E_{\text{beton}} / E_{\text{clay}} \approx 3000$ ).

### 2.2.2 Κριτήριο διαρροής Von- Mises: θεωρητικά στοιχεία

Κατά την θεωρία εφαρμογής του κριτηρίου διαρροής Von Mises, ένα υλικό διαρρέει όταν η ισοδύναμη τάση Von Mises ( $\sigma_v$ ) εξισωθεί με την κρίσιμή της τιμή, την τάση διαρροής υπό μονοαξονικό εφελκυσμό  $S_y$ . Η ισοδύναμη τάση Von Mises χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διαρροή ενός υλικού υπό οποιαδήποτε εντατική κατάσταση, μέσω της απλής αναγωγής των αποτελεσμάτων απλών δοκιμών μονοαξονικού εφελκυσμού (ή μονοαξονικής φόρτισης, γενικότερα). Η ισοδύναμη τάση Von Mises  $\sigma_v$  ορίζεται ικανοποιώντας το κριτήριο να παρέχει την εξίσωση μεταξύ δύο διαφορετικών εντατικών καταστάσεων, οι οποίες, όμως, έχουν την βασική ιδιότητα να περιγράφονται από ίσες ενέργειες παραμόρφωσης. Εφόσον το κριτήριο διαρροής Von Mises είναι ανεξάρτητο από την πρώτη αναλλοίωτο του τανυστή των τάσεων ( $J_1$ ), έχει ευρεία εφαρμογή σε πλάστιμα υλικά, με την συμπεριφορά του υλικού πριν την κατάσταση διαρροής να υποτίθεται ελαστική. Πιο συγκεκριμένα, η θεωρία του κριτηρίου διαρροής Von Mises μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει άμεση ισχύ και

εφαρμοσιμότητα σε προβλήματα αργίλων, υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης, όπως είναι το πρόβλημα που μελετάται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Μαθηματικά, το κριτήριο διαρροής Von Mises ορίζεται ως εξής:

$$J_2 = k^2 \quad (2.1)$$

όπου:

- $J_2$  είναι η δεύτερη αναλλοίωτος του τανυστή των αποκλινουσών τάσεων (second deviatoric stress invariant) και
- $k$  είναι η τάση διαρροής του υλικού υπό καθαρή διάτμηση.

Το μέγεθος της διατμητικής τάσης διαρροής του υλικού υπό καθαρή διάτμηση  $k$ , είναι  $\sqrt{3}$  φορές μικρότερο από την αντίστοιχη τάση διαρροής του υλικού υπό καθαρό εφελκυσμό, δηλαδή ισχύει:

$$k = \frac{S_y}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

Θέτοντας την ισοδύναμη τάση Von Mises  $\sigma_v$  ενός υλικού ίση με την αντίστοιχη του τάση διαρροής  $S_y$ , το κριτήριο διαρροής Von Mises εκφράζεται ως:

$$\sigma_v = S_y = \sqrt{3 \cdot J_2} \quad (2.3)$$

ή

$$\sigma_v^2 = 3 \cdot J_2 = 3 \cdot k^2 \quad (2.4)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2.4) την δεύτερη αναλλοίωτο του τανυστή των αποκλινουσών τάσεων  $J_2$  με τα επιμέρους στοιχεία της, προκύπτει ότι το τετράγωνο της ισοδύναμης τάσης Von Mises ενός υλικού ισούται αναλυτικά με:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6 \cdot (\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2)]$$

$$(2.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση (2.5) περιγράφει μαθηματικά την κυλινδρική επιφάνεια διαρροής ενός υλικού που ορίζεται από το κριτήριο διαρροής Von Mises, όπως απεικονίζεται γραφικά στο **Σχήμα 2.4**, προσδιορίζοντας ένα κύλινδρο ακτίνας  $(\sqrt{2})k$  (ή  $\sqrt{2/3}S_y$ ) γύρω από τον υδροστατικό άξονα ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων των κυρίων τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ). Επίσης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και το επίπεδο των αποκλινουσών των τάσεων (ή “επίπεδο π”, deviatoric plane), ως ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που ικανοποιούν την συνθήκη  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ , καθώς και η αντίστοιχη γραφική απεικόνιση του -παρόμοιας λογικής- κριτηρίου διαρροής Tresca. Επίσης, στο **Σχήμα 2.5** φαίνεται γραφικά η σύγκριση μεταξύ των κριτηρίων διαρροής Von Mises και Tresca, στο επίπεδο των κυρίων τάσεων  $\sigma_1 - \sigma_2$ . Τέλος, στο **Σχήμα 2.6** απεικονίζεται, για λόγους πληρότητας, η γραφική σύγκριση των κριτηρίων διαρροής Von Mises και Mohr- Coulomb. Συγκεκριμένα, σχεδιάζονται οι επιφάνειες διαρροής που ορίζουν τα δύο αυτά κριτήρια για την περίπτωση των μη- συνεκτικών εδαφών (συνοχής  $c = 0$ ), με το σχήμα του τροποποιημένου κριτηρίου Von Mises (modified Von Mises) να προκύπτει από την κατάλληλη επέκταση της βασικής θεωρίας που αναπτύχθηκε παραπάνω (που συνεπάγεται το χαρακτηριστικό κυλινδρικό σχήμα), καθιστώντας πλέον την διαρροή του υλικού εξαρτώμενη άμεσα από την μεταβολή της εντατικής του κατάστασης (pressure- dependent Von Mises failure criterion).

### **2.2.2.1 Τροποποίηση του κριτηρίου διαρροής Von Mises για διαφορετικές εντατικές καταστάσεις.**

Η εξίσωση (2.5) αποτελεί την γενική διατύπωση του κριτηρίου διαρροής Von Mises. Τροποποιώντας κατάλληλα την εξίσωση αυτή αναλόγως της θεωρούμενης εντατικής κατάστασης, το κριτήριο παίρνει την ανάλογη μορφή. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού (ή γενικότερα της μονοαξονικής έντασης), ισχύει ότι  $\sigma_1 \neq 0$  και  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , με αποτέλεσμα η διαρροή του υλικού να συμβαίνει όταν η κύρια τάση  $\sigma_1$  λάβει την τιμή της χαρακτηριστικής τάσης διαρροής  $S_y$  ( $\sigma_1 = S_y$ ). Έτσι, στην περίπτωση της καθαρής διάτμησης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, ισχύει ότι  $\sigma_{12} = \sigma_{21} \neq 0$ , ενώ όλες οι

υπόλοιπες συνιστώσες του τανυστή των τάσεων,  $\sigma_{ij}$ , παραμένουν μηδενικές. Συνεπώς, το κριτήριο διαρροής γράφεται ως εξής:

$$\sigma_{I2} = k = \frac{S_y}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

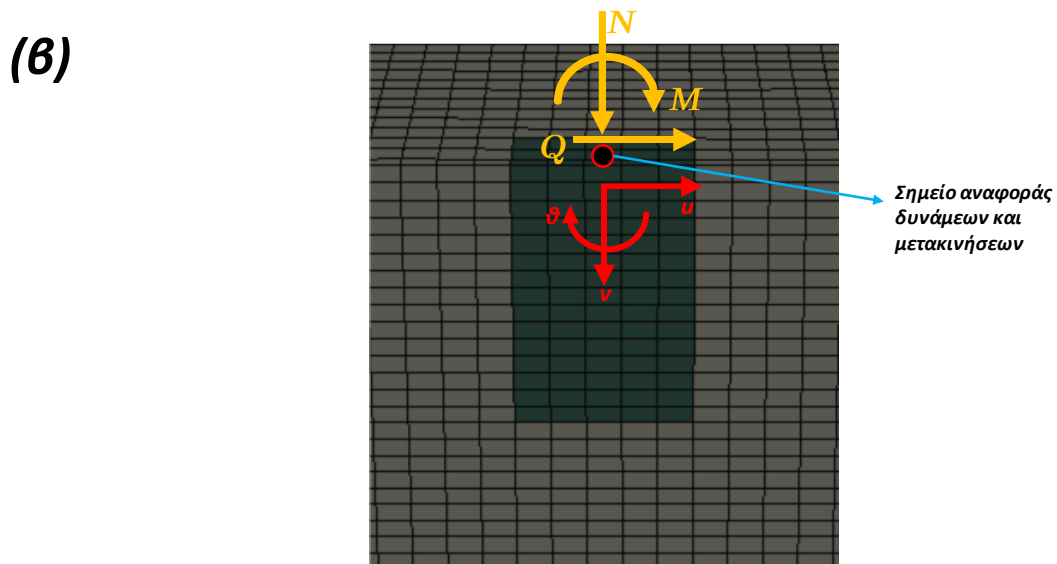
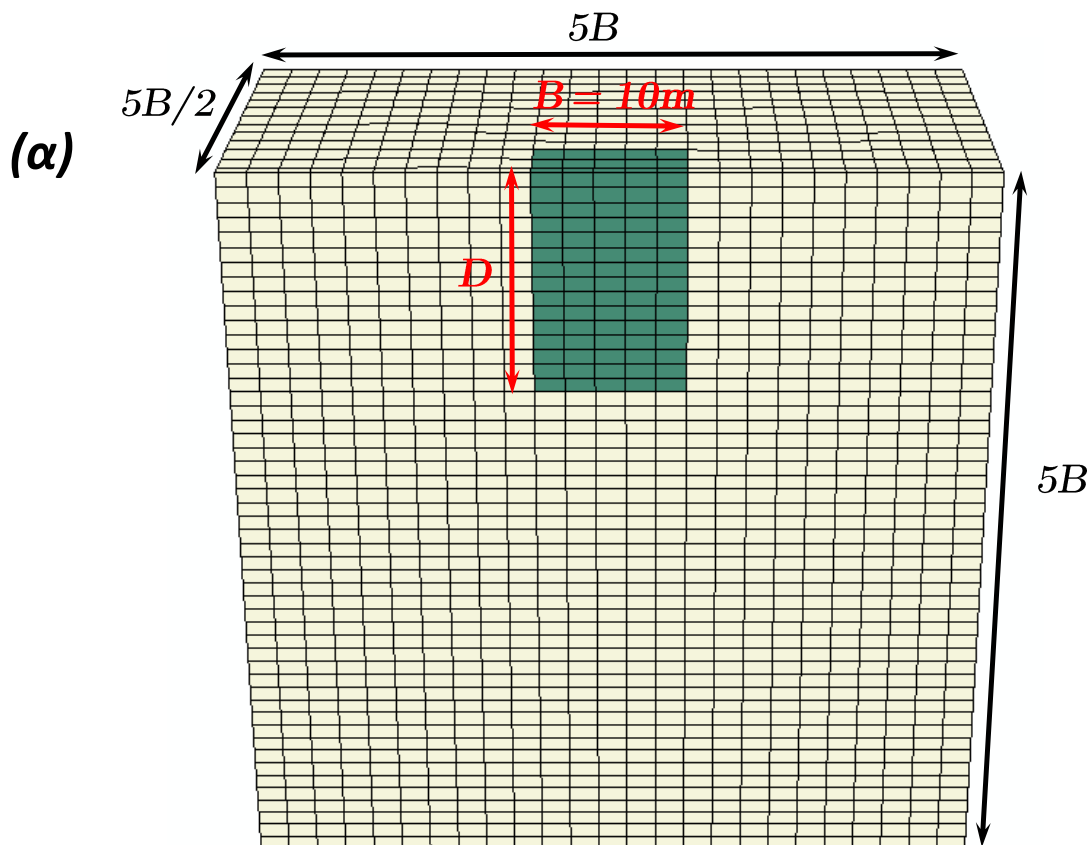
Η εξίσωση (2.6) υποδηλώνει ότι κατά την διαρροή ενός υλικού η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του,  $S_y$ , είναι  $\sqrt{3}$  φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διατμητική αντοχή του. Εν προκειμένω, στην περίπτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, κατά την μοντελοποίηση του συστήματος εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, ορίστηκε ως "μονοαξονική" αντοχή του αργιλικού εδαφικού σχηματισμού η τιμή που είναι  $\sqrt{3}$  φορές μεγαλύτερη από την θεωρούμενη αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$ . Επιπλέον, η εξίσωση διαρροής του κριτηρίου Von Mises στην περίπτωση της καθαρής διάτμησης, μπορεί να εκφραστεί σε όρους κυρίων τάσεων και στην ακόλουθη μορφή:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 6 \cdot \sigma_{I2}^2 \quad (2.7)$$

Συγκεντρωτικά, στον **Πίνακα 2.1 (Σχήμα 2.7)** σημειώνονται όλες οι τροποποιήσεις που επιδέχεται η γραφή του κριτηρίου διαρροής Von Mises, σε σχέση με την καθολική του γραφή (load scenario: general), ανάλογα με τις θεωρούμενες εντατικές συνθήκες και τις επακόλουθες παραδοχές τους (περιορισμοί- restrictions), για τις σημαντικότερες εντατικές καταστάσεις που έχουν θεωρητικό ενδιαφέρον στην πράξη.

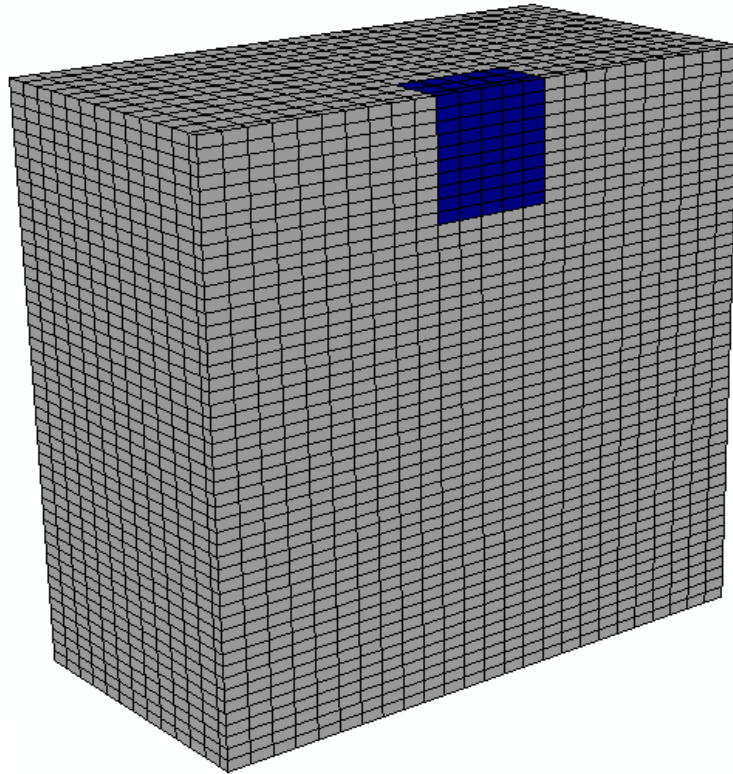
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΗΜΑΤΑ**

---

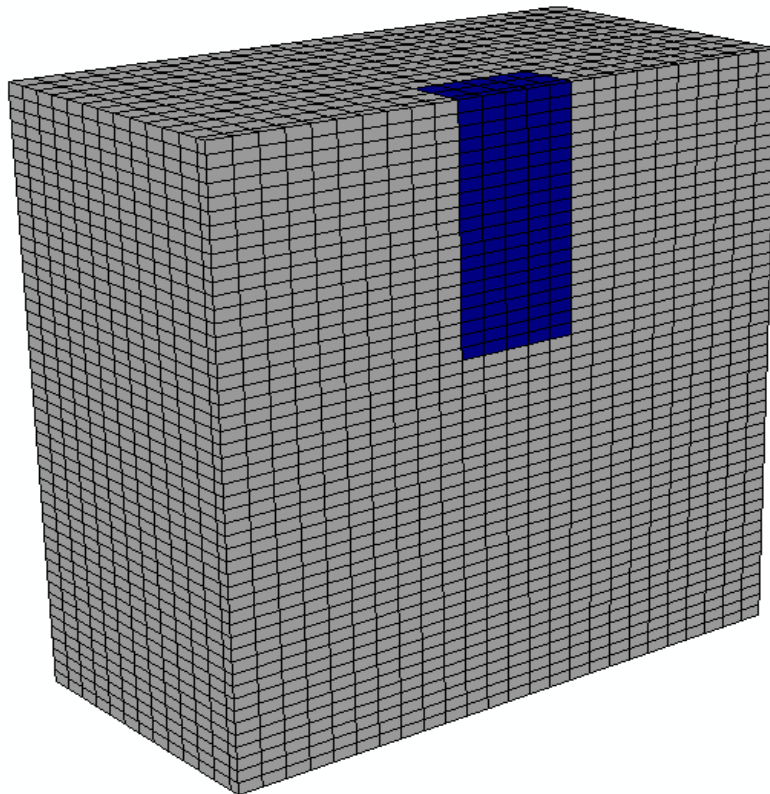


**Σχήμα 2.1.** Η γεωμετρία του τριδιάστατου καννάβου πεπερασμένων στοιχείων (σχήμα α), και οι θεωρούμενες θετικές φορές για την φόρτιση και τις επακόλουθες μετακινήσεις στο σημείο αναφοράς στην κορυφή της βαθιά εγκλιωτισμένης θεμελίωσης (σχήμα β).

**(α)**

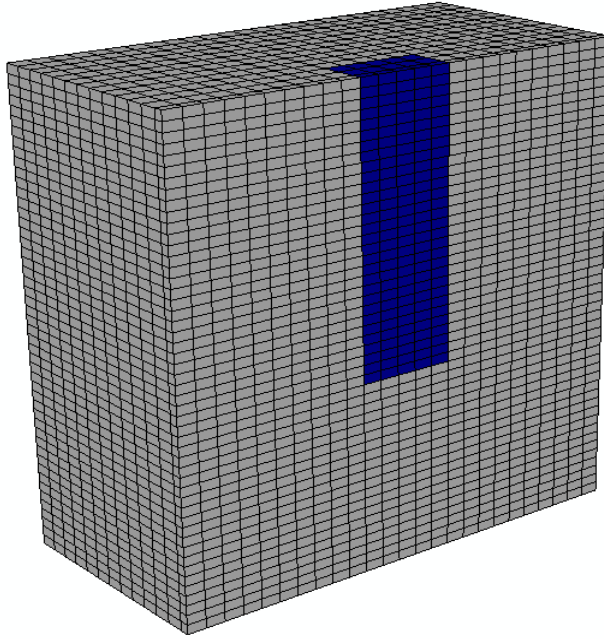


**(β)**

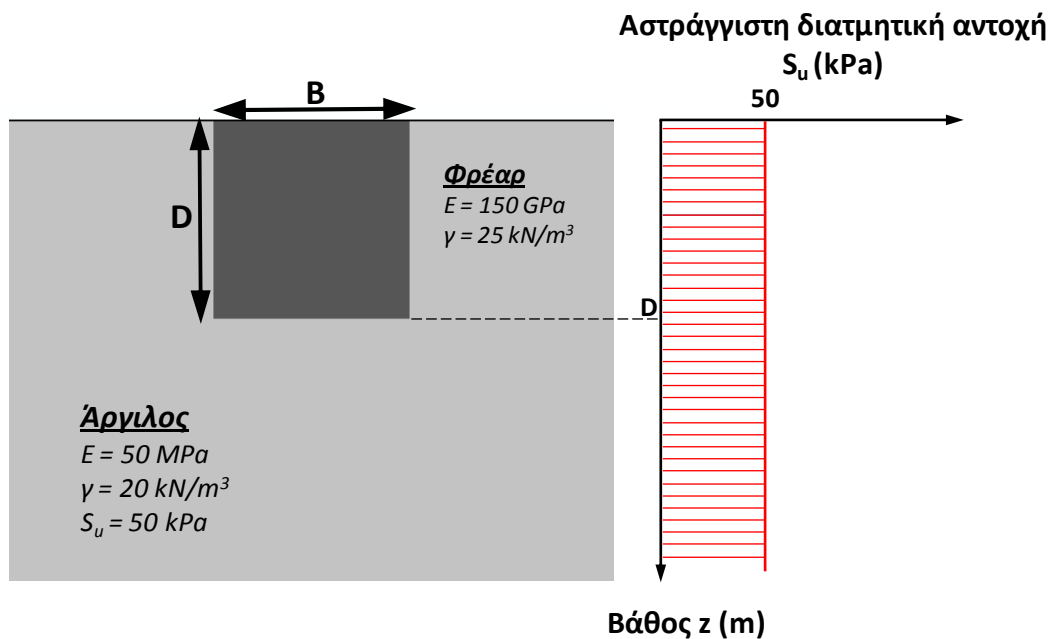




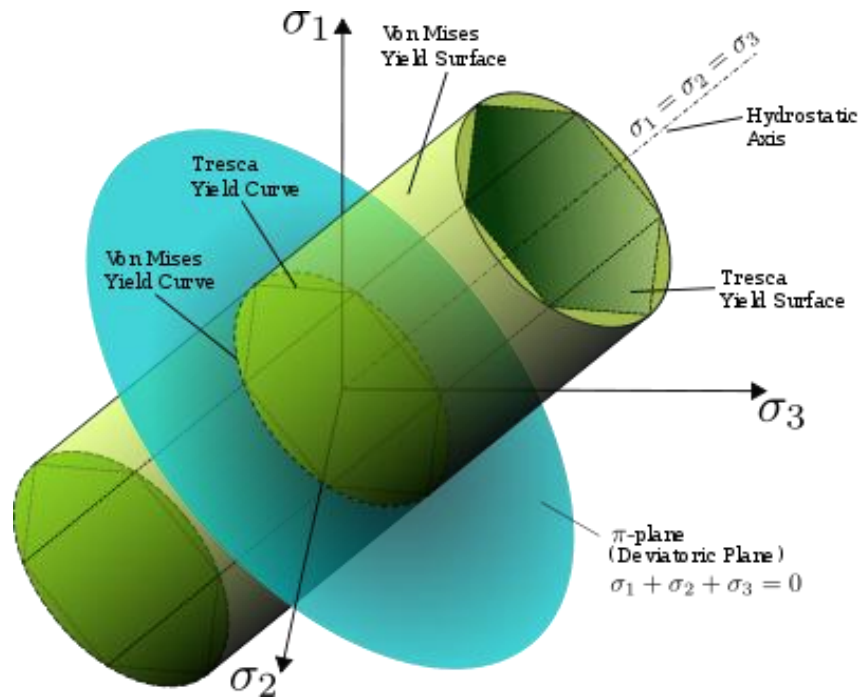
(γ)



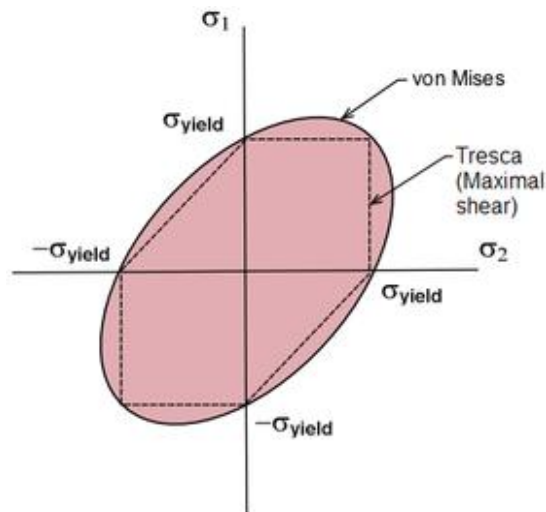
**Σχήμα 2.2.** Προοπτική απεικόνιση των τριών εξεταζόμενων βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων: (α) φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , (β) φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  και (γ) φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ .



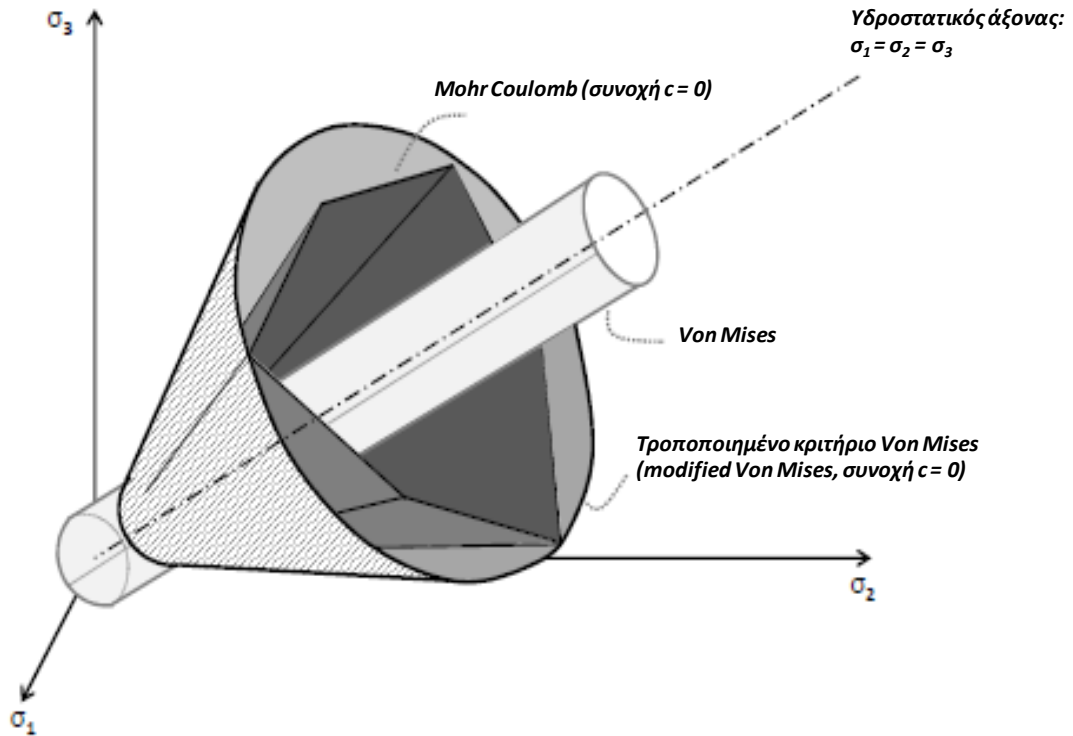
**Σχήμα 2.3.** Ιδιότητες των υλικών του τριδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων. Η κατανομή της εδαφικής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος θεωρείται ομοιόμορφη, με τιμή  $S_u = 50 \text{ kPa}$ . Ο “δείκτης δυσκαμψίας” του αργιλικού υλικού ισούται με  $E_{\text{αργίλου}} / S_u = 1000$ , και ο λόγος δυσκαμψίας των δύο υλικών (οπλισμένο σκυρόδεμα και άργιλος) με  $E_{\text{beton}} / E_{\text{αργίλου}} = 3000$ . Η θεώρηση ενός “θηριώδους” λόγου δυσκαμψίας μεταξύ των δύο υλικών καθιστά το φρέαρ άκαμπτο, σε σχέση με το περιβάλλον του έδαφος.



**Σχήμα 2.4.** Γραφική αναπαράσταση του κριτηρίου διαρροής Von Mises (κύλινδρος ακτίνας  $(\sqrt{2})k$ , γύρω από τον υδροστατικό άξονα:  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ), στο τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων των κυρίων τάσεων  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ . Σχεδιάζονται, επίσης, η αντίστοιχη γραφική αναπαράσταση του (παρόμοιας λογικής) κριτηρίου διαρροής Tresca, καθώς και το “επίπεδο-  $\pi$ ” (deviatoric plane), στο οποίο ισχύει η συνθήκη:  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ .



**Σχήμα 2.5.** Προβολή των “καμπυλών διαρροής” των κριτηρίων Von Mises και Tresca, στο επίπεδο των κυρίων τάσεων  $\sigma_1 - \sigma_2$  (Von Mises yield curve και Tresca yield curve, αντίστοιχα). Οι καμπύλες διαρροής των δύο κριτηρίων ορίζονται από την τομή των επιφανειών διαρροής τους με το “επίπεδο-  $\pi$ ”, όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.6.** Γραφική αναπαράσταση του κριτηρίου διαρροής Von Mises σε παραβολή με το κριτήριο Mohr- Coulomb για μη- συνεκτικά εδάφη (συνοχή  $c = 0$ ), στο τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων των κυρίων τάσεων  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ . Απεικονίζεται, επίσης, και η γραφική αναπαράσταση του τροποποιημένου κριτηρίου διαρροής Von Mises (modified Von Mises), που έχει καλύτερη εφαρμογή στην περίπτωση των μη- συνεκτικών εδαφών, σε σχέση με το ομώνυμο κριτήριο.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1**

Load scenario	Restrictions	Simplified von Mises equation
General	No restrictions	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]}$
Principal stresses	$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$
Plane stress	$\sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\sigma_{12}^2}$
Pure shear	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{3}\sigma_{12}$
Uniaxial	$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sigma_1$

**Σχήμα 2.7.** Οι τροποποιήσεις της καθολικής γραφής του κριτηρίου διαρροής Von Mises, για τις σημαντικότερες (θεωρητικά) εντατικές καταστάσεις.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΒΑΘΙΑ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

---

#### **3.1 Ορισμός του προβλήματος**

Πρωταρχικός στόχος της διαδικασίας των τριδιάστατων αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS είναι η παραγωγή των καμπυλών αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων. Αντίστοιχη μεθοδολογία έχει αναπτυχθεί σε βάθος και σε σπουδαίο όγκο εργασίας για την περίπτωση των επιφανειακών (ή ακόμα και των ελαφρώς εγκιβωτισμένων- “ρηχών”) θεμελιώσεων.

Με τον όρο “καμπύλη αλληλεπίδρασης” ορίζουμε την καμπύλη (σε οποιοδήποτε από τα τρία κύρια επίπεδα φόρτισης, όπως αναφέρθηκαν στην εισαγωγή) η οποία καθορίζει την σχέση που έχουν εντατικά μεγέθη στην κορυφή του φρέατος ή, εν γένει, στο επιλεγμένο σημείο αναφοράς (περισσότερες λεπτομέρειες για την επιλογή του σημείου αναφοράς αναφέρονται σε επόμενη ενότητα) κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Τα τρία κύρια επίπεδα φόρτισης αποτελούνται από: (i) το κύριο επίπεδο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης N- οριζόντιας δύναμης Q, (ii) το κύριο επίπεδο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης N- ροπής M και (iii) το κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης Q- ροπής M. Ουσιαστικά, η καμπύλη αλληλεπίδρασης ενός συστήματος θεμελίωσης ορίζει συγχρόνως και την περιβάλλουσα αστοχίας του, σε όρους γενικευμένης και συνδυασμένης φόρτισής του. Προτιμάται, πάντως, η χρήση του όρου “καμπύλη αλληλεπίδρασης” δύο εντατικών μεγεθών από τον γενικότερο όρο “περιβάλλουσα αστοχίας” του συστήματος της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, διότι η πρώτη ονομασία περιλαμβάνει ισχυρά την αλληλένδετη σχέση που έχουν μεταξύ τους τα τρία εντατικά μεγέθη (δηλαδή η

κατακόρυφη δύναμη  $N$ , η οριζόντια δύναμη  $Q$  και η ροπή  $M$ ) και η οποία, τελικά, είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για την αστοχία του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης. Εξάλλου, η φόρτιση που επιβάλλεται στο φρέαρ είναι “ομοεπίπεδη” (παρά την τριδιάστατη φύση του προσομοιώματος), επιτρέποντας πρακτικώς μετακινήσεις μόνο στους τρεις αντίστοιχους ενεργούς βαθμούς ελευθερίας, στο σημείο αναφοράς στην κορυφή του φρέατος: δύο μετατοπίσεις  $u$  και  $v$  (οριζόντια μετατόπιση και κατακόρυφη μετατόπιση, αντίστοιχα) και μία στροφή  $\theta$  (**Σχήμα 3.1**). Συνεπώς, από την στιγμή που οι ενεργοί βαθμοί ελευθερίας των δυνάμεων και των μετακινήσεων του εξεταζόμενου προβλήματος, απομειώνονται αριθμητικά σε μόνον τρεις (από την γενική περίπτωση των έξι, συνολικών, βαθμών ελευθερίας), μπορούμε να ορίσουμε γραφικά και τις “επιφάνειες αλληλεπίδρασης” των τριών προαναφερθέντων εντατικών μεγεθών για μία εγκιβωτισμένη θεμελίωση, σχεδιάζοντας στον γενικευμένο χώρο φόρτισης  $M - Q - N$ , όλα τα επιμέρους σημεία αστοχίας των παραπάνω καμπυλών αλληλεπίδρασης (π.χ. **Σχήμα 3.2(α)**: ενδεικτική επιφάνεια αλληλεπίδρασης για επιφανειακή θεμελίωση σε άμμο, “Rugby ball” shaped yield surface, [Nova and Montrasio 1991; Gottardi and Butterfield 1995; Chatzigogos, Figini, Pecker, Salençon 2011] και **Σχήμα 3.2(β)**: ενδεικτική επιφάνεια αλληλεπίδρασης για επιφανειακή θεμελίωση σε άργιλο, “bounding surface for cohesive soil”, [Cremer, Pecker, Davenne 2001]).

Στην βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί διάφορες διαδικασίες με απώτερο σκοπό την παραγωγή των καμπυλών αλληλεπίδρασης εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, ως κατάλληλη επέκταση των αντίστοιχων μεθόδων που είχαν ήδη αναπτυχθεί για τις επιφανειακές θεμελιώσεις. Η βασική θεώρηση αυτών των μεθόδων επιτρέπει την κατάταξή τους σε δύο βασικές κατηγορίες: (α) την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων και (β) την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων. Σε γενικές γραμμές, όπως είναι προφανές, η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων έγκειται στον τρόπο με τον οποίο καταπονείται η βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση- φρέαρ, με κοινό στόχο, εν τέλει, την αστοχία του συστήματος εδάφους- θεμελίου και, φυσικά, την καταγραφή των εντατικών μεγεθών κατά την στιγμή της αστοχίας. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται λεπτομερώς οι δύο παραπάνω μέθοδοι. Αρχικά, όμως, στην ενότητα που έπεται αναλύεται με λεπτομερέστερο τρόπο η εξάρτηση του σχήματος μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, σε συνάρτηση με

το επιλεχθέν σημείο αναφοράς για την μέτρηση των δυνάμεων και των μετακινήσεων, στα πλαίσια του θεωρητικού υποβάθρου της μελέτης της συμπεριφοράς των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, όπως τονίσθηκε ιδιαίτερα σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

### **3.2 Επιλογή σημείου αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων**

Στην εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας έγινε λόγος σχετικά με την επιλογή του σημείου αναφοράς για την μέτρηση των δυνάμεων και των μετακινήσεων. Η επιλογή του κατάλληλου σημείου είναι σπουδαίας σημασίας, μιας και επηρεάζει άμεσα το σχήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης. Στο **Σχήμα 3.3** απεικονίζονται διάφορες καμπύλες αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελιώσεων, τυχαίας επιλογής από την βιβλιογραφία. Σημειώνεται πλήρης συμμετρία στο σχήμα των καμπυλών, σε κάθε κύριο επίπεδο φόρτισης, ενώ δεν παρατηρείται κάποιος έντονος κλάδος υπεραντοχής του συστήματος. Στην περίπτωση, λοιπόν, των επιφανειακών θεμελιώσεων, η επιλογή του σημείου αναφοράς έχει αμελητέο αντίκτυπο στο σχήμα των αντίστοιχων καμπυλών αλληλεπίδρασης. Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις, έχει επικρατήσει να επιλέγεται ως σημείο αναφοράς το κέντρο της βάσης της θεμελίωσης (**Σχήμα 3.4**).

Αντιθέτως, στις εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις (και δη στις βαθιά εγκιβωτισμένες που εξετάζονται στην παρούσα εργασία) η επιλογή του σημείου αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων παίζει ουσιαστικότερο ρόλο. Στο **Σχήμα 3.5** απεικονίζεται μια τυχαία καμπύλη αλληλεπίδρασης (σε όρους οριζόντιας δύναμης- ροπής) εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , και με επιλεγμένο ως σημείο αναφοράς το κέντρο της βάσης της. Παρατηρείται έντονα ο κλάδος της υπεραντοχής στο  $1^\circ$  τεταρτημόριο του επιπέδου, δηλαδή σε ομόσημα μεγέθη (θετικά) οριζόντιας δύναμης και ροπής. Απ' την άλλη πλευρά, στο **Σχήμα 3.6** απεικονίζεται η ισοδύναμη καμπύλη αλληλεπίδρασης της ίδιας εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, για τον ίδιο λόγο εγκιβωτισμού (επίσης σε όρους οριζόντιας δύναμης- ροπής, και κανονικοποιημένη με τον ίδιο τρόπο), με την ουσιαστική διαφορά ότι το επιλεγμένο σημείο αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων είναι, σε αυτήν την περίπτωση, το κέντρο της κορυφής του φρέατος. Ως αποτέλεσμα της απλής μετάθεσης του σημείου αναφοράς, ο κλάδος της υπεραντοχής

μετατοπίζεται πλέον στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του επιπέδου, για θετική οριζόντια δύναμη και για αρνητική ροπή. Γίνεται άμεσα αντιληπτή η βασική διαφορά στο σχήμα της καμπύλης, που οφείλεται αποκλειστικά και μόνον στην επιλογή διαφορετικού σημείου αναφοράς, εφόσον τονίζεται ότι ως θετικές έχουν ληφθεί ακριβώς οι ίδιες φορές, τόσο για τις δυνάμεις όσο και για τις μετακινήσεις. Επομένως, η μόνη αιτία διαφοροποίησης του σχήματος της καμπύλης αλληλεπίδρασης είναι η αναγωγή των εντατικών μεγεθών και των μετακινήσεων σε διαφορετικά σημεία: είτε στο κέντρο της βάσης της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, είτε στο κέντρο της κορυφής της, εν προκειμένω.

Η διαφορά αυτή στο σχήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, συναρτήσει του επιλεγμένου σημείου αναφοράς, οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο με τον οποίον η ίδια φόρτιση δύναται να οδηγήσει σε διαφορετική παραμόρφωση το σύστημα εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, όταν εφαρμοστεί σε διαφορετικό σημείο. Στην πρώτη περίπτωση (σημείο αναφοράς στο κέντρο της βάσης του φρέατος), ο συνδυασμός θετικής οριζόντιας δύναμης- θετικής ροπής οδηγεί το σύστημα σε υπεραντοχή, διότι τα δύο ομόσημα μεγέθη είναι “ανταγωνιστικά” μεταξύ τους: το ένα αναλώνεται σε μεγάλο βαθμό στην ισορρόπηση της δράσης του άλλου, με αποτέλεσμα το μελετώμενο σύστημα να εμφανίζει αυξημένη φέρουσα ικανότητα (πέραν των “καθαρών” αντοχών του) υπό τέτοιου είδους συνδυασμό φόρτισης. Αντιθέτως, στην δεύτερη περίπτωση (σημείο αναφοράς στο κέντρο της κορυφής του φρέατος), παρόμοιο “ανταγωνιστικό” αποτέλεσμα εμφανίζει ο συνδυασμός θετικής οριζόντιας δύναμης- αρνητικής ροπής. Στο **Σχήμα 3.7**, απεικονίζεται ποιοτικά ο τρόπος παραμόρφωσης του συστήματος εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, εφαρμόζοντας “ανταγωνιστική” φόρτιση είτε στην βάση είτε στην κορυφή του φρέατος, και σημειώνεται ότι το αποτέλεσμα, τελικώς, είναι παρόμοιο και για τους δύο διαφορετικούς συνδυασμούς φόρτισης. Συνεπώς, είναι ιδιαίτερα καθοριστική, ως προς το τελικό σχήμα της παραγόμενης καμπύλης αλληλεπίδρασης, η επιλογή του σημείου αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων, και πρέπει σε κάθε περίπτωση να αναφέρεται εξ' αρχής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση της διπλωματικής εργασίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως και αναπτύχθηκε στην συγκεκριμένη ενότητα, ως σημείο

αναφοράς και μέτρησης δυνάμεων και μετακινήσεων έχει επιλεγεί το κέντρο της κορυφής του φρέατος.

Εξάλλου, το συγκεκριμένο θέμα έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τους ερευνητές διαχρονικά, ενώ υπάρχουν διαφορές ως προς το σημείο αναφοράς που θεωρεί ο καθένας: ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις έχουν οριστεί ως σημεία αναφοράς, κατά το παρελθόν, τόσο το κέντρο της μάζας της θεμελίωσης [Martin 1994], όσο η βάση της [Cassidy et al. 2004] και η κορυφή της [Byrne and Cassidy 2002].

### **3.3 Η μέθοδος των επιβαλλόμενων δυνάμεων**

#### **3.3.1 Εισαγωγή**

Κατά την μέθοδο αυτή, διεξάγονται στατικές pushover αναλύσεις, στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης Q- ροπής M. Έχοντας καθορίσει το κριτήριο αστοχίας του συστήματος (με μοναδική πηγή μη- γραμμικής ανελαστικής συμπεριφοράς αυτήν του αργιλικού εδάφους), πλέον πρέπει να καθοριστεί ο τρόπος φόρτισης της θεμελίωσης που, καθώς αυξάνεται, θα την οδηγήσει στην αστοχία. Κατά την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων, η οποία ακολουθήθηκε στην διπλωματική εργασία, επιχειρείται μία ρεαλιστική προσέγγιση της φόρτισης της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, παρόμοια με αυτήν που εμφανίζεται στην πράξη. Επιπλέον, αν θεωρηθεί ότι η κατασκευή που θεμελιώνεται στο φρέαρ μπορεί να προσομοιαστεί με μονοβάθμιο ταλαντωτή (π.χ. βάρθρο γέφυρας σε δυναμικά προβλήματα), ή γενικώς με πρόβολο (π.χ. βάρθρο γέφυρας σε “πρόχειρες” ψευδο- στατικές αναλύσεις σεισμικών προβλημάτων, ή έργο ανοιχτής θαλάσσης υποβαλλόμενο σε ανακυκλική φόρτιση), τότε είναι απολύτως λογικό να εφαρμοστούν ακτινικές διαδρομές φόρτισης στο μελετώμενο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης Q- ροπής M, υπό σταθερό κατακόρυφο φορτίο N [Cremer, Pecker, Davenne 2001; Gouvernec 2004; Gajan, Kutter, Phalen, Hutchinson, Martin 2005]. Στο **Σχήμα 3.8** απεικονίζεται σκαριφηματικά η υιοθετούμενη έννοια των ακτινικών διαδρομών φόρτισης, στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης Q- ροπής M, όπως αυτή διατυπώθηκε από τους Cremer, Pecker και Davenne



[2001], για κατασκευές χαρακτηριζόμενες από μία μόνον (κύρια) ιδιομορφή κατά την ανάλυση των σεισμικών προβλημάτων. Θεωρώντας ότι στο κέντρο μάζας (ή, προσεγγιστικά, στο κέντρο βάρους) της ανωδομής ασκείται αδρανειακή δύναμη  $F = ma$ , σε απόσταση  $h_i$  πάνω από την στάθμη της θεμελίωσης, μεταβιβάζεται σε αυτήν ροπή ίση με  $M = Fh_i = mah_i$ , και οριζόντια δύναμη ίση με την αδρανειακή δύναμη, δηλαδή  $Q = F = ma$ . Συγχρόνως, η κατακόρυφη φόρτιση επί της θεμελίωσης διατηρείται σταθερή και ίση, φυσικά, με το ίδιο βάρους της ανωδομής  $N = W = mg$ . Τέλος, οι διαφορετικές ενδείξεις υψών του **Σχήματος 3.8** (π.χ.  $h_1$  έως  $h_3$ ) υποδηλώνουν στοιχεία ανωδομής διαφορετικών υψών, φανερώνοντας μία ακόμα πτυχή της φυσικής σημασίας των καμπυλών αλληλεπίδρασης, καθώς είναι δυνατή η απεικόνιση στο ίδιο διάγραμμα μίας ποικιλίας περιπτώσεων και παραλλαγών του ίδιου μελετώμενου προβλήματος.

### 3.3.2 Διαδικασία σχεδιασμού των αριθμητικών αναλύσεων

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, αρχικώς επιλέγεται ως σημείο αναφοράς των δυνάμεων και των μετακινήσεων το κέντρο της κορυφής του φρέατος (**Σχήμα 3.9**). Σε πρώτη φάση, θεωρείται ότι εφαρμόζεται το κατακόρυφο φορτίο της ανωδομής στο συγκεκριμένο σημείο και διατηρείται σταθερό κατά την διάρκεια των επόμενων σταδίων φόρτισης. Να σημειωθεί ότι λαμβάνεται υπόψιν και το βάρος της θεμελίωσης, παρόλο που δεν έχει άμεση φυσική σημασία απ' την στιγμή που επιλέχθηκε ως θέση αναφοράς η κορυφή: απ' την μια πλευρά είναι ασήμαντο εν συγκρίσει με το φορτίο της ανωδομής, αλλά απ' την άλλη δεν παύει να αναφερόμαστε σε συμπεριφορά συστήματος με συνέπεια να οφείλει να συμπεριληφθεί. Για την ακρίβεια, θεωρείται ως "βάρος" της θεμελίωσης το πρόσθετο φορτίο που εφαρμόζεται στο έδαφος, δηλαδή η διαφορά του βάρους του φρέατος με το βάρος του προϋπάρχοντος εδαφικού όγκου στην θέση αυτή. Ακόμα, πάντως, και να αγνοηθεί εντελώς δεν υπάρχει, πρακτικώς, καμία ουσιαστική διαφοροποίηση στα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Το δεύτερο στάδιο της φόρτισης αποτελείται από την επιβολή ακτινικών διαδρομών φόρτισης οριζόντιας δύναμης και ροπής ( $Q$  και  $M$ , αντίστοιχα) στην κορυφή του φρέατος, αυξανομένων μέχρι την αστοχία του συστήματος. Ως κατάσταση αστοχίας θεωρείται το κομμάτι εκείνο του στατικών pushover αναλύσεων κατά το οποίο η μεταβολή των εντατικών μεγεθών διατηρείται μηδενική: το σύστημα εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης δεν δύναται να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο. Υποτίθεται ότι εφαρμόζεται οριζόντιο φορτίο  $F$  υπό σταθερό μοχλοβραχίονα  $H$  πάνω από την θεμελίωση (**Σχήμα 3.9**). Στην κορυφή του φρέατος μεταβιβάζεται οριζόντια δύναμη  $Q = F$  και ροπή  $M = QH$ . Για δεδομένη ακτινική φόρτιση (δηλαδή για σταθερό μοχλοβραχίονα  $H$ , π.χ. ύψος βάρους γέφυρας) εφαρμόζεται αναλογική και γραμμική αύξηση των εντατικών μεγεθών  $Q$  και  $M$  έως την αστοχία του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, έχοντας ως δεδομένο τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$  (για δεδομένη γεωμετρία φρέαρ, δηλαδή), αρχικώς υπολογίζεται η φέρουσα ικανότητα του συστήματος εδάφους- φρέατος σε κατακόρυφη φόρτιση ( $N_u$ ). Έπειτα, ορίζονται επτά υπό εξέταση διαφορετικοί συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , οι  $FS_v = 1.25; 1.66; 2; 2.5; 5; 10$  και  $\infty$  (με μηδενικό επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο). Ας σημειωθεί ότι για λόγους ευκολότερης αριθμητικής επεξεργασίας και παρουσίας των αποτελεσμάτων - αντί του συντελεστή ασφαλείας  $FS_v$ - χρησιμοποιείται περιστασιακά και ο συντελεστής  $x$ , ο οποίος ορίζεται ως ο αντίστροφος του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, δηλαδή  $x = 1/FS_v = N/N_u$ , με τιμές  $x = 0.8; 0.6; 0.5; 0.4; 0.2; 0.1$  και  $0$  αντίστοιχα. Εν συνεχεία, διατηρώντας σταθερή την κατακόρυφη συνιστώσα φόρτισης του συστήματος, σε πρώτη φάση υπολογίζονται οι "καθαρές" αντοχές του σε οριζόντια δύναμη και ροπή ( $Q_u$  και  $M_u$ , αντίστοιχα) για τον δεδομένο συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Ως "καθαρή" αντοχή σε οριζόντια δύναμη (ή ροπή) ορίζεται η μέγιστη οριζόντια δύναμη (ή ροπή) που μπορεί να παραληφθεί από το σύστημα της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (εφαρμοσμένη στο σημείο αναφοράς, εδώ στην κορυφή του φρέατος) υπό μηδενική ροπή (ή οριζόντια δύναμη, αντίστοιχα). Έπειτα, για κάθε έναν συντελεστή ασφαλείας ξεχωριστά, πραγματοποιείται ικανοποιητικός αριθμός στατικών pushover αναλύσεων, στα πλαίσια της εφαρμογής στην κορυφή της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης ακτινικών διαδρομών φόρτισης οριζόντιας δύναμης και ροπής, προσδιορίζονται τα εντατικά μεγέθη κατά την στιγμή

της αστοχίας και, για την στοχευμένη παρουσίασή τους μέσω των καμπυλών αλληλεπίδρασης, κανονικοποιούνται με τις “καθαρές” αντοχές τους ( $Q/Q_u$  και  $M/M_u$ ), σύμφωνα με τις προτεινόμενες συστάσεις ερευνητών σχετικά με την μελέτη της συμπεριφοράς των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων [Bransby and Randolph 1999a; Gourvenec and Randolph 2003]. Έτσι, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων προκύπτουν οι ζητούμενες καμπύλες αλληλεπίδρασης του συστήματος εδάφους- φρέατος στο γενικευμένο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης και ροπής ( $Q - M$ ).

### 3.3.3 Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων

Στα **Σχήματα 3.10** έως **3.15** εμφανίζονται οι παραπάνω καμπύλες αλληλεπίδρασης που παράχθηκαν με χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων, κάθε μία για σταθερό συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $F_{Sv}$ , και, φυσικά, για φρέαρ δεδομένου λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ . Παρατηρείται ότι οι άξονες των διαγραμμάτων εκφράζουν τα εντατικά μεγέθη κανονικοποιημένα με τις “καθαρές” αντοχές τους ( $Q/Q_u$  και  $M/M_u$ ), και όχι σε διαστατοποιημένη μορφή ή, έστω, σε κάποια άλλη αδιαστατοποιημένη μορφή. Οι Bransby και Randolph [1999] που μελέτησαν το σχήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης για ελαφρώς εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, παρατήρησαν το γεγονός ότι το σχήμα των καμπυλών διατηρείται σταθερό όταν τα μεγέθη κανονικοποιηθούν με τις “καθαρές” αντοχές τους. Η έρευνα τους, ωστόσο, περιορίστηκε σε έναν μόνο (και σχετικά μικρό) λόγο εγκιβωτισμού,  $D/B = 0.167$ , με αποτέλεσμα το συμπέρασμά τους να χρήζει επιβεβαίωσης. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν οι καμπύλες αλληλεπίδρασης στην συγκεκριμένη κανονικοποιημένη τους μορφή, για κάθε λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$  και για κάθε συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $F_{Sv}$ , με σκοπό την διερεύνηση της καθολικής ισχύος της παρατήρησής τους. Επιπλέον, με αυτό τον τρόπο παρουσίασης των καμπυλών αλληλεπίδρασης και υποθέτοντας την ισχύ της παρατήρησης των Bransby και Randolph (η οποία επιβεβαιώνεται, όπως θα αναφερθεί παρακάτω), ουσιαστικά απαιτείται η γνώση μόνο των “καθαρών” αντοχών του συστήματος για τον προσδιορισμό της απόκρισής του, σε συνδυασμό, φυσικά, με τον προσδιορισμό της

φέρουσας ικανότητάς του σε κατακόρυφη φόρτιση. Το πλεονέκτημα αυτό των κανονικοποιημένων καμπυλών αλληλεπίδρασης είναι σημαντικά ισχυρό και βοηθάει σημαντικά στην προσπάθεια της μαθηματικής περιγραφής της συμπεριφοράς των φρεάτων, ιδιαίτερα όταν η προσπάθεια αυτή στοχεύει στην μετ' έπειτα περιγραφή της απόκρισης του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με χρήση ενός κατάλληλου ενιαίου μαθηματικού εργαλείου, στα πλαίσια της μοντελοποίησης μέσω “μακρο- στοιχείου” (“macro- element modeling”), όπως αυτό διατυπώνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε ένα από τα επόμενα κεφάλαια της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Στα **Σχήματα 3.10** και **3.11** απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης για  $D/B = 1$  και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας  $FS_v$ , στα **Σχήματα 3.12** και **3.13** οι αντίστοιχες καμπύλες για  $D/B = 2$  και στα **Σχήματα 3.14** και **3.15** οι αντίστοιχες καμπύλες για  $D/B = 3$ . Σε γενικές γραμμές, το σχήμα των παραπάνω καμπυλών αλληλεπίδρασης προσεγγίζεται ικανοποιητικά από ένα περιστραμμένο έκκεντρο ελλειψοειδές (“oblique parabola in  $M - Q$  space”), η εκκεντρότητα του οποίου αυξάνεται μονότονα συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$  [Yun and Bransby 2007a].

### **3.3.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων**

#### **3.3.4.1 Το πλεονέκτημα της κανονικοποίησης με τις “καθαρές” αντοχές της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης**

Όπως παρατήρησαν οι Bransby και Randolph, το σχήμα των κανονικοποιημένων καμπυλών αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων διατηρείται σταθερό, ανεξάρτητα από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  και τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ . Στα **Σχήματα 3.11**, **3.13** και **3.15** απεικονίζονται όλες οι καμπύλες αλληλεπίδρασης συγχρόνως για  $D/B = 1$ , 2, και 3, αντίστοιχα. Είναι παραπάνω από φανερό ότι όταν οι καμπύλες αλληλεπίδρασης κανονικοποιηθούν με τις “καθαρές” αντοχές τους συμπίπτουν μεταξύ τους, με μία μικρή απόκλιση για τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , που πρακτικώς μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Αυτό συμβαίνει διότι δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν κατά την δημιουργία του προσομοιώματος τα

φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε πληροφορία αντοχής του εδάφους (στην οποία, εν τέλει, οφείλεται οποιοδήποτε αποτέλεσμα αντοχής του εξεταζόμενου συστήματος) να υπεισέρχεται με παρόμοιο και ανάλογο τρόπο στις κανονικοποιημένες καμπύλες. Επιπλέον, στο **Σχήμα 3.16** απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης για δεδομένο συντελεστή ασφαλείας ( $FS_v=2.5$ ) και για τους τρεις διαφορετικούς λόγους εγκιβωτισμού  $D/B$ , που εξετάζονται. Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο λόγος εγκιβωτισμού η καμπύλη αλληλεπίδρασης υφίσταται μία διεύρυνση (ή αυξανόμενη εκκεντρότητα- “increasingly eccentric”, κατά τους σχετικούς ερευνητές [Yun and Bransby 2007]) στον κλάδο της υπεραντοχής (δηλαδή για θετική οριζόντια δύναμη και αρνητική ροπή). Είναι, πάντως, ιδιαίτερα σημαντικό να τονισθεί ότι αυτή η διεύρυνση δείχνει να είναι εντονότερη για μετάβαση από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  σε  $D/B = 2$ , και αρκετά ασθενέστερη για μετάβαση από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  σε  $D/B = 3$ . Ουσιαστικά, θα μπορούσε κανείς να ισχυρισθεί ότι η συμπεριφορά των φρεάτων για  $D/B \geq 2$ , εκφρασμένη σε κανονικοποιημένη μορφή ( $Q/Q_u - M/M_u$ ) μέσω των καμπυλών αλληλεπίδρασης, δείχνει να σταθεροποιείται για τις θεωρούμενες αστράγγιστες εδαφικές συνθήκες φόρτισης και μη λαμβάνοντας υπ’ όψιν τις γεωμετρικές μη- γραμμικότητες στην διεπιφάνεια του εδάφους με την θεμελίωση. Το εύρημα αυτό είναι σπουδαίας σημασίας στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η οποία έχει ως σκοπό και την μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων και για τον λόγο αυτό θα γίνει ειδικά ξεχωριστή αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο. Επιγραμματικά, είναι δυνατόν να ισχυριστούμε ότι (υπό τις συγκεκριμένες παραδοχές) οι βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις αποκτούν κοινά στοιχεία απόκρισης για λόγο εγκιβωτισμού μεγαλύτερο του 2 (περίπου), εγκαθιστώντας με αυτόν τον τρόπο ένα επιπλέον ποσοτικό χαρακτηριστικό σχετικά με το τι θα πρέπει να εκλαμβάνεται, στην πράξη, ως βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση (σε άμεση παραβολή με το αντίστοιχο ποιοτικό όριο του  $D/B \geq 1$ ).

Τέλος, στα **Σχήματα 3.17, 3.18** και **3.19** απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης που παράχθηκαν με την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων στην αδιαστατοποιημένη τους μορφή. Σε αντίθεση με την κανονικοποιημένη τους μορφή, ως κριτήριο αδιαστατοποίησης ορίζονται τα καθαρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της

θεμελίωσης (πλάτος  $B$  και βάθος εγκιβωτισμού  $D$ ) και η αστράγγιστη εδαφική διατμητική αντοχή  $S_u$ . Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας της ροπής αδιαστατοποιείται με την ποσότητα  $ADS_u$  (όπου  $A$  είναι το εμβαδόν της τετραγωνικής διατομής του φρέατος:  $A = B^2$ ) και ο άξονας της οριζόντιας δύναμης με την ποσότητα  $BDS_u$ . Για κάθε λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ , χωριστά, παρατηρείται η εξάρτηση του σχήματος των καμπυλών αλληλεπίδρασης από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , εφόσον, καθώς αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας (μείωση της κατακόρυφης φόρτισης), οι καμπύλες αλληλεπίδρασης διογκώνονται. Επιπλέον, συγκρίνοντας μεταξύ τους τις καμπύλες που αναφέρονται σε κοινό συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , παρατηρείται η έντονη στροφή τους καθώς αυξάνεται ο λόγος εγκιβωτισμού  $D/B$ . Η στροφή αυτή φαίνεται γραφικά στο **Σχήμα 3.20**, για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας και λόγους εγκιβωτισμού. Συμπερασματικά, με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις για το σχήμα των αδιαστατοποιημένων καμπυλών αλληλεπίδρασης, φαίνεται να καταργούνται τα σημαντικά πλεονεκτήματα που αυτές έχουν στην κανονικοποιημένη τους μορφή. Απ' την μια πλευρά, έγινε η εισαγωγή της εξάρτησης των καμπυλών από την κατακόρυφη φόρτιση του φρέατος (εκφρασμένη μέσω του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ ), ενώ, απ' την άλλη, οι αδιαστατοποιημένες καμπύλες διέπονται από έντονη στροφή, με ασθενέστερο τον χαρακτήρα της διεύρυνσης που παρατηρήθηκε στις κανονικοποιημένες καμπύλες. Έτσι, με γνώμονα τους στόχους της παρούσης διπλωματικής εργασίας, είναι σαφώς ευκολότερο (και πιο εύχρηστο, συγχρόνως) να ποσοτικοποιηθεί μαθηματικά η απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, μέσω της αξιοποίησης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που έχουν οι κανονικοποιημένες (με τις "καθαρές" αντοχές τους) καμπύλες αλληλεπίδρασης, φανερώνοντας το συγκριτικό πλεονέκτημά τους. Για τους λόγους, λοιπόν, που αναπτύχθηκαν στην συγκεκριμένη ενότητα, επιλέγεται η παρουσίαση των καμπυλών αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων να γίνεται αποκλειστικά και μόνο στην κανονικοποιημένη τους μορφή.

### 3.3.4.2 Το σχήμα (shape) των καμπυλών αλληλεπίδρασης

Όλες οι καμπύλες αλληλεπίδρασης που παράχθηκαν με την παραπάνω διαδικασία έχουν κοινό σχήμα (shape), ανεξάρτητα από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  και τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ . Εν προκειμένω, στο 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο η σχέση οριζόντιας δύναμης- ροπής δείχνει να μοιάζει με γραμμική, ενώ στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο παρατηρείται ο λεγόμενος κλάδος της υπεραντοχής. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι στα σχήματα που έχουν παρουσιαστεί ως τώρα απεικονίζονται μόνο οι μισές καμπύλες αλληλεπίδρασης, λόγω της συμμετρίας που παρατηρείται με βάση τα τεταρτημόρια του επιπέδου στο οποίο σχεδιάζονται (1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο με 3<sup>ο</sup> τεταρτημόριο και 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο με 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο, **Σχήμα 3.21**).

Η γραμμική σχέση της οριζόντιας δύναμης με την ροπή που εντοπίζεται στο 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του επιπέδου των καμπυλών αλληλεπίδρασης, υποδηλώνει ότι τα δύο αυτά εντατικά μεγέθη αντλούν την αντίδρασή τους από τους ίδιους μηχανισμούς. Σε όλο το τμήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης που βρίσκεται σε αυτό το τεταρτημόριο ισχύει ότι  $Q/Q_u \leq 1$  και  $M/M_u \leq 1$ , διότι η “ομόσημη” δράση της οριζόντιας δύναμης και της ροπής επαλληλίζεται δυσμενώς. Επομένως, σε αυτό το τμήμα η ταυτόχρονη και “ομόσημη” παρουσία του έτερου εντατικού μεγέθους επιδεινώνει την απόκριση της θεμελίωσης, με συνέπεια τόσο η μέγιστη οριζόντια δύναμη όσο και η μέγιστη ροπή που δύναται να παραλάβει το σύστημα της θεμελίωσης να ταυτίζονται με τις “καθαρές” αντοχές του (σημεία  $Q/Q_u = 1$  και  $M/M_u = 1$ ).

Στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο, όμως, η γραμμική αυτή σχέση καταργείται. Σε αντίθεση με τις καμπύλες αλληλεπίδρασης των επιφανειακών θεμελιώσεων, όπου παρατηρείται θαυμαστή συμμετρία στην απόκριση του συστήματος (σε όρους δυνάμεων), στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις παρατηρείται ένας ισχυρός κλάδος υπεραντοχής. Συγκεκριμένα, παρατηρώντας το **Σχήμα 3.22**, ως κλάδος υπεραντοχής νοείται το τμήμα της καμπύλης αλληλεπίδρασης (σε όρους γενικευμένου συνδυασμού οριζόντιας δύναμης- ροπής) στο οποίο, εν γένει, ισχύει ότι  $Q/Q_u \geq 1$  ή/ και  $M/M_u \geq 1$ , δηλαδή στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο (και αντίστοιχα στο 2<sup>ο</sup>, που, λόγω συμμετρίας της καμπύλης αλληλεπίδρασης, δεν σχεδιάζεται) του επιπέδου. Σε αυτό το σημείο θα είναι χρήσιμο να οριστούν δύο πρόσθετα χαρακτηριστικά εντατικά μεγέθη: η μέγιστη οριζόντια

δύναμη  $Q_{\max}$  και η μέγιστη ροπή  $M_{\max}$ . Τα δύο αυτά μεγέθη διαφέρουν ποιοτικά από τις αντίστοιχες “καθαρές” αντοχές  $Q_u$  και  $M_u$  που ορίστηκαν παραπάνω, διότι σημειώνονται υπό την ταυτόχρονη παρουσία του άλλου μεγέθους φόρτισης, ενώ η ποσοτική τους διαφορά είναι άμεσα αντιληπτή από τα **Σχήματα 3.23** και **3.24**. Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί εκτενέστερα σε προηγούμενη ενότητα, η τοποθέτηση του κλάδου της υπεραντοχής πάνω σε μία καμπύλη αλληλεπίδρασης έχει άμεση σχέση με το θεωρούμενο σημείο αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων. Συνεπώς, για την ουσιαστικότερη κατανόηση αυτής της συμπεριφοράς των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, εκφρασμένη με τον κλάδο της υπεραντοχής (και σε αντιδιαστολή με την αντίστοιχη των επιφανειακών θεμελιώσεων), σε πρώτη φάση απαιτείται ιδιαίτερη αναφορά στους μηχανισμούς παραλαβής των εγκάρσιων φορτίσεων (που συντίθενται από οριζόντιες δυνάμεις  $Q$  και ροπές  $M$ ) τόσο σε επιφανειακές όσο και σε εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις.

### **3.3.4.3 Εδαφικοί μηχανισμοί παραλαβής εγκάρσιων φορτίσεων σε επιφανειακές και σε βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις: η φυσική του προβλήματος**

Μία τυπική επιφανειακή θεμελίωση υπό εγκάρσια φόρτιση (αποτελούμενη από οριζόντια δύναμη και ροπή, δηλαδή) απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.25**. Η εγκάρσια φόρτιση της θεμελίωσης (όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως) παρουσιάζεται κατά κύριο λόγο- είτε εξαιτίας μιας σεισμικής εξάιτησης (φόρτιση με δυναμικά χαρακτηριστικά), είτε λόγω των περιβαλλοντικών φορτίσεων (φόρτιση με ανακυκλικά χαρακτηριστικά), ιδιαίτερα στην περίπτωση των έργων ανοικτής θαλάσσης. Στο ίδιο σχήμα, φαίνονται ποιοτικά οι επιμέρους μηχανισμοί οι οποίοι κινητοποιούνται για την παραλαβή της εγκάρσιας φόρτισης, εν προκειμένω: (α) η ανελαστική απόκριση του εδάφους θεμελίωσης και (β) οι γεωμετρικές μη- γραμμικότητες στην βάση της επιφανειακής θεμελίωσης (ανασήκωμα- *uplifting* και ολίσθηση- *sliding*). Απ' την άλλη πλευρά, στο **Σχήμα 3.26** απεικονίζεται μία τυπική βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση (φρέαρ) τετραγωνικής διατομής υπό εγκάρσια φόρτιση στην κορυφή. Επιπλέον, απεικονίζονται σκαριφηματικά οι κατανομές των αναπτυσσόμενων τάσεων στην



περιφέρεια και στην βάση του φρέατος, τόσο σε όψη όσο και σε κάτοψη. Ενώ στις επιφανειακές θεμελιώσεις συμμετέχει μόνη η βάση της θεμελίωσης για την παραλαβή της εγκάρσιας φόρτισης με την ανάπτυξη ορθών και διατμητικών τάσεων, στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις κάτι τέτοιο δεν υφίσταται. Παρ' όλο που και εδώ η βάση του φρέατος συμμετέχει με παρόμοιο τρόπο, η συνεισφορά της είναι πολύ μικρή σε σχέση με την συνεισφορά των παράπλευρων επιφανειών.

Κατά την εγκάρσια φόρτιση φρεάτων, που κατά κανόνα θεωρούνται ως άκαμπτα στερεά σώματα, αναπτύσσονται οι εξής κατανομές τάσεων στις επιφάνειές τους: (α) ορθές εδαφικές αντιδράσεις  $\sigma_x$  στα κάθετα (σε σχέση με το επίπεδο εγκάρσιας φόρτισης) επίπεδα, (β) διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$  στα παράλληλα του επιπέδου φόρτισης επίπεδα, (γ) διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$  και  $\tau_{yz}$  στα επίπεδα κάθετα και παράλληλα, αντίστοιχα, με το επίπεδο φόρτισης, (δ) ορθές εδαφικές αντιδράσεις  $\sigma_z$  στην βάση και (ε) διατμητικές τάσεις  $\tau_{zx}$  στην βάση της θεμελίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αυτήν την κατηγορία θεμελιώσεων, οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην περιφέρεια των φρεάτων είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την συνολική απόκριση του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης. Απ' την μια πλευρά, συμμετέχουν τόσο στην παραλαβή οριζόντιων δυνάμεων αλλά και ροπών, ενώ απ' την άλλη αναφέρονται σε σημαντικά μεγάλες επιφάνειες. Επιπλέον, και εδώ ενδέχεται να παρουσιαστούν φαινόμενα γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων (π.χ. αποκόλληση- gapping), όπως φαίνεται ποιοτικά στο **Σχήμα 3.27**, κυρίως στην περίπτωση των συνεκτικών εδαφών θεμελίωσης, όπου η ποσοτικοποίηση αυτού του είδους της συμπεριφοράς μπορεί να γίνει, προσεγγιστικά, μέσω της ορθής εφαρμογής της θεωρίας "δημιουργίας και ευστάθειας κοιλότητων" (cavity expansion theory, [Yu and Rowe 1999]).

Είναι, λοιπόν, φανερό ότι στην απόκριση των επιφανειακών θεμελιώσεων υπό εγκάρσια φόρτιση συμβάλλουν πολλοί λιγότεροι μηχανισμοί, και μάλιστα οι ίδιοι μηχανισμοί είναι κοινοί και αποτελούν μόνο ένα μέρος της απόκρισης των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Στο **Σχήμα 3.28** απεικονίζονται οι "καθαρές" αντοχές μια επιφανειακής θεμελίωσης και στο **Σχήμα 3.29** οι αντίστοιχες "καθαρές" αντοχές ενός φρέατος. Και στα δύο σχήματα οι αντοχές παρουσιάζονται συναρτήσει του συντελεστή  $\chi$ . Στην περίπτωση της επιφανειακής θεμελίωσης οι αντοχές παρουσιάζουν μέγιστο για  $\chi \approx 0.5$  (δηλαδή για  $FS_v \approx 2$ ) ενώ μηδενίζονται για  $\chi = 0$ : υπό την απουσία

κατακόρυφης φόρτισης. Αντιθέτως, στην εγκιβωτισμένη θεμελίωση όχι μόνο οι αντοχές δεν μηδενίζονται για  $x = 0$ , αλλά παρατηρείται μεγιστοποίησή τους όταν απουσιάζει η κατακόρυφη φόρτιση. Οι μηχανισμοί παραλαβής εγκάρσιας φόρτισης που αναφέρθηκαν είναι τόσο ισχυροί ώστε να μην απαιτείται κατακόρυφο φορτίο για την πλήρη “ενεργοποίησή” τους, σε αντίθεση με τις επιφανειακές θεμελιώσεις όπου η σχέση της μεταβολής των “καθαρών” αντοχών συναρτήσει του αντίστροφου του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση δεν είναι μονότονη. Στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, για ένα σημαντικό εύρος του συντελεστή  $x$  (περίπου για  $x \leq 0.15$ ), οι αντοχές δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές ποσοτικές διαφορές και διατηρούνται περίπου σταθερές, ενώ, επιπλέον, αυτές φθίνουν με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου λόγω της εντονότερης πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους που αυτό προκαλεί.

### **3.4 Η μέθοδος των επιβαλλόμενων μετακινήσεων (Swipe tests)**

#### **3.4.1 Εισαγωγή**

Η δεύτερη κατηγορία αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, με σκοπό την παραγωγή καμπυλών αλληλεπίδρασης, είναι διαφορετικής φύσεως σε σχέση με την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων, η οποία χρησιμοποιήθηκε. Εδώ επιβάλλονται μετακινήσεις στην κορυφή του φρέατος κατά τους τρεις ενεργούς βαθμούς ελευθερίας που εξετάζονται (δηλαδή κατακόρυφη μετακίνηση  $v$ , οριζόντια μετακίνηση  $u$  και στροφή  $\theta$ ) και καταγράφονται τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη ως αντιδράσεις. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αποφεύγονται σε μεγάλο ποσοστό ενδεχόμενες αριθμητικές αστάθειες που δύναται να εμφανιστούν κατά τον χρόνο των αναλύσεων με την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων, διότι, επιβάλλοντας μετακινήσεις, το σύστημα εδάφους- θεμελίωσης δεν “αστοχεί” (με την έννοια της αστοχίας σε όρους δυνάμεων που ορίστηκε παραπάνω). Οι αναλύσεις θα ολοκληρωθούν στον συνδυασμό μετακινήσεων που ορίζεται από τον χρήστη, ανεξάρτητα από το αν έχει επέλθει η αστοχία σε όρους δυνάμεων. Επιπλέον, έχει διατυπωθεί (και αποδειχθεί) η άποψη ότι οι αναλύσεις με την μέθοδο των

επιβαλλόμενων μετακινήσεων παράγουν πιο ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά τα φορτία αστοχίας [Bransby and Randolph 1997; Gourvenec and Randolph 2003; Bransby and Yun 2009], με συνέπεια η παραπάνω πρόταση να αποτελεί ένα ισχυρό στοιχείο σύγκρισης και εξακρίβωσης της ορθότητας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων, στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Η μέθοδος των επιβαλλόμενων μετακινήσεων (ή *swipe tests*) αποτελεί την γενίκευση της αντίστοιχης μεθόδου που συστήθηκε αρχικά από τον Tan (*sideswipe tests*, [1990]) κατά την διάρκεια δοκιμών φυσικής κλίμακας. Η εφαρμογή της θεωρίας των πειραματικών δοκιμών “*sideswipe*” επέτρεψε στον Tan να προσδιορίσει πλήρως την καμπύλη αλληλεπίδρασης μιας επιφανειακής θεμελίωσης στο κύριο επίπεδο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης  $N$ - οριζόντιας δύναμης  $Q$ , χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα μόνο δύο πειραμάτων: μιας δοκιμής “*sideswipe*” η οποία ξεκινά από κατακόρυφη φόρτιση ίση με την φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης ( $x = N/N_u = 1$ ) και μιας επιπλέον δοκιμής, η οποία ξεκινά από την περιοχή- πρακτικώς- μηδενικής κατακόρυφης φόρτισης ( $x = N/N_u \approx 0$ ). Για την ακρίβεια, τα παραπάνω αποτελέσματα αποτελούσαν την προβολή των τριδιάστατων διαδρομών φόρτισης (3D- load paths) της θεμελίωσης (στον γενικευμένο χώρο φόρτισης  $M - Q - N$ ), στο κύριο επίπεδο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης  $N$ - οριζόντιας δύναμης  $Q$ , από την στιγμή που δεν έγιναν μετρήσεις ροπής, παρόλο που η στροφή της θεμελίωσης είχε δεσμευθεί [Martin and Houlsby 2000]. Άμεση επέκταση της εργασίας του Tan είναι το γεγονός ότι μπορούν να παραχθούν (με παρόμοιο τρόπο) καμπύλες αλληλεπίδρασης θεμελιώσεων σε οποιοδήποτε κύριο επίπεδο φόρτισης επιθυμείται κάθε φορά, με απλή αντικατάσταση των ορθών μεγεθών κατά την σχεδίαση των σταδίων των αναλύσεων, καθώς ακόμα και να παραχθούν με άμεσο τρόπο και οι (τριδιάστατες) επιφάνειες αλληλεπίδρασης των μελετώμενων θεμελιώσεων. Αργότερα, η μέθοδος του Tan τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να χρησιμοποιηθεί κατά την παραγωγή καμπυλών αλληλεπίδρασης τόσο σε πειραματικές δοκιμές [Martin 1994; Martin and Houlsby 2000; Byrne and Cassidy 2002] όσο και σε αριθμητικές αναλύσεις [Bell 1991; Ngo- Tran 1996; Bransby and Randolph 1998; Gourvenec and Randolph 2003].

### 3.4.2 Σχεδιασμός των αριθμητικών αναλύσεων με την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων

Η διαδικασία της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων αποτελείται από δύο στάδια. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπου επιθυμείται η παραγωγή των καμπυλών αλληλεπίδρασης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ , το πρώτο στάδιο αποτελείται από την εφαρμογή στην κορυφή του φρέατος κατάλληλης κατακόρυφης μετακίνησης  $v$ , ξεκινώντας από μηδενική κατακόρυφη αντίδραση (κατακόρυφο φορτίο  $N = 0$ ) έως την ενεργοποίηση της μέγιστης δυνατής (κατακόρυφο φορτίο  $N = N_u$  ή συντελεστής ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1$ ). Έπειτα, η εισαγόμενη στο πρώτο στάδιο κατακόρυφη μετακίνηση διατηρείται σταθερή ( $\Delta v = 0$ ), και επιβάλλεται στην κορυφή του φρέατος ένας συνδυασμός οριζόντιας μετακίνησης και στροφής, με τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη να λαμβάνονται ως οι αντιδράσεις σε αυτόν τον επιβαλλόμενο συνδυασμό των μετακινήσεων. Το αποτέλεσμα αυτής της αλληλουχίας σταδίων είναι η τμηματική παραγωγή της ζητούμενης καμπύλης αλληλεπίδρασης, διεξάγοντας μικρότερο αριθμό αναλύσεων, αλλά και η ταυτόχρονη παραγωγή της επιφάνειας αλληλεπίδρασης της εξεταζόμενης θεμελίωσης, μιας και το κατακόρυφο φορτίο μειώνεται συνεχώς καθώς αυξάνονται (μεταβάλλονται, εν γένει) η οριζόντια δύναμη ή/ και η ροπή, με τέτοιο τρόπο που να “εγκλωβίζει” σε όλη την διάρκεια της ανάλυσης το σύστημα εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης σε κατάσταση αστοχίας. Σύμφωνα με τους Martin και Houlsby [2000], στην περίπτωση των επιφανειακών θεμελιώσεων απαιτούνται δύο ειδών δοκιμές τύπου “swipe”, στο θεωρητικό πλαίσιο εκείνων που διεξήχθησαν από τον Tan (όπως αυτές αναπτύχθηκαν παραπάνω, **Σχήμα 3.30**). Στην περίπτωση, όμως, των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, που, εκ των προτέρων, δεν αναμένεται να παρατηρηθεί η αντίστοιχη συμμετρία στο σχήμα των επιφανειών αλληλεπίδρασης (ως προς τον άξονα της κατακόρυφης δύναμης  $N$ ), εφαρμογή βρίσκει μόνον το ένα είδος: οι δοκιμές τύπου “swipe” που ξεκινούν από συντελεστή  $x = 1$ , όπως ενδεικτικά απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.31** [Gottardi, Houlsby, Butterfield 1999]. Εξάλλου, παρόμοια διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί με σκοπό την παραγωγή καμπυλών αλληλεπίδρασης μιας θεμελίωσης, σε οποιοδήποτε άλλο κύριο επίπεδο φόρτισης επιθυμείται, τροποποιώντας κατάλληλα κάθε φορά τα στάδια της ανάλυσης με βάση το

επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 3.32** απεικονίζεται ποιοτικά μέσω απλών διαγραμμάτων η φιλοσοφία σχεδιασμού των αναλύσεων που ακολουθείται, γενικώς, κατά τον σχεδιασμό δοκιμών τύπου “swipe”, ενώ συγχρόνως καταγράφεται παράπλευρα από κάθε περίπτωση το επιδιωκόμενο της αποτέλεσμα.

### **3.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου, αποτελέσματα και σχολιασμός τους.**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των επιβαλλόμενων δυνάμεων, όπου κατά το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης διατηρείται σταθερή η επιβαλλόμενη κατακόρυφη φόρτιση. Με την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων, όμως, όπως αυτή αναπτύχθηκε σε θεωρητικό επίπεδο παραπάνω, κατά το δεύτερο στάδιο φόρτισης διατηρείται σταθερή η επιβαλλόμενη κατακόρυφη μετακίνηση του πρώτου σταδίου. Η παραγόμενη κατακόρυφη αντίδραση δεν διατηρείται σταθερή (κατά κανόνα μειώνεται) και ακολουθεί το σχήμα της επιφάνειας αλληλεπίδρασης στον γενικευμένο χώρο των εντατικών μεγεθών  $M - Q - N$ , διότι το σύστημα εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης ωθείται συνεχώς (εκ των φιλοσοφιών της μεθόδου) σε κατάσταση αστοχίας, κατά την διάρκεια ολόκληρου του δεύτερου σταδίου της ανάλυσης. Προκειμένου να υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ των δύο μεθόδων για την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί μια παραλλαγή της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων [Martin and Houlby 2000; Bransby and Yun 2009]. Ενώ η μέθοδος των δοκιμών τύπου “swipe” είναι σχετικά νέα, η παραλλαγή που χρησιμοποιήθηκε έχει εφαρμοστεί πολύ συχνά για την μελέτη της φέρουσας ικανότητας εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό συνδυασμένη φόρτιση, και μάλιστα έχει αρκετά κοινά θεωρητικά σημεία με την πειραματική διαδικασία που ακολουθείται κατά την μελέτη του κριτηρίου διαρροής των αργιλικών εδαφών (σε όρους ενεργών τάσεων  $p'$ ,  $q$ ), κατά την διεξαγωγή τριαξονικών δοκιμών υπό στραγγιζόμενες συνθήκες φόρτισης, σταθερής ενεργής τάσης  $p'$  και για ποικίλους λόγους υπερστερεοποίησης OCR [Martin and Houlby 2000]. Έτσι, καθίσταται δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών μεθόδων για την παραγωγή των καμπυλών αλληλεπίδρασης (μέθοδος επιβαλλόμενων δυνάμεων και παραλλαγή της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων), διότι και στις δύο

περιπτώσεις δίνεται η δυνατότητα να εξεταστούν οι κοινές τομές των επιφανειών αλληλεπίδρασης, που αναφέρονται σε δεδομένο συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Κατά την παραλλαγή αυτή, στο πρώτο στάδιο δεν επιβάλλεται κατακόρυφη μετακίνηση αλλά κατακόρυφη φόρτιση που αντιστοιχεί σε δεδομένο συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , ενώ το δεύτερο στάδιο παραμένει όπως ακριβώς παρουσιάστηκε (**Σχήμα 3.33**): υπό την διατήρηση της κατακόρυφης φόρτισης σταθερής, επιβάλλονται στην κορυφή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης κατάλληλοι συνδυασμοί οριζόντιας μετατόπισης  $u$  και στροφής  $\theta$ . Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων παρουσιάζονται στα **Σχήματα 3.34, 3.35 και 3.36** για όλους τους μελετώμενους λόγους εγκιβωτισμού  $D/B$  και για δύο από τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση,  $FS_v = 2.5$  και  $\infty$ . Σημειώνεται πλήρης σύγκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων, εκτός, ίσως, του κλάδου της υπεραντοχής και για λόγους εγκιβωτισμού  $D/B \geq 2$ , όπου φαίνεται ότι η διαδρομή φόρτισης (2D- load path) που προκύπτει με την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων υπερβαίνει ελαφρώς την καμπύλη αλληλεπίδρασης που παράχθηκε με την χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχθεί τόσο πειραματικά [*Martin and Houlsby 2000*] όσο και αριθμητικά [*Bransby and Randolph 1998*] ότι κάτι τέτοιο είναι- εκ των προτέρων- αναμενόμενο, με την καμπύλη αλληλεπίδρασης που προκύπτει με την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων να “εγγράφεται” ελαφρώς εκείνης που προκύπτει με την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων, στο εξεταζόμενο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ . Συνεπώς, η παραπάνω ταύτιση των δύο μεθόδων ενισχύει σημαντικά την καθολική ορθότητα της εφαρμογής της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων, μέσω ποικίλων ακτινικών διαδρομών φόρτισης, που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Επιπλέον, στα παραπάνω σχήματα, οι επιμέρους διδιάστατες διαδρομές φόρτισης που καταγράφηκαν με χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων, προέκυψαν χρησιμοποιώντας κατάλληλους συνδυασμούς οριζόντιας μετατόπισης  $u$  και στροφής  $\theta$ , κατά των προγραμματισμό του δευτέρου σταδίου των αναλύσεων, και όχι τυχαίους. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι λόγοι των πλαστικών μετακινήσεων ( $u^{pl}$  και  $\theta^{pl}$ ) που καταγράφηκαν με βάση την μέθοδο των

επιβαλλόμενων δυνάμεων κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, για κάθε ένα σημείο χωριστά κατά μήκος μιας δεδομένης καμπύλης αλληλεπίδρασης, και οι αντίστοιχες διαδρομές φόρτισης “κατέληξαν”- με αξιοσημείωτη ακρίβεια- στο ισοδύναμό τους σημείο. Το εύρημα αυτό είναι πολύ σημαντικό για την μελέτη της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, μιας και υποδηλώνει (εμμέσως) την ταύτιση των καμπυλών αλληλεπίδρασης (yield surfaces) με το “δυναμικό πλαστικοποίησής” τους (plastic potential). Εξάλλου, ένας από τους βασικούς στόχους που διατυπώθηκαν στην εισαγωγή του συγκεκριμένου εντύπου της διπλωματικής εργασίας, είναι η επιτυχής παραγωγή αναλυτικών εκφράσεων για την καθολική περιγραφή της συμπεριφοράς που διέπει τις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, με σκοπό την ενσωμάτωσή τους σε ένα ενιαίο μαθηματικό εργαλείο, στα πλαίσια της μοντελοποίησης του συστήματος της θεμελίωσης μέσω “μακρο- στοιχείου” (“macro- element modeling”). Η σπουδαία συνεισφορά του συγκεκριμένου ευρήματος έγκειται στην κατεύθυνση της επιβεβαίωσης της ισχύος μιας από τις βασικότερες των παραδοχών που γίνονται από διάφορους ερευνητές, κατά την προσπάθεια κατάρτισης του ενιαίου αυτού μαθηματικού εργαλείου, για διάφορα συστήματα θεμελιώσεων: η παραδοχή της ισχύος του “συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής” των μετακινήσεων (associated plastic flow rule). Το γεγονός ότι, με βάση τις παρατηρήσεις από την σύγκριση των δύο διαφορετικών μεθόδων παραγωγής καμπυλών αλληλεπίδρασης, προέκυψε πως οι καμπύλες αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων ταυτίζονται, συγχρόνως, με το δυναμικό πλαστικοποίησής τους, είναι εξαιρετικής σημασίας για δύο κύριους λόγους: (α) αρκεί μόνον ο προσδιορισμός της κατάλληλης μαθηματικής έκφρασης για την περιγραφή των καμπυλών αλληλεπίδρασης (και κατ’ επέκταση των τριδιάστατων επιφανειών αλληλεπίδρασης), χωρίς να απαιτείται κάποια καινούρια, ξεχωριστή και, ίσως, επίπονη προσπάθεια για την εύρεση μια κατάλληλης εξίσωσης περιγραφής του δυναμικού αυτού και (β) αποτελεί ένα ισχυρό αποδεικτικό στοιχείο για την διατύπωση της πρότασης ότι δείχνει να ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια ο συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων στην περίπτωση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (με τις παραδοχές της παρούσης διπλωματικής εργασίας, φυσικά), εισάγοντας ταυτόχρονα την μαθηματική ευκολία στην διατύπωση και στον προγραμματισμό του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου, που αυτός επιφέρει.

Τέλος, άμεσα συνδεδεμένη με το παραπάνω εύρημα είναι η διαπίστωση των Bransby και Yun [2009], οι οποίοι αναφέρουν ότι το κάθετο διάνυσμα στο σημείο τερματισμού μιας αριθμητικής ανάλυσης (ή πειράματος) με χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων, αναπαριστά συγχρόνως και τον λόγο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων που εισάγεται κατά το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης. Συνεπώς, γίνεται άμεσα αντιληπτή η σπουδαιότητα που ανακλάται από τα παραπάνω ευρήματα, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και με τους στόχους που έχουν τεθεί εξαρχής, με αποτέλεσμα το συγκεκριμένο θέμα να αναπτυχθεί εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα, και με την εφαρμογή του (στα πρότυπα της μοντελοποίησης μέσω “μακρο- στοιχείου”) να περιγράφεται διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

### **3.5 Δυναμικό πλαστικοποίησης (plastic potential)**

#### **3.5.1 Εισαγωγή**

Με τον όρο “δυναμικό πλαστικοποίησης” αναφερόμαστε στην συμπεριφορά του μελετώμενου συστήματος εδάφους- θεμελίωσης σε όρους μετακινήσεων, που συνδυάζεται με την κατάσταση αστοχίας (με τον τρόπο που αυτή έχει ήδη οριστεί). Γενικότερα, όταν γίνεται αναφορά σε θεμελιώσεις επί αστράγγιστων εδαφικών συνθηκών φόρτισης και στην περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπ’ όψιν φαινόμενα γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων, έχει παρατηρηθεί (πειραματικά) ότι οι περιβάλλουσες αστοχίας (εκφρασμένες μέσω των καμπυλών αλληλεπίδρασης, όπως αναπτύχθηκαν προηγουμένως) σχηματίζουν συγχρόνως ένα “δυναμικό πλαστικοποίησης” (plastic potential). Το δυναμικό πλαστικοποίησης εκφράζει την σχέση που έχουν οι μεταβολές (increments) των πλαστικών μετακινήσεων ( $v^{pl}$ ,  $u^{pl}$ ,  $\theta^{pl}$ ) κατά την στιγμή της αστοχίας (**Σχήμα 3.37**), σε άμεση συνάρτηση με την μεταβολή της επιφάνειας διαρροής του συστήματος της θεμελίωσης (ή, εν γένει, σε συνάρτηση με την μεταβολή της εξίσωσης που περιγράφει το δυναμικό αυτό), ως προς τα εντατικά μεγέθη  $M - Q - N$ . Η γνώση αυτή είναι εξέχουσας σημασίας και τίθεται υπό άμεση



χρήση σε θεωρούμενα ελαστο- πλαστικά προσομοιώματα θεμελιώσεων (και ιδίως υπό την σκοπιά της μοντελοποίηση μέσω “μακρο- στοιχείου”- “macro- element modeling”), ενώ συγχρόνως παρέχει ποιοτικές αλλά και ποσοτικές πληροφορίες για τους διάφορους μηχανισμούς αστοχίας που κινητοποιούνται σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης [Tan 1990; Martin 1994]. Παρ' όλα αυτά, στην συντριπτική πλειοψηφία των δημοσιευμένων ερευνών πάνω στις εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, δεν καταβάλλεται ιδιαίτερη προσπάθεια για την αριθμητική εξακρίβωση της ταύτισης του δυναμικού πλαστικοποίησης με τις περιβάλλουσες αστοχίας, ή ακόμα και για την εύρεση της κατάλληλης εξίσωσης δυναμικού πλαστικοποίησης της θεμελίωσης, σε περίπτωση που η ταύτιση αυτή δεν ισχύει. Αντιθέτως, γίνεται η συνήθης παραδοχή (π.χ. [Cremer, Pecker, Davenne 2001]) ότι η πλαστική συμπεριφορά του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης περιγράφεται από ένα συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής των μετακινήσεων (associated plastic flow rule), χωρίς να δίνεται βάση στην απαιτούμενη επαλήθευση και, ακόμα περισσότερο, στην εξήγηση της φυσικής σημασίας αυτής της παραδοχής.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην προσπάθεια για την διατύπωση του νόμου πλαστικής ροής που εμφανίζει καλύτερη προσαρμογή στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, με βάση τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Για κάθε μία ακτινική φόρτιση που διεξήχθη (και για όλους τους λόγους εγκιβωτισμού D/B και τους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  που εξετάστηκαν) καταγράφηκαν οι “χρονοϊστορίες” των μετακινήσεων, με έμφαση- κυρίως- στην αστοχία του συστήματος, ταυτόχρονα με τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη για την σχεδίαση των καμπυλών αλληλεπίδρασης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης Q- ροπής M. Προκειμένου να υπάρχει πλήρης συμφωνία με την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων που χρησιμοποιήθηκε, οι παραπάνω μετακινήσεις αστοχίας αναφέρονται στην πλαστική οριζόντια μετατόπιση  $u^{pl}$  στο σημείο αναφοράς της κορυφής του φρέατος, και στην πλαστική στροφή του  $\theta^{pl}$ , η οποία, φυσικά, είναι ενιαία σε κάθε σημείο κατά μήκος της θεμελίωσης (υπενθυμίζεται ότι ελήφθη ως απολύτως άκαμπτο στερεό σώμα). Συγχρόνως, γίνεται η (εύλογη) παραδοχή ότι το ελαστικό τμήμα των παραπάνω μετακινήσεων είναι αμελητέο, σε σύγκριση με την ανελαστική συνιστώσα

τους, δηλαδή ισχύει ότι  $u = u^{el} + u^{pl} \equiv u^{pl}$  και  $\theta = \theta^{el} + \theta^{pl} \equiv \theta^{pl}$ . Για την ακρίβεια, επιδιώκοντας- εν τέλει- αυστηρά την γενικότερη μαθηματική περιγραφή της απόκρισης του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, οι απαιτούμενες τιμές των πλαστικών μετακινήσεων που απαιτείται να καταγραφούν για την εξαγωγή του καταλληλότερου νόμου πλαστικής ροής που διέπει την μετελαστική συμπεριφορά των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, είναι στην πραγματικότητα οι μεταβολές των προαναφερθέντων πλαστικών μετακινήσεων  $u^{pl}$  και  $\theta^{pl}$  (increments), με βάση το μαθηματικό υπόβαθρο της θεωρίας της πλαστικότητας για κάθε είδους σύστημα θεμελίωσης. Παρόλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν ήταν, τελικώς, απαραίτητο για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, από την στιγμή που ο λόγος των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων προέκυψε αριθμητικά ίσος με τον απλό λόγο των πλαστικών μετακινήσεων κατά την αστοχία (δηλαδή προέκυψε ότι:  $\delta u^{pl}/\delta \theta^{pl} \equiv u^{pl}/\theta^{pl}$ ), με την αιτιολόγηση του παραπάνω αποτελέσματος να αναπτύσσεται σε επόμενη παράγραφο.

### **3.5.2 Η φυσική σημασία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων**

Στα **Σχήματα 3.38, 3.39** και **3.40** απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης που παράχθηκαν με την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων, συμπληρωμένες με τα διανύσματα των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων ( $\delta u^{pl}$  και  $\delta \theta^{pl}$ ) κατά την αστοχία. Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 3.38** φαίνονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης για λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση (δηλαδή για  $FS_v = 1.25; 1.66; 2; 2.5; 5; 10$  και  $\infty$ , αντίστοιχα), στο **Σχήμα 3.39** οι αντίστοιχες καμπύλες για λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  και στο **Σχήμα 3.40** οι καμπύλες για λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ . Για λόγους πληρότητας, σημειώνεται ότι σε αυτήν την ενότητα, όπου εξετάζεται (με γραφικό τρόπο) αν ισχύει ο συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων κατά την αστοχία της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, οι καμπύλες αλληλεπίδρασης πρέπει να εκφραστούν υπό διαστατοποιημένη μορφή και σε κλίμακα 1: 1. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές του κατακόρυφου άξονα της ροπής διαιρούνται με το βάθος εγκιβωτισμού του φρέατος  $D$ , με την πράξη αυτή να συνεπάγεται και την ταυτόχρονη θεώρηση των μεταβολών των

πλαστικών οριζόντιων μετατοπίσεων  $du^p$  διαιρεμένες με την ίδια ποσότητα (**Σχήμα 3.37(θ)**). Για την ακρίβεια, όμως, ενδιαφέρει (πρακτικώς) ο λόγος που έχουν οι μεταβολές των πλαστικών μετακινήσεων κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους-φρέατος, με αποτέλεσμα η διαίρεση των μεταβολών των πλαστικών οριζόντιων μετατοπίσεων  $du^p$  με το βάθος εγκιβωτισμού της θεμελίωσης  $D$ , να ισοδυναμεί πλήρως με την εναλλακτική περίπτωση πολλαπλασιασμού με την ίδια ποσότητα των μεταβολών των πλαστικών στροφών  $d\theta^p$  του φρέατος.

Σε όλα τα παραπάνω σχήματα, και για κάθε εξεταζόμενο συνδυασμό λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , τα “μοναδιαία” διανύσματα των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων δείχνουν να είναι κάθετα στο κάθε σημείο της καμπύλης αλληλεπίδρασης, όπου αυτά αναφέρονται. Επομένως, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι, στην περίπτωση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, εφαρμόζεται με θαυμαστή ακρίβεια ο συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων (associated plastic flow rule), εφόσον η άμεση γραφική συνέπειά του, κατά την αντίστοιχη απεικόνισή του μέσω των καμπυλών αλληλεπίδρασης, είναι η παρατήρηση της ισχύος της “καθετότητας” (normality). Το αποτέλεσμα αυτό είναι πάρα πολύ σημαντικό, στην κατεύθυνση της ολοκλήρωσης των στόχων που έχουν τεθεί εξ αρχής, διότι καθιστά πολύ πιο εύκολη την σύνταξη και τον προγραμματισμό του επιδιωκόμενου ενιαίου μαθηματικού εργαλείου για την περιγραφή της απόκρισης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, χωρίς την ανάγκη διεξαγωγής των χρονοβόρων τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, ενώ συγχρόνως παρέχει άμεση στήριξη όσον αφορά την εγκυρότητα, από φυσική σκοπιά, της αντιμετώπισης του προβλήματος των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων μέσω της μοντελοποίησης με “μακρο-στοιχείο” (“macro-element modeling”). Πάντως, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο καταβάλλεται προσπάθεια για την εξήγηση της φυσικής σημασίας που συνοδεύει το φαινόμενο αυτό, με την εκτενέστερη περιγραφή των βημάτων για την σύνταξη του ενιαίου μαθηματικού μοντέλου να γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο. Εξάλλου, το συμπέρασμα ισχύος της εφαρμογής του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής των μετακινήσεων ήταν- κατά μία έννοια- αναμενόμενο εκ των προτέρων, διότι αναφερόμαστε σε μακροσκοπική συμπεριφορά θεμελίωσης (ή αλλιώς συμπεριφορά συστήματος εδάφους-θεμελίωσης). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι

αντίστοιχα συμπεράσματα κατά την μακροσκοπική παρατήρηση της συμπεριφοράς συστημάτων εδάφους- θεμελίωσης έχουν παρατηρηθεί, κατά το παρελθόν, σε επιφανειακές θεμελιώσεις (**Σχήματα 3.41(α)** και **3.41(β)**, [Cremer, Pecker, Davenne 2001; Grange, Kotronis, Mazars 2008; Chatzigogos, Figini, Pecker, Salençon 2011]), καθώς και σε μία ιδιαίτερη κατηγορία θεμελιώσεων έργων ανοικτής θαλάσσης: τις κυκλικές θεμελιώσεις “κωνικού σχήματος” βάσης (**Σχήματα 3.41(γ)** και **3.41(δ)**, spudcan foundations, [Martin and Houlby 2001; Cassidy, Byrne, Randolph 2004]), που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις θαλάσσιες πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου. Επιπλέον, έρευνες σχετικές με την εγκυρότητα της χρήσης του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής έχουν διεξαχθεί και για μία άλλη μεγάλη κατηγορία γεωτεχνικών προβλημάτων (“μακροσκοπικής” φύσεως), κατά την μελέτη της ευστάθειας πρανών [Wang, Yin, Lee 2001].

Ένα ακόμα σημαντικό αποτέλεσμα είναι το γεγονός ότι οι λόγοι των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων κατά την αστοχία του συστήματος της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης είναι ανεξάρτητοι του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , δηλαδή τα αντίστοιχα σημεία επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης έχουν κοινό λόγο μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεών τους. Για παράδειγμα, θεωρώντας τις κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης (με τις “καθαρές” αντοχές τους) στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ , ισχύει η παρατήρηση ότι όλα τα σημεία που έχουν σταθερή γωνία κλίσης με τον οριζόντιο άξονα (δηλαδή για τα σημεία που ισχύει  $\tan\phi_i = (M_i/M_u) / (Q_i/Q_u) = \text{σταθερό}$ , ανεξαρτήτως συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  και για δεδομένο λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ ) χαρακτηρίζονται από τον ίδιο κοινό λόγο μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων κατά την αστοχία. Σε παραβολή με την παραπάνω πρόταση, αναφέρεται- για ακόμα μία φορά- ότι το σχήμα (shape) των καμπυλών αλληλεπίδρασης στο γενικευμένο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$  διατηρείται σταθερό, και μάλιστα ταυτόσημο, για δεδομένο λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ , ανεξάρτητα από την επιβαλλόμενη κατακόρυφη φόρτιση, εξαιτίας της απουσίας φαινομένων γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων (κατά κύριο λόγο). Συνεπώς, το εύρημα αυτό αποτελεί μία ακόμα ισχυρή ένδειξη ότι στα εξεταζόμενα συστήματα των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, και με την ισχύ των αντίστοιχων παραδοχών που έγιναν κατά την

αριθμητική προσομοίωση της φυσικής που διέπει το συγκεκριμένο πρόβλημα, ισχύει ο συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων.

Επιπρόσθετα, εντοπίστηκε ότι ο λόγος των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης σταδιακά σταθεροποιείται, και ισούται αριθμητικά με τον απλό λόγο των μεγεθών αυτών (δηλαδή ισχύει ότι  $\delta u^{pl}/\delta \theta^{pl} \equiv u^{pl}/\theta^{pl}$ ), με το αποτέλεσμα αυτό να αποτελεί ένα ακόμα ισχυρό αποδεικτικό στοιχείο που συνδέεται άρρηκτα με την καθολική ισχύ της καθετότητας στο μελετώμενο σύστημα εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Πρακτικά, ο λόγος των πλαστικών μετακινήσεων αστοχίας υποδηλώνει τον πόλο περιστροφής (σε m, μετρούμενος από την επιφάνεια του εδάφους) της θεμελίωσης για κάθε συνδυασμό επιβαλλόμενης φόρτισης, και το γεγονός ότι σταθεροποιείται (και διατηρείται έτσι) κατά την αστοχία δείχνει ότι- μακροσκοπικά- η συμπεριφορά του φρέατος μπορεί να προσομοιαστεί με την κίνηση ενός απολύτως άκαμπτου στερεού σώματος (perfect rigid body motion). Στο **Σχήμα 3.42** φαίνεται η εξέλιξη των διανυσμάτων των πλαστικών μετακινήσεων μέχρι την αστοχία του συστήματος, κατά μήκος τριών συγκεκριμένων ακτινικών διαδρομών φόρτισης, για εγκιβωτισμένη θεμελίωση με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , και για σταθερό συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση ( $FS_v = 5$ ) σε κάθε περίπτωση. Παρατηρείται η (γραφική) μεταβολή της διεύθυνσης των διανυσμάτων συναρτήσει του σταδίου της ανάλυσης (η οποία είναι εντονότερη, γραφικά, για τις ακτινικές διαδρομές φόρτισης που καταλήγουν στον κλάδο της υπεραντοχής), με τελικό αποτέλεσμα την απόκτηση της κάθετης διεύθυνσης στην καμπύλη αλληλεπίδρασης, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο τελικός πόλος περιστροφής, όπως αναφέρθηκε, σχηματίζεται σταδιακά και σταθεροποιείται πλησίον της κατάστασης αστοχίας του συστήματος. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να ξεκαθαριστεί ότι το παραπάνω συμπέρασμα δεν αναφέρεται μόνο στο φρέαρ αυτό καθ' αυτό (το οποίο, εξ' άλλου, προσομοιώνεται με ένα απολύτως άκαμπτο στερεό σώμα), αλλά στο γενικότερο σύστημα φρέατος- περιβάλλοντος πλαστικοποιημένου εδάφους, συνολικά. Στα **Σχήματα 3.43, 3.44** και **3.45** απεικονίζονται σχηματικά οι πόλοι περιστροφής του συστήματος θεμελίωσης για κάθε λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ , για διάφορα σημεία επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης, και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Η απεικόνιση των συγκεκριμένων

πόλων περιστροφής γίνεται μέσω της “περιοχής” μηδενισμού του διανυσματικού αθροίσματος όλων των συνιστωσών των μετατοπίσεων (για το τρισσορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων). Επιπλέον, στο **Σχήμα 3.46** παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας της “ακριβούς” θέσης των πόλων περιστροφής (αριθμητικά) όλων των παραπάνω σημείων, όπου επισημαίνεται η διαπίστωση ότι οι πόλοι περιστροφής (ή οι λόγοι των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων) για τα αντίστοιχα σημεία κατά μήκος μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης φρέατος, με δεδομένο λόγο εγκιβωτισμού, είναι ανεξάρτητοι της κατακόρυφης φόρτισης. Η μόνη επιρροή του κατακόρυφου φορτίου έγκειται στα χαρακτηριστικά συμμετρίας που επιβάλλει στην απόκριση της θεμελίωσης, όπου για μικρούς συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση (μεγάλο κατακόρυφο φορτίο), η συμπεριφορά του συστήματος θεμελίωσης “χάνει” τα συμμετρικά της χαρακτηριστικά (π.χ. σε αντιδιαστολή με την ακραία περίπτωση απουσίας της κατακόρυφης φόρτισης, όπου παρατηρείται πλήρης συμμετρία). Η συγκεκριμένη πτυχή της επιρροής της κατακόρυφης φόρτισης αναπτύσσεται περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο.

### **3.5.3 Χαρακτηριστικά σημεία μέγιστης οριζόντιας δύναμης $Q_{max}$ και μέγιστης ροπής $M_{max}$**

Σε προηγούμενη ενότητα ορίστηκαν τα μέγιστα εντατικά μεγέθη  $Q_{max}$  και  $M_{max}$  που παρατηρούνται κατά μήκος μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Τα δύο αυτά εντατικά μεγέθη αποτελούν τα τοπικά μέγιστα της εξίσωσης διαρροής  $f$  που περιγράφει την καμπύλη αλληλεπίδρασης: η μέγιστη οριζόντια δύναμη  $Q_{max}$  αποτελεί το τοπικό μέγιστο της καμπύλης αλληλεπίδρασης συναρτήσει της ροπής και, αντίστοιχα, η μέγιστη ροπή  $M_{max}$  το τοπικό μέγιστο συναρτήσει της οριζόντιας δύναμης. Με βάση όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω, σχετικά με την γραφική απεικόνιση της έννοιας του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής, και το συμπέρασμα ισχύος της καθετότητας στις εξεταζόμενες βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, θα πρέπει να ισχύει ότι στο σημείο της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$  ο λόγος των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων τείνει στο άπειρο και στο σημείο της μέγιστης ροπής  $M_{max}$  τείνει στο μηδέν. Με άλλα λόγια, το διάνυσμα των μεταβολών των

πλαστικών μετακινήσεων στο σημείο της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{\max}$  οφείλει να είναι οριζόντιας διεύθυνσης και στο σημείο της μέγιστης ροπής  $M_{\max}$  κατακόρυφης διεύθυνσης [Prager 1959]. Πράγματι, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.47**, κάτι τέτοιο ισχύει απόλυτα και ενισχύει ακόμα περισσότερο το εξαγόμενο συμπέρασμα ισχύος του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις- φρέατα. Μαθηματικά, τα δύο αυτά χαρακτηριστικά σημεία μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$(α) \text{ Όταν: } \frac{\partial f}{\partial M} = 0 \longrightarrow \text{σημείο}(Q_{\max}) \longrightarrow \left[ \frac{\delta u^{pl}}{\delta \theta^{pl}} \rightarrow \infty \right] \text{ και}$$

$$(β) \text{ Όταν: } \frac{\partial f}{\partial Q} = 0 \longrightarrow \text{σημείο}(M_{\max}) \longrightarrow \left[ \frac{\delta u^{pl}}{\delta \theta^{pl}} \rightarrow 0 \right]$$

Εξάλλου, στα **Σχήματα 3.34, 3.35** και **3.36** (δοκιμές τύπου “swipe”) απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης που προέκυψαν με την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων σε συνδυασμό με διάφορες διαδρομές φόρτισης (για κάθε καμπύλη) της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, οι οποίες προέκυψαν ως αντιδράσεις στις επιβαλλόμενες μετακινήσεις (οριζόντια μετατόπιση  $u$  και στροφή  $\theta$ ) στην κορυφή του φρέατος, στα πρότυπα της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων. Όσον αφορά τα σημεία των μέγιστων εντατικών μεγεθών, οι δύο αντίστοιχες διαδρομές φόρτισης αναφέρονται σε άπειρο και σε μηδενικό λόγο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων (κατά το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης) στην κορυφή του φρέατος, αντίστοιχα ( $u/\theta \rightarrow \infty$  και  $u/\theta \rightarrow 0$ ). Η διαδρομή φόρτισης που αντιστοιχεί σε άπειρο λόγο μετακινήσεων καταλήγει στο σημείο της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{\max}$  και η αντίστοιχη διαδρομή μηδενικού λόγου στο σημείο της μέγιστης ροπής  $M_{\max}$ , σε θαυμαστή συμφωνία με τις παραπάνω παρατηρήσεις. Ας σημειωθεί, όμως, ότι επιβάλλοντας μετακινήσεις στην θεμελίωση με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, είναι εξ’ ορισμού δεδομένη η γραμμική και αναλογική αύξησή τους μέχρι την εισαγόμενη τιμή τους. Με αυτόν τον τρόπο ισχύει εξ’ αρχής ότι  $u/\theta \equiv \Delta u/\Delta \theta$ . Παρ’ όλα αυτά, παραπάνω αναφέρθηκε ότι- υπό αυστηρά μαθηματική έννοια- μας ενδιαφέρουν οι μεταβολές (increments) των παρατηρούμενων μετακινήσεων στην κορυφή της θεμελίωσης, κατά την αστοχία. Έτσι, προκειμένου να διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βάθος το σπουδαίο

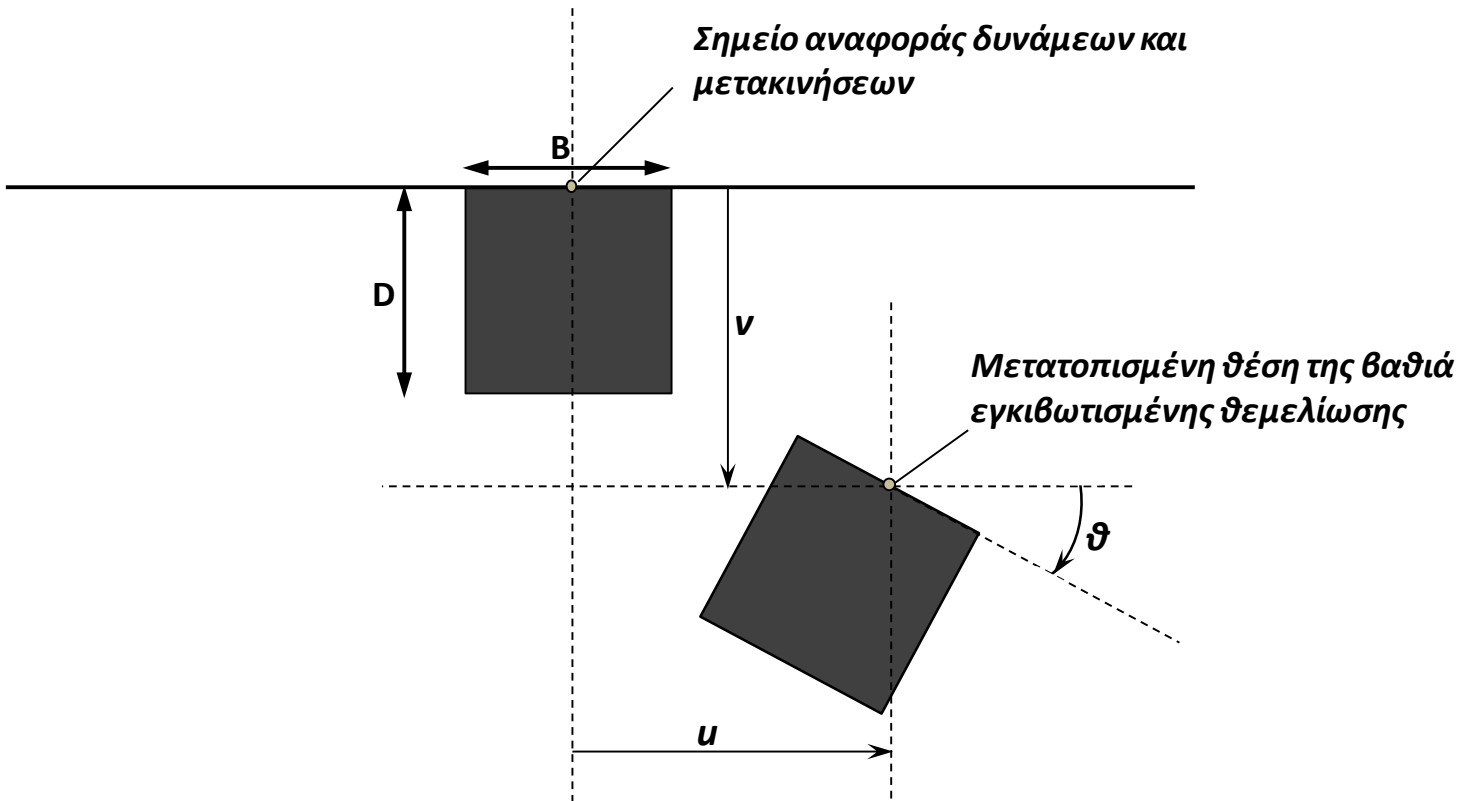
συμπέρασμα της εγκυρότητας του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής των μετακινήσεων στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, διεξάγονται πρόσθετες αναλύσεις τύπου δοκιμών “swire”, όπου σε πρώτο στάδιο εισάγεται στο σύστημα εδάφους- θεμελίωσης ένας λόγος μετακινήσεων που οδηγεί την απόκριση του συστήματος (σε όρους δυνάμεων) στο 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του επιπέδου  $M - Q$  της καμπύλης αλληλεπίδρασης, και σε επόμενο στάδιο εισάγεται κατάλληλος συνδυασμός μετακινήσεων τέτοιος ώστε να ισχύει:  $\Delta u/\Delta \theta \rightarrow \infty$  και  $\Delta u/\Delta \theta \rightarrow 0$ , αντίστοιχα. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 3.48** φαίνονται τα αποτελέσματα αυτής της νέας σειράς αριθμητικών αναλύσεων, με την προσθήκη ενός επιπλέον βήματος ανάλυσης, για φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ . Είναι, πλέον, κάτι παραπάνω από ξεκάθαρο ότι τα αποτελέσματα συμβαδίζουν απόλυτα με την θεωρία που επιβάλλει ο συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων. Τέλος, όπως θα αναπτυχθεί στο κεφάλαιο που ακολουθεί, η ουσιώδης διαφορά στην απόκριση των δύο αυτών σημείων των μεγίστων εντατικών μεγεθών (από την σκοπιά των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων της θεμελίωσης, μακροσκοπικά) είναι ότι στο σημείο της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{\max}$  η απόκριση του συστήματος έχει έντονο τον μετακινησιακό χαρακτήρα, ενώ στο σημείο της μέγιστης ροπής  $M_{\max}$  επικρατεί ο περιστροφικός χαρακτήρας.



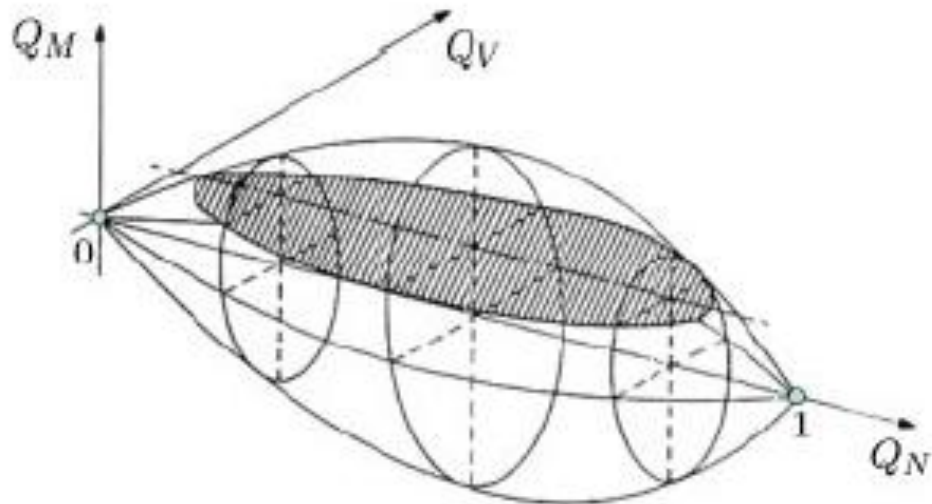
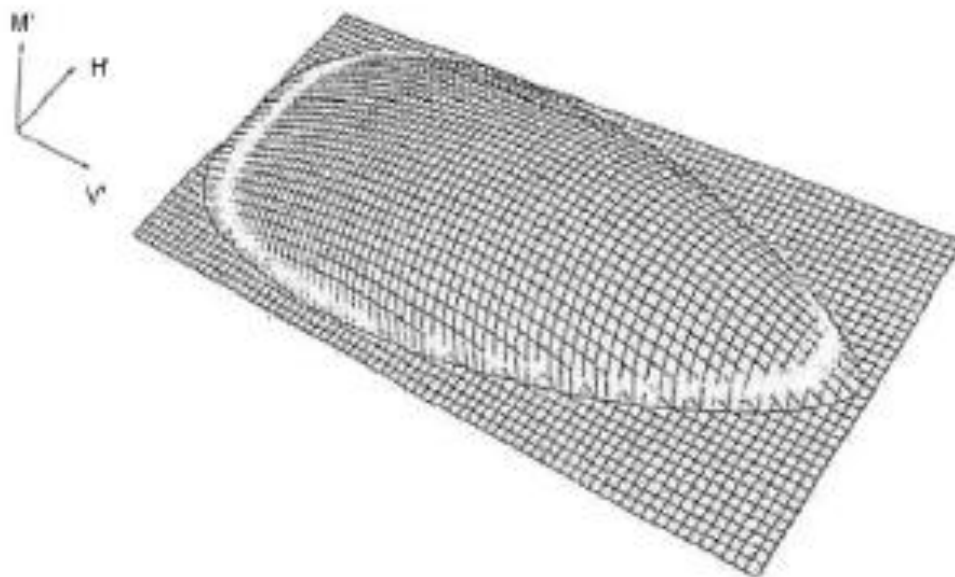


## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΗΜΑΤΑ**

---

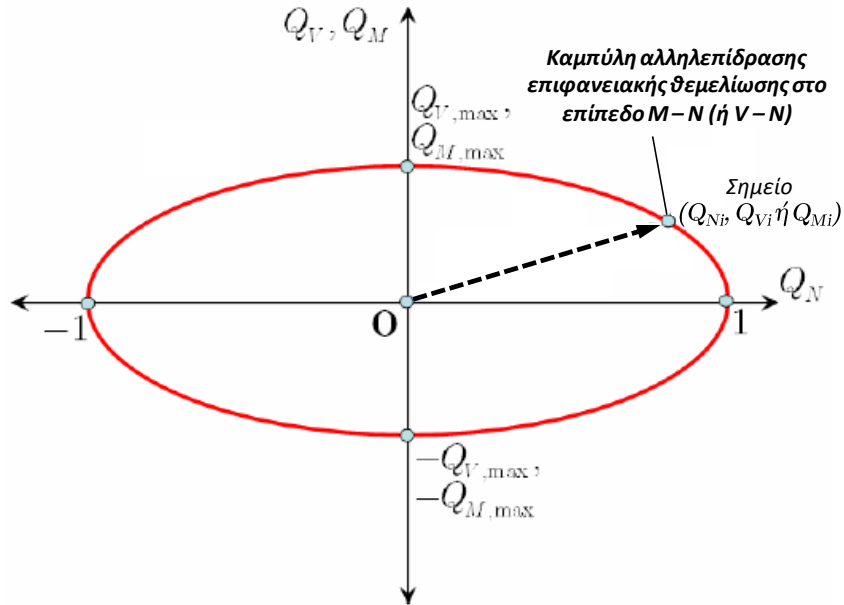
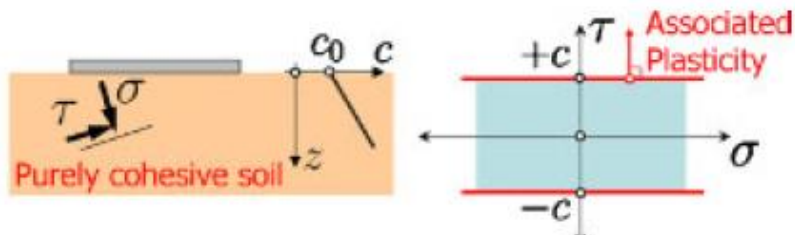


**Σχήμα 3.1.** Οι τρεις ενεργοί μετακινησιακοί βαθμοί ελευθερίας στο σημείο αναφοράς στην κορυφή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης: (α) κατακόρυφη μετατόπιση  $v$ , (β) οριζόντια μετατόπιση  $u$  και (γ) στροφή  $\theta$ . Η θεωρούμενη σύμβαση προσήμων βαδίζει στις συστάσεις των Butterfield, Housby και Gottardi [1997].

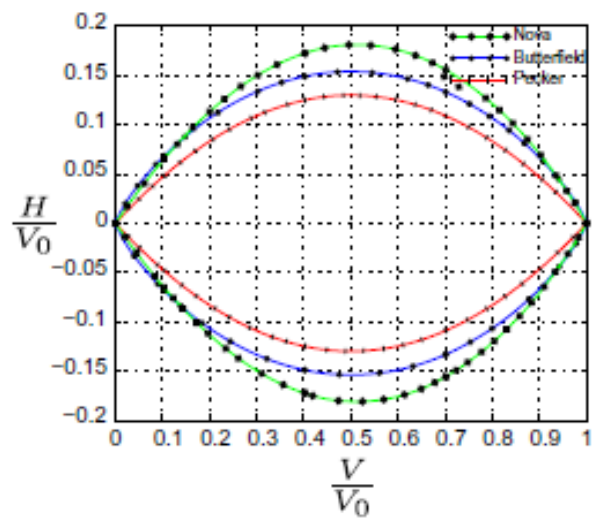
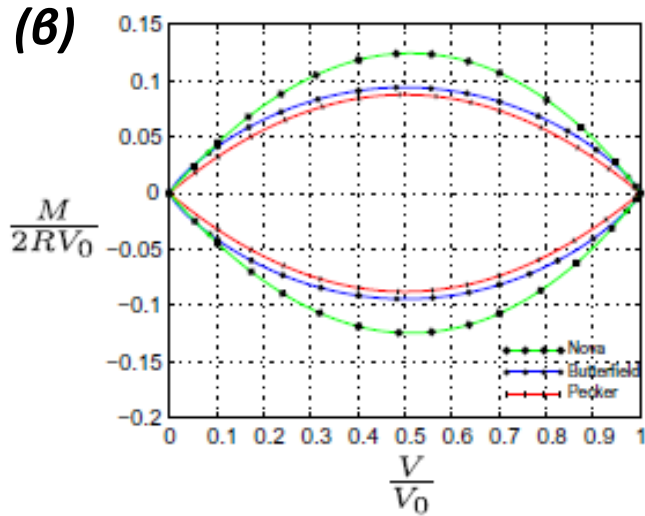
**(α)****(β)**

**Σχήμα 3.2.** (α) Επιφάνεια αλληλεπίδρασης για επιφανειακή θεμελίωση σε άμμο ("rugby ball" shaped yield surface, [Gottardi and Butterfield 1995]) και (β) επιφάνεια αλληλεπίδρασης για επιφανειακή θεμελίωση σε συνεκτικά εδάφη [Cremer, Pecker, Davenne 2001].

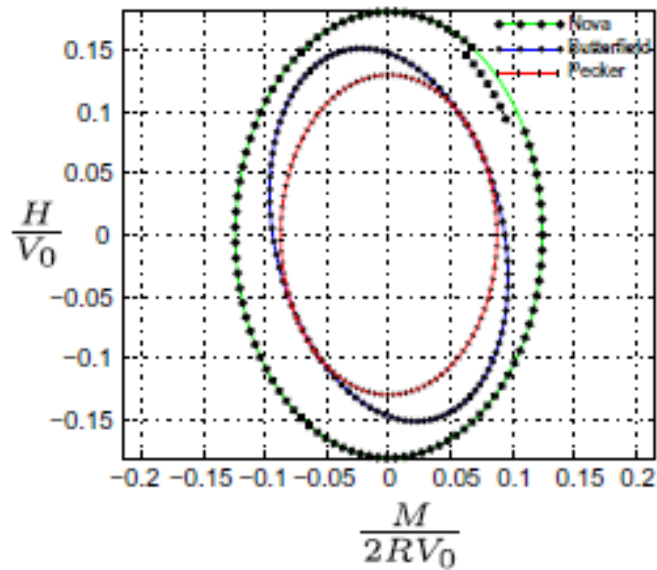
(α)



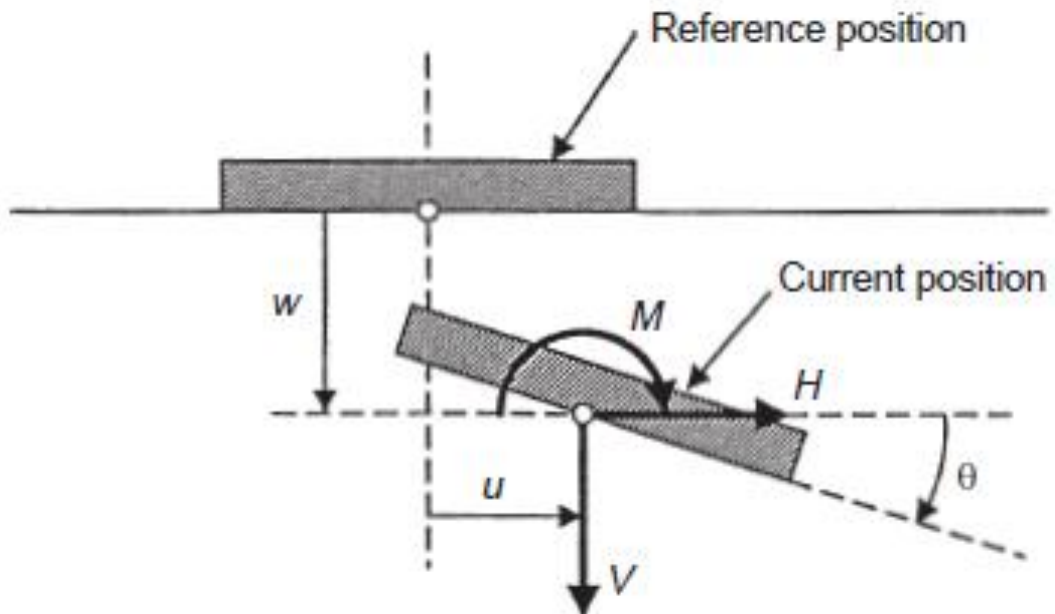
(β)



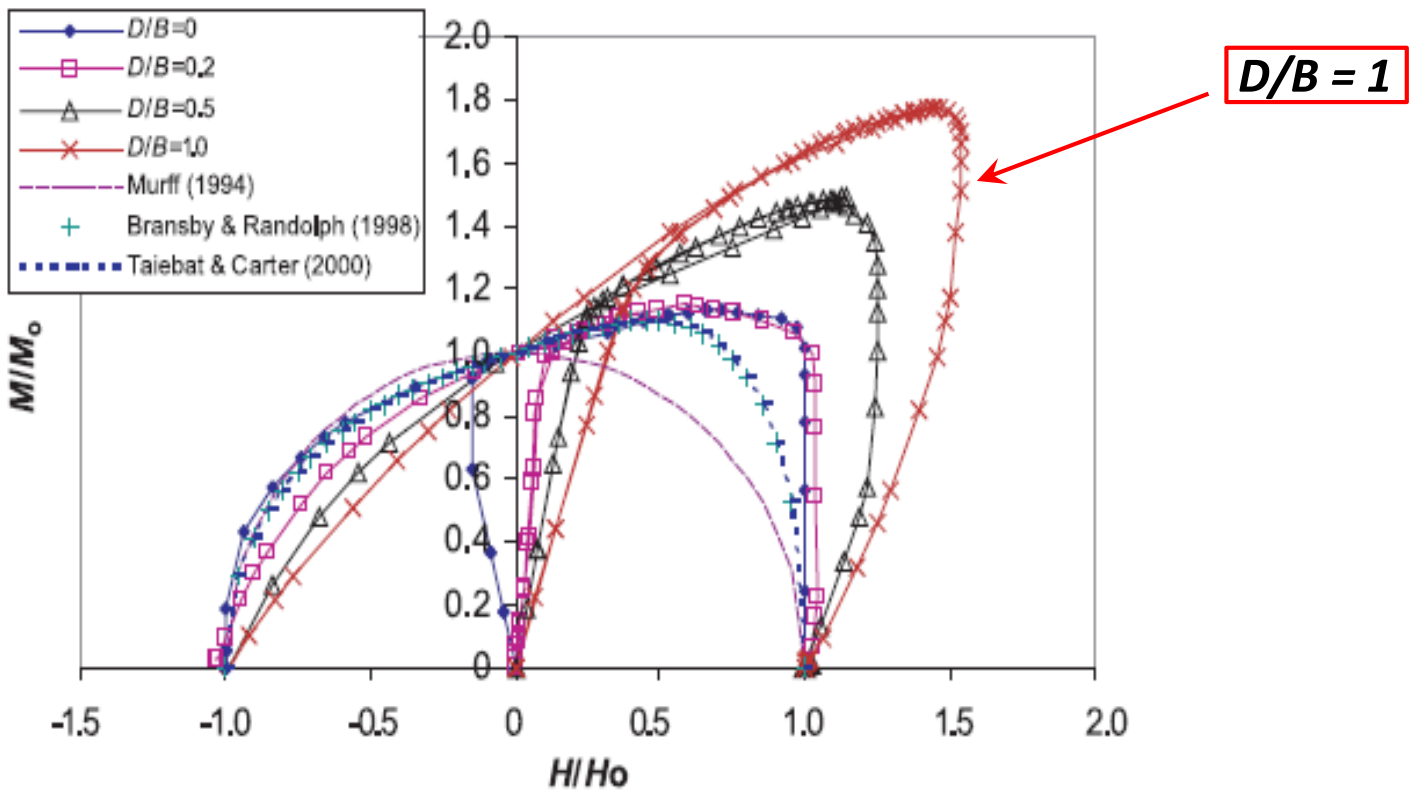
(γ)



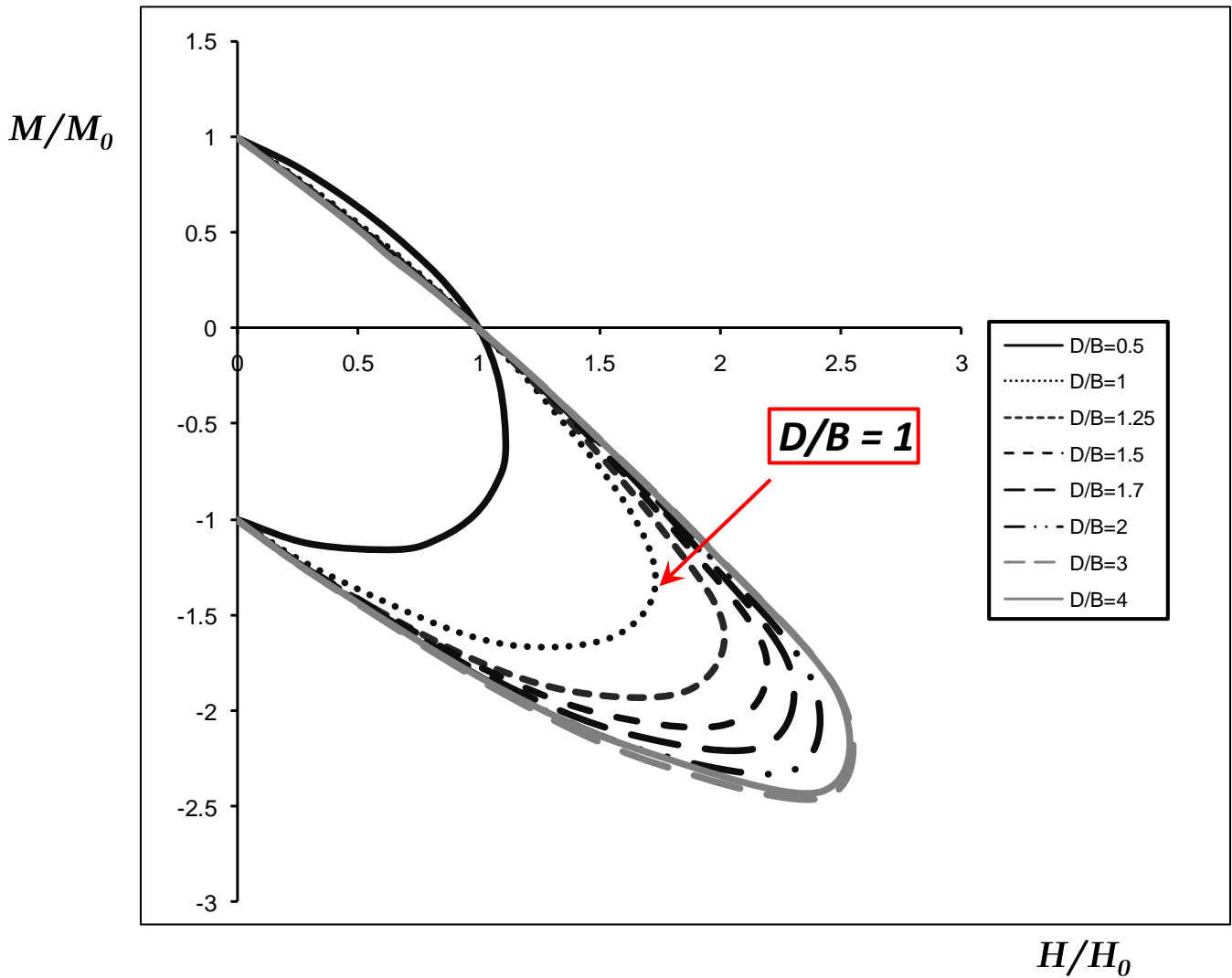
**Σχήμα 3.3.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελιώσεων στα τρία κύρια επίπεδα φόρτισης: (i) κύριο επίπεδο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης- οριζόντιας δύναμης, (ii) κύριο επίπεδο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης- ροπής και (iii) κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Η περίπτωση (α) αναφέρεται, κυρίως, σε έρευνες σχετικά με συνεκτικά εδάφη [Chatzizogios, Figini, Pecker and Salençon 2011] και η περίπτωση (β) σε έρευνες για την συμπεριφορά των επιφανειακών θεμελιώσεων σε άμμους [π.χ. Nova and Montrasio 1991]. Σε κάθε περίπτωση, παρατηρείται πλήρης συμμετρία στο σχήμα (shape) των καμπυλών.



**Σχήμα 3.4.** Σύνηθες σημείο αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων (το κέντρο της βάσης) για την μελέτη της απόκρισης των επιφανειακών θεμελιώσεων υπό εγκάρσια φόρτιση.

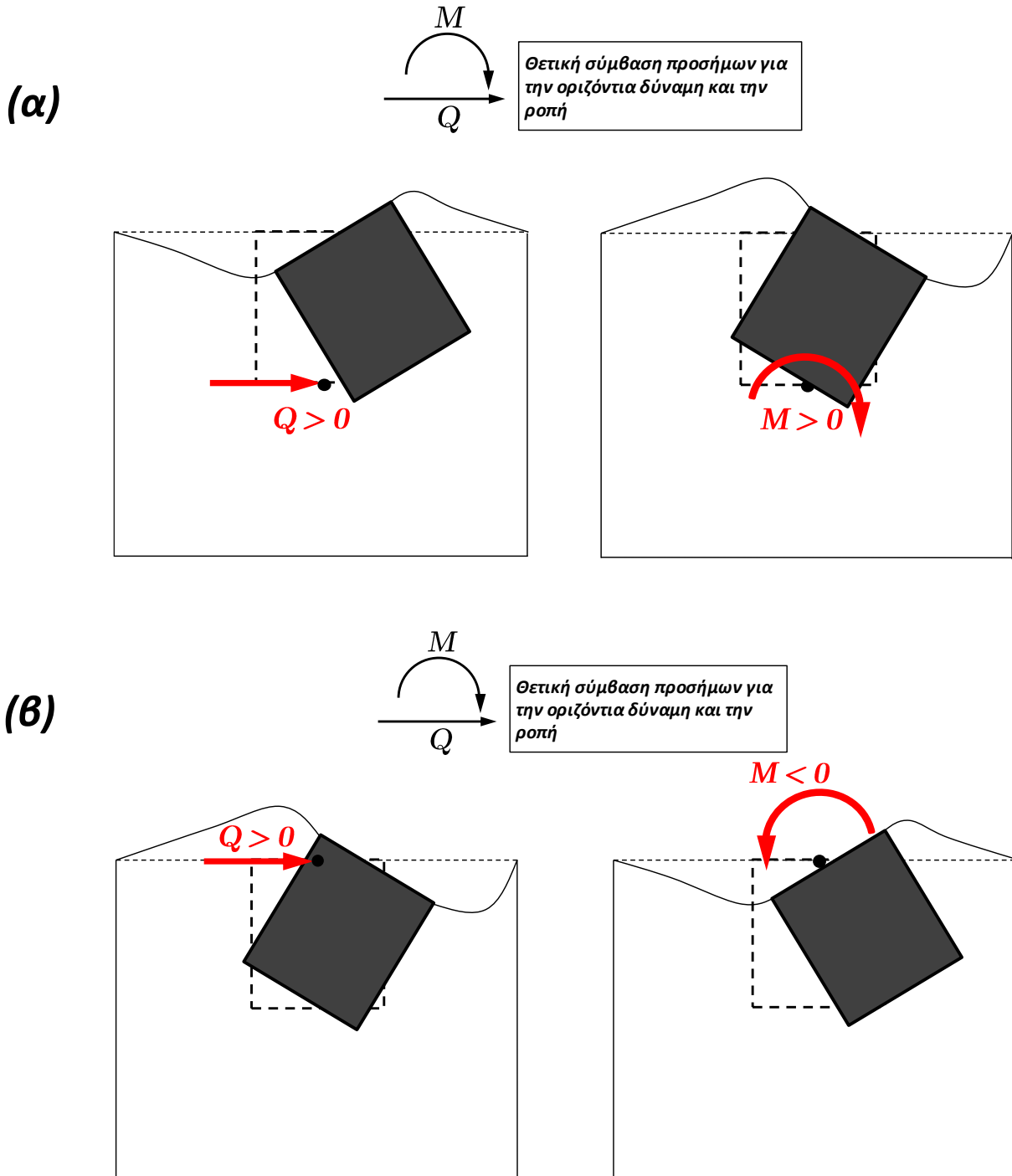


**Σχήμα 3.5.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται η καμπύλη αλληλεπίδρασης που αναφέρεται σε λόγο εγκιβωτισμού της θεμελίωσης  $D/B = 1$ . Ως σημείο αναφοράς των δυνάμεων έχει επιλεγεί το κέντρο της βάσης της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης.

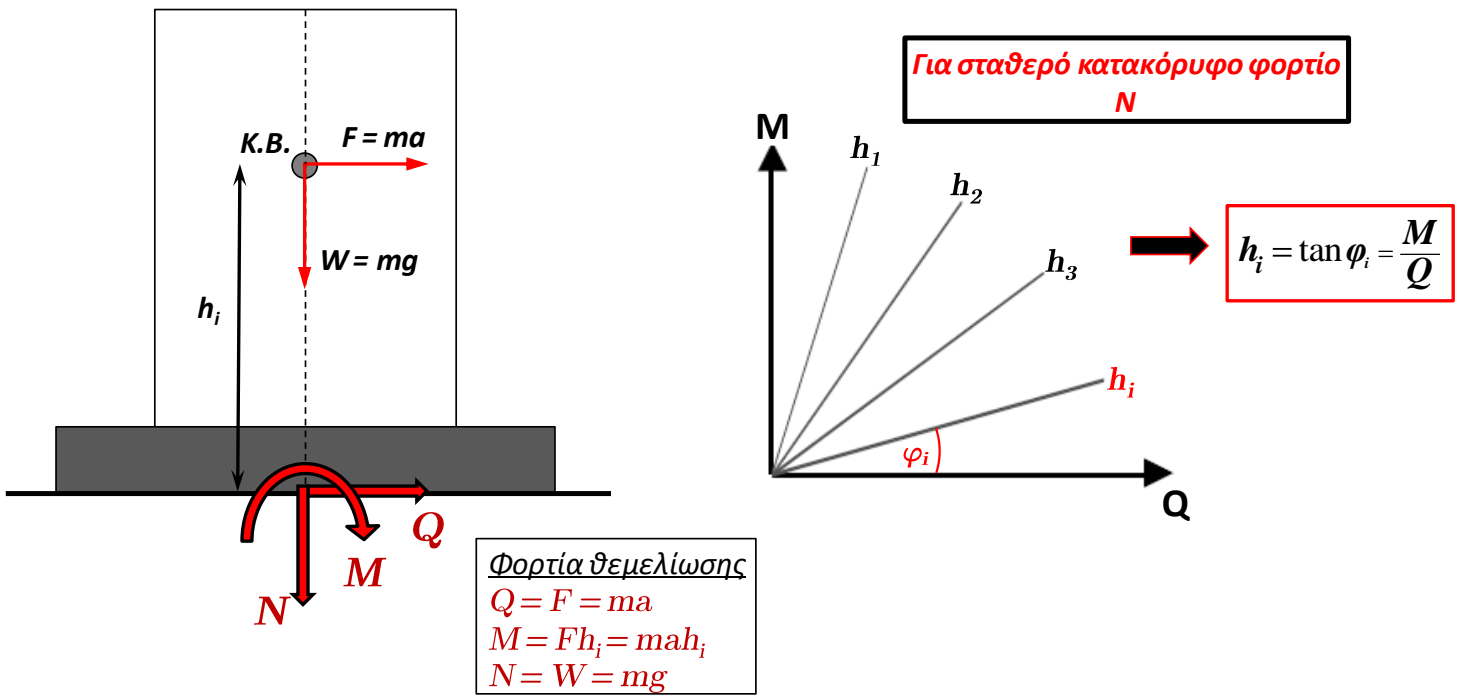


**Σχήμα 3.6.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται η καμπύλη αλληλεπίδρασης που αναφέρεται σε λόγο εγκιβωτισμού της θεμελίωσης  $D/B = 1$ . Ως σημείο αναφοράς των δυνάμεων έχει επιλεγεί το κέντρο της κορυφής της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης.

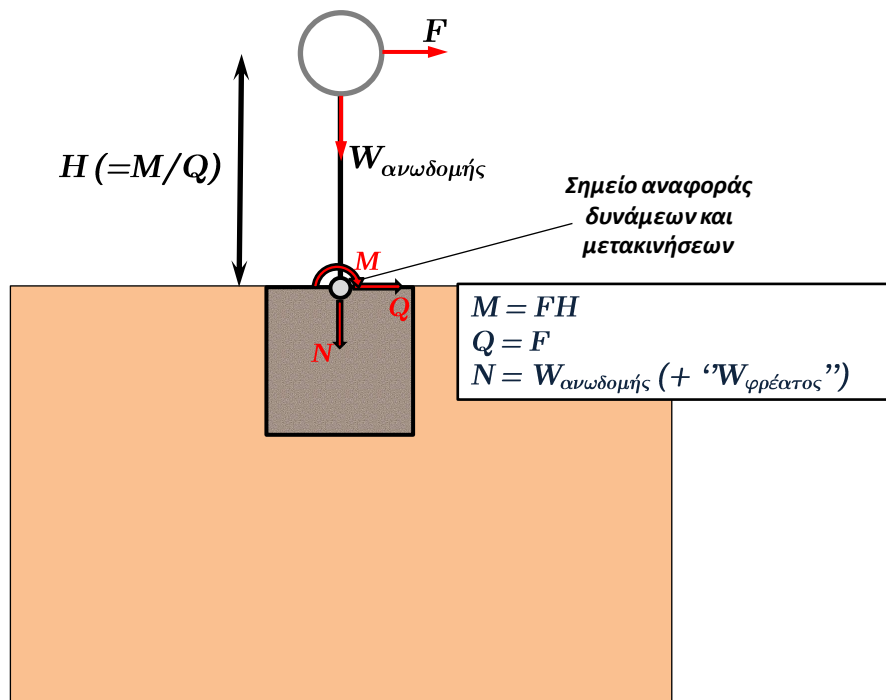




**Σχήμα 3.7.** Ποιοτική σχεδίαση της παραμόρφωσης του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης, για εφαρμογή “ανταγωνιστικής” φόρτισης: (α) στο κέντρο της βάσης της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης και (β) στο κέντρο της κορυφής της. Στην πρώτη περίπτωση, ο κλάδος της υπεραντοχής των καμπυλών αλληλεπίδρασης θα σημειωθεί στο 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του επιπέδου  $M - Q$ , ενώ στην δεύτερη περίπτωση, ο κλάδος της υπεραντοχής θα σημειωθεί στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο.

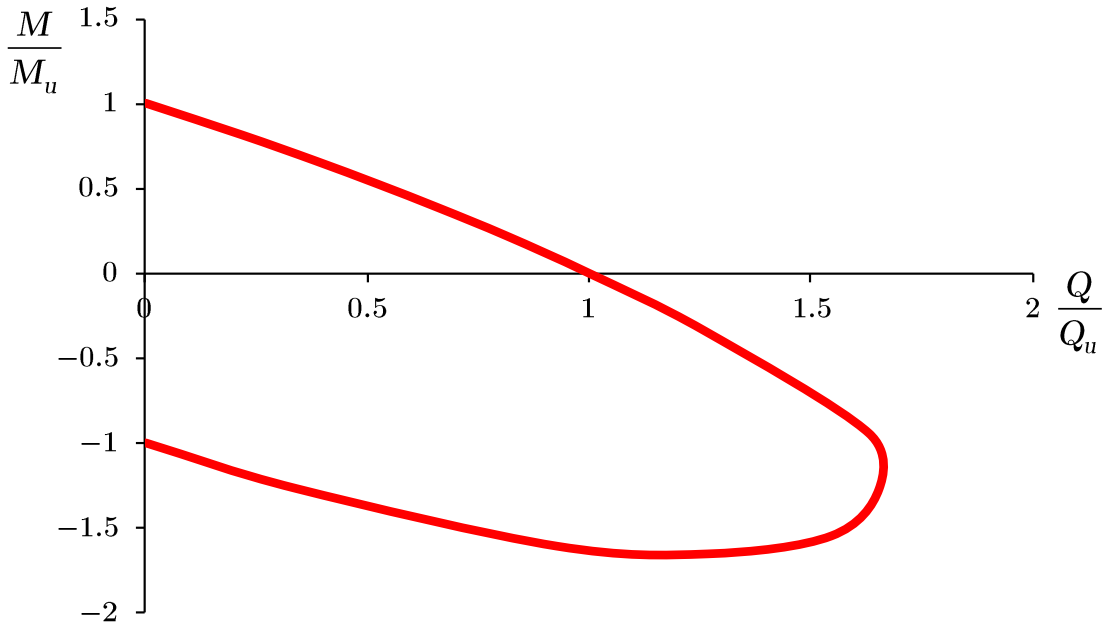


**Σχήμα 3.8.** Η έννοια των ακτινικών διαδρομών φόρτισης μιας θεμελίωσης, στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ . Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βρίσκει άμεση εφαρμογή κατά την χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων, για την μελέτη της απόκρισης των θεμελιώσεων υπό εγκάρσια φόρτιση.

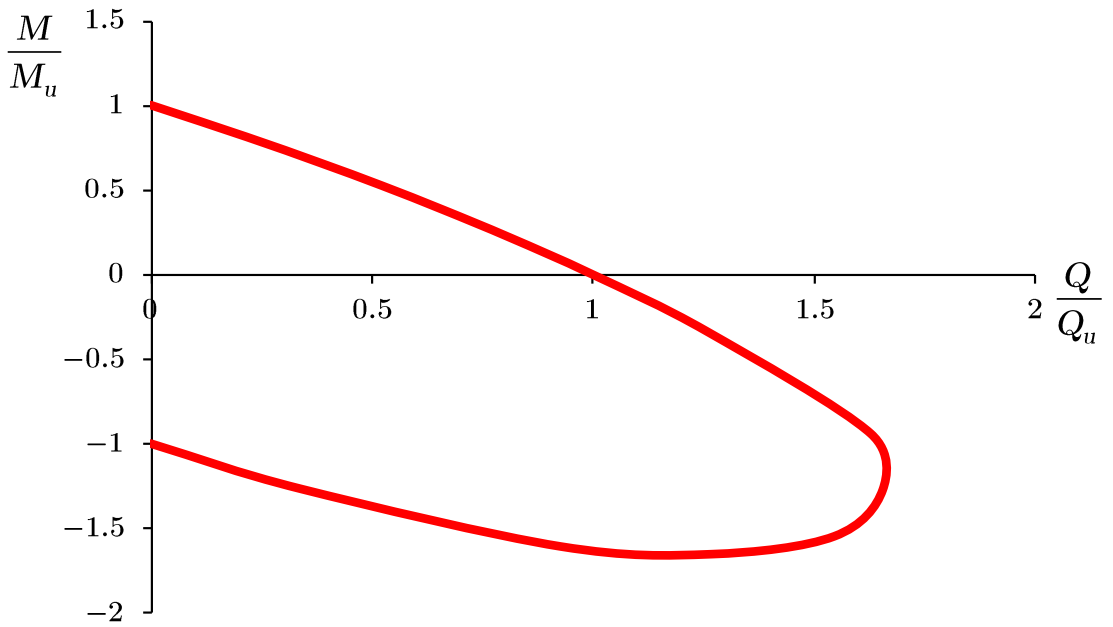


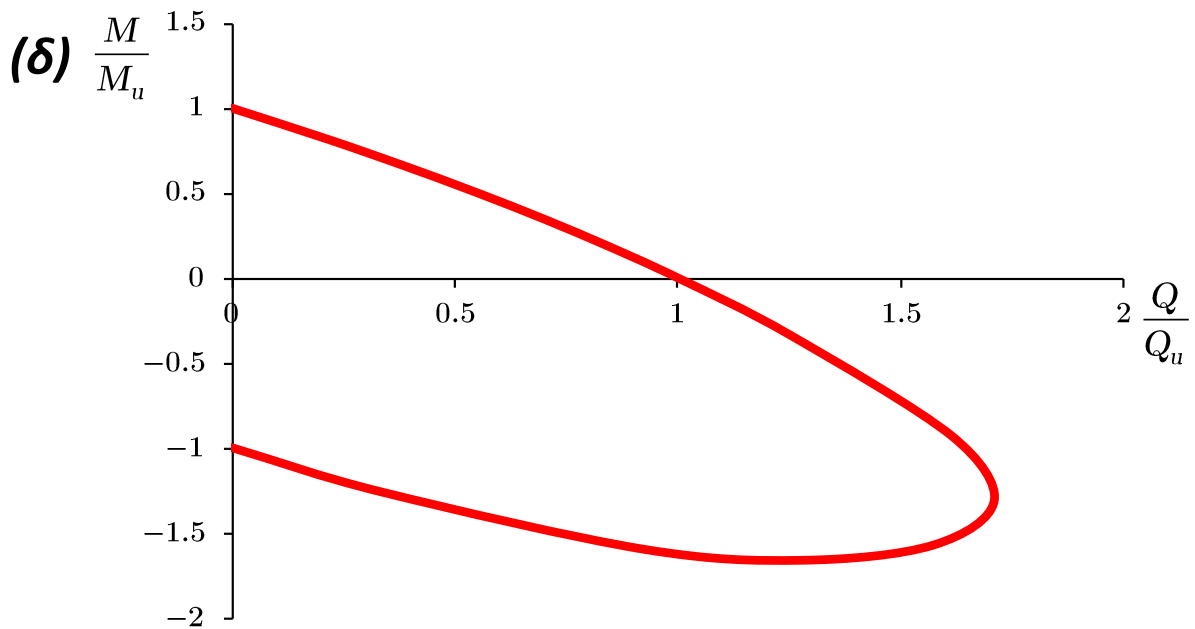
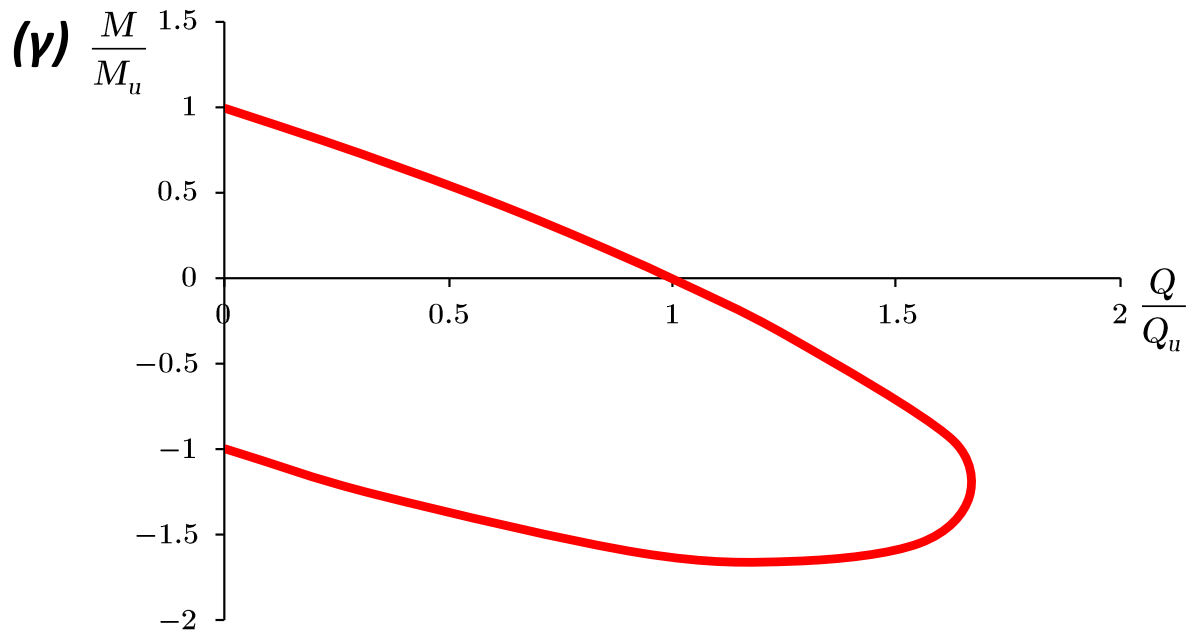
**Σχήμα 3.9.** Η έννοια των ακτινικών διαδρομών φόρτισης, εφαρμοσμένη στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Ο λόγος της ροπής προς την οριζόντια δύναμη στην κορυφή του φρέατος ισούται κάθε φορά με το (ενεργό) ύψος της ανωδομής  $H$ .

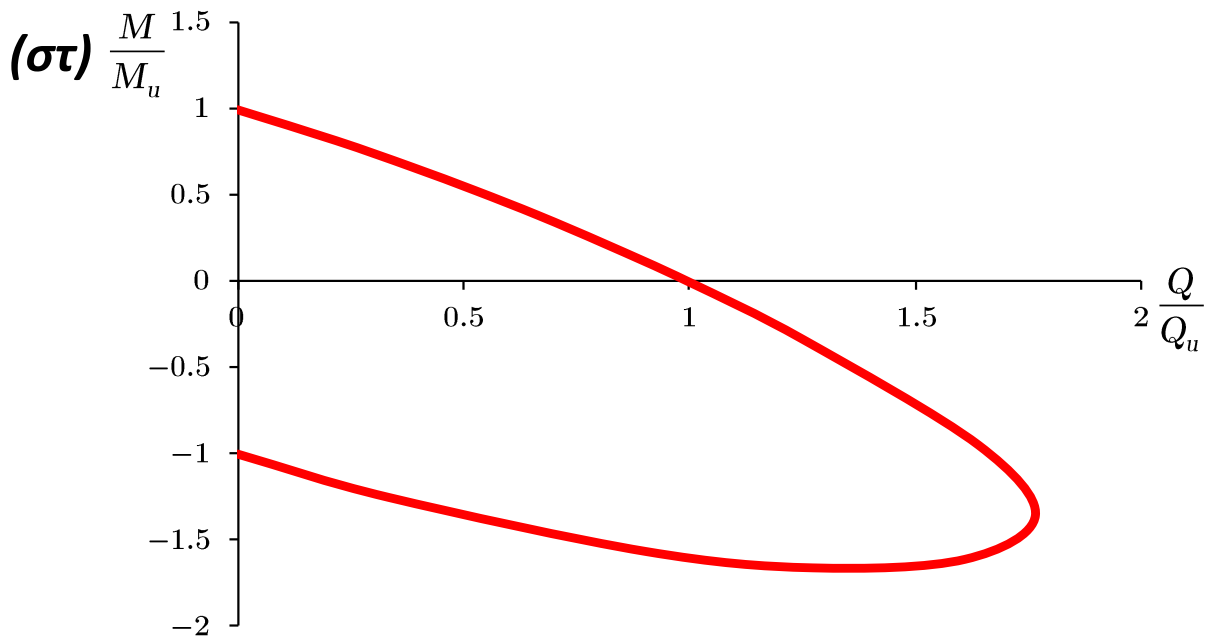
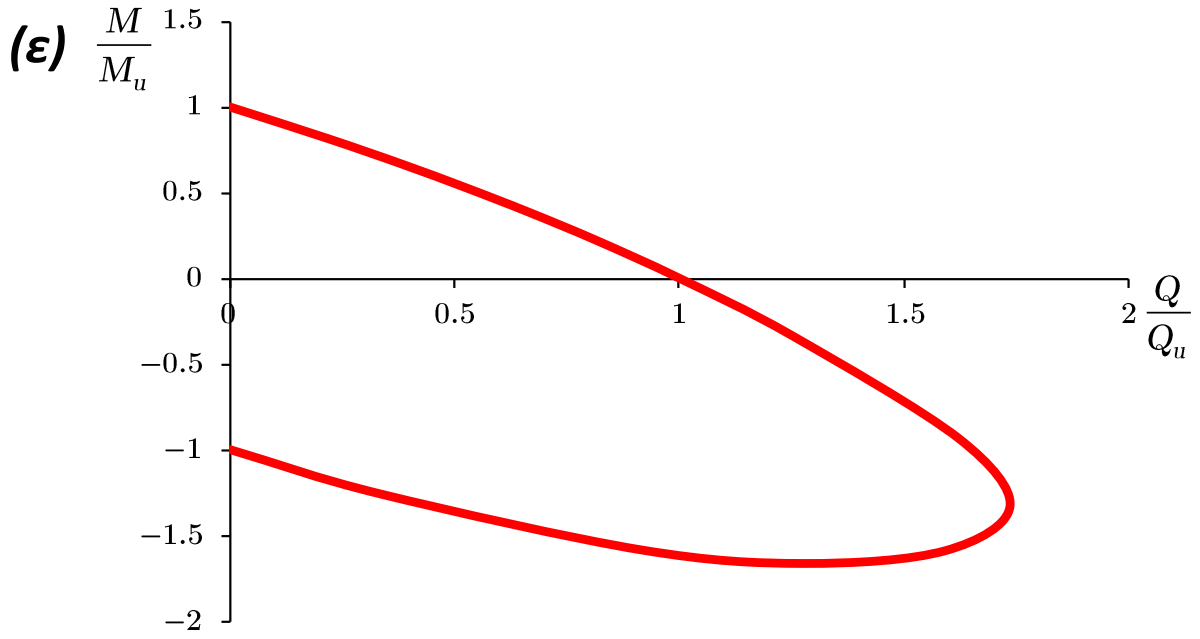
**(α)**

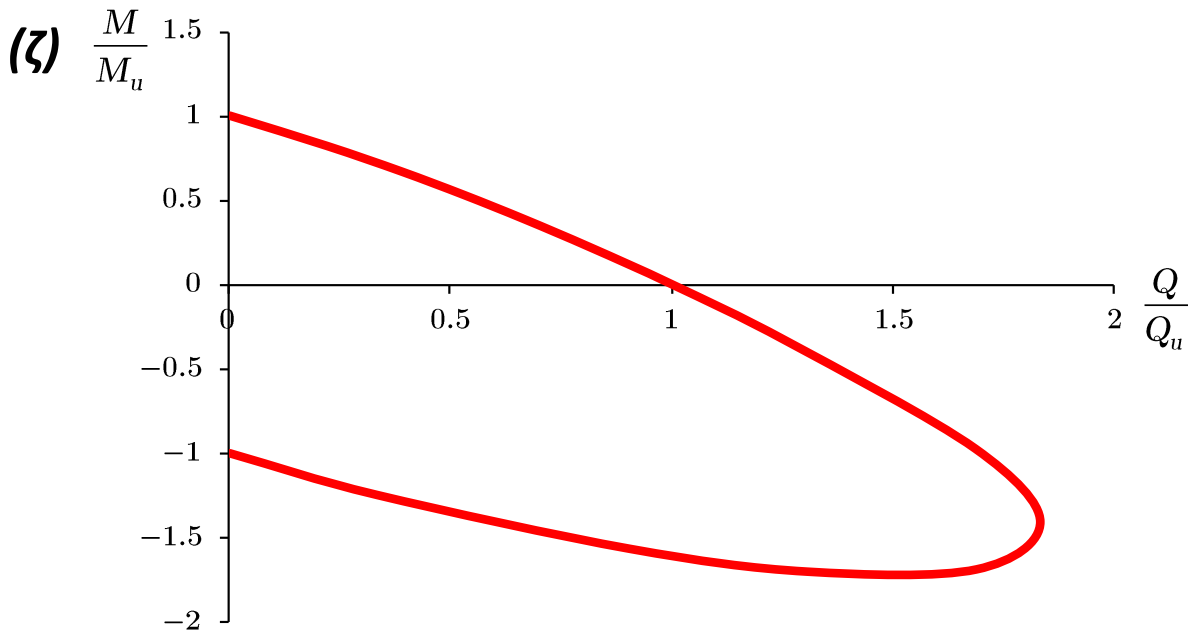


**(β)**

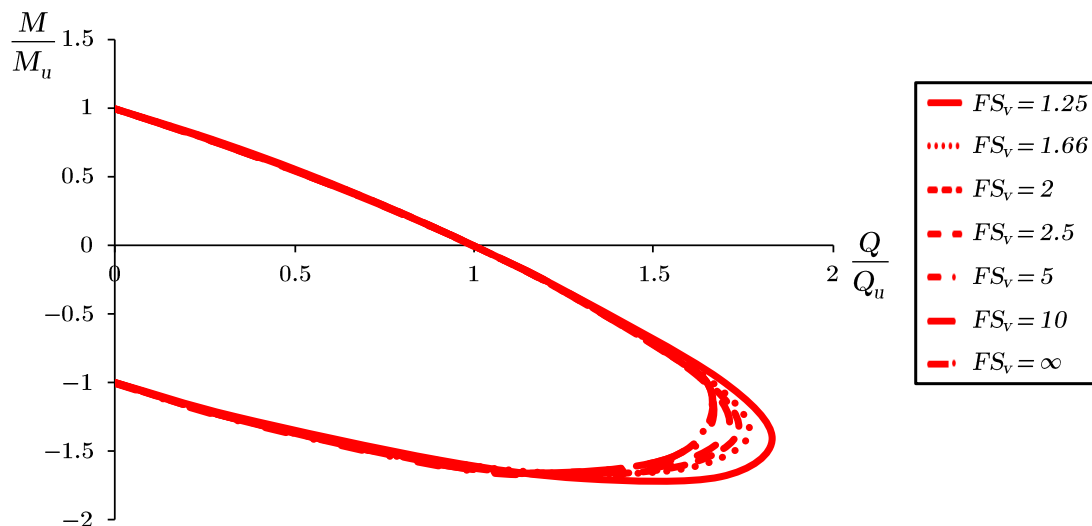




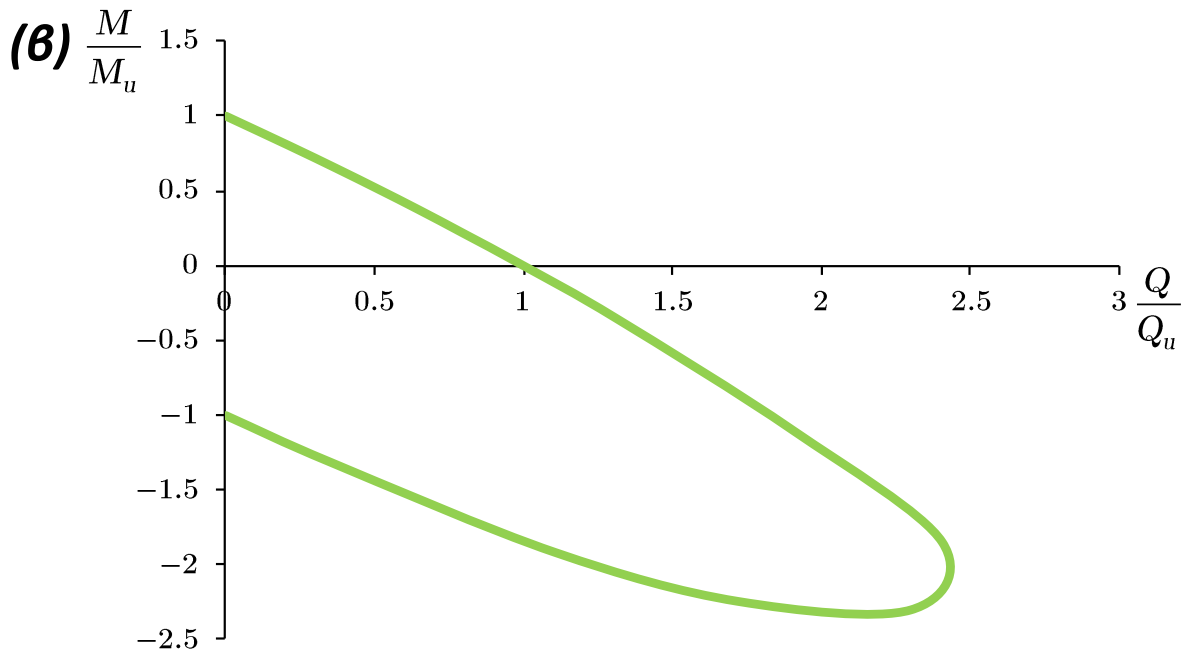
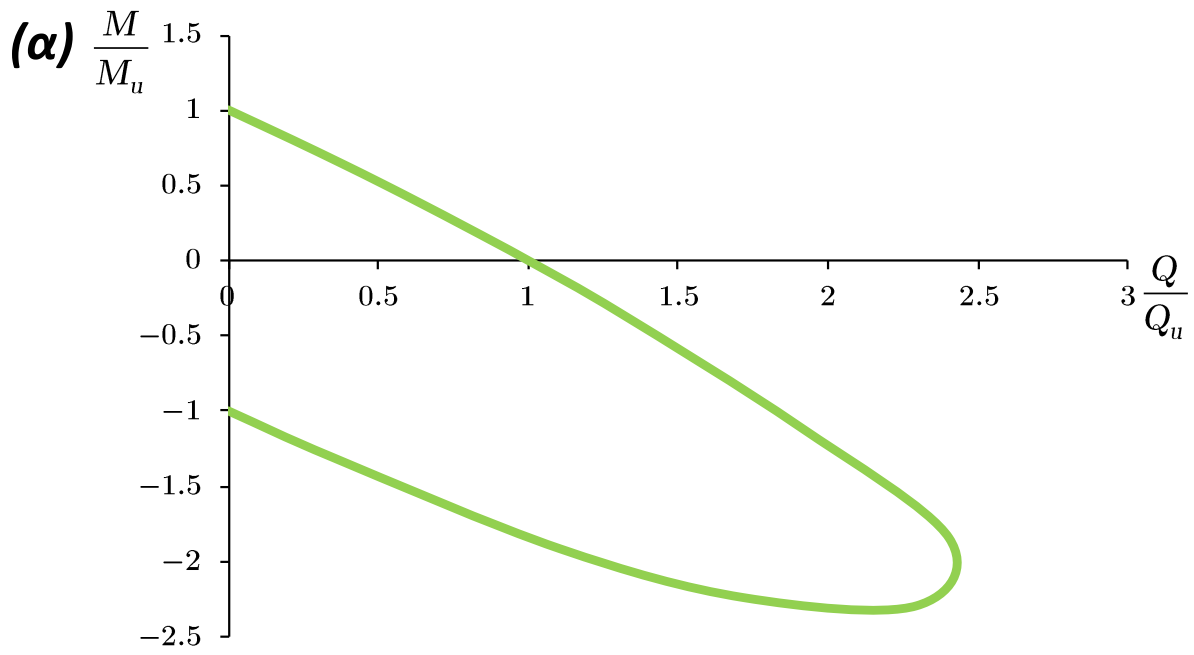


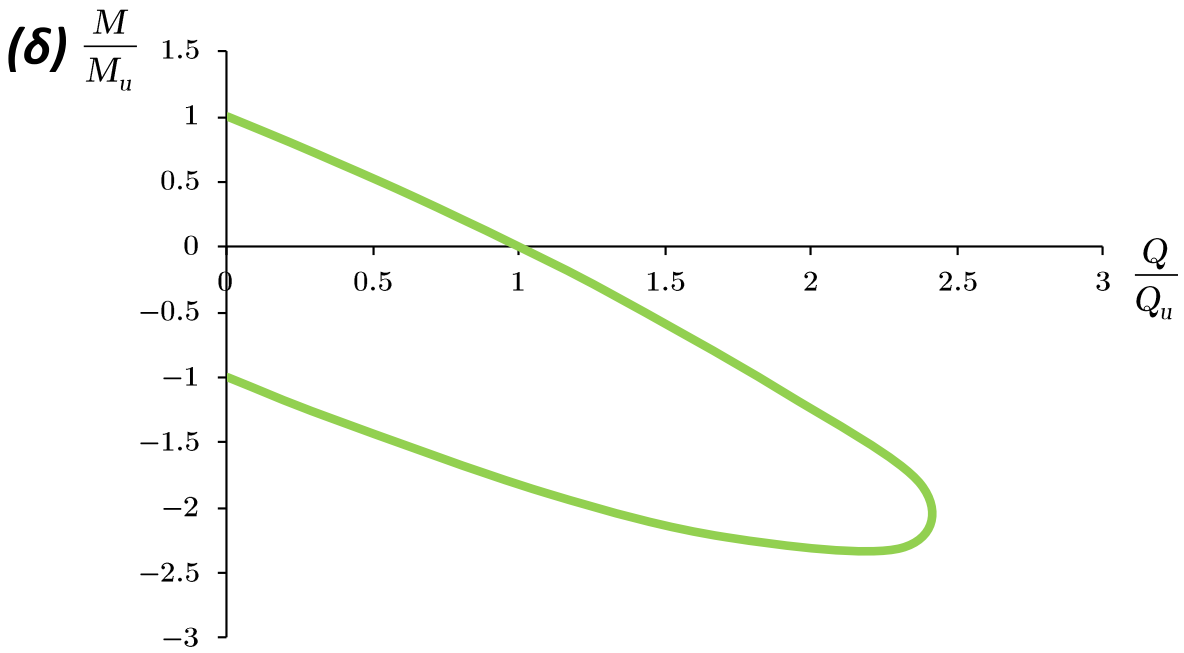
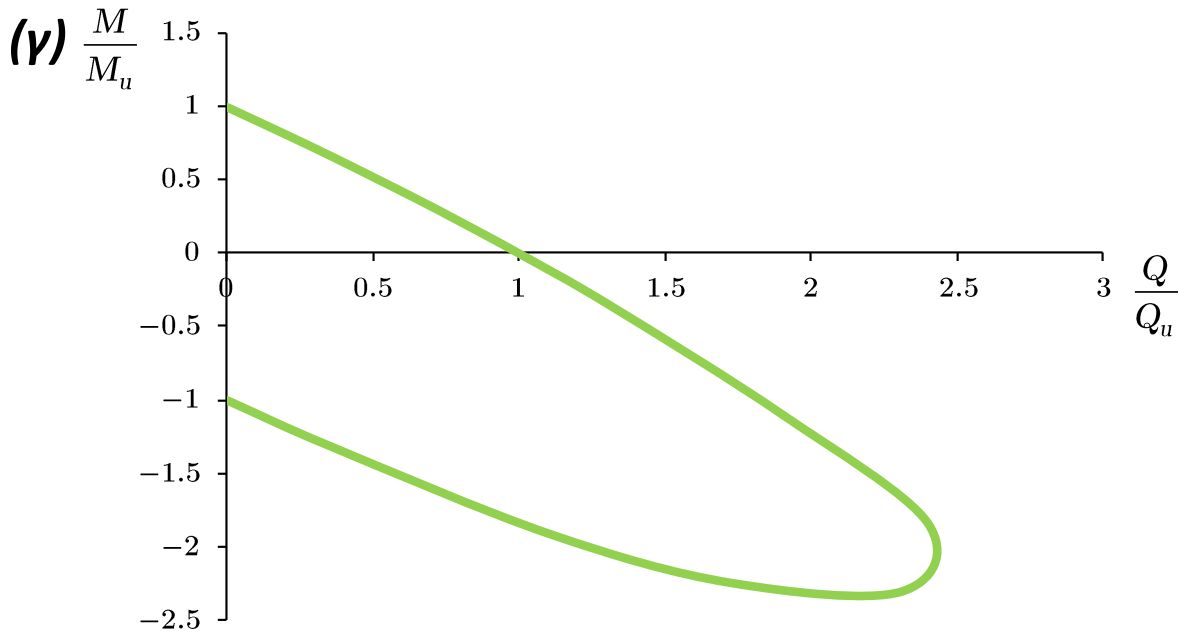


**Σχήμα 3.10.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης φρέατος με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, διαδοχικά: (α)  $FS_v = \infty$  (ή  $x = 0$ ), (β)  $FS_v = 10$  (ή  $x = 0.1$ ), (γ)  $FS_v = 5$  (ή  $x = 0.2$ ), (δ)  $FS_v = 2.5$  (ή  $x = 0.4$ ), (ε)  $FS_v = 2$  (ή  $x = 0.5$ ), (στ)  $FS_v = 1.66$  (ή  $x = 0.6$ ), (ζ)  $FS_v = 1.25$  (ή  $x = 0.8$ ).

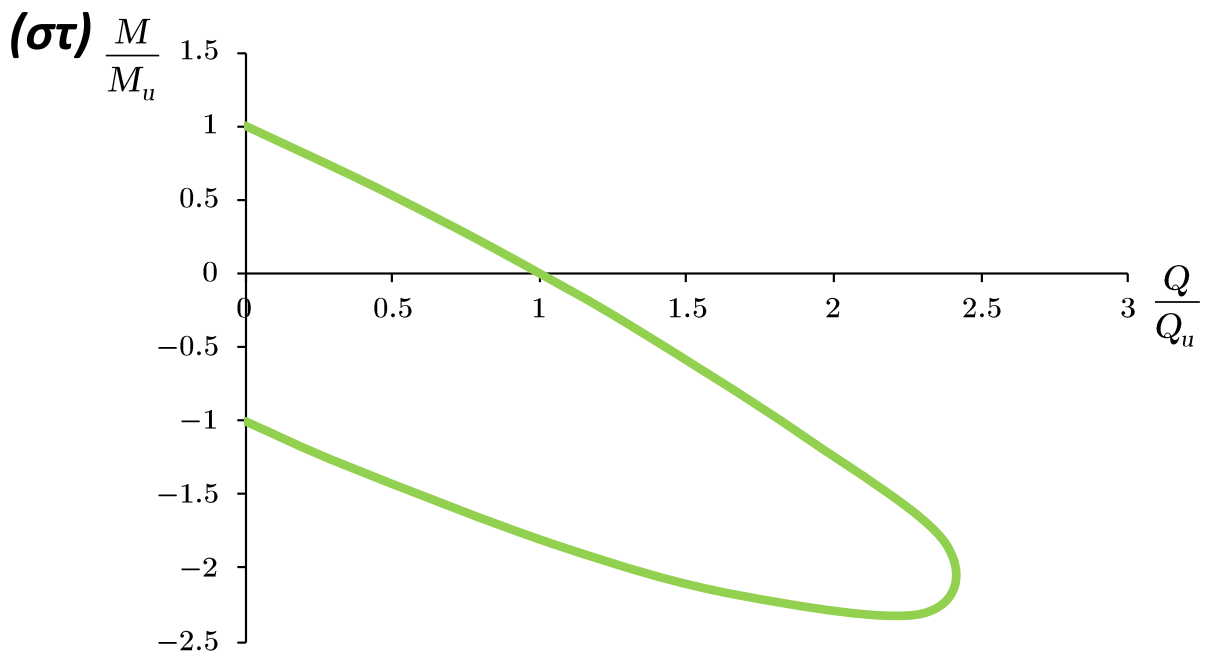
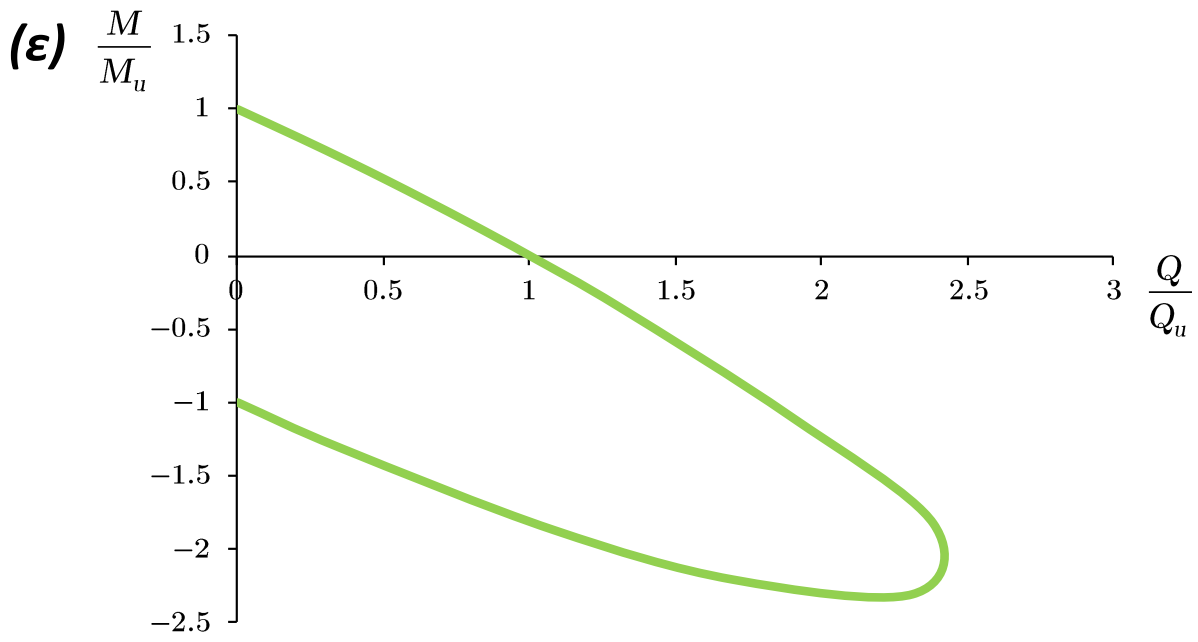


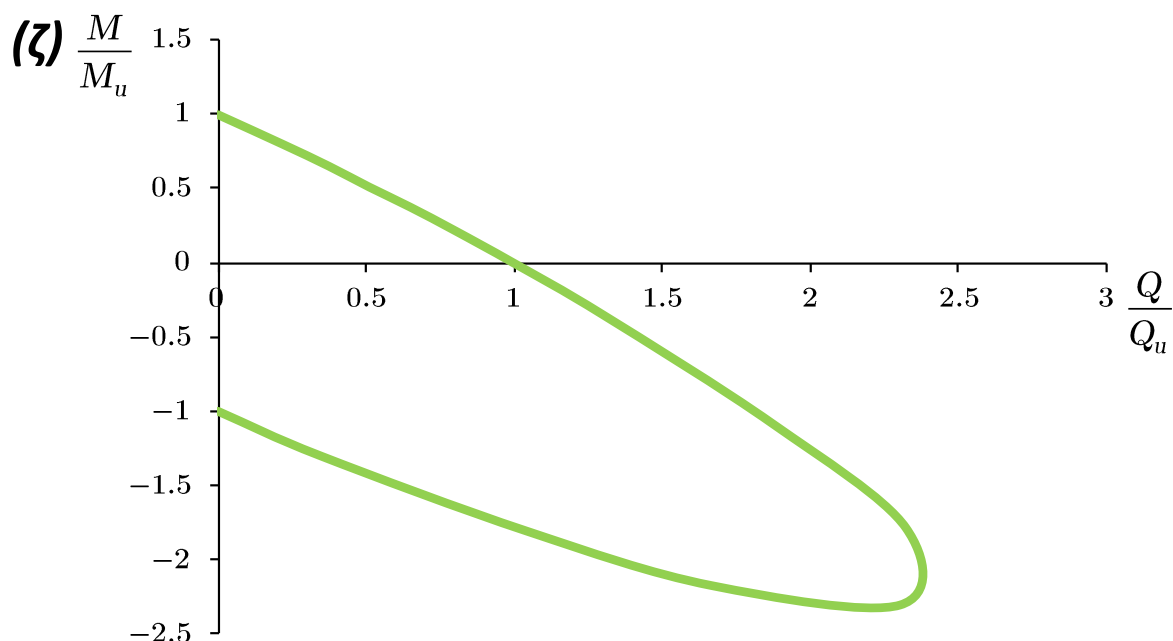
**Σχήμα 3.11.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης φρέατος με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, συγχρόνως. Εντοπίζεται θαυμαστή “ταύτιση” μεταξύ των καμπυλών.



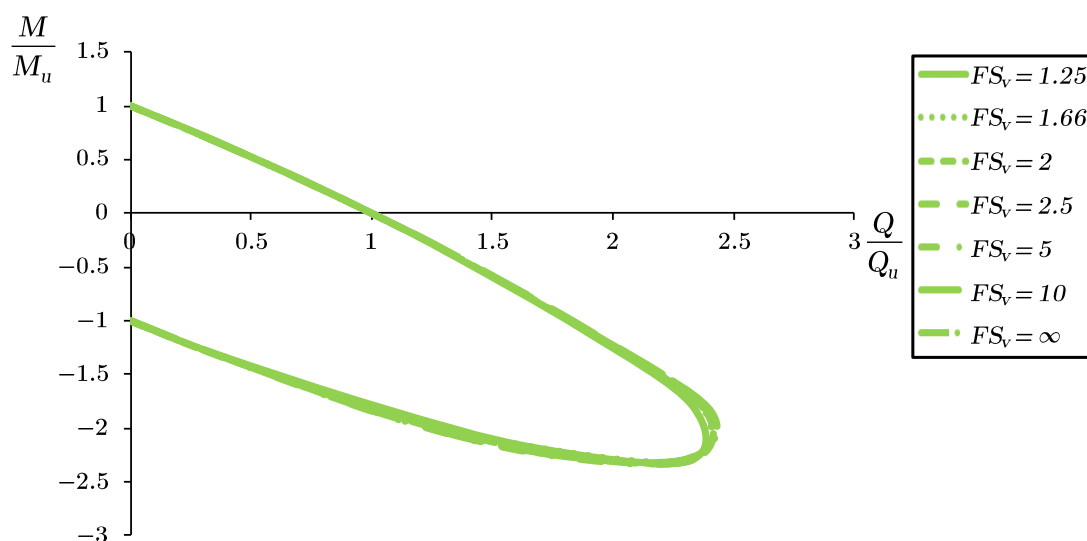




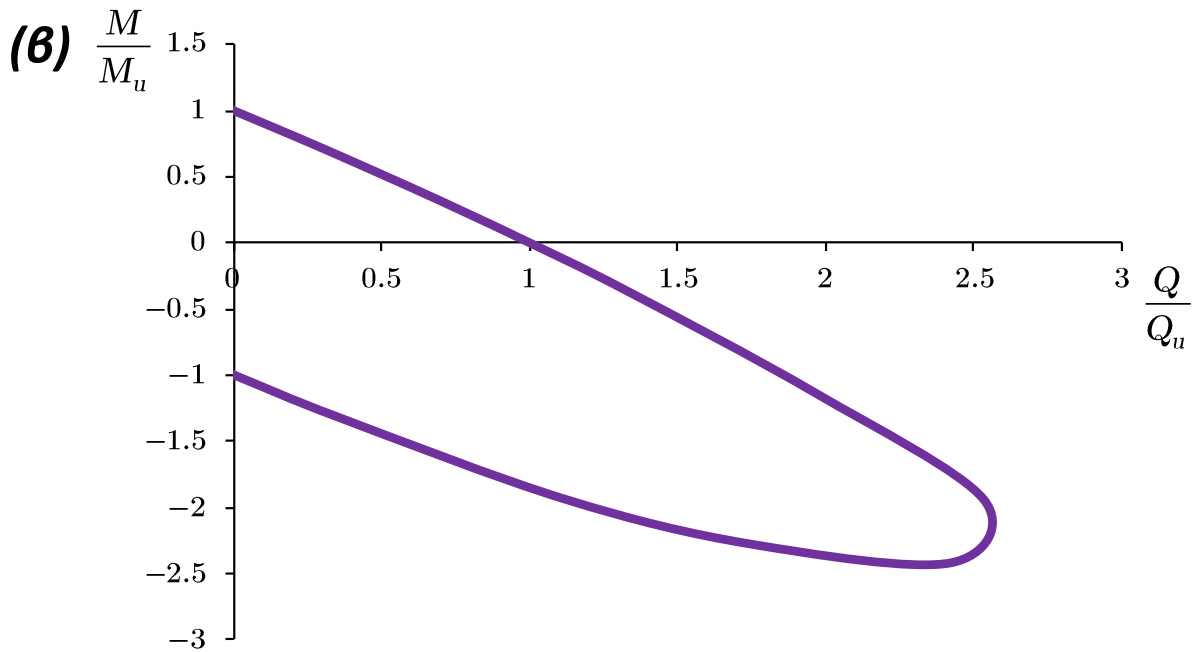
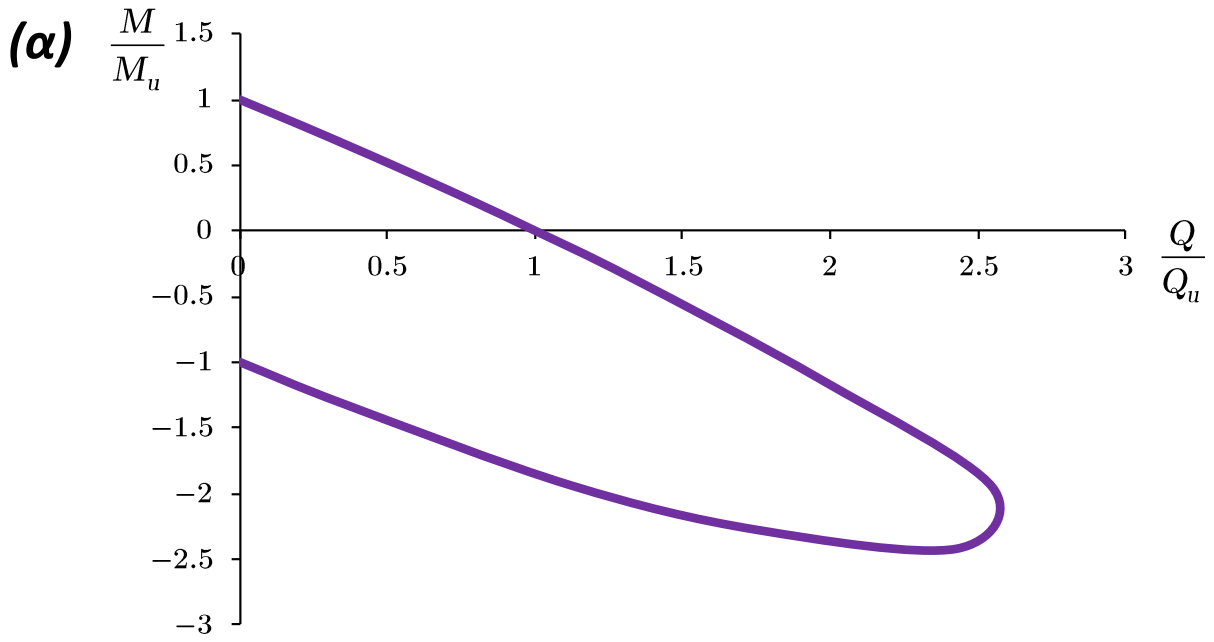


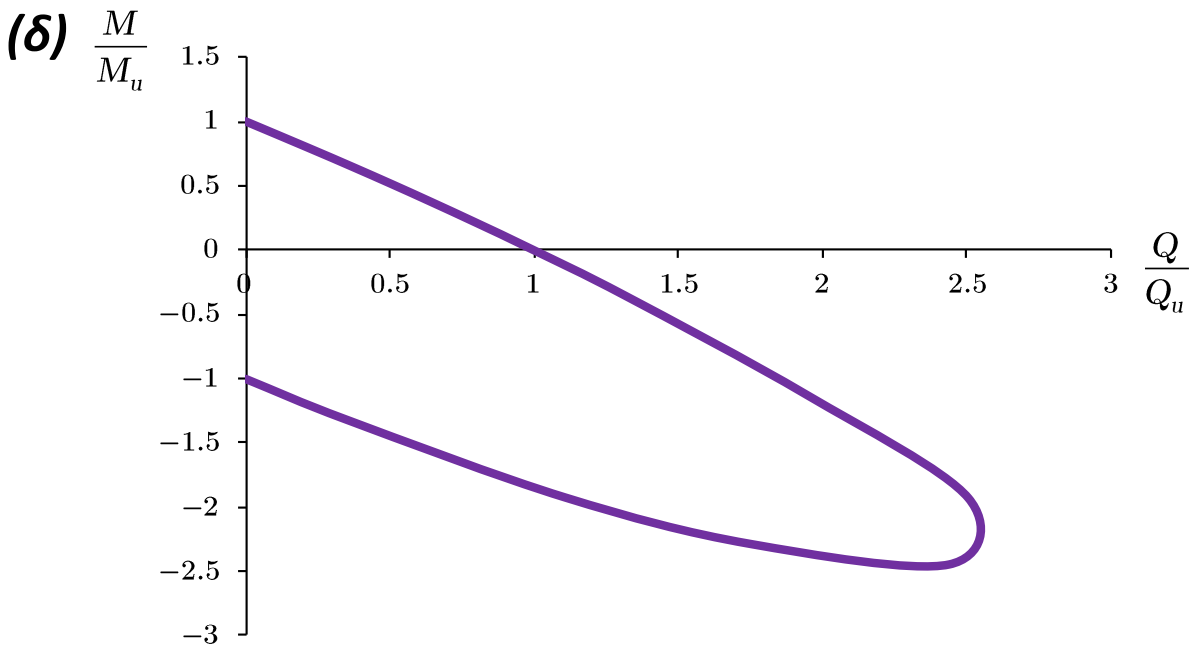
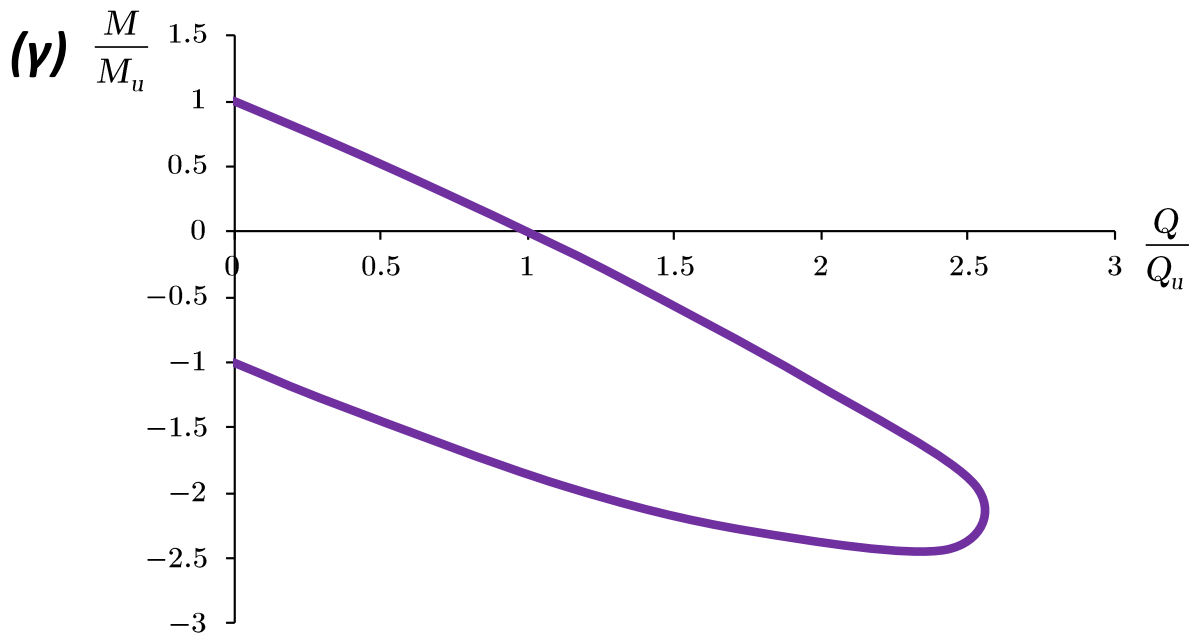


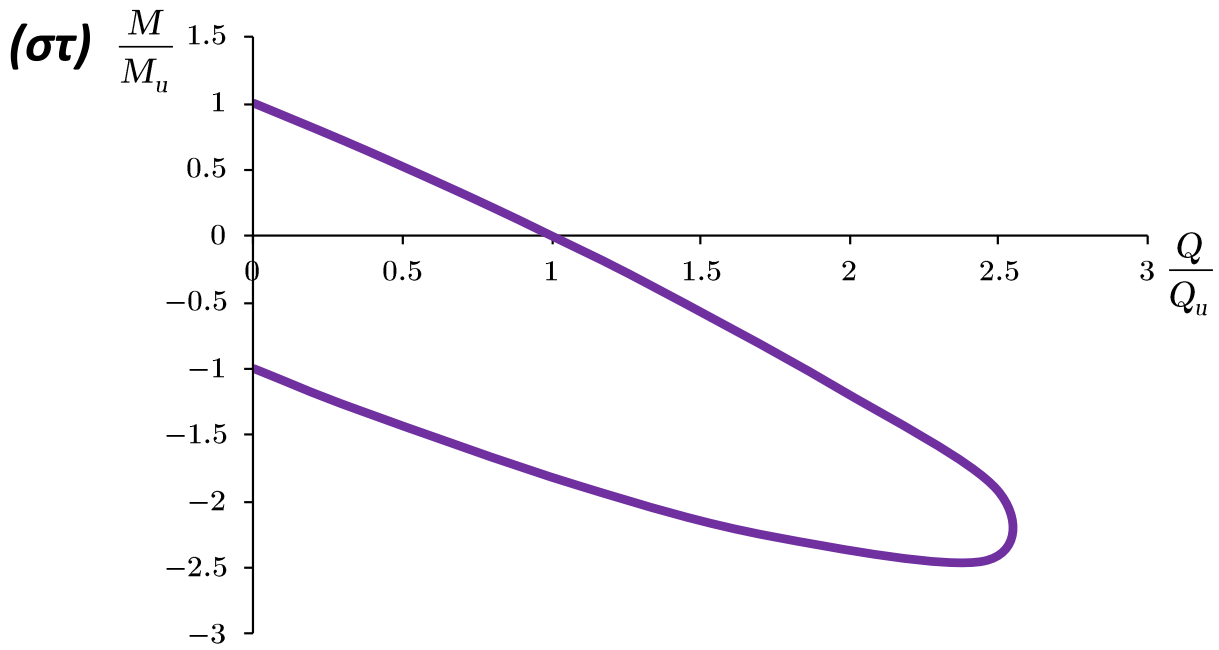
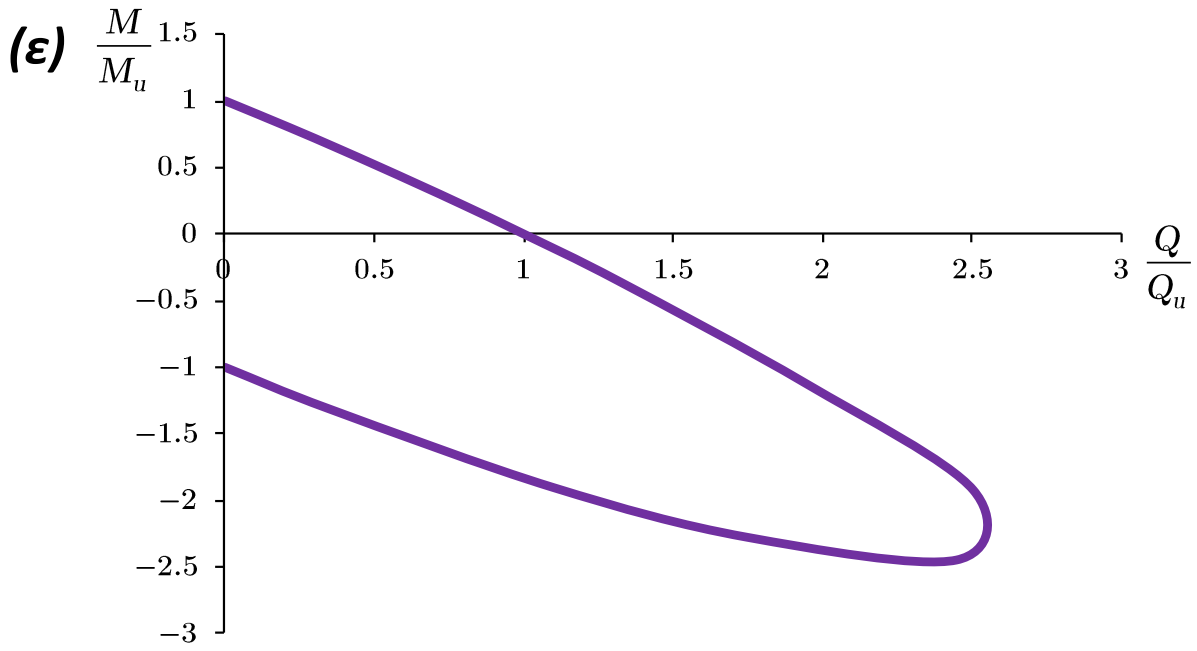
**Σχήμα 3.12.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης φρέατος με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$ , και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, διαδοχικά: (α)  $FS_v = \infty$  (ή  $x = 0$ ), (β)  $FS_v = 10$  (ή  $x = 0.1$ ), (γ)  $FS_v = 5$  (ή  $x = 0.2$ ), (δ)  $FS_v = 2.5$  (ή  $x = 0.4$ ), (ε)  $FS_v = 2$  (ή  $x = 0.5$ ), (στ)  $FS_v = 1.66$  (ή  $x = 0.6$ ), (ζ)  $FS_v = 1.25$  (ή  $x = 0.8$ ).

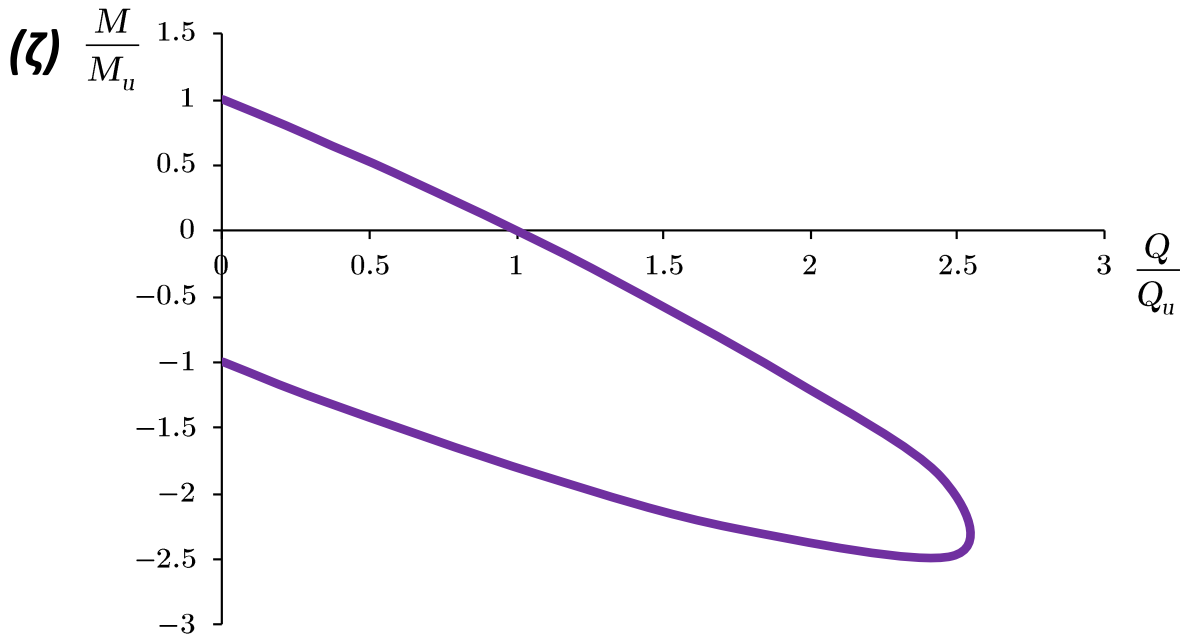


**Σχήμα 3.13.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης φρέατος με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$ , και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, συγχρόνως. Εντοπίζεται θαυμαστή ταύτιση μεταξύ των καμπυλών.

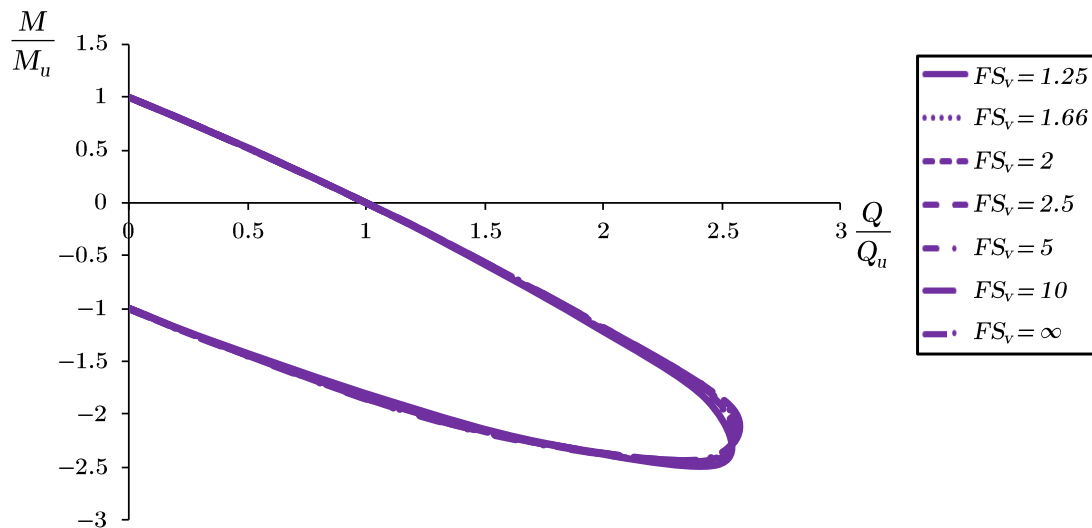




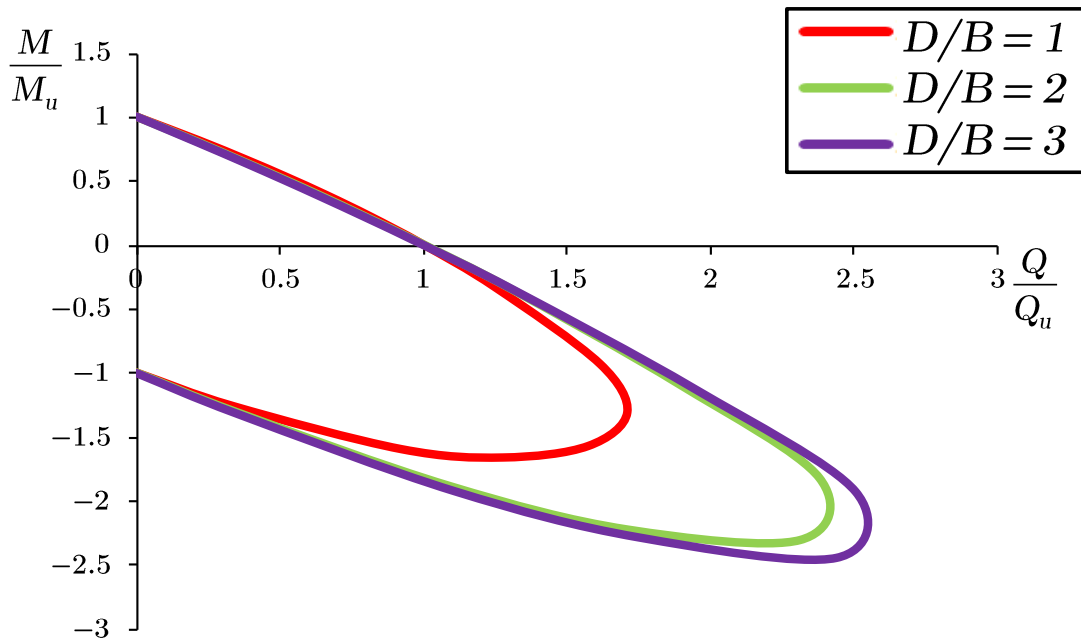




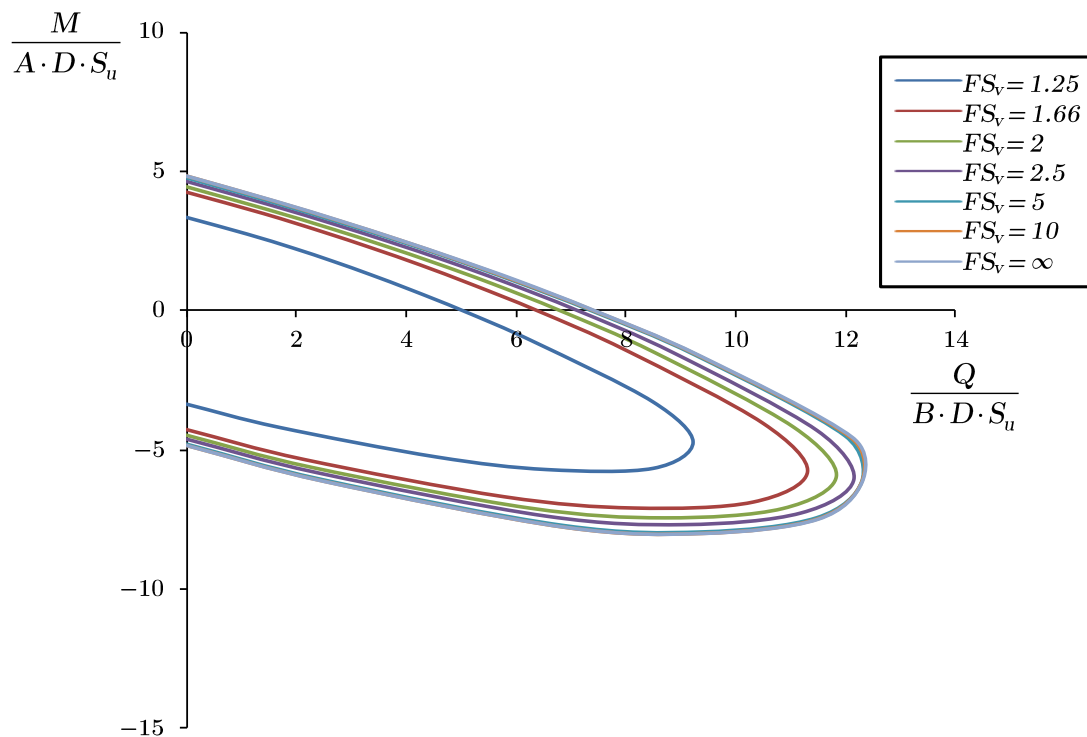
**Σχήμα 3.14.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης φρέατος με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ , και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, διαδοχικά: (α)  $FS_v = \infty$  (ή  $x = 0$ ), (β)  $FS_v = 10$  (ή  $x = 0.1$ ), (γ)  $FS_v = 5$  (ή  $x = 0.2$ ), (δ)  $FS_v = 2.5$  (ή  $x = 0.4$ ), (ε)  $FS_v = 2$  (ή  $x = 0.5$ ), (στ)  $FS_v = 1.66$  (ή  $x = 0.6$ ), (ζ)  $FS_v = 1.25$  (ή  $x = 0.8$ ).



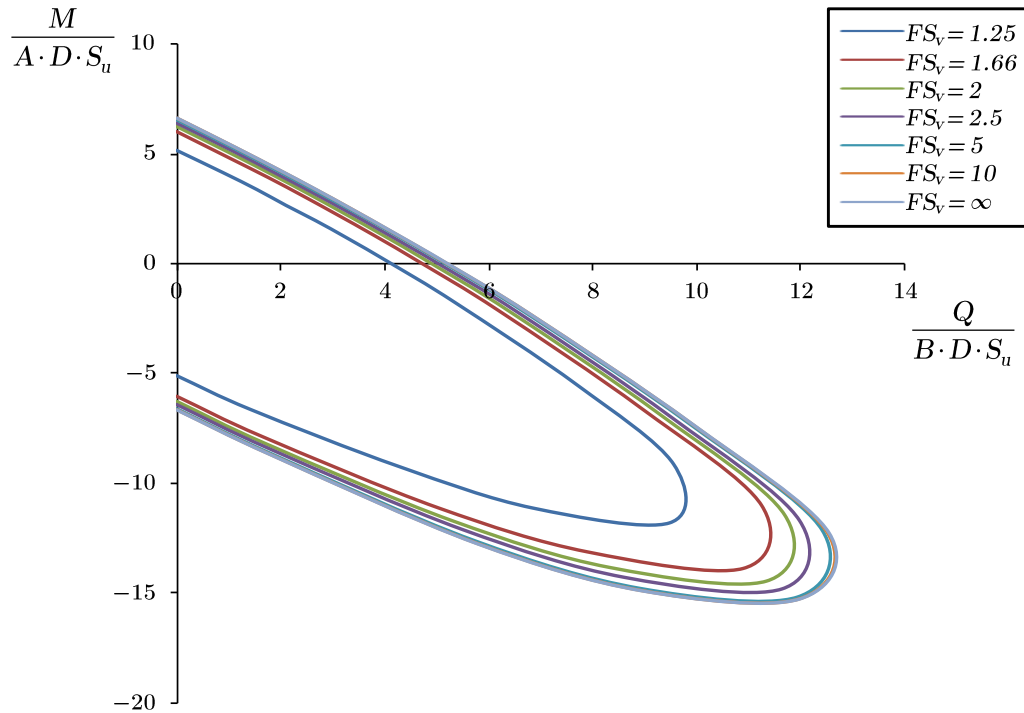
**Σχήμα 3.15.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης φρέατος με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ , και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, συγχρόνως. Εντοπίζεται θαυμαστή ταύτιση μεταξύ των καμπυλών.



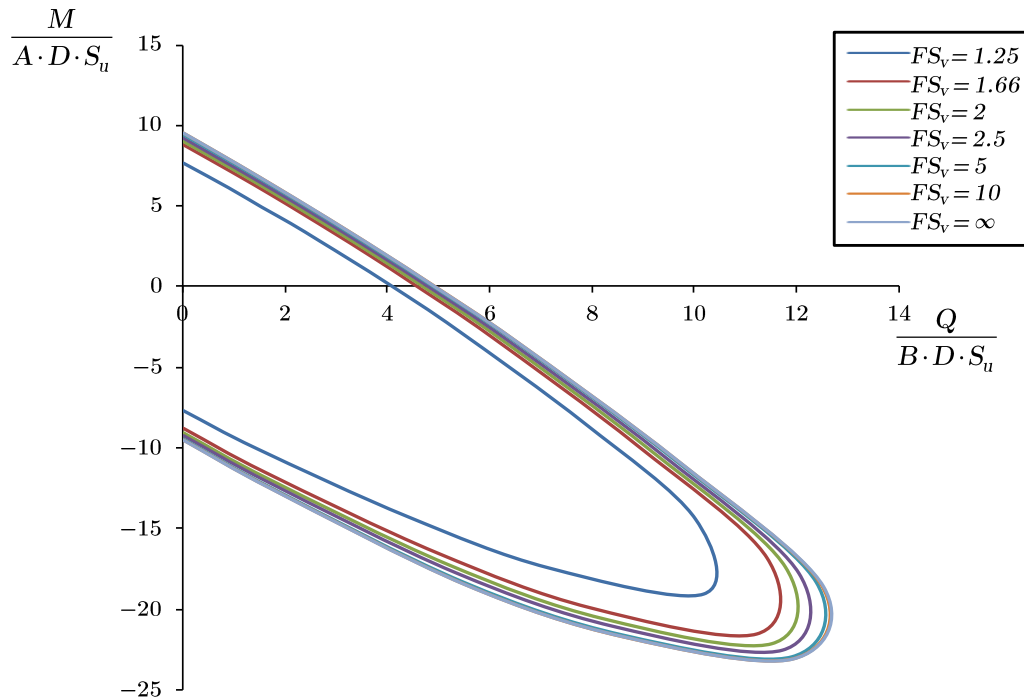
**Σχήμα 3.16.** Καμπύλες αλληλεπίδρασης εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης φρεάτων με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1, 2$  και  $3$ , για σταθερό συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$ . Σημειώνεται η διεύρυνση των καμπυλών καθώς αυξάνεται ο λόγος εγκιβωτισμού.



**Σχήμα 3.17.** Αδιαστατοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ . Οι καμπύλες σχεδιάζονται στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής, συναρτήσει του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ .

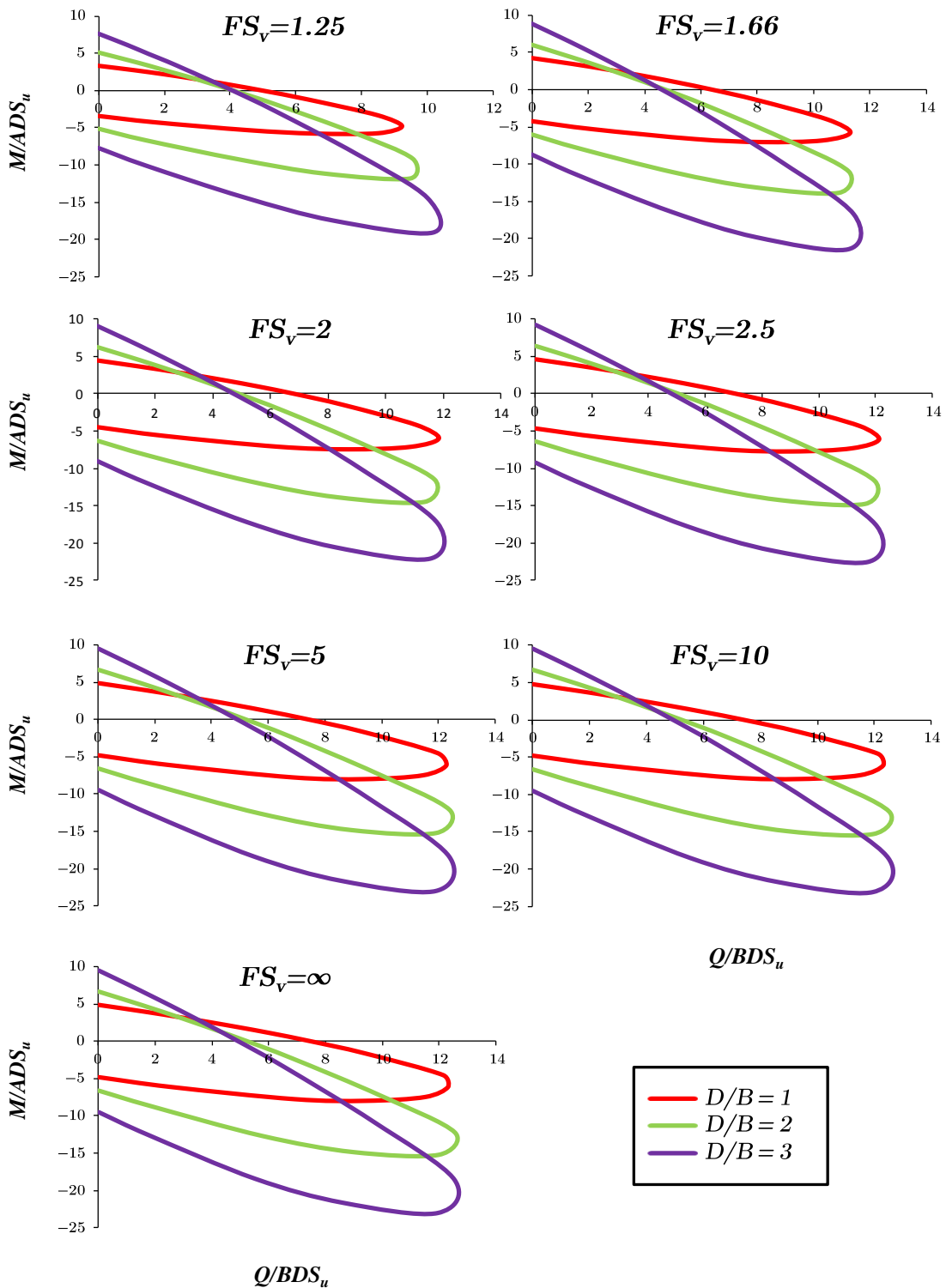


**Σχήμα 3.18.** Αδιαστατοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$ . Οι καμπύλες σχεδιάζονται στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής, συναρτήσεως του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ .

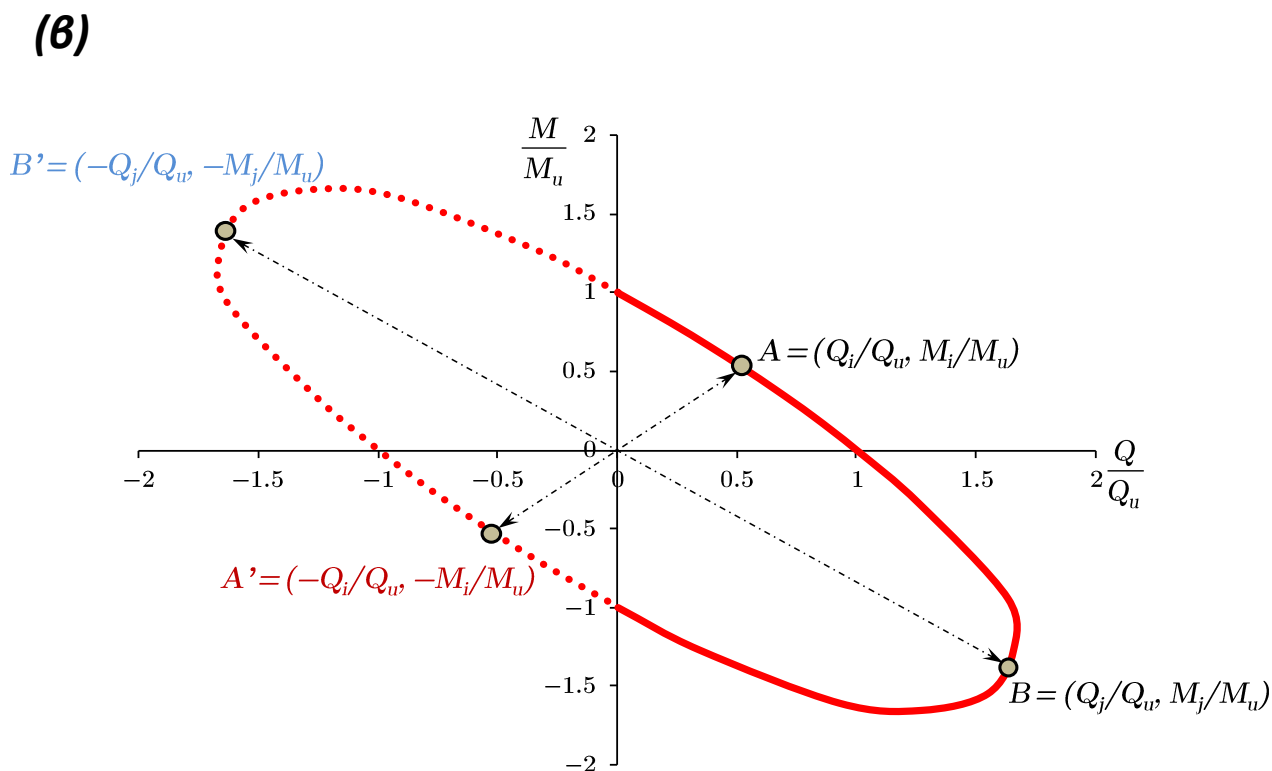
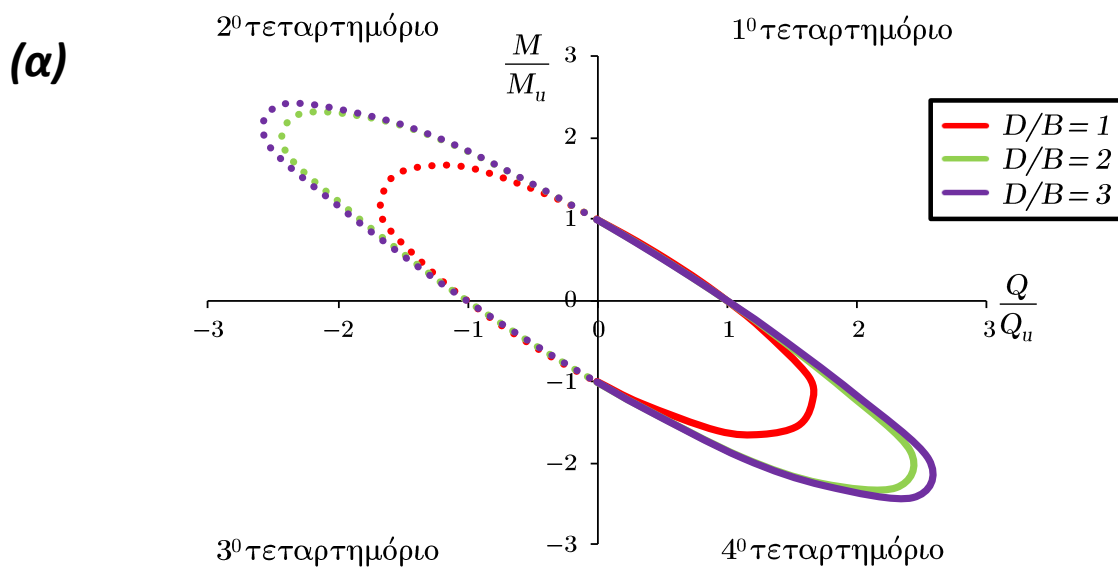


**Σχήμα 3.19.** Αδιαστατοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ . Οι καμπύλες σχεδιάζονται στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής, συναρτήσεως του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ .

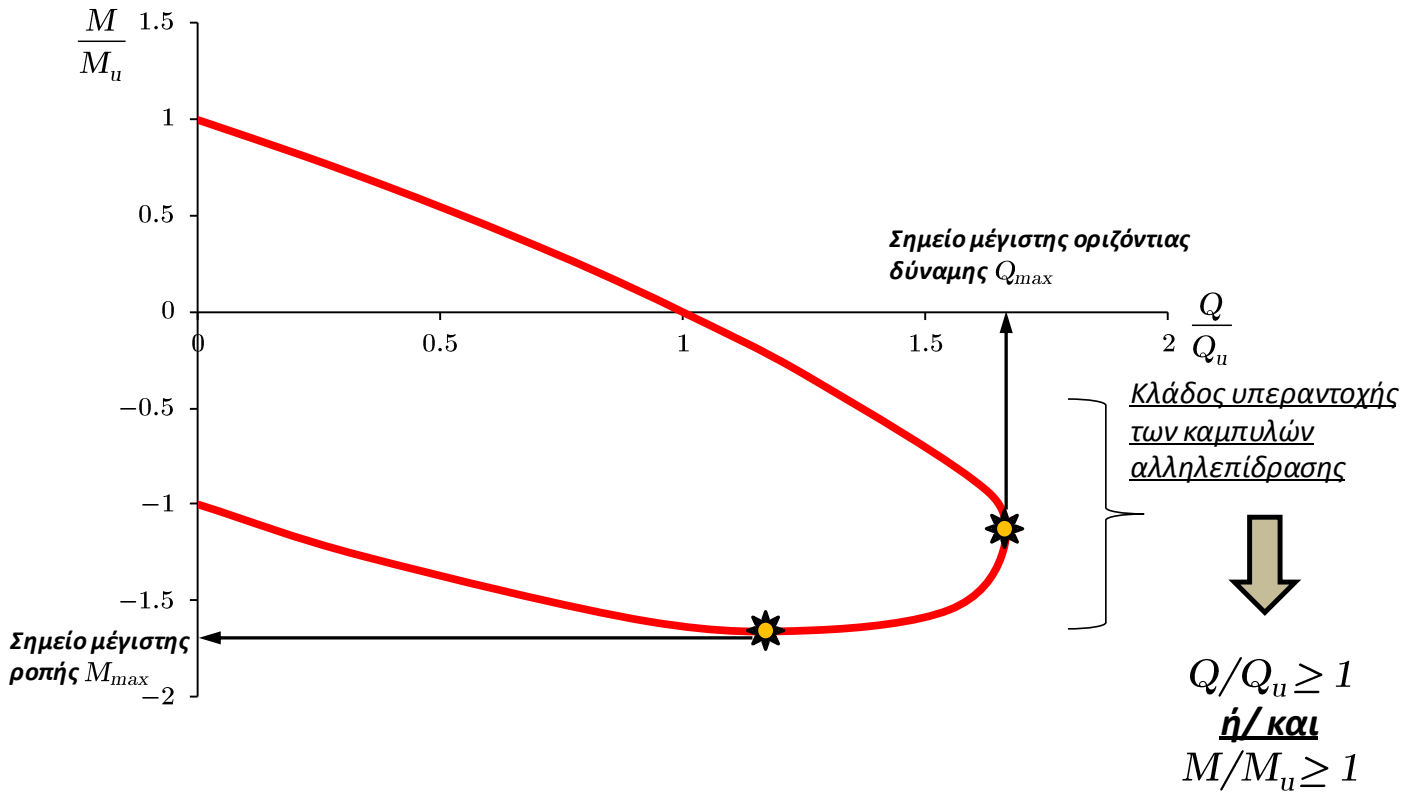




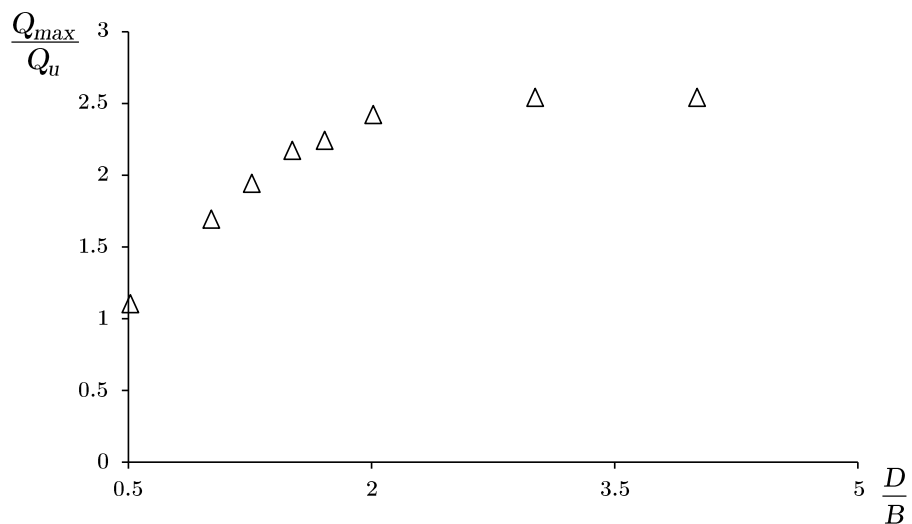
**Σχήμα 3.20.** Αδιαστατοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής. Για κάθε συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , οι καμπύλες σχεδιάζονται συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$  της θεμελίωσης.



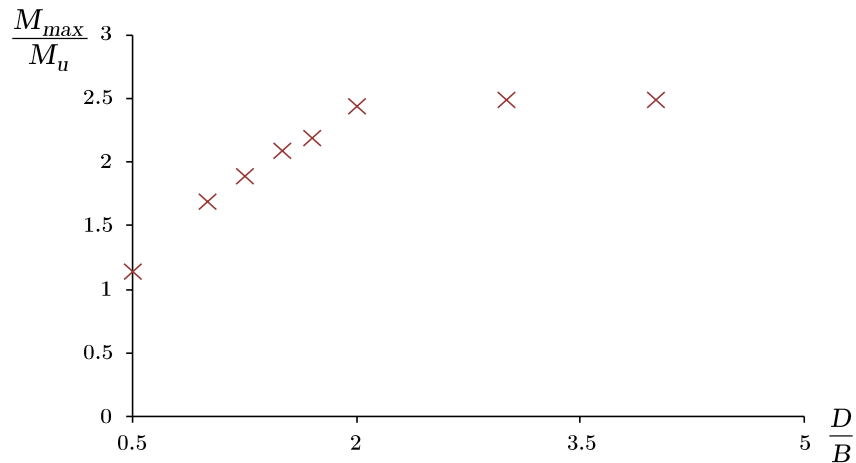
**Σχήμα 3.21.** Η έννοια της συμμετρίας των καμπυλών αλληλεπίδρασης. Στο σχήμα (α) απεικονίζονται οι κλειστές (πλήρεις) καμπύλες αλληλεπίδρασης για τους τρεις εξεταζόμενους λόγους εγκιβωτισμού  $D/B$  και στο σχήμα (β) η αντιστοίχιση των συμμετρικών σημείων κατά τεταρτημόρια.



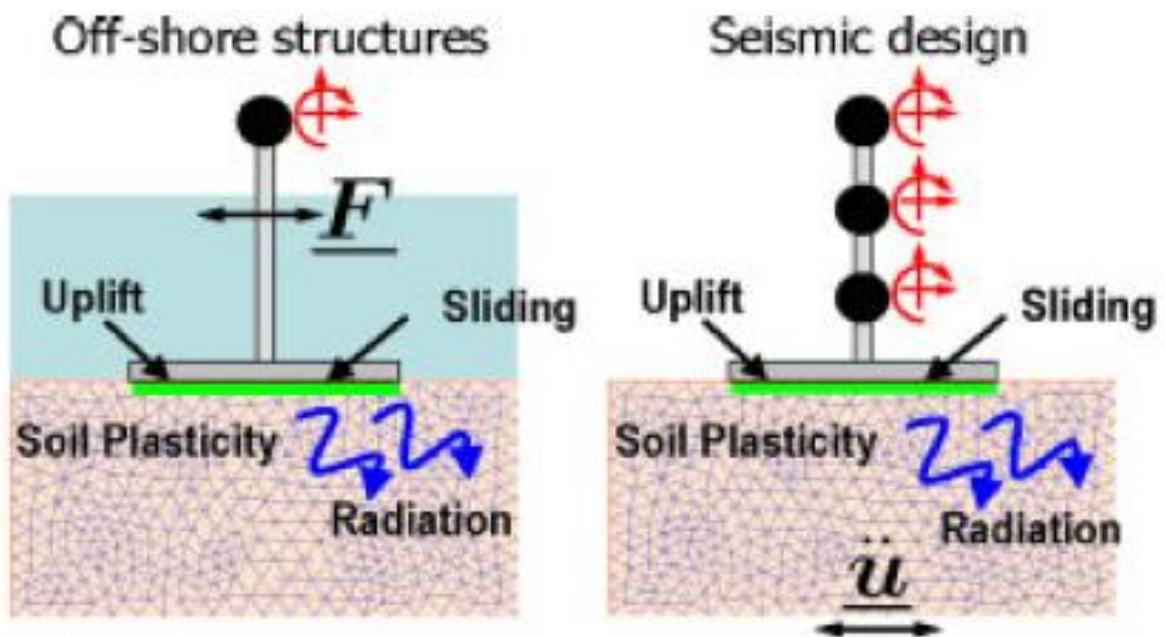
**Σχήμα 3.22.** Γραφική αναπαράσταση του κλάδου υπεραντοχής των καμπυλών αλληλεπίδρασης και ορισμός των μέγιστων εγκάρσιων εντατικών μεγεθών  $Q_{max}$  και  $M_{max}$ .



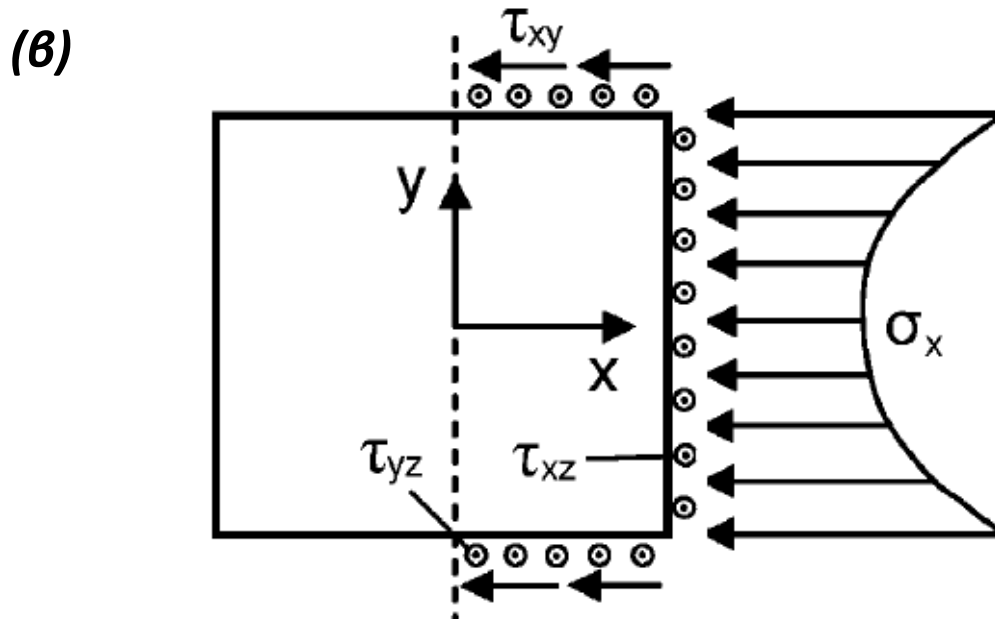
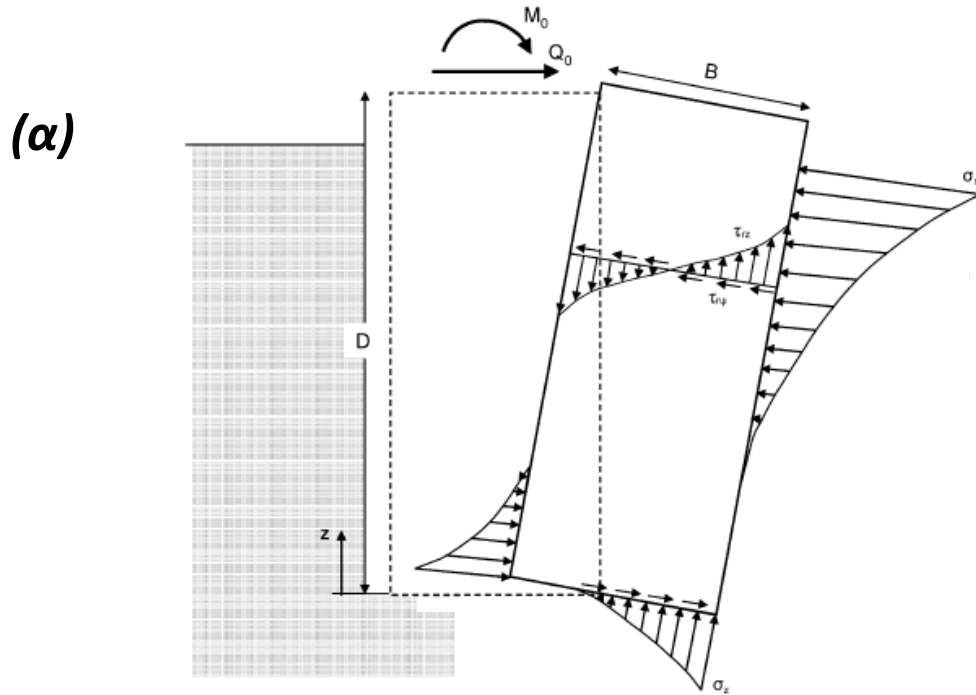
**Σχήμα 3.23.** Η μεταβολή της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$  (εκφρασμένη μέσω της κανονικοποίησής της με την “καθαρή” αντοχή  $Q_u$ ) συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ .



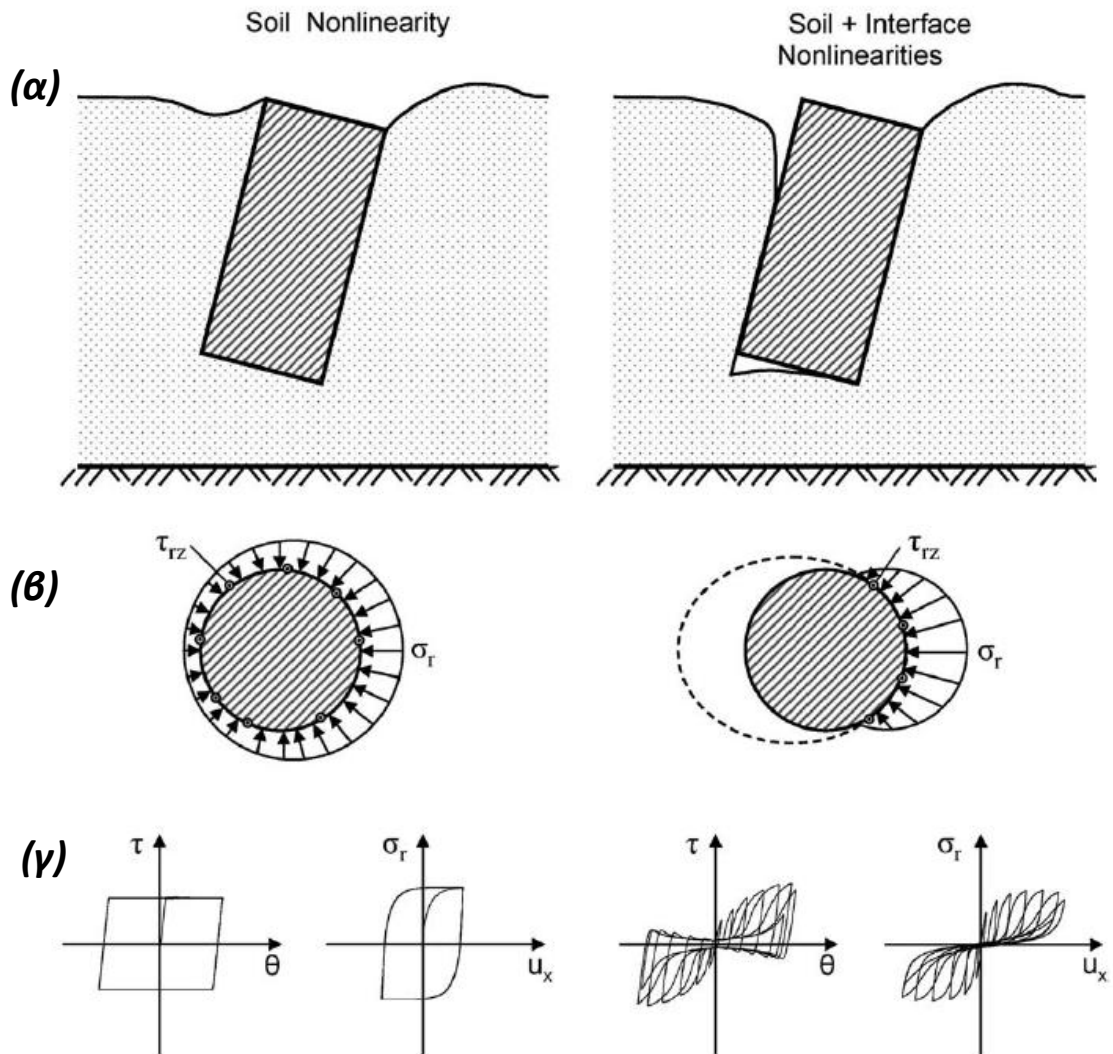
**Σχήμα 3.24.** Η μεταβολή της μέγιστης ροπής  $M_{max}$  (εκφρασμένη μέσω της κανονικοποίησής της με την “καθαρή” αντοχή  $M_u$ ) συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ .



**Σχήμα 3.25.** Επιφανειακή θεμελίωση υπό εγκάρσια φόρτιση, η οποία προέρχεται είτε από περιβαλλοντικούς παράγοντες (“off- shore structures”), είτε λόγω μιας σεισμικής εξάιτησης (“seismic design”). Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί που δύναται να κινητοποιηθούν για την παραλαβή της εγκάρσιας φόρτισης είναι: (i) η ανελαστική απόκριση του εδάφους θεμελίωσης (“soil plasticity”) και (ii) τα φαινόμενα γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια θεμελίου- εδάφους (“uplift” και “sliding”).

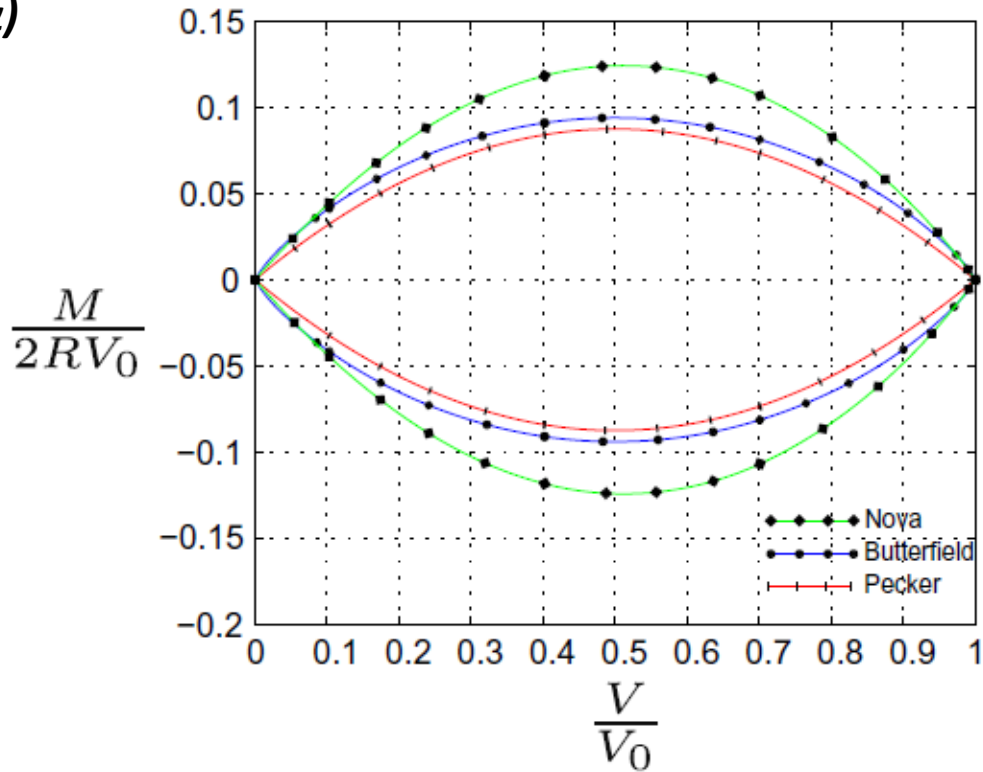


**Σχήμα 3.26.** Βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση τετραγωνικής διατομής υπό εγκάρσια φόρτιση στην κορυφή (οριζόντια δύναμη  $Q_0$  και ροπή  $M_0$ ). Απεικονίζονται ενδεικτικώς οι κατανομές των αναπτυσσόμενων εδαφικών τάσεων στις διεπιφάνειες της θεμελίωσης, σε όψη (σχήμα α) και σε κάτοψη (σχήμα β).

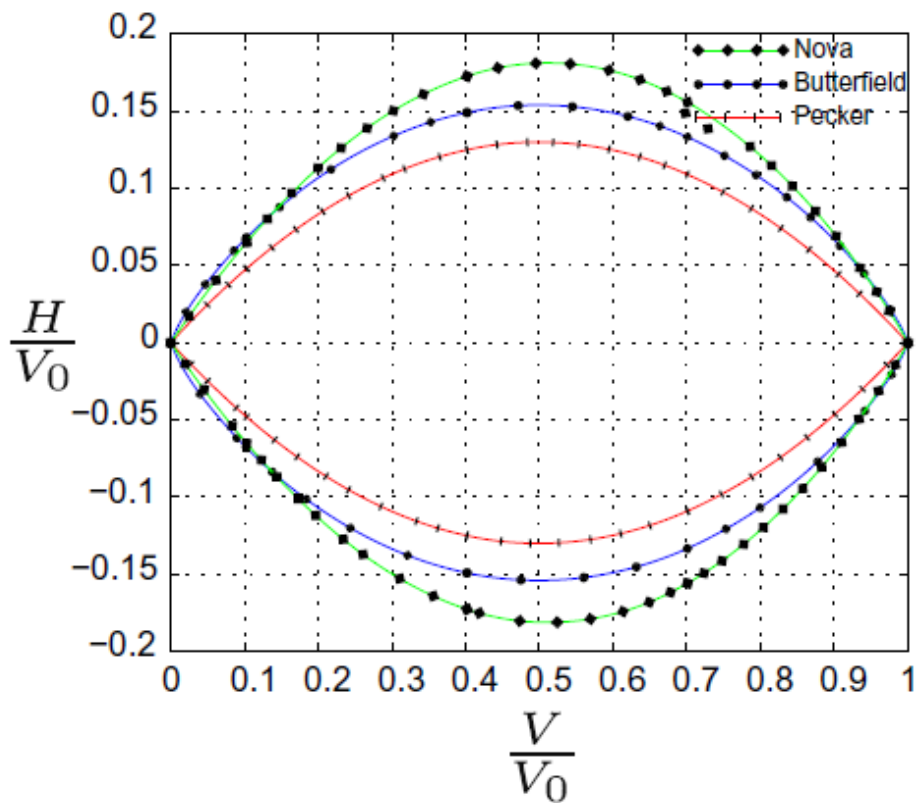


**Σχήμα 3.27.** Φαινόμενα γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων στην περίπτωση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Η αριστερή “οικογένεια” σχημάτων αναφέρεται στην απόκριση φρεάτων σε μη- συνεκτικό έδαφος θεμελίωσης και η δεξιά στην απόκριση φρεάτων σε συνεκτικό έδαφος θεμελίωσης. Στο σχήμα (α) απεικονίζονται ποιοτικά οι μηχανισμοί παραλαβής της εγκάρσιας φόρτισης της θεμελίωσης, όπου στην περίπτωση των συνεκτικών εδαφών εισάγονται και τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια θεμελίου-εδάφους. Στο σχήμα (β) απεικονίζεται ενδεικτικά η πλευρική μετακίνηση (σε κάτοψη) της θεμελίωσης, σε συνδυασμό με τις αναπτυσσόμενες εδαφικές τάσεις στην παράπλευρη επιφάνεια. Στην περίπτωση της ύπαρξης φαινομένων γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων, δημιουργείται κενό (gap) ανάμεσα στο έδαφος και την θεμελίωση. Τέλος, στο σχήμα (γ) απεικονίζονται οι βρόχοι υστέρησης των εδαφικών στοιχείων της περιμέτρου του φρεάτος. Στην περίπτωση των συνεκτικών εδαφών, οι βρόχοι υστέρησης παύουν να είναι συμμετρικοί, ενώ, επιπλέον, το φαινόμενο της αποκόλλησης (gapping) συνιστά έναν πρόσθετο μηχανισμό δημιουργίας παραμενουσών μετακινήσεων (πέραν της ανελαστικής απόκρισης του εδάφους).

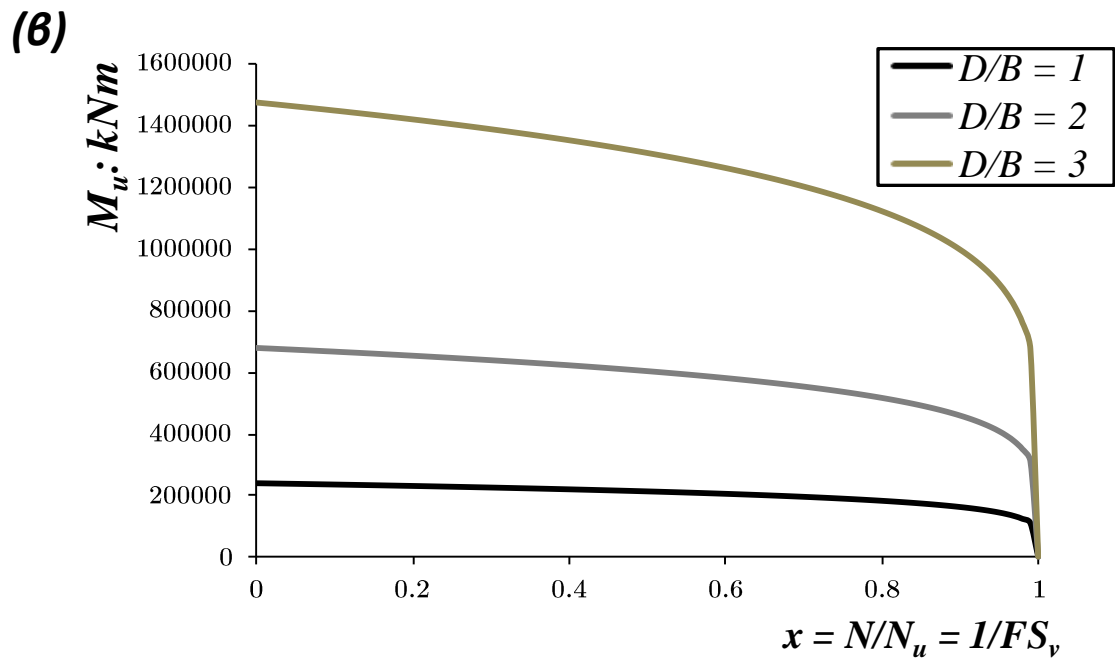
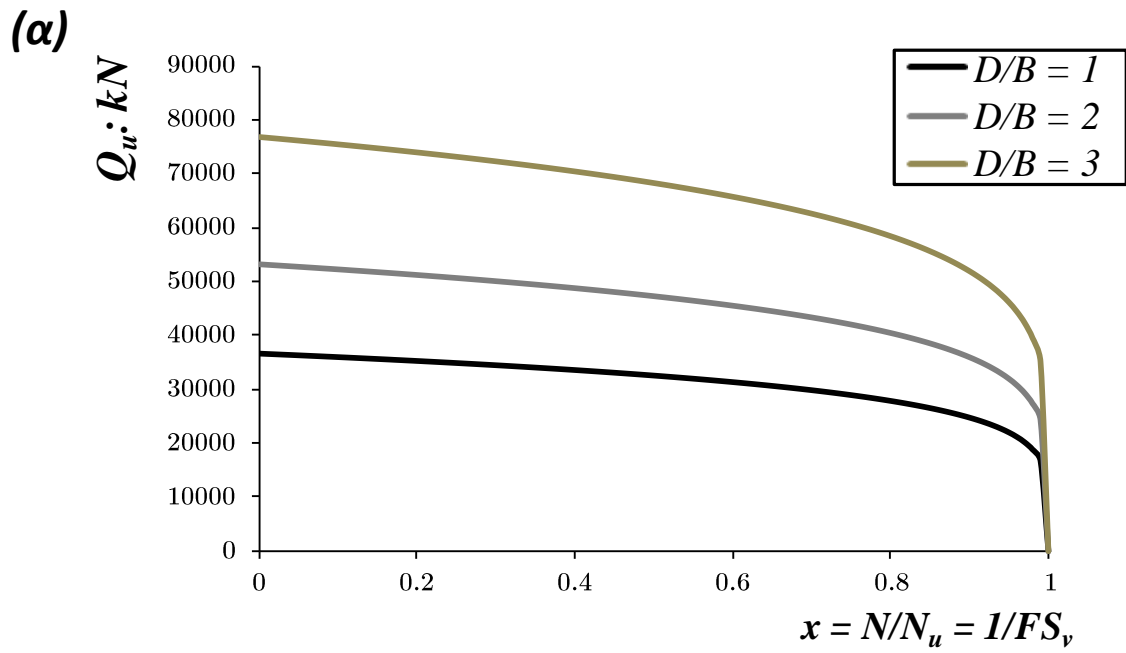
(α)



(β)

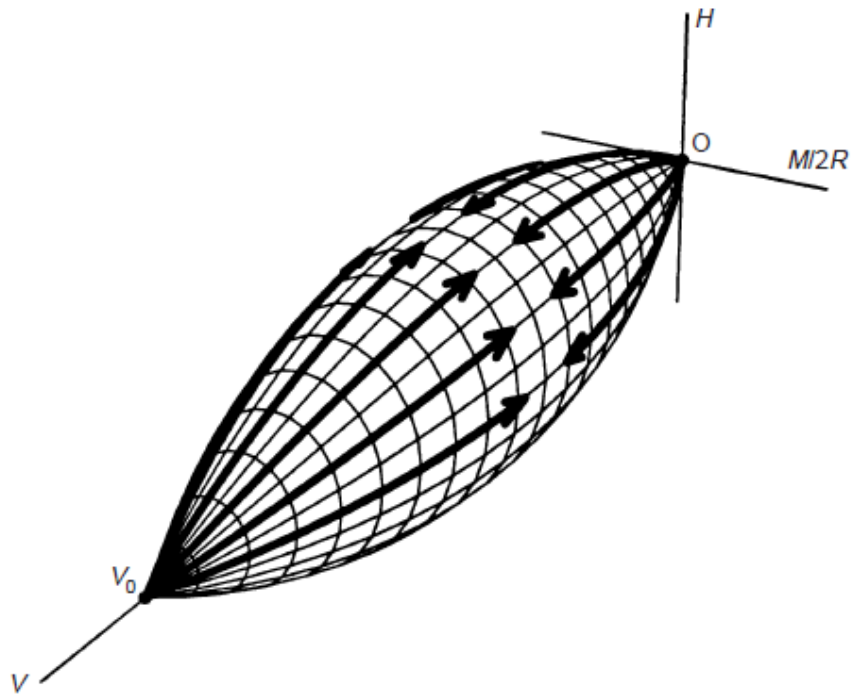


**Σχήμα 3.28.** Μεταβολή των αντοχών επιφανειακής θεμελίωσης σε ροπή και σε οριζόντια δύναμη, συναρτήσει της κατακόρυφης φόρτισης. Σημειώνεται μεγιστοποίησή τους για συντελεστή  $\chi = 0.5$  (δηλαδή για  $FS_v = 2$ ).

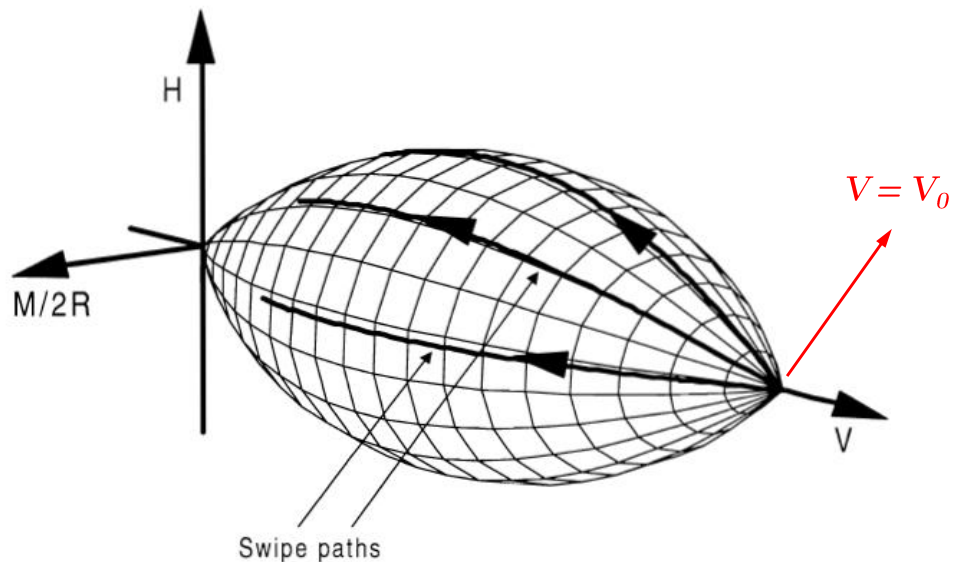


Σχήμα 3.29. Μεταβολή των “καθαρών” αντοχών σε οριζόντια δύναμη ( $Q_u$ ) και σε ροπή ( $M_u$ ) των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, συναρτήσει της κατακόρυφης φόρτισης.

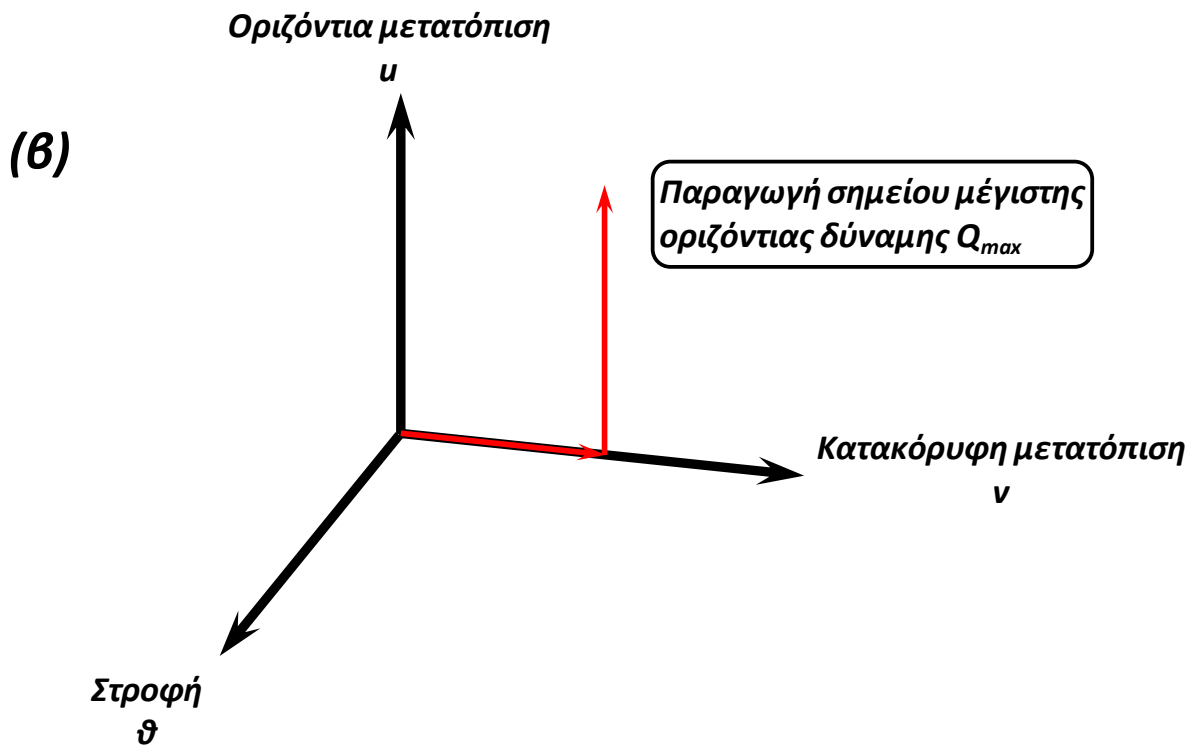
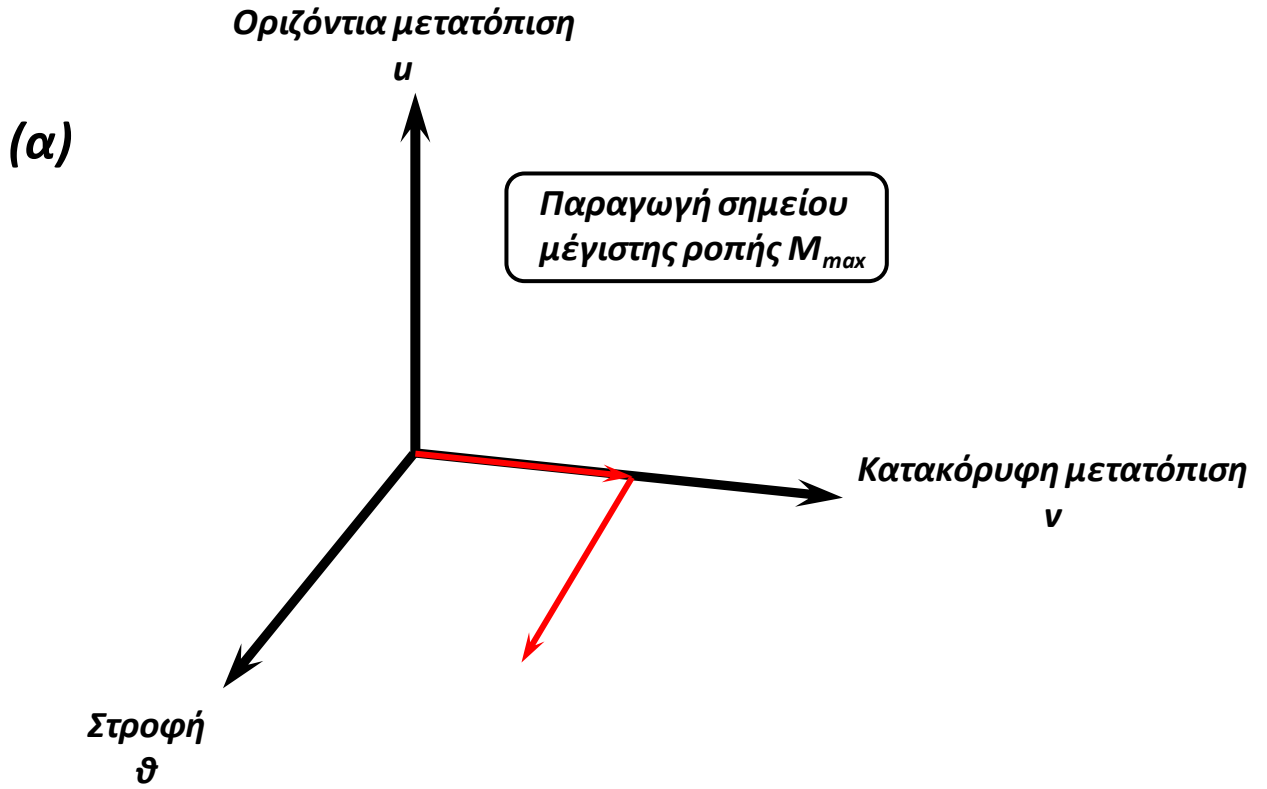


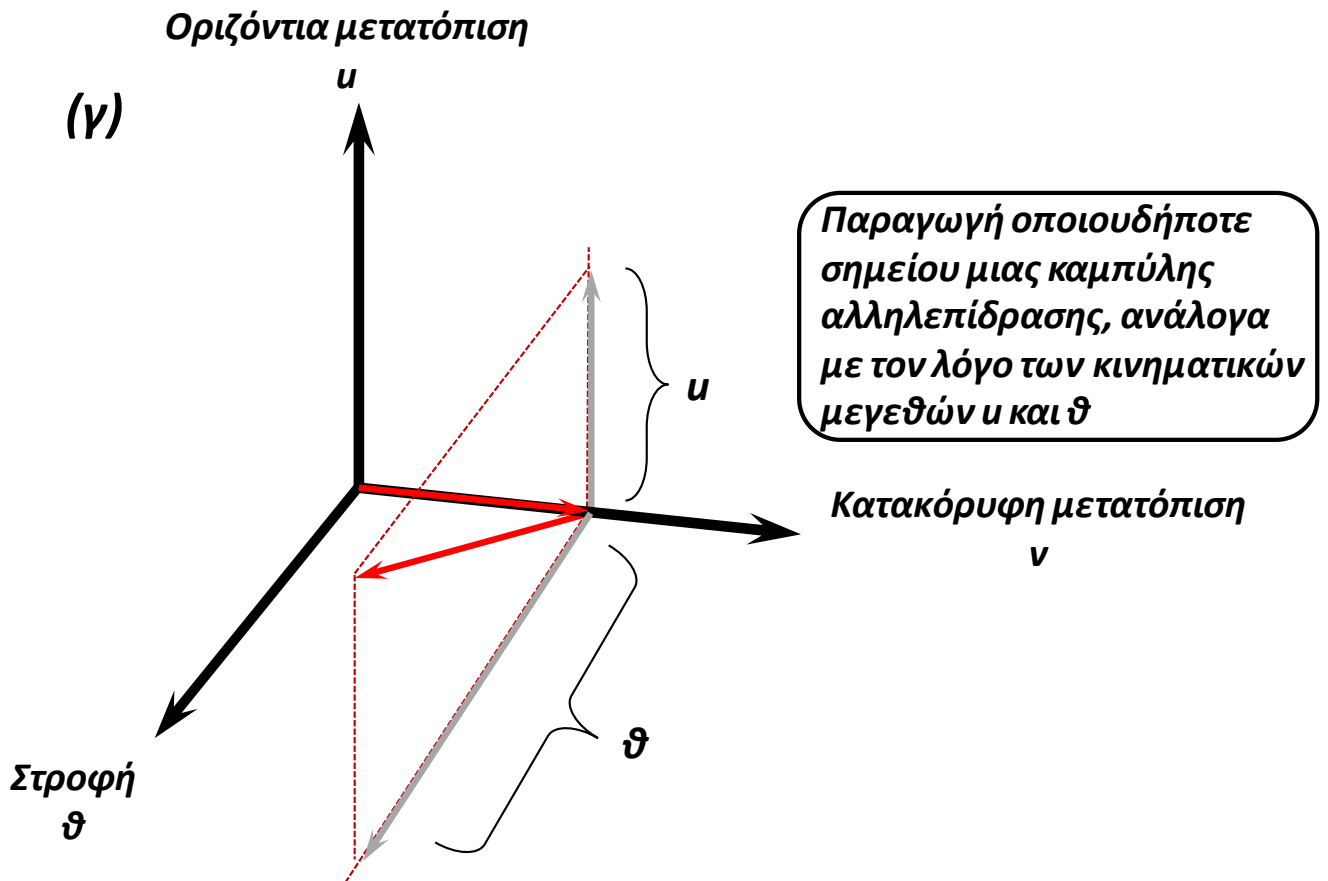


**Σχήμα 3.30.** Η λογική των δοκιμών τύπου “swipe”, για την παραγωγή των επιφανειών αλληλεπίδρασης επιφανειακών θεμελιώσεων. Η μία από τις δύο “οικογένειες” δοκιμών ξεκινά από κατακόρυφο φορτίο ίσο με την φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης σε κατακόρυφη φόρτιση (σημείο  $V_0$ ), ενώ η δεύτερη “οικογένεια” ξεκινά από την περιοχή μηδενικής κατακόρυφης φόρτισης ( $V \approx 0$ ).

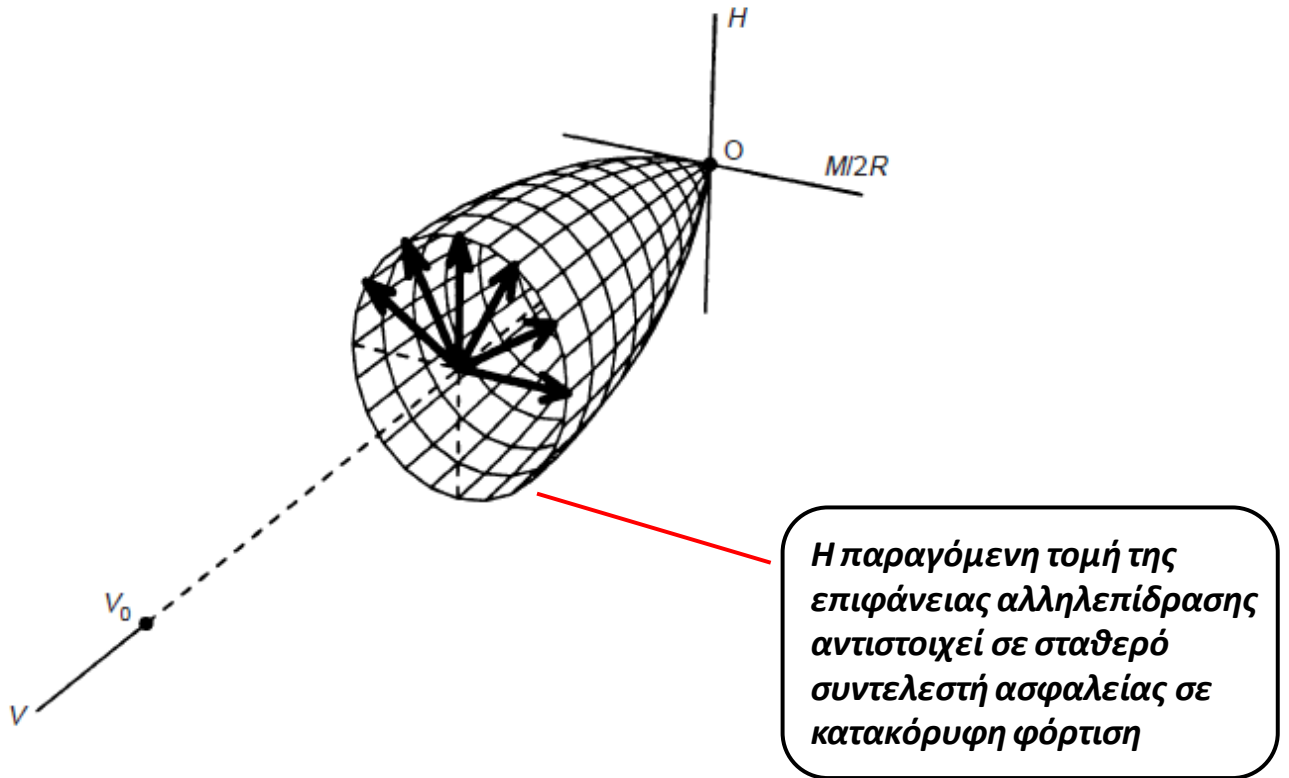


**Σχήμα 3.31.** Η λογική των δοκιμών τύπου “swipe”, για την παραγωγή των επιφανειών αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Στην περίπτωση αυτή, άμεση εφαρμογή έχει μόνον η μία “οικογένεια” δοκιμών: οι δοκιμές που ξεκινούν από κατακόρυφο φορτίο ίσο με την φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης σε κατακόρυφη φόρτιση.

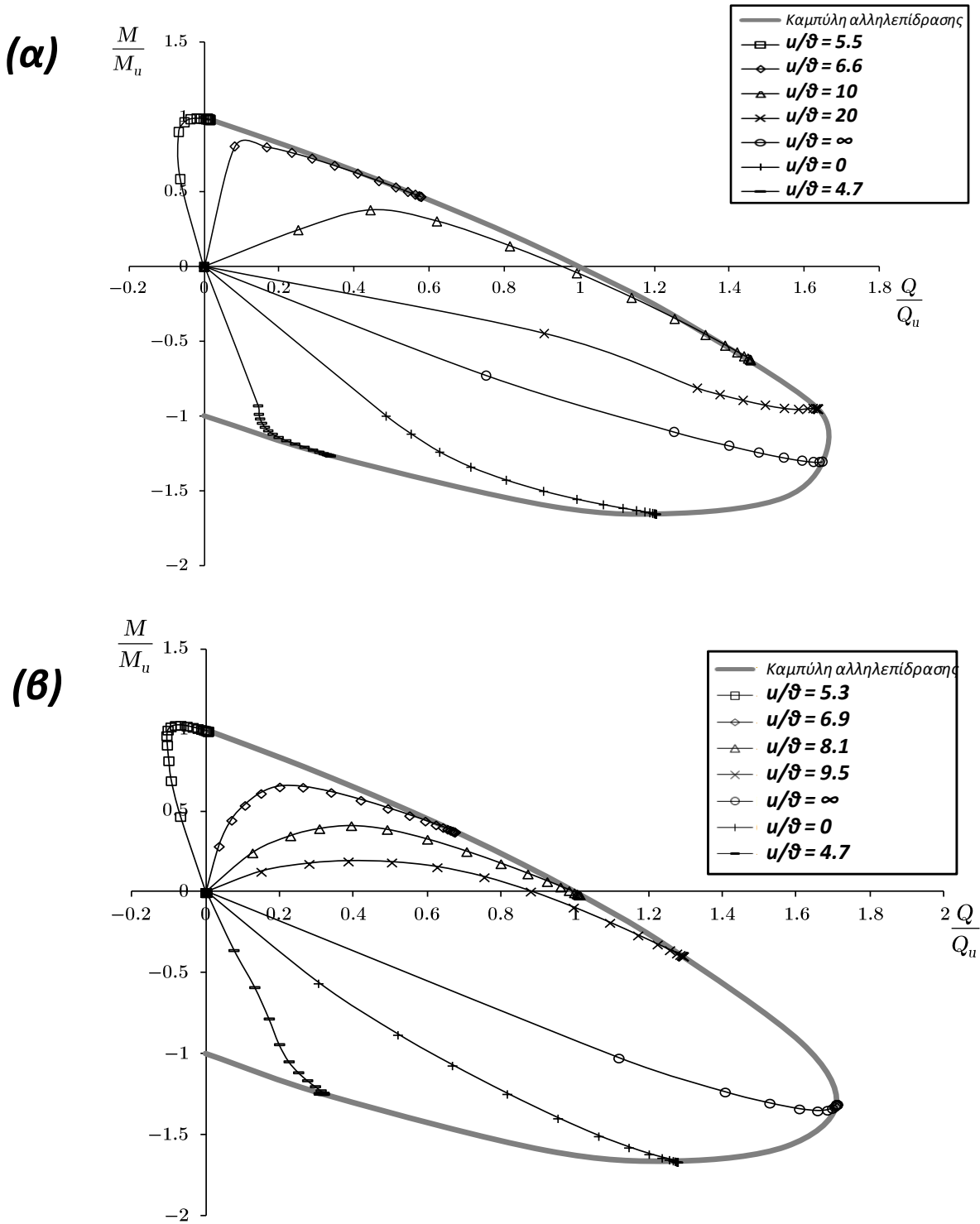




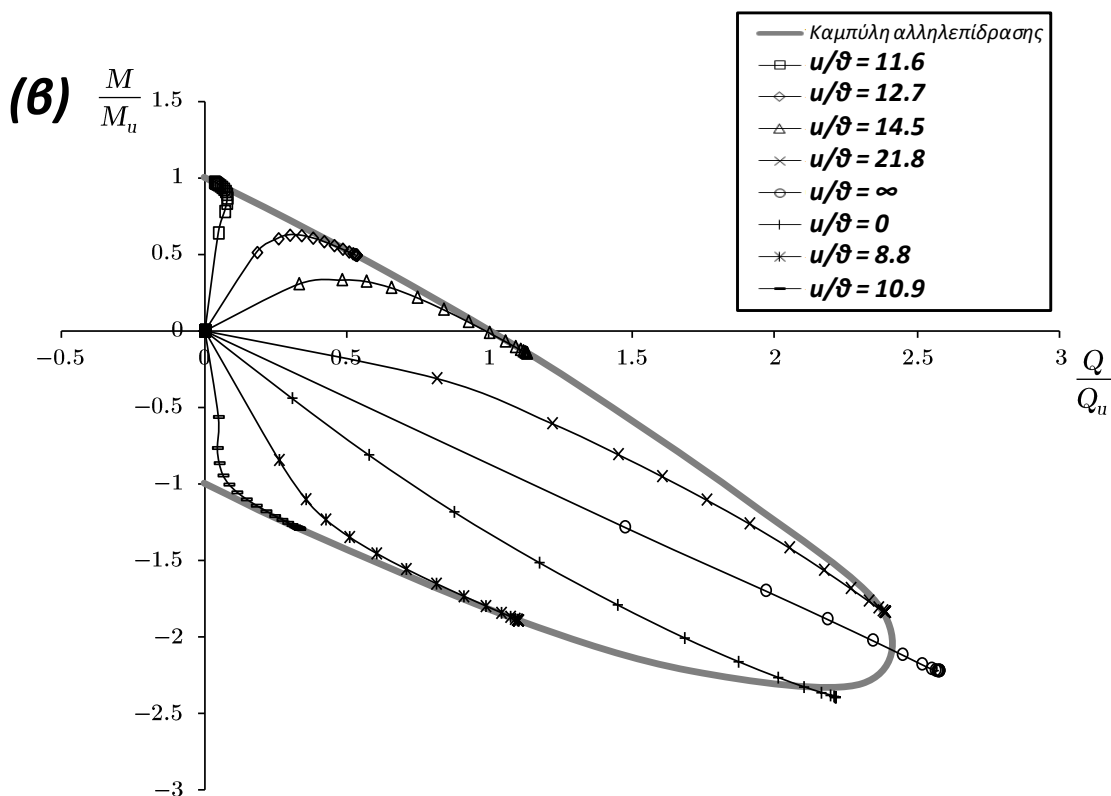
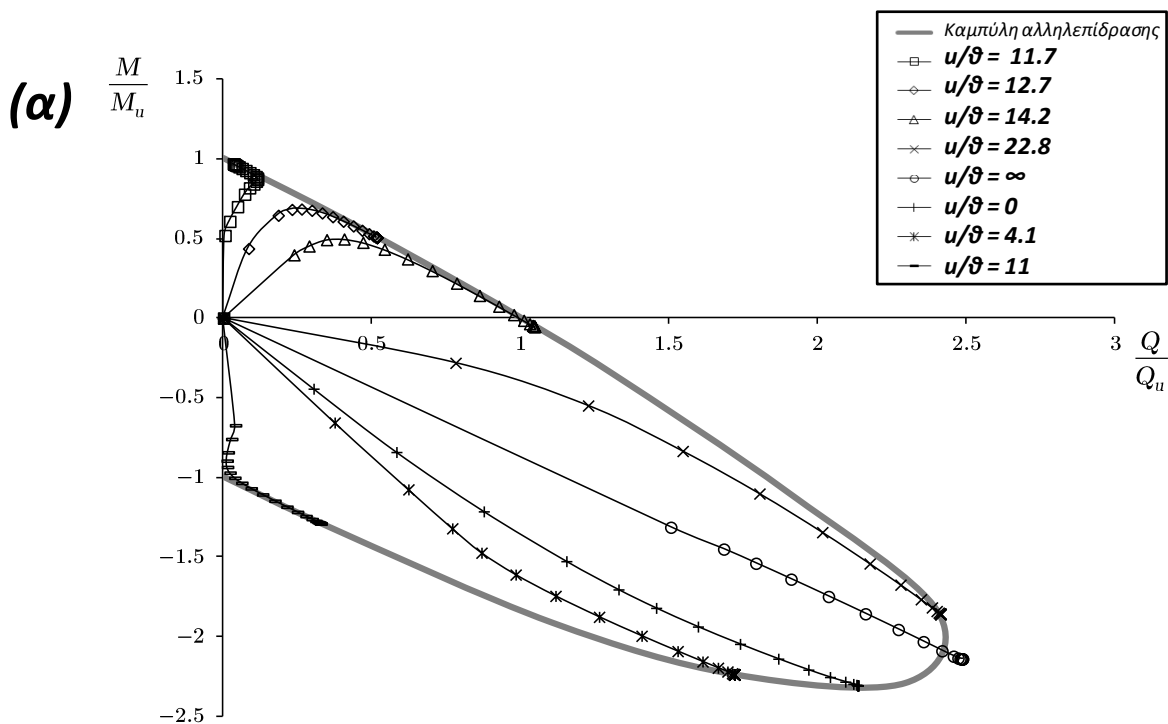
**Σχήμα 3.32.** Η φιλοσοφία σχεδιασμού των αναλύσεων με χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων. Καταγράφονται σκαριφηματικά τα στάδια της ανάλυσης των τριών σπουδαιότερων περιπτώσεων, σε συνδυασμό με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα της κάθε μίας. Στην περίπτωση (α) το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης αποτελείται μόνο από την επιβολή πεπερασμένης στροφής στην θεμελίωση, στην περίπτωση (β) από την επιβολή μόνο οριζόντιας μετατόπισης και στην περίπτωση (γ) από ταυτόχρονο επιβαλλόμενο συνδυασμό των δύο παραπάνω κινηματικών μεγεθών.



**Σχήμα 3.33.** Η παραλλαγή της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων. Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης έχει αντικατασταθεί από την επιβολή κατάλληλου κατακόρυφου φορτίου, το οποίο διατηρείται σταθερό κατά την διεξαγωγή του δεύτερου σταδίου. Στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης επιβάλλεται συνδυασμός οριζόντιας μετατόπισης και στροφής, κατά τα γνωστά.

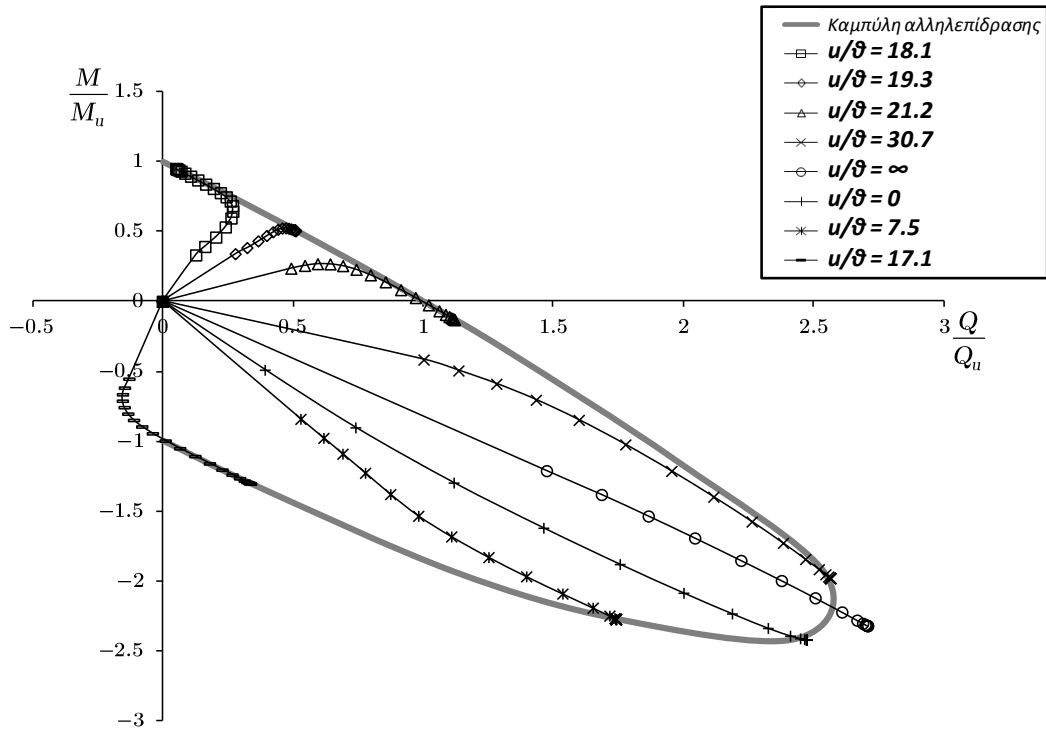


**Σχήμα 3.34.** Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων (γκρι γραμμή καμπύλης αλληλεπίδρασης) με την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων (διδιάστατες διαδρομές φόρτισης με δείκτες). Η εξεταζόμενη θεμελίωση έχει λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , το σχήμα (α) αναφέρεται στην περίπτωση συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$  και το σχήμα (β) στην περίπτωση  $FS_v = 2.5$ .

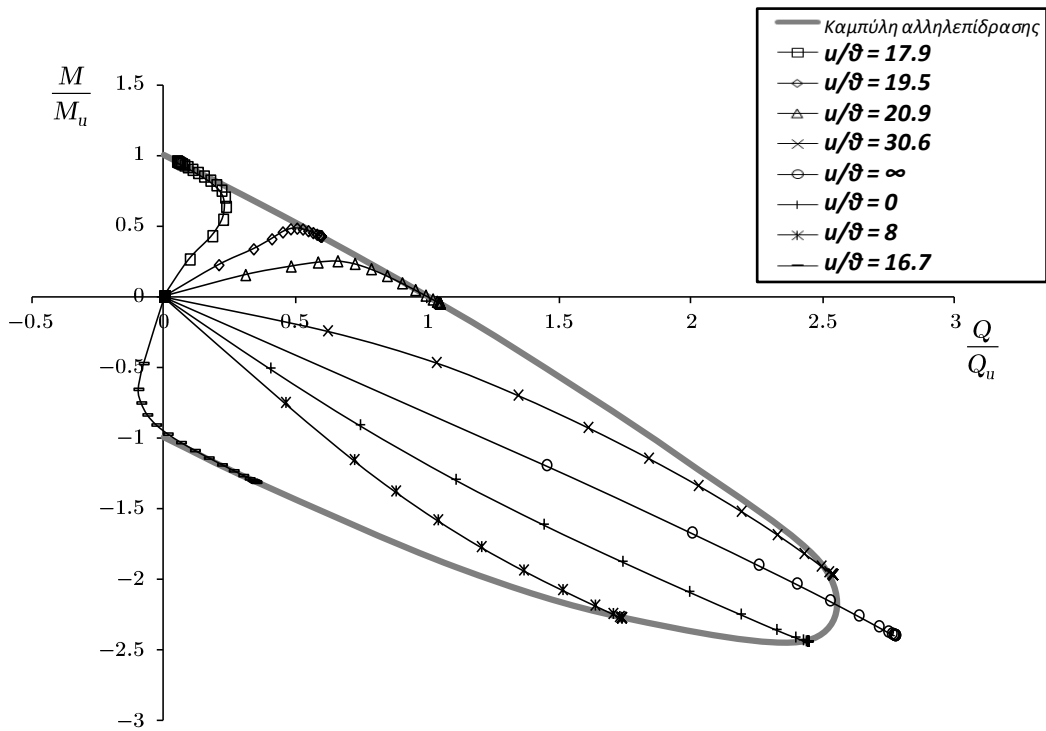


**Σχήμα 3.35.** Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων (γκρι γραμμή καμπύλης αλληλεπίδρασης) με την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων (διδιάστατες διαδρομές φόρτισης με δείκτες). Η εξεταζόμενη θεμελίωση έχει λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$ , το σχήμα (α) αναφέρεται στην περίπτωση συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$  και το σχήμα (β) στην περίπτωση  $FS_v = 2.5$ .

(α)

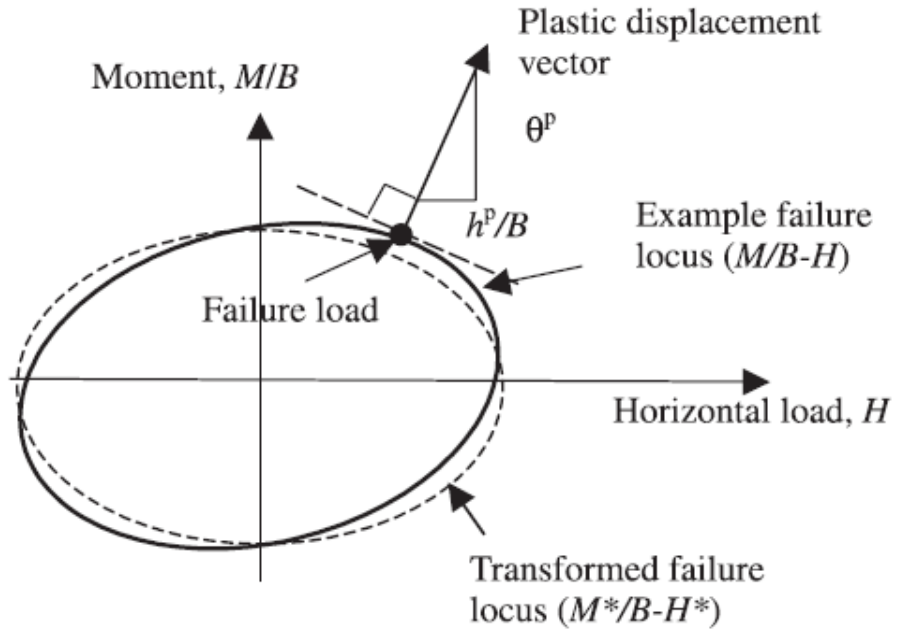


(β)

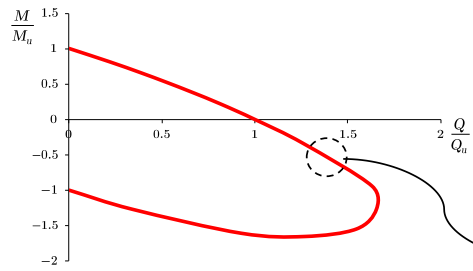


**Σχήμα 3.36.** Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων (γκρι γραμμή καμπύλης αλληλεπίδρασης) με την μέθοδο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων (διδιάστατες διαδρομές φόρτισης με δείκτες). Η εξεταζόμενη θεμελίωση έχει λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ , το σχήμα (α) αναφέρεται στην περίπτωση συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$  και το σχήμα (β) στην περίπτωση  $FS_v = 2.5$ .

(α)

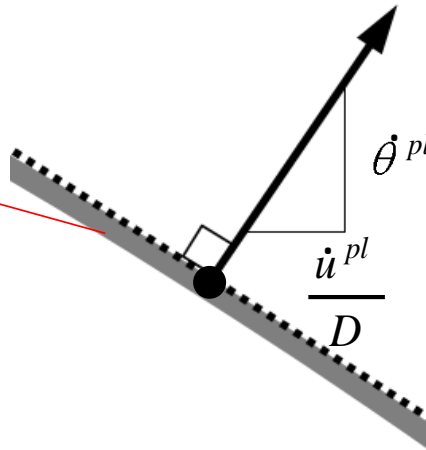


(β)



**ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ**

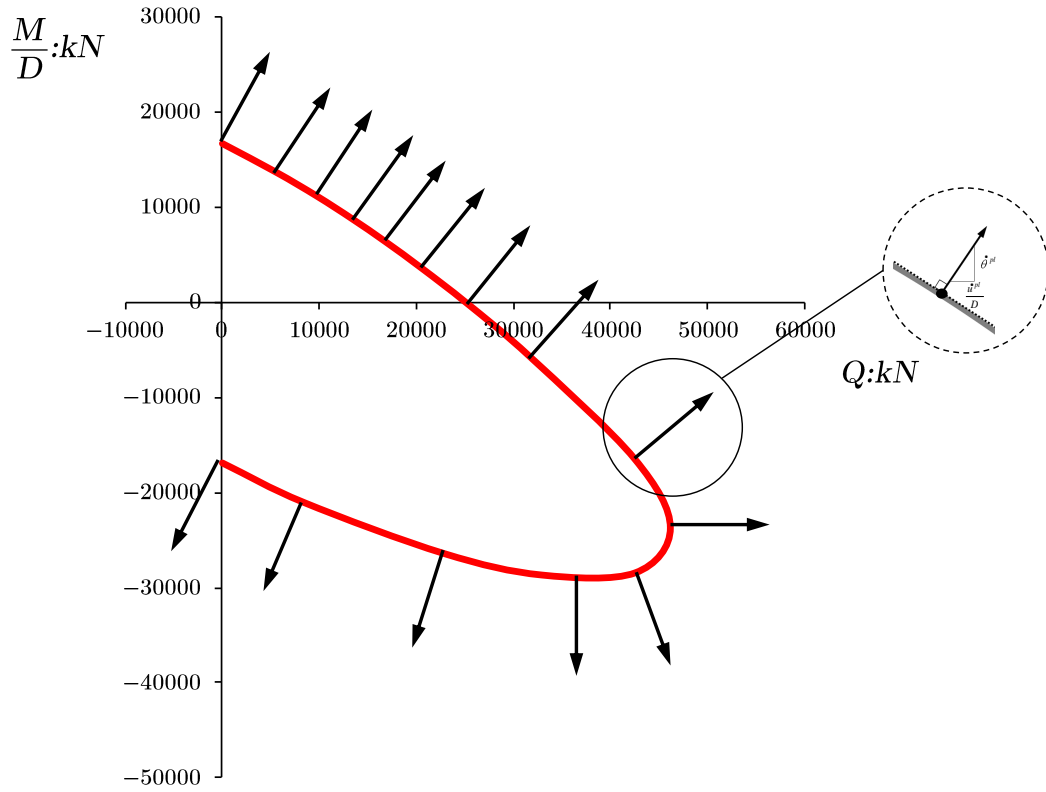
Καμπύλη αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης



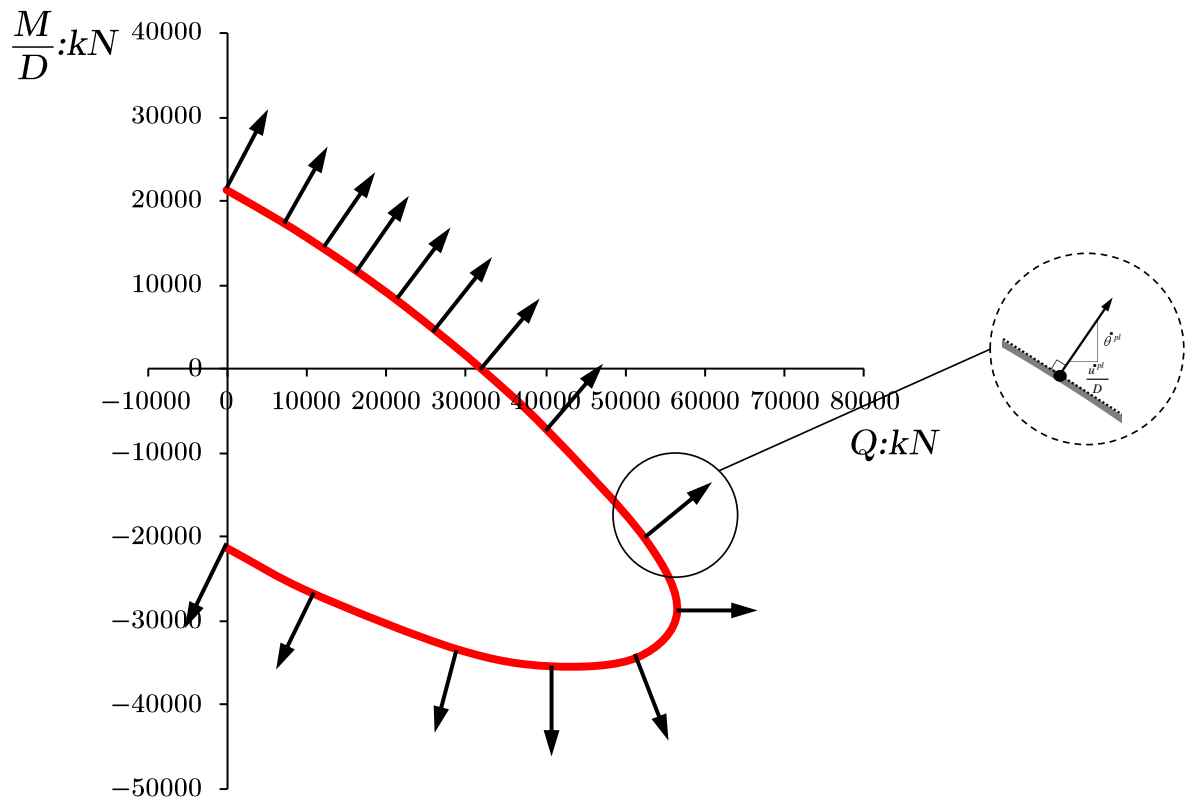
**Σχήμα 3.37.** (α) Γραφική αναπαράσταση της ταύτισης της περιβάλλουσας αστοχίας μιας θεμελίωσης με το “δυναμικό πλαστικοποίησής” της (plastic potential). Ισχύει ο συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων (associated plastic flow rule), με το διάνυσμα των πλαστικών μετακινήσεων σε κάθε σημείο της καμπύλης αλληλεπίδρασης να είναι κάθετο σε αυτήν. (β) Εφαρμογή της παραπάνω γραφικής διαδικασίας στα αποτελέσματα της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

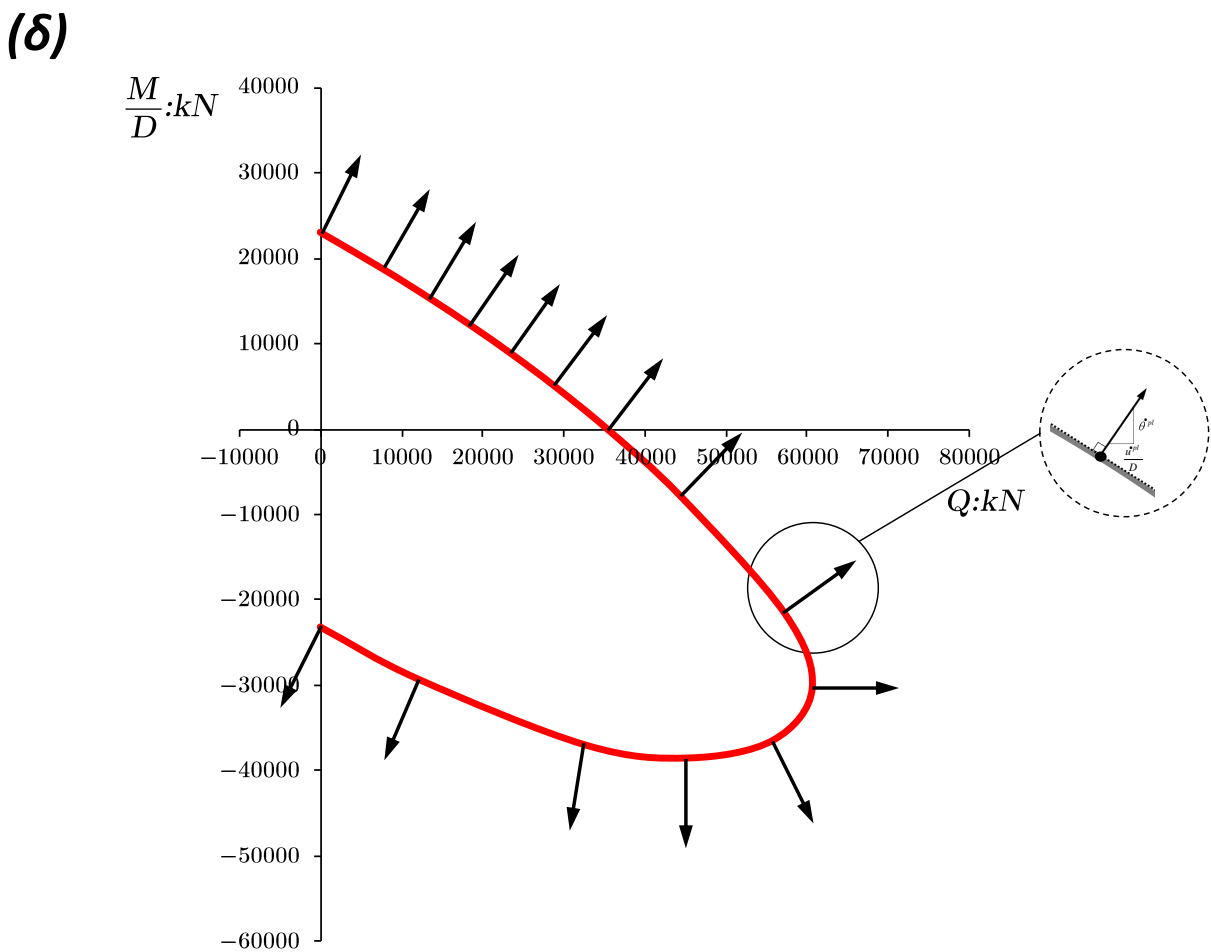
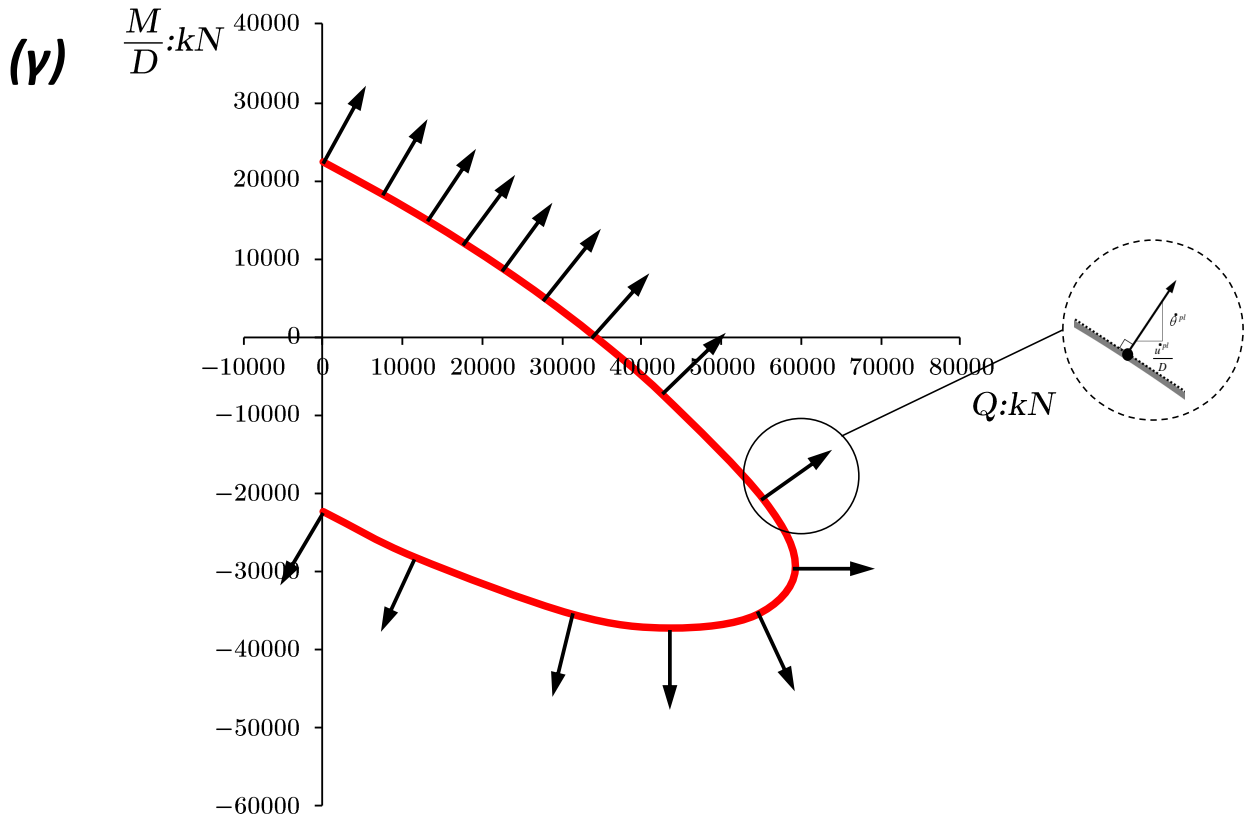


(α)

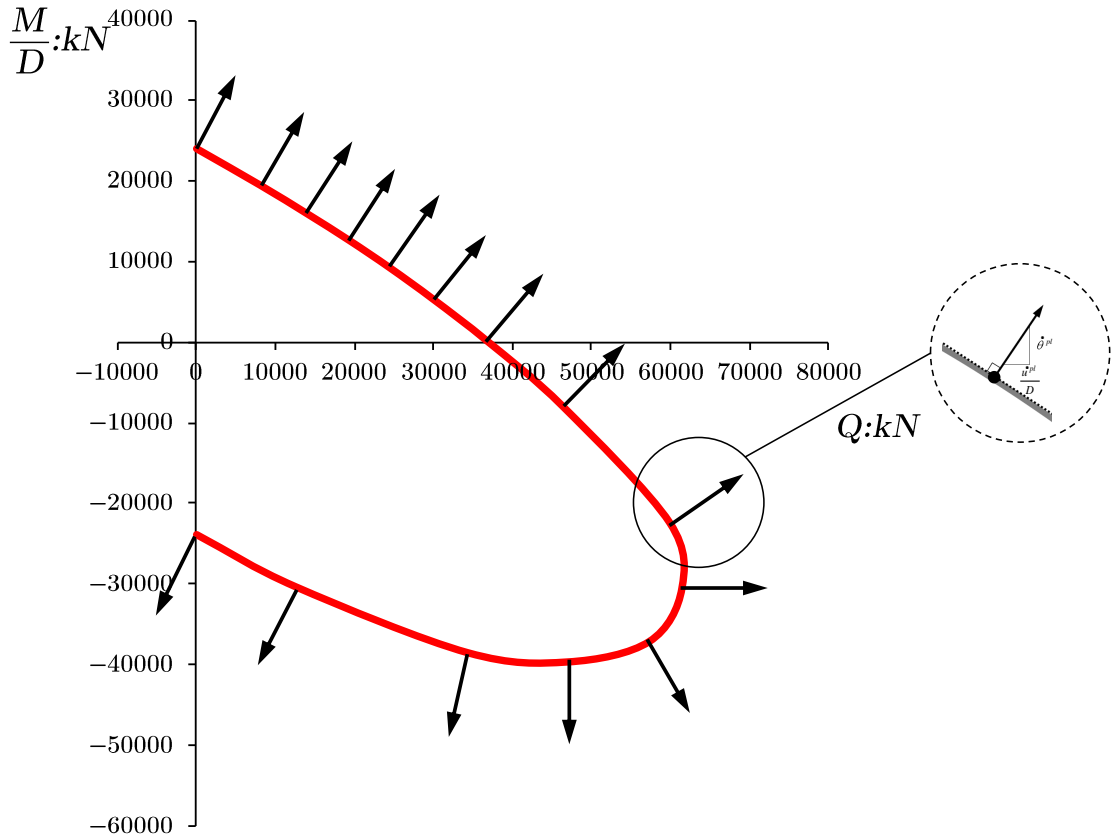


(β)

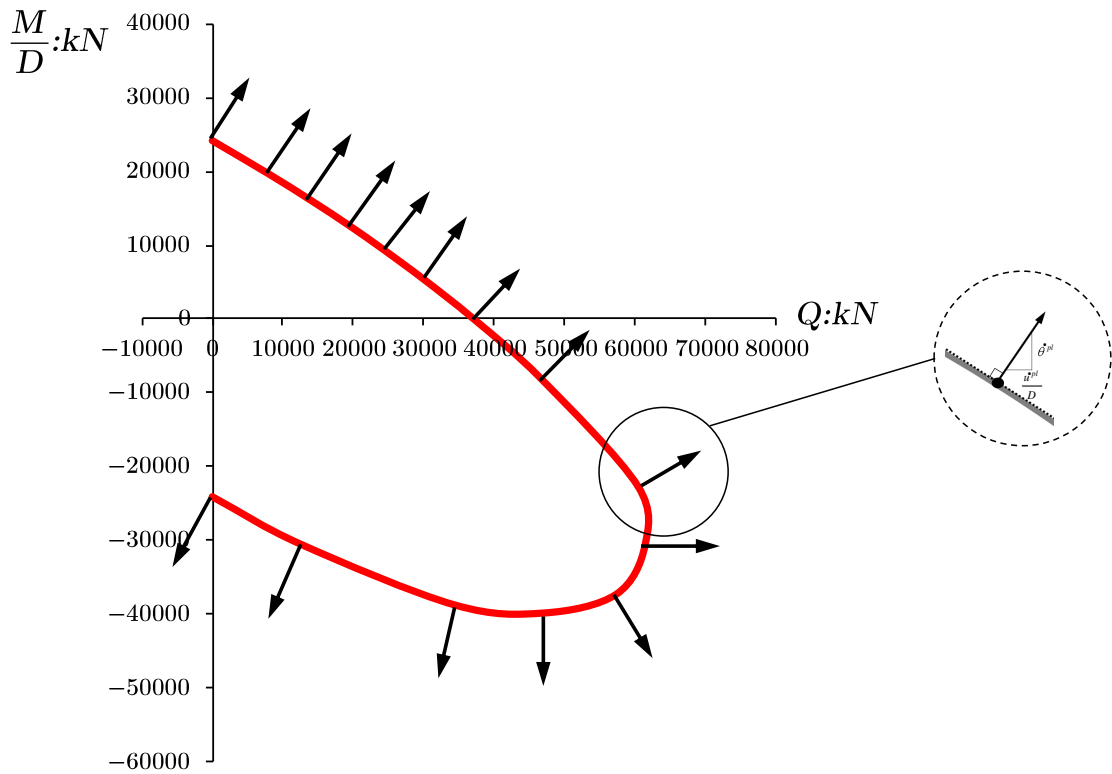


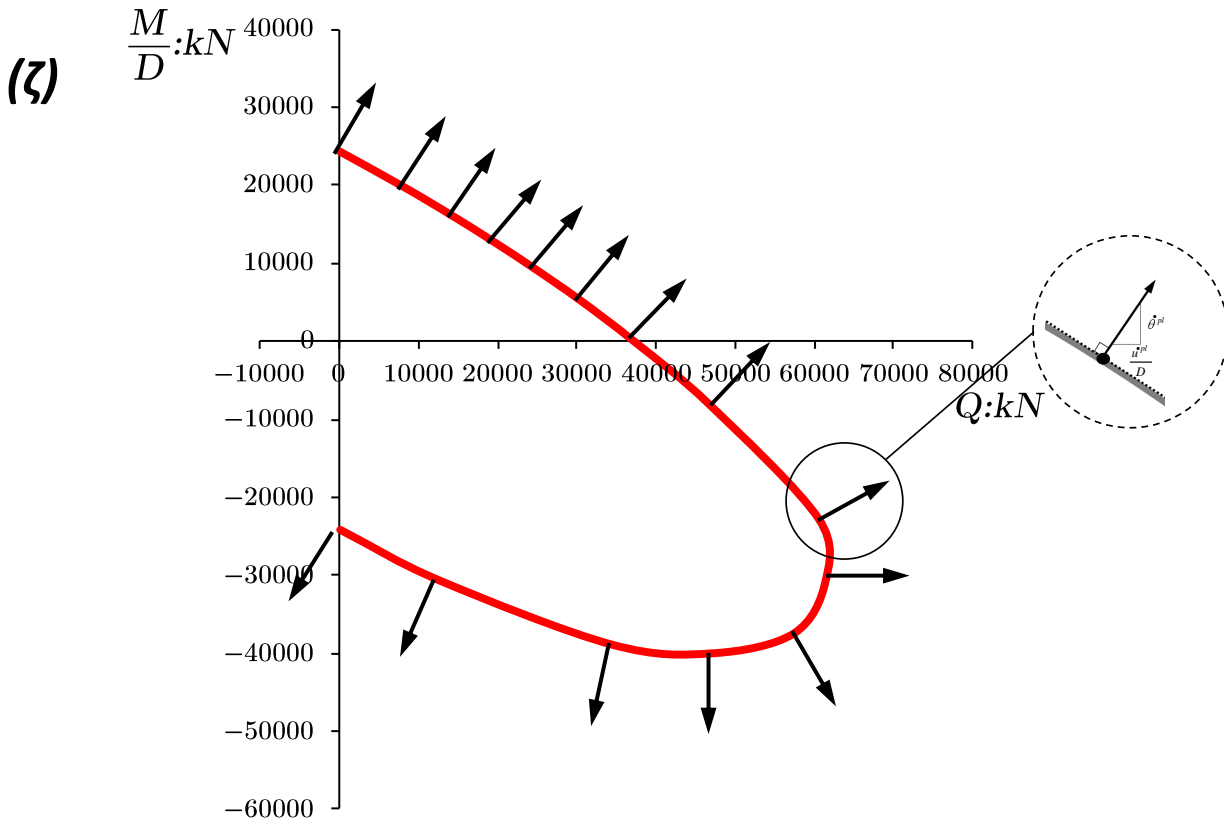


( $\varepsilon$ )

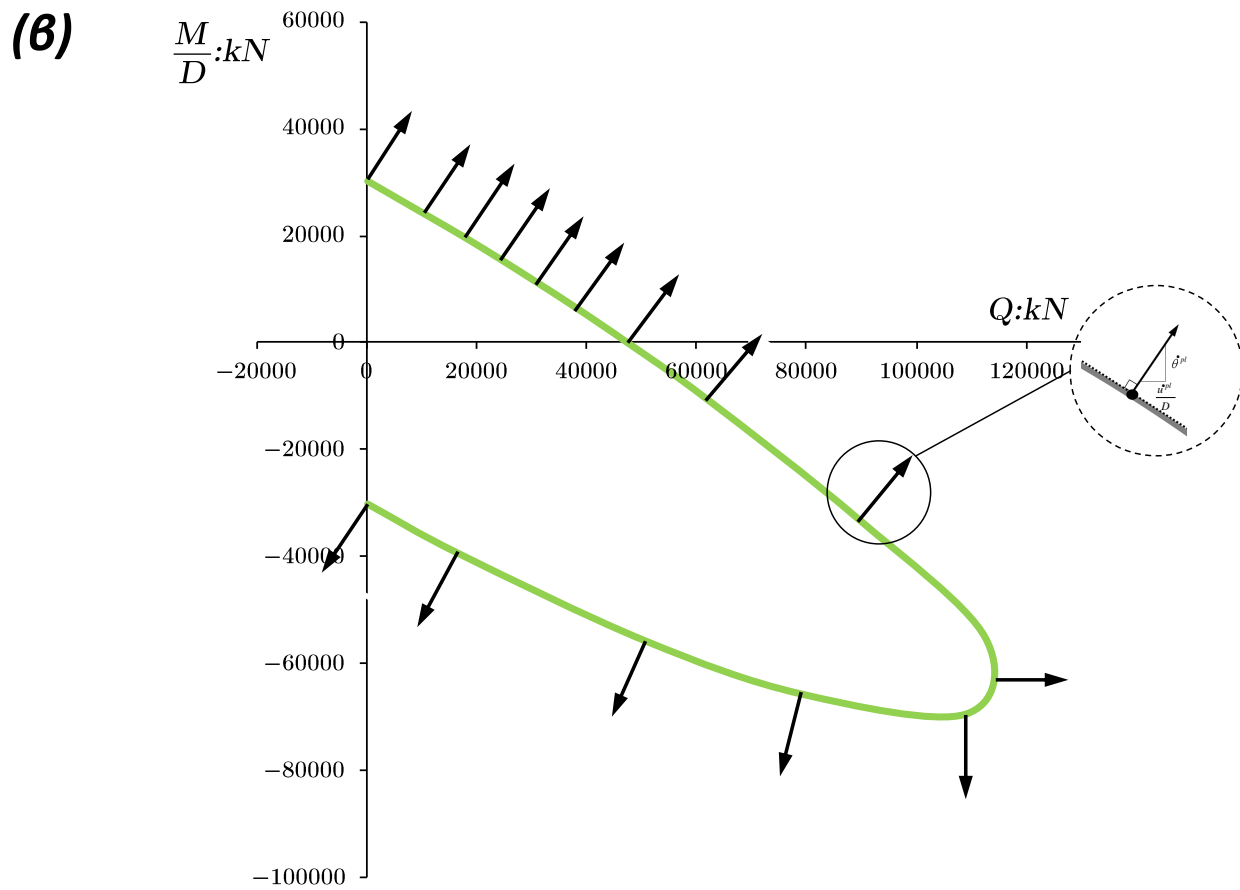
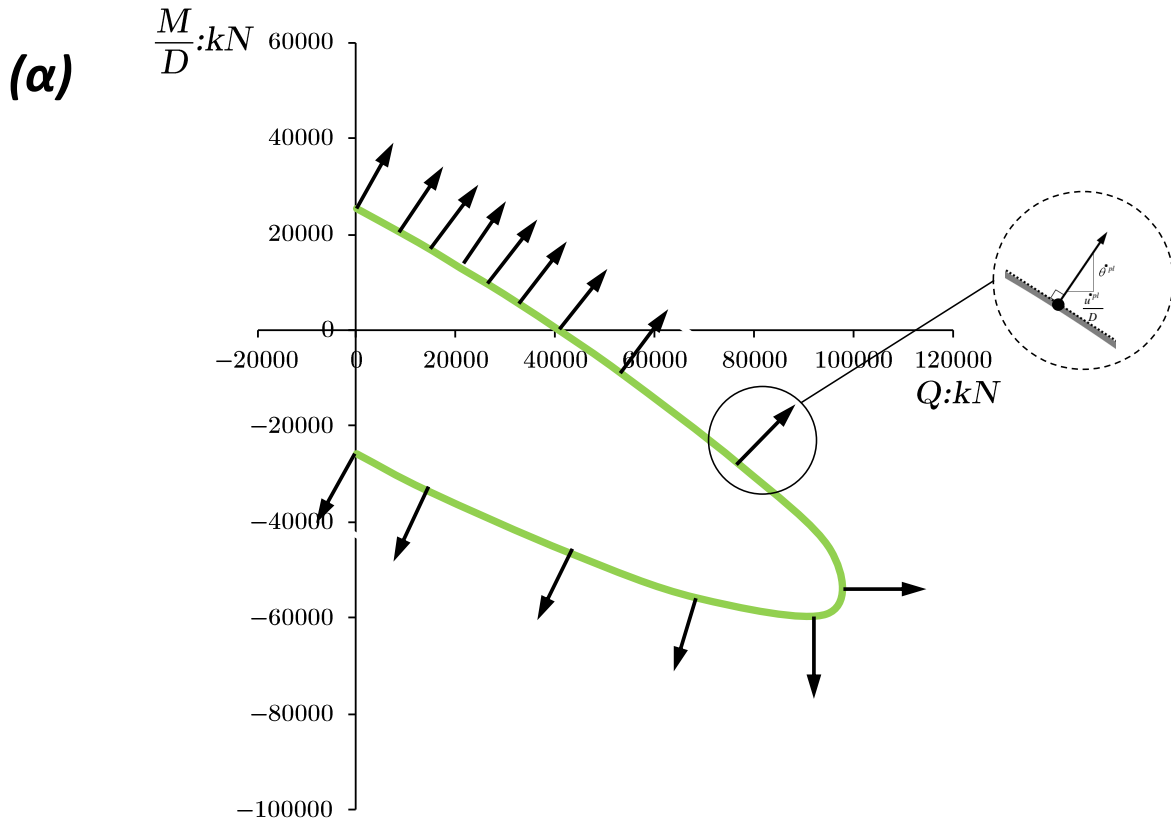


( $\sigma\tau$ )

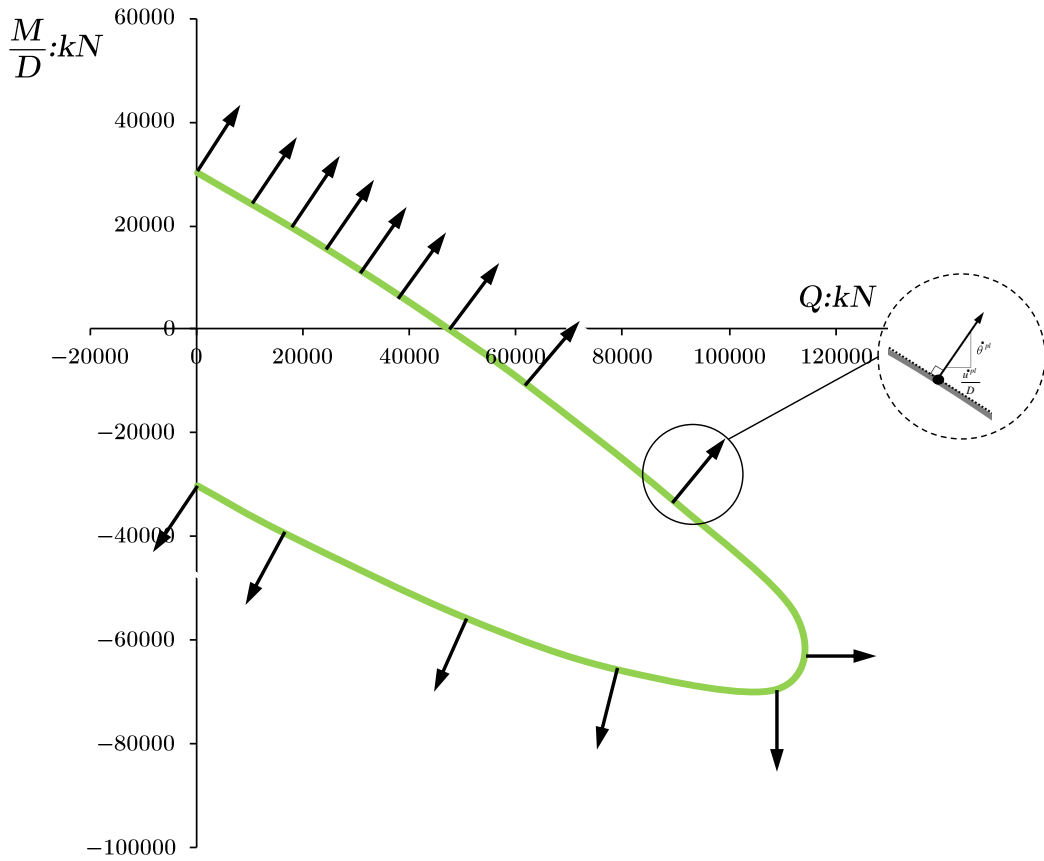




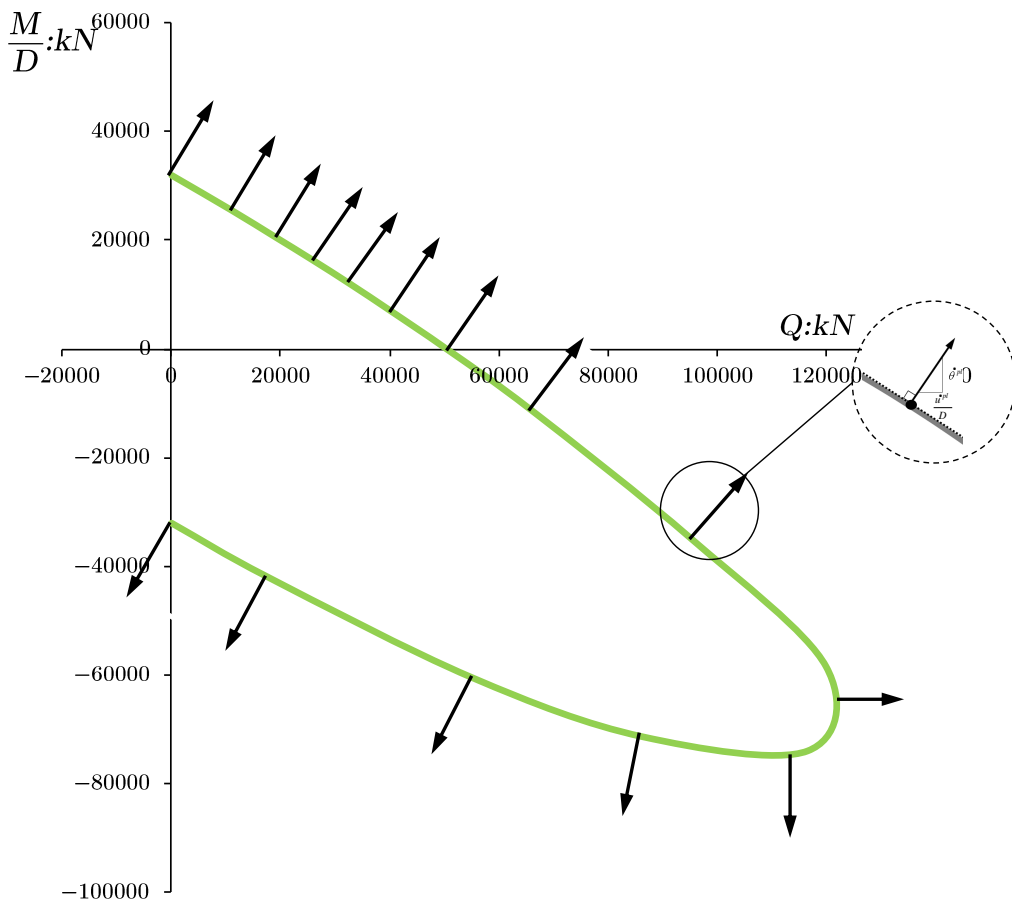
**Σχήμα 3.38.** Τα διανύσματα των μεταβολών των πλαστικών εγκάρσιων μετακινήσεων  $\delta u^{pl}$  και  $\delta \theta^{pl}$  κατά την αστοχία. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, διαδοχικά: (α)  $FS_v = 1.25$  ( $x = 0.8$ ), (β)  $FS_v = 1.66$  ( $x = 0.6$ ), (γ)  $FS_v = 2$  ( $x = 0.5$ ), (δ)  $FS_v = 2.5$  ( $x = 0.4$ ), (ε)  $FS_v = 5$  ( $x = 0.2$ ), (στ)  $FS_v = 10$  ( $x = 0.1$ ) και (ζ)  $FS_v = \infty$  ( $x = 0$ ).



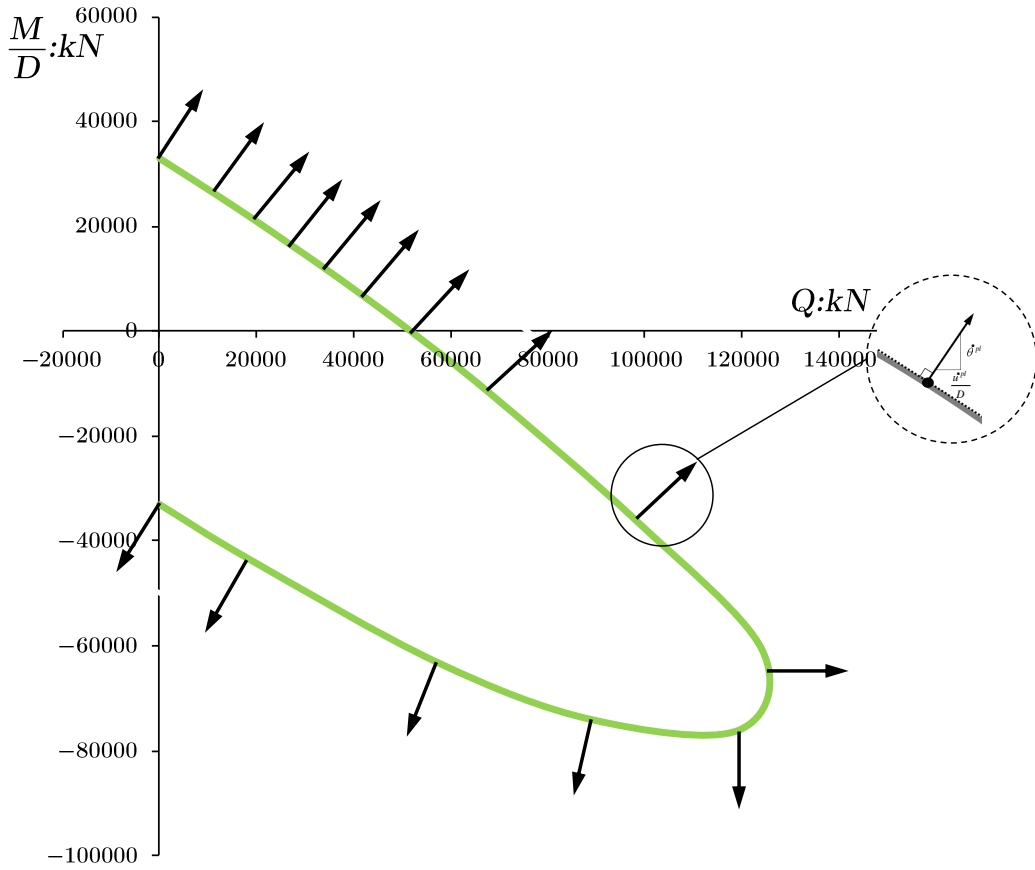
(γ)



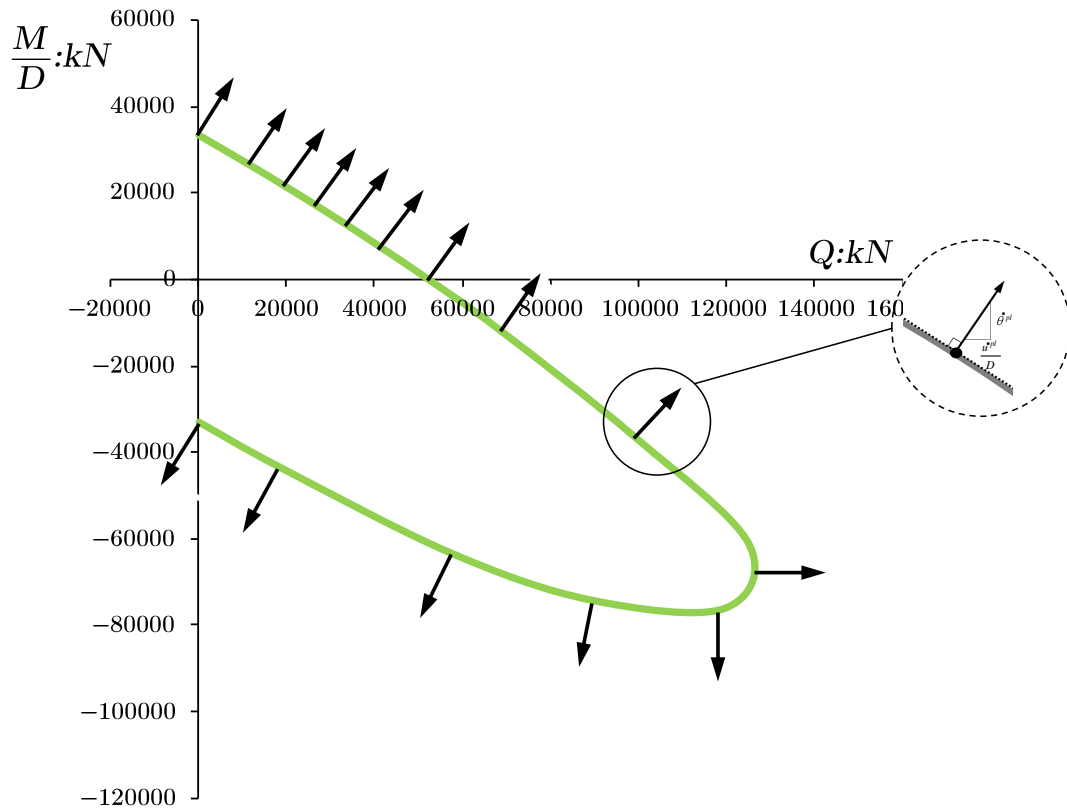
(δ)



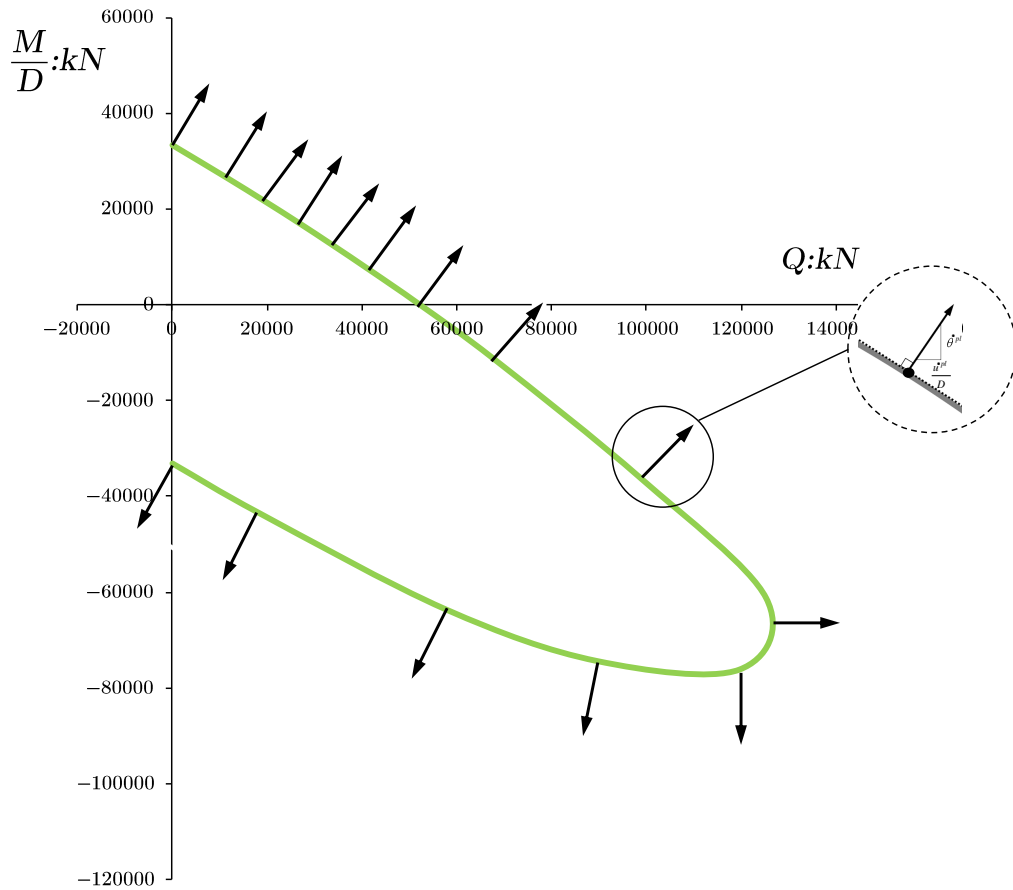
(ε)



(στ)

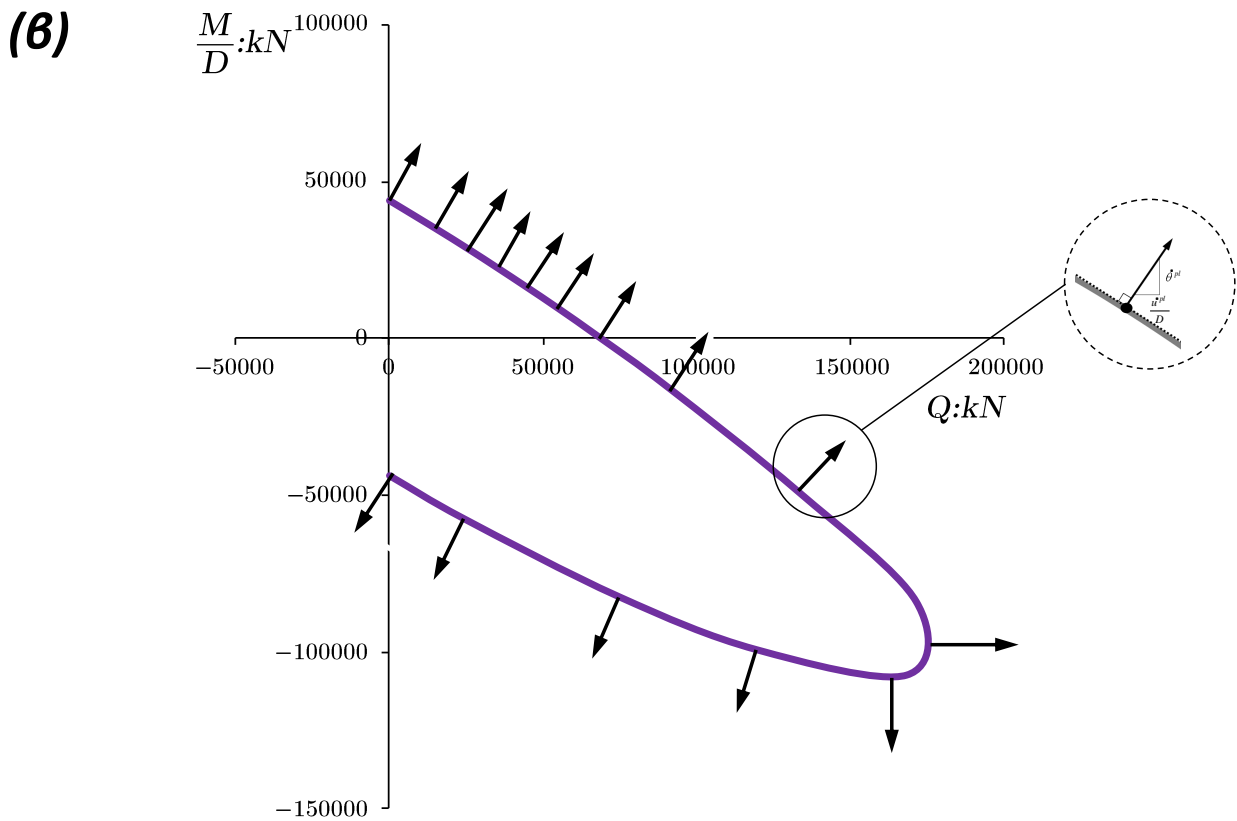
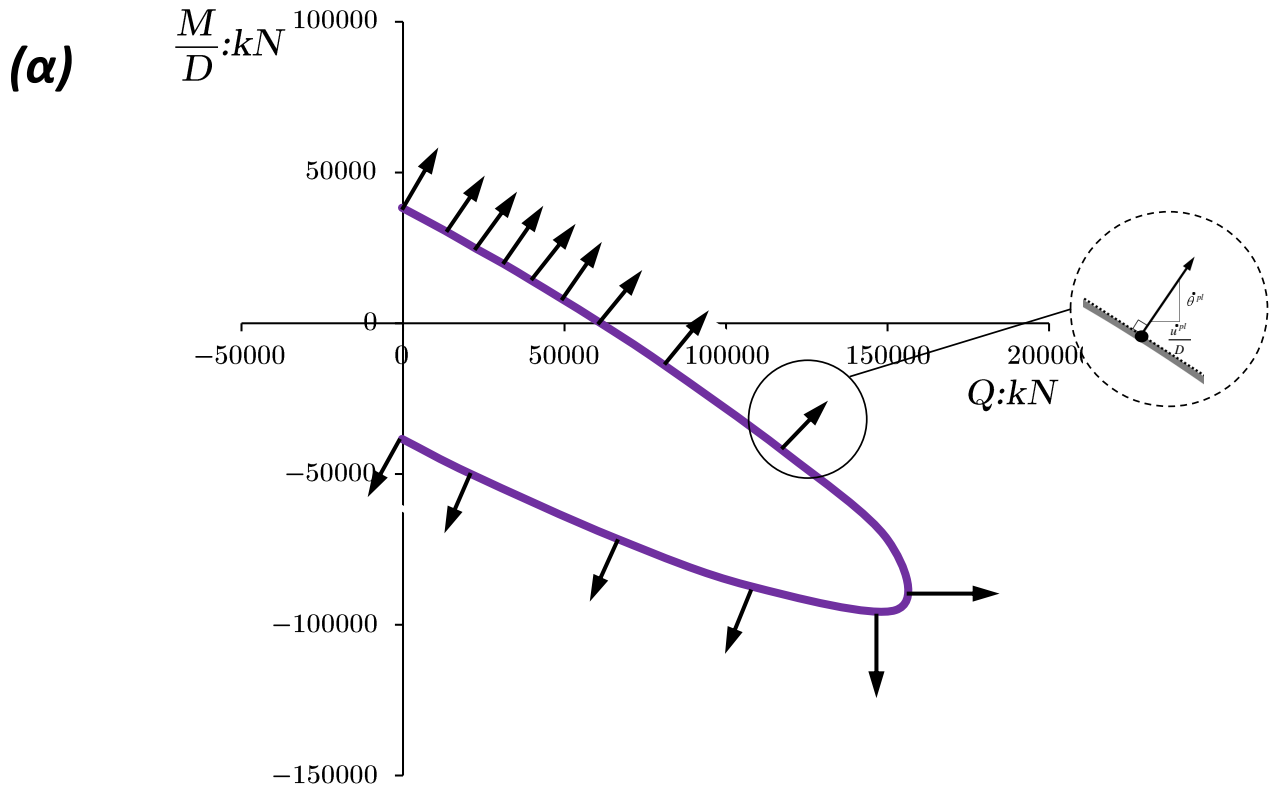


(ζ)

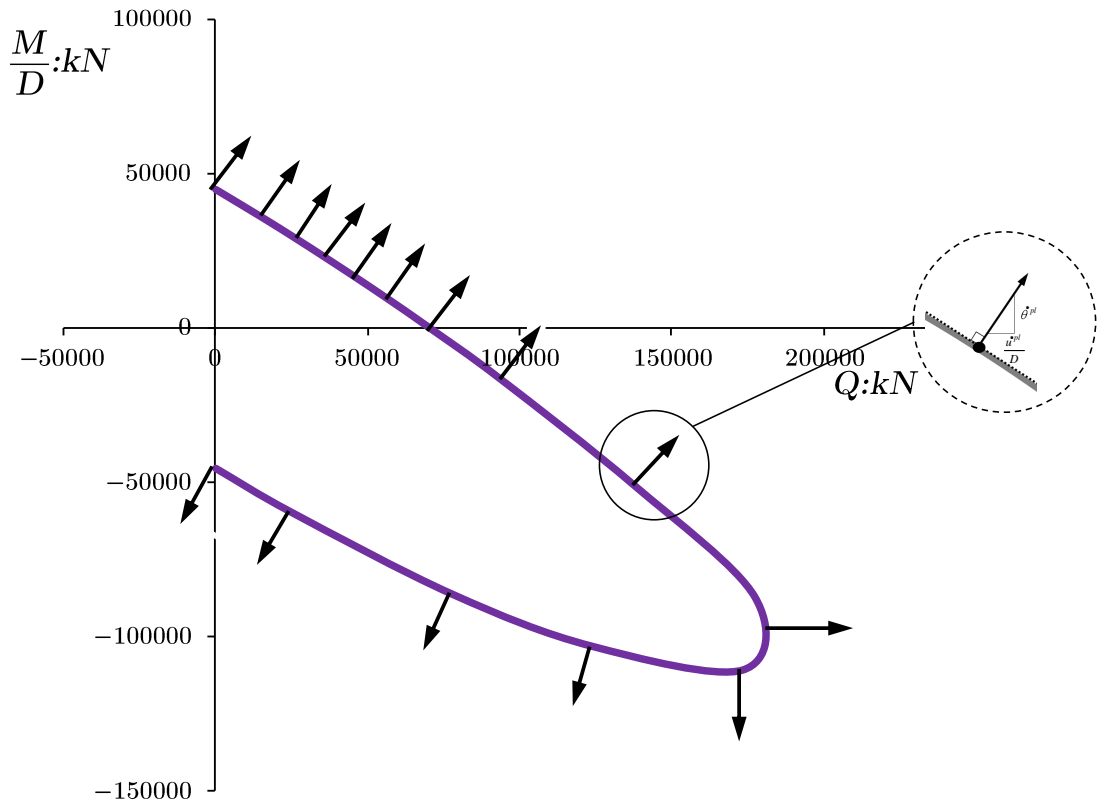


**Σχήμα 3.39.** Τα διανύσματα των μεταβολών των πλαστικών εγκάρσιων μετακινήσεων  $\delta u^{pl}$  και  $\delta \theta^{pl}$  κατά την αστοχία. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$ , και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, διαδοχικά: (α)  $FS_v = 1.25$  ( $x = 0.8$ ), (β)  $FS_v = 1.66$  ( $x = 0.6$ ), (γ)  $FS_v = 2$  ( $x = 0.5$ ), (δ)  $FS_v = 2.5$  ( $x = 0.4$ ), (ε)  $FS_v = 5$  ( $x = 0.2$ ), (στ)  $FS_v = 10$  ( $x = 0.1$ ) και (ζ)  $FS_v = \infty$  ( $x = 0$ ).

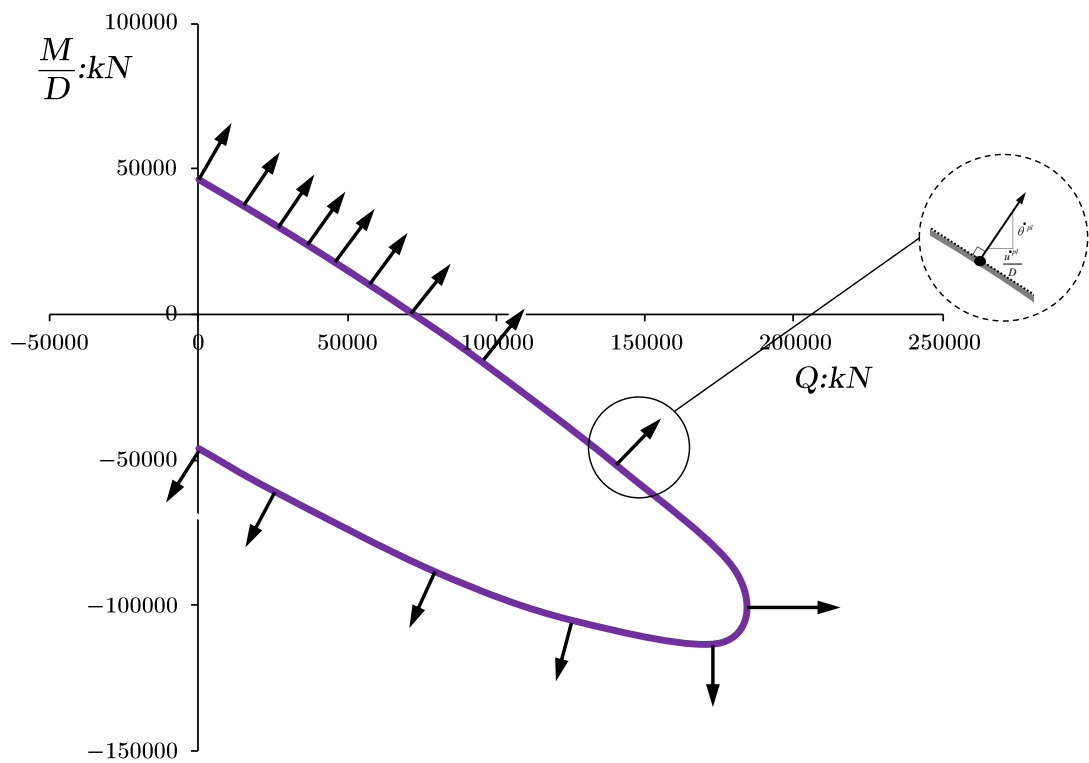




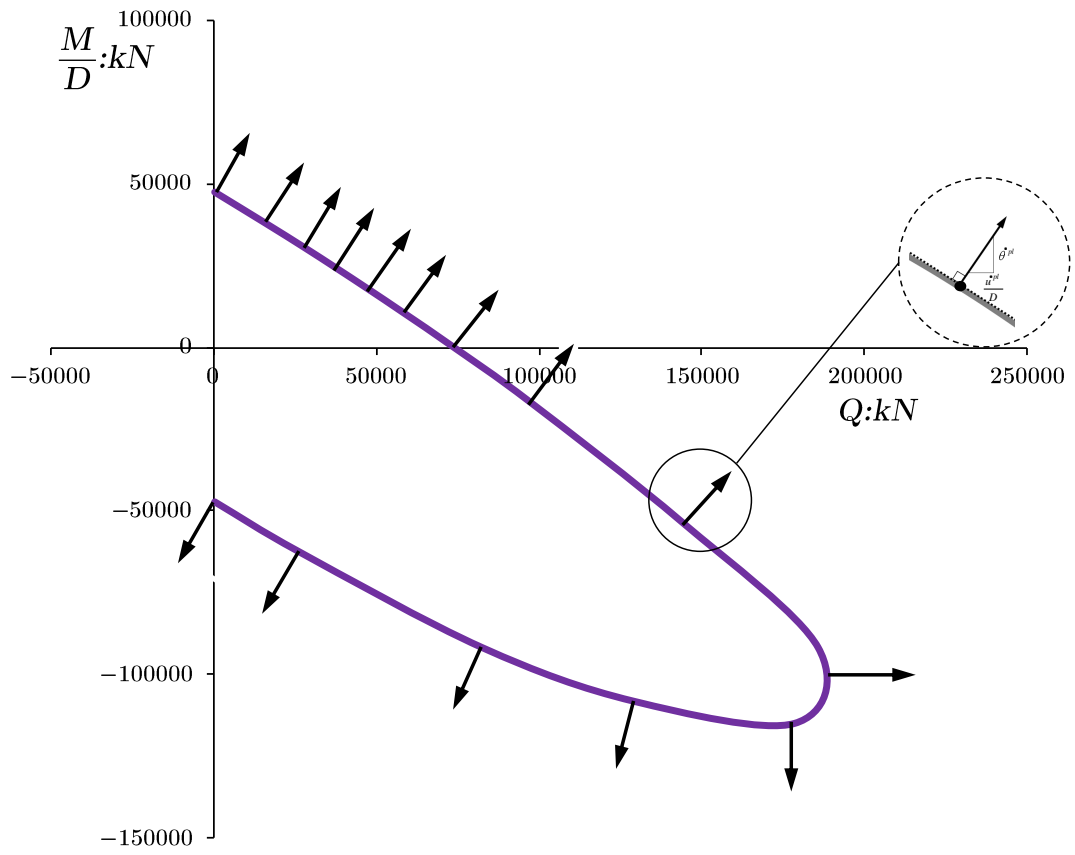
(γ)



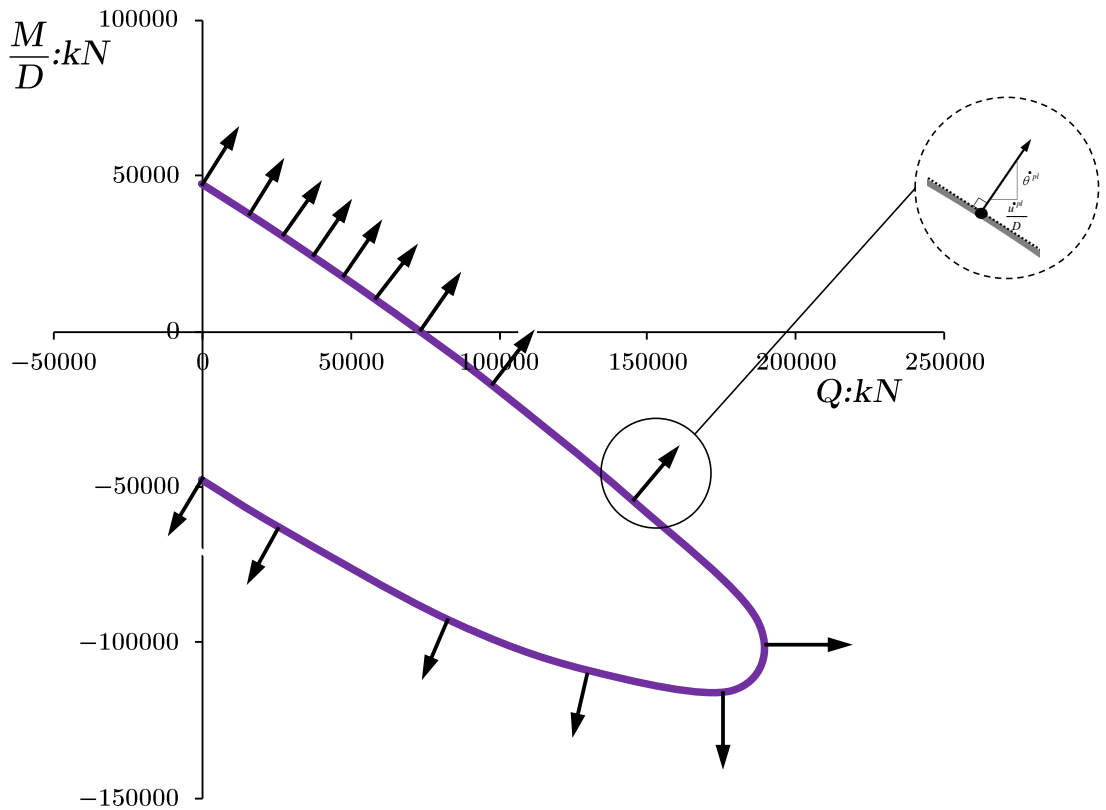
(δ)



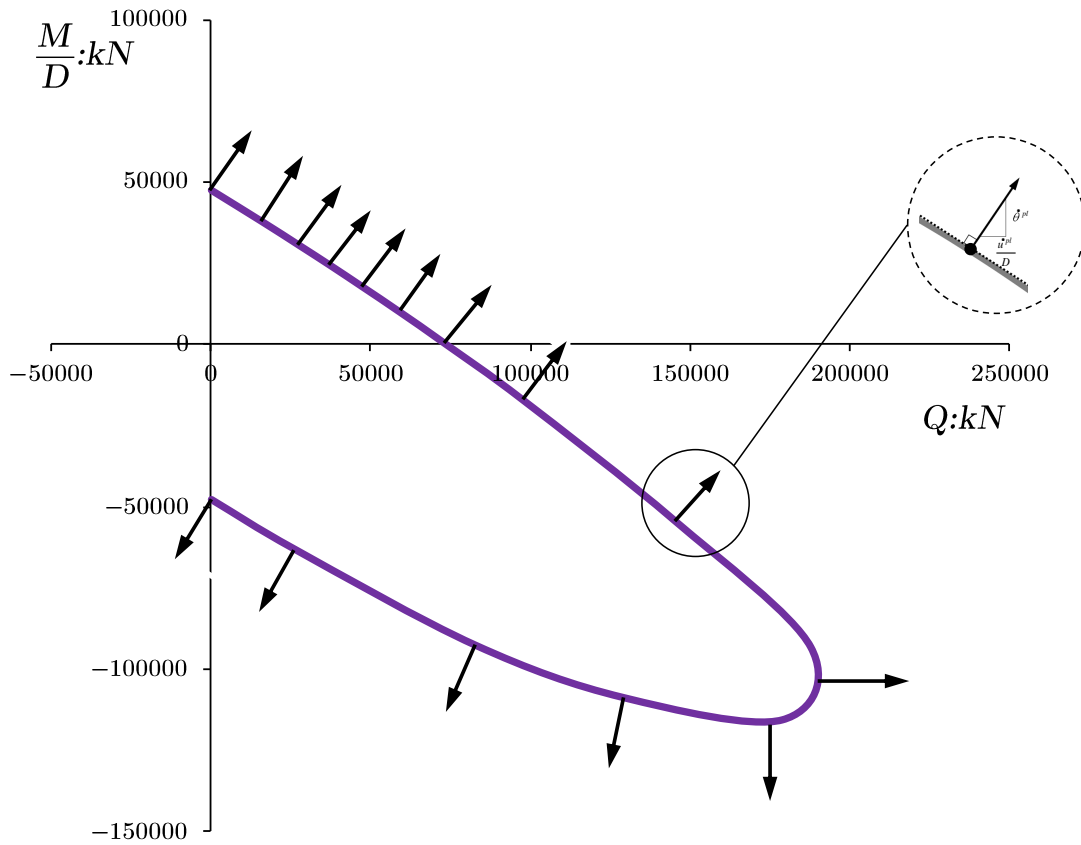
(ε)



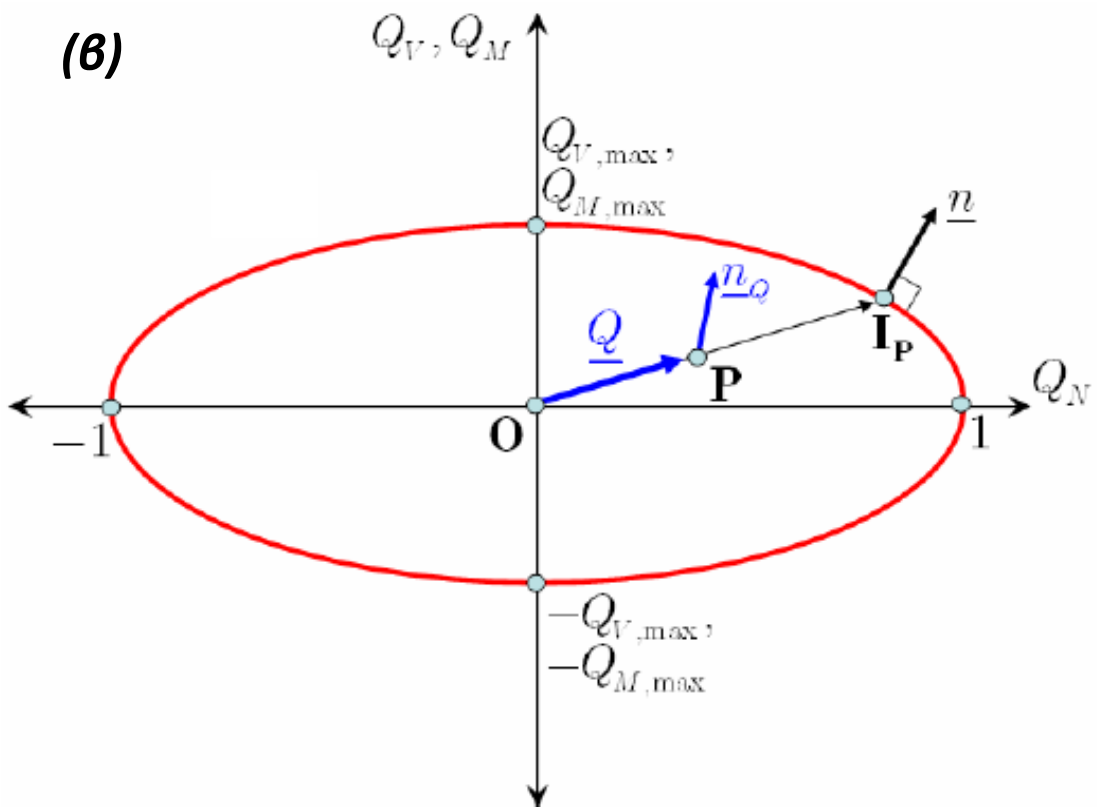
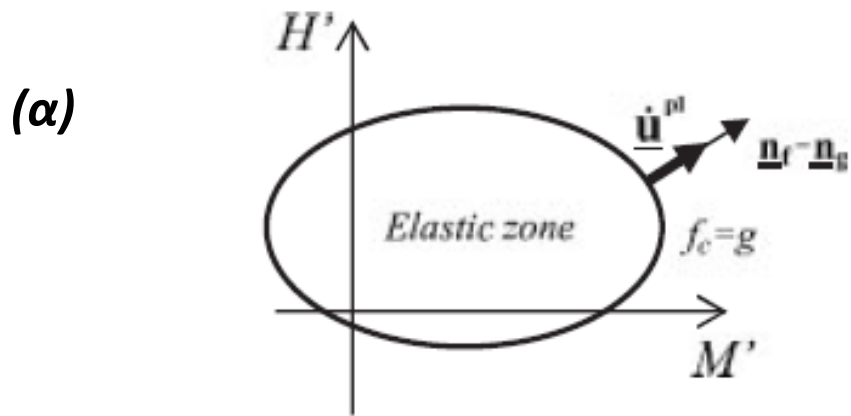
(σ)



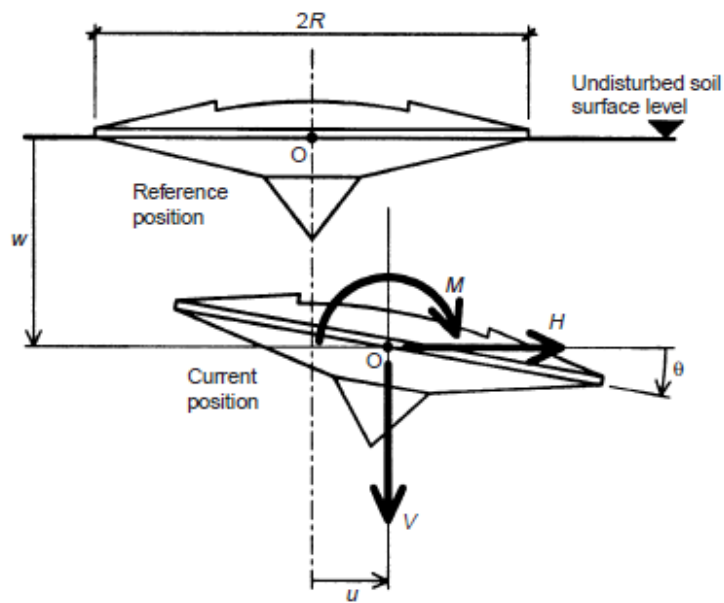
(ζ)



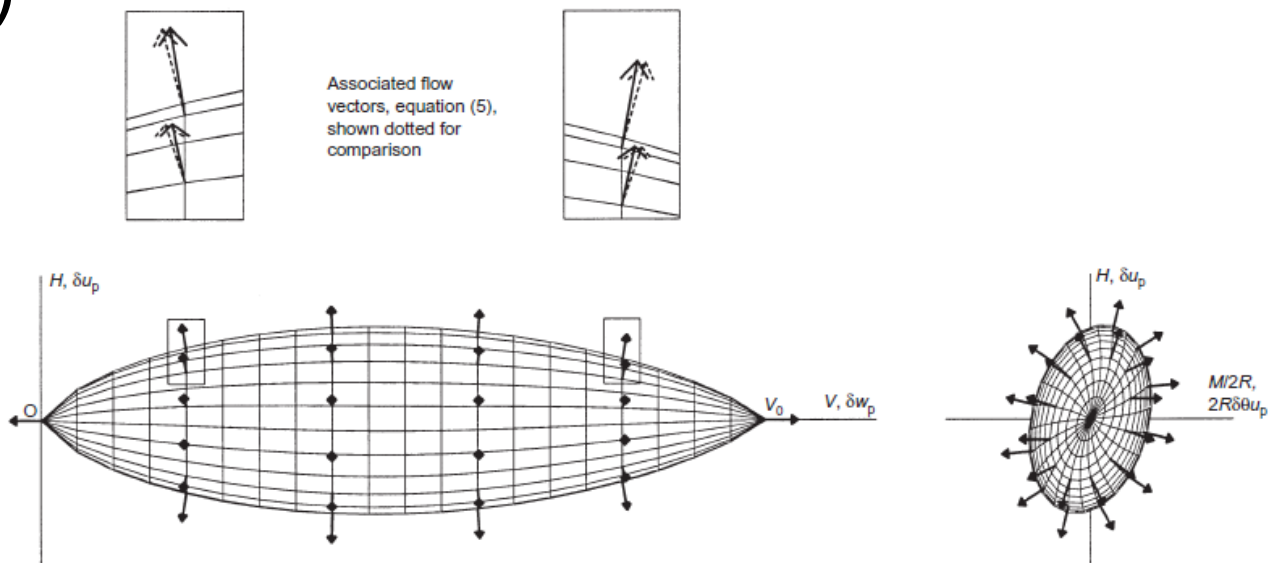
**Σχήμα 3.40.** Τα διανύσματα των μεταβολών των πλαστικών εγκάρσιων μετακινήσεων  $\delta u^{pl}$  και  $\delta \theta^{pl}$  κατά την αστοχία. Απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ , και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, διαδοχικά: (α)  $FS_v = 1.25$  ( $x = 0.8$ ), (β)  $FS_v = 1.66$  ( $x = 0.6$ ), (γ)  $FS_v = 2$  ( $x = 0.5$ ), (δ)  $FS_v = 2.5$  ( $x = 0.4$ ), (ε)  $FS_v = 5$  ( $x = 0.2$ ), (στ)  $FS_v = 10$  ( $x = 0.1$ ) και (ζ)  $FS_v = \infty$  ( $x = 0$ ).



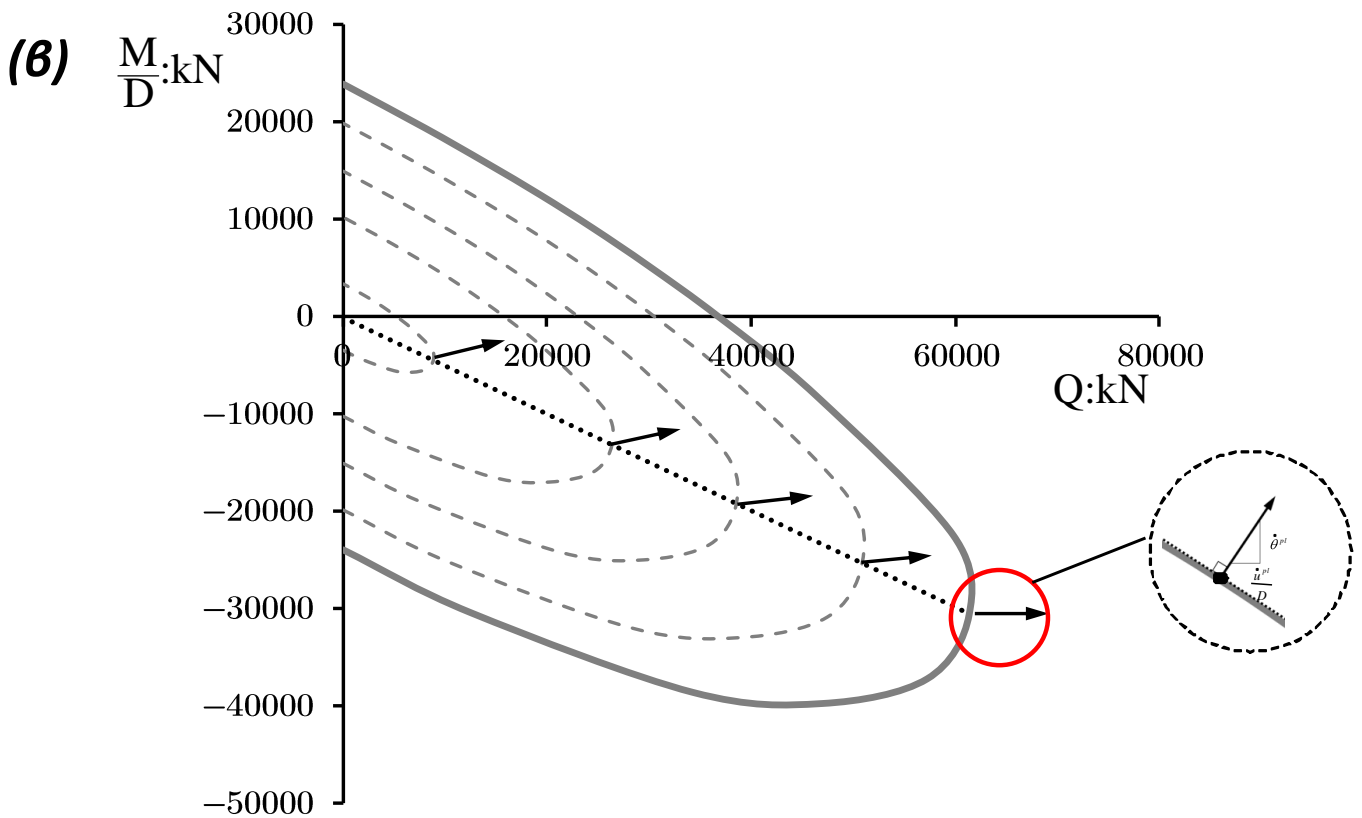
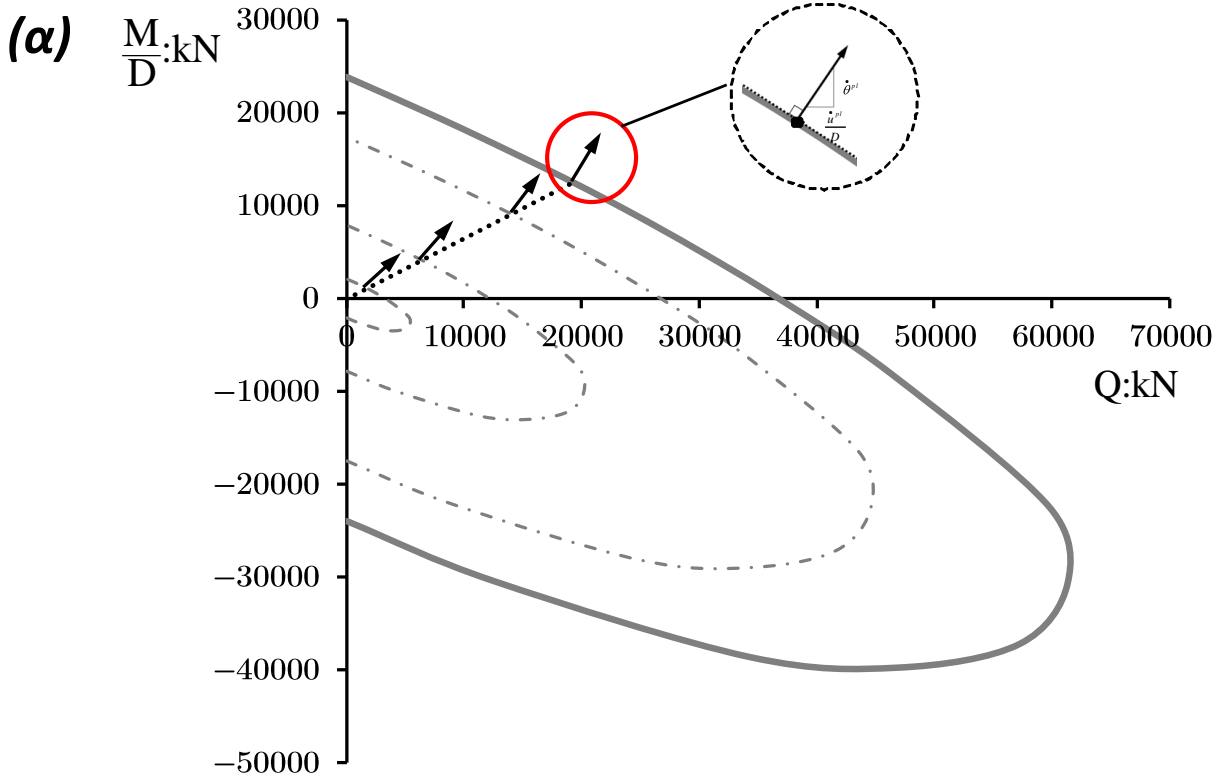
(γ)



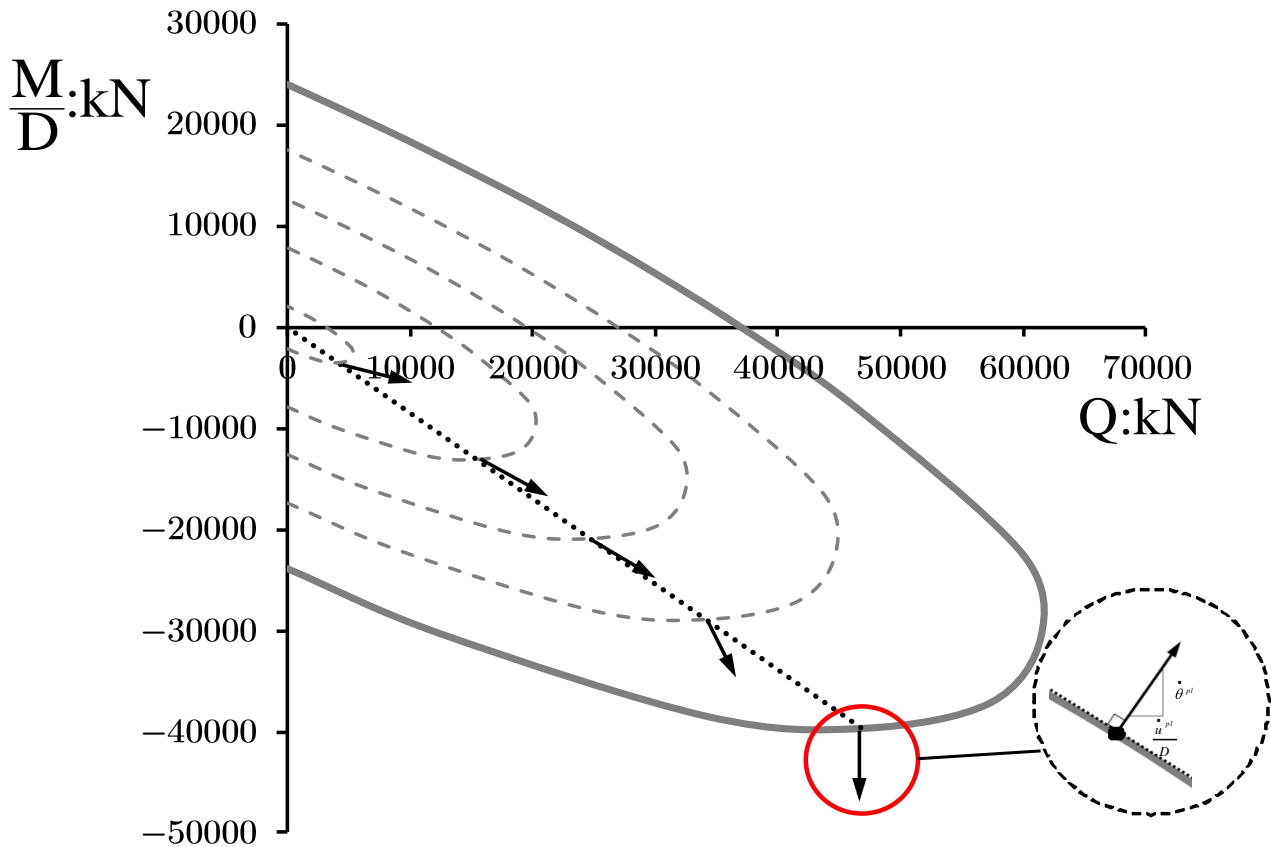
(δ)



**Σχήμα 3.41.** Βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με την ισχύ του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής: σχήματα (α) και (β), για επιφανειακές θεμελιώσεις [Grange, Kotronis, Mazars 2008; Chatzigogos, Figini, Pecker, Salençon 2011] και σχήμα (δ) για θεμελιώσεις έργων ανοικτής θαλάσσης (sprudcan foundations, [Martin and Houlsby 2001]). Στο σχήμα (γ), παρουσιάζεται σκαριφηματικά (για λόγους πληρότητας) η όψη του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης.

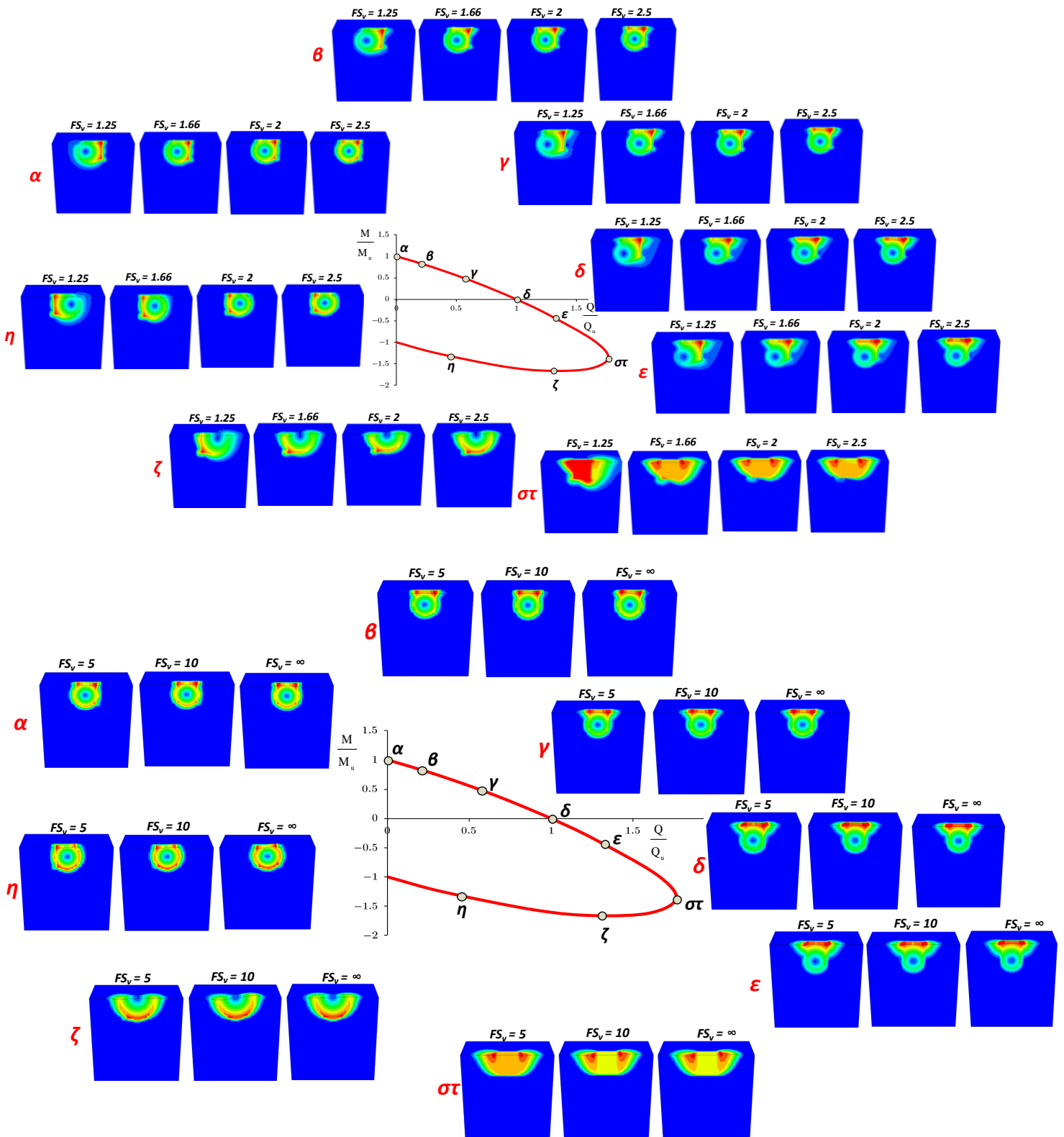


(γ)

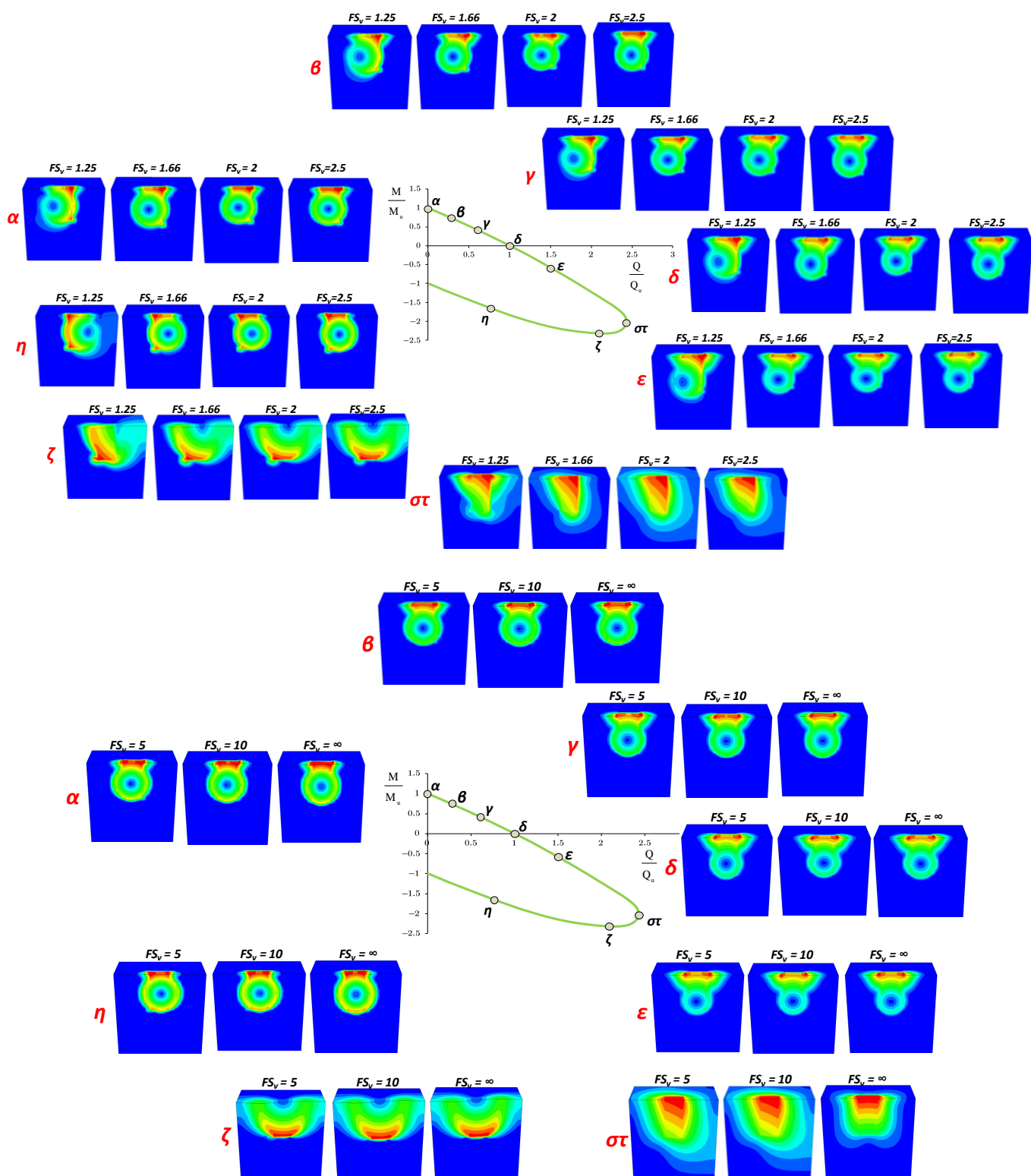


**Σχήμα 3.42.** Η εξέλιξη των διανυσμάτων των πλαστικών μετακινήσεων κατά μήκος τριών ακτινικών διαδρομών φόρτισης: (α) ακτινική διαδρομή φόρτισης που καταλήγει στο 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του επιπέδου  $M - Q$ , (β) ακτινική διαδρομή φόρτισης που καταλήγει στο σημείο της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$  και (γ) ακτινική διαδρομή φόρτισης που καταλήγει στο σημείο της μέγιστης ροπής  $M_{max}$ . Η καμπύλη αλληλεπίδρασης που καταγράφεται στις τρεις περιπτώσεις (γκρι συνεχής γραμμή) αντιστοιχεί σε φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , και σε συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 5$ . Και στις τρεις περιπτώσεις, τα διανύσματα μεταβάλλονται σταδιακά και σταθεροποιούνται πλησίον της κατάστασης αστοχίας της θεμελίωσης, υποδηλώνοντας τον σχηματισμό του τελικού πόλου περιστροφής.

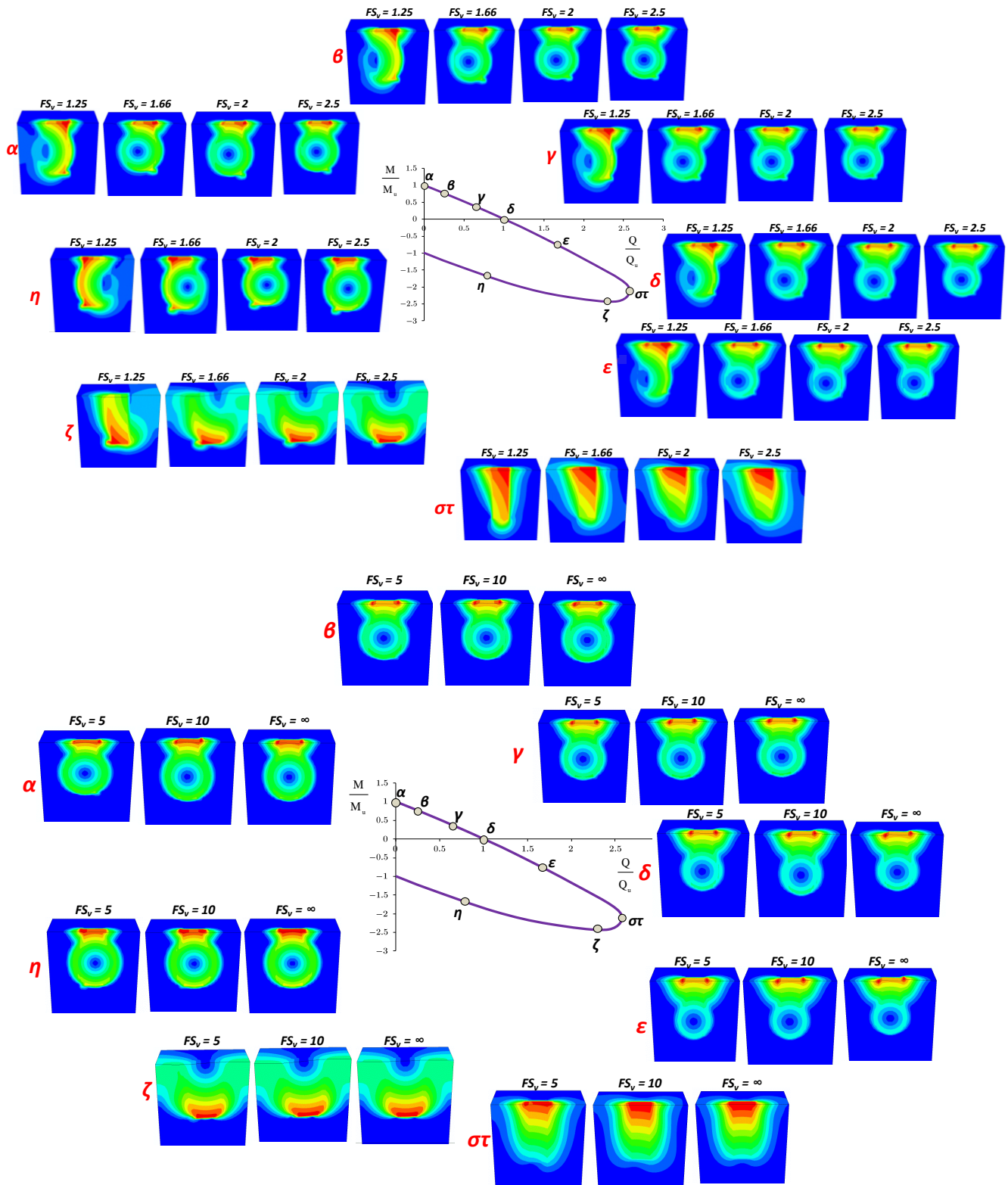




**Σχήμα 3.43.** Η απεικόνιση των πόλων περιστροφής βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , για διάφορα σημεία επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Η απεικόνιση των πόλων γίνεται μέσω της “περιοχής” μηδενισμού του διανυσματικού αθροίσματος των μετατοπίσεων του συστήματος της θεμελίωσης.



**Σχήμα 3.44.** Η απεικόνιση των πόλων περιστροφής βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$ , για διάφορα σημεία επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Η απεικόνιση των πόλων γίνεται μέσω της “περιοχής” μηδενισμού του διανυσματικού αθροίσματος των μετατοπίσεων του συστήματος της θεμελίωσης.

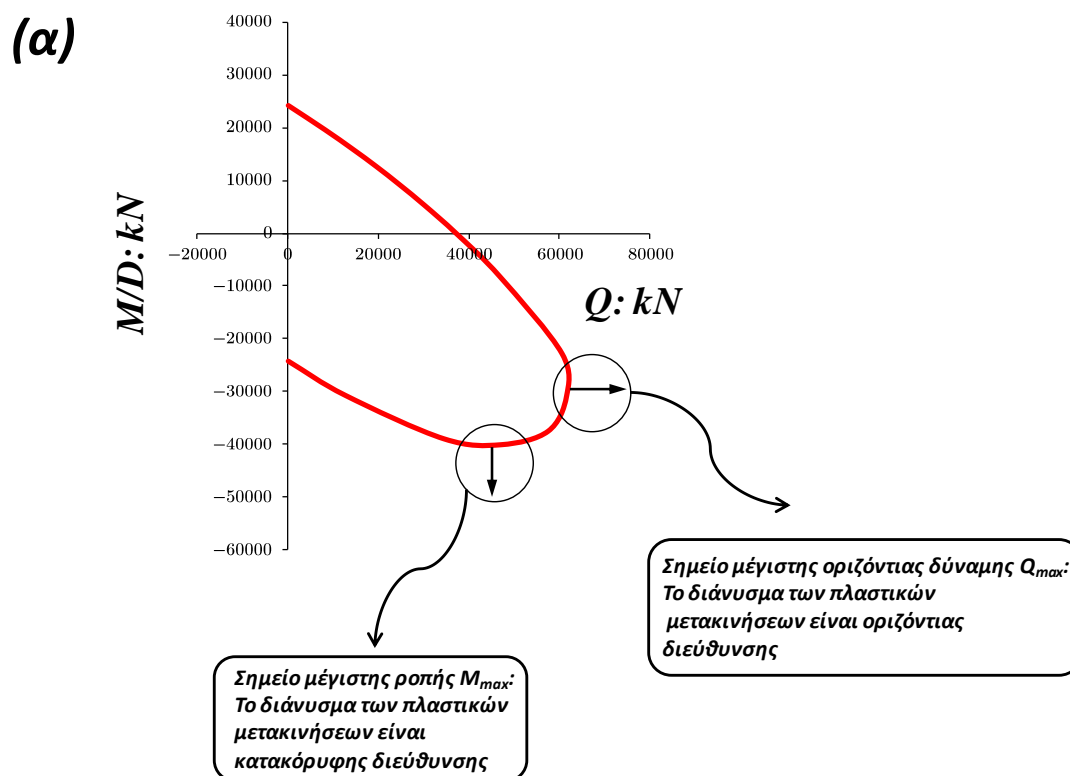


**Σχήμα 3.45.** Η απεικόνιση των πόλων περιστροφής βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ , για διάφορα σημεία επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Η απεικόνιση των πόλων γίνεται μέσω της “περιοχής” μηδενισμού του διανυσματικού αθροίσματος των μετατοπίσεων του συστήματος της θεμελίωσης.

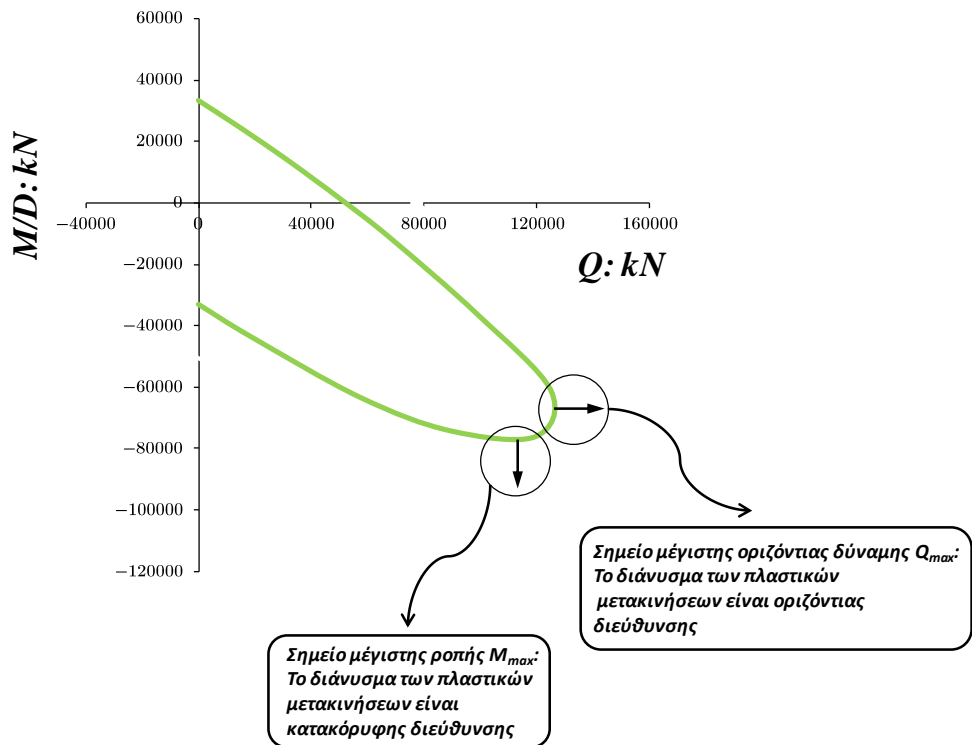
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1**

Βάθος πόλου περιστροφής (m)	$D/B = 1$	$D/B = 2$	$D/B = 3$
Σημείο <b>α</b>	5.44	11.62	17.91
Σημείο <b>β</b>	6.17	12.42	18.93
Σημείο <b>γ</b>	6.86	13.08	19.75
Σημείο <b>δ</b>	8.07	14.04	20.87
Σημείο <b>ε</b>	9.19	15.15	22.02
Σημείο <b>στ</b>	$\infty$	$\infty$	$\infty$
Σημείο <b>ζ</b>	0	0	0
Σημείο <b>η</b>	4.74	10.93	16.97

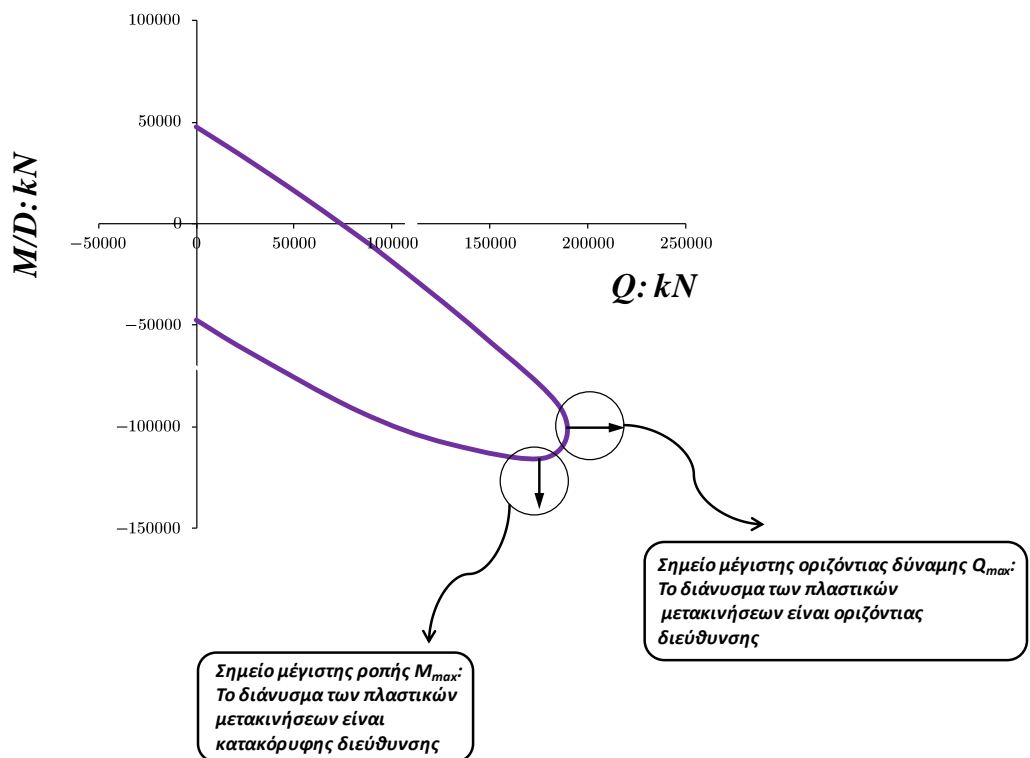
**Σχήμα 3.46.** Συγκεντρωτικός πίνακας του βάθους του πόλου περιστροφής για κάθε ένα από τα σημεία που ορίστηκαν παραπάνω, και για κάθε λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ . Το βάθος του πόλου περιστροφής είναι ανεξάρτητο από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Οι τιμές που παρουσιάζονται αναφέρονται στον λόγο των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης ( $\delta u^{pl}/\delta \theta^{pl}$ ), ο οποίος και υποδηλώνει την θέση του πόλου περιστροφής, όπως ακριβώς αναπτύχθηκε στο παρόν κεφάλαιο.



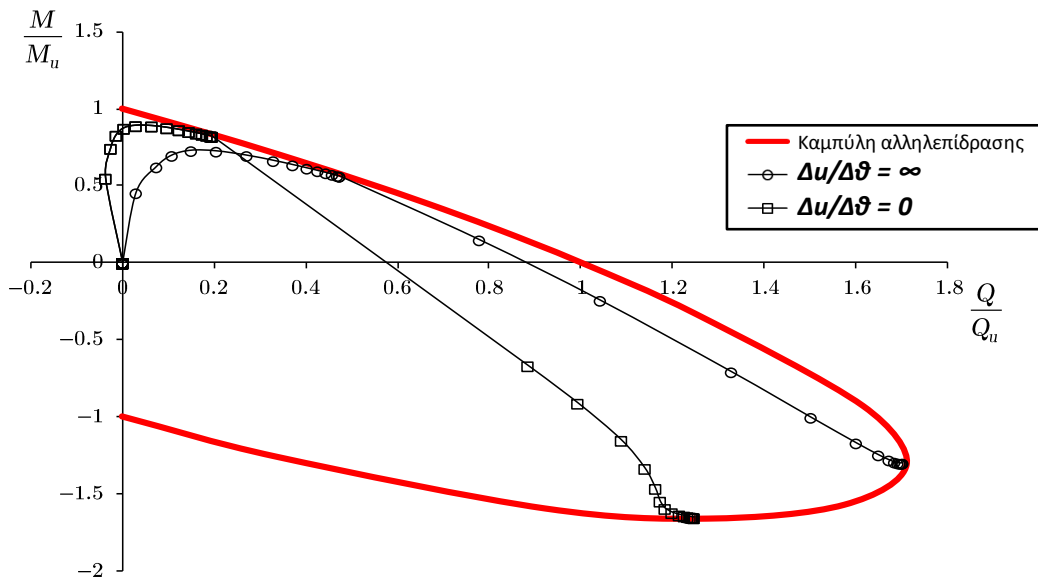
(β)



(γ)



**Σχήμα 3.47.** Τα διανύσματα των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων στα σημεία της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$  και της μέγιστης ροπής  $M_{max}$ . Το σχήμα (α) αναφέρεται σε λόγο εγκλιωτισμού της θεμελίωσης  $D/B = 1$ , το σχήμα (β) σε λόγο  $D/B = 2$  και το σχήμα (γ) σε λόγο  $D/B = 3$ .



**Σχήμα 3.48.** Δοκιμές τύπου "swire", για φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ . Και στις δύο αναλύσεις που διεξήχθησαν, εξασφαλίστηκε (με την εισαγωγή ενός επιπλέον σταδίου ανάλυσης) ότι ο λόγος των μεταβολών των μετακινήσεων στην κορυφή της θεμελίωσης θα ισούται με  $\Delta u/\Delta \theta = \infty$  και  $\Delta u/\Delta \theta = 0$ , αντίστοιχα.



---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

---

### 4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Οι τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας είχαν ως στόχο τόσο την παραγωγή των καμπυλών αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, όσο και την μελέτη των διάφορων εδαφικών μηχανισμών παραμόρφωσης που κινητοποιούνται κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης. Κατά μήκος μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης, σε κάθε της σημείο κινητοποιούνται διαφορετικοί μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης, όπως έχει επισημανθεί στο παρελθόν από ερευνητές [Salençon and Pecker 1995; Bransby and Randolph 1998; Ukritchon et al. 1998], υποδηλώνοντας την άμεση εξάρτηση των επιμέρους μηχανισμών που κινητοποιούνται με τον λόγο των επιβαλλόμενων εντατικών μεγεθών  $M/Q$ , δηλαδή με τον σταθερό μοχλοβραχίονα που θεωρείται κατά την διάρκεια των αναλύσεων με την μέθοδο των επιβαλλόμενων δυνάμεων (π.χ. ύψος βάθρου γέφυρας, ή ύψος ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή).

Οι Bransby και Yun [2009] διεξήγαγαν αναλύσεις “ανώτατων ορίων” με βάση την θεωρία της πλαστικότητας (rigid plasticity upper-bound analysis), προκειμένου να κατηγοριοποιήσουν τις εδαφικές συνθήκες αστοχίας υπό την συνδυασμένη φόρτιση θεμελιώσεων (κατακόρυφης δύναμης  $N$ , οριζόντιας δύναμης  $Q$  και ροπής  $M$ ). Οι αναλύσεις αυτές έγιναν στα πρότυπα των αντίστοιχων μεθόδων που προτάθηκαν από τους Bransby και Randolph [1998], με την πιθανοτική εφαρμογή απλών, αλλά και κινηματικώς αποδεκτών, μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης, οι οποίοι είχαν την βάση τους στους αντίστοιχους μηχανισμούς που παρατηρήθηκαν ύστερα από αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία. Η εργασία τους βασίστηκε στις “εγκιβωτισμένες”



επιφανειακές θεμελιώσεις, μέσω περιμετρικών κατακόρυφων τοιχωμάτων (skirted foundations, **Σχήμα 4.1(α)**), λαμβάνοντας υπ' όψιν και ορισμένους πρόσθετους μηχανισμούς εδαφικής παραμόρφωσης που δεν είναι δυνατόν να εμφανιστούν στις κλασσικές συμπαγείς εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις- φρέατα, διότι περιλαμβάνουν εδαφική παραμόρφωση ανάμεσα στα κατακόρυφα τοιχώματα (skirts). Στο **Σχήμα 4.1(β)** απεικονίζονται σκαριφηματικά όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης που δύναται να κινητοποιηθούν κατά την εγκάρσια φόρτιση εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, γενικότερα, όπως αυτοί επισημάνθηκαν στην εργασία των Bransby και Yun. Επιγραμματικά, οι εν λόγω μηχανισμοί μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες, με βάση την αγγλική ορολογία που εισήχθη στην συγκεκριμένη έρευνα: (α) "forward scoop", (β) "scoop- slide", (γ) "internal Hansen", (δ) "reverse scoop" και (ε) "internal double scoop". Σημειώνεται ότι οι κατηγορίες μηχανισμών που αναφέρονται αποκλειστικά στην περίπτωση των επιφανειακών θεμελιώσεων με κατακόρυφα περιμετρικά τοιχώματα (skirted foundations) είναι οι (γ) και (ε), οι οποίες αποτελούνται από συνδυασμούς σύνθετων μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης ανάμεσα στα τοιχώματα αυτά, και συνεπώς δεν εξετάζονται στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Εν συντομία, οι υπολογισμοί των εντατικών μεγεθών αστοχίας με την μέθοδο των "ανώτατων ορίων" (upper-bound analysis), που βασίζονται στην θεωρία της πλαστικότητας, αποτελούνται από δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, επιλέγονται οι τιμές δύο εντατικών μεγεθών και διατηρούνται σταθερές (π.χ.  $N = 0$  και  $Q = 0$ ). Έπειτα, διεξάγονται αριθμητικές αναλύσεις για κάθε έναν θεωρούμενο διαθέσιμο μηχανισμό εδαφικής παραμόρφωσης, με σκοπό την εύρεση της χαμηλότερης τιμής του τρίτου αγνώστου εντατικού μεγέθους (π.χ. εδώ της ροπής  $M$ ). Για κάθε έναν μηχανισμό ξεχωριστά, οι κινηματικές μεταβλητές (kinematic variables, π.χ. μήκος  $L$ ) μεταβάλλονται διαδοχικά, με τελικό στόχο τον εντοπισμό του ελάχιστου (των ελαχίστων) τρίτου φορτίου αστοχίας. Το ελάχιστο αυτό φορτίο μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστά την βέλτιστη δυνατή προσέγγιση τις συνδυασμένης, πλέον, συνθήκης αστοχίας του συστήματος, δηλαδή του γενικού συνδυασμού φόρτισης  $M - Q - N$ . Η διαδικασία που παρουσιάστηκε είναι επαναληπτικής φύσεως και οδηγεί, εν τέλει, στην παραγωγή κατάλληλων τομών της επιφάνειας αλληλεπίδρασης του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης, σε πλήρη αντιστοιχία με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων (καμπύλες αλληλεπίδρασης στο

κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ ), όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά στο **Σχήμα 4.2**.

#### **4.2 Ταξινόμηση των χαρακτηριστικών σημείων των καμπυλών αλληλεπίδρασης**

Στα **Σχήματα 4.3(α)** έως **4.3(ζ)** παρουσιάζονται οι κινητοποιούμενοι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους- φρέατος, σε σχέση με την θέση του κάθε σημείου πάνω στην καμπύλη αλληλεπίδρασης, δηλαδή σε συνάρτηση με τον λόγο των επιβαλλόμενων εντατικών μεγεθών  $M/Q$ . Συγκεκριμένα, απεικονίζονται (ποιοτικά) τα στιγμιότυπα των ισοϋψών των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων κατά την αστοχία, σε χαρακτηριστικά σημεία επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης, για όλους τους εξεταζόμενους λόγους εγκιβωτισμού  $D/B$  και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Ως χαρακτηριστικά, λαμβάνονται τα εξής σημεία: (α) σημείο μηδενικής οριζόντιας δύναμης ( $Q = 0$ ) και “καθαρής” αντοχής σε ροπή  $M_u$ , (β) σημείο θετικής οριζόντιας δύναμης  $Q$  και θετικής ροπής  $M$ , (γ) σημείο “καθαρής” αντοχής σε οριζόντια δύναμη  $Q_u$  και μηδενικής ροπής ( $M = 0$ ), (δ) σημείο θετικής οριζόντιας δύναμης  $Q$  και αρνητικής ροπής  $M$ , (ε) σημείο μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$  και ταυτόχρονης αρνητικής ροπής  $M$ , (στ) σημείο μέγιστης ροπής  $M_{max}$  (αρνητικής) και ταυτόχρονης θετικής οριζόντιας δύναμης  $Q$  και, τέλος, (ζ) σημείο θετικής οριζόντιας δύναμης  $Q$  και αρνητικής ροπής  $M$ . Σημειώνεται ότι τα σημεία (δ) και (ζ) διαφέρουν μεταξύ τους, διότι ανήκουν σε τμήματα επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης διαφορετικής καμπυλότητας. Παρατηρείται ότι κάθε ένας διαφορετικός κινητοποιούμενος μηχανισμός εδαφικής παραμόρφωσης του συστήματος της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης δεν εξαρτάται (ποιοτικά) από τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ , ούτε επίσης από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , παρά μόνον από την θέση του θεωρούμενου σημείου πάνω στην καμπύλη αλληλεπίδρασης, δηλαδή εξαρτάται αποκλειστικά από τον λόγο των εντατικών μεγεθών  $M/Q$  κατά την αστοχία. Όπως έχει διαπιστωθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι καμπύλες αλληλεπίδρασης για δεδομένο λόγο

εγκιβωτισμού D/B ταυτίζονται, ανεξαρτήτως του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση FS<sub>v</sub>. Επομένως, είναι απόλυτα συμβατό το γεγονός ότι τα αντίστοιχα σημεία επί των καμπυλών (“κοινού λόγου M/Q”) έχουν κοινά ποιοτικά χαρακτηριστικά απόκρισης. Έτσι, εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα επιμέρους χαρακτηριστικά σημεία επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης μπορούν να ταξινομηθούν στις παραπάνω κατηγορίες μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης κατά την αστοχία, και για κάθε λόγο εγκιβωτισμού D/B, ως εξής (σύμφωνα και με το **Σχήμα 4.4**):

(i) Το σημείο (α) “καθαρής” αντοχής σε ροπή αντιστοιχεί στην κατηγορία “rigid forward scoop”.

(ii) Το σημείο (β) θετικών εντατικών μεγεθών Q – M αντιστοιχεί στον μηχανισμό “scoop- slide”, το βάθος του οποίου εξαρτάται από την θέση του θεωρούμενου σημείου επί του πρώτου τεταρτημορίου. Θεωρώντας κατεύθυνση από το σημείο (α) προς το σημείο (γ), το βάθος του συγκεκριμένου μηχανισμού αυξάνεται, ενώ συγχρόνως η μετακινησιακή συνιστώσα της απόκρισης υπερτερεί σταδιακά της στροφικής.

(iii) Το σημείο (γ) της “καθαρής” αντοχής σε οριζόντια δύναμη αντιστοιχεί σε έναν βαθύτερο μηχανισμό “scoop- slide”, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

(iv) Το πρώτο εξεταζόμενο σημείο θετικής οριζόντιας δύναμης και αρνητικής ροπής, το σημείο (δ), αντιστοιχεί σε έναν ακόμα βαθύτερο μηχανισμό “scoop- slide”. Το γεγονός αυτό, με τους συνεχώς αυξανόμενου βάθους μηχανισμούς “scoop- slide” που παρατηρούνται μέχρι στιγμής, συμβαδίζει απόλυτα και με τις παρατηρήσεις που έχουν γίνει στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε σχέση με το δυναμικό πλαστικοποίησης των καμπυλών αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Σταδιακά, κατά μήκος των καμπυλών αλληλεπίδρασης, ο πόλος περιστροφής του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης ωθείται βαθύτερα. Αν, μάλιστα, θεωρηθεί πως το τμήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης από το χαρακτηριστικό σημείο (α) στο χαρακτηριστικό σημείο (δ) είναι “περίπου γραμμικό”, τότε είναι απολύτως λογικό, σε αυτό το τμήμα, οι αντίστοιχοι κινητοποιούμενοι μηχανισμοί εδαφικής παραμόρφωσης να είναι “κοινοί”, εμφανίζοντας, δηλαδή, κοινά ποιοτικά χαρακτηριστικά απόκρισης.

(v) Το σημείο (ε) της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$  αντιστοιχεί σε έναν, καθαρά, μετακινησιακό μηχανισμό ολίσθησης (“sliding mechanism- pure translation”). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός δεν επισημάνθηκε παραπάνω, ούτε απεικονίζεται σαφώς στο **Σχήμα 4.1(β)**, αν και μπορεί να παρομοιαστεί με τον μηχανισμό (c) του συγκεκριμένου σχήματος. Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, ο μηχανισμός (c) δεν έχει εφαρμογή σε συμπαγείς βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, παρά μόνο στις “εγκιβωτισμένες” επιφανειακές θεμελιώσεις με περιμετρικά κατακόρυφα τοιχώματα (skirted foundations), διότι περιλαμβάνει εδαφική παραμόρφωση ανάμεσα στα τοιχώματα αυτά. Παρ' όλα αυτά, αν αγνοηθεί το παραμορφωμένο τμήμα του εδάφους που απεικονίζεται ανάμεσα στα τοιχώματα (skirts, **Σχήμα 4.5(α)**), προκύπτει, με αξιοσημείωτη ομοιότητα, ο αντίστοιχος μηχανισμός ολίσθησης που παρατηρείται στις βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, για το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό σημείο (**Σχήμα 4.5(β)**). Στο σημείο της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$ , το έδαφος μπροστά και πίσω από την θεμελίωση μετακινείται με τρόπο παρόμοιο με εκείνον που εμφανίζεται στους κοινούς τοίχους αντιστήριξης [Bransby and Randolph 1999a]. Επιπλέον, με βάση τα όσα έχουν αναπτυχθεί σχετικά με το δυναμικό πλαστικοποίησης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, το σημείο της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$ , πάνω σε μία καμπύλη αλληλεπίδρασης, διέπεται από λόγο πλαστικών μετακινήσεων (κατά την αστοχία) που τείνει στο άπειρο ( $u^{pl} / \theta^{pl} \rightarrow \infty$ ). Συνεπώς, η απόκριση του συστήματος είναι κατά κύριο λόγο μετακινησιακή, με αμελητέα (πρακτικώς μηδενική) την στροφική συνιστώσα [Prager 1959].

(vi) Το σημείο (στ) της μέγιστης ροπής  $M_{max}$  αντιστοιχεί στην κατηγορία “reverse scoop”, με έντονο τον περιστροφικό χαρακτήρα. Η απόκριση του συστήματος σε αυτήν την περίπτωση είναι θεμελιωδώς αντίθετη με εκείνη του παραπάνω σημείου της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$ , εφόσον η στροφική συνιστώσα της θεμελίωσης, τώρα, είναι σημαντικά ενισχυμένη σε σύγκριση με την αντίστοιχη μετακινησιακή. Υπενθυμίζεται, και εδώ, ότι στην περίπτωση αυτή, η θεωρία του δυναμικού πλαστικοποίησης, εκφρασμένη μέσω του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής (associated plastic flow rule), επιβάλλει έναν λόγο πλαστικών μετακινήσεων κατά την αστοχία που τείνει στο μηδέν ( $u^{pl} / \theta^{pl} \rightarrow 0$ ), συμβαδίζοντας άριστα με τον παρατηρούμενο μηχανισμό εδαφικής παραμόρφωσης που κινητοποιείται.

(vii) Το δεύτερο εξεταζόμενο σημείο θετικής οριζόντιας δύναμης και αρνητικής ροπής, το σημείο (ζ), αντιστοιχεί, επίσης, στον μηχανισμό “reverse scoop”, με την διαφορά ότι πλέον ο μηχανισμός αυτός έχει αποκτήσει αρκετά πιο έντονα χαρακτηριστικά σε σχέση με το προηγούμενο σημείο της μέγιστης ροπής. Εξάλλου, η διαφορά του σημείου (δ) με το εξεταζόμενο σημείο (ζ) έγκειται στο ότι τα δύο αυτά σημεία βρίσκονται σε τμήματα επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης με διαφορετική καμπυλότητα. Επιπλέον, παρόλο που και τα δύο σημεία βρίσκονται στον κλάδο της υπεραντοχής των καμπυλών αλληλεπίδρασης (υποδηλώνοντας “ανταγωνιστική” φόρτιση της θεμελίωσης, όπως έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο), στο σημείο (ζ) υπερισχύει η συνιστώσα της ροπής, σε πλήρη αντίθεση με το σημείο (δ), όπου υπερισχύει η συνιστώσα της επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης.

Επιπρόσθετα, παραπάνω αναφέρθηκε ότι η αντιστοιχία των επιμέρους χαρακτηριστικών σημείων κατά μήκος των καμπυλών αλληλεπίδρασης με τις διάφορες κατηγορίες μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης, είναι ανεξάρτητη από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Πράγματι, τα ομοειδή χαρακτηριστικά σημεία των καμπυλών για δεδομένης γεωμετρίας φρέαρ (λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ ) συνεπάγονται τους ίδιους μηχανισμούς παραμόρφωσης, για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση. Η μοναδική επιρροή του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  στον σχηματισμό των αντίστοιχων μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης, σε κάθε περίπτωση, εστιάζεται στο μέγεθος των συμμετρικών χαρακτηριστικών της απόκρισης που αυτός επιβάλλει για τον δεδομένο μηχανισμό. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα σχήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, καθώς αυξάνεται το κατακόρυφο φορτίο του φρέατος (μείωση του συντελεστή ασφαλείας  $FS_v$ , ή- αλλιώς- αύξηση του συντελεστή  $x$ ) η συμμετρία στους σχηματιζόμενους μηχανισμούς αστοχίας καταλύεται. Η απόκριση του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης χαρακτηρίζεται, πλέον, από έντονη συσσώρευση των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων προς την κατεύθυνση της κυρίαρχης φόρτισης (εδώ μονοτονικής φύσεως), σε πλήρη αντίθεση με την (ακραία) περίπτωση απουσίας της κατακόρυφης φόρτισης ( $FS_v = \infty$  ή  $x = 0$ ) όπου παρατηρείται απόλυτη συμμετρία στην κατανομή των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων γύρω από την εγκιβωτισμένη θεμελίωση, κατά την αστοχία (στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζονται ενδεικτικά

τα σημεία των μέγιστων εντατικών μεγεθών  $Q_{\max}$  και  $M_{\max}$ , για δύο ακραίες περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης  $FS_v = 1.25$  και  $FS_v = \infty$ , και για φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$ ). Παρ' όλα αυτά, τονίζεται ιδιαίτερα ότι τα φυσικά χαρακτηριστικά των επιμέρους μηχανισμών δεν αλλοιώνονται από την ύπαρξη (ή την απουσία) του κατακόρυφου φορτίου. Γι' αυτό, εξάλλου, είναι απολύτως αποδεκτή η καθολική ισχύς της αντιστοίχισης των χαρακτηριστικών σημείων μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης με τους ανάλογους κινητοποιούμενους μηχανισμούς εδαφικής παραμόρφωσης, όπως αυτή διατυπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ανεξάρτητα από τον συντελεστή ασφαλείας  $FS_v$ . Το εύρημα της απώλειας της συμμετρίας, όμως, με την αύξηση της κατακόρυφης φόρτισης είναι σπουδαίο, διότι έχει άμεσο αντίκτυπο στην αστράγγιστη συμπεριφορά των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό ανακυκλική εγκάρσια φόρτιση, λόγω της έντονης συγκέντρωσης των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων προς την κατεύθυνση που επιβάλλει ο πρώτος μισός κύκλος της κυκλικής φόρτισης. Ως αποτέλεσμα, το (αρχικώς συμμετρικό) σύστημα εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης παύει να είναι συμμετρικό, και οι επόμενοι κύκλοι φόρτισης επιβάλλονται υπό διαφορετικές αρχικές συνθήκες σε σχέση με αυτές που έχουν μελετηθεί ως τώρα στην περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης. Μια σύντομη περιγραφή της φυσικής σκοπιάς του συγκεκριμένου θέματος αναπτύσσεται λεπτομερέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

### **4.3 Μονοτονικές καμπύλες “δύναμης- μετακίνησης”**

Στα **Σχήματα 4.8** έως **4.13** παρουσιάζονται οι μονοτονικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης ( $Q - u$ ) και ροπής- στροφής ( $M - \theta$ ), στην κορυφή των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ . Πιο συγκεκριμένα, τα **Σχήματα 4.8, 4.9** και **4.10** αντιστοιχούν σε συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$  και τα **Σχήματα 4.11, 4.12** και **4.13** σε συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.66$ . Σε κάθε περίπτωση, οι καμπύλες αναφέρονται σε τρία σημεία επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ), όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.7**.

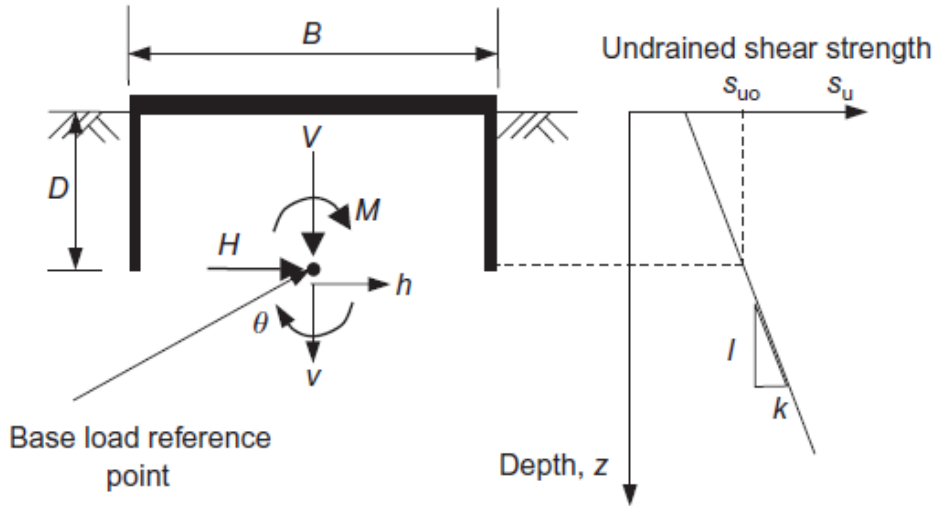
Η επιρροή του λόγου εγκιβωτισμού D/B είναι εμφανής πάνω στις μονοτονικές καμπύλες, τόσο από άποψη δυσκαμψίας όσο και από άποψη αντοχής, και γι' αυτό δεν υπάρχει λόγος να σχολιαστεί παραπάνω. Πιο ενδιαφέρουσα, όμως, είναι η ιδιαίτερα διαφορετική συμπεριφορά που παρατηρείται στο σημείο 3 σε σχέση με το σημείο 2. Στο σημείο 2 κυρίαρχη είναι η συνιστώσα της οριζόντιας δύναμης  $Q$ , ενώ στο σημείο 3 κυρίαρχη είναι η συνιστώσα της ροπής  $M$ . Ο παράγοντας που εισάγει, όμως, την διαφοροποίηση στην απόκριση των δύο αυτών σημείων είναι η καμπυλότητα των τμημάτων στα οποία αυτά ανήκουν. Με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο σχετικά με τον νόμο πλαστικής ροής των μετακινήσεων κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους- φρέατος, στο σημείο 2 (λόγω της δεδομένης καμπυλότητας της καμπύλης αλληλεπίδρασης) επιβάλλεται οι μεταβολές των πλαστικών μετακινήσεων αστοχίας να είναι θετικές. Αντιθέτως, στο σημείο 3 επιβάλλεται οι μεταβολές των πλαστικών μετακινήσεων αστοχίας να είναι αρνητικές, με αποτέλεσμα η θεμελίωση να υφίσταται αρνητική οριζόντια μετατόπιση και αρνητική στροφή (όπως ενδεικτικά απεικονίζεται π.χ. στο **Σχήμα 4.10**). Γίνεται, πλέον, εμφανής και από μία άλλη οπτική γωνία ο ρόλος του υιοθετούμενου συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής των μετακινήσεων κατά την αστοχία του συστήματος, και πώς αυτός δύναται να προβλέψει (εδώ ποιοτικά) τις αναπτυσσόμενες πλαστικές μετακινήσεις. Σε επόμενο κεφάλαιο, το μαθηματικό υπόβαθρο του συγκεκριμένου νόμου αξιοποιείται με σκοπό την σύνταξη ενός ενιαίου μαθηματικού εργαλείου, για την περιγραφή της απόκρισης των φρεάτων υπό εγκάρσια φόρτιση δίχως την ανάγκη διεξαγωγής νέων τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Τέλος, παρατηρείται ότι ο παράγοντας του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  δεν έχει κάποια σημαντική επιρροή στα χαρακτηριστικά των παραπάνω μονοτονικών καμπυλών. Το σπουδαιότερο φαινόμενο που συνοδεύει την ύπαρξη της κατακόρυφης φόρτισης είναι- ξεκάθαρα- η απώλεια των συμμετρικών χαρακτηριστικών της απόκρισης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΗΜΑΤΑ**

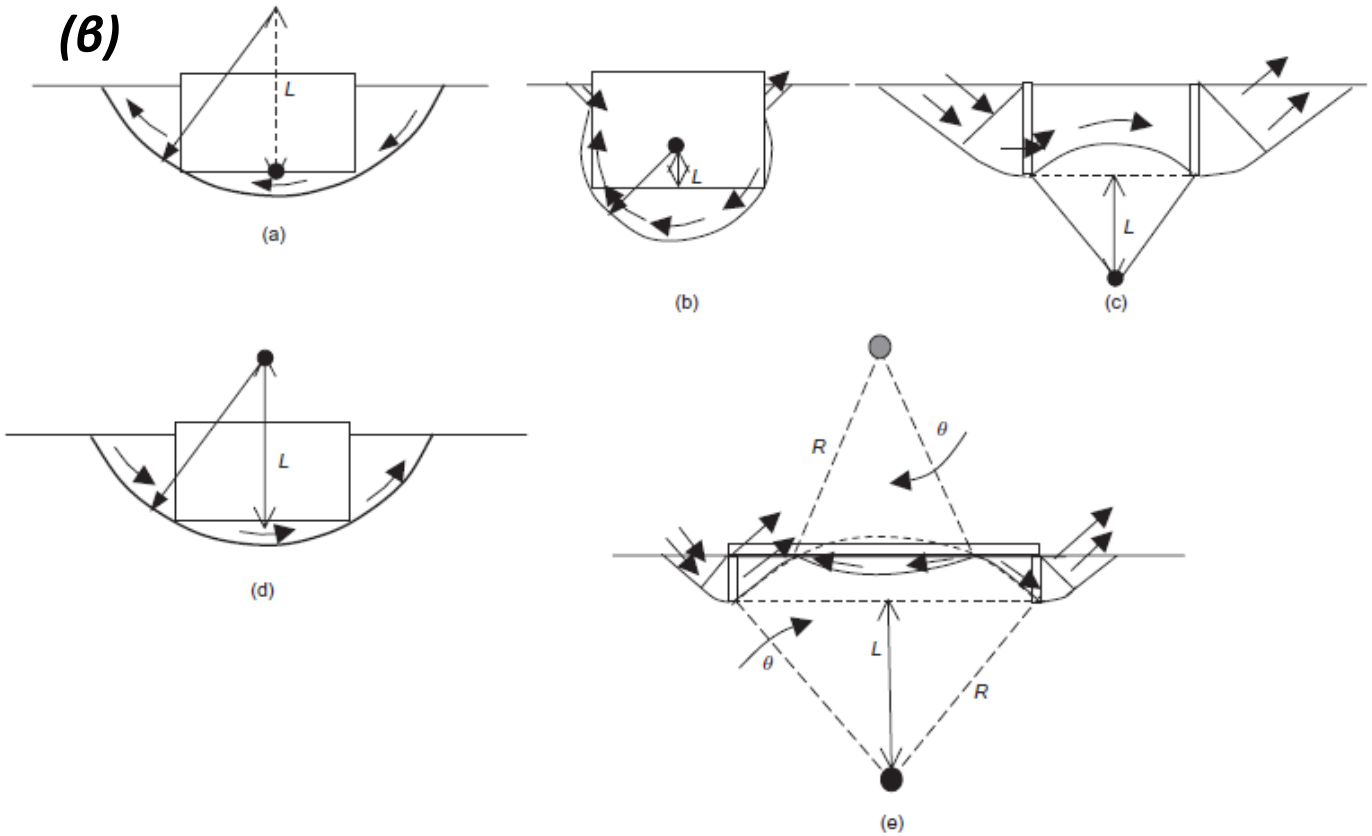
---



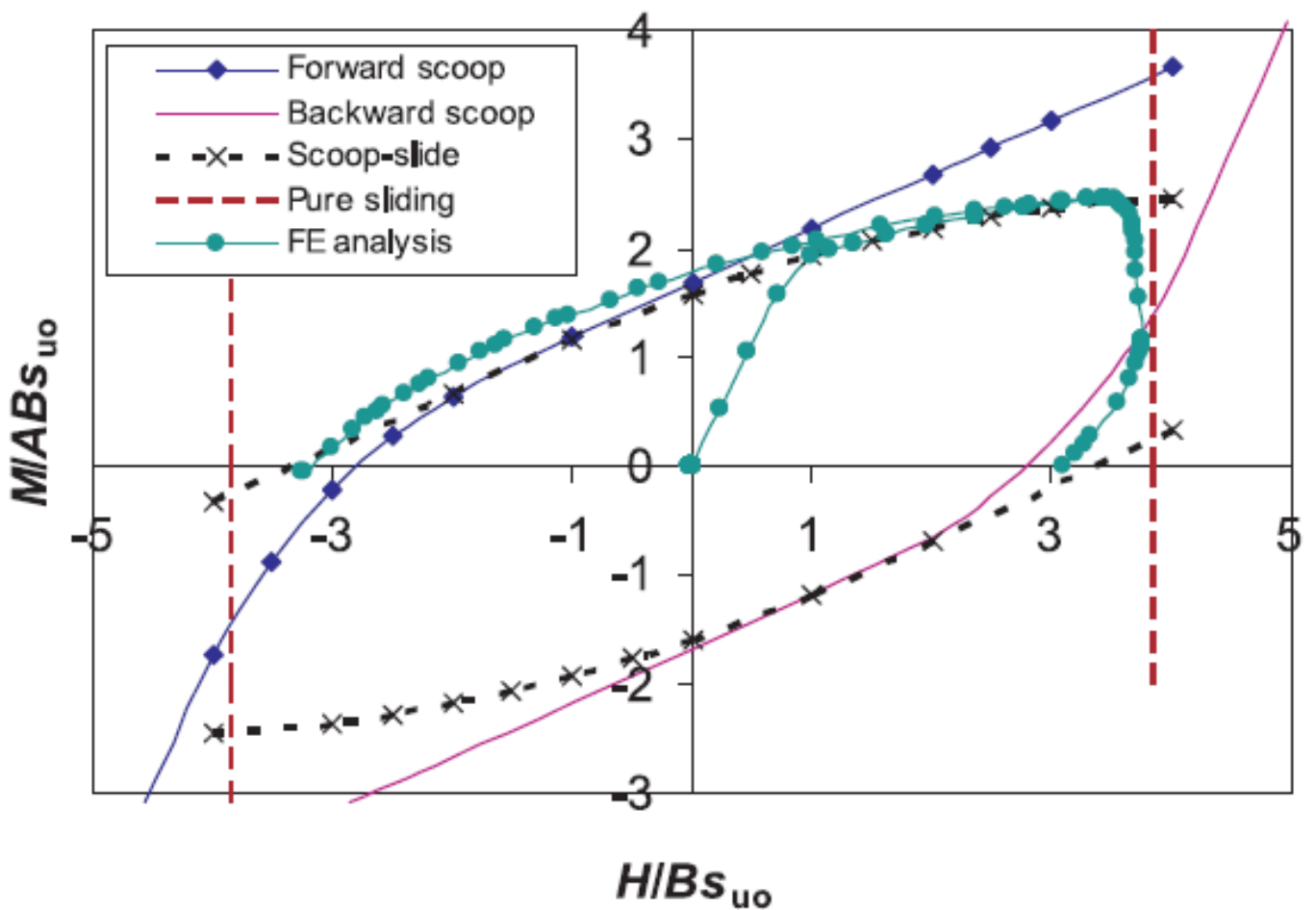
(α)



(β)

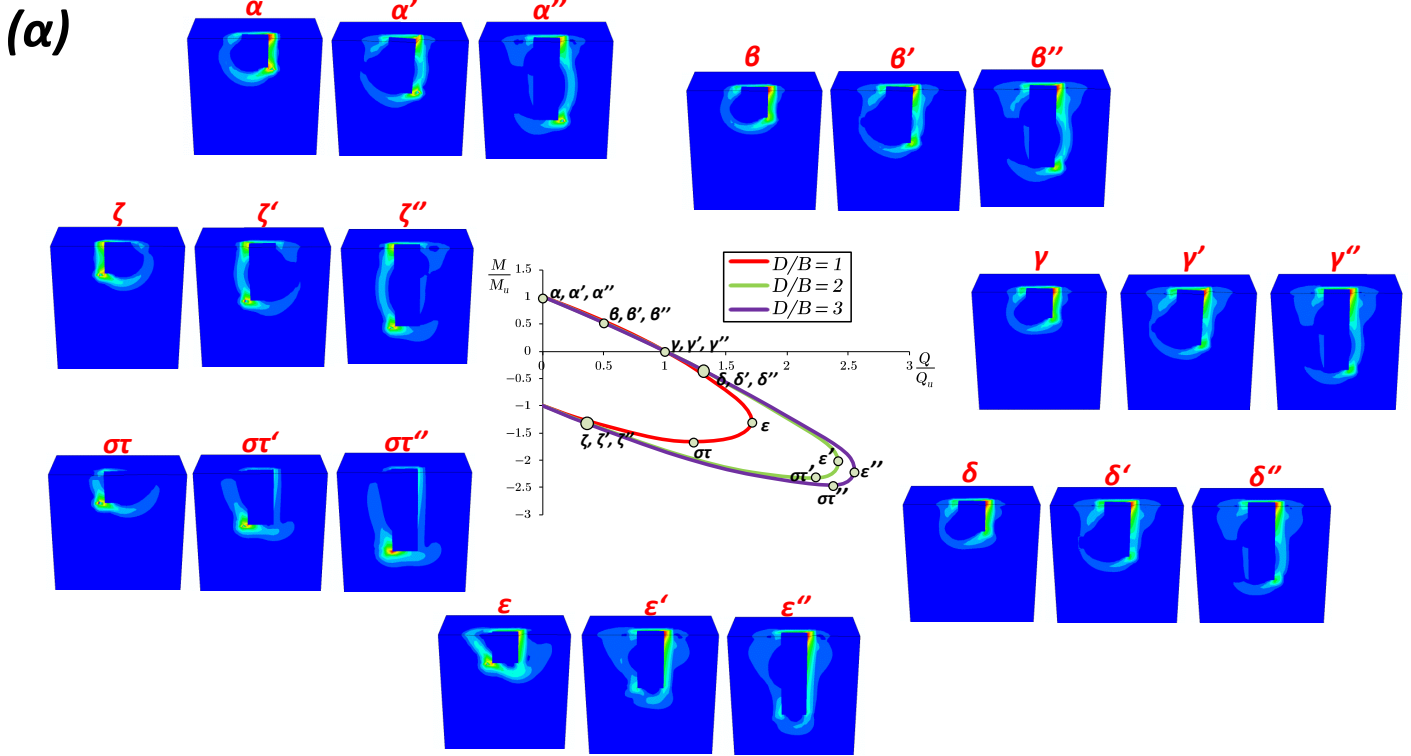


**Σχήμα 4.1.** Ορισμός του προβλήματος κατά την εργασία των Bransby και Yun [2009]. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η εξεταζόμενη ελαφρώς εγκιβωτισμένη θεμελίωση, με περιμετρικά κατακόρυφα τοιχώματα (*skirted foundation*), υποβαλλόμενη σε συνδυασμένη φόρτιση και στο σχήμα (β) αναπτύσσονται οι επιμέρους εδαφικοί μηχανισμοί παραμόρφωσης που δύναται να κινητοποιηθούν, με βάση τις αναλύσεις “ανώτατων ορίων” (*upper-bound mechanisms*): (α) “*forward scoop*”, (β) “*scoop-slide*”, (γ) “*internal Hansen*”, (δ) “*reverse scoop*” και (ε) “*internal double scoop*”. Σημειώνεται ότι οι μηχανισμοί (γ) και (ε) δεν είναι διαθέσιμοι προς παρατήρηση στην περίπτωση των συμπαγών εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων.

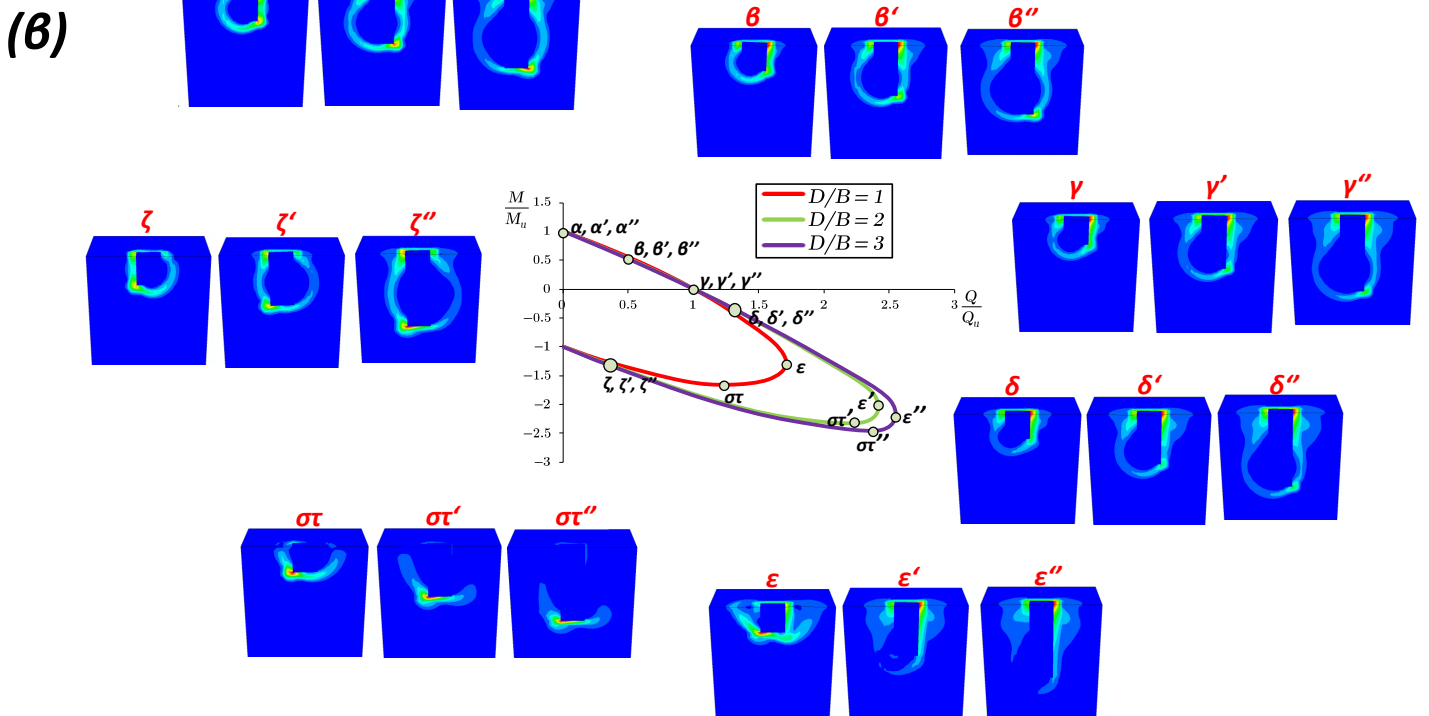


**Σχήμα 4.2.** Σύγκριση της καμπύλης αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο οριζόντιας δύναμης- ροπής) εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , με τα αποτελέσματα των αναλύσεων “ανώτατων ορίων” (upper-bound analysis). Η καμπύλη αλληλεπίδρασης παράχθηκε έπειτα από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων [Yun and Bransby 2007].

$FS_v = 1.25$

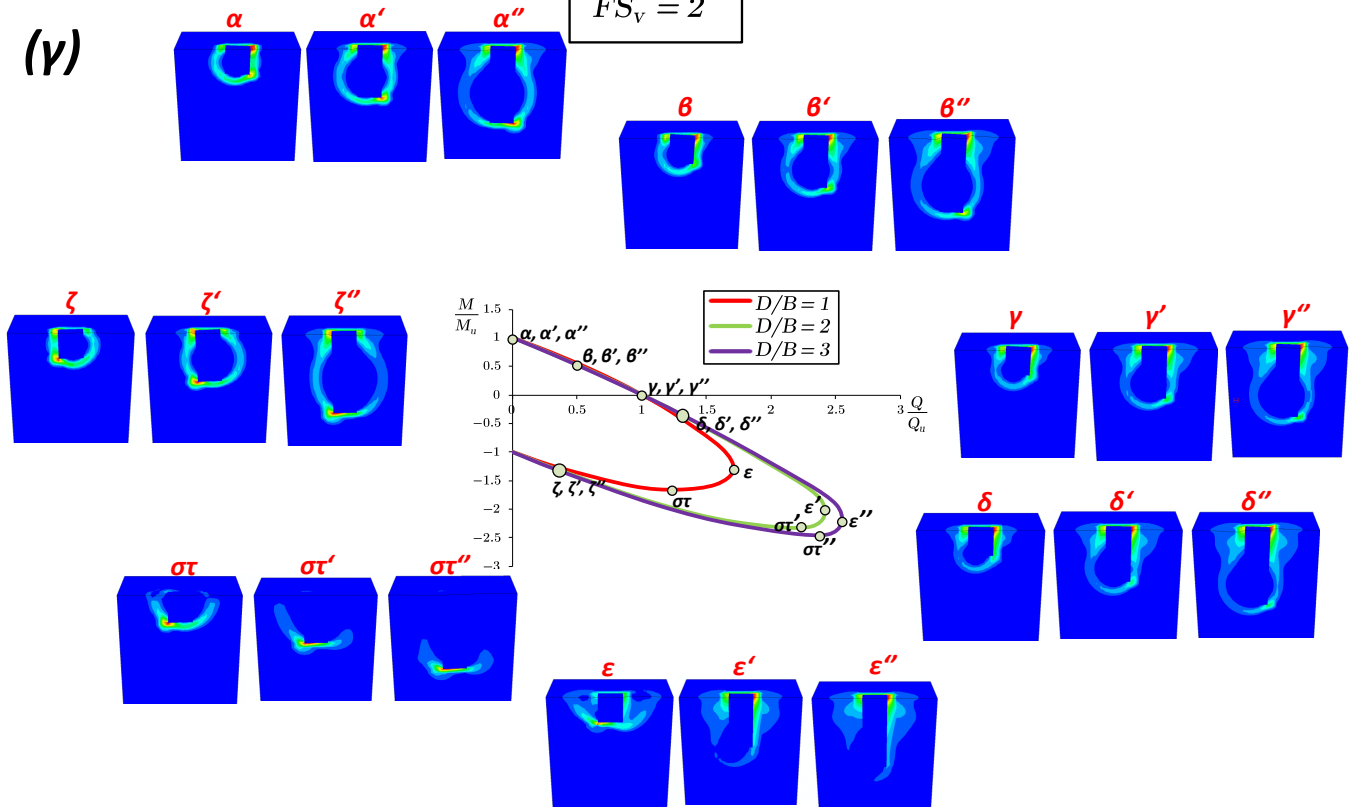


$FS_v = 1.66$



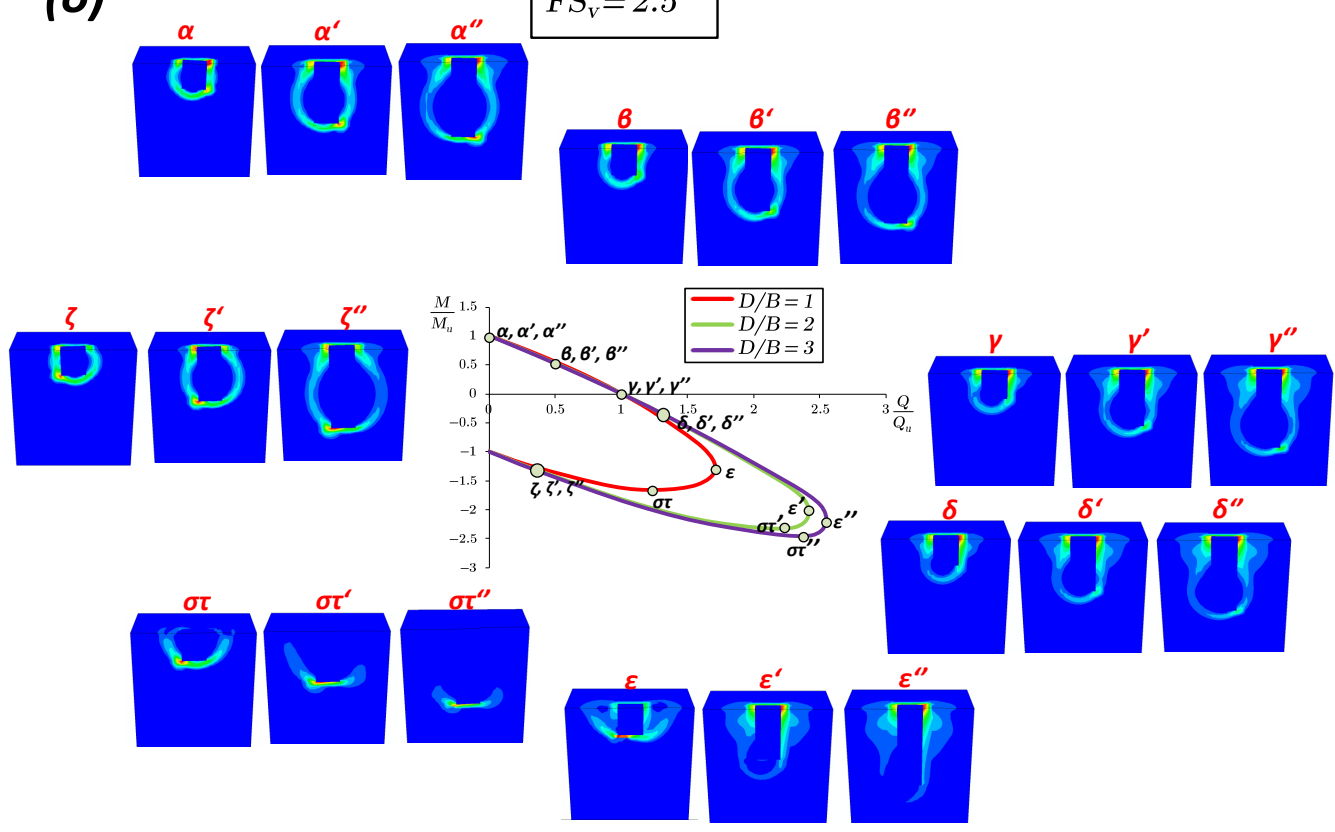
(γ)

$FS_v = 2$

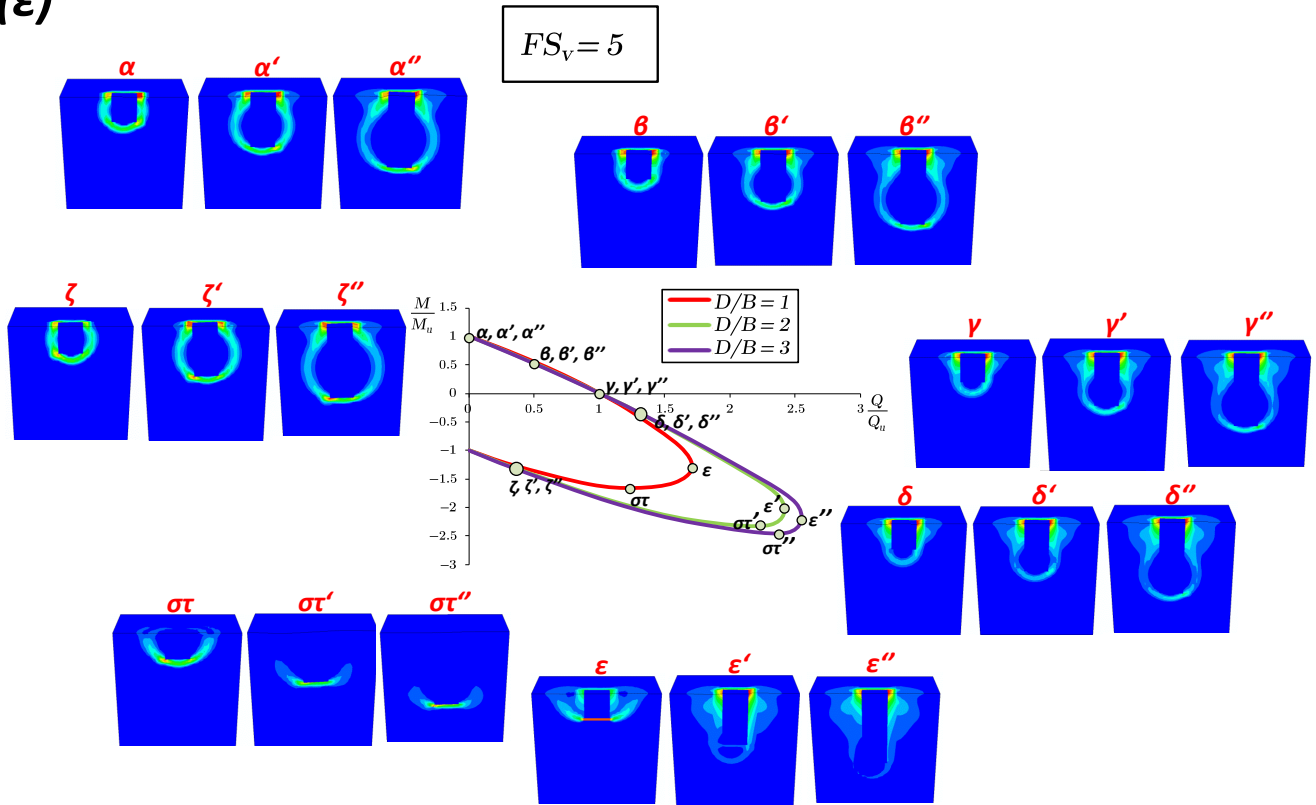


(δ)

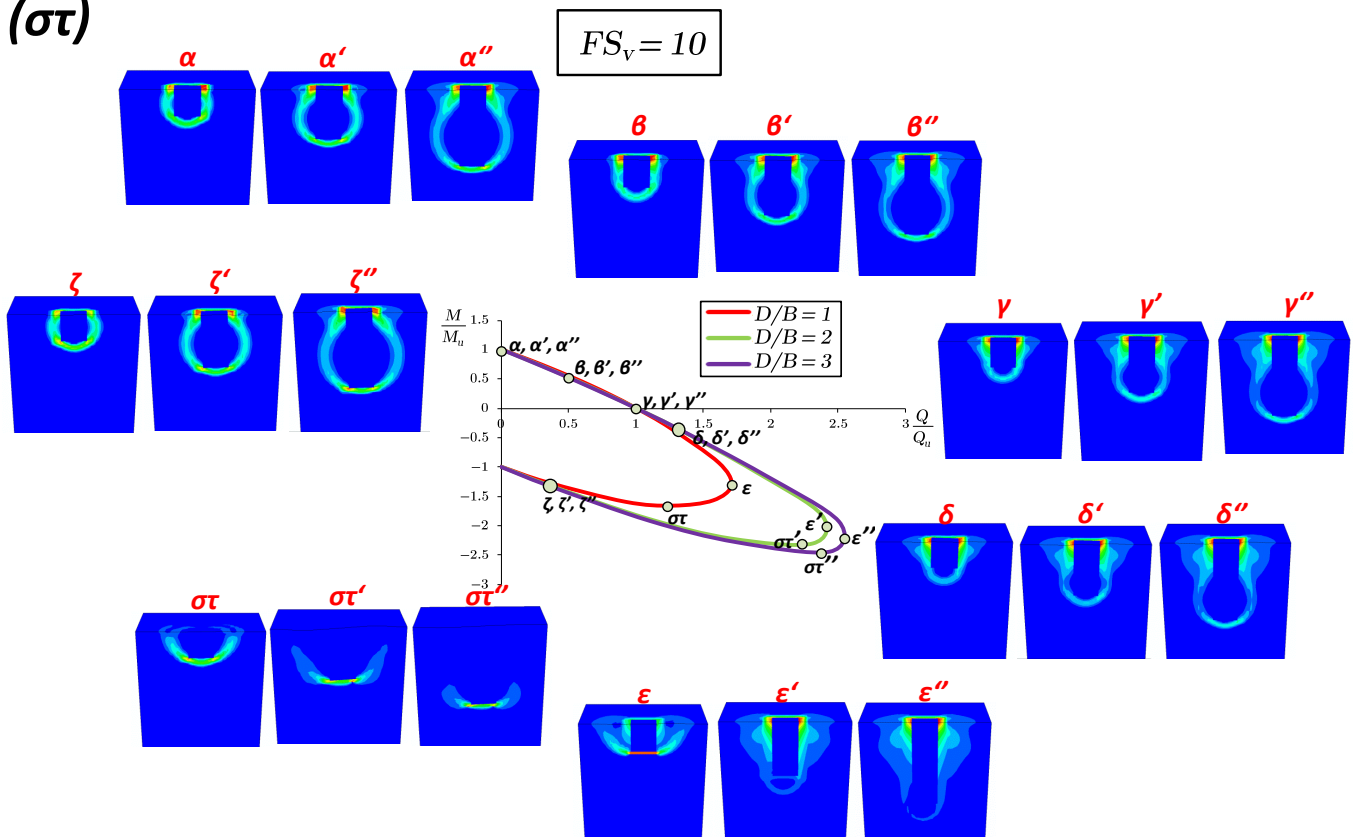
$FS_v = 2.5$



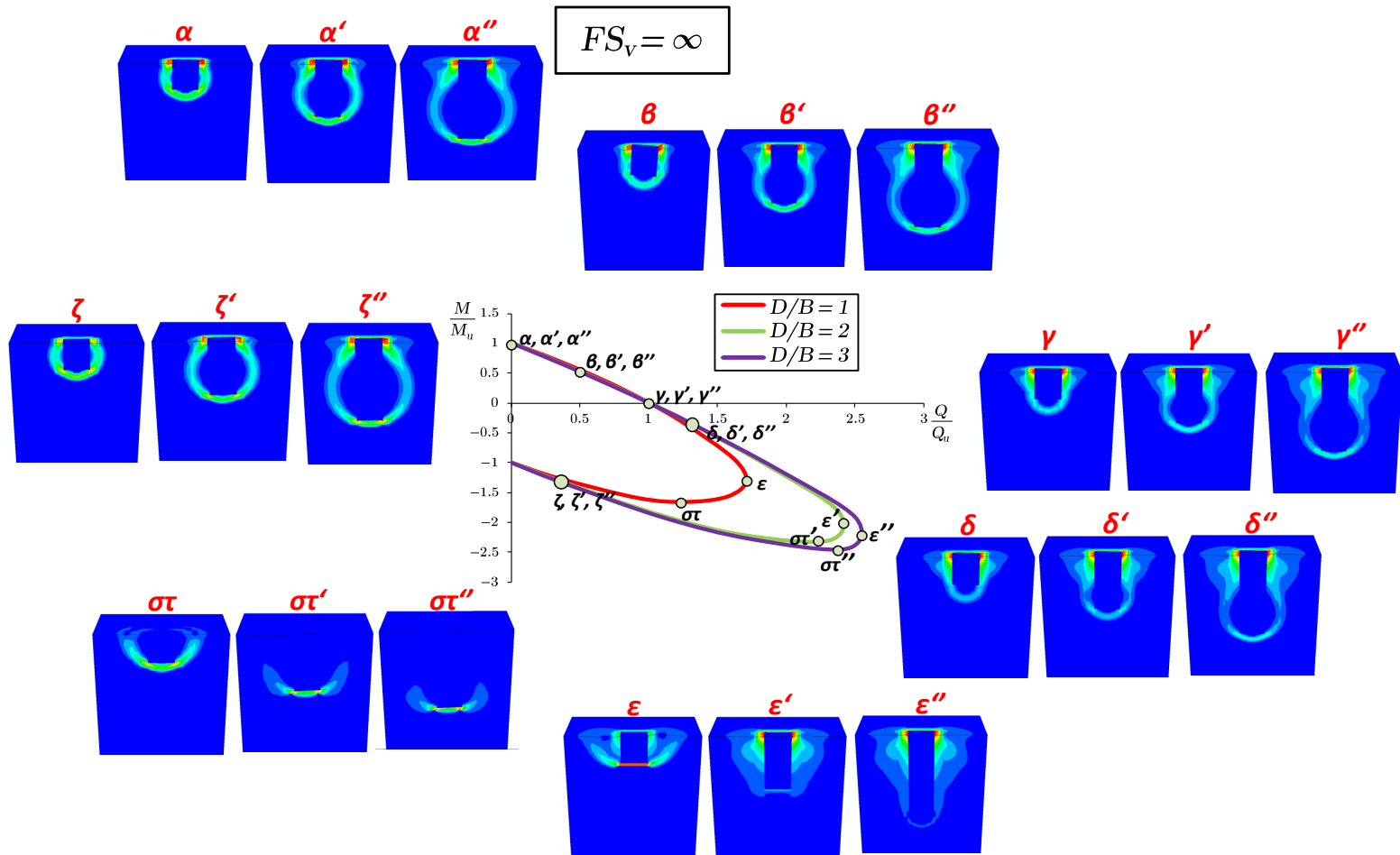
(ε)



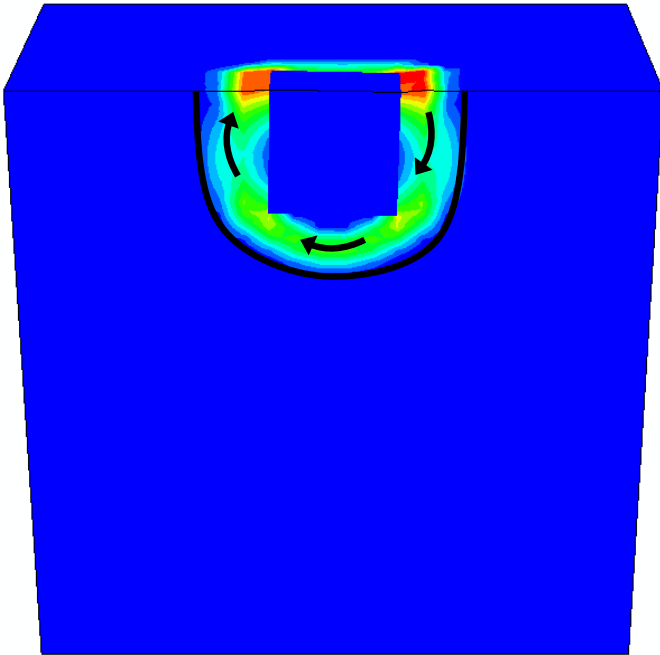
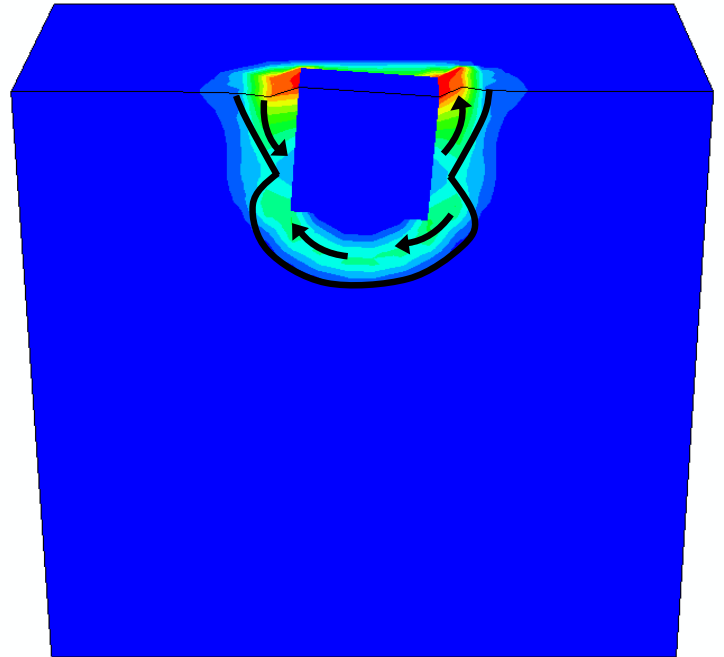
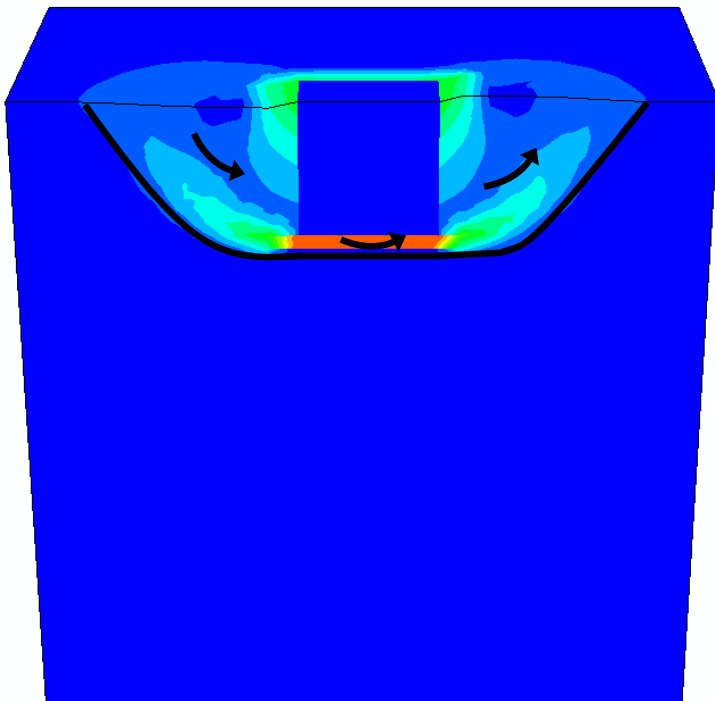
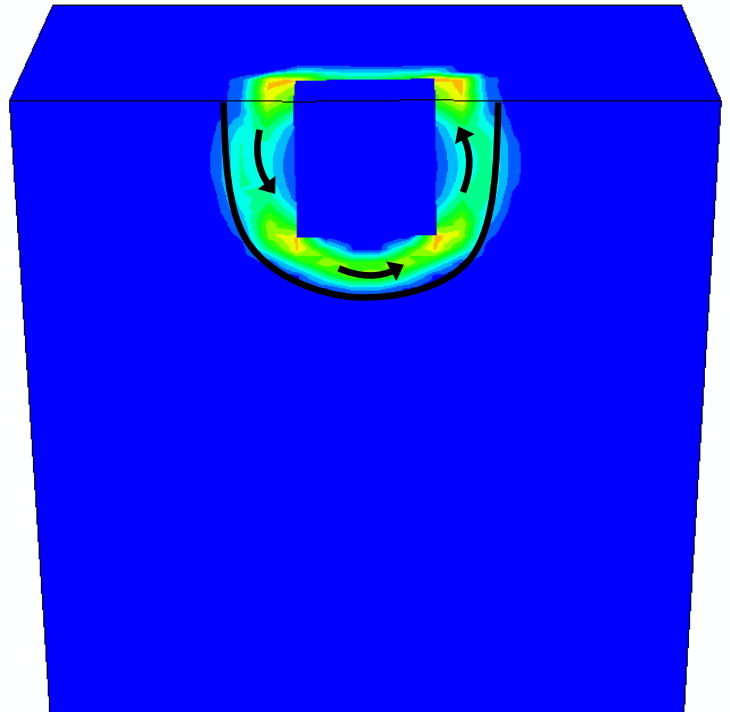
(σ)



(ζ)

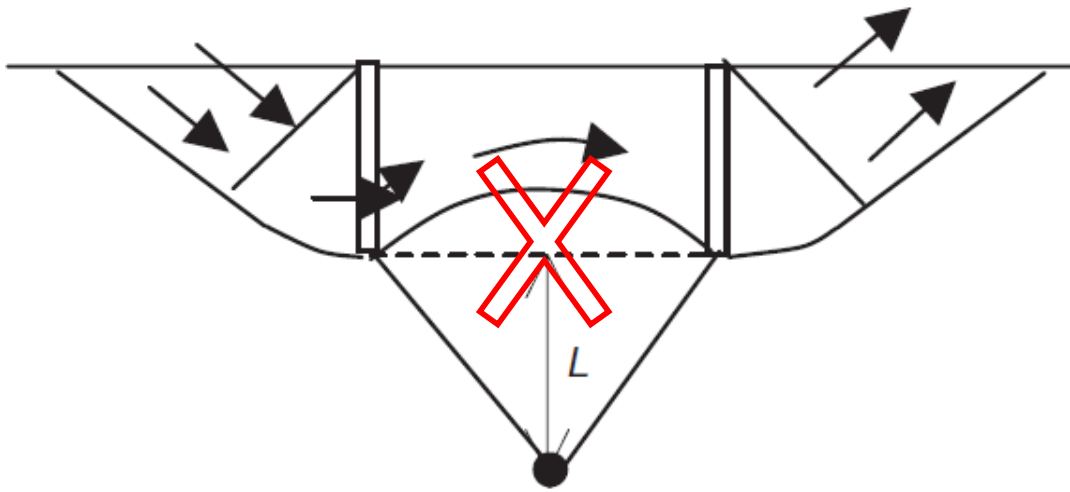


**Σχήμα 4.3.** Οι ισοϋψείς των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων στην κατάσταση αστοχίας, κατά μήκος των καμπυλών αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1, 2$  και  $3$ , και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση: (α)  $FS_v = 1.25$ , (β)  $FS_v = 1.66$ , (γ)  $FS_v = 2$ , (δ)  $FS_v = 2.5$ , (ε)  $FS_v = 5$ , (στ)  $FS_v = 10$  και (ζ)  $FS_v = \infty$ . Μέσω της απεικόνισης αυτής, καθίσταται δυνατή η κατηγοριοποίηση των επιμέρους σημείων στις αντίστοιχες "ομάδες" μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης, όπως αυτοί αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

**(α) "forward scoop"****(β) "scoop- slide"****(γ) "sliding mechanism-  
pure translation"****(δ) "reverse scoop"**

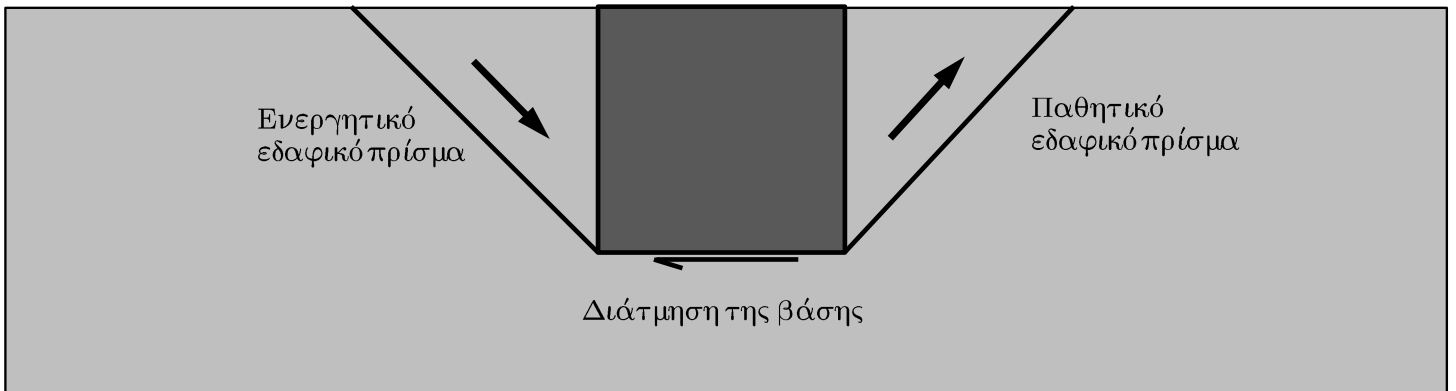
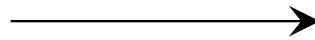
**Σχήμα 4.4.** Σκαριφηματική παρουσίαση των κινητοποιούμενων μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης στα συστήματα των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, όπως αυτοί αποτυπώθηκαν μέσω των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

(α)



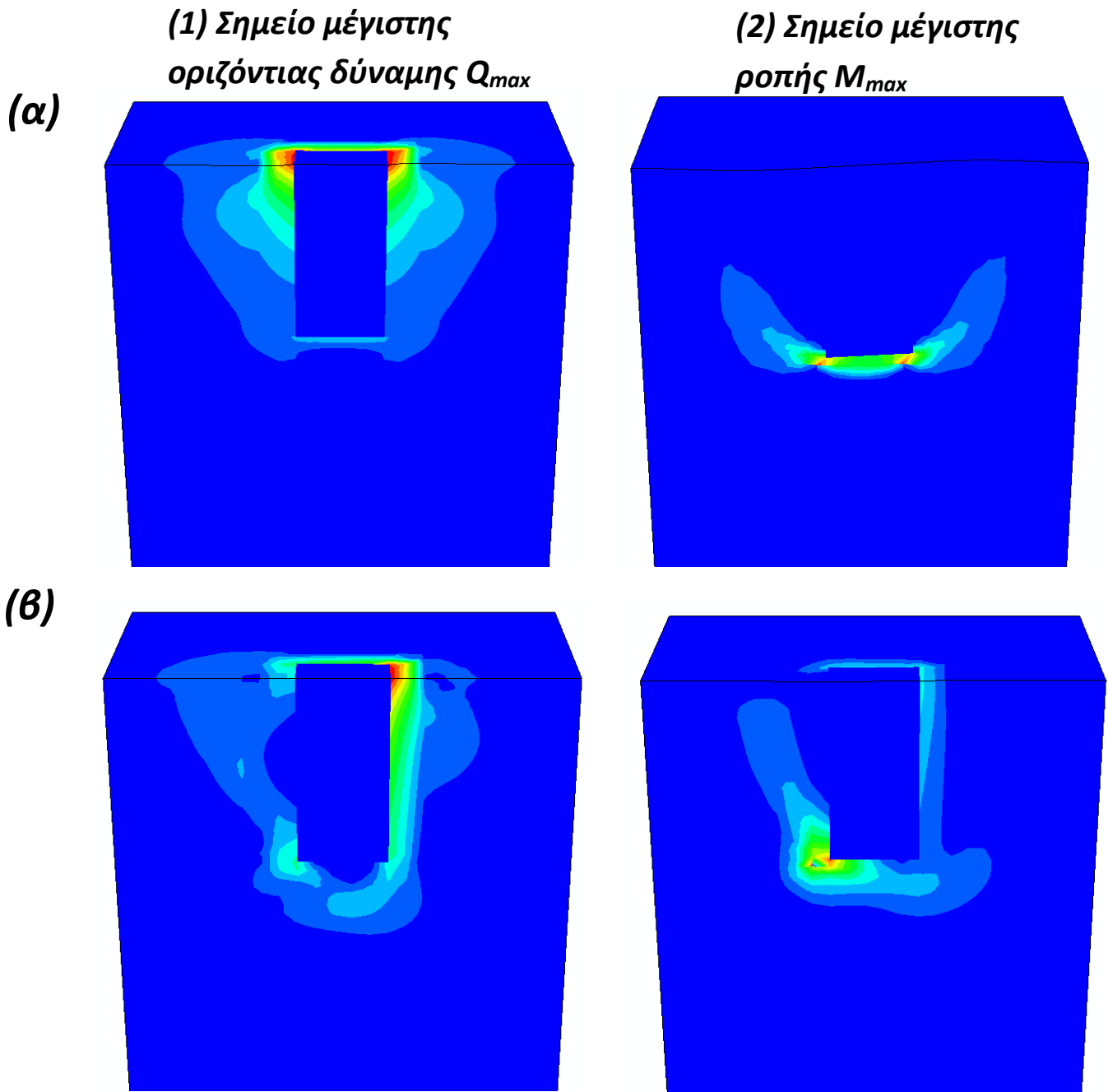
(β)

Οριζόντια μετατόπιση  $u$

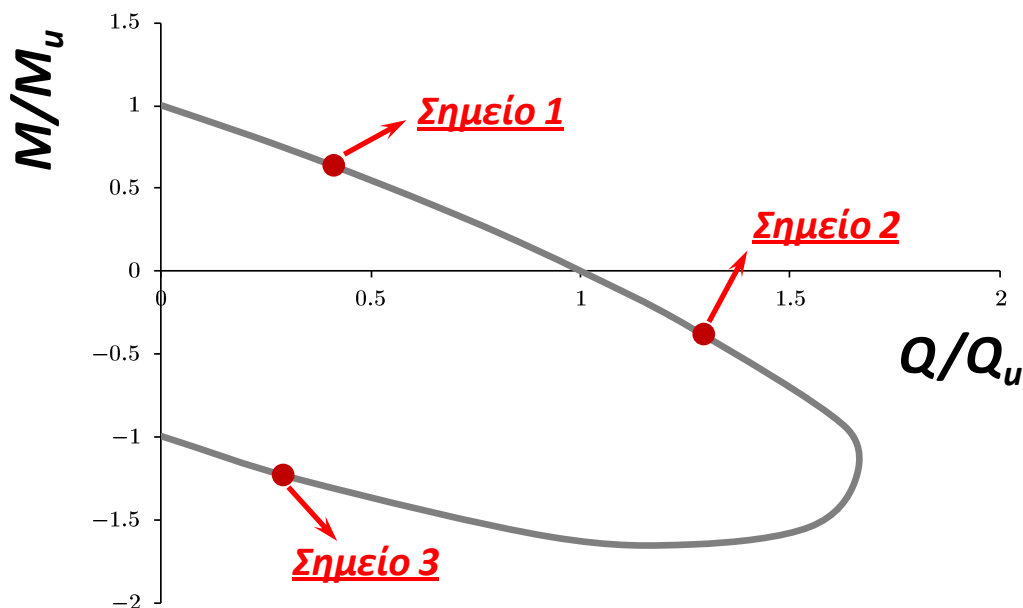


**Σχήμα 4.5.** Στο σχήμα (α) απεικονίζεται ο μηχανισμός (c)- "internal Hansen", για την περίπτωση των επιφανειακών θεμελιώσεων με περιμετρικά κατακόρυφα τοιχώματα (skirts). Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθεί κατά την μελέτη της απόκρισης συμπαγών εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, διότι περιλαμβάνει εδαφική παραμόρφωση ανάμεσα στα τοιχώματα. Αντί αυτού, αν αγνοηθεί το τμήμα ανάμεσα στα τοιχώματα, προκύπτει ο μηχανισμός του σχήματος (β), ο οποίος είναι ο χαρακτηριστικός μετακινησιακός μηχανισμός ολίσθησης ("sliding mechanism- pure translation") του σημείου της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$  μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης.



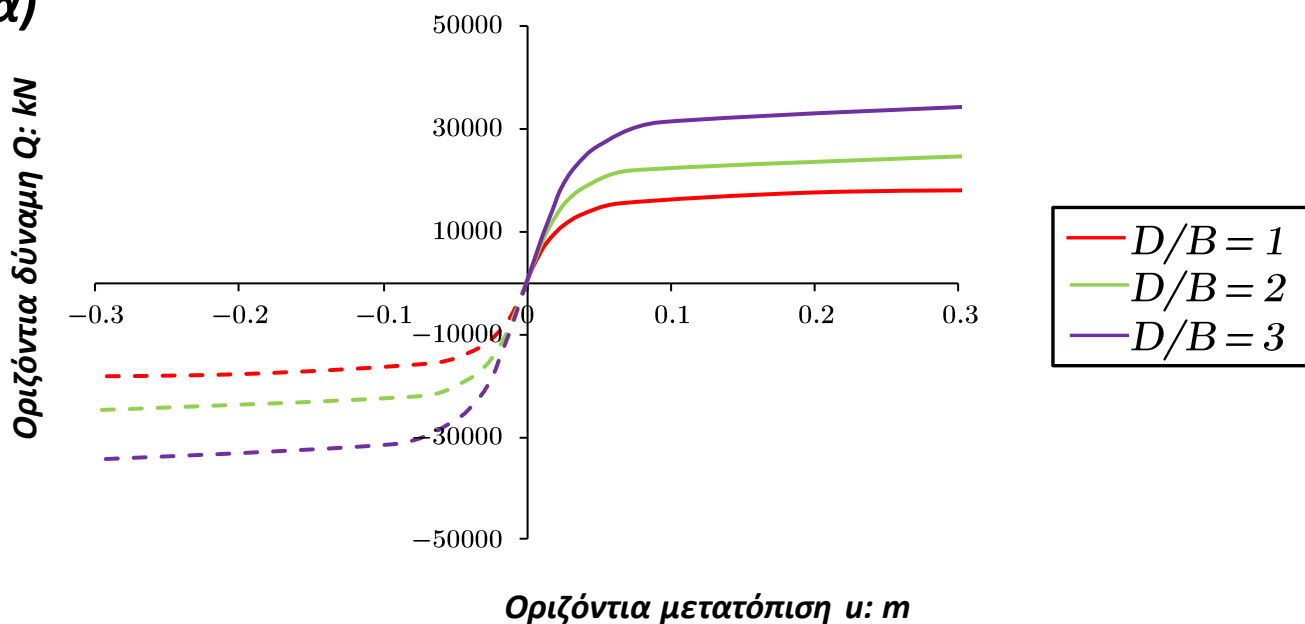


**Σχήμα 4.6.** Οι ισοϋψείς των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων κατά την αστοχία του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, η οποία χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$ . Στην αριστερή στήλη σχημάτων (σχήματα  $\alpha_1$  και  $\beta_1$ ) παρουσιάζεται η κατάσταση που αντιστοιχεί στο σημείο (των καμπυλών αλληλεπίδρασης) της μέγιστης οριζόντιας δύναμης  $Q_{max}$  και στην δεξιά στήλη (σχήματα  $\alpha_2$  και  $\beta_2$ ) η κατάσταση που αντιστοιχεί στο σημείο της μέγιστης ροπής  $M_{max}$ . Επιπλέον, στο σχήμα (α) απεικονίζονται τα στιγμιότυπα που αντιστοιχούν σε συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$ , και στο σχήμα (β) τα αντίστοιχα στιγμιότυπα για συντελεστή  $FS_v = 1.25$ . Φαίνεται η άμεση επιρροή της κατακόρυφης φόρτισης στα συμμετρικά χαρακτηριστικά της απόκρισης του συστήματος θεμελίωσης, δίχως, όμως, να οδηγεί σε αλλοίωση των ποιοτικών της χαρακτηριστικών.

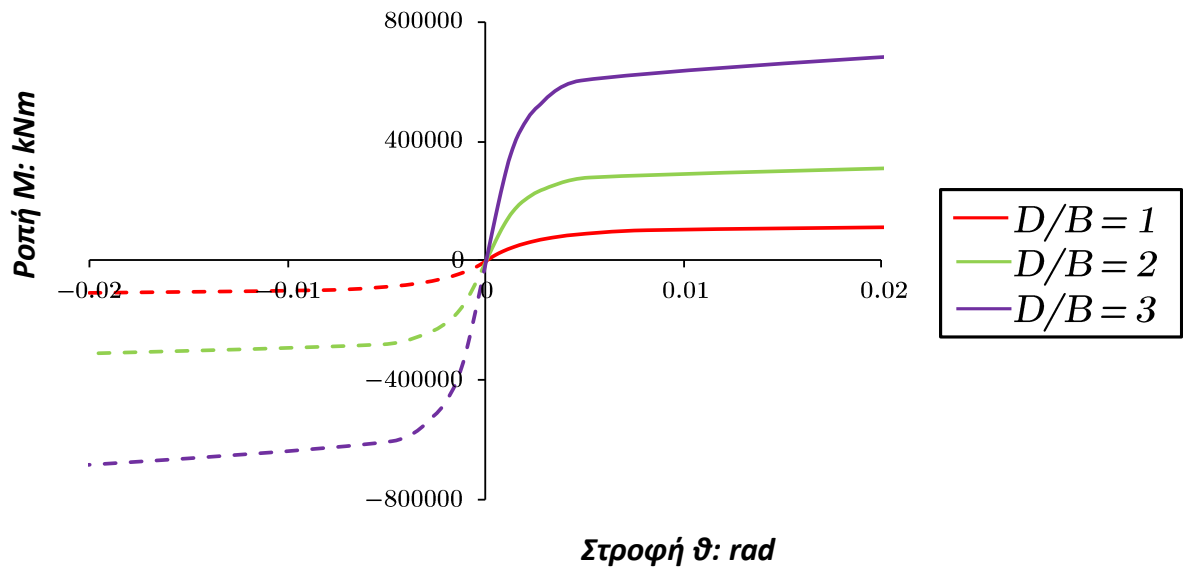


**Σχήμα 4.7.** Ορισμός των τριών σημείων για την παρουσίαση των μονοτονικών καμπυλών οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής- στροφής, στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Το σημείο 1 τοποθετείται στο πρώτο τεταρτημόριο του επιπέδου φόρτισης  $M-Q$ , το σημείο 2 στο τέταρτο τεταρτημόριο (στην περιοχή, όμως, κοινής καμπυλότητας με το σημείο 1) και το σημείο 3 τοποθετείται, επίσης, στο τέταρτο τεταρτημόριο αλλά σε περιοχή αντίστροφης καμπυλότητας από το σημείο 2. Στο σημείο 2 κυρίαρχη είναι η συνιστώσα της οριζόντιας δύναμης  $Q$ , ενώ στο σημείο 3 κυρίαρχη είναι η συνιστώσα της ροπής  $M$ .

(α)

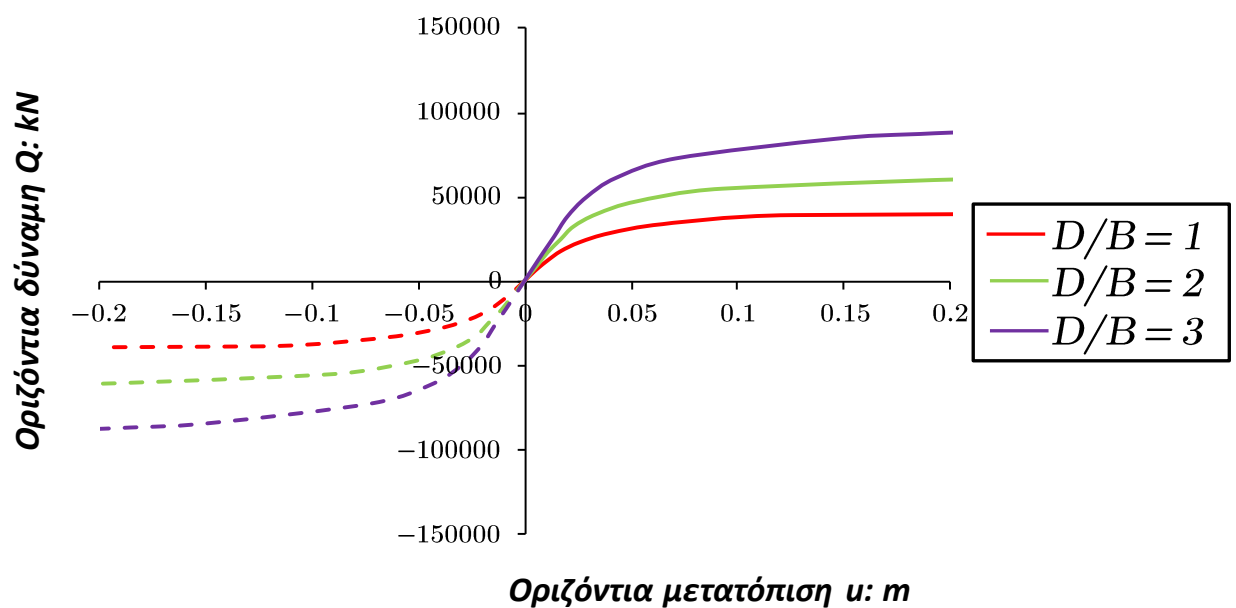


(β)

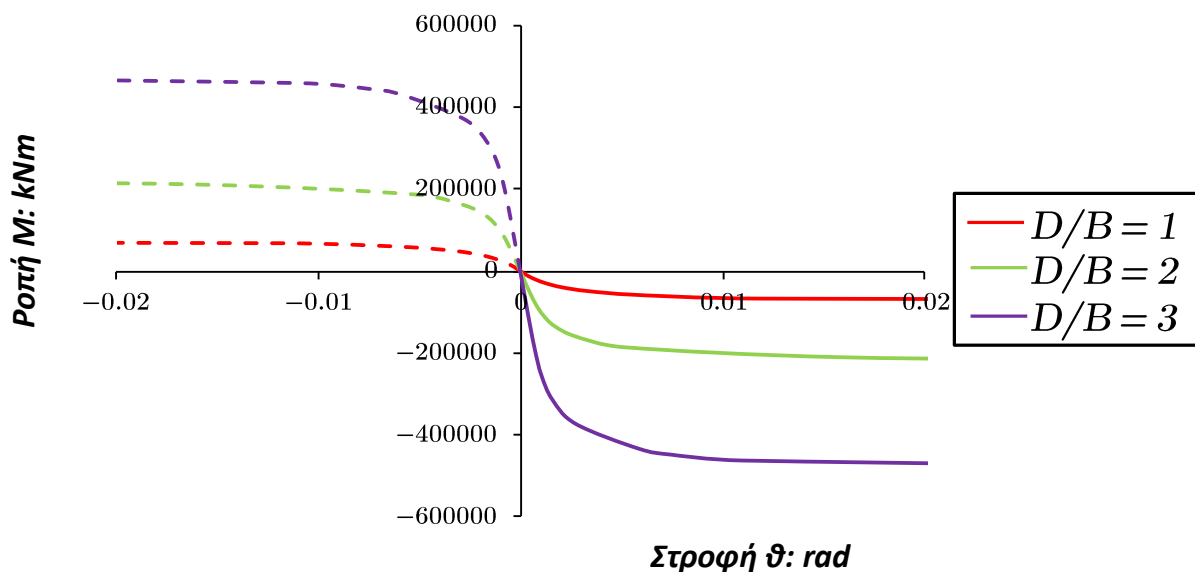


**Σχήμα 4.8.** Μονοτονικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης (σχήμα α) και ροπής- στροφής (σχήμα β), συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Τα σχήματα αντιστοιχούν στο σημείο 1, για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$ . Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι καμπύλες που αναφέρονται στο συμμετρικό σημείο του συγκεκριμένου σημείου 1.

(α)

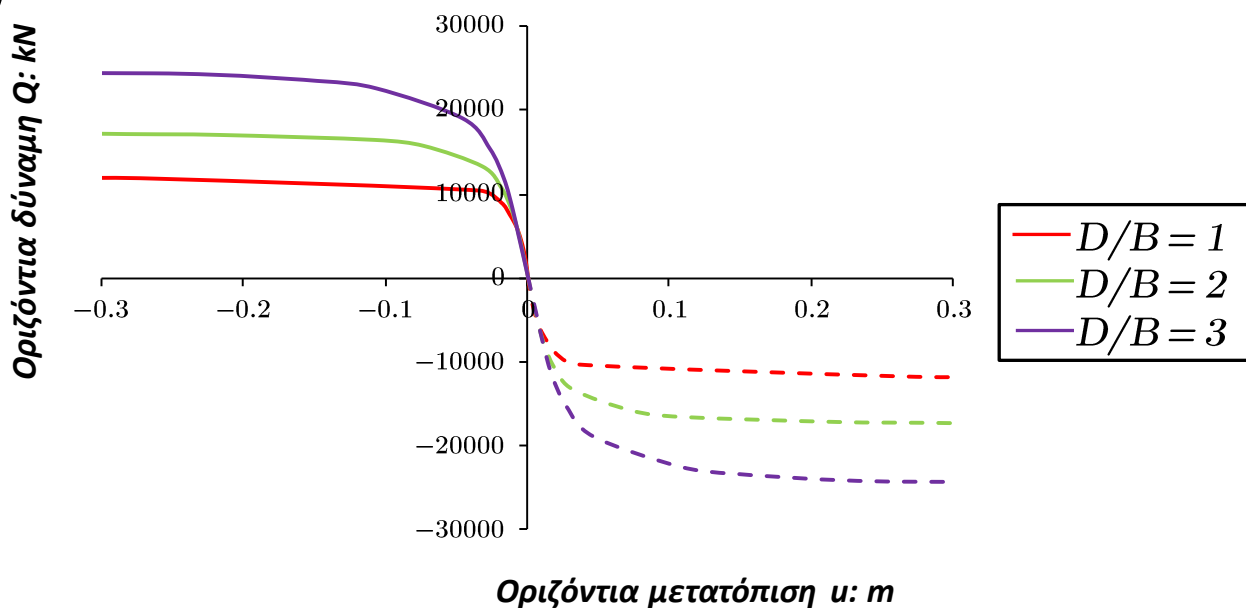


(β)

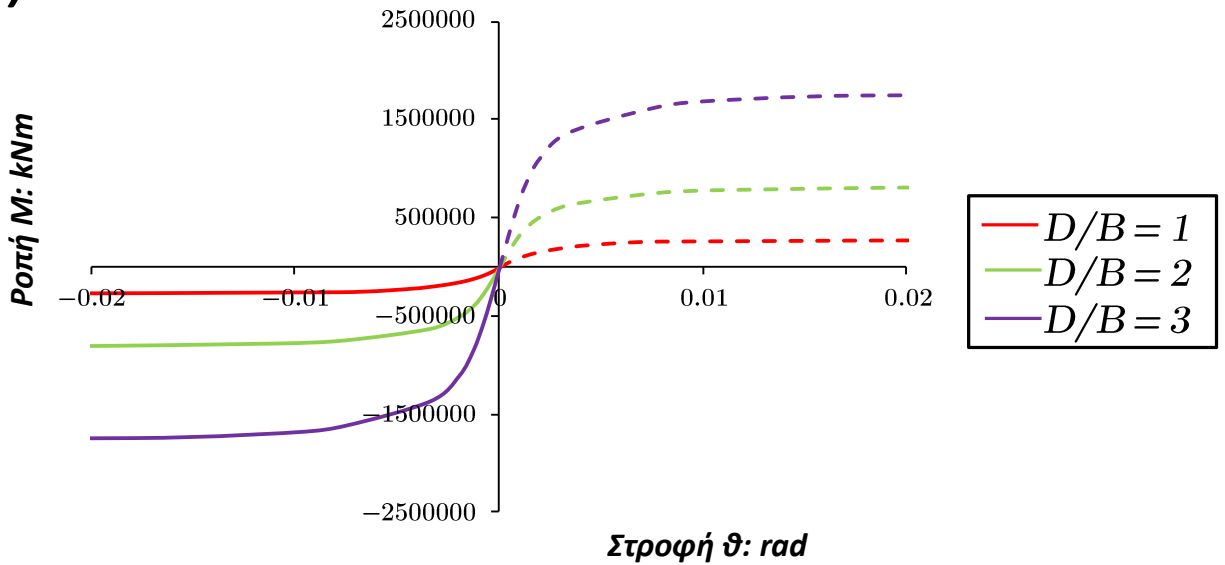


**Σχήμα 4.9.** Μονοτονικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης (σχήμα α) και ροπής- στροφής (σχήμα β), συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Τα σχήματα αντιστοιχούν στο σημείο 2, για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$ . Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι καμπύλες που αναφέρονται στο συμμετρικό σημείο του συγκεκριμένου σημείου 2.

(α)

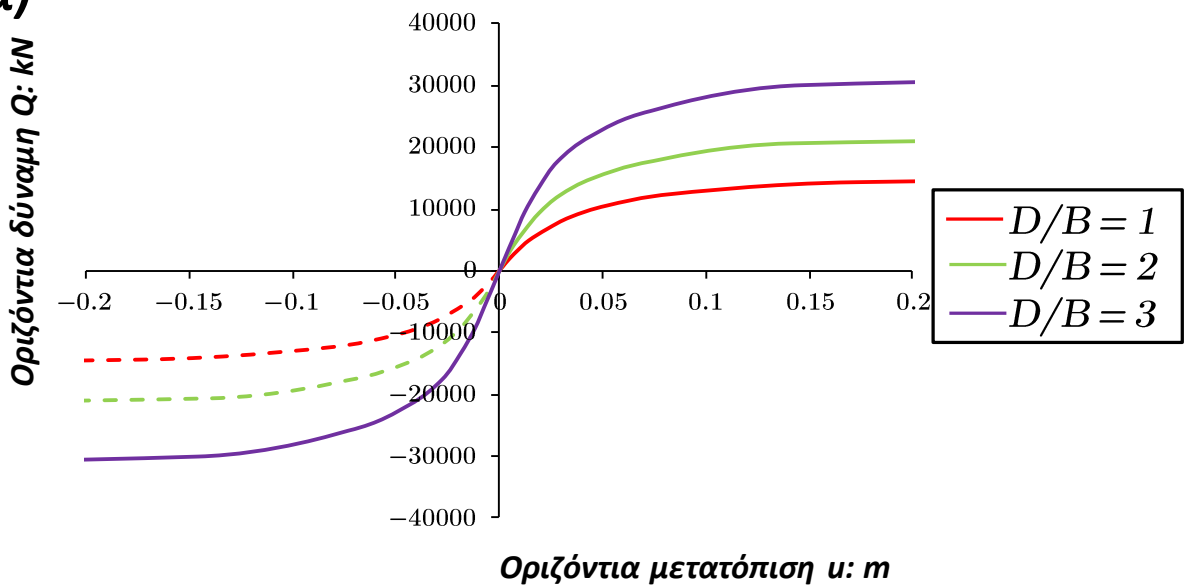


(β)

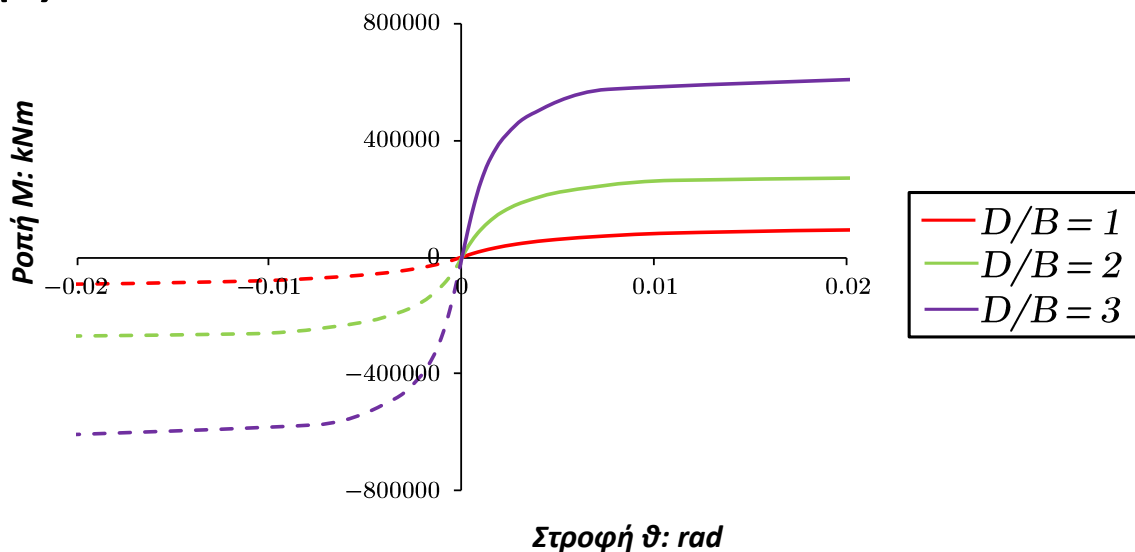


**Σχήμα 4.10.** Μονοτονικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης (σχήμα α) και ροπής- στροφής (σχήμα β), συναρτήσεως του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Τα σχήματα αντιστοιχούν στο σημείο 3, για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$ . Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι καμπύλες που αναφέρονται στο συμμετρικό σημείο του συγκεκριμένου σημείου 3.

(α)

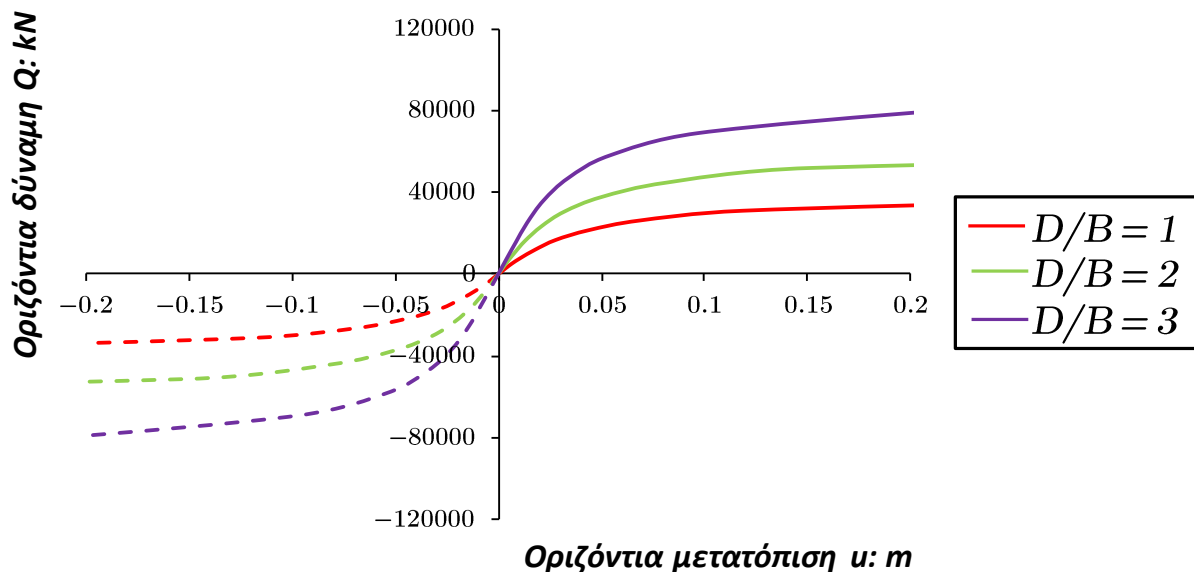


(β)

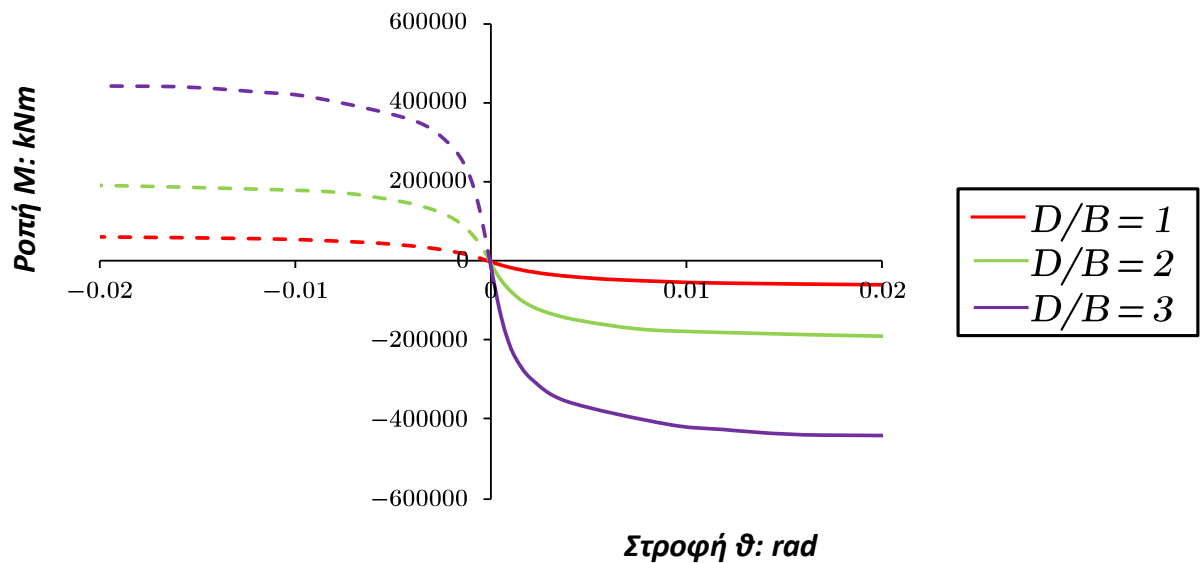


**Σχήμα 4.11.** Μονοτονικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης (σχήμα α) και ροπής- στροφής (σχήμα β), συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Τα σχήματα αντιστοιχούν στο σημείο 1, για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.66$ . Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι καμπύλες που αναφέρονται στο συμμετρικό σημείο του συγκεκριμένου σημείου 1.

(α)

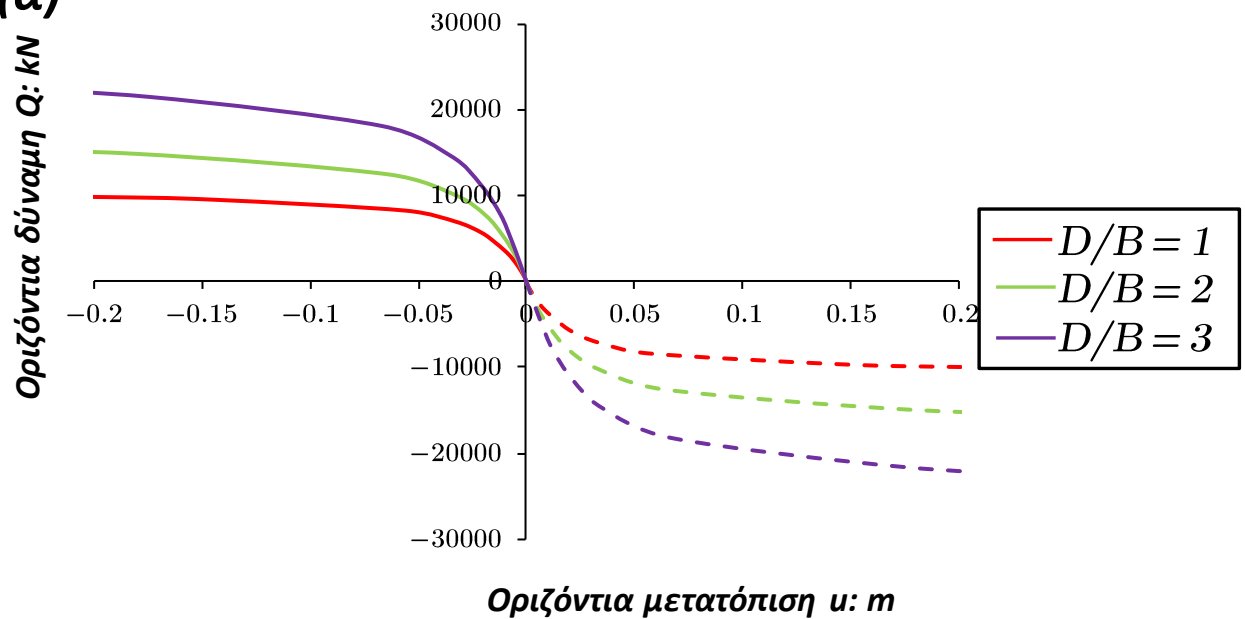


(β)

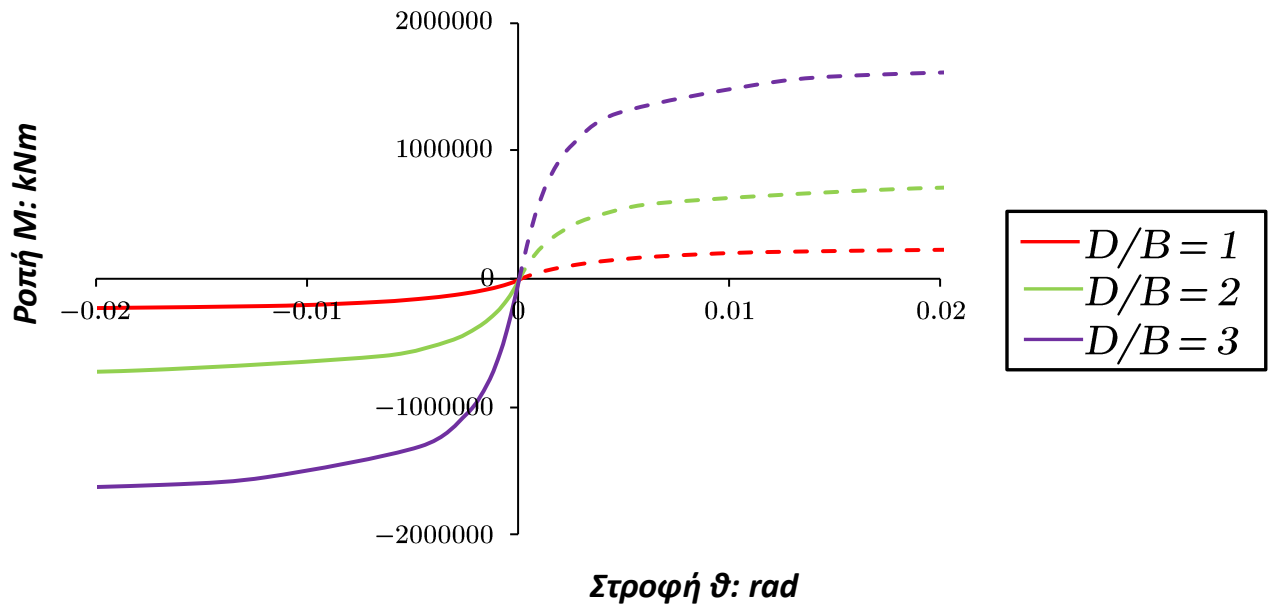


**Σχήμα 4.12.** Μονοτονικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης (σχήμα α) και ροπής- στροφής (σχήμα β), συναρτήσεως του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Τα σχήματα αντιστοιχούν στο σημείο 2, για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.66$ . Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι καμπύλες που αναφέρονται στο συμμετρικό σημείο του συγκεκριμένου σημείου 2.

(α)



(β)



**Σχήμα 4.13.** Μονοτονικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης (σχήμα α) και ροπής- στροφής (σχήμα β), συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Τα σχήματα αντιστοιχούν στο σημείο 3, για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.66$ . Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι καμπύλες που αναφέρονται στο συμμετρικό σημείο του συγκεκριμένου σημείου 3.





---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

---

### 5.1 Εισαγωγή

Ένα από τα αντικείμενα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η εξαγωγή κατάλληλων αναλυτικών εκφράσεων που θα περιγράψουν συνολικά την απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε λεπτομερής εξήγηση των μηχανισμών που διέπουν την συμπεριφορά αυτή, δίχως να δοθεί, όμως, έμφαση στην ποσοτικοποίησή τους (υπό αυστηρά μαθηματική έννοια). Εξάλλου, στο δεύτερο “μέρος” της διπλωματικής εργασίας είναι απαραίτητη η χρήση των εκφράσεων που εισάγονται στις επόμενες ενότητες, με σκοπό την αναπαραγωγή της συμπεριφοράς των φρεάτων υπό οποιεσδήποτε συνθήκες φόρτισης, μέσω της κατάλληλης μαθηματικής προσομοίωσης του συστήματος εδάφους- φρέατος με ένα “μακρο- στοιχείο” (στα πρότυπα του “macro- element modeling”), και χωρίς την ανάγκη διεξαγωγής νέων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Δύο από τα βασικά πλεονεκτήματα της διαδικασίας αυτής είναι: (α) η ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους, μιας και αποφεύγονται οι (ιδιαίτερως) χρονοβόρες αναλύσεις τριδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων και (β) η άμεση αξιοποίηση ενός ενιαίου μαθηματικού εργαλείου, η αξιοπιστία του οποίου εδράζεται στην γενική εφαρμογή που εισάγεται με την αναπαραγωγή της απόκρισης των μελετώμενων θεμελιώσεων κατ’ αυτόν τον τρόπο, τόσο στην περιοχή των πολύ μικρών παραμορφώσεων (“οιωνεί” ελαστική συμπεριφορά), όσο και στην περιοχή της αστοχίας. Συν τοις άλλοις, η προσέγγιση του προβλήματος από την σκοπιά της μοντελοποίησης μέσω “μακρο- στοιχείου” (“macro- element modeling”) παρέχει και έναν αποτελεσματικότερο διάυλο επικοινωνίας μεταξύ των γεωτεχνικών και των δομοστατικών μηχανικών. Εφόσον οι γεωτεχνικοί μηχανικοί καταφέρουν να εκφράσουν την απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων σε όρους “δύναμης- μετακίνησης”, στα πλαίσια του προαναφερθέντος μαθηματικού

εργαλείου, τότε οι δομοστατικοί μηχανικοί θα είναι σε θέση να ανακτήσουν πολύ πιο ρεαλιστικές συμπεριφορές των θεμελιώσεων, κατά τις μη- γραμμικές επαυξητικές αναλύσεις (non- linear incremental structural analysis) για την μελέτη των κατασκευών [Martin and Houlsby 2000]. Βασική, όμως, προϋπόθεση για την ορθή και ουσιαστική αξιοποίηση των παραπάνω πλεονεκτημάτων, είναι η απαίτηση να εκφραστούν μαθηματικά οι επιμέρους ιδιότητες που εξουσιάζουν την απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (π.χ. παράμετροι αντοχής του συστήματος θεμελίωσης), ενώ ταυτόχρονα οι εκφράσεις αυτές πρέπει να συμβαδίζουν απόλυτα με την φυσική του συγκεκριμένου προβλήματος, ακολουθώντας πιστά τους “κανόνες συμπεριφοράς” των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων που παρατηρήθηκαν, και έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής.

## **5.2 Προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας φρέατων σε κατακόρυφη φόρτιση ( $N_u$ )**

Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζεται η μεταβολή της φέρουσας ικανότητας σε κατακόρυφη φόρτιση της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης σε συνάρτηση με τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ . Καθώς αυξάνεται ο λόγος εγκιβωτισμού, αυξάνεται και η φέρουσα ικανότητα του φρέατος σε κατακόρυφο φορτίο, με τρόπο που (προσεγγιστικά) μπορεί να θεωρηθεί γραμμικός. Ύστερα από την κατάλληλη επεξεργασία των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις τριδιάστατες αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία, προτείνεται η παρακάτω έκφραση για την περιγραφή της αντοχής σε κατακόρυφη φόρτιση βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης:

$$N_u = 9.64 \cdot B^2 \cdot S_u \cdot \left(1 + \frac{D}{B}\right)^{0.67} \quad (5.1)$$

### **5.3 Προσδιορισμός των “καθαρών” αντοχών σε οριζόντια δύναμη (Q<sub>u</sub>) και σε ροπή (M<sub>u</sub>)**

Στο **Σχήμα 5.2** απεικονίζεται η μεταβολή της “καθαρής” αντοχής σε οριζόντια δύναμη Q<sub>u</sub> συναρτήσει του αντίστροφου του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση x (υπενθυμίζεται ότι:  $x = 1/FS_v = N/N_u$ ), και για τους τρεις λόγους εγκιβωτισμού D/B που εξετάζονται διεξοδικά. Επίσης, στο **Σχήμα 5.3** απεικονίζεται, με παρόμοιο τρόπο, η αντίστοιχη μεταβολή της “καθαρής” αντοχής σε ροπή M<sub>u</sub>. Και στις δύο περιπτώσεις σχεδιάζονται και οι γραφικές παραστάσεις των αναλυτικών εκφράσεων που θα συστηθούν παρακάτω, τόσο για τους τρεις λόγους εγκιβωτισμού D/B που μελετώνται λεπτομερέστερα (D/B = 1, 2 και 3), όσο και για διάφορους άλλους, όπως αυτές προβλέπονται από τις προτεινόμενες εκφράσεις. Σημειώνεται εκπληκτικά κοινή συμπεριφορά μεταξύ των δύο “καθαρών” αντοχών, τέτοια που να δίνει την δυνατότητα να εξαχθούν κοινά συμπεράσματα και για τις δύο περιπτώσεις. Αρχικώς, φαίνεται η έντονη εξάρτηση και των δύο αυτών “καθαρών” αντοχών από την κατακόρυφη φόρτιση του φρέατος. Και οι δύο αντοχές φθίνουν με την αύξηση του επιβαλλόμενου κατακόρυφου φορτίου (αύξηση του συντελεστή x). Καθώς το επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο στην κορυφή του φρέατος αυξάνει, η πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους γίνεται εντονότερη και μεγαλύτερη σε έκταση. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης εμφανίζει συνεχώς μειωμένα περιθώρια περαιτέρω πλαστικοποίησης, με συνέπεια- τελικά- την εμφάνιση συνεχώς μειωμένων “καθαρών” αντοχών (έως τον μηδενισμό τους για την ακραία περίπτωση  $x = 1$ , ή  $FS_v = 1$ ). Η διεύρυνση αυτή της ζώνης πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους συναρτήσει της κατακόρυφης φόρτισης στην κορυφή του φρέατος, φαίνεται ενδεικτικά στο **Σχήμα 5.4**, όπου απεικονίζονται οι ισοϋψείς των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων που αντιστοιχούν στο τέλος της κατακόρυφης φόρτισης (και πριν την εφαρμογή της εγκάρσιας, είτε οριζόντιας δύναμης είτε ροπής) για εγκιβωτισμένη θεμελίωση με λόγο εγκιβωτισμού D/B = 1, και για συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.25$  και 10. Επιπλέον, εντοπίζεται και η (προφανής) έντονη εξάρτηση των δύο “καθαρών” αντοχών με τον λόγο εγκιβωτισμού D/B. Καθώς το βάθος εγκιβωτισμού του φρέατος αυξάνει, οι μηχανισμοί αστοχίας που έχουν διατυπωθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο ωθούνται

βαθύτερα στην εδαφική μάζα, κινητοποιώντας σημαντικά μεγαλύτερο εδαφικό όγκο. Συνεπώς, είναι απολύτως αναμενόμενο οι “καθαρές” αντοχές να παρουσιάζονται αυξημένες, και μάλιστα, η αύξηση αυτή δείχνει να είναι εντονότερη (αναλογικά) στην “καθαρή” αντοχή σε ροπή  $M_u$ , σε σχέση με την αντίστοιχη “καθαρή” αντοχή σε οριζόντια δύναμη  $Q_u$  (Σχήμα 5.5).

Ύστερα από την κατάλληλη στατιστική επεξεργασία των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία, προτείνονται οι παρακάτω αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των “καθαρών” αντοχών των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων, συναρτήσει (κυρίως) του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$  και του συντελεστή  $x$ :

(α) “Καθαρή” αντοχή σε οριζόντια δύναμη:

$$Q_u = B \cdot D \cdot S_u \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^{-2.15} \cdot \left(1 + \frac{D}{B}\right)^{2.89} \cdot (1-x)^{0.17} \quad (5.2)$$

(β) “Καθαρή” αντοχή σε ροπή:

$$M_u = 0.46 \cdot B^2 \cdot D \cdot S_u \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^{-1.49} \cdot \left(1 + \frac{D}{B}\right)^{3.39} \cdot (1-x)^{0.17} \quad (5.3)$$

### 5.3.1 Η επιρροή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u$

Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι οι δύο “καθαρές” αντοχές της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης εξαρτώνται και από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$  της αργίλου, που θεωρείται ότι περιβάλλει το φρέαρ, και μάλιστα με απολύτως ανάλογο τρόπο. Υπενθυμίζεται, εξάλλου, ότι, απ' την μια πλευρά, δεν ελήφθησαν υπ' όψιν φαινόμενα γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων (π.χ. αποκόλληση- gapping και ολίσθηση- slippage) στο τριδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε πληροφορία αντοχής του συστήματος εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης να πηγάζει εξ' ολοκλήρου από την εδαφική αντοχή (εκφρασμένης μέσω της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$ ), ενώ, απ' την άλλη, η κατανομή της με το βάθος θεωρήθηκε

ομοιόμορφη. Έτσι, προς επιβεβαίωση της διαπίστωσης που έγινε σε προηγούμενη ενότητα, οι μηχανισμοί παραλαβής τόσο της οριζόντιας δύναμης όσο και της ροπής είναι κοινοί, με συνέπεια οι “καθαρές” αντοχές να επηρεάζονται με απολύτως ανάλογο τρόπο από την συγκεκριμένη παράμετρο αντοχής του εδάφους.

Για λόγους πληρότητας, στα **Σχήματα 5.6** και **5.7** απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης (στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ ) που προέκυψαν με χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων, θεωρώντας, όμως, ως εδαφική παράμετρο αντοχής την τριπλάσια αστράγγιστη διατμητική αντοχή του αργιλικού εδάφους, από αυτήν που θεωρήθηκε κατά την αρχική παραγωγή των καμπυλών αλληλεπίδρασης,  $S_u = 150$  kPa (υπενθυμίζεται ότι τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αναφέρονται σε αστράγγιστη εδαφική διατμητική αντοχή  $S_u = 50$  kPa, όπως αυτές σχεδιάζονται στα ίδια σχήματα). Όλες οι καμπύλες αλληλεπίδρασης αναφέρονται, αντίστοιχα, στους δύο ακραίους από τους λόγους εγκιβωτισμού που εξετάστηκαν ( $D/B = 1$  και  $3$ ), και σε τρεις διαφορετικούς συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  (δύο ακραίες περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης  $FS_v = 1.25$  και  $10$ , και μία ενδιάμεση  $FS_v = 2.5$ ). Παρατηρείται ότι, πρακτικώς, οι νέες κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης ταυτίζονται με εκείνες που αναφέρονται στην υπο- τριπλάσιά τους αστράγγιστη εδαφική διατμητική αντοχή  $S_u$ , φανερώνοντας το μεγάλο πλεονέκτημα της ισχύος της συγκεκριμένης μορφής κανονικοποίησης: η απόκριση (σε όρους αντοχής) των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων έχει ανεξαρτητοποιηθεί πλήρως από την θεωρούμενη τιμή της εδαφικής παραμέτρου αντοχής. Συνεπώς, στην περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της εδαφικής αντοχής με το βάθος, η επιλεγόμενη τιμή της δεν επηρεάζει σε κανέναν βαθμό τα παραγόμενα αποτελέσματα, όπως ακριβώς περιγράφεται από τις παραπάνω μαθηματικές εκφράσεις που προτάθηκαν.

### 5.3.2 Χαρακτηριστικές ιδιότητες των εκφράσεων των “καθαρών” αντοχών

Με βάση τις παραπάνω εκφράσεις (5.2) και (5.3), αξίζει να παρατηρηθούν τα ακόλουθα:

(α) Η επιρροή του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση στις “καθαρές” αντοχές σε οριζόντια δύναμη ( $Q_u$ ) και ροπή ( $M_u$ ) εκφράζεται μέσω του συντελεστή  $\chi$ . Το γεγονός ότι ο εκθέτης του αντίστοιχου όρου  $(1-\chi)$  είναι κοινός και στις δύο περιπτώσεις (ίσως με 0.17), συμβαδίζει απόλυτα με τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά την προσπάθεια εξήγησης της φυσικής σημασίας που έχει το σχήμα (shape) των κανονικοποιημένων καμπυλών αλληλεπίδρασης: για δεδομένη γεωμετρία φρέαρ (βάθους εγκιβωτισμού  $D$  και πλάτους  $B$ ), και για δεδομένη εδαφική αντοχή (αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$ ), οι παραγόμενες κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης ταυτίζονται, για κάθε εξεταζόμενο συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ .

(β) Και τα δύο μεγέθη αντοχής επηρεάζονται ισχυρά από τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ . Ο όρος  $(1 + D/B)$  έχει σημαντικά μεγαλύτερη επιρροή από τον απλό όρο  $(D/B)$ , κάτι που απεικονίζεται μέσω των αντίστοιχών τους εκθετών, και είναι ο κύριος υπεύθυνος (συγκριτικά) που προσδίδει, εν τέλει, την αύξουσα σχέση των “καθαρών” αντοχών συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού. Επιπλέον, συγκρίνοντας τους αντίστοιχους όρους στις δύο εκφράσεις, φαίνεται το σημαντικά μεγαλύτερο αντίκτυπο που έχει ο όρος  $(1 + D/B)$  στην “καθαρή” αντοχή σε ροπή  $M_u$ , σε σχέση την αντίστοιχη σε οριζόντια δύναμη  $Q_u$ , όπως ακριβώς αυτό αποτυπώθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Έτσι, αναλογικά, η “καθαρή” αντοχή σε ροπή εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστιαίο ρυθμό αύξησης σε συνάρτηση με τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$  του φρέατος, σε συμφωνία με ό, τι ακριβώς παρατηρήθηκε και από τις τριδιάστατες αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία. Ουσιαστικά, η άρρηκτη σχέση των δύο “καθαρών” αντοχών ( $Q_u$  και  $M_u$ ) με τον λόγο εγκιβωτισμού του φρέατος ( $D/B$ ) φανερώνει ένα “πρώτο επίπεδο υπεραντοχής” του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης, σε παραβολή με τον τρόπο που αυτή η υπεραντοχή έχει οριστεί πάνω σε μία καμπύλη αλληλεπίδρασης (4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του επιπέδου). Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, είναι αυτονόητο

ότι καθώς αυξάνεται ο λόγος εγκιβωτισμού, το σύστημα εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης παραλαμβάνει σαφώς μεγαλύτερη φόρτιση (**Σχήμα 5.8**, διαστατοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης για λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1, 2$ , και  $3$  και για συντελεστές ασφαλείας  $FS_v = 1.66, 2$  και  $5$ ). Επιπλέον, καθώς αυξάνεται το βάθος εγκιβωτισμού της θεμελίωσης, παρατηρείται και μία διεύρυνση του κλάδου της υπεραντοχής των καμπυλών αλληλεπίδρασης (π.χ. **Σχήμα 5.9**, καμπύλες αλληλεπίδρασης για ποικίλους λόγους εγκιβωτισμού  $D/B$  και για σταθερό συντελεστή ασφαλείας  $FS_v = 2$ ), με την διεύρυνση αυτή να οφείλεται, εν μέρει, στις νέες, αυξημένες “καθαρές” αντοχές της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Όπως έχει τονισθεί, όμως, η διεύρυνση του κλάδου της υπεραντοχής μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης είναι εντονότερη για μετάβαση από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  σε λόγο  $D/B = 2$ , παρά για μετάβαση από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  σε λόγο  $D/B = 3$  (αναφέρονται συγκεκριμένα αυτοί οι τρεις λόγοι εγκιβωτισμού από το σχετικό σχήμα, διότι είναι εκείνοι που εξετάστηκαν διεξοδικά). Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οφείλει να υπάρξει κατάλληλη μαθηματική μέριμνα, όσον αφορά τον φαινόμενο της διεύρυνσης του κλάδου της υπεραντοχής, μιας και πρέπει να ποσοτικοποιηθεί- υπό αυστηρά μαθηματική σκοπιά- ένα νέο “δεύτερο επίπεδο υπεραντοχής”, το οποίο να είναι ικανό να εκφράζει τον ρυθμό εξάρτησης της διεύρυνσης του κλάδου της υπεραντοχής μιας κανονικοποιημένης καμπύλης αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ ), σε σχέση με την μεταβολή στον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ , με τον ρυθμό αυτό να αποσβένει διαρκώς καθώς ο λόγος  $D/B$  αυξάνεται, έως τον (ουσιαστικώς) μηδενισμό του.

## **5.4 Εξίσωση διαρροής του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης**

### **5.4.1 Βιβλιογραφικά στοιχεία**

Επιστημονικές έρευνες σχετικές με διάφορους τύπους εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υποδεικνύουν ότι η εξίσωση της επιφάνειας διαρροής του συστήματος εδάφους- εγκιβωτισμένης θεμελίωσης περιγράφεται ικανοποιητικά από ένα



καταλλήλως περιστραμμένο ελλειψοειδές [Bransby and Randolph 1999a; Martin and Houlby 2001; Yun and Bransby 2007]. Για παράδειγμα, οι Yun και Bransby [2007], πρότειναν (στα πλαίσια των συστάσεων σχεδιασμού έργων ανοικτής θαλάσσης) την ακόλουθη συντηρητική εξίσωση διαρροής για ελαφρώς εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις (με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B \leq 1$ ):

$$\left(\frac{H}{H_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{M^*}{M_0}\right)^2 = 1 \quad (5.4)$$

όπου:

- $H$  και  $H_{\max}$  είναι η επιβαλλόμενη οριζόντια δύναμη και η μέγιστη δυνατή οριζόντια δύναμη που δύναται να παραληφθεί από την θεμελίωση, αντίστοιχα
- $M^*$  είναι επιβαλλόμενη ροπή στην θεμελίωση, γύρω από ένα τροποποιημένο σημείο αναφοράς και
- $M_0$  είναι η “καθαρή” αντοχή σε ροπή της ελαφρώς εγκιβωτισμένης θεμελίωσης.

Το γραφικό αποτέλεσμα της παραπάνω εξίσωσης απεικονίζεται στο **Σχήμα 5.10**, για διάφορους λόγους εγκιβωτισμού της θεμελίωσης μικρότερους της μονάδας. Μέσω της χρησιμοποίησης ενός τροποποιημένου σημείου αναφοράς, οι Yun και Bransby κατάφεραν να “μετατρέψουν” την καμπύλη διαρροής της θεμελίωσης από ένα περιστραμμένο ελλειψοειδές σε ένα κυκλικό τόξο (με συντηρητικό αντίκτυπο).

#### 5.4.2 Προτεινόμενες εκφράσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η εξίσωση που δείχνει να αναπαριστά καλύτερα το σχήμα (shape) των καμπυλών αλληλεπίδρασης στο γενικευμένο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$  είναι της μορφής:

$$f(Q, M) = n_6 \cdot \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^{n_1} + \left(\frac{M}{M_u}\right)^{n_2} + n_3 \cdot \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^{n_4} \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right)^{n_5} - 1 = 0 \quad (5.5)$$

Έπειτα από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης για την εύρεση των επιμέρους συντελεστών της εξίσωσης (5.5) (συντελεστές  $n_1$  έως  $n_6$ ), σύμφωνα πάντα με τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία με την χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, προέκυψαν οι παρακάτω τιμές:  $n_1 = n_2 = 2$  και  $n_4 = n_5 = n_6 = 1$ . Συνεπώς, η παραπάνω εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$f(Q, M) = \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_u}\right)^2 + n_3 \cdot \left(\frac{Q}{Q_u}\right) \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right) - 1 = 0 \quad (5.6)$$

Εξάλλου, το συγκεκριμένο αποτέλεσμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης των συντελεστών της εξίσωσης που περιγράφει την διαρροή του συστήματος εδάφους-φρέατος, θα μπορούσε- εκ των προτέρων- να θεωρηθεί μαθηματικά αναμενόμενο, εφόσον έχει ήδη διατυπωθεί ότι ο στόχος της προταθείσας μαθηματικής εξίσωσης είναι να περιγράψει ένα περιστραμμένο ελλειψοειδές. Ως γνωστόν, ο τρίτος προσθετός της παραπάνω εξίσωσης (δηλαδή ο όρος που περιλαμβάνει το γινόμενο των δύο εγκάρσιων εντατικών μεγεθών, της οριζόντιας δύναμης  $Q$  και της ροπής  $M$ ) είναι υπεύθυνος για την στροφή αυτή (ως προς τους καρτεσιανούς άξονες του επιπέδου) του ελλειψοειδούς, το σχήμα του οποίου ορίζεται από τους δύο πρώτους προσθετούς (με τετραγωνικούς εκθέτες). Επιπλέον, ο συγκεκριμένος συνδυασμός των αγνώστων συντελεστών που προέκυψε, αποδεικνύεται και αρκετά βοηθητικός για την εύκολη εισαγωγή στην παραπάνω εξίσωση και του αντίστοιχου όρου της κατακόρυφης φόρτισης. Απ' την στιγμή που οι αντίστοιχοι όροι της επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης και της ροπής έχουν κοινούς εκθέτες (είτε το τετράγωνο είτε την μονάδα), και με βάση την παρατήρηση (α) σε προηγούμενη ενότητα (σχετικά με τον σχολιασμό των εκφράσεων των "καθαρών" αντοχών), αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5.6) τα σύμβολα των "καθαρών" αντοχών σε οριζόντια δύναμη ( $Q_u$ ) και σε ροπή ( $M_u$ ) με τις εκφράσεις τους ((5.2) και (5.3), αντίστοιχα), προκύπτει η παρακάτω εξίσωση, στον γενικευμένο τριδιάστατο χώρο φόρτισης  $M - Q - N$ :

$$f(M, Q, N) = \left(1 - \frac{N}{N_u}\right)^{-0.34} \cdot \left[ \left(\frac{Q}{Q_u^*}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_u^*}\right)^2 + n_3 \cdot \left(\frac{Q}{Q_u^*}\right) \cdot \left(\frac{M}{M_u^*}\right) \right] - 1 = 0$$

(5.7)

όπου:

- $x = N/N_u$ , δηλαδή έγινε εμμέσως η εισαγωγή στην εξίσωση διαρροής του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, του αντίστροφου του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση συντελεστή (υπενθυμίζεται ότι  $x = 1/FS_v = N/N_u$ ).
- Με τον συμβολισμό  $Q_u^*$  ορίζεται η “καθαρή” αντοχή σε οριζόντια δύναμη της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, υπό την απουσία κατακόρυφης φόρτισης, δηλαδή  $Q_u^* = Q_u|_{x=0}$ .
- Αντίστοιχα ορίζεται και ο όρος  $M_u^*$ , δηλαδή  $M_u^* = M_u|_{x=0}$  (απουσία κατακόρυφης φόρτισης).

Η εξίσωση (5.7) έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι εκφράζει το κριτήριο διαρροής του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης στον τριδιάστατο γενικευμένο χώρο φόρτισης στην κορυφή του φρέατος (συνδυασμένη φόρτιση κατακόρυφης δύναμης  $N$ - οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ ) με αποτέλεσμα να περιγράφει μαθηματικά τις λεγόμενες “επιφάνειες αλληλεπίδρασης”. Στα **Σχήματα 5.11(α), 5.11(β)** και **5.11(γ)** απεικονίζονται οι επιφάνειες αλληλεπίδρασης εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1, 2, 3$ , αντίστοιχα, ως οι γραφικές παραστάσεις της εξίσωσης (5.7) (scatter plots). Οι άξονες της οριζόντιας δύναμης και της ροπής εμφανίζονται κανονικοποιημένοι με τις “καθαρές” αντοχές της θεμελίωσης υπό την απουσία κατακόρυφης φόρτισης ( $Q_u^*$  και  $M_u^*$ ). Παρατηρείται η σταδιακή σμίκρυνση των επιφανειών αλληλεπίδρασης σε όλες τις περιπτώσεις λόγω εγκιβωτισμού, καθώς αυξάνεται ο συντελεστής  $x$ , η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι οι άξονες της οριζόντιας δύναμης και της ροπής έχουν κανονικοποιηθεί με τις “καθαρές” αντοχές υπό την ταυτόχρονη απουσία του κατακόρυφου φορτίου. Υπό αυτήν την συνθήκη, όπως έχει σημειωθεί σε προηγούμενη ενότητα, οι “καθαρές” αντοχές της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης σημειώνουν την μέγιστη τιμή τους.

### **5.5 Συντελεστής διεύρυνσης των καμπυλών αλληλεπίδρασης**

Ως τώρα, δεν έχει γίνει καμία αναφορά στο τι εκφράζει και στο πώς ορίζεται ο συντελεστής  $n_3$  της εξίσωσης των επιφανειών αλληλεπίδρασης. Παρατηρώντας την εξίσωση (5.6), προκύπτει ότι ο συντελεστής  $n_3$  ανήκει στον προσθετέο που περιλαμβάνει το γινόμενο της επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης  $Q$  και της επιβαλλόμενης ροπής  $M$  στην κεφαλή του φρέατος, ο οποίος- όπως αναφέρθηκε παραπάνω- εκφράζει τον περιστραμμένο χαρακτήρα των καμπυλών αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Σύμφωνα, όμως, με την παρατήρηση (β) προηγούμενης ενότητας (σχετικά με τον σχολιασμό των προτεινόμενων εκφράσεων για τις “καθαρές” αντοχές  $Q_u$  και  $M_u$ ), οι καμπύλες αλληλεπίδρασης φρεάτων στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$  διευρύνονται συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ . Ο όρος του γινομένου των εντατικών μεγεθών της εξίσωσης (5.6) αδυνατεί να επιτύχει την διεύρυνση αυτή από μόνος του, με αποτέλεσμα να απαιτείται να εισαχθεί ο συντελεστής  $n_3$  στους υπολογισμούς, ως ο υπεύθυνος συντελεστής που θα αναπαράγει την διεύρυνση των καμπυλών αλληλεπίδρασης φρεάτων σε όρους οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ , συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ . Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος της εισαγωγής του κατάλληλου συντελεστή  $n_3$  στην εξίσωση διαρροής του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, είναι να περιγράψει ορθά την παρατήρηση με βάση τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, ότι η διεύρυνση του κλάδου της υπεραντοχής μιας καμπύλης αλληλεπίδρασης εξαρτάται αποκλειστικά από τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ , και μάλιστα με μειούμενο ρυθμό καθώς αυτός αυξάνεται. Στο **Σχήμα 5.12** απεικονίζεται ο συντελεστής  $n_3$  σε σχέση με τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ . Σε πρώτη φάση, τονίζεται ιδιαίτερα ότι ο συντελεστής διεύρυνσης  $n_3$  παραμένει ανεξάρτητος από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , για δεδομένης γεωμετρίας φρέαρ (με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ ), σε θαυμαστή συμφωνία με τις παρατηρήσεις κατά την εξήγηση της φυσικής σημασίας των καμπυλών αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Απ' την στιγμή που οι κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$  (ως προς τις “καθαρές” αντοχές  $Q_u$  και  $M_u$ ) είναι πρακτικώς ταυτόσημες για δεδομένο λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ , ανεξάρτητα από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , είναι

απολύτως σύμφωνο το εύρημα της μηδενικής εξάρτησης του συντελεστή  $n_3$  από τον συντελεστή ασφαλείας  $FS_v$ . Έτσι, στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται συγχρόνως οι τιμές του συντελεστή  $n_3$  που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (δείκτες), καθώς και η γραφική παράσταση της προτεινόμενης σχέσης (συνεχής κόκκινη γραμμή). Με βάση την κατάλληλη ανάλυση παλινδρόμησης, προτείνεται η παρακάτω έκφραση για την ορθή περιγραφή του φαινομένου της διεύρυνσης μια καμπύλης αλληλεπίδρασης, σε συνάρτηση με τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ :

$$n_3 = 1.84 - 0.21 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^{-1.98} \quad (5.8)$$

Το **Σχήμα 5.12** μπορεί κάλλιστα να συνδυαστεί με το **Σχήμα 5.9** (καμπύλες αλληλεπίδρασης ποικίλων λόγων εγκιβωτισμού  $D/B$  και για συντελεστή ασφαλείας  $FS_v = 2$ ), προκειμένου να διερευνηθεί άμεσα η ορθή εφαρμογή της προτεινόμενης έκφρασης του συντελεστή διεύρυνσης του περιστραμμένου ελλειψοειδούς  $n_3$ . Παρατηρείται ότι έπειτα από ένα τμήμα γραμμικής μεταβολής ( $0.5 \leq D/B \leq 1$ ), ο ρυθμός μεταβολής του συντελεστή  $n_3$  μειώνεται συνεχώς και (πρακτικώς) μηδενίζεται. Το γράφημα ορίζει ένα “πλατώ” για την τιμή του συντελεστή  $n_3 \approx 1.80$ , όπως ακριβώς σημειώθηκε με βάση τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, που ουσιαστικά ξεκινά για  $D/B \approx 1.7$ . Επιπλέον, στο **Σχήμα 5.9** φαίνεται ότι για  $D/B \geq 1.7$ , πρακτικά οι κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης δείχνουν να ταυτίζονται. Οι διαφορές τους στον κλάδο της υπεραντοχής τους μοιάζουν αμελητέες, αν αναλογιστεί κανείς ότι για  $D/B \geq 1.7$  οι κανονικοποιημένες τιμές της μέγιστης ροπής κυμαίνονται μεταξύ των τιμών  $2.2 \leq M_{\max}/M_u \leq 2.4$ , ενώ οι αντίστοιχες της μέγιστης οριζόντιας δύναμης κυμαίνονται μεταξύ των τιμών  $2.3 \leq Q_{\max}/Q_u \leq 2.6$  (π.χ. για  $D/B = 1$  ισχύει ότι  $Q_{\max}/Q_u \approx 1.7$  και  $M_{\max}/M_u \approx 1.6$ , τιμές που απέχουν κατά πολύ από την “οικογένεια” των τιμών που παρατηρούνται για  $D/B \geq 1.7$ ). Ουσιαστικά, ο προτεινόμενος συντελεστής διεύρυνσης  $n_3$  εκφράζει ένα “δεύτερο επίπεδο υπεραντοχής” του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, σε παραβολή με το “πρώτο επίπεδο” που ορίστηκε προηγουμένως. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ρόλος του συντελεστή  $n_3$  είναι να ορίσει την διεύρυνση του κλάδου της υπεραντοχής καθώς αυξάνεται ο λόγος

εγκιβωτισμού  $D/B$  της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, πέραν της αύξησης των αντοχών του συστήματος που η αύξηση του λόγου εγκιβωτισμού συνεπάγεται. Το γεγονός ότι η προτεινόμενη σχέση του συντελεστή  $n_3$ , σε συνάρτηση με τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ , εμφανίζει “πλατώ” στην τιμή 1.80 (και για  $D/B \geq 1.7$ , περίπου) υποδηλώνει την σταδιακή εξάλειψη του “δεύτερου επιπέδου” υπεραντοχής του συστήματος εδάφους-φρέατος, με αποτέλεσμα την (πρακτικώς) πλήρη ταύτιση των κανονικοποιημένων καμπυλών αλληλεπίδρασης. Συνεπώς, ο κατάλληλος ορισμός του συντελεστή διεύρυνσης του περιστραμμένου ελλειψοειδούς  $n_3$ , με τον τρόπο που έγινε, εισάγει με έμμεσο τρόπο μία νέα ποσοτική απάντηση στο ερώτημα σχετικά με το τι θα πρέπει να θεωρείται ως βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση. Στο **Σχήμα 1.1** (Κεφάλαιο 1) απεικονίζεται η ποιοτική κατηγοριοποίηση όλων των συνηθισμένων ειδών θεμελιώσεων, με βάση την γεωμετρική φύση τους [Gerolymos and Gazetas 2006]. Σύμφωνα, όμως, με την πρόταση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, ως βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση-φρέαρ οφείλει να θεωρηθεί κάθε συμπαγής εγκιβωτισμένη θεμελίωση η οποία ορίζεται από έναν λόγο εγκιβωτισμού της τάξεως του 2 (και μεγαλύτερο). Ας τονισθεί ιδιαίτερα, όμως, ότι η πρόταση αυτή θα ήταν λάθος να θεωρηθεί ευρείας αποδοχής και εφαρμογής, αλλά θα πρέπει να υιοθετείται μόνο στις περιπτώσεις που συμβαδίζουν απόλυτα με τις παραδοχές που έγιναν για την εξαγωγή των ποσοτικών αποτελεσμάτων στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας, με τις βασικότερες εξ' αυτών να είναι: (α) η αγνόηση των φαινομένων γεωμετρικών μη-γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια εδάφους φρέατος (π.χ. αποκόλληση- gapping) και (β) η θεώρηση ομογενούς εδαφικού σχηματισμού (σταθερών εδαφικών παραμέτρων με το βάθος), υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης. Για την πλήρη αξιοποίηση μιας τέτοιου είδους σύστασης, οφείλει να υπάρξει καθολικότερη διερεύνηση του θέματος, λαμβάνοντας υπ' όψιν περισσότερες παραμέτρους. Παρ' όλα αυτά, το παραπάνω εύρημα δεν παύει να είναι εξέχως σημαντικό για την συγκεκριμένη εργασία, μιας και αποτελεί μία ισχυρή ποσοτική ένδειξη για τον ορισμό και την συμπεριφορά των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, εισάγοντας μία πρωτότυπη διάκριση ανάμεσα στις ελαφρώς εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις και στα φρέατα. Για  $D/B \geq 2$ , περίπου, το “δεύτερο επίπεδο” υπεραντοχής των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων χάνεται, οι κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης ταυτίζονται μεταξύ τους, με συνέπεια, πλέον, η μελέτη της συμπεριφοράς τους να ανεξαρτητοποιείται πλήρως και από την

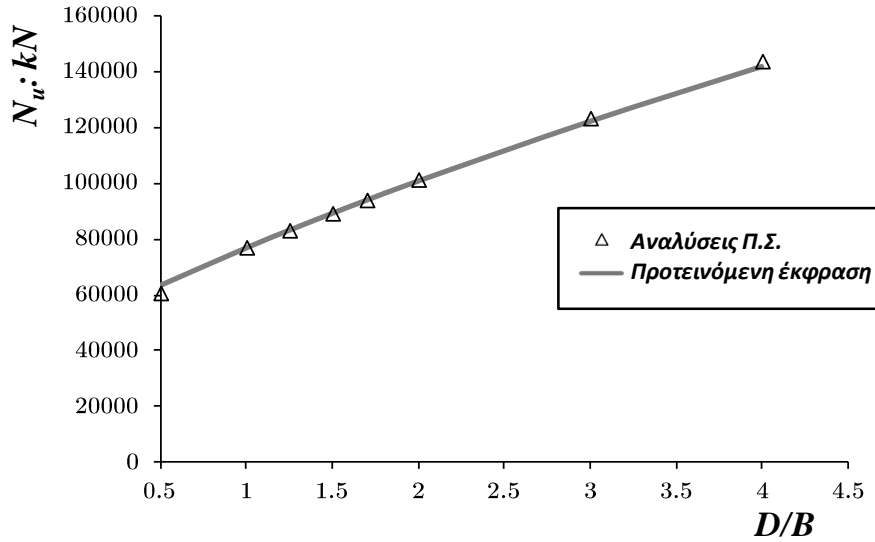
ίδια την γεωμετρία τους, αλλά και από τις εδαφικές παραμέτρους αντοχής (ταυτόχρονα). Ουσιαστικά, η μελέτη των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων ανάγεται στο απλό πρόβλημα προσδιορισμού των τριών αντοχών του συστήματος εδάφους-φρέατος: (α) της φέρουσας ικανότητας σε κατακόρυφη φόρτιση,  $N_u$ , (β) της “καθαρής” αντοχής σε οριζόντια δύναμη,  $Q_u$  και (γ) της “καθαρής” αντοχής σε ροπή,  $M_u$ . Οποιοδήποτε άλλο ζήτημα αντοχής μπορεί να εκληφθεί εμμέσως από τις προτεινόμενες εκφράσεις, και τις καμπύλες (ή επιφάνειες) αλληλεπίδρασης που αυτές ορίζουν. Εξάλλου, το εύρημα αυτό αποτελεί, κατά μία έννοια, την επέκταση της σύστασης των Bransby και Randolph [1998], και την γενίκευση της εφαρμοσιμότητάς της, όπως αυτή έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Τέλος, στο **Σχήμα 5.13** απεικονίζονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης που παράχθηκαν κατά την διεξαγωγή των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ , συμπληρωμένες με τις γραφικές παραστάσεις της εξίσωσης διαρροής (5.6), για κάθε λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ . Πιο συγκεκριμένα, οι καμπύλες αλληλεπίδρασης είναι ακριβώς αυτές που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 (**Σχήματα 3.11, 3.13 και 3.15**), για δεδομένο λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$  και για όλους τους εξεταζόμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_u$ , παρά το γεγονός ότι προτεινόμενη η εξίσωση διαρροής δεν εξαρτάται από την κατακόρυφη φόρτιση του φρέατος, συμβαδίζοντας με ό, τι έχει διαπιστωθεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο (μία αρκετά καλή παραδοχή προσέγγισης). Πέραν από την σύγκλιση των προτεινόμενων εκφράσεων με την φυσική σκοπιά του προβλήματος των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων που αναπτύχθηκε παραπάνω, είναι, πλέον, φανερό και η γραφική τους ταύτιση. Συνεπώς, η πρόταση των ανωτέρω αναλυτικών εκφράσεων για την περιγραφή της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων αποδεικνύεται αποτελεσματική και ικανοποιητική, με αποτέλεσμα την αποδοχή της χρησιμοποίησής τους σε ένα κατάλληλα αναπτυγμένο ενιαίο μαθηματικό εργαλείο, στην λογική της μοντελοποίησης του συστήματος θεμελίωσης μέσω ενός “μακρο- στοιχείου” (“macro- element modeling”), όπως αυτό θα αναπτυχθεί λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

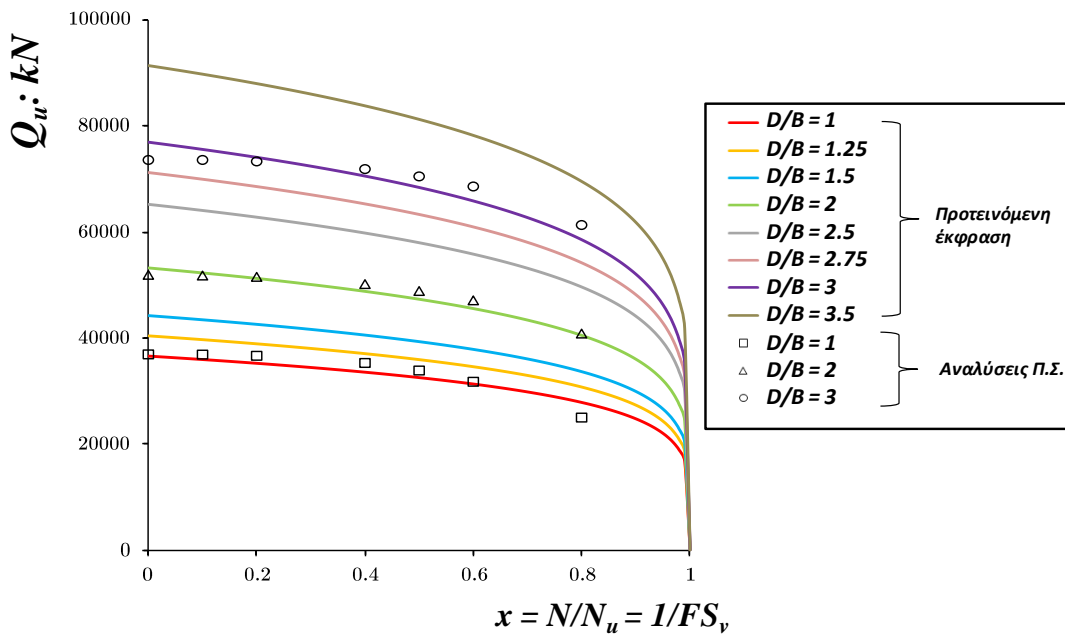
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΗΜΑΤΑ**

---

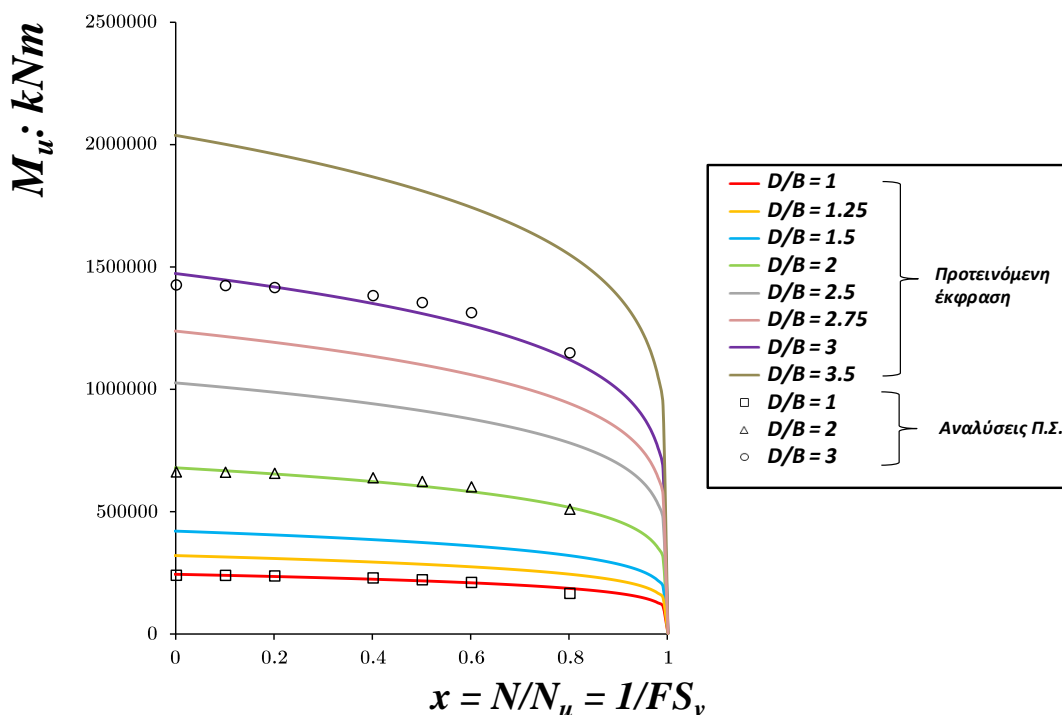




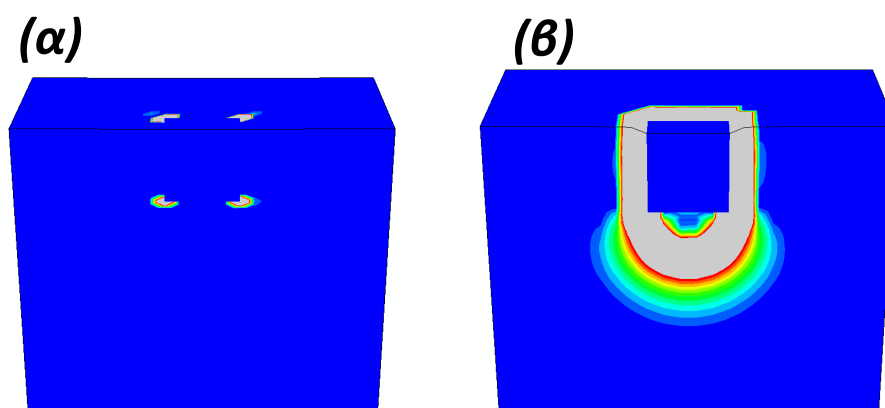
**Σχήμα 5.1.** Μεταβολή της φέρουσας ικανότητας εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων σε κατακόρυφη φόρτιση, συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ . Απεικονίζονται τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία (τρίγωνα) και η γραφική παράσταση της προτεινόμενης έκφρασης (γκρι γραμμή).



**Σχήμα 5.2.** Η μεταβολή των “καθαρών” αντοχών σε οριζόντια δύναμη  $Q_u$  των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, συναρτήσει του αντίστροφου του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Απεικονίζονται οι αντοχές που προσδιορίστηκαν με βάση τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων σημείων (διακριτά σημεία), καθώς και οι γραφικές παραστάσεις της προτεινόμενης σχέσης προσδιορισμού των “καθαρών” αντοχών, για διάφορους λόγους εγκιβωτισμού  $D/B$  (συνεχείς γραμμές).

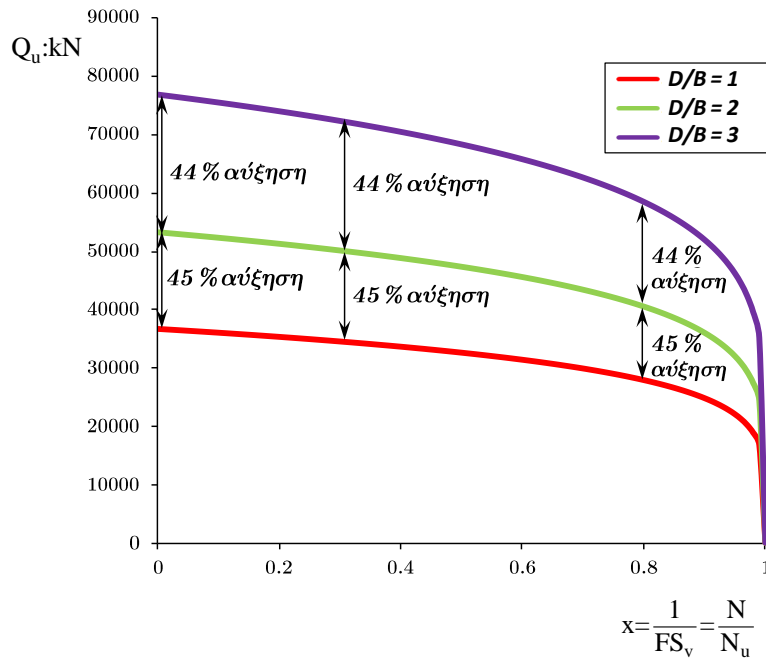


**Σχήμα 5.3.** Η μεταβολή των “καθαρών” αντοχών σε ροπή  $M_u$  των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, συναρτήσει του αντίστροφου του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Απεικονίζονται οι αντοχές που προσδιορίστηκαν με βάση τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων σημείων (διακριτά σημεία), καθώς και οι γραφικές παραστάσεις της προτεινόμενης σχέσης προσδιορισμού των “καθαρών” αντοχών, για διάφορους λόγους εγκιβωτισμού  $D/B$  (συνεχείς γραμμές).

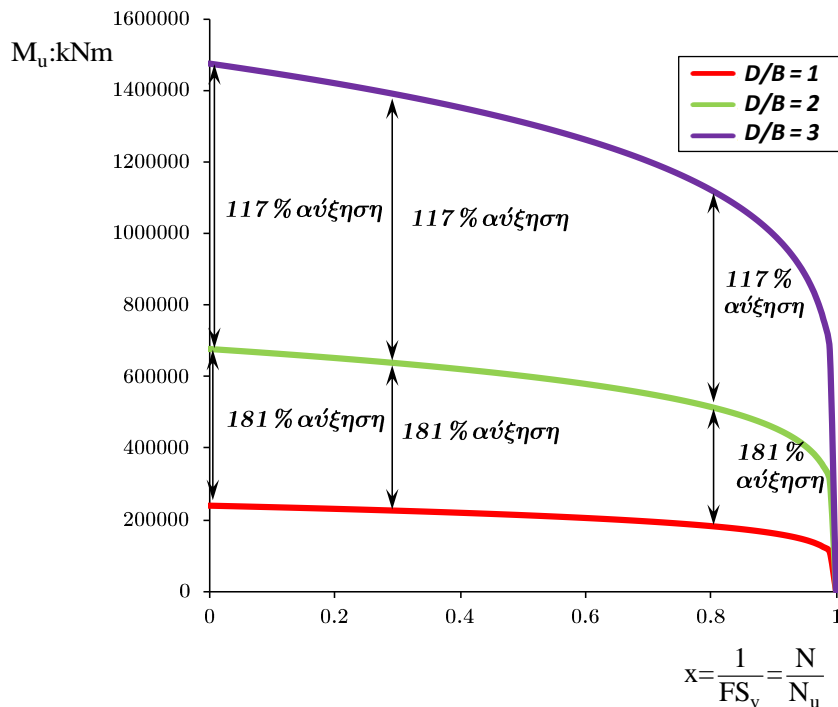


**Σχήμα 5.4.** Η διεύρυνση της ζώνης πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος της θεμελίωσης εδάφους συναρτήσει της κατακόρυφης φόρτισης, για εγκιβωτισμένη θεμελίωση με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , και για συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση: (α)  $FS_v = 10$  και (β)  $FS_v = 1.25$ .

(α)

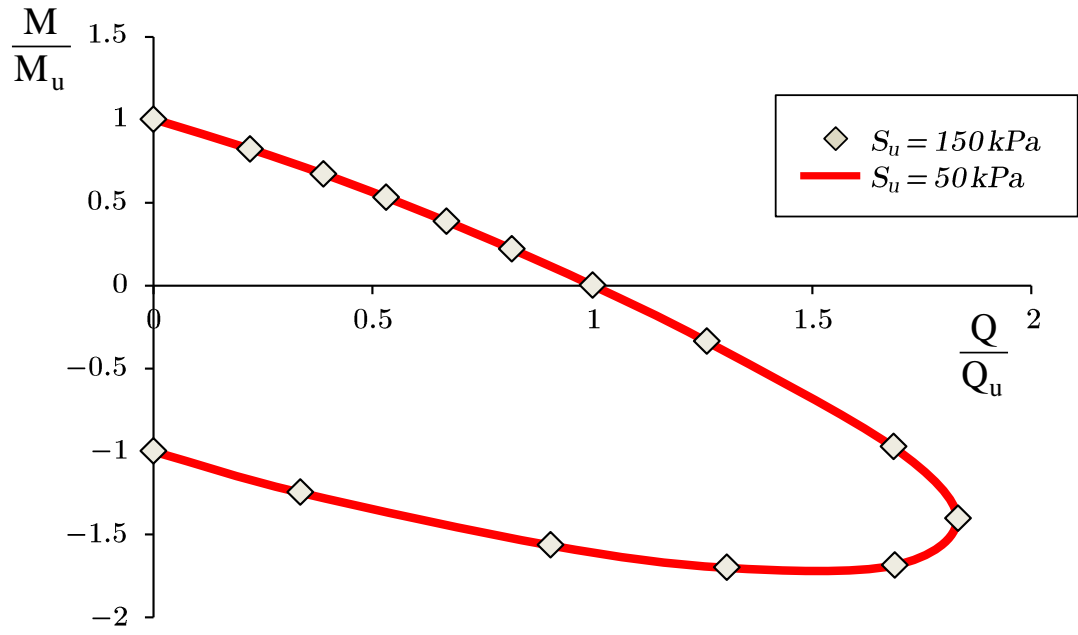


(β)

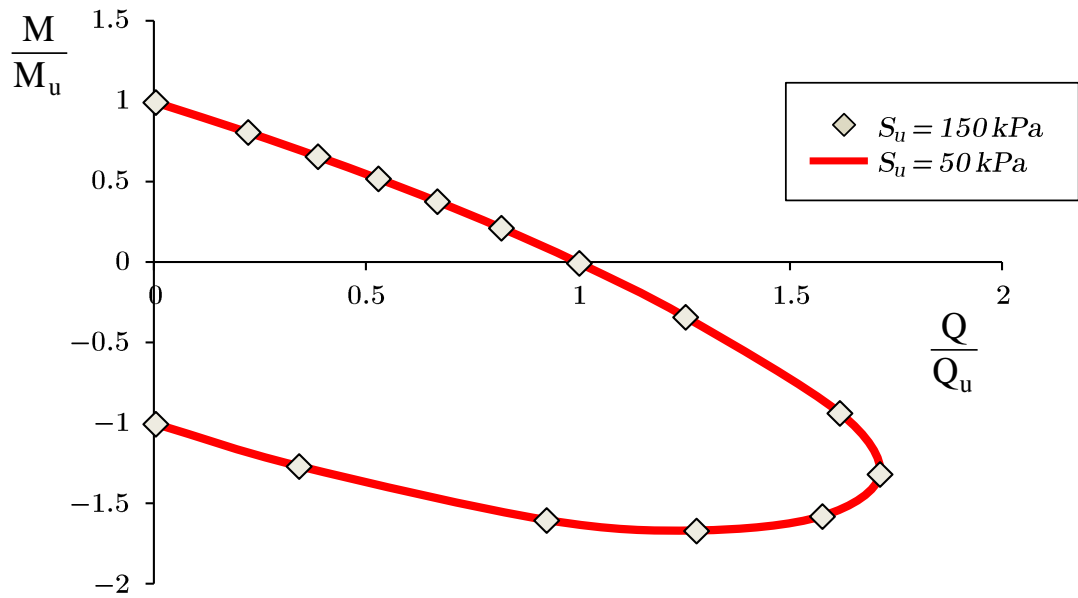


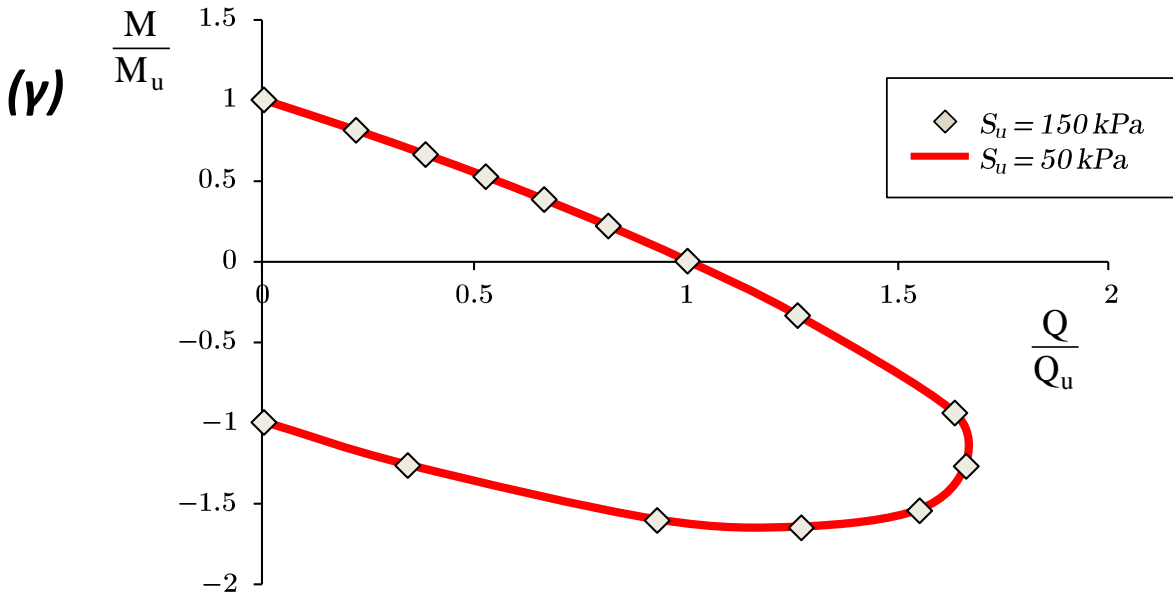
**Σχήμα 5.5.** Ποσοστιαίες μεταβολές των “καθαρών” αντοχών βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, σε σχέση με την μεταβολή στον λόγο εγκιβωτισμού τους από  $D/B = 1$  σε  $D/B = 2$ , και από  $D/B = 2$  σε  $D/B = 3$ , αντίστοιχα. Στο σχήμα (α) απεικονίζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές στην “καθαρή” αντοχή σε οριζόντια δύναμη  $Q_u$ , και στο σχήμα (β) οι ποσοστιαίες μεταβολές στην “καθαρή” αντοχή σε ροπή  $M_u$ . Οι μεταβολές αυτές είναι σαφώς εντονότερες στην περίπτωση των “καθαρών” αντοχών σε ροπή.

(α)

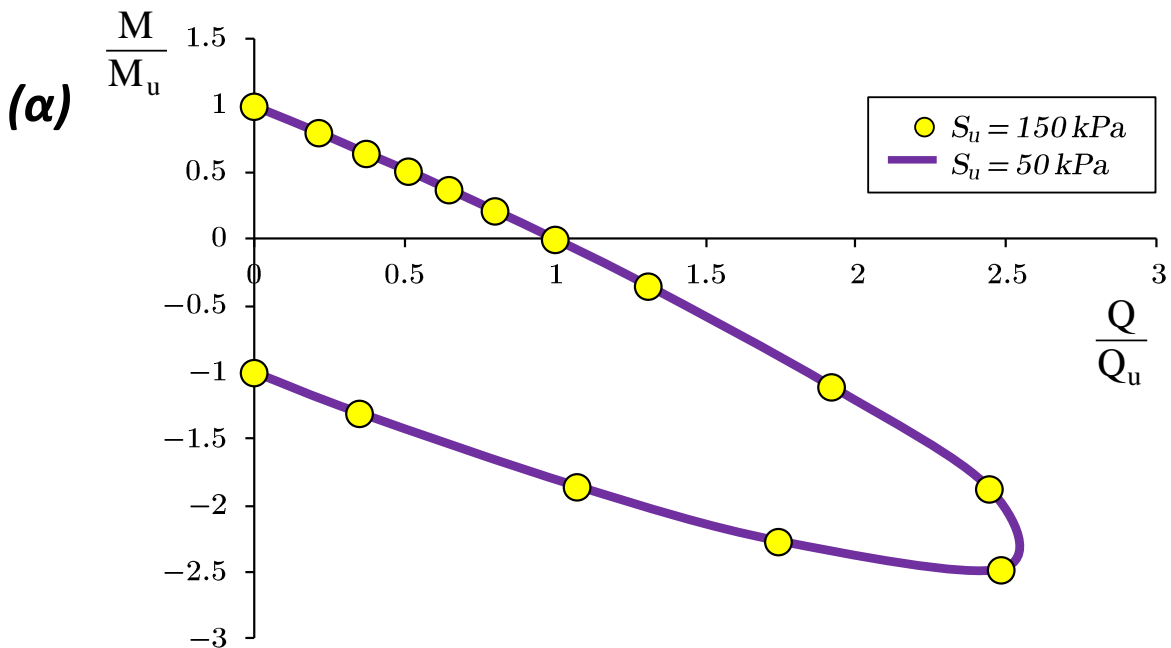


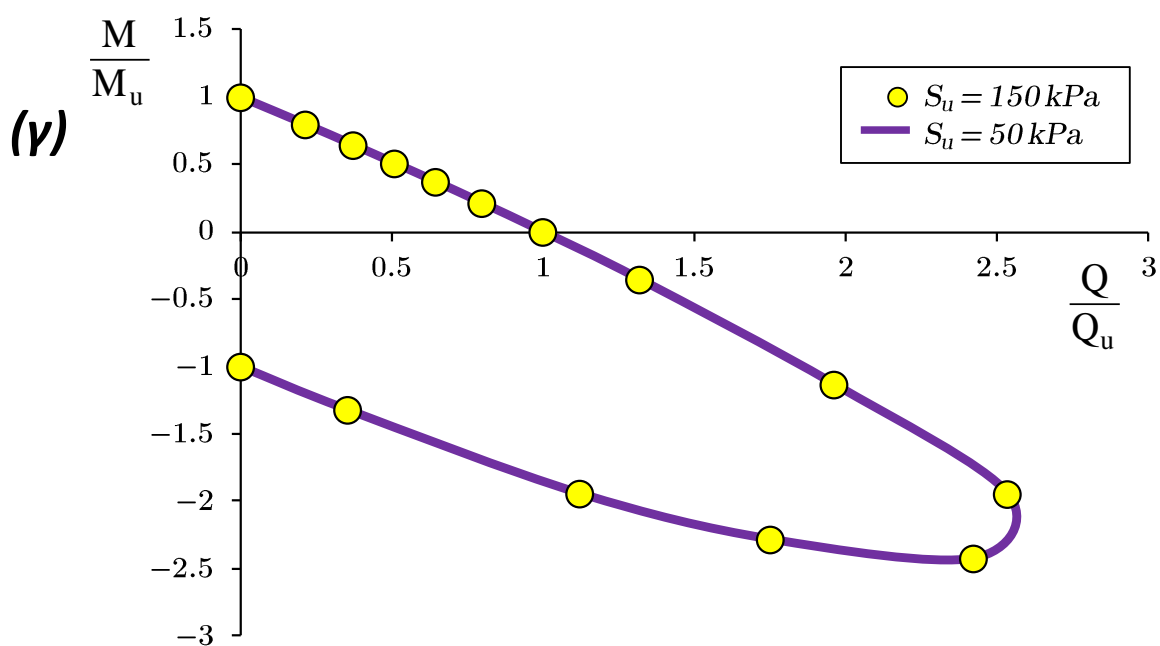
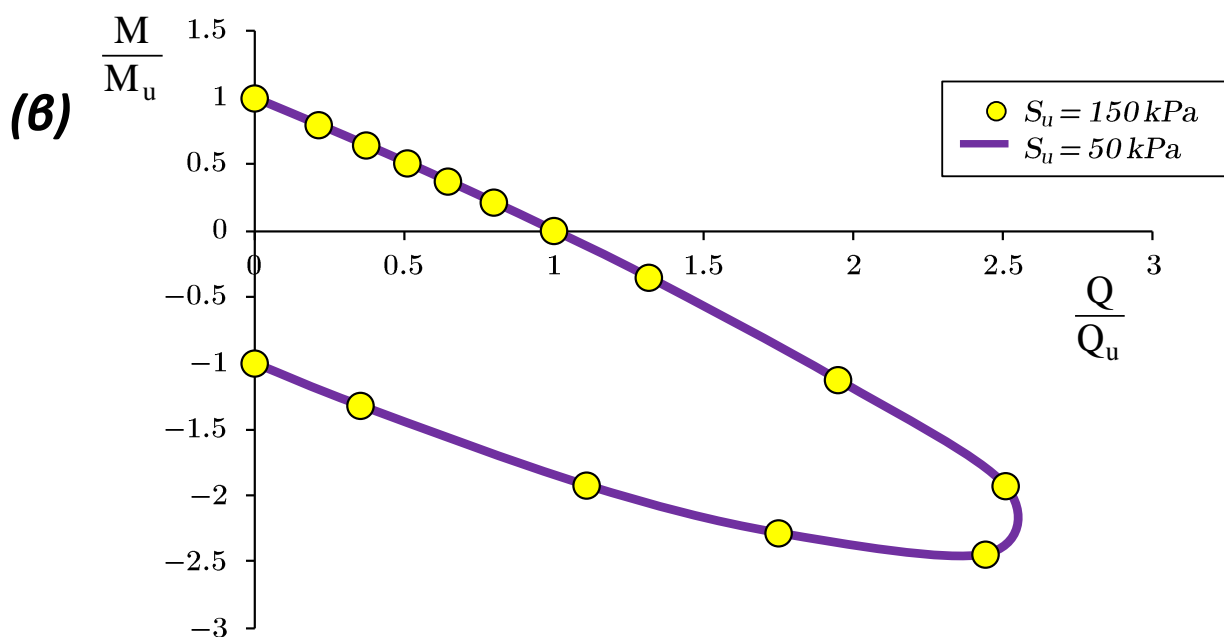
(β)





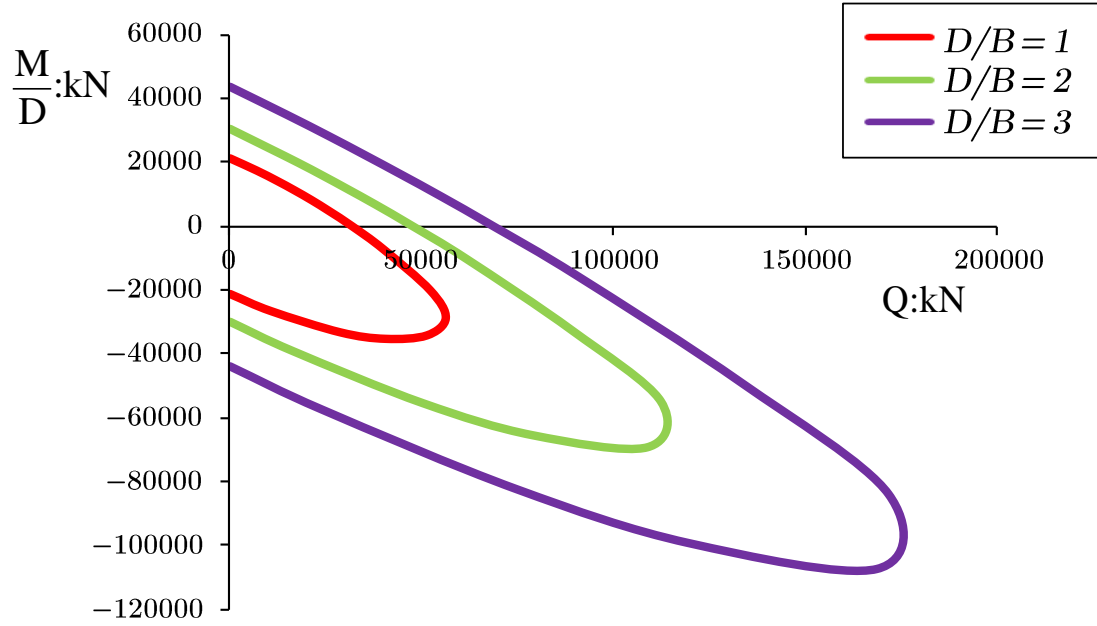
**Σχήμα 5.6.** Σύγκριση των κανονικοποιημένων καμπυλών αλληλεπίδρασης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής, για δύο διαφορετικές περιπτώσεις αστράγγιστης εδαφικής διατμητικής αντοχής:  $S_u = 50 \text{ kPa}$  (συνεχής γραμμή) και  $S_u = 150 \text{ kPa}$  (δείκτες). Οι καμπύλες αναφέρονται σε φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , και σε συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση: (α)  $FS_v = 1.25$  (β)  $FS_v = 2.5$  και (γ)  $FS_v = 10$ . Σημειώνεται θαυμαστή ταύτιση των δύο διαφορετικών κανονικοποιημένων καμπυλών.



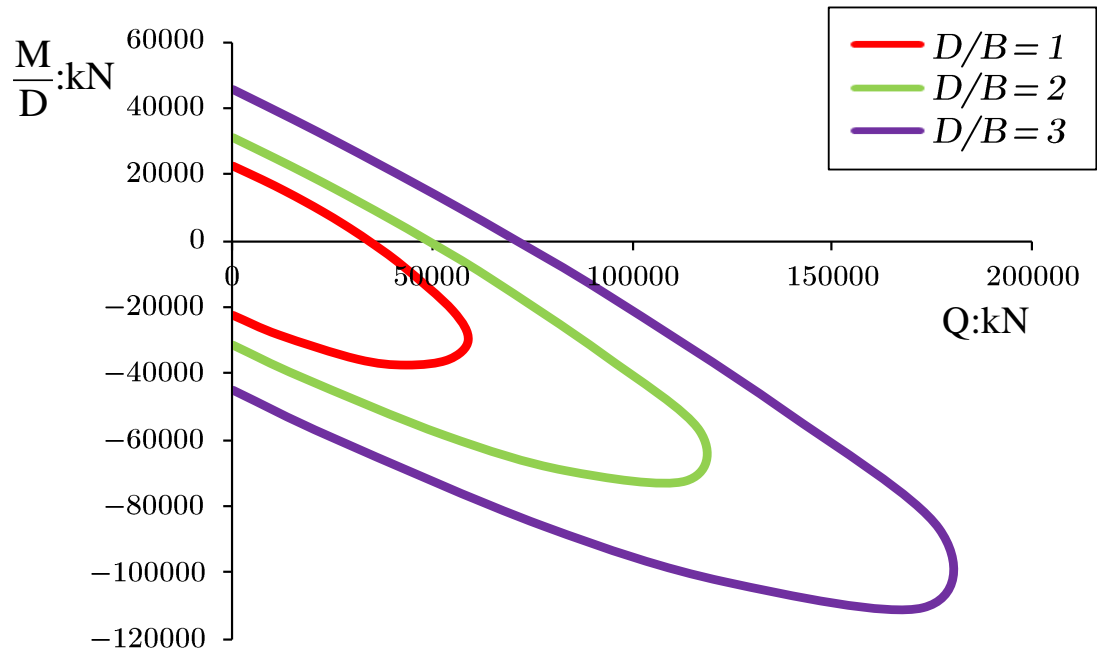


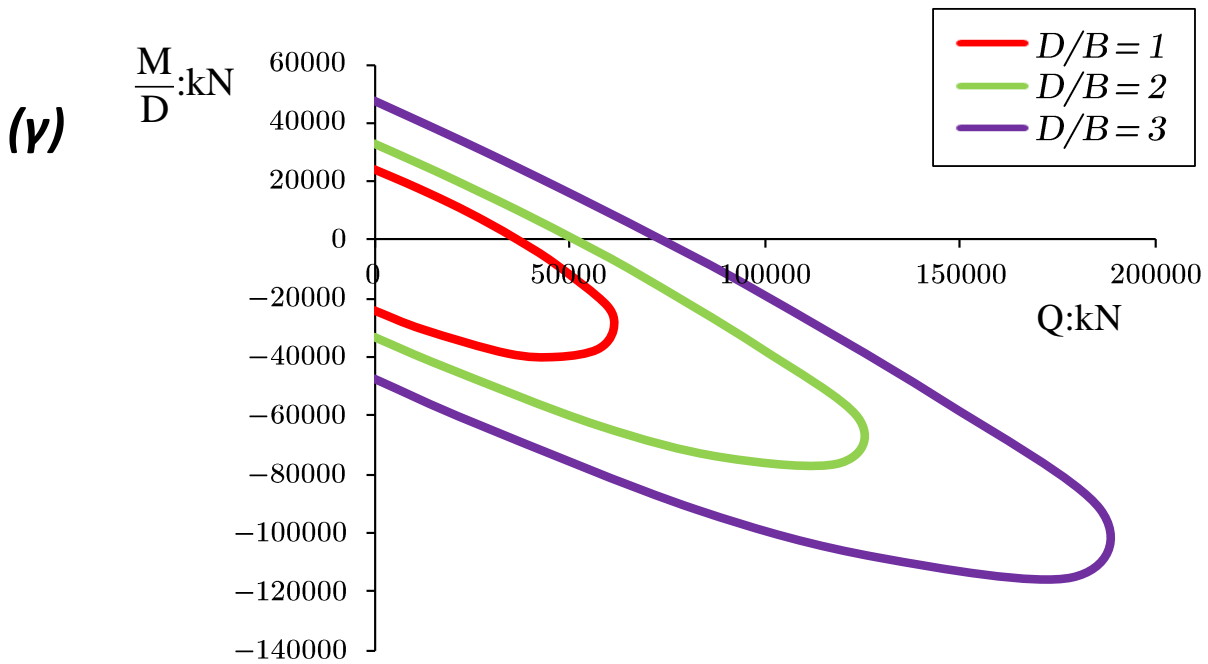
**Σχήμα 5.7.** Σύγκριση των κανονικοποιημένων καμπυλών αλληλεπίδρασης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης- ροπής, για δύο διαφορετικές περιπτώσεις αστράγγιστης εδαφικής διατμητικής αντοχής:  $S_u = 50 \text{ kPa}$  (συνεχής γραμμή) και  $S_u = 150 \text{ kPa}$  (δείκτες). Οι καμπύλες αναφέρονται σε φρέαρ με λόγο εγκλιωτισμού  $D/B = 3$ , και σε συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση: (α)  $FS_v = 1.25$  (β)  $FS_v = 2.5$  και (γ)  $FS_v = 10$ . Σημειώνεται θαυμαστή ταύτιση των δύο διαφορετικών κανονικοποιημένων καμπυλών.

(α)



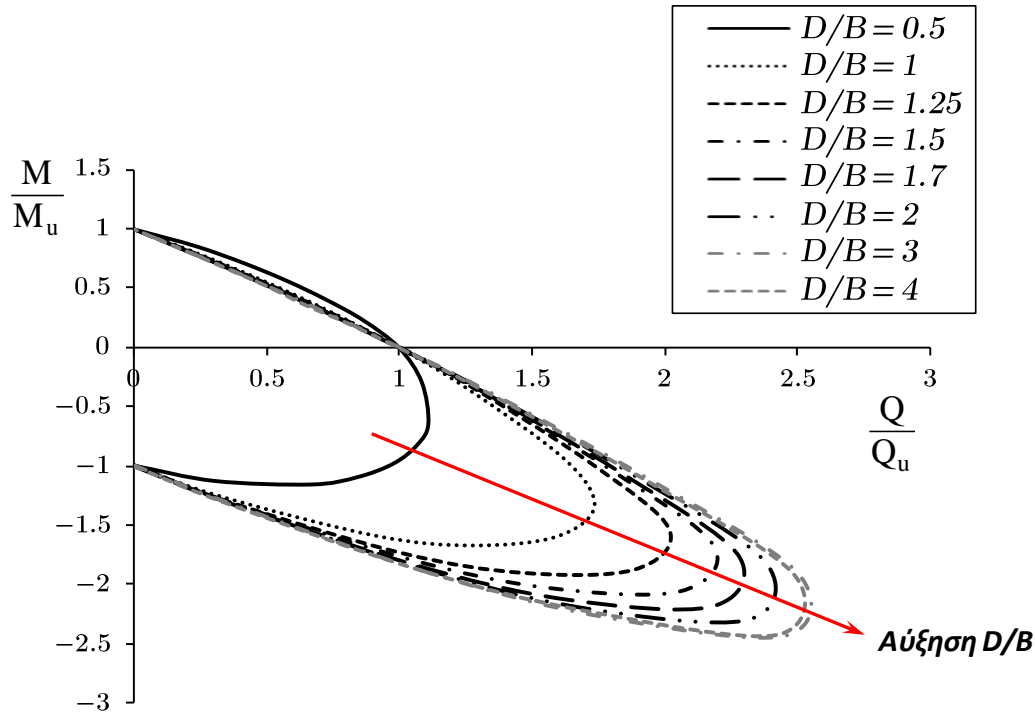
(β)



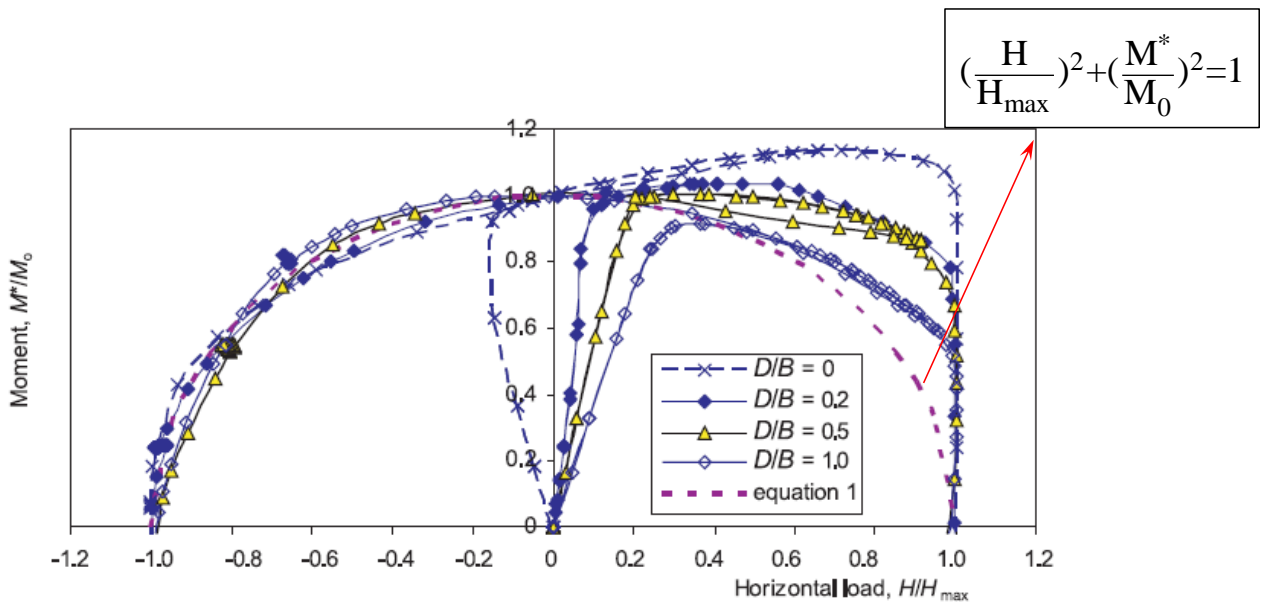


**Σχήμα 5.8.** Διαστατοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης, για τους τρεις εξεταζόμενους λόγους εγκιβωτισμού  $D/B$ , και για συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση: (α)  $FS_v = 1.66$ , (β)  $FS_v = 2$  και (γ)  $FS_v = 5$ . Φαίνεται με άμεσο τρόπο η (ευνοϊκή) επιρροή του λόγου εγκιβωτισμού στις αντοχές του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης, μέσω της “διόγκωσης” των καμπυλών με την αύξηση του λόγου εγκιβωτισμού.



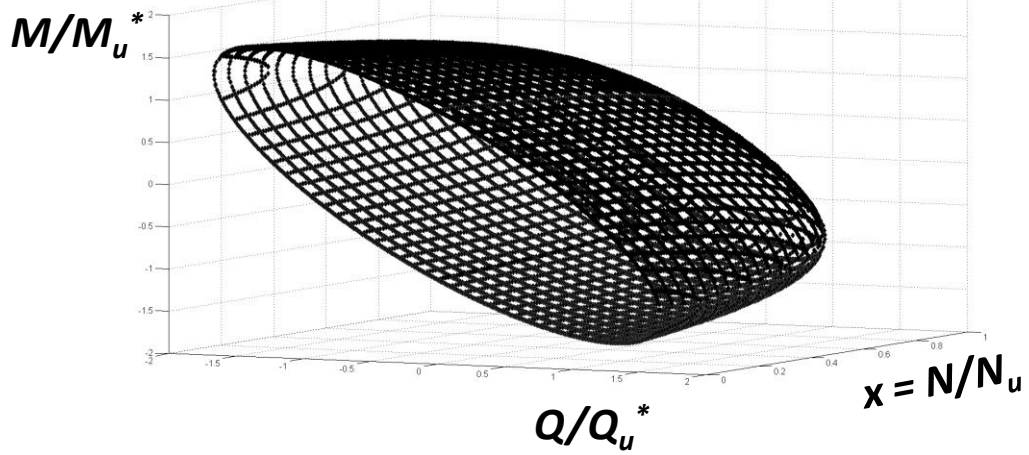


**Σχήμα 5.9.** Η παρατηρούμενη διεύρυνση του κλάδου της υπεραντοχής των καμπυλών αλληλεπίδρασης (για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2$ ) εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ . Η διεύρυνση αυτή εκφράζει ένα “δεύτερο επίπεδο υπεραντοχής” του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης.

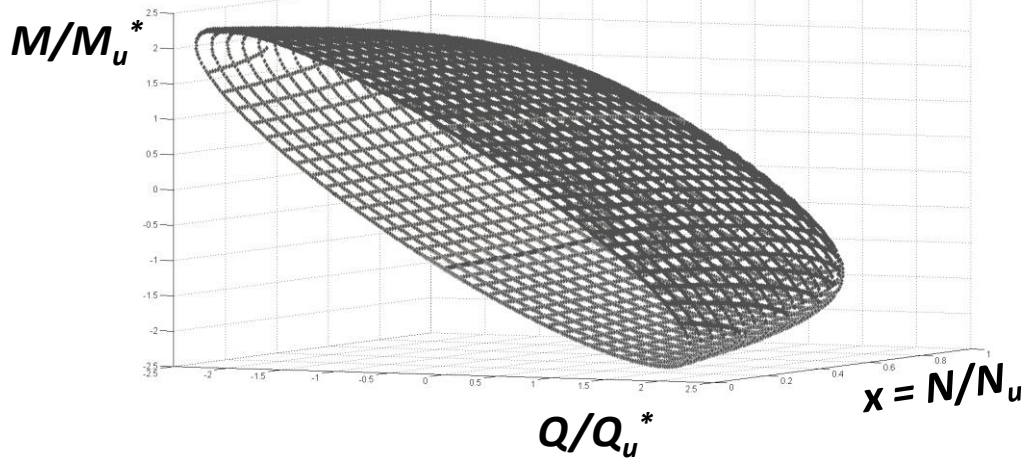


**Σχήμα 5.10.** Γραφική αναπαράσταση της (συντηρητικής) εξίσωσης διαρροής των Yun και Bransby [2007], για ελαφρώς εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις, με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B \leq 1$  (σύσταση στα πλαίσια σχεδιασμού έργων ανοικτής θαλάσσης).

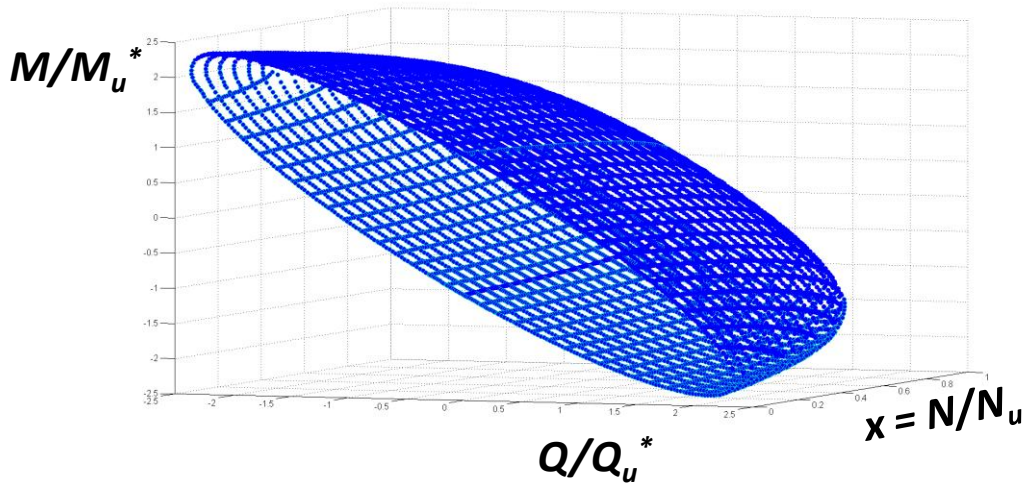
(α)



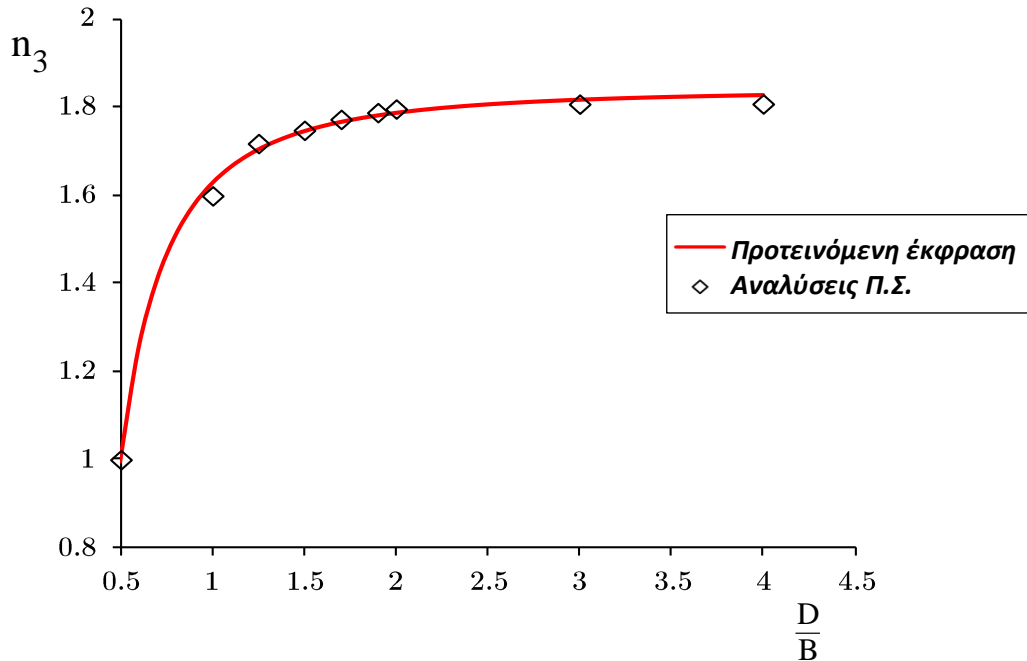
(β)



(γ)



**Σχήμα 5.11.** Επιφάνειες αλληλεπίδρασης ( στον τριδιάστατο χώρο φόρτισης  $M - Q - N$ ) βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων με λόγο εγκιβωτισμού: (α)  $D/B = 1$ , (β)  $D/B = 2$  και (γ)  $D/B = 3$ .



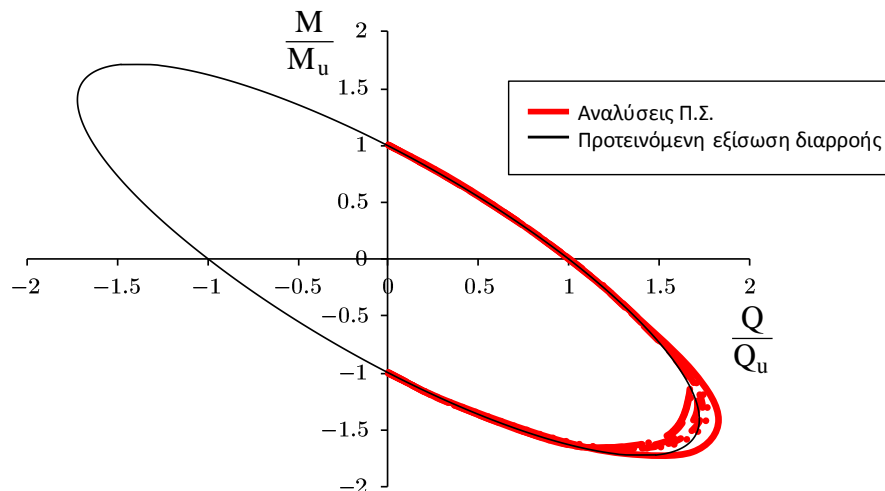
**Σχήμα 5.12.** Η μεταβολή του συντελεστή διεύρυνσης ( $n_3$ ) της εξίσωσης διαρροής των καμπυλών αλληλεπίδρασης βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ . Απεικονίζονται τα αποτελέσματα από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (δείκτες), καθώς και η γραφική παράσταση της προτεινόμενης έκφρασης (συνεχής κόκκινη γραμμή). Ο συντελεστής διεύρυνσης  $n_3$  παρουσιάζει “πλατώ” στην τιμή  $n_3 \approx 1.8$ , για τιμές του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B \geq 1.7$ .

**Εξίσωση διαρροής (στο επίπεδο Q – M)**

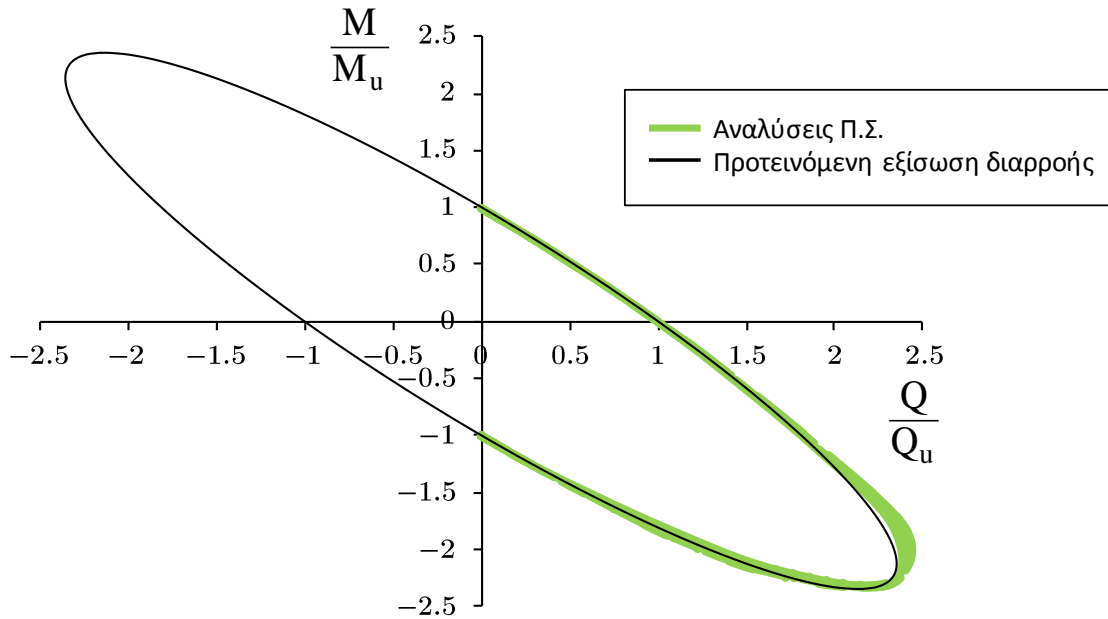
$$f(Q,M) = \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_u}\right)^2 + n_3 \cdot \left(\frac{Q}{Q_u}\right) \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right) - 1 = 0$$

και:  $n_3 = 1.84 - 0.21 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^{-1.98}$

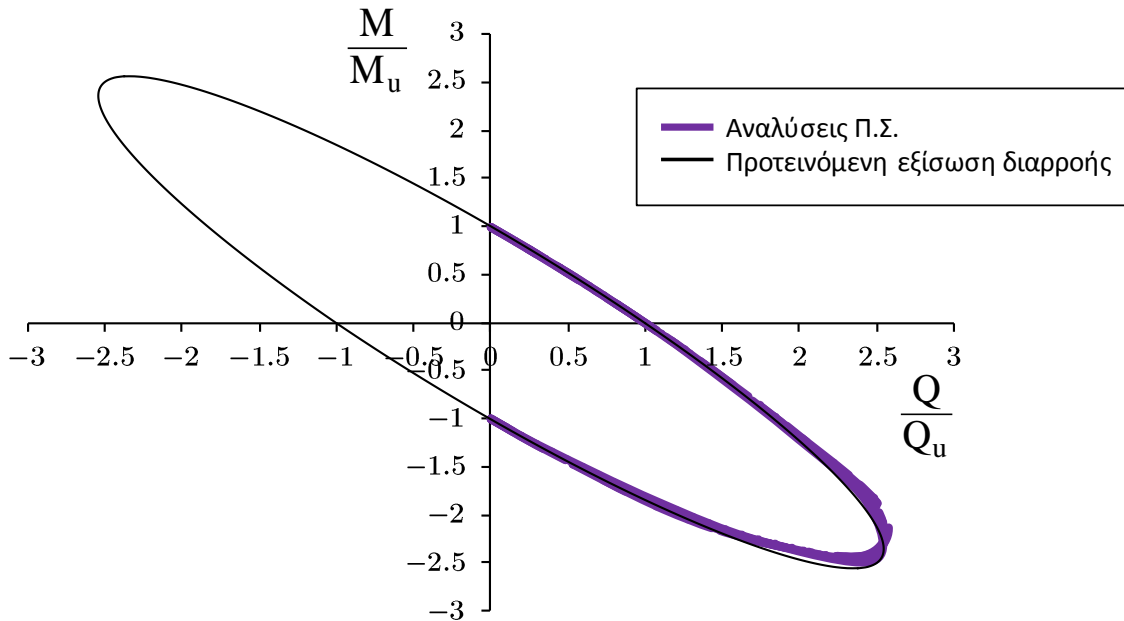
(α)



(β)



(γ)



**Σχήμα 5.13.** Γραφική σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, με την γραφική παράσταση της προτεινόμενης εξίσωσης διαρροής. Παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, για λόγο εγκιβωτισμού: (α)  $D/B = 1$ , (β)  $D/B = 2$  και (γ)  $D/B = 3$ , όπως ακριβώς αυτές σχεδιάστηκαν στα Σχήματα 3.11, 3.13 και 3.15 (κεφάλαιο 3). Τονίζεται η αξιοσημείωτη συμβατότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων και της προτεινόμενης εξίσωσης διαρροής, υποδεικνύοντας την εγκυρότητά της.



---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΝΑΠΤΥΞΗ “ΜΑΚΡΟ- ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ” ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΡΕΑΤΩΝ

---

#### **6.1 Εισαγωγή**

Πολλές από τις εφαρμογές έργων Πολιτικού Μηχανικού περιλαμβάνουν την ενιαία θεώρηση των φαινομένων αλληλεπίδρασης που παρατηρούνται ανάμεσα στις κατασκευές, στις θεμελιώσεις τους και στο περιβάλλον τους έδαφος (στην “άμεση γειτονιά” τους), και τα οποία δύνανται να παράξουν έντονες μη- γραμμικές συμπεριφορές, επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό την ανωδομή και, εν γένει, τον σχεδιασμό της. Ως δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα κατασκευών που εξουσιάζονται από την ύπαρξη σημαντικών φαινομένων αλληλεπίδρασης μπορούν να αναφερθούν: (α) ο σχεδιασμός των κατασκευών έργων ανοικτής θαλάσσης, στις οποίες η θεμελίωση υπόκειται σε ισχυρές ανακυκλικές φορτίσεις οριζόντιων δυνάμεων και ροπών ανατροπής εξαιτίας των θαλάσσιων κυματισμών και (β) ο αντισεισμικός σχεδιασμός υψηλών κτιρίων και γεφυρών, όπου ολόκληρο το σύστημα εδάφους- θεμελίωσης- ανωδομής καταπονείται από την θεωρούμενη σεισμική εξαίτηση (**Σχήμα 6.1**).

Από την στιγμή, όμως, που η ενιαία θεώρηση όλων εκείνων των φαινομένων αλληλεπίδρασης των συστημάτων εδάφους- θεμελίωσης, συμπεριλαμβάνοντας τόσο την μη- γραμμική συμπεριφορά του εδαφικού υλικού (ανελαστική εδαφική συμπεριφορά) όσο και τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια θεμελίου- εδάφους (π.χ. ολίσθηση- sliding και ανασήκωμα- uplift), είναι ιδιαίτερως απαιτητική, πολύπλοκη και υπολογιστικά χρονοβόρα ως διαδικασία, η επιστημονική κοινότητα των γεωτεχνικών μηχανικών έχει προνοήσει (σχετικά με τέτοιου είδους προβλήματα θεμελιώσεων) για την ορθή ανάπτυξη απλοποιημένων μαθηματικών προσομοιωμάτων, ικανά να αντιμετωπίσουν με θαυμαστή προσέγγιση την προαναφερθείσα αλληλεπίδραση των συστημάτων εδάφους- θεμελίωσης. Τα

συγκεκριμένα προσομοιώματα εγκαθίστανται με πολύ εύκολο και άμεσο τρόπο στα επιμέρους λογισμικά ανάλυσης των κατασκευών των δομοστατικών μηχανικών, με σκοπό την σωστή αναπαραγωγή όλων εκείνων των μη- γραμμικών φαινομένων που παρατηρούνται στην “στάθμη θεμελίωσης” της κατασκευής, οδηγώντας σε ακριβέστερη διαστασιολόγηση τόσο των κατασκευών όσο και των θεμελιώσεών τους. Μια μεγάλη κατηγορία τέτοιων μαθηματικών προσομοιωμάτων, αποτελείται από την αντικατάσταση του εδάφους θεμελίωσης με ελατήρια τύπου Winkler, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 6.2**. Κατά την μέθοδο αυτή, ολόκληρο το έδαφος θεμελίωσης αντικαθίσταται από “μη- συζευγμένα” οριζόντια, κατακόρυφα και στροφικά ελατήρια, τα οποία διέπονται από τους κατάλληλους νόμους συμπεριφοράς (π.χ. ελαστο-πλαστική συμπεριφορά των ελατηρίων). Η παραδοχή αυτή των “μη- συζευγμένων” ελατηρίων έχει το πλεονέκτημα της εύκολης μαθηματικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τους, όπως είναι η αριθμητική ολοκλήρωση της τοπικής συμπεριφοράς των ελατηρίων με σκοπό την αναπαραγωγή της γενικευμένης συμπεριφοράς της θεμελίωσης, συνοδεύεται, όμως, και από μία πληθώρα μειονεκτημάτων: υπάρχει σημαντική δυσκολία στην βαθμονόμηση των παραμέτρων των ελατηρίων, ορισμένες φορές σε ανυπέβλητο βαθμό, ενώ συγχρόνως η παραδοχή αυτή καθ’ αυτή είναι (συνήθως) μη ρεαλιστική, εφόσον σχεδόν σε όλα τα γεωτεχνικά προβλήματα θεμελιώσεων απαιτείται η θεώρηση της κατάλληλης σύζευξης ανάμεσα στους διάφορους βαθμούς ελευθερίας της θεμελίωσης. Κατά το παρελθόν, έρευνες σχετικά με την θεώρηση ελατηρίων τύπου Winkler για την αναπαραγωγή της συμπεριφοράς των θεμελιώσεων έχουν διεξαχθεί σε σημαντικό βαθμό, για διάφορες στάθμες αποτελεσματικότητας και πολυπλοκότητας [Housner 1963; Chopra 1984; Chen and Lai 2003; Houlsby, Cassidy, Einav 2005; Einav, Cassidy 2005; Gerolymos and Gazetas 2006; Allotey, El Naggar 2007].

Απ’ την άλλη πλευρά, όμως, μία νέα κατηγορία μαθηματικών προσομοιωμάτων για την ενιαία περιγραφή των φαινομένων αλληλεπίδρασης εδάφους- θεμελίου αναπτύσσεται διαρκώς τα τελευταία χρόνια, τα οποία βασίζονται στην προσομοίωση του γενικότερου συστήματος θεμελίωσης μέσω ενός “μακρο- στοιχείου” (**Σχήμα 6.3**, “macro- element modeling”). Στην περίπτωση αυτή, ολόκληρο το σύστημα εδάφους- θεμελίωσης αντικαθίσταται από ένα και μοναδικό στοιχείο, είτε έξι βαθμών ελευθερίας

(τριδιάστατη θεώρηση της θεμελίωσης) είτε τριών βαθμών ελευθερίας (διδιάσταση θεώρηση της θεμελίωσης), ικανό να περιγράψει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του συστήματος σε όρους “δύναμης- μετακίνησης” γύρω από ένα σημείο αναφοράς δυνάμεων και μετακινήσεων [Chatzigogos, Figini, Pecker and Salençon 2011]. Εκτεταμένη έρευνα πάνω στην συγκεκριμένη κατηγορία προσομοιωμάτων έχει γίνει κατά κόρον στις επιφανειακές θεμελιώσεις, η οποία συμβαδίζει κατά μία έννοια με την εξέλιξη της θεωρίας της πλαστικότητας, με τους Roscoe και Schofield [1956, 1957] να είναι από τους πρώτους που συνέδεσαν την μελέτη των θεμελιώσεων μέσω ενός “μακρο- στοιχείου” με την ίδια την θεωρία της πλαστικότητας. Αρχικά, η έννοια της μοντελοποίησης των επιφανειακών θεμελιώσεων μέσω ενός “μακρο- στοιχείου” αξιοποιήθηκε από τους Nova και Montrasio [1991], οι οποίοι βασιζόμενοι σε έναν αριθμό πειραματικών αποτελεσμάτων κατόρθωσαν να βαθμονομήσουν ένα ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα επιφανειακής θεμελίωσης, με ιστροπικό νόμο κράτυνσης (isotropic hardening) για ολόκληρο το σύστημα εδάφους- θεμελίωσης. Το προσομοίωμα των Nova και Montrasio αργότερα τροποποιήθηκε από τον Paolucci [1997], για την εφαρμογή του σε κατασκευές που υπόκεινται σε πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, καθώς και επεκτάθηκε από τον Pedretti [1998], για μία ορθότερη περιγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος εδάφους- επιφανειακής θεμελίωσης υπό ανακυκλική φόρτιση. Οι Crémer [2001] και Crémer et al. [2001] παρουσίασαν ένα περισσότερο πολύπλοκο προσομοίωμα “μακρο- στοιχείου”, με την εισαγωγή δύο συζευγμένων μηχανισμών απόκρισης: (α) την ανελαστική απόκριση του εδάφους θεμελίωσης και (β) την θεώρηση ανασηκώματος μεταξύ θεμελίου και εδάφους, υπό έντονη φόρτιση, παρέχοντας την δυνατότητα για την ξεχωριστή ενεργοποίηση οποιουδήποτε από τους δύο μηχανισμούς επιθυμείται κάθε φορά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε διαφορετικού εξεταζόμενου προβλήματος. Εν συνεχεία, οι Le Pape και Sieffert [2001] αξιοποίησαν το προσομοίωμα των Nova και Montrasio με σκοπό την μελέτη προβλημάτων θεμελιώσεων που απορρέουν από τον κλάδο της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής, βασίζοντας (θεωρητικά) το προσομοίωμά τους σε θερμοδυναμικές αρχές. Τέλος, σχετικά πρόσφατα, οι Grange, Kotronis και Mazars [2008] αξιοποίησαν τις υπάρχουσες έρευνες και δημιούργησαν ένα κατάλληλο προσομοίωμα για αναπαραγωγή της συμπεριφοράς κυκλικών επιφανειακών θεμελιώσεων, υποβαλλόμενες σε τριδιάστατη φόρτιση.



Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό, όμως, από την παραπάνω (σύντομη) βιβλιογραφική ανασκόπηση, όλες οι έρευνες πάνω στο συγκεκριμένο θέμα έχουν αναπτυχθεί για την περίπτωση των επιφανειακών θεμελιώσεων, και περιορισμένη (έως και “μηδενική”) έρευνα έχει διεξαχθεί για την περίπτωση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ένα από τους βασικούς στόχους που έχουν τεθεί εξαρχής στην εισαγωγή της, είναι η σύνταξη ενός κατάλληλου ενιαίου μαθηματικού εργαλείου, στα πλαίσια της μοντελοποίησης μέσω ενός “μακρο-στοιχείου” (“macro- element modeling”), ικανό να αξιοποιήσει τις μαθηματικές εκφράσεις και τα φυσικά συμπεράσματα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής, με σκοπό την αναπαραγωγή της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων δίχως την ανάγκη διεξαγωγής νέων και χρονοβόρων τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Στις επόμενες ενότητες γίνεται η παρουσίαση του μαθηματικού υπόβαθρου του συγκεκριμένου εργαλείου, με όλες εκείνες τις εξισώσεις και τους νόμους που συνδέουν κατάλληλα μεταξύ τους τις επιμέρους εκφράσεις που έχουν προταθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, συμβαδίζοντας (πάντα) με τις παρατηρήσεις θεωρητικού χαρακτήρα που έχουν διατυπωθεί για την απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό εγκάρσια φόρτιση στην κεφαλή τους. Σε γενικές γραμμές, οι επόμενες ενότητες του συγκεκριμένου κεφαλαίου αποτελούν την “συνδετήρια δύναμη” ανάμεσα στα προηγούμενα κεφάλαια, με απώτερο σκοπό την παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την σύνταξη του ενιαίου αυτού μαθηματικού εργαλείου, και- φυσικά- την σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

## **6.2 Ορισμός του προβλήματος**

Η ανάγκη της δημιουργίας ενός ενιαίου μαθηματικού εργαλείου, με απώτερο στόχο την περιγραφή της απόκρισης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, πηγάζει από διάφορους παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, κάποια από τα πιο ελκυστικά πλεονεκτήματα για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος από την σκοπιά της μοντελοποίησης μέσω ενός “μακρο-στοιχείου” (“macro- element modeling”), είναι τα παρακάτω: (α) αποφεύγονται οι χρονοβόρες (υπολογιστικά) τριδιάστατες αναλύσεις

πεπερασμένων στοιχείων, παρόλο που αυτές λαμβάνουν υπ’ όψιν τους με αξιοσημείωτη ακρίβεια όλα εκείνα τα σχετικά φαινόμενα αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο έδαφος και την εγκιβωτισμένη θεμελίωση και (β) αναπαράγεται πιστά η απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων σε όρους “δύναμης- μετακίνησης”, τόσο στην περιοχή των πολύ μικρών παραμορφώσεων (“οιωνεί” ελαστική συμπεριφορά της θεμελίωσης), όσο και στην κατάσταση αστοχίας, με την χρήση ενός ενιαίου πλαισίου εργασίας. Συν τοις άλλοις, η δυνατότητα αναπαραγωγής της συμπεριφοράς της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης μέσω του “μακρο- στοιχείου” αυτού, αποτελεί έναν νέο δίαυλο επικοινωνίας ανάμεσα στους γεωτεχνικούς και στους δομοστατικούς μηχανικούς. Εφόσον οι γεωτεχνικοί μηχανικοί καταφέρουν να εκφράσουν την απόκριση της θεμελίωσης (σε όρους “δύναμης- μετακίνησης”) στα πλαίσια του ενιαίου αυτού μαθηματικού εργαλείου, τότε οι δομοστατικοί μηχανικοί θα είναι σε θέση να ανακτήσουν πολύ πιο ρεαλιστικές συμπεριφορές των θεμελιώσεων, κατά τις μη- γραμμικές επαυξητικές αναλύσεις που απαιτούνται από την πλευρά τους για την ανάλυση των κατασκευών [Martin and Houlsby 2000], σε άμεση αντίθεση με τις αντίστοιχες συμπεριφορές που συνοδεύουν διάφορα άλλα “εργαλεία”, όπως είναι αυτά που βασίζονται στην αντικατάσταση του εδάφους θεμελίωσης με “μη- συζευγμένα” ελατήρια τύπου Winkler.

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, η λογική του επιδιωκόμενου προς δημιουργία μαθηματικού προσομοιώματος, βασίζεται στην παραδοχή της αντικατάστασης του εδάφους και της ίδιας της θεμελίωσης με ένα και μοναδικό “μακρο- στοιχείο”, όπως απεικονίζεται ενδεικτικά στο **Σχήμα 6.3(γ)**. Ο όρος “μακρο- στοιχείο” προέρχεται από την ίδια την λογική της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, όπου η συνολική απόκριση της θεμελίωσης μιας κατασκευής (εγκιβωτισμένη θεμελίωση + έδαφος θεμελίωσης) παρατηρείται “μακροσκοπικά”, παρέχοντας τις κατάλληλες πληροφορίες σε όρους “δυνάμεων και μετακινήσεων”, και όχι σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου (ούτε ακόμα και σε επίπεδο “εδαφικού όγκου”). Έχοντας προσδιορίσει και αναπτύξει όλες εκείνες τις (θεωρητικές) πτυχές της απόκρισης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων, το επόμενο βήμα ήταν η ποσοτικοποίηση της απόκρισης αυτής μέσω κατάλληλων αναλυτικών εκφράσεων, με σκοπό την ενσωμάτωσή τους στο ενιαίο μαθηματικό εργαλείο που παρουσιάζεται στο

παρόν κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο, λοιπόν, αυτό, επιδιώκεται η κατάλληλη σύνδεση όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων και αναλυτικών εκφράσεων, μέσω των ορθών νόμων και των κατάλληλων εξισώσεων που έχουν διατυπωθεί διαχρονικά στην βιβλιογραφία για την περίπτωση (κυρίως) των επιφανειακών θεμελιώσεων, καθώς και η εξέταση της εφαρμοσιμότητάς τους μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας αυτής με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία που διεξήχθησαν.

Πρόσφατες σχετικές έρευνες έχουν υποδείξει ότι η χρήση των νόμων και των ανάλογων εξισώσεων που παρέχει η θεωρία της πλαστικότητας (work- hardening plasticity theory), μπορούν να έχουν άμεση εφαρμογή στα θεωρούμενα ελαστοπλαστικά προσομοιώματα θεμελιώσεων επί αστράγγιστων αργλικών εδαφών [*Martin and Houlsby 2000*], όταν το σύστημα εδάφους- θεμελίωσης αντικαθίσταται από ένα και μόνον στοιχείο (στα πλαίσια του "macro- element modeling") στην βάση της ανωδομής, προβλέποντας με ορθό τρόπο την απόκριση του συστήματος θεμελίωσης (η οποία καταπονείται από συνδυασμένη φόρτιση κατακόρυφης δύναμης, οριζόντιας δύναμης και ροπής) σε όρους "δύναμης- μετακίνησης". Η προσέγγιση αυτή, μάλιστα, έχει αποδειχθεί ότι παρέχει ορθότερα αποτελέσματα σε σχέση με τις ανάλογες προσεγγίσεις με ελατήρια τύπου Winkler, διότι είναι ικανή να αναπαραστήσει με απολύτως ρεαλιστικό και (σχετικά) εύκολο τρόπο την σύζευξη μεταξύ των διαφορετικών βαθμών ελευθερίας της θεμελίωσης, κάτι που τα ελατήρια τύπου Winkler αδυνατούν να συλλάβουν λεπτομερώς. Επιπλέον, οι γεωτεχνικοί μηχανικοί είναι ήδη εξοικειωμένοι με την φυσική που παρέχει η συγκεκριμένη πτυχή της θεωρίας της πλαστικότητας (work- hardening plasticity theory), μιας και έχει αξιοποιηθεί σε ιδιαίτερο βαθμό κατά την καταγραφή διάφορων καταστατικών νόμων συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών (π.χ. καταστατικό προσομοίωμα Cam- Clay). Θα μπορούσαμε, μάλιστα, να ισχυριστούμε (έστω και με αδρό τρόπο) ότι, στα προβλήματα των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, η εφαρμογή της θεωρίας της πλαστικότητας είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που έχει διατυπωθεί κατά την καταγραφή των παραπάνω καταστατικών νόμων συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών, και γίνεται άμεσα μέσω της απλής αντικατάστασης των αντίστοιχων μεγεθών: οι τάσεις και οι παραμορφώσεις των θεωρούμενων εδαφικών στοιχείων αντικαθίστανται από τις γενικευμένες φορτίσεις

(στον τριδιάστατο χώρο φόρτισης  $M - Q - N$ ) και τις συνεπακόλουθες μετακινήσεις ( $\theta - u - v$ ), αντίστοιχα. Έτσι, στις επόμενες ενότητες αναπτύσσονται λεπτομερέστερα οι παρακάτω τέσσερις βασικές συνιστώσες [Martin and Houlsby 2000] της θεωρητικής διαδικασίας για την σύνταξη του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου που συζητείται στο παρόν κεφάλαιο, οι οποίες είναι οι εξής: (α) ο ορισμός της ελαστικής συμπεριφοράς της θεμελίωσης, μέσω των κατάλληλων ελαστικών μητρών δυσκαμψίας για τους ενεργούς βαθμούς ελευθερίας της, (β) ο ορισμός των “επιφανειών διαρροής” των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (yield surfaces), στον γενικευμένο τριδιάστατο χώρο φόρτισης  $M - Q - N$ , οι οποίες εγκαθιστούν το όριο ανάμεσα στην ελαστική και στην ανελαστική συμπεριφορά του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, (γ) ο ορισμός του καταλληλότερου νόμου πλαστικής ροής (plastic flow rule) των μετακινήσεων της θεμελίωσης, ο οποίος παρέχει την απαιτούμενη πληροφορία για το μέγεθος και την σχέση που έχουν μεταξύ τους οι στοιχειώδεις μετακινήσεις (ή οι μεταβολές αυτών- increments) στο σημείο αναφοράς στην κορυφή της θεμελίωσης, κατά την διαρροή των εξεταζόμενων συστημάτων των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων και, τέλος, (δ) ο ορισμός του κατάλληλου νόμου κράτυνσης (hardening law), ο οποίος ορίζει το κατά πόσο (και εάν) οι πλαστικές μετακινήσεις της θεμελίωσης επηρεάζουν το σχήμα και το μέγεθος των επιφανειών διαρροής της. Κατά την ανάπτυξη των παραπάνω επιμέρους ξεχωριστών συνιστωσών, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην μαθηματική πλευρά της διαδικασίας της δημιουργίας του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου για την περίπτωση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων, με την φυσική σκοπιά του συγκεκριμένου προβλήματος να έχει αναπτυχθεί λεπτομερώς σε όλα τα προηγούμενα κεφάλαια. Τέλος, στο **Σχήμα 6.4** απεικονίζεται σκαριφηματικά ένα σχετικό “διάγραμμα ροής” των παραπάνω συνιστωσών- βημάτων, με απώτερο σκοπό την σύνταξη του “μακρο- στοιχείου” για την προσομοίωση του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης (“macro- element modeling”), παράλληλα με την επιρροή του κάθε βήματος στην συμπεριφορά της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης σε όρους διαγραμμάτων “δύναμης- μετακίνησης”.

### 6.2.1 Ελαστική συμπεριφορά των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων

Η αντιμετώπιση της ελαστικής συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων, γίνεται μέσω της ορθής επιλογής και χρήσης των αντίστοιχων ελαστικών μητρώων δυσκαμψίας. Πιο συγκεκριμένα, για την περιγραφή της απόκρισης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων στην περιοχή των πολύ μικρών παραμορφώσεων (“οιωνεί” ελαστική συμπεριφορά), υιοθετούνται ελαστικά μητρώα δυσκαμψίας της βιβλιογραφίας, κατά τους εγκάρσιους βαθμούς ελευθερίας της θεμελίωσης (δηλαδή κατά την οριζόντια και κατά την στροφική έννοια). Τα μητρώα αυτά συνδέουν κατάλληλα την εγκάρσια φόρτιση και τις συνεπακόλουθες εγκάρσιες μετακινήσεις στην κορυφή της θεμελίωσης, και εξαρτώνται (κατά κύριο λόγο) από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίδιας της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (π.χ. λόγος εγκιβωτισμού  $D/B$ ), καθώς και από τις ελαστικές σταθερές του εδάφους θεμελίωσης (π.χ. λόγος Poisson  $\nu$ ).

Οι Gazetas και Tassoulas [1987], καθώς και οι Fotopoulou et al. [1989], μελέτησαν το πρόβλημα των εγκάρσιως φορτιζομένων βαθιά εγκιβωτισμένων άκαμπτων θεμελιώσεων, τυχαίου σχήματος κάτοψης, επί γραμμικώς ελαστικού ομογενούς ημιχώρου, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 6.5**. Βασιζόμενοι σε απλούς ελαστοδυναμικούς σχηματισμούς πεπερασμένων στοιχείων, σε σχηματισμούς πεπερασμένων διαφορών και σε δημοσιευμένα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [Davidson 1982], ανέπτυξαν αναλυτικές εκφράσεις “κλειστής μορφής” για την περιγραφή των δυναμικών δυσκαμψιών τέτοιων θεμελιώσεων. Για άκαμπτες εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις τυχαίου σχήματος κάτοψης, οι οποίες εγγράφονται από ένα ορθογώνιο πλάτους  $B$  και μήκους  $L$  ( $L > B$ ), οι αναλυτικές εκφράσεις των δυναμικών τους δυσκαμψιών αναφέρονται στο κέντρο της βάσης τους, και αναπτύσσονται στην ακόλουθη μορφή:

$$K_{emb} = K_{emb} \cdot \chi_{emb}(\omega) + i \cdot \omega \cdot C(\omega) \quad (6.1)$$

όπου:

- $K_{emb}$  είναι ο στατικός συντελεστής δυσκαμψίας της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης
- $\chi_{emb}(\omega)$  είναι ο δυναμικός συντελεστής δυσκαμψίας της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, εκφράζοντας το ποσοστό της στατικής δυσκαμψίας που ενεργοποιείται σε σχέση με την συχνότητα της δυναμικής διέγερσης,  $\omega$ , και
- $C(\omega)$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης της θεμελίωσης (συμπεριλαμβάνοντας την απόσβεση λόγω της ανελαστικής συμπεριφοράς του υλικού και την απόσβεση ακτινοβολίας), συναρτήσει επίσης της συχνότητας διέγερσης  $\omega$ .

Στην παρούσα διπλωματική εργασία όπου εξετάζεται η μονοτονική φόρτιση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, ενδιαφέρει πρακτικώς μόνον ο συντελεστής  $K_{emb}$ , ο οποίος, εξάλλου, είναι δυνατόν να εκληφθεί άμεσα και από την παραπάνω γραφή για στατικές συνθήκες διέγερσης ( $\omega = 0$ ), ενώ, επιπλέον, ενδιαφέρει μόνον η περίπτωση φρέατος τετραγωνικής διατομής ( $L = B$ ). Έτσι, προκύπτει το ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας (κατά την εγκάρσια έννοια φόρτισης) που χρησιμοποιείται, το οποίο αναφέρεται στο κέντρο της βάσης της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, και ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{K}_{base} = \begin{bmatrix} K_h & K_{hr} \\ K_{rh} & K_r \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

όπου:

- $K_h$  είναι ο συντελεστής δυσκαμψίας κατά την οριζόντια διεύθυνση φόρτισης της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης
- $K_r$  είναι ο συντελεστής δυσκαμψίας κατά την στροφική έννοια της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης και
- $K_{rh} = K_{hr}$  είναι ο συζευγμένος συντελεστής δυσκαμψίας, ο οποίος ορίζει την αλληλεπίδραση που έχουν μεταξύ τους οι δύο εγκάρσιοι βαθμοί ελευθερίας της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης.

Οι παραπάνω συντελεστές δυσκαμψίας ισούνται με:

$$K_h = \frac{9 \cdot G_s \cdot B}{2 \cdot (2 - \nu)} \cdot \left[ 1 + 0.15 \sqrt{\frac{2 \cdot D}{B}} \right] \cdot \left[ 1 + 0.9 \cdot \left( \frac{2 \cdot D}{B} \right)^{0.8} \right] \quad (6.3)$$

$$K_r = \frac{3.6 \cdot G_s \cdot B^3}{8 \cdot (1 - \nu)} \cdot \left[ 1 + 1.26 \cdot \frac{2 \cdot D}{B} \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot D}{B} \right) \right] \quad (6.4)$$

και

$$K_{hr} = K_{rh} = \frac{1}{3} \cdot D \cdot K_h \quad (6.5)$$

όπου  $G_s$  και  $\nu$  είναι το μέτρο διάτμησης και ο λόγος Poisson του εδαφικού υλικού, αντίστοιχα,  $D$  το βάθος εγκιβωτισμού της θεμελίωσης και  $B$  το πλάτος της τετραγωνικής διατομής της.

Στα παραπάνω κεφάλαια που προηγήθηκαν, όμως, έχει επισημανθεί εντόνως ότι ως σημείο αναφοράς των δυνάμεων και των μετακινήσεων έχει επιλεγεί το κέντρο της κορυφής της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, και όχι το κέντρο της βάσης της, στο οποίο αναφέρονται οι παραπάνω συντελεστές δυσκαμψίας. Πρέπει, λοιπόν, να υπάρξει κατάλληλη μαθηματική μέριμνα για την τροποποίηση των ανωτέρω συντελεστών, με σκοπό την αναφορά τους στο ορθό σημείο αναφοράς της κορυφής. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω του παρακάτω μητρώου μετασχηματισμού  $\mathbf{M}$ , ως εξής:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$\mathbf{K}_{top} = \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{K}_{base} \cdot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} K_H & K_{HR} \\ K_{RH} & K_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_h & K_{hr} - D \cdot K_h \\ K_{rh} - D \cdot K_h & K_r - 2 \cdot D \cdot K_{hr} + D^2 \cdot K_h \end{bmatrix}$$

(6.7)

Η λειτουργία του παραπάνω μητρώου μετασχηματισμού  $\mathbf{M}$  απεικονίζεται σκαριφηματικά στο **Σχήμα 6.6**, όπου με την χρήση του το μητρώο  $\mathbf{K}_{base}$  αντικαθίσταται από το μητρώο  $\mathbf{K}_{top}$ , με αποτέλεσμα να αρκεί η θεώρηση μόνον της κορυφής της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, αγνοώντας το υπόλοιπο τμήμα αυτής και το περιβάλλον έδαφος (“μητρώο δυσκαμψίας συστήματος”). Τέλος, σημειώνεται ότι οι παραπάνω αναλυτικές σχέσεις της βιβλιογραφίας, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναφέρονται σε βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις μη συμπαγούς διατομής, σε αντίθεση με το εξεταζόμενο πρόβλημα των συμπαγών άκαμπτων φρεάτων. Παρόλα αυτά, η χρήση τους θεωρείται αποδεκτή, εφόσον για την παραγωγή των συγκεκριμένων αναλυτικών εκφράσεων έχει γίνει η παραδοχή ότι η μη συμπαγής βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση συμπεριφέρεται ως ένα “απείρως” δύσκαμπτο στερεό σώμα, κάτι που συμβαδίζει απόλυτα με την αντίστοιχη παραδοχή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

### 6.2.2 Επιφάνειες διαρροής των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων

Οι επιφάνειες διαρροής των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων που εισάγονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ορίζουν το όριο ανάμεσα στην ελαστική και στην ανελαστική συμπεριφορά του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης. Τονίζεται, για ακόμα μία φορά, ότι δεν έχουν ληφθεί υπ’ όψιν (κατά τις τριδιάστατες αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία) ενδεχόμενα φαινόμενα γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια των φρεάτων με το περιβάλλον τους έδαφος (π.χ. αποκόλληση- gapping), με αποτέλεσμα η μοναδική πηγή μη- γραμμικής ανελαστικής συμπεριφοράς του συστήματος της θεμελίωσης να πηγάζει από την ίδια την ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους θεμελίωσης, η οποία (εν τέλει) είναι



αποκλειστικά υπεύθυνη για τον ορισμό των συγκεκριμένων επιφανειών διαρροής. Με άλλα λόγια, οι επιμέρους επιφάνειες διαρροής (και οι συνεπακόλουθες εξισώσεις που τις εκφράζουν) που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής, θεωρούνται ως οι επιφάνειες που απαιτούνται για την σύνταξη του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου με σκοπό την προσομοίωση του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης μέσω ενός “μακρο- στοιχείου” (“macro- element modeling”), και μόνον εφόσον ληφθούν σε επόμενη εργασία και άλλες φυσικές παράμετροι του προβλήματος (όπως είναι τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων) απαιτείται ο κατάλληλος περιορισμός τους. Συνεπώς, με βάση τα όσα έχουν αναπτυχθεί σχετικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι επιφάνειες διαρροής των μελετώμενων βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων χαρακτηρίζονται γραφικά από ένα κατάλληλα περιστραμμένο ελλειψοειδές, και μαθηματικά μπορούν να περιγραφούν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$f(M, Q, N) = \left(1 - \frac{N}{N_u}\right)^{-0.34} \cdot \left[ \left(\frac{Q}{Q_u^*}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_u^*}\right)^2 + n_3 \cdot \left(\frac{Q}{Q_u^*}\right) \cdot \left(\frac{M}{M_u^*}\right) \right] - 1 = 0$$

**(6.8)**

όπου:

- $N/N_u$  είναι ο αντίστροφος του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, δηλαδή:  $x = 1/FS_v = N/N_u$
- $Q_u^*$  είναι η “καθαρή” αντοχή σε οριζόντια δύναμη της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης υπό την απουσία κατακόρυφης φόρτισης, δηλαδή:  $Q_u^* = Q_u|_{x=0}$
- $M_u^*$  είναι η “καθαρή” αντοχή σε ροπή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης υπό την απουσία κατακόρυφης φόρτισης, δηλαδή:  $M_u^* = M_u|_{x=0}$ , και
- $n_3$  είναι ο συντελεστής διεύρυνσης των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο  $Q - M$ ) των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , με προτεινόμενη έκφραση την ακόλουθη:

$$n_3 = 1.84 - 0.21 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^{-1.98}$$

**(6.9)**

Στο **Σχήμα 5.11** (Κεφάλαιο 5) απεικονίζονται οι (τριδιάστατες) γραφικές παραστάσεις των παραπάνω εκφράσεων διαρροής του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης

θεμελίωσης, για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις λόγων εγκιβωτισμού  $D/B = 1, 2$  και 3. Επιπλέον, οι “καθαρές” αντοχές των εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό την απουσία κατακόρυφης φόρτισης μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από τις προτεινόμενες εκφράσεις των “καθαρών” αντοχών του προηγούμενου κεφαλαίου, θέτοντας σε αυτές τον συντελεστή  $\chi$  ίσο με το μηδέν. Έχουμε, λοιπόν, διαδοχικά:

(α) “Καθαρή” αντοχή σε οριζόντια δύναμη της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης υπό την απουσία κατακόρυφης φόρτισης:

$$Q_u^* = Q_u|_{x=0} = B \cdot D \cdot S_u \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^{-2.15} \cdot \left(1 + \frac{D}{B}\right)^{2.89} \quad (6.10)$$

(β) “Καθαρή” αντοχή σε ροπή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης υπό την απουσία κατακόρυφης φόρτισης:

$$M_u^* = M_u|_{x=0} = 0.46 \cdot B^2 \cdot D \cdot S_u \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^{-1.49} \cdot \left(1 + \frac{D}{B}\right)^{3.39} \quad (6.11)$$

Τέλος, για την φέρουσα ικανότητα των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων σε κατακόρυφη φόρτιση, έχει ήδη προταθεί η ακόλουθη έκφραση:

$$N_u = 9.64 \cdot B^2 \cdot S_u \cdot \left(1 + \frac{D}{B}\right)^{0.67} \quad (6.12)$$

Σύμφωνα, λοιπόν, με τις παραπάνω εκφράσεις, καθίσταται εύκολος ο προσδιορισμός της κατάστασης (από την σκοπιά της φόρτισης) που βρίσκονται κάθε φορά οι βαθιά εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις. Έχοντας ως δεδομένη την γεωμετρία της θεμελίωσης (π.χ. λόγος εγκιβωτισμού  $D/B$ ), τις εδαφικές παραμέτρους αντοχής (π.χ. αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$ ) και την στάθμη της κατακόρυφης φόρτισης εκ της ανωδομής (εκφρασμένη μέσω του αντίστροφου του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση,  $\chi$ ), σε πρώτη φάση προσδιορίζονται οι αντοχές του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης μέσω των ανωτέρω αναλυτικών εκφράσεων. Στην συνέχεια, οι αντοχές που προσδιορίστηκαν συγκρίνονται με τον εκάστοτε θεωρούμενο συνδυασμό εγκάρσιων δράσεων (οριζόντια δύναμη  $Q$  και ροπή

M), και προσδιορίζεται πολύ απλά αν το εξεταζόμενο σύστημα θεμελίωσης συμπεριφέρεται “ελαστικά” (π.χ. αν ο συνδυασμός των εγκάρσιων δράσεων βρίσκεται εντός της δεδομένης επιφάνειας διαρροής), ή αν έχει επέλθει υπέρβαση των αντοχών του συστήματος. Εξάλλου, η λογική αυτή της χρήσης των επιφανειών διαρροής αποτέλεσε κατά το παρελθόν έναν συνηθισμένο τρόπο διαστασιολόγησης των θεμελιώσεων, ιδιαίτερα στην περίπτωση των επιφανειακών θεμελιώσεων όπου η έρευνα ήταν εκτενέστερη [Georgiadis 1985; Nova and Montrasio 1988; Ricceri and Simonini 1989; Tan 1990; Martin 1994].

Τέλος, έχοντας ορίσει την ανώτατη στάθμη φόρτισης που δύναται να παραλάβει μια εξεταζόμενη βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση, μέσω των παραπάνω εξισώσεων διαρροής του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης, το επόμενο βήμα για την διατύπωση του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου είναι να καθοριστούν μαθηματικά οι στοιχειώδεις μεταβολές (increments) των πλαστικών μετακινήσεων κατά την αστοχία του συστήματος. Με άλλα λόγια, επιχειρείται η πλήρης περιγραφή της μετελαστικής συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, όπου- απ’ την μια πλευρά- έχει προσδιοριστεί η στάθμη της φόρτισης που χαρακτηρίζει την “περιοχή” αυτή (και με βάση τις παραδοχές της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας διατηρείται σταθερή), και- απ’ την άλλη πλευρά- απομένει μόνον η κατάλληλη πρόβλεψη των αναπτυσσόμενων πλαστικών μετακινήσεων αστοχίας, ανάλογα με τον λόγο (M/Q) που έχουν τα εγκάρσια εντατικά μεγέθη κατά την στιγμή της αστοχίας (δηλαδή συναρτήσει της θέσης κάθε συνδυασμού φόρτισης πάνω σε μια καμπύλη αλληλεπίδρασης, στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης Q- ροπής M). Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω της υιοθέτησης του καταλληλότερου νόμου πλαστικής ροής των μετακινήσεων (plastic flow rule), όπως διατυπώνεται στην ενότητα που ακολουθεί.

### **6.2.3 Νόμος πλαστικής ροής (plastic flow rule)**

Στο Κεφάλαιο 3 διατυπώθηκε το συμπέρασμα ότι ο νόμος της πλαστικής ροής που δείχνει να αναπαριστά στον βέλτιστο βαθμό την αστράγγιστη συμπεριφορά των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό συνδυασμένη εγκάρσια φόρτιση στην

κεφαλή τους, είναι ο αντίστοιχος συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων (associated plastic flow rule), με την άμεση γραφική συνέπεια αυτού την παρατήρηση της ισχύος της συνθήκης της καθετότητας (normality) στις καμπύλες αλληλεπίδρασης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ . Μαθηματικά, ο συγκεκριμένος συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων είναι πέραν του δέοντος “εύχρηστος”, εφόσον- πλέον- δεν απαιτείται η εύρεση μιας νέας εξίσωσης που να περιγράφει το δυναμικό πλαστικοποίησης (plastic potential) κατά την αστοχία των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, αλλά αρκεί η χρήση των ίδιων των εξισώσεων που περιγράφουν τις επιφάνειες διαρροής τους. Έτσι, ο συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων εκφράζεται στην παρακάτω μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \partial u^{pl} \\ \partial \theta^{pl} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_{pl} \\ \dot{\theta}_{pl} \end{Bmatrix} = \lambda \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial Q} \\ \frac{\partial f}{\partial M} \end{Bmatrix} \quad (6.13)$$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις συνδέουν τις μεταβολές της εξίσωσης διαρροής  $f$ , σε σχέση με τα εγκάρσια εντατικά μεγέθη  $Q$  και  $M$ , με τις στοιχειώδεις μεταβολές των αντίστοιχων εγκάρσιων πλαστικών μετακινήσεων αστοχίας (μεταβολή της πλαστικής οριζόντιας μετατόπισης  $\delta u^{pl}$  και μεταβολή της πλαστικής στροφής  $\delta \theta^{pl}$ ). Με  $\lambda$  συμβολίζεται ένας μη αρνητικός πολλαπλασιαστικός συντελεστής, ο οποίος δηλώνει το μέγεθος που έχουν οι πλαστικές μετακινήσεις κατά την αστοχία της θεμελίωσης, ανάλογα με τον λόγο των εντατικών μεγεθών  $M/Q$ , με την βασική προϋπόθεση- συνθήκη ότι ένα ελαστο- πλαστικό βήμα φόρτισης οφείλει να παραμένει επί της επιφάνειας διαρροής της θεμελίωσης [Cassidy, Martin, Houlsby 2004]. Ουσιαστικώς, για την πρόβλεψη της εξέλιξης των πλαστικών μετακινήσεων απαιτείται (κάθε φορά) μόνο ο υπολογισμός των μερικών παραγώγων της εξίσωσης διαρροής,  $f$ , της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης.

#### 6.2.4 Νόμος κράτωσης (hardening law)

Σε ένα μαθηματικό μοντέλο (όπως είναι το “μακρο- στοιχείο” του εδάφους και της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης) που βασίζεται στην θεωρία της πλαστικότητας,

η “μακροσκοπική” συμπεριφορά της θεμελίωσης σε όρους δύναμης- μετακίνησης προσδιορίζεται με τον (ακριβώς) ίδιο τρόπο με εκείνον που χρησιμοποιείται στα καταστατικά προσομοιώματα εδαφικών υλικών, συνδέοντας τις τάσεις με τις παραμορφώσεις: η φόρτιση επιβάλλεται επαυξητικά, και το μαθηματικό μοντέλο υπολογίζει αριθμητικά τα “επικαιροποιημένα” εφαπτομενικά μητρώα δυσκαμψίας του συστήματος σε κάθε βήμα, παράγοντας τις αντίστοιχες μετακινήσεις. Όπως και στην κλασική θεωρία της πλαστικότητας, τυχόν αλλαγή στο διάνυσμα της συνδυασμένης φόρτισης του συστήματος της θεμελίωσης εντός της επιφάνειας διαρροής του, οδηγεί στην ανάπτυξη μόνον ελαστικών μετακινήσεων στην κορυφή της θεμελίωσης. Μία διαδρομή φόρτισης που τέμνει την παραπάνω επιφάνεια διαρροής (και παραμένει επί αυτής) προκαλεί την ανάπτυξη πλαστικών μετακινήσεων, οι επαυξητικές συνιστώσες των οποίων καθορίζονται επακριβώς από τον νόμο πλαστικής ροής που έχει υιοθετηθεί (στην περίπτωση μας αυτός είναι ο συσχετισμένος), καθώς και από τον κατάλληλο νόμο κράτυνσης (hardening law). Για παράδειγμα, οι Cassidy et al. [2004] ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο στην θεωρία της πλαστικότητας, για την μελέτη της απόκρισης των ειδικών θεμελιώσεων κωνικού σχήματος (sprudcan foundations) που έχουν καθιερωθεί στην βιομηχανία των έργων ανοικτής θαλάσσης (offshore engineering). Όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο **Σχήμα 6.7**, η εργασία τους βασίστηκε στον νόμο κράτυνσης που εξαρτάται αποκλειστικά από την κατακόρυφη μετακίνηση του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης (single- surface strain- hardening plasticity model), επηρεάζοντας την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής ανάλογα με το μέγεθος της κατακόρυφης φόρτισης, διότι, λόγω της ειδικής γεωμετρίας του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης, ο βαθμός εγκιβωτισμού της εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την επιβαλλόμενη σε αυτή κατακόρυφη φόρτιση και την στάθμη της πλαστικής κατακόρυφης βύθισης που αυτή συνεπάγεται. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο περισσότερο θεωρείται ότι το σύστημα της συγκεκριμένης θεμελίωσης εγκιβωτίζεται, απ’ την άλλη, όμως, τόσο μειώνονται τα περιθώρια για την περαιτέρω παραλαβή της επιβαλλόμενης εγκάρσια φόρτισης, όπως αυτά περιορίζονται από την ίδια την επιφάνεια διαρροής της θεμελίωσης στην περιοχή της φέρουσας ικανότητας σε κατακόρυφη φόρτιση (στον τριδιάστατο γενικευμένο χώρο φόρτισης κατακόρυφης δύναμης  $V$ , οριζόντιας δύναμης  $H$  και ροπής  $M$ ).

Στο “μακρο- στοιχείο” που αναπτύσσεται στο παρόν κεφάλαιο, υιοθετείται ο νόμος κράτυνσης της θεωρίας της πλαστικότητας που εξαρτάται από το παραγόμενο έργο του συστήματος θεμελίωσης (work- hardening plasticity theory). Συμβολίζοντας με  $F$  το διάνυσμα της εγκάρσιας φόρτισης της θεμελίωσης, και με  $\delta$  το διάνυσμα των αναπτυσσόμενων εγκάρσιων μετακινήσεων, το παραγόμενο έργο  $W$  (μακροσκοπική παρατήρηση του συστήματος) ισούται με:

$$W = F \cdot \delta \quad (6.14)$$

όπου:

$$F = \begin{Bmatrix} Q \\ M \end{Bmatrix} \quad \text{και} \quad \delta = \begin{Bmatrix} u \\ \theta \end{Bmatrix}$$

Όπως απεικονίζεται σκαριφηματικά στο **Σχήμα 6.8**, η απόκριση της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης μελετάται ανά βήματα φόρτισης  $\Delta F$ , υπολογίζεται το επικαιροποιημένο εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος  $K_t$ , και με την αντιστροφή αυτού υπολογίζονται τα επαυξητικά στοιχεία του διανύσματος των εγκάρσιων μετακινήσεων  $\Delta \delta$ , χρησιμοποιώντας το ανεπτυγμένο μαθηματικό υπόβαθρο που αποκτήθηκε από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με τον τρόπο που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Επιπροσθέτως, εισάγονται τρεις επιπλέον παράμετροι κράτυνσης (hardening parameters), ικανοί να περιγράψουν κάθε πτυχή της απόκρισης του εξεταζόμενου συστήματος θεμελίωσης: (α) η παράμετρος  $a$ , (β) η παράμετρος  $n$  και (γ) το ζεύγος παραμέτρων  $b$  και  $g$ .

### **Παράμετροι κράτυνσης (hardening parameters)**

#### **(α) Παράμετροι μονοτονικής φόρτισης**

Η παράμετρος κράτυνσης  $n$  ελέγχει τον βαθμό μετάβασης από το ελαστικό τμήμα της απόκρισης έως την κατάσταση διαρροής. Μία μεγάλη τιμή της παραμέτρου

$n$  (π.χ. μεγαλύτερη του 10) αποτυπώνει προσεγγιστικά ένα διγραμμικό διάγραμμα “δύναμης- μετακίνησης”, ενώ οι μικρές τιμές αυτής εγγυώνται την ομαλότερη μετάβαση ανάμεσα στις δύο περιοχές, όπου λαμβάνουν χώρα πλαστικές μετακινήσεις ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης. Το **Σχήμα 6.9** απεικονίζει τον ρόλο της παραμέτρου κράτυνσης  $n$ , όπως διατυπώθηκε στην εργασία των Gerolymos και Gazetas [2006].

Επιπλέον, η παράμετρος κράτυνσης  $a$  ορίζει το μέγεθος της παρατηρούμενης κράτυνσης (σε όρους διαγραμμάτων “δύναμης- μετακίνησης”), και ισούται με τον λόγο της δυσκαμψίας του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης μετά την διαρροή προς την αντίστοιχη αρχική ελαστική δυσκαμψία. Στο **Σχήμα 6.10** υποδεικνύεται η επιρροή της παραμέτρου  $a$  στις παραγόμενες μονοτονικές καμπύλες “δύναμης- μετακίνησης” εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (υπό σταθερή παράμετρο  $n$ ), στα πλαίσια, επίσης, της προαναφερθείσας εργασίας. Στο μαθηματικό εργαλείο που αναπτύσσεται σε αυτό το κεφάλαιο, τον πιο ουσιαστικό ρόλο παίζει η παράμετρος κράτυνσης  $n$  (όπως θα συζητηθεί παρακάτω), με την τιμή της παραμέτρου  $a$  να μην έχει έντονη επιρροή στα παραγόμενα αποτελέσματα (ενδεικτικά αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $a \approx 1 \%$ ).

### (β) Παράμετροι φόρτισης- επαναφόρτισης

Το ζεύγος παραμέτρων  $b$  και  $g$  ελέγχει το σχήμα των καμπυλών φόρτισης- επαναφόρτισης (γενικό σχήμα των αναπτυσσόμενων βρόχων υπό ανακυκλική φόρτιση). Οι Gerolymos και Gazetas [2006] διακρίνουν τέσσερα βασικά σχήματα βρόχων, ανάλογα με την σχέση μεταξύ των παραμέτρων  $b$  και  $g$  (**Σχήμα 6.11**): (i) όταν  $b = g = 0.5$ , η δυσκαμψία κατά την αναστροφή της φόρτισης ισούται με την δυσκαμψία του αρχικού κλάδου φόρτισης, ικανοποιώντας το κριτήριο του Masing, (ii) όταν  $b = 1$  και  $g = 0$ , ο υστερητικός βρόχος εκφυλλίζεται στην μονοτονική καμπύλη φόρτισης του συστήματος θεμελίωσης (μη- γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά, κατάλληλη για την περιγραφή φαινομένων γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων, αλλά ακατάλληλη για την περιγραφή της ανελαστικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού), (iii) όταν  $b = 0$  και  $g = 1$ , ο σχηματιζόμενος βρόχος εμφανίζεται περισσότερο πεπλατυσμένος, με την

δυσκαμψία που αντιστοιχεί στους κλάδους αποφόρτισης και επαναφόρτισης να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη του κλάδου της “παρθένας” φόρτισης και (iv) όταν  $b = 0.9$  και  $g = 0.1$ , η απόκριση του συστήματος που ανακτάται πλησιάζει περισσότερο την απόκριση που αντιστοιχεί στην ταυτόχρονη θεώρηση τόσο των φαινομένων των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων όσο και της ανελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους θεμελίωσης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκε ότι  $b = g = 0.5$  (κριτήριο του Masing), διότι οι τιμές αυτές δείχνει να έχουν την βέλτιστη εφαρμογή στα παραγόμενα αποτελέσματα.

### 6.2.5 Σύνταξη του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου

Οι εξισώσεις που ακολουθούν προγραμματίζονται ανά βήματα αριθμητικών αναλύσεων, με στόχο την παραγωγή των επικαιροποιημένων εφαπτομενικών μητρώων δυσκαμψίας ( $K_t$ ) του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης σε κάθε βήμα. Συνεπώς, το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του κάθε βήματος συνδέει τις μεταβολές των εγκάρσιων φορτίσεων με τις μεταβολές των εγκάρσιων μετακινήσεων, ως εξής:

$$\Delta F = K_t \cdot \Delta \delta \quad (6.15)$$

Επιπλέον, η μεταβολή του παραγόμενου (μακροσκοπικά) έργου κάθε βήματος ισούται με:

$$\Delta W = \Delta F \cdot \Delta \delta \quad (6.16)$$

Τελικώς, το ζητούμενο (“στιγμιαίο”) εφαπτομενικό μητρώο του συστήματος προκύπτει από την ακόλουθη έκφραση:

$$K_t = \begin{bmatrix} 1-a & 0 \\ 0 & 1-a \end{bmatrix} \cdot K_{top} \cdot 2 \cdot (I - B \cdot H_1 \cdot H_2) + \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix} \cdot K_{top} \quad (6.17)$$



όπου:

- $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , ο μοναδιαίος πίνακας

- $B = \Phi \cdot E \cdot \Phi^T \cdot K_{top}$

- $E = (\Phi^T \cdot K_{top} \cdot \Phi)^{-1}$

- $\Phi = \begin{Bmatrix} \partial f / \partial Q \\ \partial f / \partial M \end{Bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \cdot \begin{Bmatrix} \partial u \\ \partial \theta \end{Bmatrix}$ ,

το διάνυσμα που περιγράφει τον υιοθετούμενο συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής (associated plastic flow rule)

- $H_1 = \begin{bmatrix} f(M, Q, N) + 1^n & 0 \\ 0 & f(M, Q, N) + 1^n \end{bmatrix}$ ,

όπου στην κατάσταση διαρροής ισχύει ότι  $f(M, Q, N) = 0$ , και ο πίνακας  $H_1$  υποβαθμίζεται στον μοναδιαίο πίνακα  $I$ , και

- $H_2 = \begin{bmatrix} b + g \cdot \text{sign}(\Delta W) & 0 \\ 0 & b + g \cdot \text{sign}(\Delta W) \end{bmatrix}$

Έτσι, σε κάθε βήμα το παραγόμενο μητρώο  $K_i$  αντιστρέφεται, υπολογίζονται οι μεταβολές των στοιχείων του διανύσματος των εγκάρσιων μετακινήσεων, το διάνυσμα των εγκάρσιων φορτίσεων μεταβάλλεται στις τιμές του επόμενου ορισμένου βήματος και η παραπάνω υπολογιστική διαδικασία επαναλαμβάνεται διαρκώς. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που παράγονται από την χρήση του ανωτέρω μαθηματικού εργαλείου, η ορθότητα του οποίου διαπιστώνεται με βάση την σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία που διεξήχθησαν.

### **6.3 Αποτελέσματα του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου: σύγκριση και σχολιασμός**

Στα **Σχήματα 6.12** έως **6.26** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου που συντάχθηκε, με απώτερο σκοπό την προσομοίωση του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με ένα και μοναδικό “μακρο-στοιχείο”, για όλους τους εξεταζόμενους λόγους εγκιβωτισμού  $D/B = 1, 2$  και  $3$ , και για πέντε από τους μελετώμενους συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται (στα ίδια διαγράμματα) οι μονοτονικές καμπύλες τύπου “δύναμης- μετακίνησης” στο σημείο αναφοράς στην κορυφή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, όπως αυτές προέκυψαν τόσο από τα αποτελέσματα των εκφράσεων του μαθηματικού αυτού εργαλείου (μπλε διακεκομμένη γραμμή), όσο και από τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία που διεξήχθησαν (κόκκινη συνεχής γραμμή), σε συνάρτηση με τον λόγο των εγκάρσιων εντατικών μεγεθών  $M/Q$ , δηλαδή σε σχέση με την θέση του κάθε διανύσματος φόρτισης πάνω στις καμπύλες αλληλεπίδρασης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$  (δύο επιλεγμένα σημεία: ένα στο πρώτο τεταρτημόριο του επιπέδου και ένα στο τέταρτο).

Σε όλες τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται στα προαναφερθέντα σχήματα, παρατηρείται η αξιοθαύμαστη ταύτιση των μονοτονικών καμπυλών οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης (μονοτονικές καμπύλες  $Q - u$ ) και ροπής- στροφής (μονοτονικές καμπύλες  $M - \theta$ ) των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, όπως αυτές προβλέπονται από το μαθηματικό εργαλείο που συζητείται στο παρόν κεφάλαιο, με τις αντίστοιχες μονοτονικές καμπύλες που αποκτήθηκαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Μάλιστα, η ταύτιση αυτή είναι- πέραν κάθε αρχικής προσδοκίας- εκπληκτική τόσο στην περιοχή των πολύ μικρών παραμορφώσεων (“οιωνεί” ελαστική συμπεριφορά), όπου η απόκριση του συστήματος της θεμελίωσης εξουσιάζεται από το θεωρούμενο ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας  $K_{top}$ , τόσο και στην περιοχή της αστοχίας, με την απόκριση της θεμελίωσης να περιγράφεται (σε αυτήν την περίπτωση) από τον συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής των μετακινήσεων και τις αντίστοιχες επιφάνειες διαρροής των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Για την

ακρίβεια, εφόσον δεν ελήφθησαν υπ' όψιν (κατά την δημιουργία του αριθμητικού τριδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων) τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων που έχουν αναφερθεί ότι δύναται να παρατηρηθούν στην περίπτωση των φρεάτων υπό έντονη εγκάρσια φόρτιση, το αποτέλεσμα της θαυμαστής ταύτισης των μονοτονικών καμπυλών “δύναμης- μετακίνησης” δείχνει να αποτελεί την πλέον αξιοσημείωτη επιβεβαίωση περί της ορθότητας των μεθόδων και των βημάτων που ακολουθήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Σε επόμενη σχετική, ενδεχομένως, έρευνα θα πρέπει να θεωρηθούν με ξεχωριστό τρόπο τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων, αλλά όχι με την ίδια μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μέχρι στιγμής: για την ακρίβεια, πλέον υπάρχει “έτοιμο” το θεωρητικό υπόβαθρο που εξουσιάζει την απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό εγκάρσιες (αστράγγιστες) συνθήκες φόρτισης, το οποίο (απλώς) θα πρέπει να τροποποιηθεί και να επεκταθεί (ή ενδεχομένως να περιοριστεί) κατάλληλα. Συνεπώς, “δικαιολογώντας” την φράση που καταγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, όπου αναφέρθηκε ότι ο λόγος που δεν ελήφθησαν υπ' όψιν τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων είναι ότι επιβάλλεται η σχετική έρευνα να ξεκινήσει από “αρχικό” στάδιο (εφόσον δεν υπάρχει μεγάλος όγκος αντίστοιχης εργασίας στην περίπτωση των φρεάτων θεμελίωσης), τώρα μπορούμε να ισχυριστούμε ότι τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας όχι μόνο δεν “υποβαθμίζονται” στο λεγόμενο “αρχικό” στάδιο (με την έννοια του πρώιμου), αλλά αποτελούν ουσιαστικά την θεμελιώδη βάση για τις επόμενες εργασίες που ενδέχεται να ακολουθήσουν πάνω στην μελέτη της απόκρισης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό εγκάρσια φόρτιση. Εξάλλου, κάπως έτσι (με αδρή παρομοίωση) εξελίχθηκε διαχρονικά και η σχετική έρευνα για την προσομοίωση των συστημάτων εδάφους- επιφανειακών θεμελιώσεων μέσω “μακρο- στοιχείων” (σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές παρατίθενται στο κεφάλαιο της εισαγωγής), οδηγώντας στην ύπαρξη τεράστιου όγκου εργασίας και, εν τέλει, στην ύπαρξη πληθώρας διαφορετικών μεθοδολογιών, κάτι που- φυσικά- απουσιάζει ως θεωρητικό υπόβαθρο για το μελετώμενο πρόβλημα των φρεάτων.

Επιπροσθέτως, ακόμα περισσότερο θαυμαστή είναι η ταύτιση των μονοτονικών καμπυλών “δύναμης- μετακίνησης” που προβλέπονται από το μαθηματικό υπόβαθρο

του συγκεκριμένου “μακρο- στοιχείου” με τις αντίστοιχες καμπύλες που αποκτήθηκαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, στην περιοχή συναρμογής ανάμεσα στην περιοχή των πολύ μικρών παραμορφώσεων και στην περιοχή της αστοχίας του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (διαγράμματα  $Q - u$  και  $M - \theta$ ). Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, στην περιοχή αυτή η συμπεριφορά του συστήματος θεμελίωσης χαρακτηρίζεται από τον υιοθετούμενο νόμο κράτυνσης (hardening law), καθώς και από την συνεπακόλουθη ορθότητα της αναπαραγωγής των αντίστοιχων εφαπτομενικών μέτρων (ή μητρώων) δυσκαμψίας του συστήματος εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Όπως παρατηρείται άμεσα από τα προαναφερθέντα σχήματα, οι προβλέψεις του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου συμβαδίζουν εκπληκτικά με τις “πραγματικές καμπύλες” οριζόντιων δυνάμεων- οριζόντιων μετατοπίσεων (μονοτονικές καμπύλες  $Q - u$ ) και ροπών- στροφών (μονοτονικές καμπύλες  $M - \theta$ ), για κάθε δυνατό συνδυασμό λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $F_S$ , και γωνίας διεύθυνσης  $\phi$ , των διάφορων σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ - ροπής  $M$ ). Μάλιστα, ίσως το πιο εκπληκτικό εύρημα όλων, είναι το γεγονός ότι η απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων εξαρτάται αποκλειστικά και μόνον από μία παράμετρο κράτυνσης (hardening parameter): την χαρακτηριστική παράμετρο  $n$ . Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι ιδιαιτέρως σημαντικό, και επιδεικνύει άλλη μία πτυχή της ορθότητας των μεθόδων και των βημάτων, με βάση τα οποία αναπτύχθηκε η παρούσα εργασία, κατά την μελέτη της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (και την, μετ' έπειτα, ποσοτικοποίηση αυτής της συμπεριφοράς υπό αυστηρή μαθηματική σκοπιά). Επιπλέον, εξαιτίας του ισχυρά πλεονεκτικού χαρακτήρα που παρουσιάζει η επιρροή της μοναδικής παραμέτρου κράτυνσης  $n$ , καθίσταται δυνατή η πρόταση των ανάλογων συστάσεων για τις τιμές της, σε συνάρτηση με τις διάφορες μεταβλητές του εξεταζόμενου προβλήματος των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (π.χ. λόγος εγκιβωτισμού  $D/B$ ). Στην ενότητα που ακολουθεί, παρουσιάζεται- εν συντομία- μία αδρή προσπάθεια για τον καθορισμό των συστάσεων αυτών, για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

### 6.3.1 Προτεινόμενες συστάσεις για τις τιμές της χαρακτηριστικής παραμέτρου κράτυνσης $n$

Στο **Σχήμα 6.27** παρουσιάζονται οι εισαγόμενες συστάσεις με τις ενδεικτικές τιμές της χαρακτηριστικής παραμέτρου κράτυνσης που προτείνεται να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την θεώρηση του αναπτυσσόμενου ενιαίου μαθηματικού εργαλείου, συναρτήσεως των τριών “οικογενειών” μεταβλητών του εξεταζόμενου προβλήματος: (α) του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ , (β) του συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  και (γ) της χαρακτηριστικής γωνίας διεύθυνσης  $\phi$ , του διανύσματος εγκάρσιας φόρτισης (οριζόντιας δύναμης  $Q$  και ροπής  $M$ ). Πιο συγκεκριμένα, για την απλοποίηση της παρουσίασης των προτεινόμενων συστάσεων, αυτές παρουσιάζονται υπό μορφή συγκεντρωτικού πίνακα, ορίζοντας τρεις ξεχωριστές περιοχές ανάλογα με την χαρακτηριστική γωνία διεύθυνσης του διανύσματος της εγκάρσιας φόρτισης (γωνία  $\phi$ ): (α) στην πρώτη χαρακτηριστική περιοχή περιλαμβάνεται το τμήμα των καμπυλών αλληλεπίδρασης του πρώτου τεταρτημορίου, συγχρόνως με την “γραμμική προέκτασή” του στο τέταρτο τεταρτημόριο (τμήμα ενιαίας καμπυλότητας), (β) στην δεύτερη χαρακτηριστική περιοχή περιλαμβάνεται αποκλειστικά η ακμή των κλάδων της υπεραντοχής των καμπυλών (η οποία περιορίζεται, ποιοτικά, από τα σημεία που αντιστοιχούν στα μέγιστα εντατικά μεγέθη  $Q_{max}$  και  $M_{max}$ ), και (γ) στην τρίτη περιλαμβάνεται το υπόλοιπο τμήμα των καμπυλών που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο του επιπέδου φόρτισης  $M - Q$ , το οποίο- εξάλλου- χαρακτηρίζεται και από διαφορετική καμπυλότητα, σε σχέση με αυτήν της πρώτης περιοχής.

Έτσι, για δεδομένο λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$  και για σταθερό συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , παρουσιάζεται ενδεικτικά μία τιμή της παραμέτρου κράτυνσης  $n$  (hardening parameter), για κάθε μία από τις τρεις χαρακτηριστικές περιοχές επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (**Πίνακας 6.1, Σχήμα 6.27(γ)**). Γενικά, δεν παρατηρείται κάποια προφανής αλληλεπίδραση όλων των παραμέτρων του προβλήματος μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μην διεξάγεται κάποια περαιτέρω προσπάθεια “ομαδοποίησης”- ή κατηγοριοποίησης- των αποτελεσμάτων των προτεινόμενων συστάσεων. Η παρουσίαση αυτή γίνεται, κατά αποκλειστικό λόγο, με στόχο να επισημανθεί το εύρος των τιμών που δύναται να λάβει η παράμετρος

κράτυνσης  $n$ , και να τονισθεί η “τάξη μεγέθους” της. Εξάλλου, όπως έχει επισημανθεί σε προηγούμενη ενότητα, όσο μεγαλώνει η τιμή του συντελεστή  $n$ , τόσο περισσότερο το σχήμα των μονοτονικών καμπυλών δύναμης- μετακίνησης τείνει να ταυτιστεί με ένα (ιδεατό) διγραμμικό διάγραμμα (ελαστική- ιδεωδώς πλαστική συμπεριφορά του συστήματος της θεμελίωσης). Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, σημειώνεται ότι για μικρότερες τιμές των συντελεστών ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση (και για δεδομένο φρέαρ, σταθερού λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ ), οι τιμές της παραμέτρου  $n$  λαμβάνονται- σε γενικές γραμμές- μειωμένες, διότι (όπως έχει ήδη αναφερθεί) η έντονη στάθμη της κατακόρυφης φόρτισης προκαλεί από μόνη της την εκτενέστερη πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους, με αποτέλεσμα την εντονότερη μείωση της δυσκαμψίας του συστήματος της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη σε αυτήν εγκάρσια φόρτιση. Αντιθέτως, όσο μεγαλύτερος είναι ο θεωρούμενος συντελεστής ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση, τόσο μεγαλύτερα περιθώρια πλαστικοποίησης υπάρχουν καθώς επιβάλλεται η συνδυασμένη εγκάρσια φόρτιση στην κορυφή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, με αποτέλεσμα το σχήμα των μονοτονικών καμπυλών δύναμης- μετακίνησης να τείνει περισσότερο (“ποιοτικά”) στην διγραμμική του μορφή, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές της παραμέτρου κράτυνσης  $n$ .

#### **6.4 Ανακυκλική (pushover) φόρτιση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων: το φαινόμενο της κράτυνσης με μειούμενο ρυθμό**

##### **6.4.1. Επεξήγηση του φαινομένου**

Στην ενότητα που αναπτύσσεται παρακάτω, επιχειρείται να εξεταστεί η εγκυρότητα του αναπτυσσόμενου ενιαίου μαθηματικού εργαλείου στην περίπτωση της ανακυκλικής (pushover) φόρτισης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, επιβάλλοντας στην κορυφή των φρεάτων οριζόντιες δυνάμεις (ή ροπές), ανακυκλικού χαρακτήρα. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 6.28** απεικονίζεται ενδεικτικά η λογική των επιβαλλόμενων “χρονοϊστοριών” (γραμμικά διαγράμματα  $Q - t$  και  $M - t$ ), στο σημείο αναφοράς στην κορυφή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, οι οποίες διέπονται

από συμμετρικά χαρακτηριστικά ως προς τον χρόνο της ανάλυσης  $t$ . Η λογική της νέας σειράς αριθμητικών αναλύσεων είναι κοινή με την αντίστοιχη λογική που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στα θεωρητικά πλαίσια της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων. Συνεπώς, αρχικά επιβάλλεται δεδομένη κατακόρυφη φόρτιση (που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ ) στην κορυφή των φρεάτων, και στην συνέχεια ακολουθεί το στάδιο επιβολής της ανακυκλικής εγκάρσιας φόρτισης.

Στο σημείο αυτό, και πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της νέας σειράς αριθμητικών αναλύσεων, αξίζει να συζητηθεί μία νέα (ή, καλύτερα, “μη- ανεπτυγμένη” έως τώρα) πτυχή της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, η οποία συμβαδίζει σε μεγάλο βαθμό με την αντίστοιχη συμπεριφορά που εντοπίζεται κατά την μελέτη της απόκρισης των επιφανειακών θεμελιώσεων υπό ανακυκλική (στατική) φόρτιση. Συγκεκριμένα, οι Παναγιωτίδου, Γκαζέτας και Γερόλυμος [2010] μελέτησαν την μετα- πλαστική συμπεριφορά των επιφανειακών θεμελιώσεων υψίκορμης ανωδομής, υπό εγκάρσια στατική και σεισμική εξαίτηση. Κατά την ανακυκλική (στατική) φόρτιση που μας ενδιαφέρει στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας, διατύπωσαν ένα πολύ ενδιαφέρον αποτέλεσμα, το οποίο αποτυπώνει την μη- συμμετρική απόκριση των (αρχικώς συμμετρικών) συστημάτων επιφανειακών θεμελιώσεων, ακόμα και υπό στατικές συνθήκες φόρτισης. Στο **Σχήμα 6.29** απεικονίζεται σκαριφηματικά η συμπεριφορά που αποκτήθηκε, για δύο περιπτώσεις επιφανειακών θεμελιώσεων υψίκορμης ανωδομής, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους στον θεωρούμενο συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ : η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε συντελεστή ασφαλείας  $FS_v = 5$ , και η δεύτερη περίπτωση σε συντελεστή ασφαλείας  $FS_v = 1.25$ . Στην πρώτη περίπτωση της ελαφρώς φορτισμένης θεμελίωσης, παρατηρείται πλήρης συμμετρία στην απόκριση του συστήματος, με την ροπή λόγω των φαινομένων  $P - \delta$  (που ελήφθησαν υπ’ όψιν) να βρίσκεται συνεχώς “σε φάση” με την επιβαλλόμενη ανακυκλική ροπή. Αντιθέτως, στην περίπτωση της βαριάς φορτισμένης θεμελίωσης, εξαιτίας της μεγάλης κατακόρυφης φόρτισης, αυτή βρίσκεται συνεχώς σε συνθήκες πλήρους επαφής με το υποκείμενό της έδαφος, με αποτέλεσμα η επιβαλλόμενη ροπή και η ροπή του βάρους του ταλαντωτή (λόγω των φαινομένων  $P - \delta$ ) να παρουσιάζουν κατά διαστήματα “διαφορά φάσης” (π.χ. όταν η μία δρα

ωρολογιακά, η άλλη δρα με ανταγωνιστικό τρόπο κατά την αντι- ωρολογιακή διεύθυνση). Έτσι, παρά την θεωρούμενη (αρχικά) πλήρη συμμετρία του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης, και την πλήρη συμμετρία της επιβαλλόμενης (στατικά) ανακυκλικής φόρτισης, αποκτάται- παραδόξως- μία διόλου συμμετρική απόκριση: το σύστημα εμφανίζει “υπεραντοχές” κατά την μία διεύθυνση φόρτισης σε σχέση με την άλλη.

Στο **Σχήμα 6.30** παρουσιάζεται το διάγραμμα οριζόντιας δύναμης Q- οριζόντιας μετατόπισης  $u$  στην κορυφή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ ), για την περίπτωση επιβαλλόμενης ανακυκλικής φόρτισης οριζόντιας δύναμης στην κεφαλή της. Στην προκειμένη περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση αντιστοιχεί σε άπειρη τιμή (μηδενικό κατακόρυφο φορτίο,  $x = 0$ ). Παρατηρείται απόλυτη συμμετρία στην απόκριση του συστήματος εδάφους- θεμελίωσης, με τον αντίστοιχο βρόχο που σχηματίζεται να είναι ένας και μοναδικός, και με το σύστημα της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης να μετατοπίζεται κατά την ίδια ποσότητα και κατά τις δύο διευθύνσεις φόρτισης. Απ’ την άλλη πλευρά, στο **Σχήμα 6.31** απεικονίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ίδια θεμελίωσης, με την διαφορά ότι- σε αυτήν την περίπτωση- το διάγραμμα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης αντιστοιχεί σε συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $F_{S_v} = 2.5$  ( $x = 0.4$ ). Είναι ιδιαιτέρως εμφανής η απώλεια της συμμετρίας στην απόκριση του συστήματος, η οποία οφείλεται σε αντίστοιχο φαινόμενο με αυτό που διατυπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, για την περίπτωση των επιφανειακών θεμελιώσεων. Όπως έχει διατυπωθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η επιρροή της κατακόρυφης φόρτισης στην συμπεριφορά των μελετώμενων βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων, έγκειται στην μεταβολή των συμμετρικών χαρακτηριστικών απόκρισης που αυτή επιφέρει. Ως αποτέλεσμα, οι σχηματιζόμενοι βρόχοι διαφοροποιούνται από τον (μοναδικό) βρόχο που παρατηρείται στην περίπτωση της απουσίας της κατακόρυφης φόρτισης, και μάλιστα διαφέρουν και μεταξύ τους. Αντίθετα, όμως, με την αντίστοιχη μελέτη της ανακυκλικής φόρτισης των επιφανειακών θεμελιώσεων, στην περίπτωση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων- φρεάτων δεν απαιτείται να ληφθούν υπ’ όψιν τα φαινόμενα P – δ, με στόχο να αναπαραχθεί η συγκεκριμένη- “παράδοξη”- μορφή απόκρισης, διότι είναι τέτοια η γεωμετρία του συστήματος, ώστε η επιβαλλόμενη κατακόρυφη φόρτιση να συνοδεύεται από έναν σημαντικού μεγέθους



μοχλοβραχίονα, παρέχοντας (γεωμετρικά, εξ' ορισμού του προβλήματος των θηριωδών φρεάτων) περαιτέρω αντίσταση. Έτσι, το σύστημα εδάφους- θεμελίωσης δείχνει να εμφανίζει "υπεραντοχές", αυξάνοντας την δυσκαμψία του με μειούμενο, όμως, ρυθμό. Το ανωτέρω φαινόμενο αποτελεί ένα είδος μακροσκοπικής "κράτυνσης" (hardening) του εξεταζόμενου συστήματος θεμελίωσης, σε παραβολή με την έννοια της κράτυνσης που ορίστηκε κατά την επεξήγηση του ενιαίου μαθηματικού εργαλείου ("μακροστοιχείο") που συντάχθηκε στο παρόν κεφάλαιο, το οποίο (όπως θα συζητηθεί παρακάτω) είναι σε θέση να αναπαραγάγει και το νέο φαινόμενο κράτυνσης που συζητείται σε αυτήν την ενότητα.

Προκειμένου να εξηγηθεί αναλυτικότερα η φυσική που διέπει την παραπάνω συμπεριφορά, στα **Σχήματα 6.33** και **6.34** δίνονται ενδεικτικά διάφορα στιγμιότυπα της απόκρισης του συστήματος εδάφους- φρέατος, σε άμεση συνάρτηση με τον χρόνο της ανάλυσης (**Σχήμα 6.32**,  $Q=Q(t)$ ), για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$  και  $FS_v = 2.5$ . Πιο συγκεκριμένα, τα στιγμιότυπα αναφέρονται στους χρόνους της ανάλυσης  $t = 1$ , έως και 9 (στο τέλος κάθε ευθύγραμμου κλάδου φόρτισης, δηλαδή), και απεικονίζουν τις ισοϋψείς των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων.

Αρχικά, ο πρώτος κλάδος της φόρτισης ( $t \leq 1$ ) ωθεί το φρέαρ σε μετατόπιση προς τα δεξιά, όπως ακριβώς έχει παρατηρηθεί και στην περίπτωση της μονοτονικής στατικής φόρτισης. Λόγω της ύπαρξης κατακόρυφης φόρτισης, όμως, παρατηρείται συσσώρευση των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων (**Σχήμα 6.34**,  $t = 1$ ) προς την πλευρά την πρώτης φόρτισης (δεξιά του φρέατος), ενώ συγχρόνως η αριστερή πλευρά παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη αντίστοιχη στάθμη πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων (συγκριτικά "αμελητέα"), σε αντιδιαμετρική αντίθεση με την περίπτωση απουσίας της κατακόρυφης φόρτισης, όπου εντοπίζεται θαυμαστή συμμετρία στην κατανομή των εδαφικών παραμορφώσεων γύρω από την εγκιβωτισμένη θεμελίωση, στον αντίστοιχο χρόνο ανάλυσης (**Σχήμα 6.33**,  $t = 1$ ). Ο επόμενος κλάδος φόρτισης ( $1 \leq t \leq 2$ ), όπως γίνεται αντιληπτό, επιβάλλεται υπό πλήρως διαφορετικές αρχικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε διαφορετικά χαρακτηριστικά απόκρισης. Η νέα επιβαλλόμενη οριζόντια δύναμη (ούσα συνεχώς

μικρότερη της τιμής του σημείου  $t = 1$ ) έχει να υπερνικήσει περισσότερους παράγοντες από εκείνους που συμμετείχαν κατά την “παρθένα” εγκάρσια φόρτιση της θεμελίωσης, με αποτέλεσμα όταν αυτή μηδενιστεί ( $t = 1.5$ ), το φρέαρ να βρίσκεται σε μετατοπισμένη θέση αρκετά μεγαλύτερης οριζόντιας μετατόπισης, σε σχέση με την περίπτωση της απουσίας της κατακόρυφης φόρτισης (**Σχήμα 6.35**, διαφορά μετατόπισης  $\Delta u$ ). Ουσιαστικά, η νέα αυτή οριζόντια δύναμη πρέπει να ωθήσει ένα σημαντικά μεγαλύτερο “σώμα” (μακροσκοπικά): το άκαμπτο φρέαρ θεμελίωσης (μαζί με το πλαστικοποιημένο έδαφος στα δεξιά του) καθώς και το εδαφικό πρίσμα που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά αυτού, με συνέπεια να αντιμετωπίζει σημαντικά μεγαλύτερη αντίσταση. Συν τοις άλλοις, η επιρροή της κατακόρυφης φόρτισης είναι ο καθοριστικός παράγοντας που οδηγεί στην αυξημένη αυτή αντίσταση, μιας και σε αντίθετη περίπτωση απουσίας της, δεν επιτρέπει στην αντίσταση αυτή να “ενεργοποιηθεί” στον μέγιστο βαθμό, οδηγώντας στην πλήρως συμμετρική απόκριση που εντοπίστηκε στο **Σχήμα 6.30**. Αυτό συμβαίνει διότι η δράση της είναι ο πλέον ανταγωνιστικός παράγοντας που “εγκλωβίζει” τις πλαστικές διατμητικές παραμορφώσεις στα δεξιά του φρέατος, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης να αναλώνεται στην εξισορρόπηση της ανταγωνιστικής δράσης αυτής: στην περίπτωση απουσίας της κατακόρυφης φόρτισης ( $x = 0$ ), το έδαφος στα δεξιά της θεμελίωσης αποφορτίζεται με πολύ ταχύτερο ρυθμό (δεν υπάρχει ο παράγοντας της κατακόρυφης φόρτισης ώστε να μειώσει τον ρυθμό αυτόν), με αποτέλεσμα η συμμετρική οριζόντια φόρτιση να είναι ικανή τόσο να επαναφέρει την θεμελίωση στην αρχική της θέση, όσο και να την μετατοπίσει ισόποσα προς την άλλη διεύθυνση (**Σχήμα 6.33**,  $t = 2$ ). Εν συνεχεία, παρατηρείται ότι ο κλάδος φόρτισης που αντιστοιχεί σε χρόνο ανάλυσης  $1.5 \leq t \leq 2$  είναι ακριβώς ο ίδιος με τον “παρθένο” κλάδο φόρτισης ( $t \leq 1$ ), επιβαλλόμενος στην αντίθετη διεύθυνση. Ξεκινώντας, όμως, από διαφορετικές αρχικές συνθήκες, με την σειρά του, έχει και αυτός να υπερνικήσει την προαναφερθείσα αντίσταση, σε σημείο που απλώς να καταφέρνει να επαναφέρει το φρέαρ κοντά στην αρχική του θέση (**Σχήματα 6.34 και 6.35**,  $t = 2$ , οριζόντια μετατόπιση  $u \approx 0$ ), απέχοντας κατά πολύ από την (συμμετρική) θέση που οδηγείται η θεμελίωση στο αντίστοιχο σημείο της περίπτωσης  $x = 0$ . Για τους επόμενους κλάδους φόρτισης η συμπεριφορά αυτή επαναλαμβάνεται διαρκώς, όμως με συνεχώς μειούμενο ρυθμό, έως ότου οι βρόχοι του διαγράμματος οριζόντιας

δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης τείνουν να σταθεροποιηθούν σε έναν κοινό βρόχο. Στην κατάσταση αυτή, λόγω των πολλών κύκλων φόρτισης που έχουν προηγηθεί, το περιβάλλον έδαφος έχει πλαστικοποιηθεί πλήρως, με συνέπεια ο κάθε επόμενος κλάδος φόρτισης να τείνει να επιβληθεί υπό κοινές αρχικές συνθήκες, σε σχέση με τον προηγούμενό του: το κατακόρυφο φορτίο, πλέον, δεν παίζει τον ανταγωνιστικό ρόλο που έπαιζε προηγουμένως, διότι δεν υπάρχει κάποια έντονη συσσώρευση των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων προς κάποια κατεύθυνση (και την οποία θα “εγκλώβιζε”), με συνέπεια να μπορούμε να ισχυριστούμε πως το σύστημα εδάφους-φρέατος έχει αρχίσει να “αγνοεί” (ποιοτικά) την ίδια την ύπαρξη της κατακόρυφης φόρτισης.

Ακριβώς η ίδια συμπεριφορά εντοπίζεται και στην περίπτωση της επιβαλλόμενης (με την ίδια λογική) ανακυκλικής ροπής στην κορυφή της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, όπως απεικονίζεται ενδεικτικά στο **Σχήμα 6.36**, για δύο διαφορετικές περιπτώσεις συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  ( $FS_v = \infty$  και  $FS_v = 2$ ). Επιπρόσθετα, το ίδιο φαινόμενο επιβεβαιώνεται και στην περίπτωση βαθύτερων φρεάτων (λόγου εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ ), με τα αντίστοιχα διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης να σχεδιάζονται στο **Σχήμα 6.37**. Τέλος, στην επόμενη ενότητα, διεξάγεται η προσπάθεια να αναπαραχθεί η απόκριση που επιβάλλει το φαινόμενο της προοδευτικής (μακροσκοπικής) κράτυνσης με μειούμενο ρυθμό, χρησιμοποιώντας το ενιαίο μαθηματικό εργαλείο που αναπτύχθηκε στο παρόν κεφάλαιο, και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

#### **6.4.2 Προσομοίωση του φαινομένου μέσω του “μακρο- στοιχείου”**

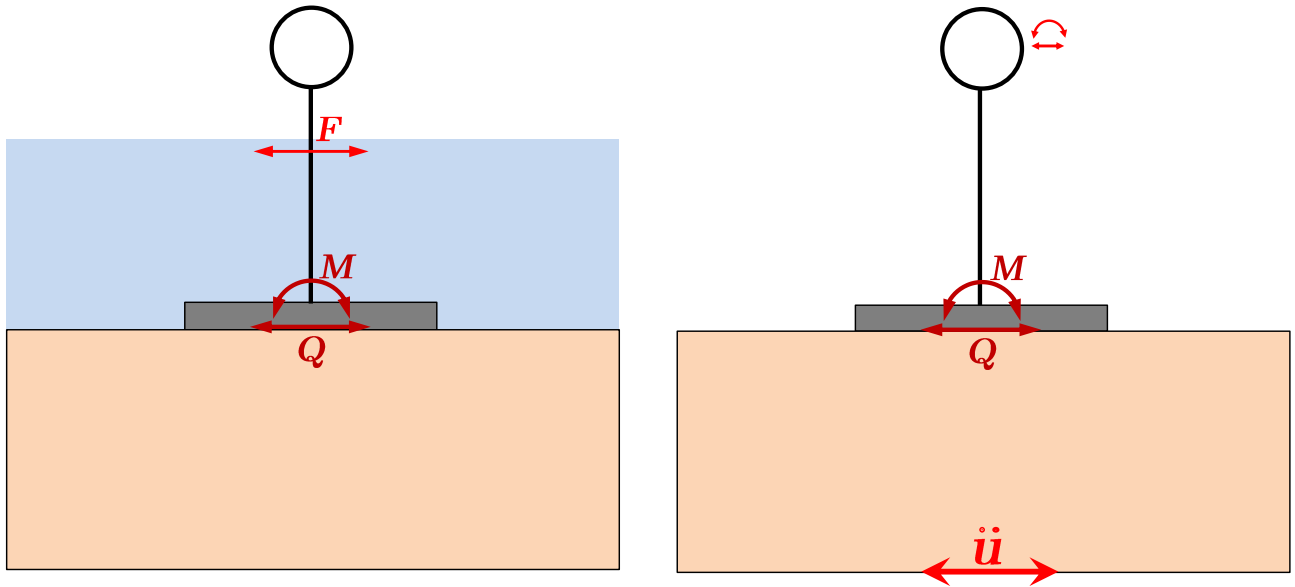
Στα **Σχήματα 6.38** και **6.39** παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, σε παραβολή με τα αποτελέσματα που παράγονται με χρήση του “μακρο- στοιχείου” (διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης). Τα συγκεκριμένα διαγράμματα αναφέρονται σε λόγους εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  και  $3$ , και σε συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$  και  $2.5$ . Παρατηρείται (πρακτικώς) ταύτιση μεταξύ των διαγραμμάτων που προέκυψαν από τις δύο διαφορετικές μεθόδους, αποτέλεσμα που

καθιστά το “μακρο- στοιχείο” ικανό να ανακτήσει ακόμα και αυτήν την πτυχή της συμπεριφοράς των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό ανακυκλική εγκάρσια φόρτιση. Για την ακρίβεια, το πιο εκπληκτικό συμπέρασμα (όπως και στην περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης) έγκειται στο γεγονός ότι η αναπαραγωγή της απόκρισης αυτής επιτυγχάνεται αποκλειστικά και μόνον από την θεώρηση διαφορετικών τιμών στην παράμετρο κράτυνσης  $n$  (hardening parameter), ανάλογα με τον εκάστοτε θεωρούμενο κλάδο φόρτισης. Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί σχετικά με την επιρροή της παραμέτρου κράτυνσης  $n$ , καθώς οι κλάδοι φόρτισης εξελίσσονται και το σύστημα εδάφους- βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης εμφανίζει σημάδια “υπεραντοχής”, η τιμή της παραμέτρου κράτυνσης οφείλει να θεωρείται συνεχώς αυξημένη, έως την σταθεροποίησή της σε μία δεδομένη τιμή (η οποία αναφέρεται στον τελικό κοινό σχηματιζόμενο βρόχο). Συνεπώς, με την χρήση μιας και μοναδικής παραμέτρου κράτυνσης, το μαθηματικό προσομοίωμα του “μακρο- στοιχείου”, που αναπτύχθηκε παραπάνω, είναι ικανό να περιγράψει ένα σημαντικά μεγάλο εύρος της απόκρισης των φρεάτων υπό εγκάρσια φόρτιση, ενώ περαιτέρω προτάσεις προς διερεύνηση παρατίθενται συγκεντρωτικά στο τελευταίο κεφάλαιο που ακολουθεί, αυτό των συμπερασμάτων και των συστάσεων για μελλοντικές έρευνες. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, στις ενότητες που αναπτύχθηκαν παραπάνω, επιβλήθηκε στην εγκιβωτισμένη θεμελίωση ανακυκλική (pushover) φόρτιση μόνον οριζόντιας δύναμης ή μόνον ροπής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει να εξεταστεί η συνύπαρξη των δύο εντατικών μεγεθών, και το κατά πόσο το μαθηματικό εργαλείο είναι δυνατόν να περιγράψει με κοινούς “παράγοντες” ταυτόχρονα τις αντίστοιχες καμπύλες  $Q - u$  και  $M - \theta$ , ή ενδεχομένως να απαιτείται η κατάλληλη τροποποίησή του.



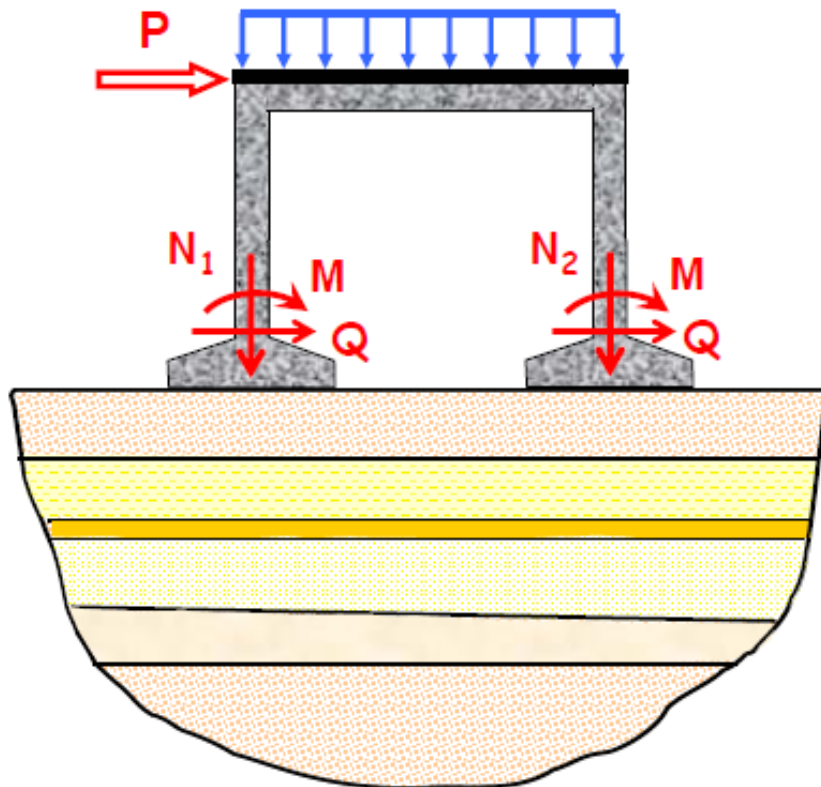
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΗΜΑΤΑ**

---

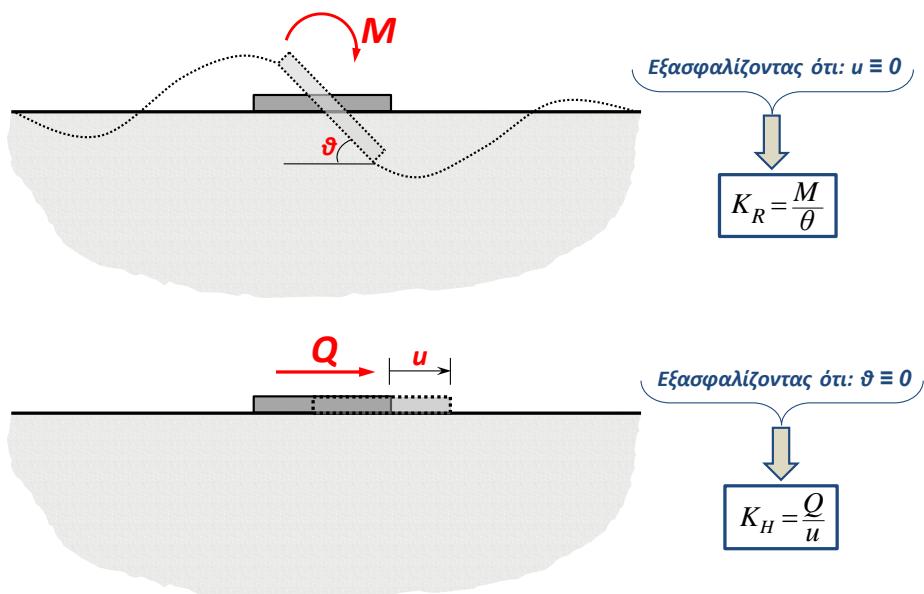


**Σχήμα 6.1.** Χαρακτηριστικά παραδείγματα κατασκευών που εξουσιάζονται από ισχυρά φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους- θεμελίου- ανωδομής: (α) έργα ανοικτής θαλάσσης, υποβαλλόμενα σε ανακυκλική φόρτιση λόγω των θαλάσσιων κυματισμών (και των ανέμων) και (β) βάρθο γέφυρας, υποβαλλόμενο σε σεισμική διέγερση κατά την εγκάρσια έννοια.

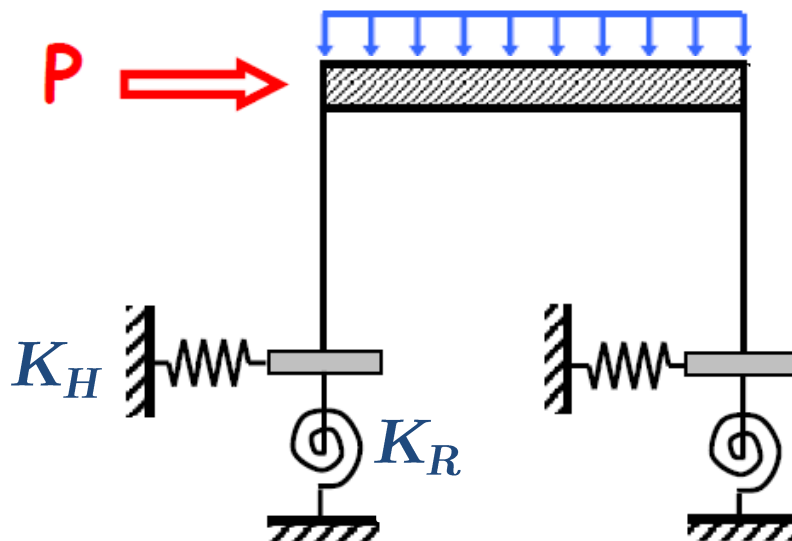
(α)



(β)



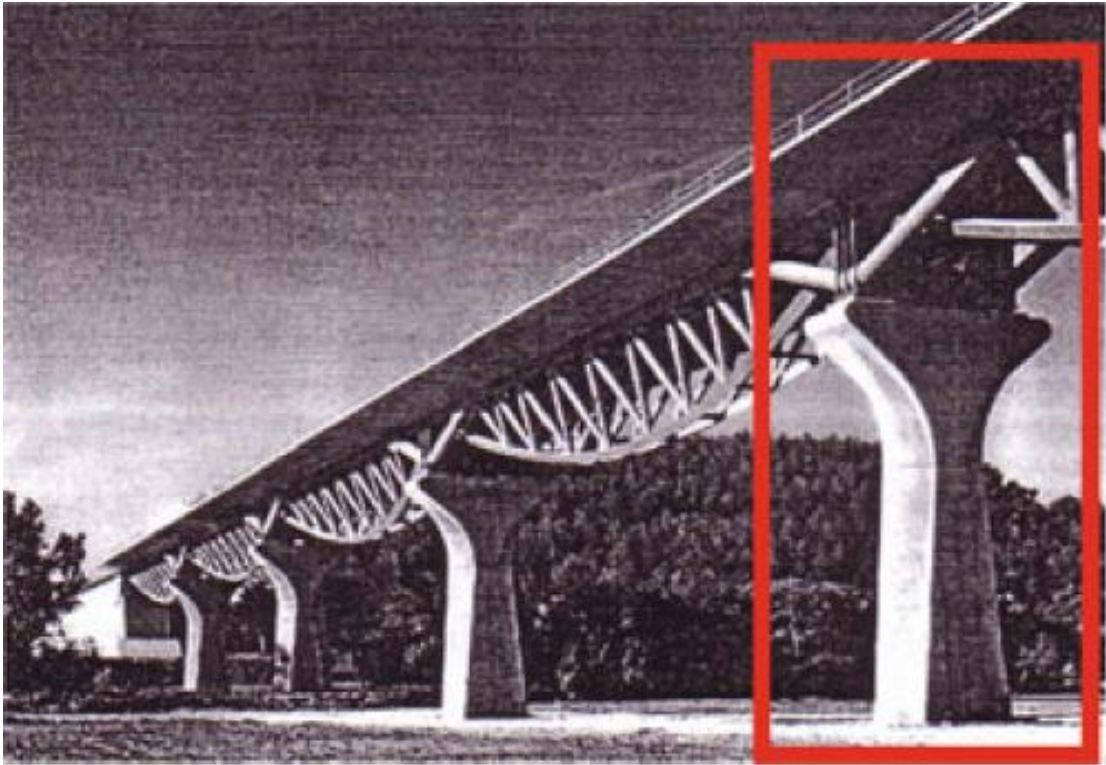
(γ)



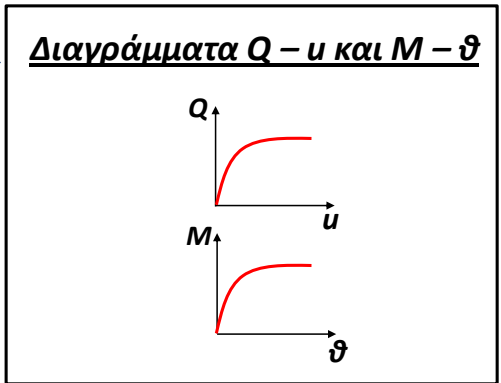
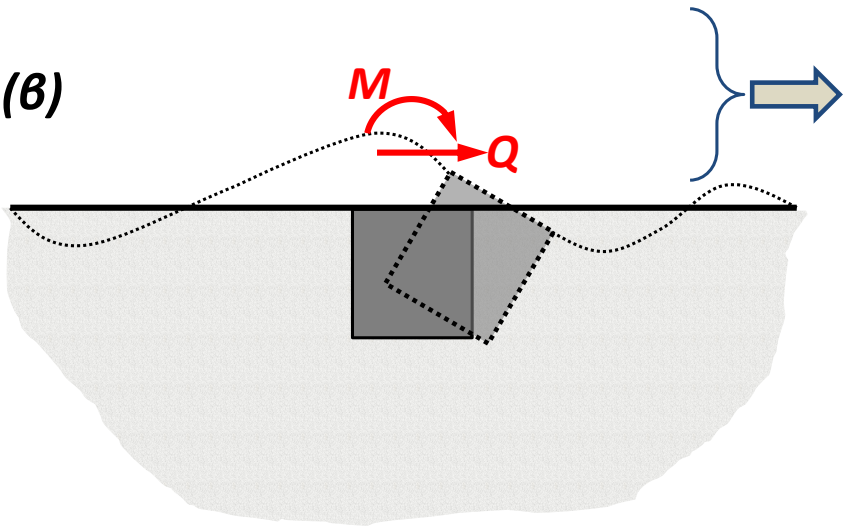
**Σχήμα 6.2.** Η φιλοσοφία της χρησιμοποίησης προσομοιωμάτων “μη- συζευγμένων” ελατηρίων τύπου Winkler: (α) επιφανειακές θεμελιώσεις πλαισιωτής κατασκευής, (β) “μη- συζευγμένη” δράση ροπής και οριζόντιας δύναμης, και προσδιορισμός των επιμέρους συντελεστών δυσκαμψίας και (γ) αντικατάσταση (μόνο) του εδάφους θεμελίωσης με τα προσδιορισθέντα ελατήρια.

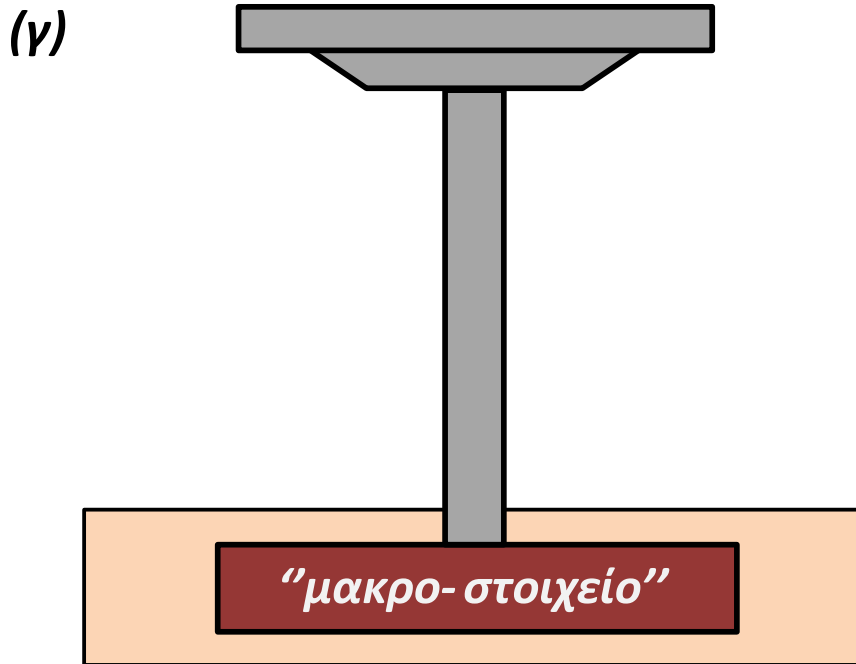


(α)

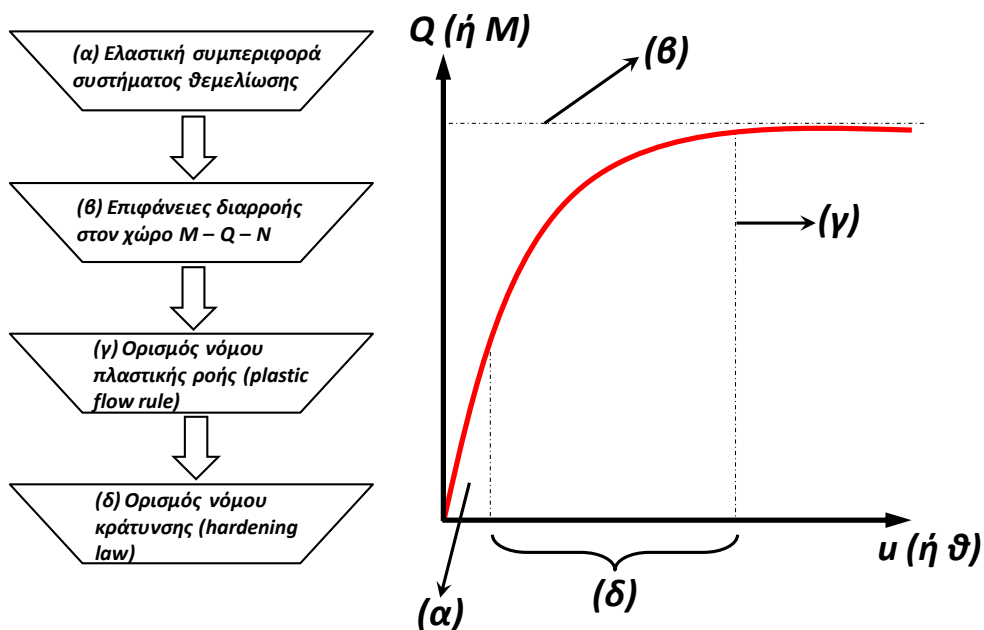


(β)

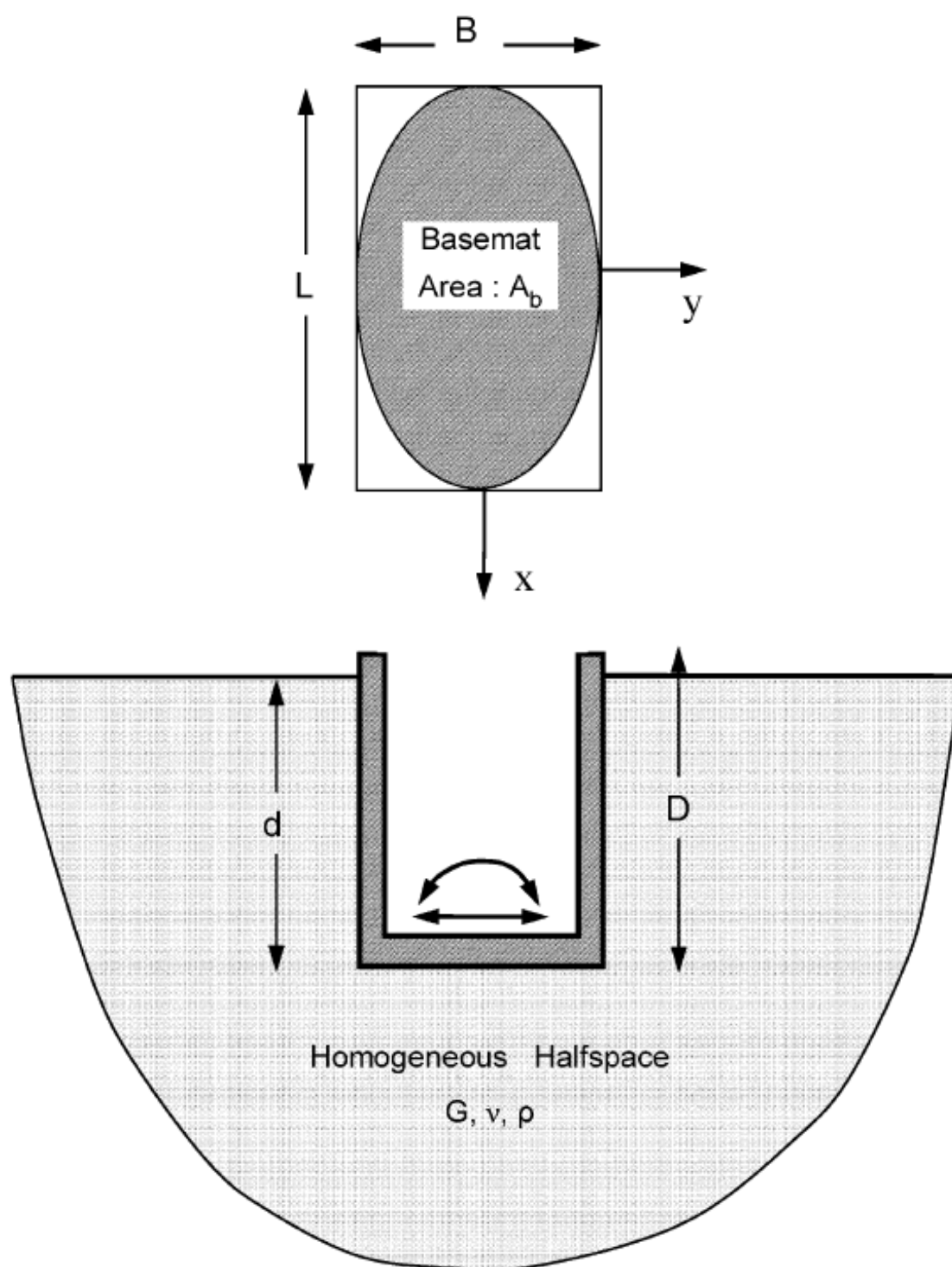




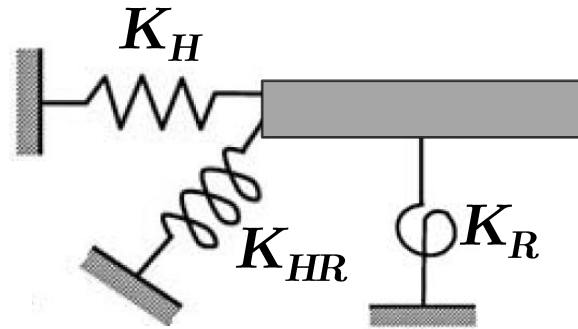
**Σχήμα 6.3.** Η φιλοσοφία της προσομοίωσης του συστήματος εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με ένα “μακρο-στοιχείο”: (α) τυπικό βάθρο γέφυρας θεμελιωμένο σε φρέαρ, (β) εγκάρσια φόρτιση της θεμελίωσης και παραγωγή διαγραμμάτων δύναμης-μετακίνησης και ροπής-στροφής στην κορυφή της, και (γ) αντικατάσταση του εδάφους και του φρέατος με ένα μοναδικό “μακρο-στοιχείο”, ικανό να αναπαράγει την απόκριση του συστήματος θεμελίωσης, έχοντας ως βάση τα ανωτέρω διαγράμματα.



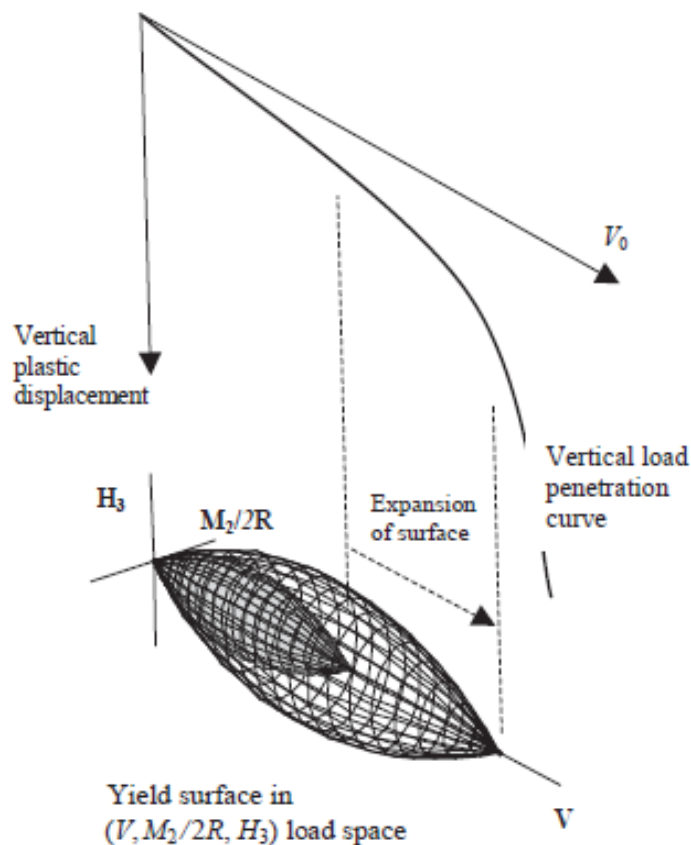
**Σχήμα 6.4.** Οι τέσσερις συνιστώσες-βήματα για την σύνταξη ενός “μακρο-στοιχείου”, και η επιρροή της κάθε μίας στα διαγράμματα τύπου “δύναμης-μετακίνησης” του εξεταζόμενου συστήματος θεμελίωσης.



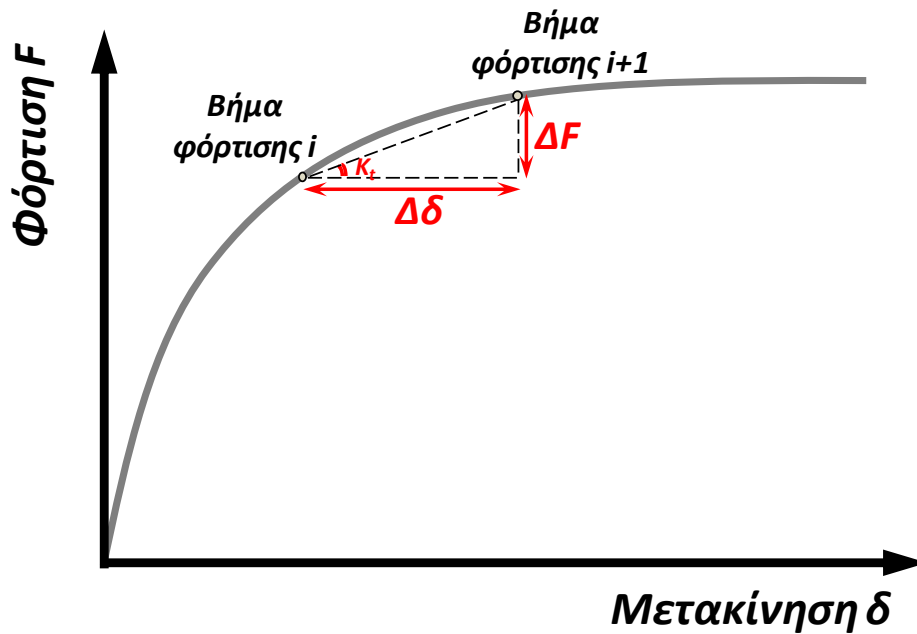
**Σχήμα 6.5.** Άκαμπτη εγκιβωτισμένη θεμελίωση επί γραμμικώς ελαστικού ομογενούς ημιχώρου, τυχαίου σχήματος κάτοψης. Ορισμός του προβλήματος κατά τους Gazetas και Tassoulas [1987], καθώς και κατά τους Fotoroulou et al. [1989], με σκοπό τον αναλυτικό προσδιορισμό των ελαστικών δυσκαμψιών της θεμελίωσης.



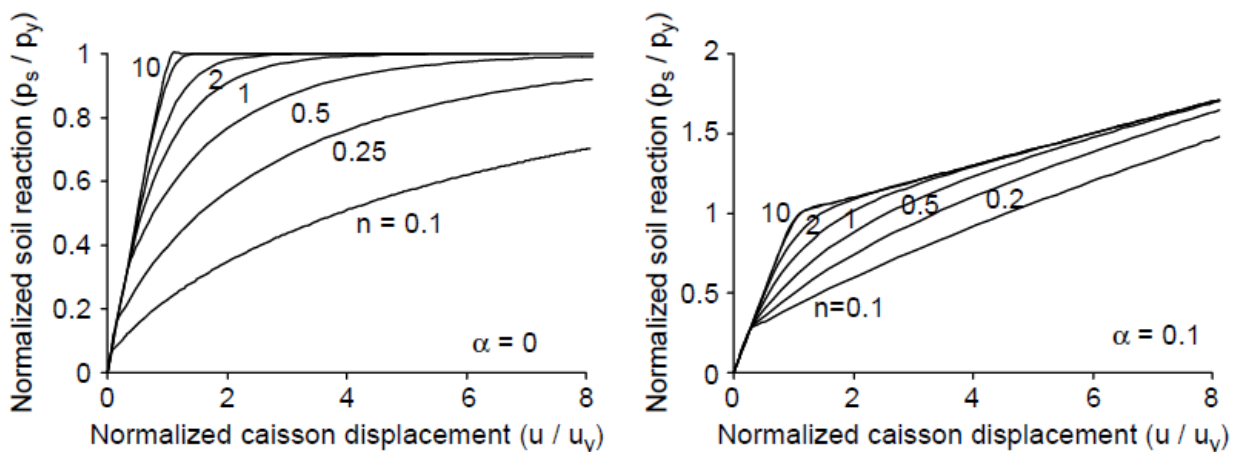
**Σχήμα 6.6.** Σκαριφηματική απεικόνιση των όρων του ελαστικού μητρώου δυσκαμψίας στην κορυφή της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης,  $K_{top}$  (δυσκαμψίες συστήματος). Με τον μετασχηματισμό που επιβάλλει το μητρώο μετασχηματισμού  $M$ , πλέον αγνοείται το υπόλοιπο τμήμα της θεμελίωσης, καθώς και το περιβάλλον έδαφος (όσον αφορά το ελαστικό τμήμα της απόκρισης).



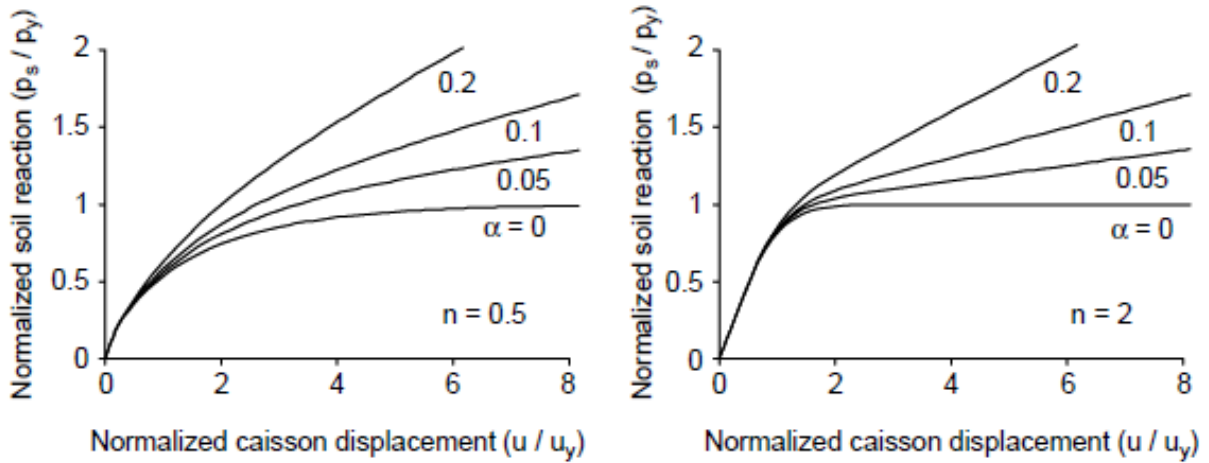
**Σχήμα 6.7.** Ο νόμος κράτυνσης που υιοθετήθηκε κατά την εργασία των Cassidy et al. [2004], για την μαθηματική περιγραφή της απόκρισης των θεμελιώσεων έργων ανοικτής θαλάσσης (sprudcan foundations). Το μέγεθος της κράτυνσης του συστήματος εξαρτάται από το μέγεθος της πλαστικής κατακόρυφης μετατόπισης της θεμελίωσης (strain-hardening plasticity model).



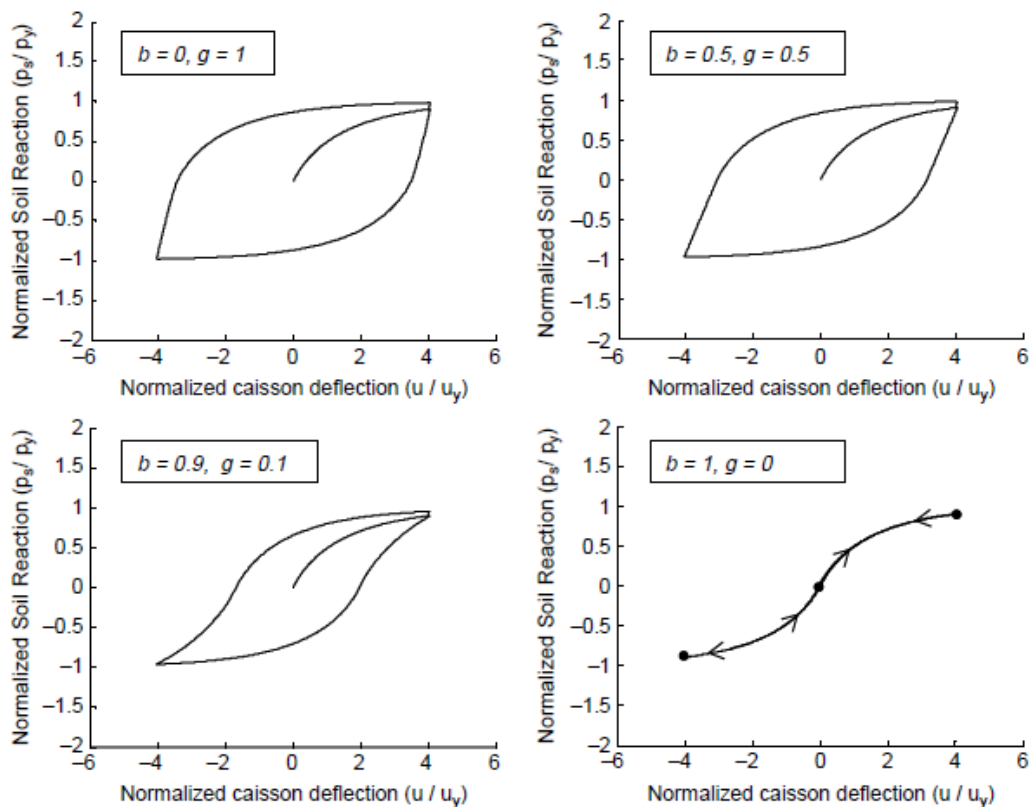
**Σχήμα 6.8.** Η επαναληπτική βάση ανάπτυξης του αναπτυσσόμενου μαθηματικού εργαλείου: στο βήμα φόρτισης  $i$  υπολογίζεται το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας  $K_t$  και προκύπτει η συνεπακόλουθη μεταβολή της μετακίνησης  $\Delta\delta$  μέχρι το επόμενο βήμα φόρτισης  $i+1$ . Όσο μικρότερο θεωρείται το διάστημα  $\Delta F$  μεταξύ δύο διαδοχικών βημάτων φόρτισης, τόσο “ακριβέστερη” θεωρείται η προσέγγιση του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας.



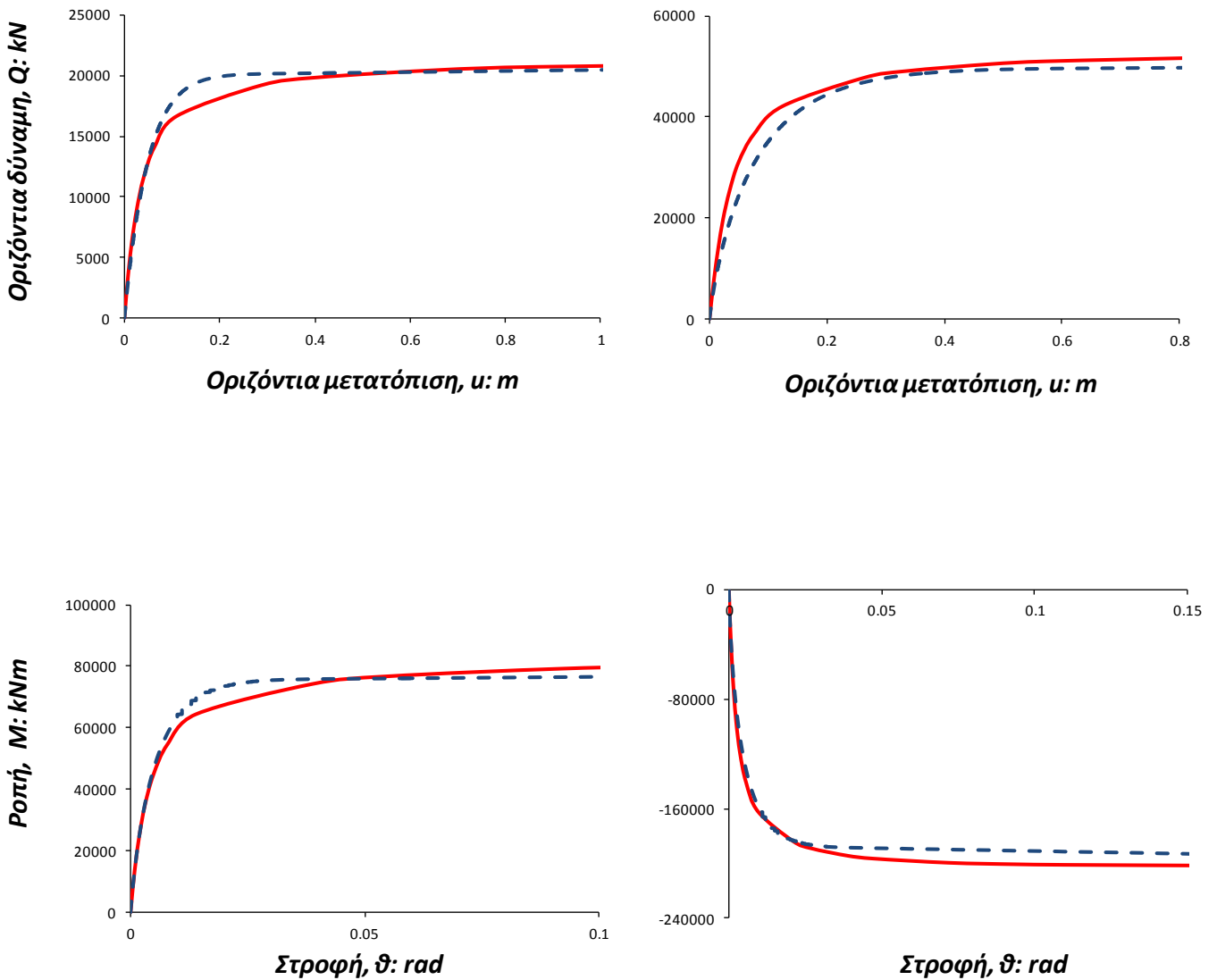
**Σχήμα 6.9.** Η επιρροή της παραμέτρου κράτυνσης  $n$  στο σχήμα των μονοτονικών καμπυλών “δύναμης- μετακίνησης”, για δύο τιμές της παραμέτρου  $\alpha$ : (i)  $\alpha = 0$  και (ii)  $\alpha = 0.1$ .



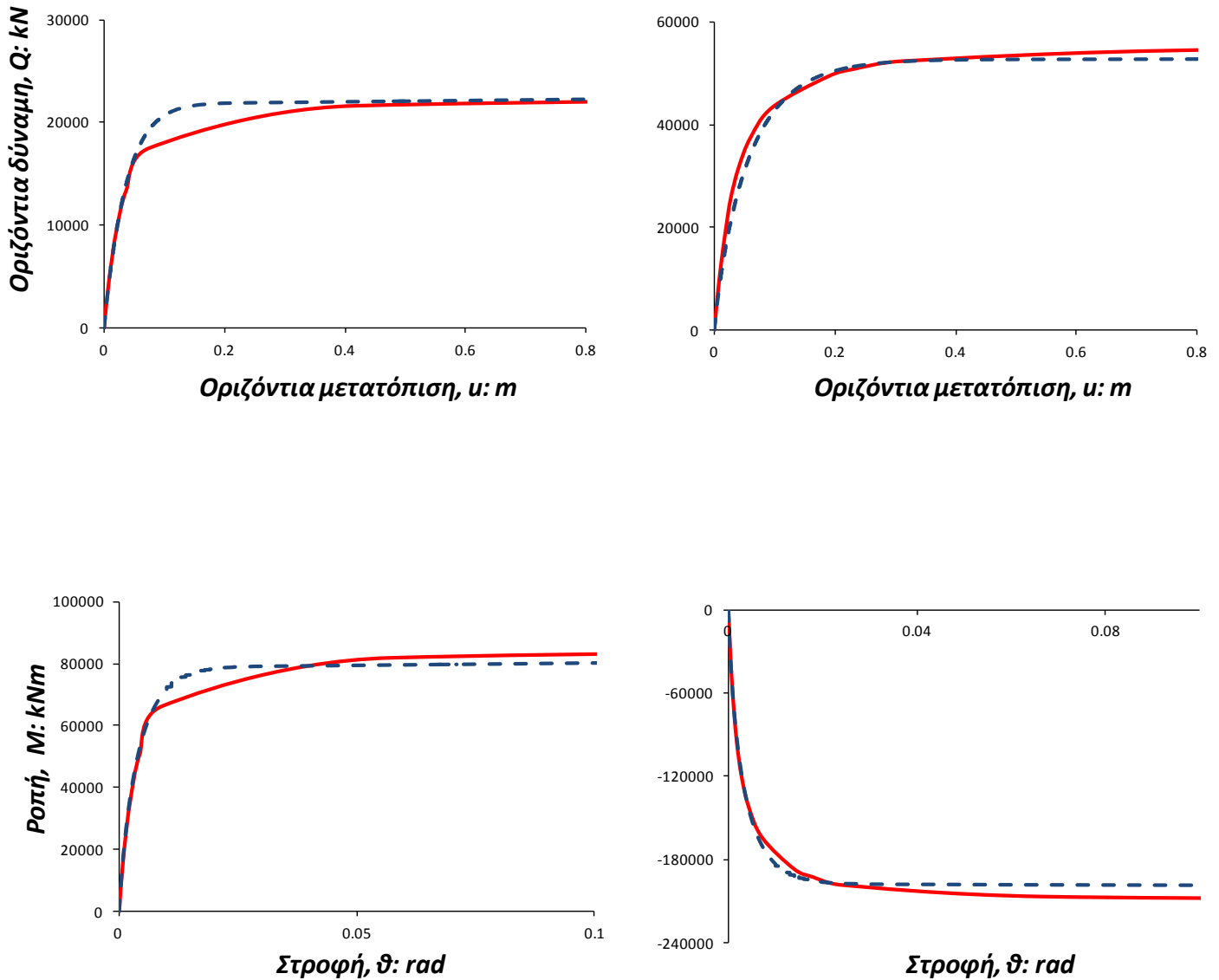
**Σχήμα 6.10.** Η επιρροή της παραμέτρου κράτυνσης  $\alpha$  στο σχήμα των μονοτονικών καμπυλών “δύναμης- μετακίνησης”, για δύο τιμές της παραμέτρου  $n$ : (i)  $n = 0.5$  και (ii)  $n = 2$ .



**Σχήμα 6.11.** Η επιρροή των παραμέτρων κράτυνσης  $b$  και  $g$ , στο σχήμα των σχηματιζόμενων βρόχων της εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (υπό ανακυκλική φόρτιση). Διακρίνονται τέσσερα χαρακτηριστικά ζεύγη τιμών των δύο παραμέτρων [Gerolymos and Gazetas 2006]. Στην παρούσα εργασία, υιοθετείται το ζεύγος τιμών  $b = g = 0.5$ , οι οποίες ικανοποιούν το κριτήριο του Masing.

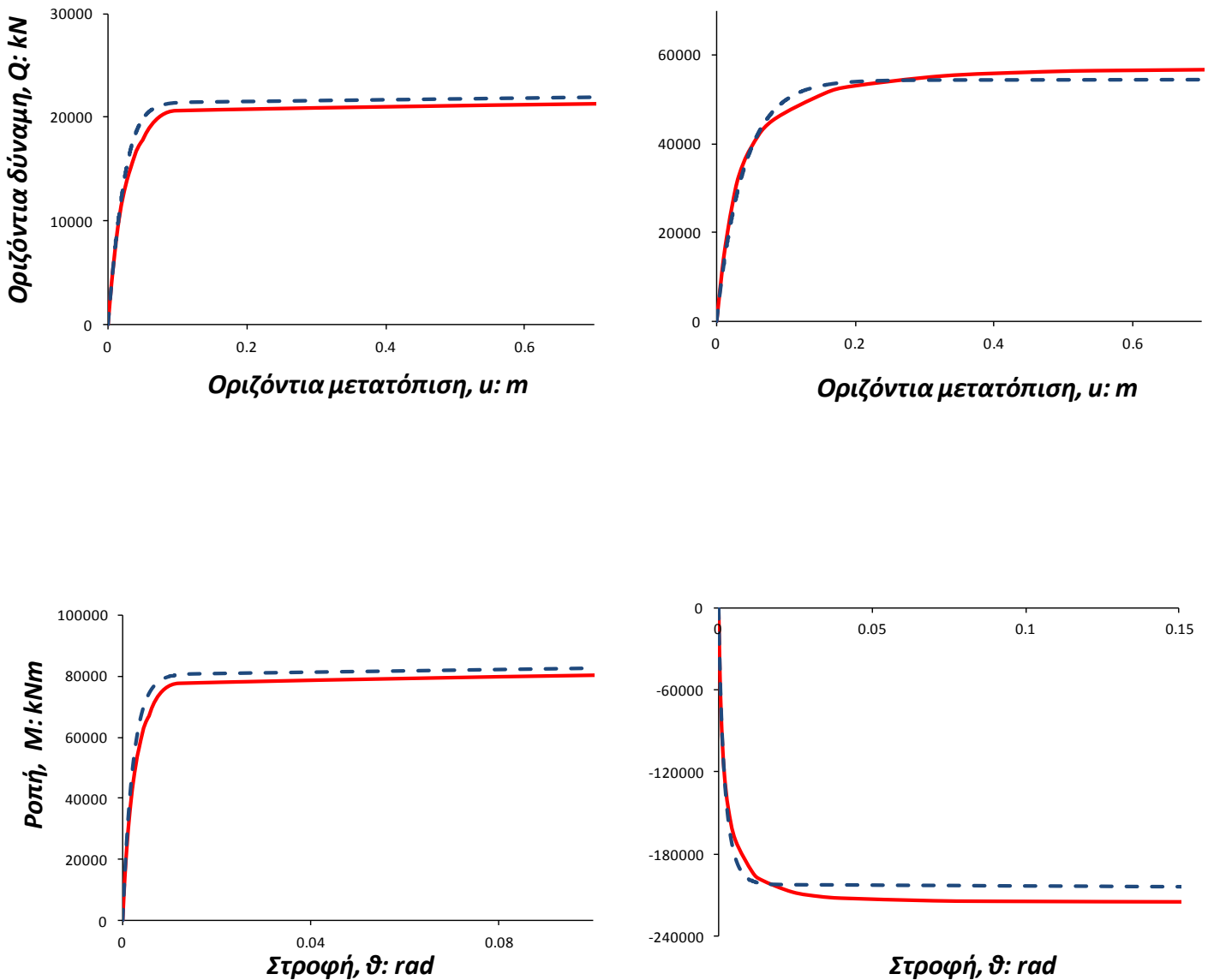


**Σχήμα 6.12.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.25$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.

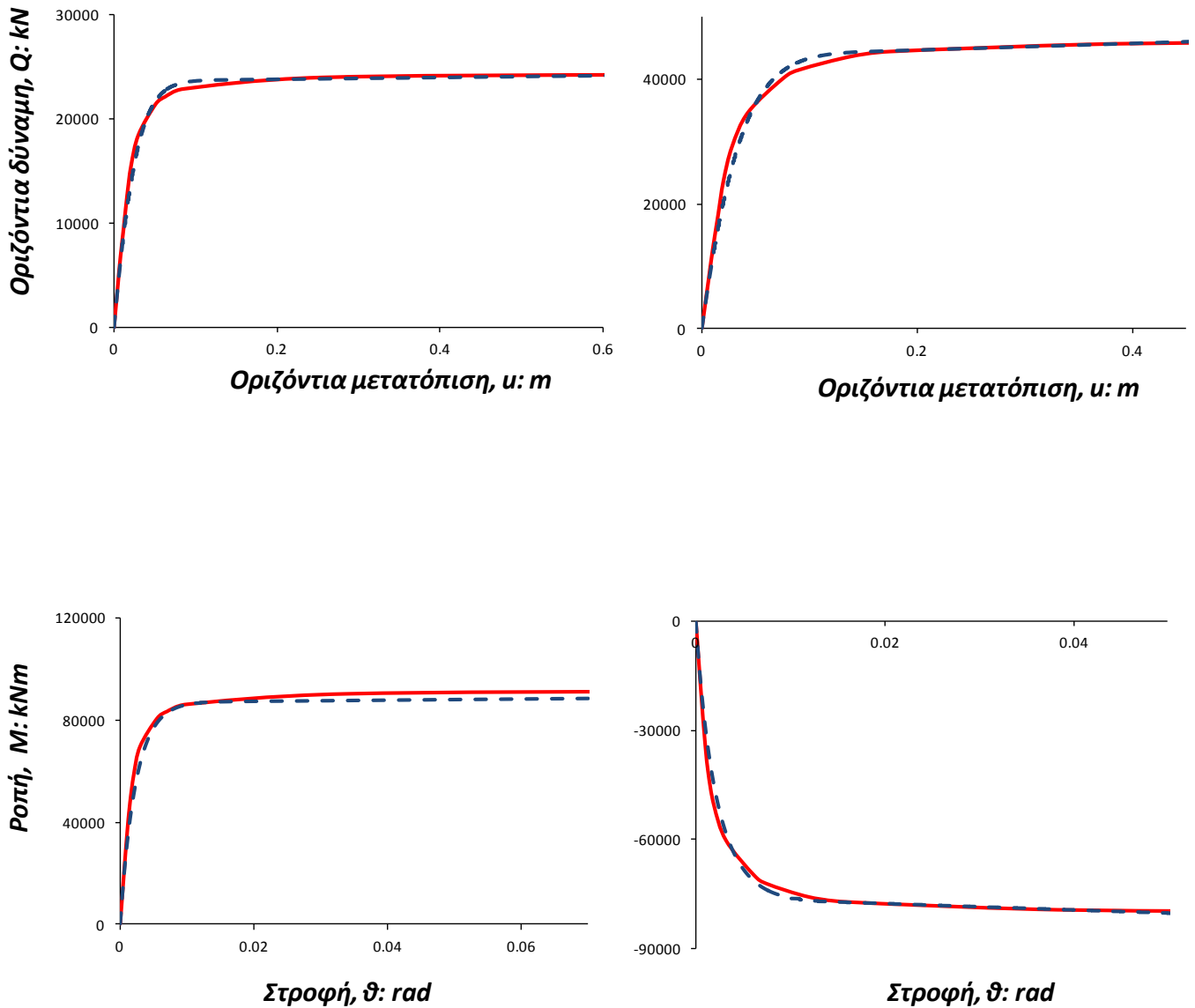


**Σχήμα 6.13.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.

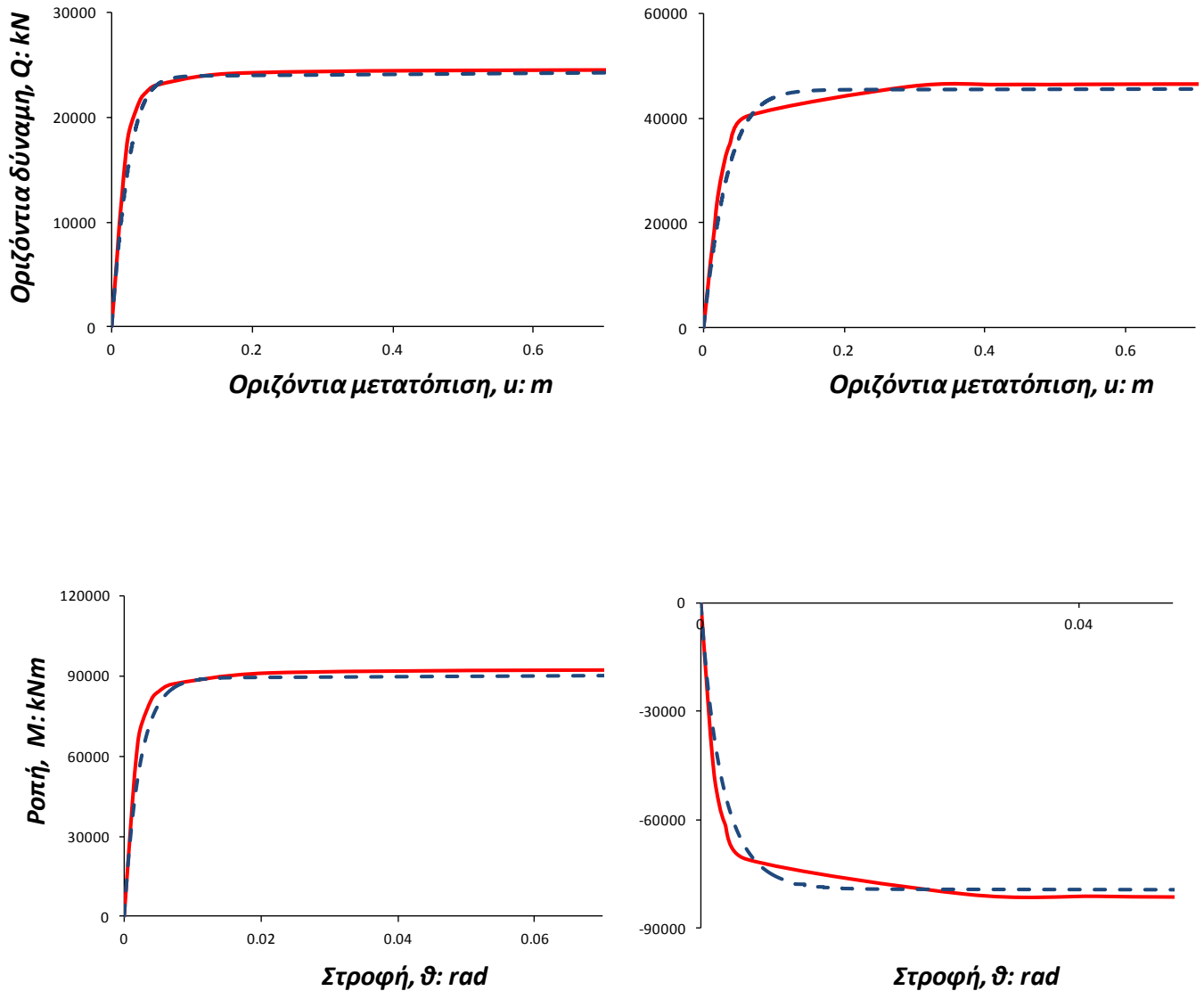




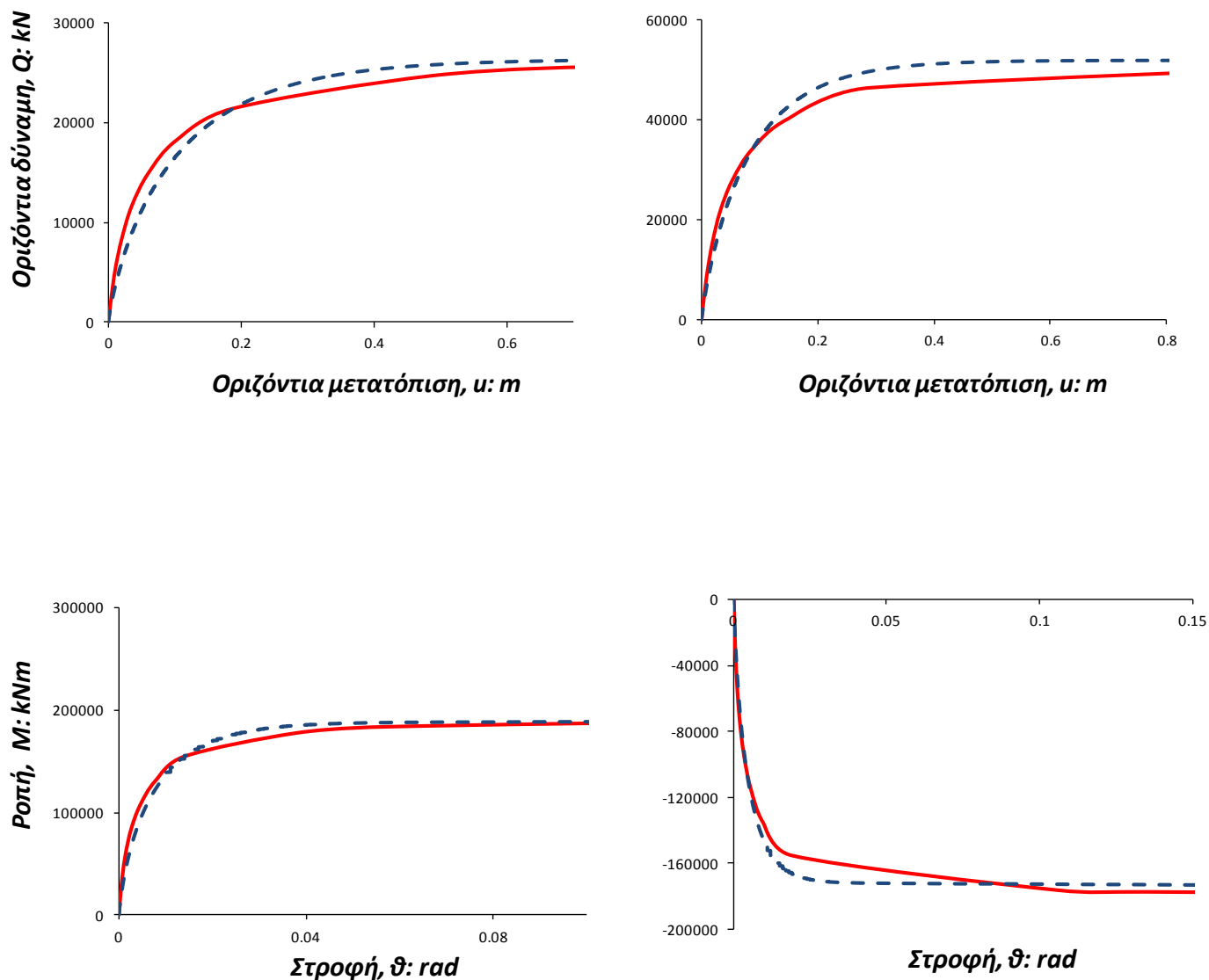
**Σχήμα 6.14.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.



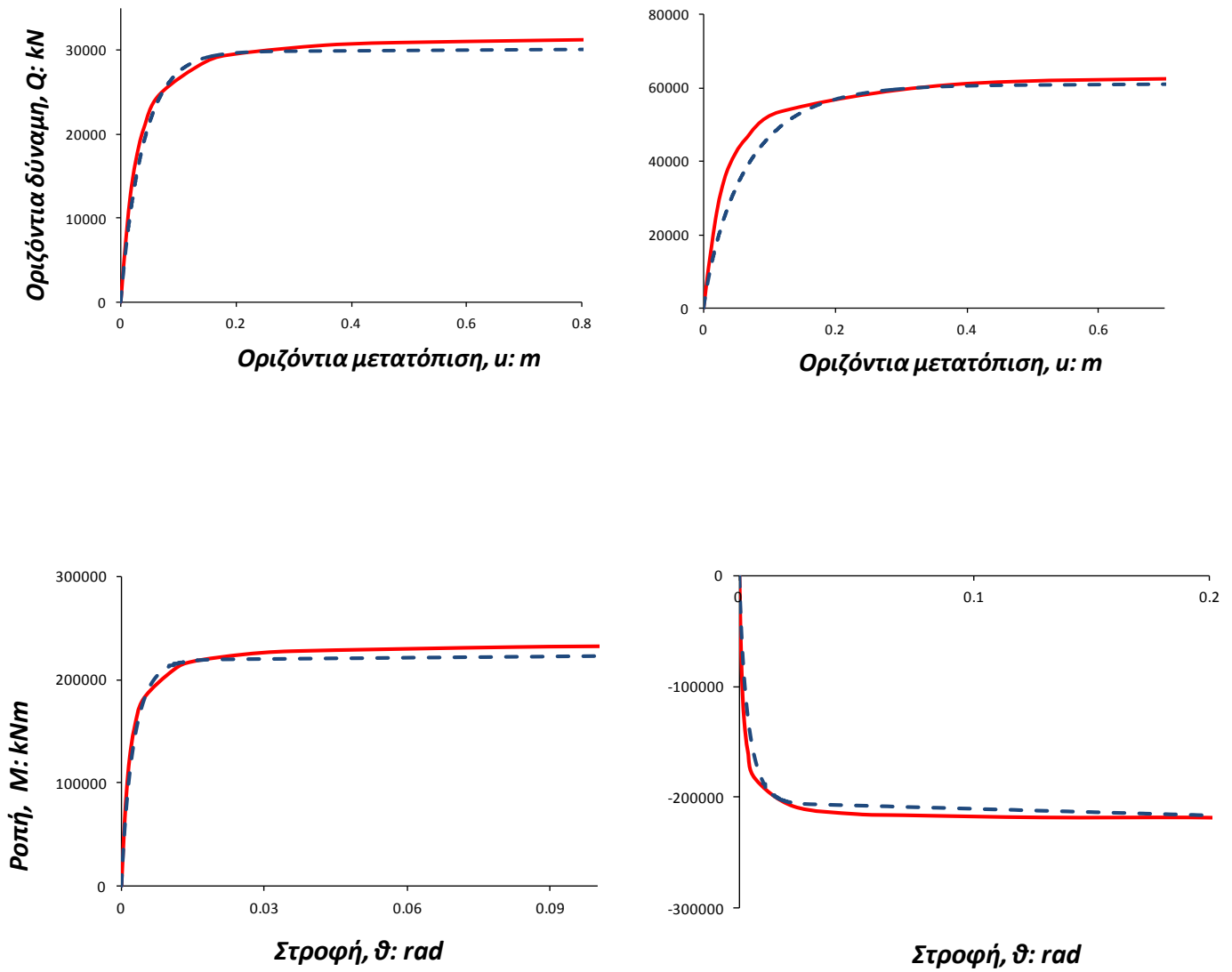
**Σχήμα 6.15.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 5$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.



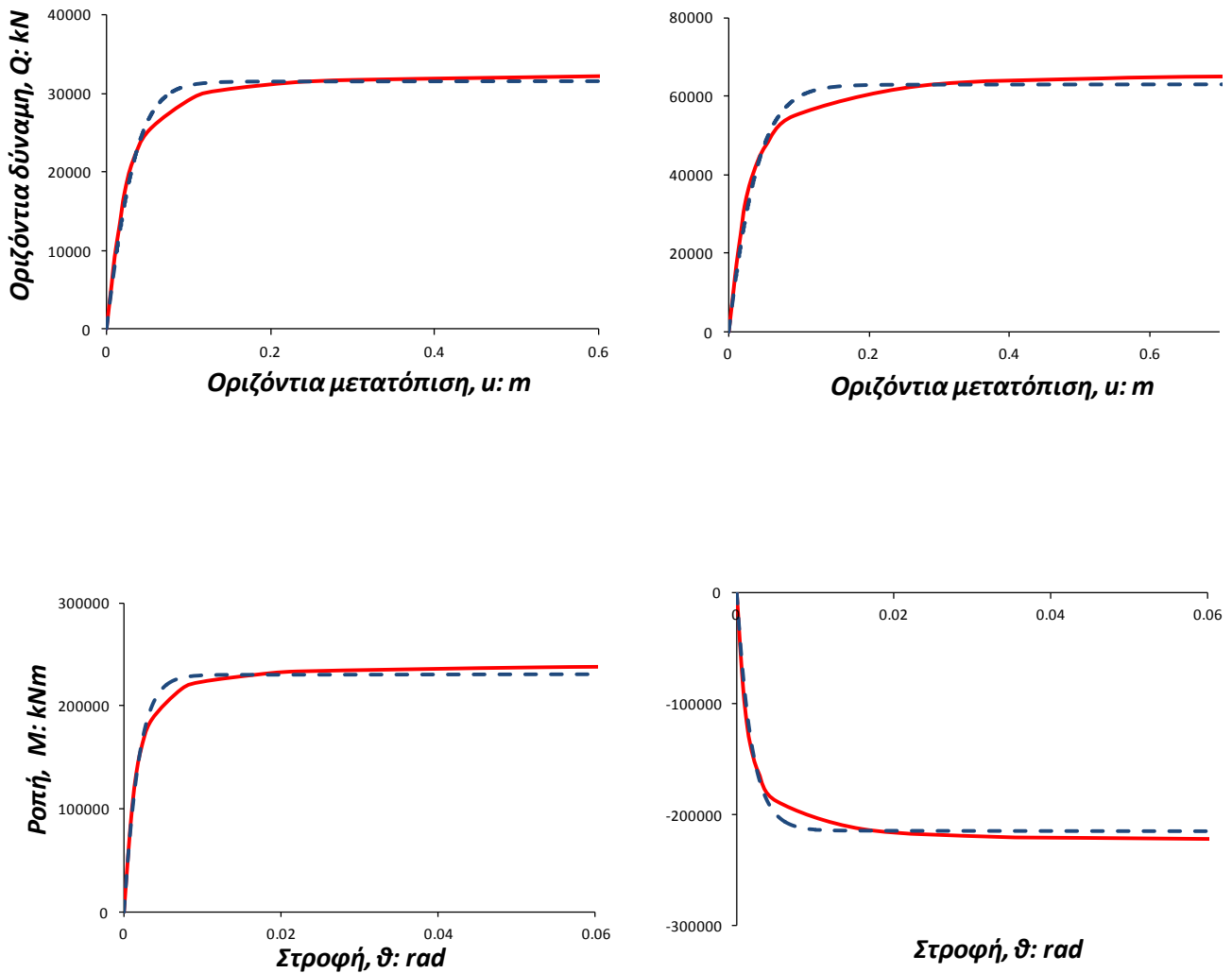
**Σχήμα 6.16.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.



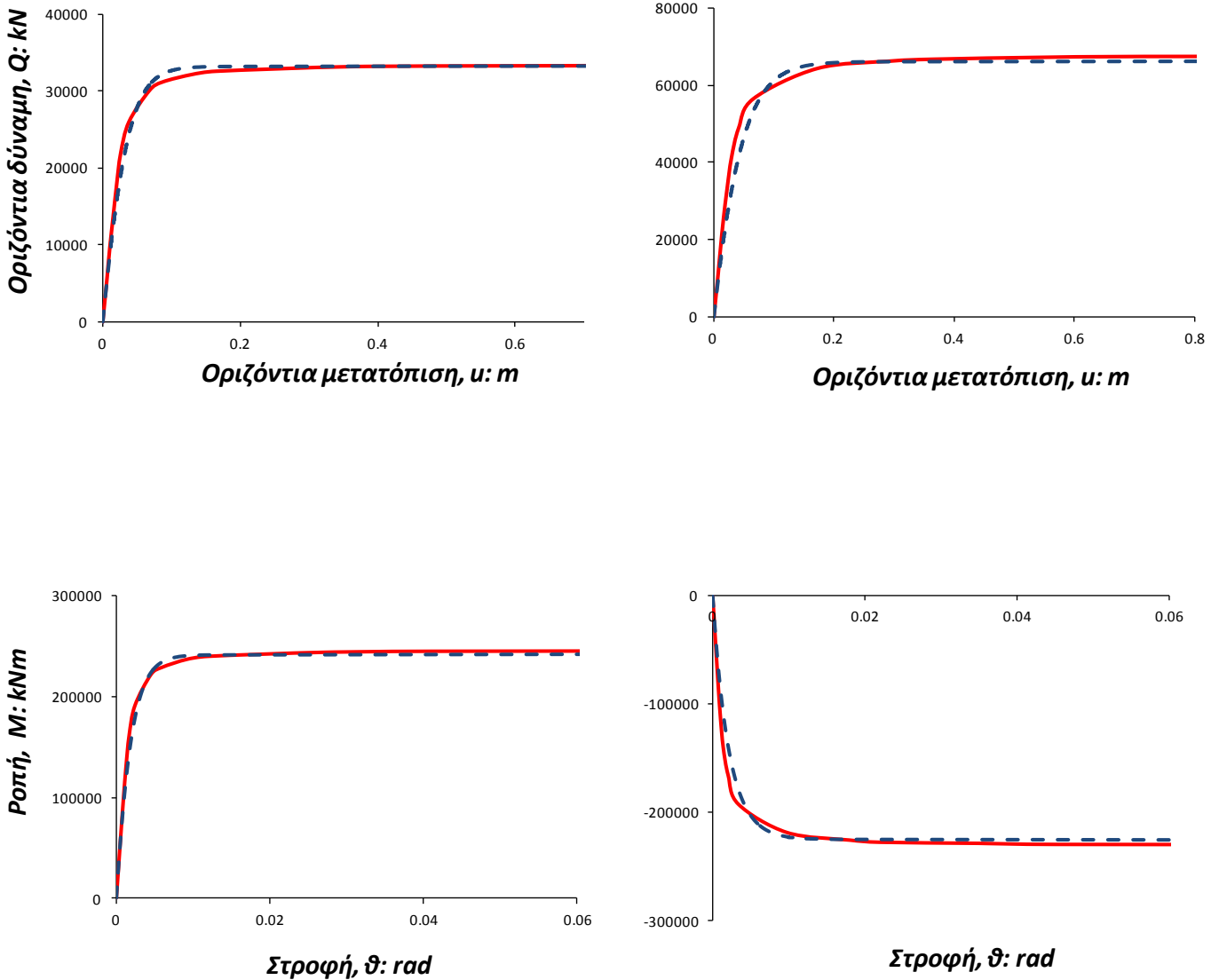
**Σχήμα 6.17.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.25$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.



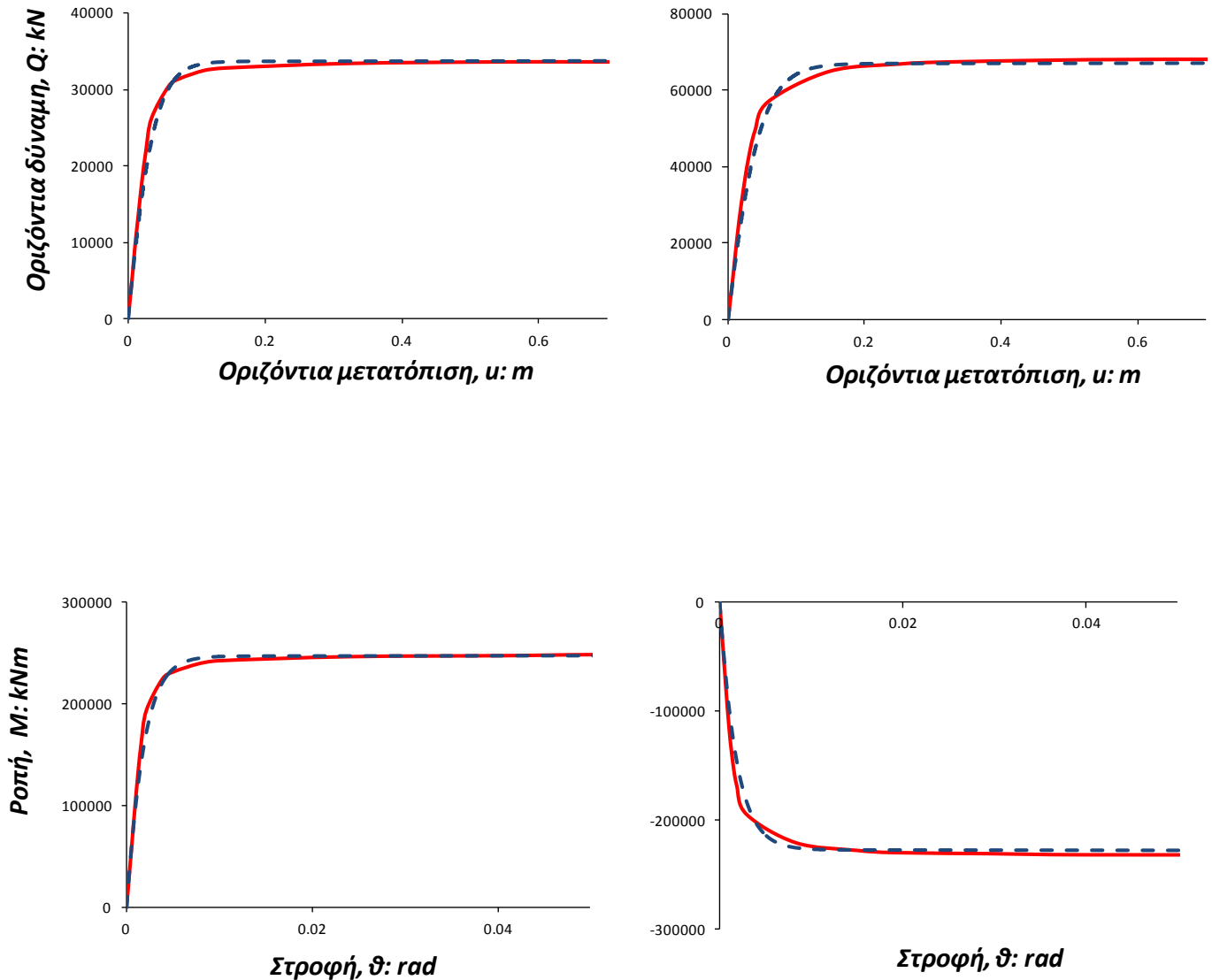
**Σχήμα 6.18.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.



**Σχήμα 6.19.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.

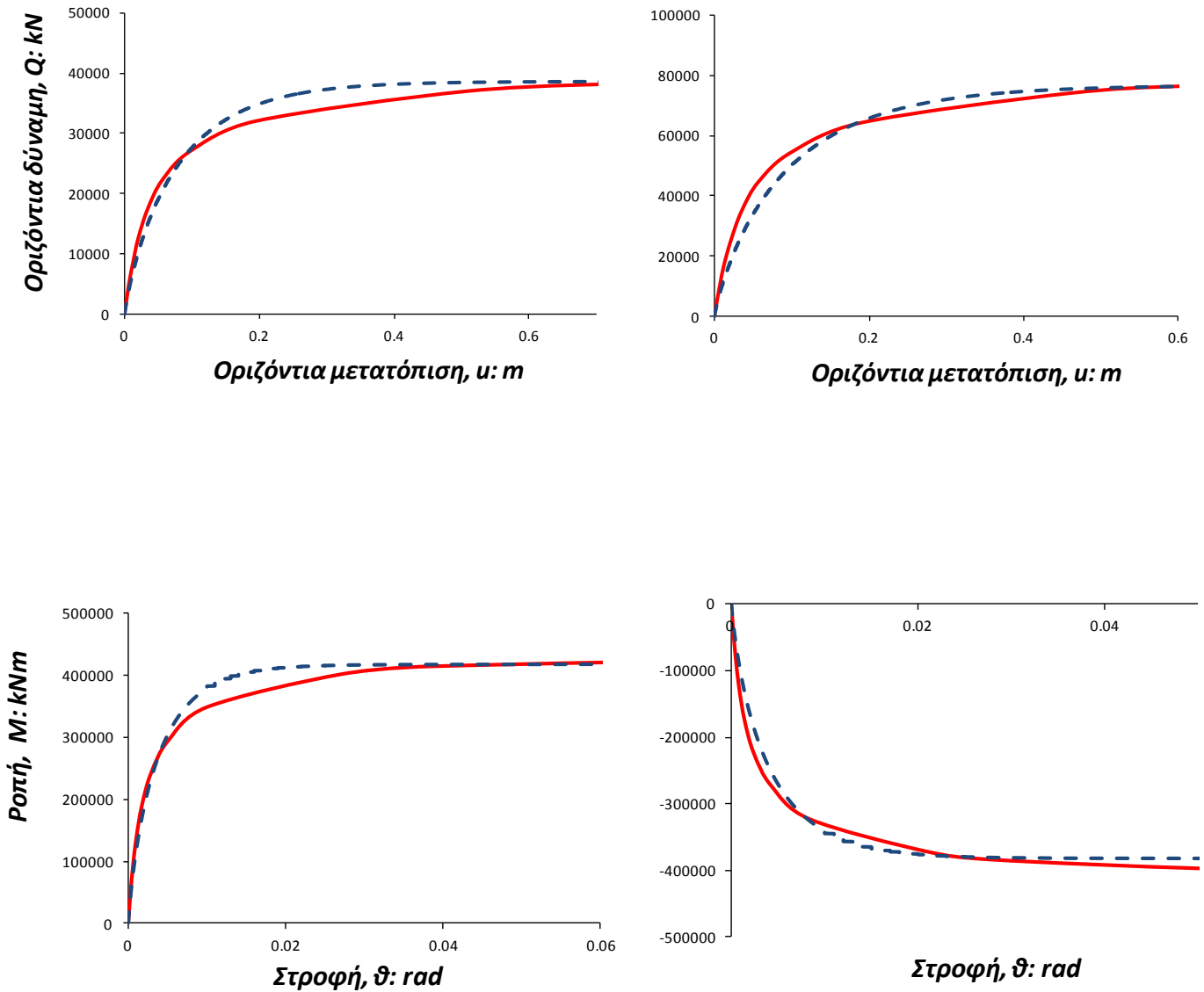


**Σχήμα 6.20.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 5$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.

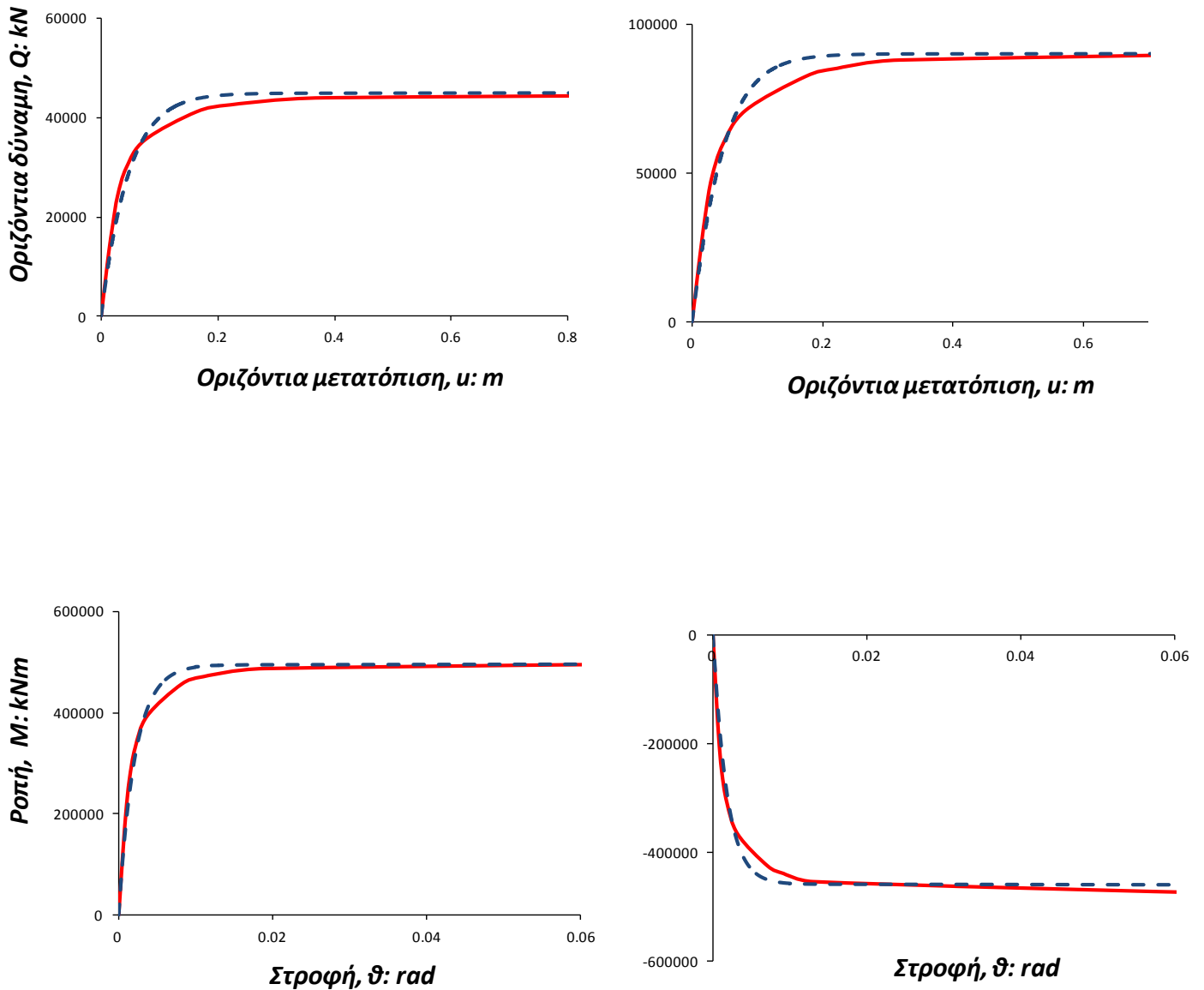


**Σχήμα 6.21.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 2$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.

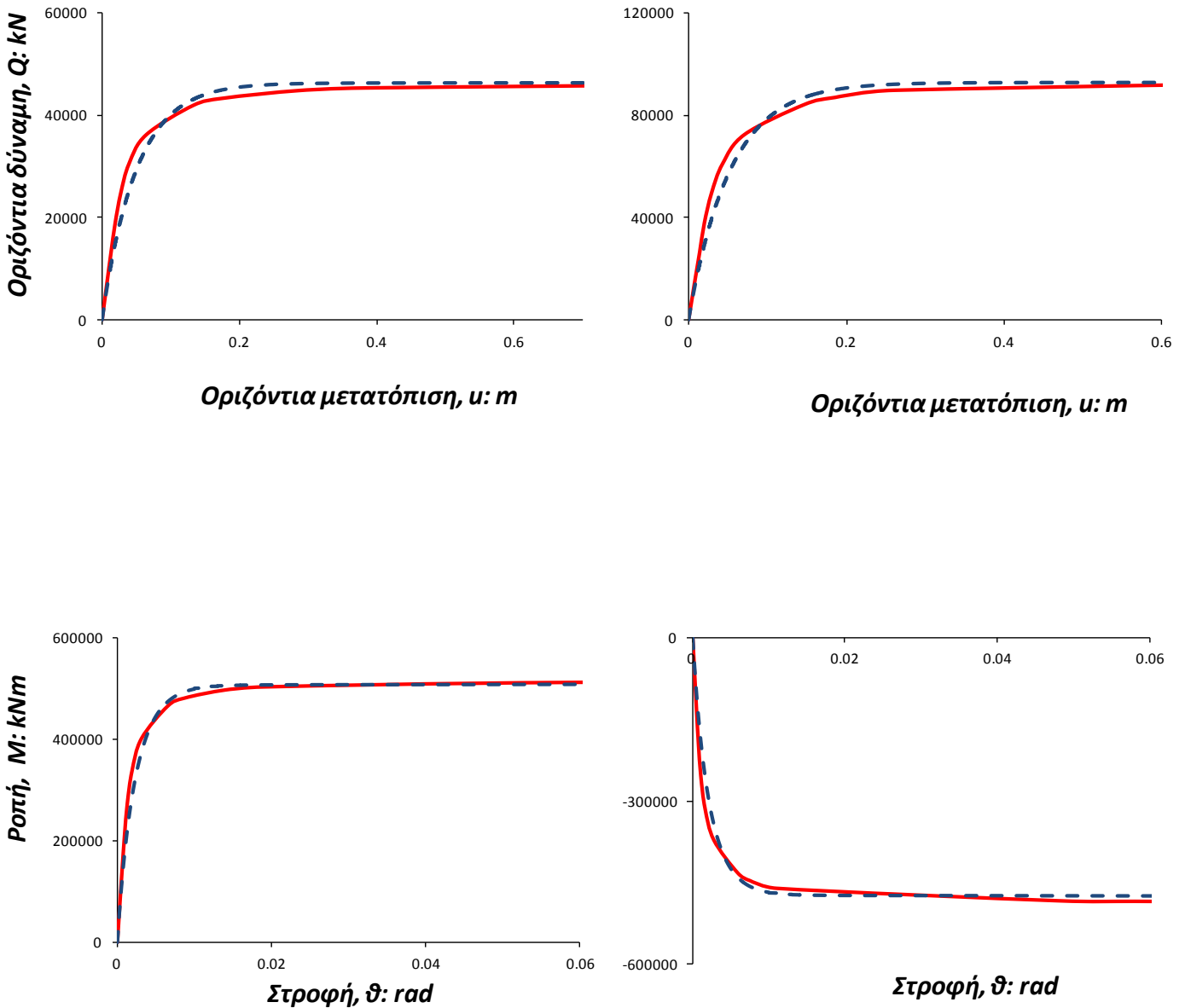




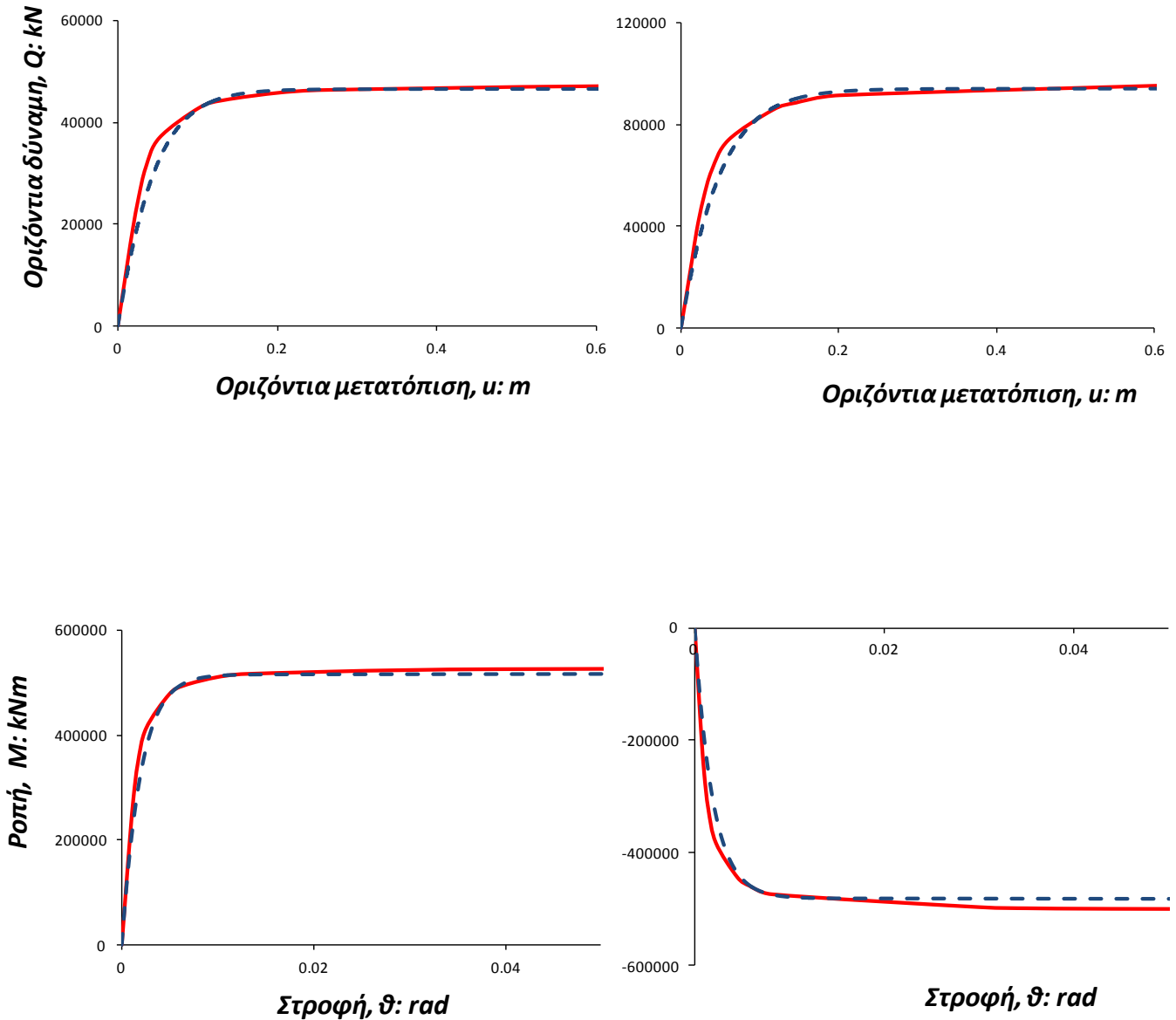
**Σχήμα 6.22.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.25$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.



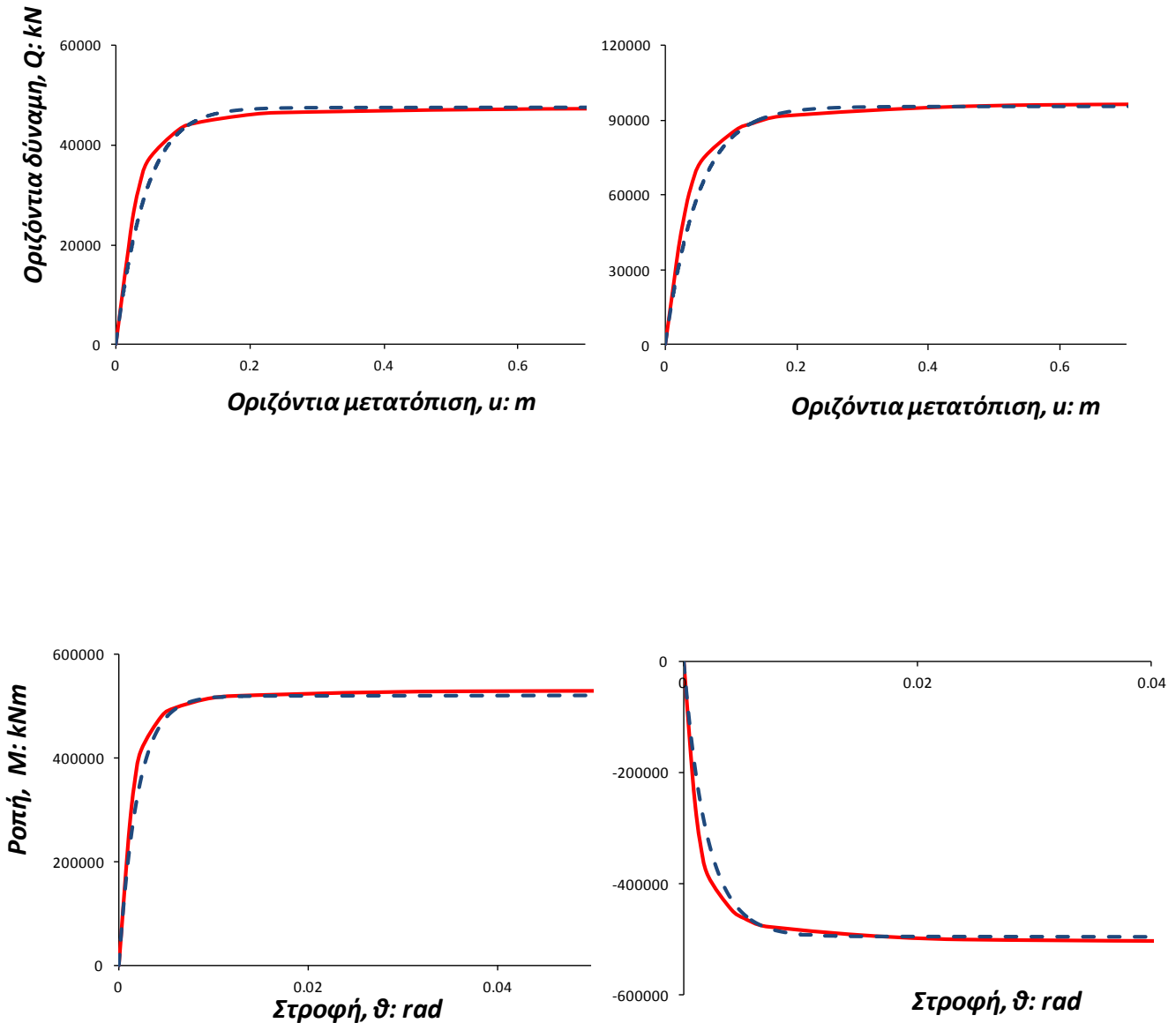
**Σχήμα 6.23.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.



**Σχήμα 6.24.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.

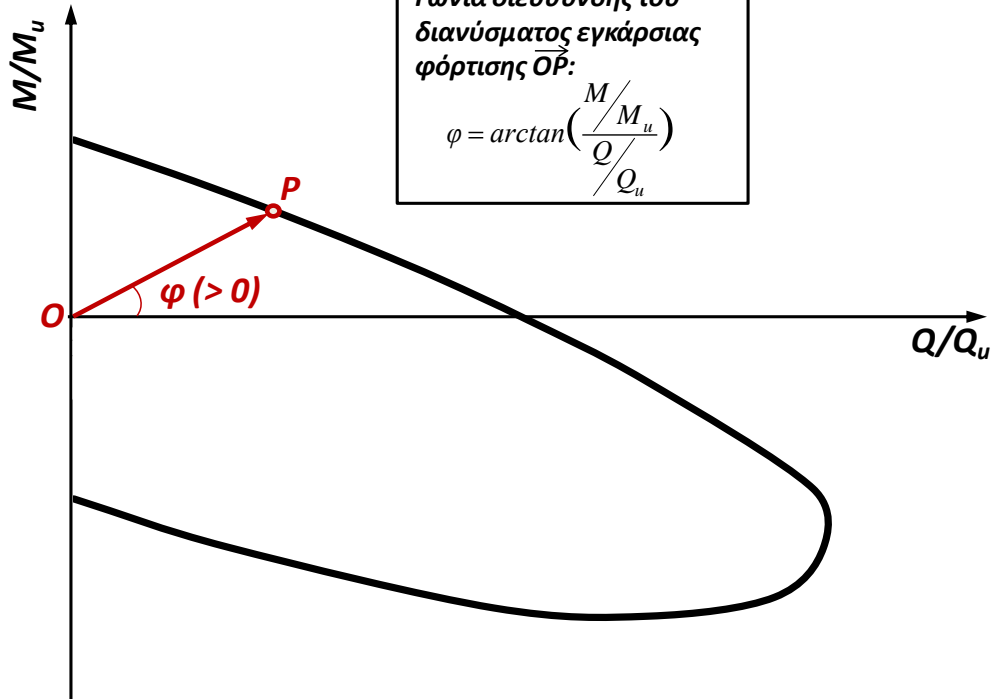


**Σχήμα 6.25.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 5$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.

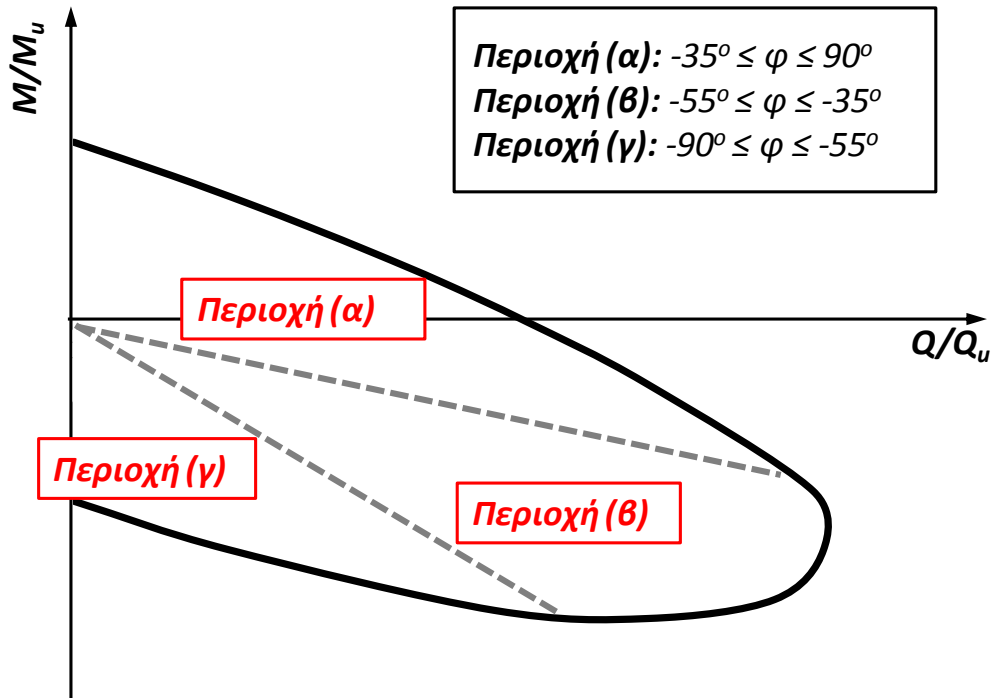


**Σχήμα 6.26.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής-στροφής στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης. Η εγκιβωτισμένη θεμελίωση χαρακτηρίζεται από λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$ . Με κόκκινη συνεχή γραμμή σχεδιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και με μπλε διακεκομμένη γραμμή οι “προβλέψεις” του “μακρο- στοιχείου”. Απεικονίζονται δύο περιπτώσεις σημείων επί των καμπυλών αλληλεπίδρασης (στο επίπεδο φόρτισης  $M - Q$ ): (α) τα διαγράμματα στα αριστερά αναφέρονται σε σημείο του πρώτου τεταρτημορίου και (β) τα διαγράμματα στα δεξιά αναφέρονται σε σημείο του τέταρτου τεταρτημορίου.

(α)



(β)

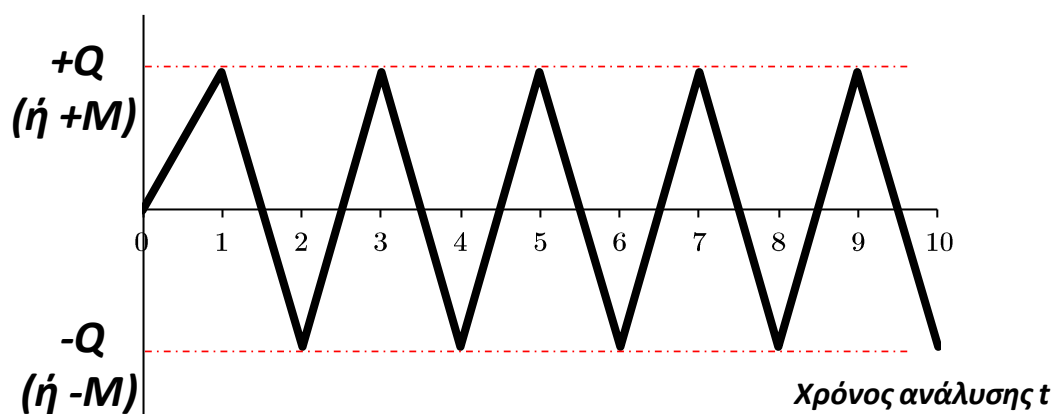


(γ)

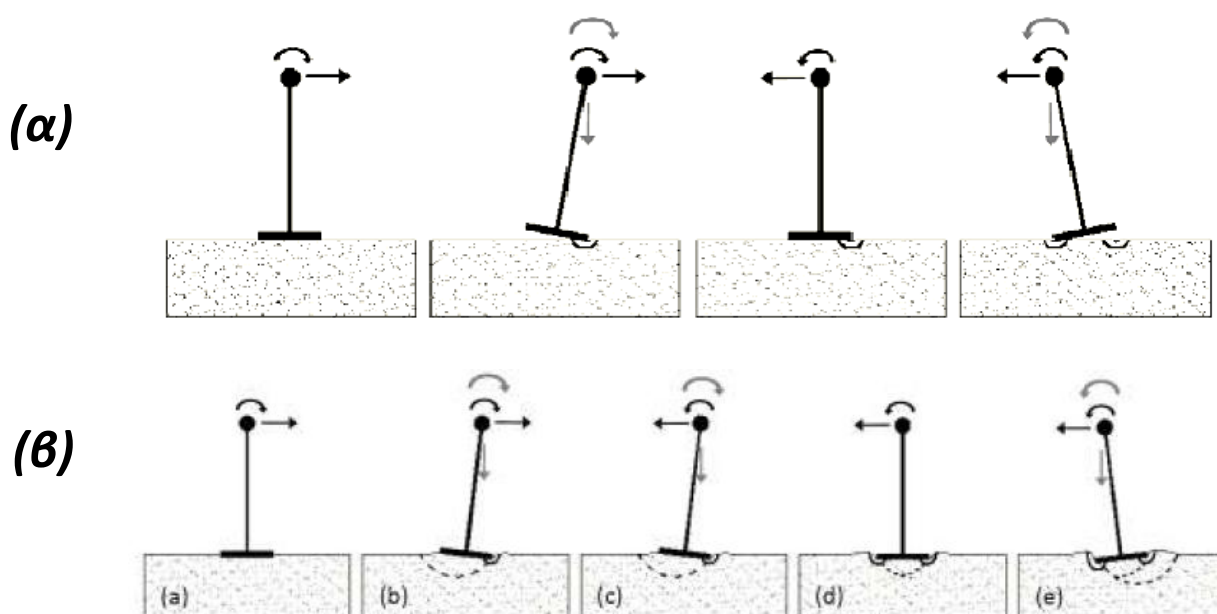
**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1**

		Περιοχή (α)	Περιοχή (β)	Περιοχή (γ)
$FS_v$		$n \approx$	$n \approx$	$n \approx$
<b><math>D/B = 1</math></b>	1.25	0.1	0.5	0.1
	1.66	0.25	0.2	0.2
	2	0.3	0.35	0.4
	2.5	0.4	0.45	0.3
	5	0.5	0.75	0.3
	10	0.5	0.7	0.9
	$\infty$	0.5	0.7	0.95
<b><math>D/B = 2</math></b>	1.25	0.15	0.4	0.2
	1.66	0.2	0.45	0.4
	2	0.4	0.6	0.8
	2.5	0.7	0.65	0.65
	5	0.6	0.6	0.55
	10	0.7	0.6	0.65
	$\infty$	0.8	0.8	0.6
<b><math>D/B = 3</math></b>	1.25	0.2	0.75	0.25
	1.66	0.3	0.3	0.2
	2	0.4	0.35	0.7
	2.5	0.4	0.35	0.35
	5	0.5	0.5	0.45
	10	0.5	0.55	0.5
	$\infty$	0.55	0.55	0.25

**Σχήμα 6.27.** (α) Ορισμός της χαρακτηριστικής γωνίας διεύθυνσης  $\varphi$ , του διανύσματος εγκάρσιας φόρτισης. (β) Οι τρεις περιοχές που καθορίζονται με σκοπό την παρουσίαση των συστάσεων για την παράμετρο κράτνσης  $n$ . (γ) Συγκεντρωτικός πίνακας παρουσίασης των προτεινόμενων συστάσεων για τις τιμές της παραμέτρου κράτνσης  $n$ , συναρτήσει των μεταβλητών του εξεταζόμενου προβλήματος των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων: (i) λόγος εγκιβωτισμού  $D/B$ , (ii) συντελεστής ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$  και (γ) χαρακτηριστική γωνία διεύθυνσης του διανύσματος εγκάρσιας φόρτισης  $\varphi$  (εκφρασμένη μέσω των τριών χαρακτηριστικών περιοχών).

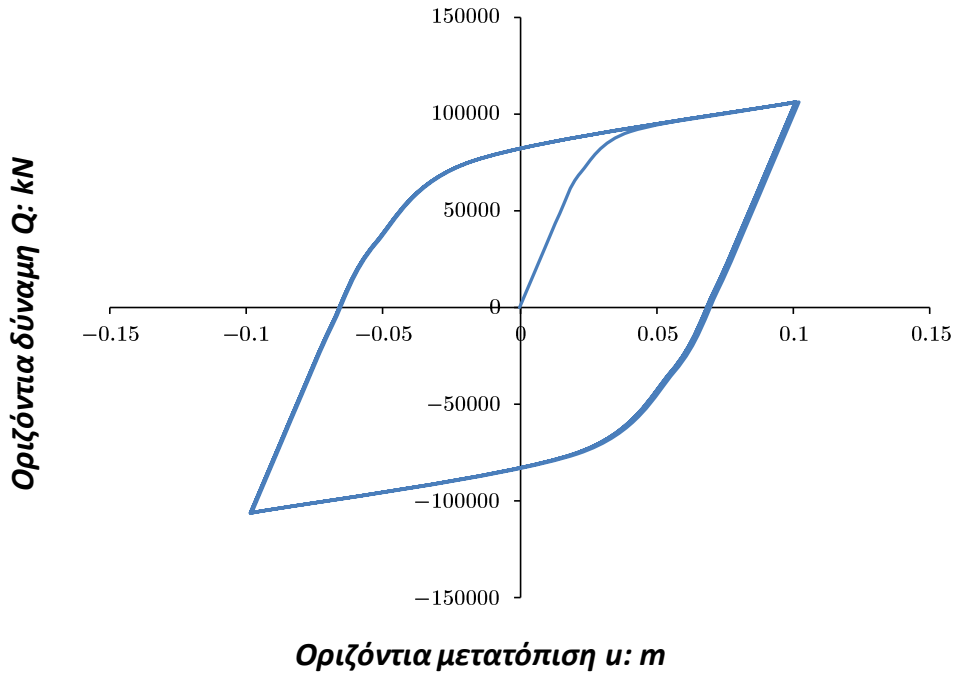


**Σχήμα 6.28.** Τυπικό προφίλ των επιβαλλόμενων (στατικά) ανακυκλικών φορτίσεων οριζόντιων δυνάμεων (ή ροπών) στην κορυφή των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων. Οι επιβαλλόμενες “χρονοϊστορίες” διέπονται από την συμμετρία τους ως προς τον χρόνο της ανάλυσης  $t$ .

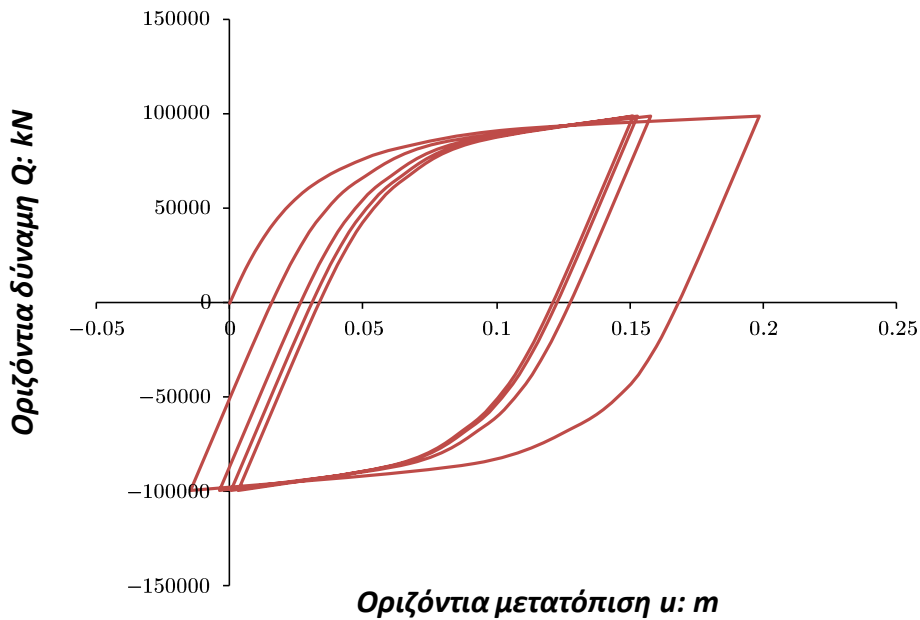


**Σχήμα 6.29.** Απόκριση επιφανειακών θεμελιώσεων υψίκορμης ανωδομής, υπό ανακυκλική (στατική) φόρτιση [Παναγιωτίδου, Γκαζέτας και Γερόλυμος 2010]: (α) συμμετρική απόκριση για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 5$  (ελαφρώς φορτισμένη θεμελίωση) και (β) απώλεια της συμμετρίας στην απόκριση για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 1.25$  (βαριά φορτισμένη θεμελίωση).

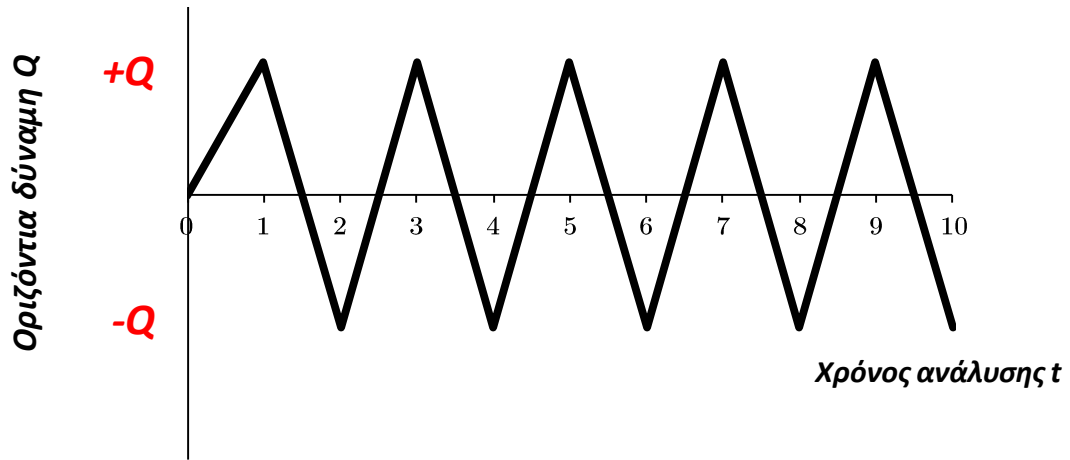




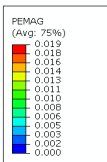
**Σχήμα 6.30.** Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης, για επιβαλλόμενη ανακυκλική φόρτιση οριζόντιας δύναμης στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ . Ο συντελεστής ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση αντιστοιχεί σε άπειρη τιμή ( $\alpha = 0$ ), με αποτέλεσμα να παρατηρείται πλήρης **συμμετρία** στην απόκριση του συστήματος.



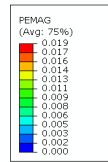
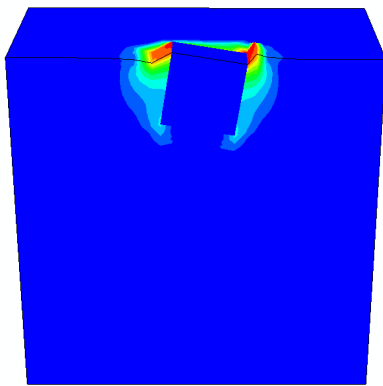
**Σχήμα 6.31.** Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης στην κορυφή βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης, με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$  και συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = 2.5$ . Παρά την (αρχική) συμμετρία του συστήματος, και τα συμμετρικά χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης ανακυκλικής φόρτισης, εντοπίζεται η έντονα **ασύμμετρη** απόκριση της θεμελίωσης: ο ορισμός του φαινομένου της προοδευτικής “μακροσκοπικής” κράτynσης του συστήματος με μειούμενο ρυθμό.



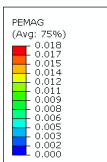
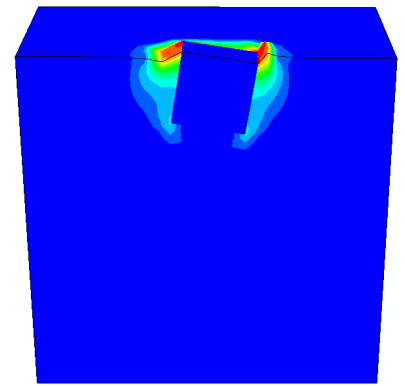
Σχήμα 6.32. Το προφίλ των επιβαλλόμενων ανακυκλικών φορτίσεων οριζόντιας δύναμης  $Q$ , για τις δύο περιπτώσεις συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v = \infty$  και  $FS_v = 0$ .



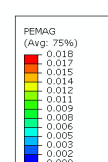
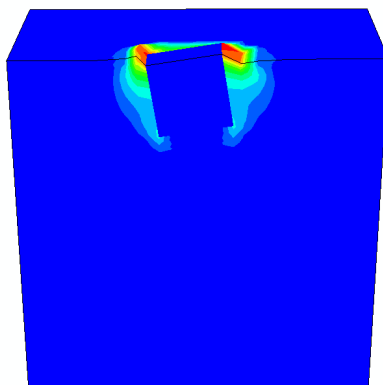
**t = 1**



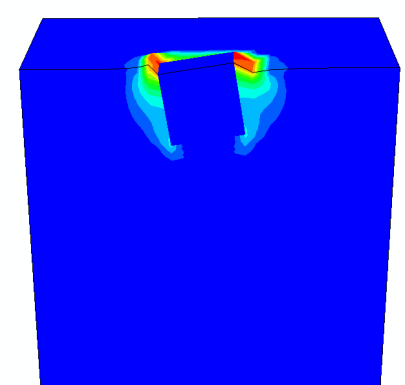
**t = 3**

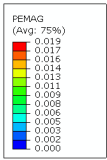


**t = 2**

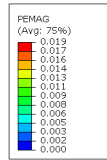
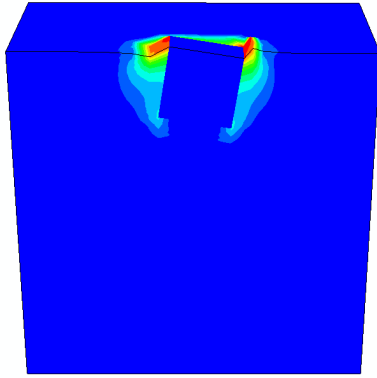


**t = 4**

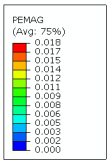
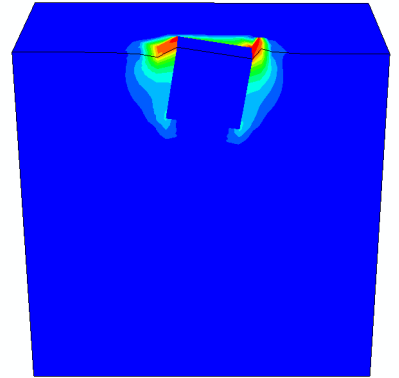




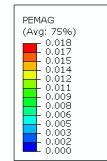
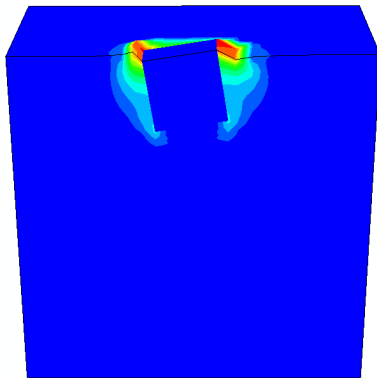
$t = 5$



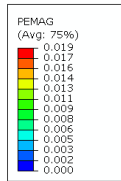
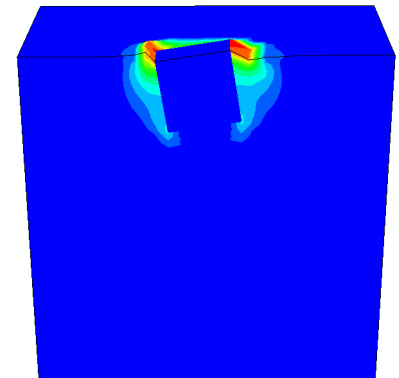
$t = 7$



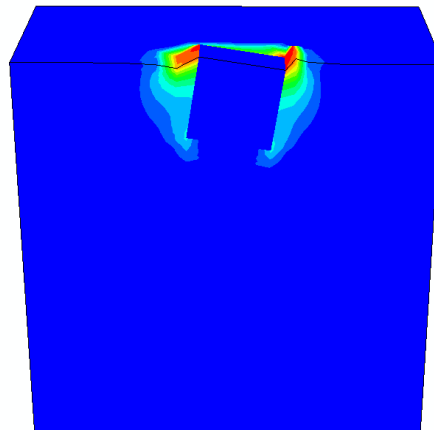
$t = 6$



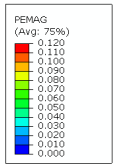
$t = 8$



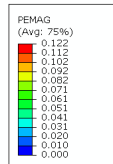
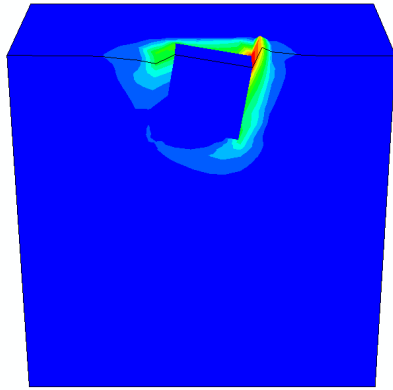
$t = 9$



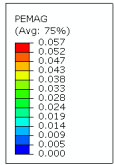
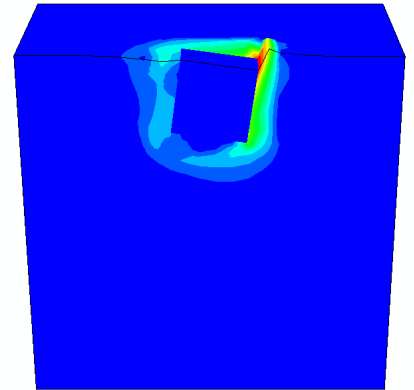
**Σχήμα 6.33.** Στιγμιότυπα των ισοϋψών των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , υπό ανακυκλική φόρτιση οριζόντιας δύναμης στην κεφαλή της. Ο συντελεστής ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση ισούται με  $FS_v = \infty$ , με αποτέλεσμα να παρατηρείται πλήρης **συμμετρία** στην απόκριση του συστήματος θεμελίωσης, καθώς δεν ενεργοποιείται ο μακροσκοπικός μηχανισμός κράτνυσης.



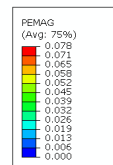
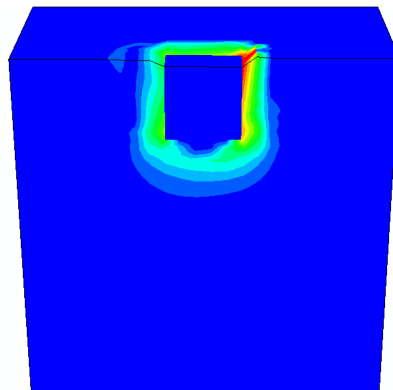
**t = 1**



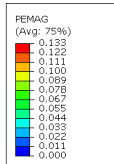
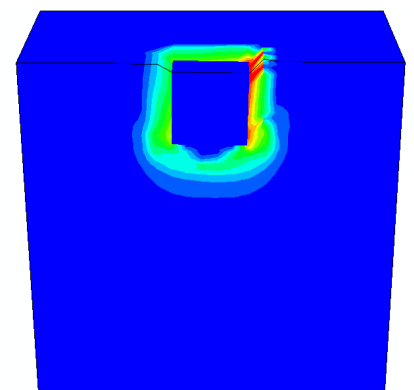
**t = 3**



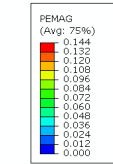
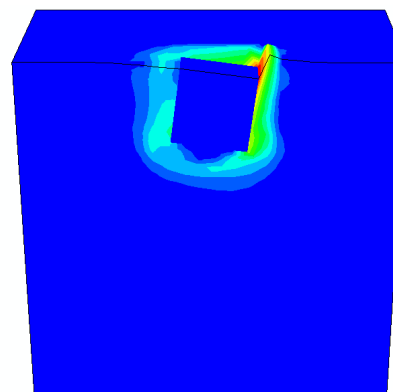
**t = 2**



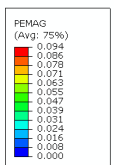
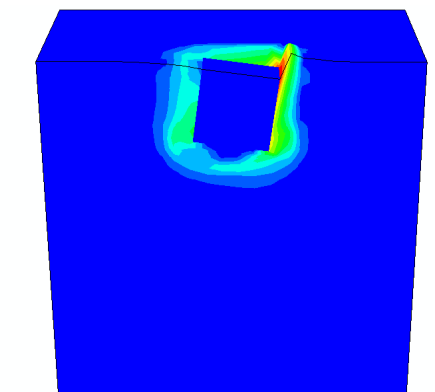
**t = 4**



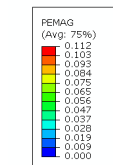
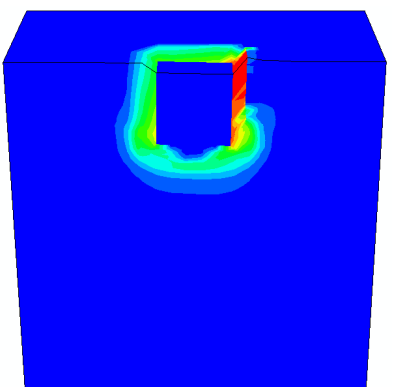
**t = 5**



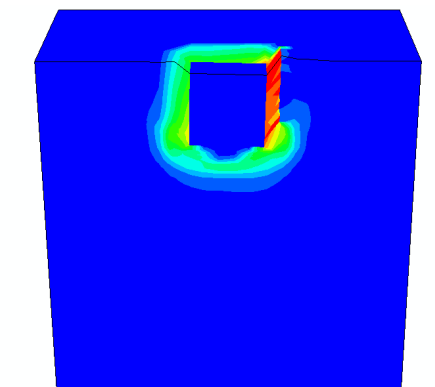
**t = 7**

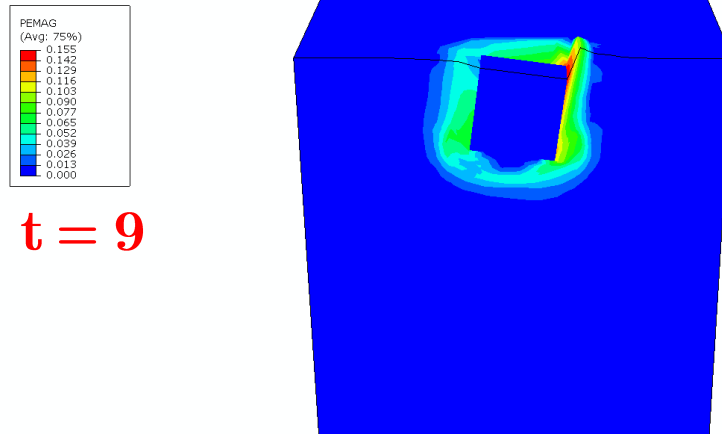


**t = 6**

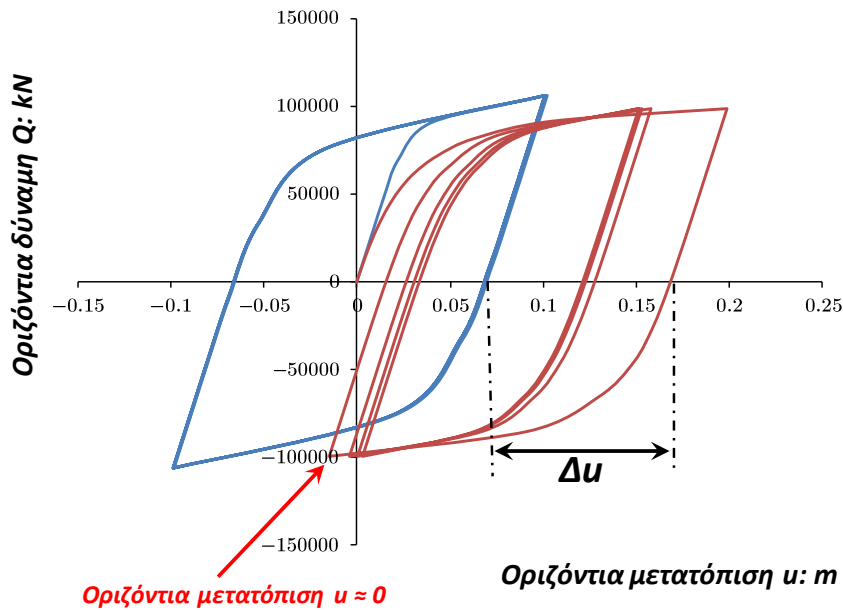


**t = 8**

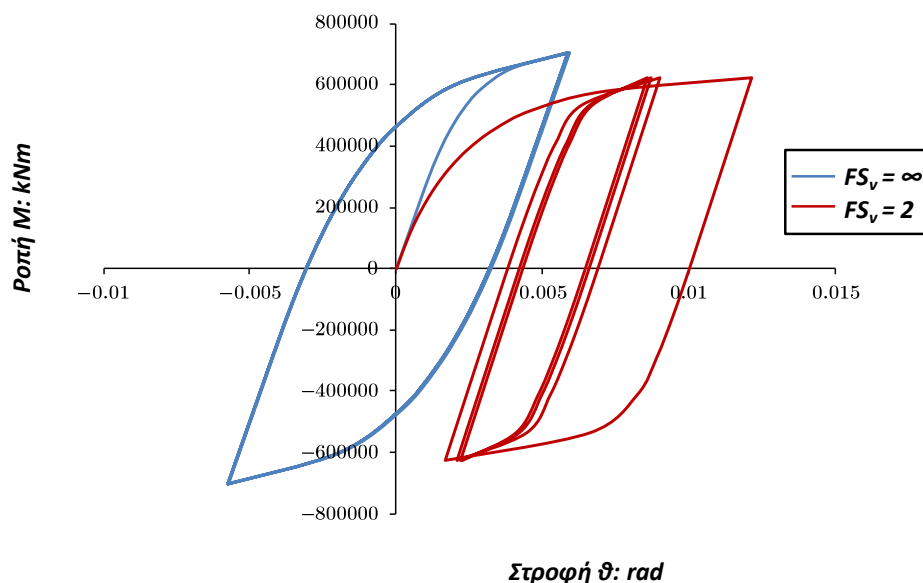




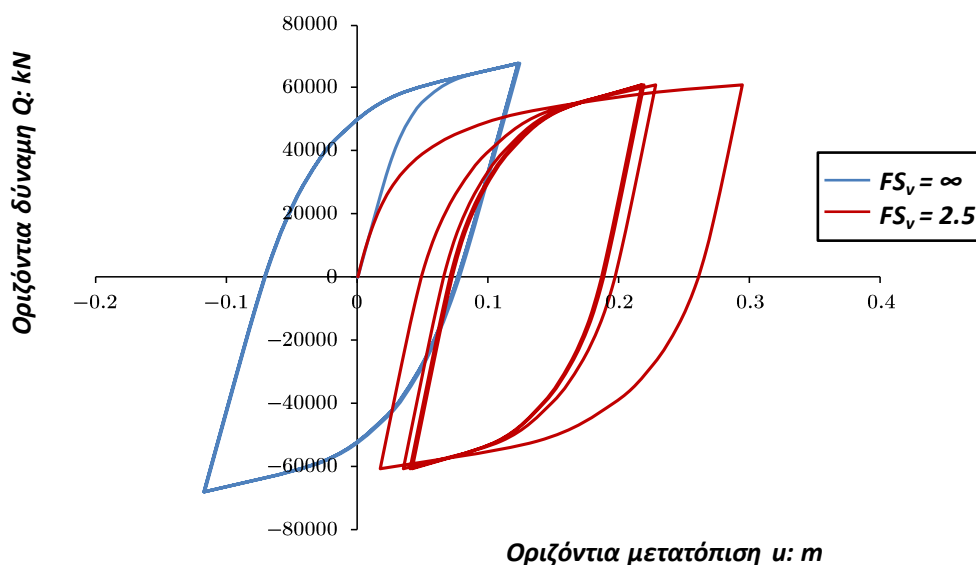
**Σχήμα 6.34.** Στιγμιότυπα των ισοϋψών των πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων εγκιβωτισμένης θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , υπό ανακυκλική φόρτιση οριζόντιας δύναμης στην κεφαλή της. Ο συντελεστής ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση ισούται με  $FS_v = 2.5$ , με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται ο μηχανισμός μακροσκοπικής κράτυνσης, και το σύστημα θεμελίωσης να εμφανίζει έντονα **ασύμμετρη** συμπεριφορά.



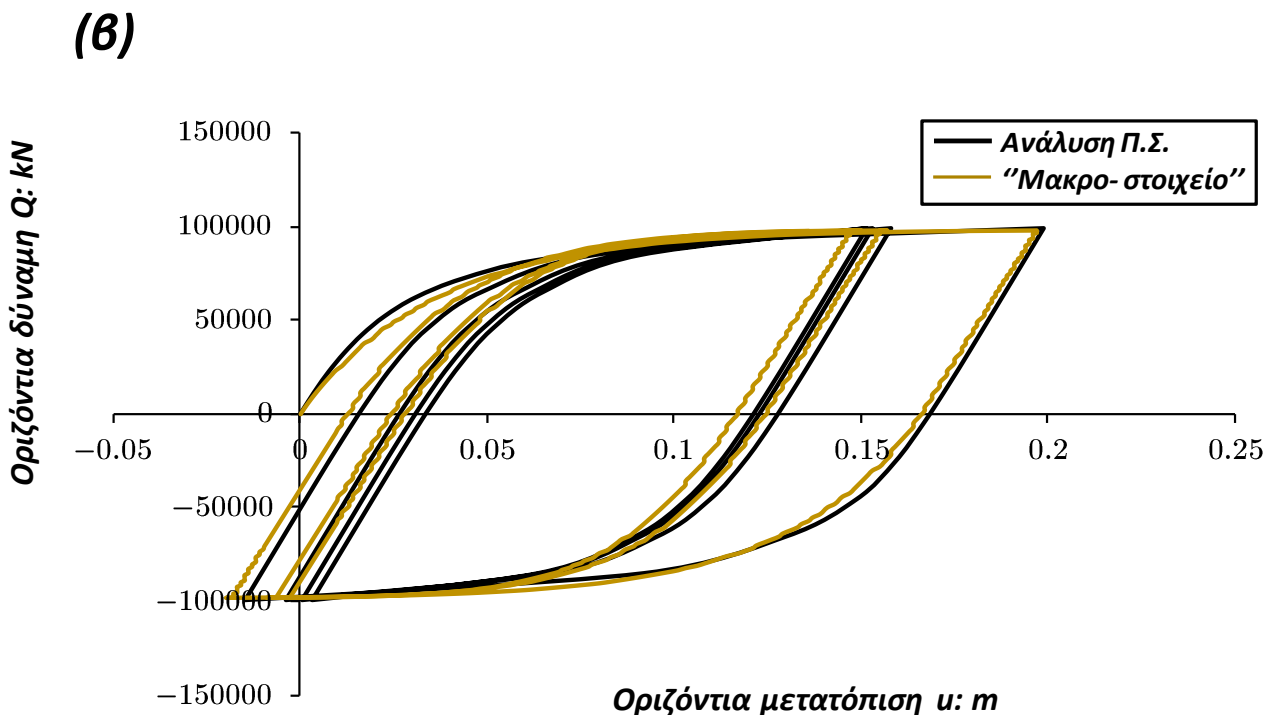
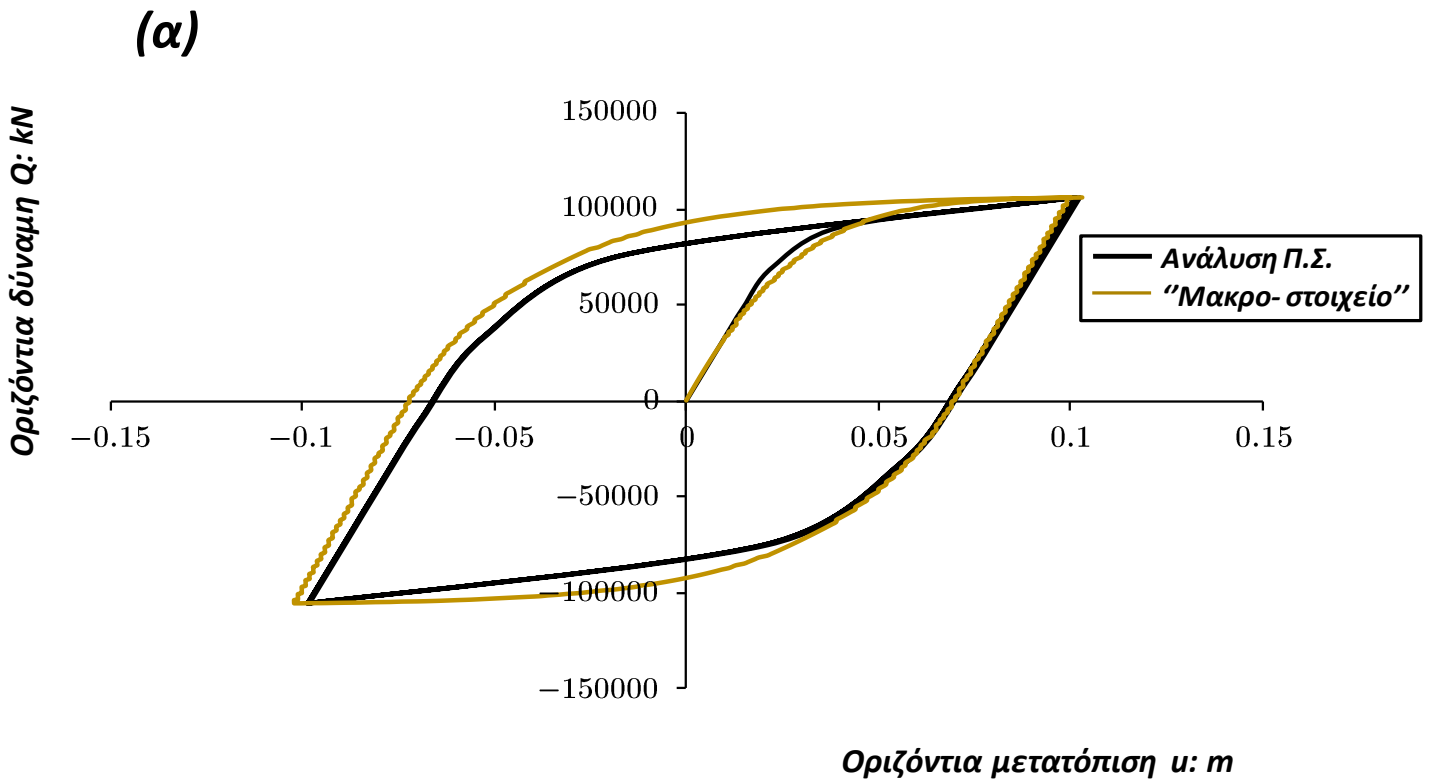
**Σχήμα 6.35.** Σχεδίαση σε κοινό διάγραμμα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης των δύο διαφορετικών περιπτώσεων συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση. Σε χρόνο ανάλυσης  $t = 1.5$  παρατηρείται διαφορά στην τιμή της οριζόντιας μετατόπισης της θεμελίωσης ( $\Delta u \approx 0.1$  m), ενώ σε χρόνο ανάλυσης  $t = 2$  (περίπτωση  $FS_v = 2.5$ ) η θεμελίωση επαναφέρεται στην αρχική της θέση ( $u \approx 0$ ).



**Σχήμα 6.36.** Διαγράμματα ροπής- στροφής βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ ) υπό ανακυκλική φόρτιση ροπής στην κεφαλή της, για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση: (α)  $FS_v = \infty$  (πλήρης συμμετρία στην απόκριση) και (β)  $FS_v = 2$  (φαινόμενο μακροσκοπικής κράτνυσης με μειούμενο ρυθμό).

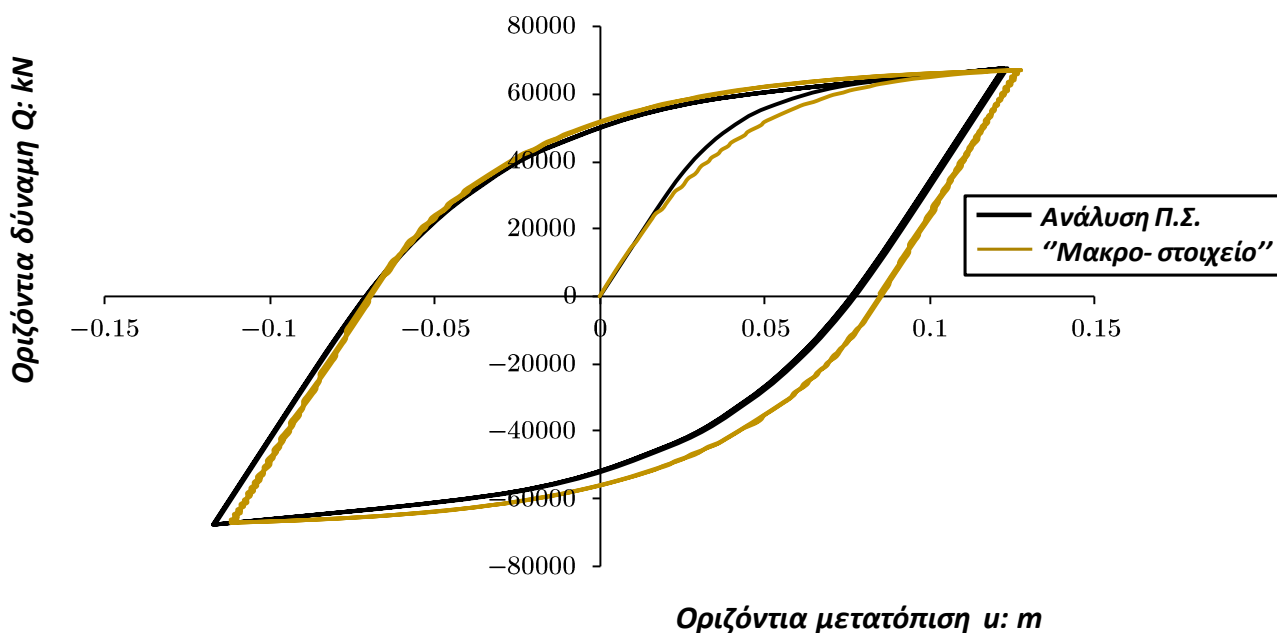


**Σχήμα 6.37.** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης (με λόγο εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ ) υπό ανακυκλική φόρτιση οριζόντιας δύναμης στην κεφαλή της, για δύο συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση (α)  $FS_v = \infty$  και (β)  $FS_v = 2.5$ . Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με την περίπτωση λόγου εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ .

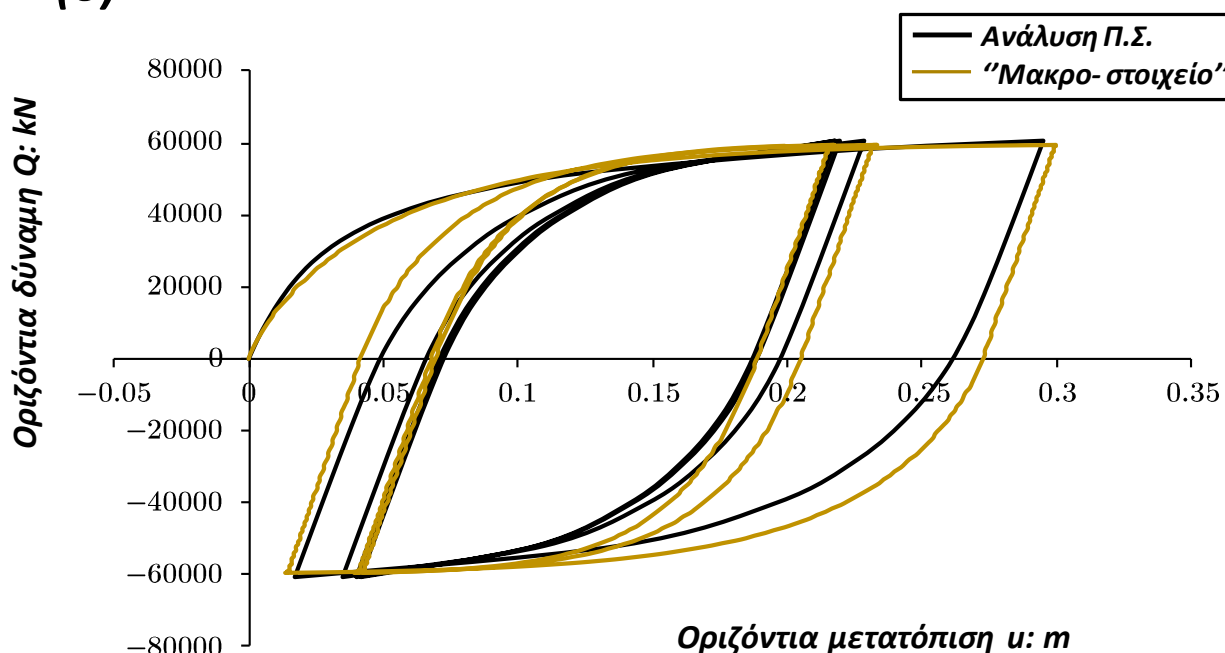


**Σχήμα 6.38.** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, σε σχέση με τις προβλέψεις του "μακρο-στοιχείου". Εγκιβωτισμένη θεμελίωση λόγω εγκιβωτισμού  $D/B = 1$ , υπό ανακυκλική φόρτιση οριζόντιας δύναμης στην κορυφή της, και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση: (α)  $FS_v = \infty$  και (β)  $FS_v = 2.5$ . Παρατηρείται η θαυμαστή ταύτιση των προβλέψεων του "μακρο-στοιχείου" με τις "πραγματικές" καμπύλες.

(α)



(β)



**Σχήμα 6.39.** Σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, σε σχέση με τις προβλέψεις του “μακρο-στοιχείου”. Εγκιβωτισμένη θεμελίωση λόγου εγκιβωτισμού  $D/B = 3$ , υπό ανακυκλική φόρτιση οριζόντιας δύναμης στην κορυφή της, και για συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση: (α)  $FS_v = \infty$  και (β)  $FS_v = 2.5$ . Παρατηρείται η θαυμαστή **ταύτιση** των προβλέψεων του “μακρο-στοιχείου” με τις “πραγματικές” καμπύλες.





---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

### 7.1 Συμπεράσματα

Στην διπλωματική εργασία αυτή, μελετήθηκε η απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό συνδυασμένη εγκάρσια φόρτιση στην κεφαλή τους, για θεωρούμενες αστράγγιστες εδαφικές συνθήκες, μέσω της διεξαγωγής πολυάριθμων τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Ο βασικότερος στόχος που καταστρώθηκε εξ αρχής ήταν η κατάλληλη μαθηματική ανάπτυξη ενός “μακρο-στοιχείου”, το οποίο απαιτείται να είναι ικανό να περιγράψει αποτελεσματικά την εξεταζόμενη απόκριση των φρεάτων, δίχως την ανάγκη διεξαγωγής νέων και χρονοβόρων τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται η καθολική μελέτη του προβλήματος με βάση τις τέσσερις παρακάτω συνιστώσες: (α) ορισμός των επιφανειών διαρροής (yield surfaces) του συστήματος της θεμελίωσης στον γενικευμένο χώρο φόρτισης  $M - Q - N$ , (β) ορισμός του νόμου πλαστικής ροής (plastic flow rule) που δείχνει να έχει την βέλτιστη εφαρμογή στο πρόβλημα των φρεάτων θεμελίωσης, (γ) ορισμός της συμπεριφοράς του συστήματος στην περιοχή των πολύ μικρών μετακινήσεων (“οιωνεί” ελαστική συμπεριφορά), με την υιοθέτηση κατάλληλων δημοσιευμένων μητρώων δυσκαμψίας της βιβλιογραφίας και (δ) ορισμός του θεωρούμενου νόμου κράτυνσης (hardening law), αξιοποιώντας τους νόμους της θεωρίας της πλαστικότητας που αυτός επιτάσσει. Με βάση τα όσα έχουν αναπτυχθεί στα κεφάλαια που προηγήθηκαν, τα βασικότερα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν περιγράφονται (συνοπτικά) στις επόμενες παραγράφους:

- ✓ Προκειμένου να οριστούν οι επιφάνειες διαρροής της θεμελίωσης, απαιτείται να δημιουργηθούν οι καμπύλες αλληλεπίδρασης της. Εξετάζονται τρεις διαφορετικοί λόγοι εγκιβωτισμού ( $D/B = 1, 2$  και  $3$ ), και επτά διαφορετικοί συντελεστές ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση ( $FS_v = 1.25; 1.66; 2; 2.5; 5; 10$  και  $\infty$ ). Ακολούθως, παράγονται οι καμπύλες αλληλεπίδρασης της βαθιά εγκιβωτισμένης θεμελίωσης στο κύριο επίπεδο φόρτισης οριζόντιας δύναμης  $Q$ -ροπής  $M$ , και παρουσιάζονται στην κανονικοποιημένη τους μορφή. Στην μορφή αυτήν, οι καμπύλες αλληλεπίδρασης εμφανίζουν σταθερό σχήμα, ενώ ανεξαρτητοποιούνται πλήρως από την κατακόρυφη φόρτιση του φρέατος. Όσον αφορά τον λόγο εγκιβωτισμού, παρατηρείται μία μικρή διεύρυνση των καμπυλών (στον κλάδο της υπεραντοχής τους), η οποία δείχνει να εξαλείφεται σταδιακά καθώς ο λόγος εγκιβωτισμού αυξάνει.
- ✓ Οι καμπύλες αλληλεπίδρασης παράχθηκαν με χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων. Για την επαλήθευση της ορθότητάς τους, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την χρήση της μεθόδου των επιβαλλόμενων μετακινήσεων (δοκιμές τύπου "swipe"), η οποία- όπως έχει διατυπωθεί στην βιβλιογραφία- παράγει ακριβέστερα αποτελέσματα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο διαφορετικών μεθόδων προκύπτει αξιοσημείωτη ταύτιση μεταξύ τους, καθιστώντας άκρως αποτελεσματική και ορθή την διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία κατά την σχεδίαση των αριθμητικών αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.
- ✓ Έχοντας παράξει τις απαιτούμενες καμπύλες αλληλεπίδρασης, προτείνονται αναλυτικές εκφράσεις για την ποσοτικοποίησή τους. Αρχικώς, περιγράφονται μαθηματικά οι "καθαρές" αντοχές της θεμελίωσης υπό εγκάρσια φόρτιση ( $Q_u$  και  $M_u$ ), σε συνδυασμό με την περιγραφή της φέρουσας ικανότητάς της σε κατακόρυφη φόρτιση ( $N_u$ ). Οι εκφράσεις αυτές, μαζί με τα θεωρητικά συμπεράσματα για το σχήμα των εν λόγω καμπυλών, αξιοποιούνται κατάλληλα και συστήνονται οι εξισώσεις διαρροής των φρεάτων θεμελίωσης, τόσο στο εξεταζόμενο κύριο επίπεδο φόρτισης ( $f(M, Q) = 0$ ), όσο και στον τριδιάστατο γενικευμένο χώρο φόρτισης του συστήματος ( $f(M, Q, N) = 0$ ). Στις προτεινόμενες εξισώσεις διαρροής εισάγεται και ο συντελεστής διεύρυνσης των

καμπυλών αλληλεπίδρασης των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων (συντελεστής  $n_3$ ), ο οποίος είναι ικανός να περιγράψει την παρατηρούμενη διεύρυνση των καμπυλών συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $D/B$ . Επιπλέον, ο συντελεστής διεύρυνσης των καμπυλών δείχνει να σταθεροποιείται για  $D/B \approx 2$ , εισάγοντας ένα νέο ποσοτικό κριτήριο σχετικά με το τι θα πρέπει να εκλαμβάνεται ως βαθιά εγκιβωτισμένη θεμελίωση στην πράξη. Καθώς ο συντελεστής αυτός σταθεροποιείται, οι κανονικοποιημένες καμπύλες αλληλεπίδρασης των φρεάτων ταυτίζονται μεταξύ τους (ανεξάρτητα τόσο από τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ , όσο και από τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$ ), οδηγώντας το μελετώμενο πρόβλημα στην πλήρη ανεξαρτησία του από την γεωμετρία της θεμελίωσης και από τις εδαφικές παραμέτρους αντοχής (π.χ. αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$ ). Συνεπώς, το απαιτούμενο για την ανάπτυξη του “μακρο- στοιχείου” μαθηματικό υπόβαθρο, σχετικά με τις επιφάνειες διαρροής της θεμελίωσης, είναι πλέον έτοιμο για την ενσωμάτωσή του στο ενιαίο μαθηματικό εργαλείο που προγραμματίζεται για τον σκοπό αυτό.

- ✓ Οι καμπύλες αλληλεπίδρασης των φρεάτων θεμελίωσης σχηματίζουν συγχρόνως και το δυναμικό πλαστικοποίησης αυτών (plastic potential), με το διάλυμα των μεταβολών των πλαστικών εγκάρσιων μετακινήσεων αστοχίας να είναι συνεχώς κάθετο σε αυτές (συνθήκη της καθετότητας- normality). Συνεπώς, ο συσχετισμένος νόμος πλαστικής ροής των μετακινήσεων (associated plastic flow rule) έχει την βέλτιστη εφαρμογή στο μελετώμενο πρόβλημα. Επιπλέον, η εφαρμογή του νόμου αυτού υποδηλώνει ότι κατά την αστοχία του συστήματος η θεμελίωση και το περιβάλλον αυτής πλαστικοποιημένο έδαφος συμπεριφέρονται (μακροσκοπικά) ως ένα απολύτως άκαμπτο στερεό σώμα (rigid body motion). Ουσιαστικά, ο λόγος των μεταβολών των πλαστικών μετακινήσεων αστοχίας ( $\delta u^{pl}/\delta \theta^{pl}$ ) φανερώνει το βάθος του πόλου περιστροφής του συγκεκριμένου στερεού σώματος, μετρούμενος από την επιφάνεια του εδάφους.
- ✓ Τα σημεία κατά μήκος των καμπυλών αλληλεπίδρασης είναι δυνατόν να ταξινομηθούν στις αντίστοιχες κατηγορίες μηχανισμών εδαφικής παραμόρφωσης. Η ταξινόμηση αυτή εξαρτάται αποκλειστικά από τον λόγο των

εντατικών μεγεθών ( $M/Q$ ) κατά την αστοχία του συστήματος, και είναι κοινή ανεξάρτητα από τον λόγο εγκιβωτισμού  $D/B$  και τον συντελεστή ασφαλείας σε κατακόρυφη φόρτιση  $FS_v$ . Συν τοις άλλοις, η ταξινόμηση αυτή μπορεί να προβλεφθεί ποιοτικά από το παραπάνω συμπέρασμα σχετικά με την ταύτιση των καμπυλών αλληλεπίδρασης με το δυναμικό πλαστικοποίησής τους, και την συνεπακόλουθη ισχύ του συσχετισμένου νόμου πλαστικής ροής των μετακινήσεων.

- ✓ Η ελαστική απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων αναπαράγεται αποτελεσματικά από την υιοθέτηση των κατάλληλων ελαστικών μητρώων δυσκαμψίας της βιβλιογραφίας. Η τελευταία “συνιστώσα” του προβλήματος που απομένει να οριστεί είναι η υιοθέτηση του καταλληλότερου νόμου κράτυνσης (*hardening law*) του συστήματος. Βασιζόμενοι στην θεωρία της πλαστικότητας, ο βέλτιστος νόμος κράτυνσης που έχει εφαρμογή στα θεωρούμενα ελαστο- πλαστικά προσομοιώματα θεμελιώσεων, είναι εκείνος ο οποίος συσχετίζει την κράτυνση του συστήματος της θεμελίωσης με το παραγόμενο του έργο (*work- hardening plasticity theory*).
- ✓ Η ολοκληρωμένη ανάπτυξη του “μακρο- στοιχείου” κρίνεται ως πλήρως αποτελεσματική, εφόσον τα αποτελέσματα που αυτό παράγει ταυτίζονται (με θαυμαστή ακρίβεια) με τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Το πιο εκπληκτικό εύρημα της ταύτισης αυτής είναι ότι η απόκριση της θεμελίωσης εξαρτάται αποκλειστικά από μία μοναδική παράμετρο κράτυνσης (την παράμετρο κράτυνσης  $n$ ), οδηγώντας στην σημαντικά ευκολότερη βαθμονόμηση του εν λόγω “μακρο- στοιχείου”.
- ✓ Τέλος, το “μακρο- στοιχείο” που αναπτύχθηκε είναι ικανό να συλλάβει και την απόκριση των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων υπό ανακυκλική (στατική) εγκάρσια φόρτιση στην κεφαλή τους, έχοντας και πάλι ως μοναδική παράμετρο προς βαθμονόμηση την παράμετρο κράτυνσης  $n$ . Το σπουδαίο συμπέρασμα που απορρέει από την ανακυκλική φόρτιση των φρεάτων θεμελίωσης είναι η (μακροσκοπική) παρατήρηση της κράτυνσης του συστήματος με μειούμενο ρυθμό, όταν υπάρχει η συνιστώσα της κατακόρυφης φόρτισης. Παρά την αρχική συμμετρία του συστήματος της θεμελίωσης και τα συμμετρικά χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης ανακυκλικής εγκάρσιας φόρτισης, η παρουσία της

κατακόρυφης φόρτισης είναι ο ικανός παράγοντας ο οποίος οδηγεί την θεμελίωση σε ασύμμετρη απόκριση: αυτή “εισάγει” το ποσοστό της συμμετρίας που θα εντοπιστεί στην απόκριση της θεμελίωσης, και μόνο στην ακραία περίπτωση απουσίας της ( $FS_v = \infty$  ή  $x = 0$ ) το σύστημα εδάφους- θεμελίωσης διέπεται από απόλυτα συμμετρικά χαρακτηριστικά κατά την εγκάρσια καταπόνησή του. Το φαινόμενο της (μακροσκοπικής) κράτυνσης με μειούμενο ρυθμό είναι δυνατόν να αναπαραχθεί από το αναπτυγμένο “μακρο- στοιχείο” αυξάνοντας σταδιακά την τιμή της παραμέτρου κράτυνσης  $n$  σε κάθε κύκλο επιβαλλόμενης φόρτισης, έως την σταθεροποίησή της σε μία τελική τιμή, κατάσταση που συμβαδίζει με την αντίστοιχη σταθεροποίηση των σχηματιζόμενων βρόχων.

## **7.2 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση**

Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση πάνω στο εξεταζόμενο πρόβλημα των βαθιά εγκιβωτισμένων θεμελιώσεων:

- ✓ Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση να εξεταστεί μία διαφορετική κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  με το βάθος (π.χ. γραμμική), αντί της ομοιόμορφης κατανομής που θεωρήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στην περίπτωση αυτή, προτείνεται να επιλεγεί ως “εδαφική αντοχή αναφοράς” η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στην βάση της θεμελίωσης ( $S_{u,ref} = S_u|_{z=D}$ ), και να εξεταστεί η επιρροή που αυτή η διαφορετική κατανομή έχει τόσο στο σχήμα των παραγόμενων καμπυλών αλληλεπίδρασης όσο και στις προτεινόμενες εκφράσεις που περιγράφουν τις αντοχές των φρεάτων.
- ✓ Ακόμα εντονότερο ενδιαφέρον προκαλεί η περίπτωση να θεωρηθούν τα φαινόμενα των γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων. Έχοντας αποκτήσει το απαραίτητο θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο από την εκπόνηση της παρούσης εργασίας, η θεώρηση των παραπάνω φαινομένων αποτελεί την

“φυσική της επέκταση”. Έτσι, είναι απαραίτητο να εξεταστεί σε μελλοντική έρευνα ο βαθμός στον οποίο επηρεάζονται τα παραγόμενα αποτελέσματα, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο (με την ανάλογη εξήγηση των “νέων” φαινομένων που διέπουν την απόκριση των φρεάτων), όσο και σε μαθηματικό επίπεδο, με απώτερο σκοπό- εν τέλει- την αποτελεσματική αναθεώρηση του ανεπτυγμένου “μακρο- στοιχείου” ώστε αυτό να είναι ικανό να αναπαράγει και αυτήν την σύνθετη (αλλά διόλου μη ρεαλιστική) περίπτωση. Η ορθή εισαγωγή των φαινομένων γεωμετρικών μη- γραμμικοτήτων στο τριδιάστατο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να γίνει με την υιοθέτηση ενός κατάλληλου νόμου τριβής στις διεπιφάνειες του φρέατος με το περιβάλλον έδαφος, συσχετίζοντας την διατμητική αντοχή των εν λόγω διεπιφανειών με τις ορθές εδαφικές πιέσεις που ασκούνται σε αυτές.

- ✓ Κατά την μελέτη του φαινομένου της μακροσκοπικής κράτυνσης με μειούμενο ρυθμό, η βαθμονόμηση του “μακρο- στοιχείου” έγινε με βάση τα αποτελέσματα αναλύσεων ανακυκλικής φόρτισης μόνο οριζόντιας δύναμης ή μόνο ροπής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει να εξεταστεί η περίπτωση ταυτόχρονης επιβολής ανακυκλικής φόρτισης και των δύο εντατικών μεγεθών, στα πρότυπα της μεθόδου των επιβαλλόμενων δυνάμεων (ακτινικές διαδρομές φόρτισης). Έτσι, στοχεύεται να εξεταστεί αν η παράμετρος κράτυνσης  $n$  επαρκεί για την ταυτόχρονη αναπαραγωγή των παραγόμενων διαγραμμάτων οριζόντιας δύναμης- οριζόντιας μετατόπισης και ροπής- στροφής, ή θα πρέπει να τροποποιηθεί. Ενδεχομένως, δηλαδή, να απαιτηθεί ο “διαχωρισμός” της παραμέτρου  $n$  σε δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους συνιστώσες: (α) στην συνιστώσα  $n_H$ , η οποία θα εξουσιάζει την μορφή των διαγραμμάτων  $Q - u$  και (β) στην συνιστώσα  $n_R$ , η οποία θα εξουσιάζει την μορφή των διαγραμμάτων  $M - \theta$ .
- ✓ Τέλος, ενδεχόμενη μελλοντική έρευνα μπορεί να εστιάσει στην σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που παράχθηκαν στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας, με τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών. Επιπλέον, μπορεί να διεξαχθεί αντίστοιχη μελέτη και για την περίπτωση μη- συνεκτικών εδαφών, τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά, και να εντοπιστούν κοινά στοιχεία και διαφορές.

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- ABAQUS 6.1. (2001). Standard user's manual. Rhode Island: Hibbit, Karlsson and Sorensen.
- Allotey N, El Naggar MH. An investigation into the Winkler modelling of cyclic response of rigid footings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2007; DOI: 10.1016/j.soildyn.2007.04.003.
- Bell, R. W. (1991). The analysis of offshore foundations subjected to combined loading. MSc thesis, University of Oxford.
- Beredugo YO, Novak M. Coupled horizontal and rocking vibration of embedded footings. *Can Geotech J* 1972;9(4):477–97.
- Bransby, M. F. & Randolph, M. F. (1997). Shallow foundations subject to combined loadings. *Proc. 9th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Wuhan 3, 1947–1952.*
- Bransby, M. F., Randolph, M. F. (1998). Combined loading of skirted foundations, *Geotechnique*, 48(5): 637~655.
- Bransby, M. F. & Randolph, M. F. (1999a). The effects of embedment on the undrained response of caisson foundations to combined loadings. *Soils Found.* 39, No. 4, 19–34.
- Bransby, M. F. & Randolph, M. F. (1999b). The effect of skirted foundation shape on response to combined V-M-H loadings. *Int. J. Offshore Polar Engng* 9, No. 3, 214–218.



- 
- Bransby, M. F. & Yun, G.-J. (2009). The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading. *Geotechnique* 59, No. 2, 115–125 [doi: 10.1680/geot.2007.00098]
- Butterfield, R. & Ticof, J. (1979). The use of physical models in design: Discussion. *Proc. 7th Eur. Conf. Soil Mech.*, Brighton 4, 259–261.
- Butterfield, R. & Gottardi, G. (1994). A complete three-dimensional failure envelope for shallow footings on sand. *Geotechnique* 44, No.1, 181–184.
- Butterfield, R., and Gottardi, G. 1995. Simplifying transformations for the analysis of shallow foundations on sand. In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, The Hague, Netherlands, 11 – 16 June 1995. International Society of Offshore and Polar Engineers, Golden, Colorado. pp. 534 – 538.
- Byrne B.W., and Cassidy M.J. 2002. Investigating the response of offshore foundations in soft clay soils. In *Proceedings of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'02)*, Oslo, Norway, 23 – 28 June 2002. ASME, New York. Paper OMAE2002 – 28057.
- Cassidy, M. J., Byrne, B. W. & Randolph, M. F. (2004). A comparison of the combined load behaviour of spudcan and caisson foundations on soft normally consolidated clay. *Geotechnique* 54, No. 2, 91–106.
- Cassidy MJ, Martin CM, Houlsby GT. Development and application of force resultant models describing jack-up foundation behaviour. *Marine Structures* 2004; 17:165–193.
- Chatzigogos, C. T., Figini, R., Pecker, A. and Salençon, J. (2011). A macroelement formulation for shallow foundations on cohesive and frictional soils. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2011; 35:902–931
- Chen XC, Lai YM. Seismic response of bridge piers on elastic-plastic Winkler foundation allowed to uplift. *Journal of Sound and Vibration* 2003; 266(5):957–965.

- 
- Chopra AK, Yim CS. Earthquake responses of structures with partial uplift on Winkler foundation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1984; 12:265–281.
- Crémer C. Modélisation du comportement non linéaire des fondations superficielles sous séisme. PhD thesis, Laboratoire de Mécanique et de Technologie, ENS – Cachan, France, 2001.
- Crémer C, Pecker A, Davenne L. Cyclic macro-element for soil-structure interaction: material and geometrical non linearities. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2001; 25: 1257 – 1284.
- Davidson HL. Laterally loaded drilled pier research. Research Report, Electric Power Research Institute, vol. 2. Pennsylvania: Gai Consultants, Inc.; 1982.
- Dominguez J. Dynamic stiffness of rectangular foundations. Research Report R78-20. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; 1978.
- Einav I, Cassidy MJ. A framework for modelling rigid footing behaviour based on energy principles. *Computers and Geotechnics* 2005; 32:491–504.
- Fotopoulou M, Kotsanopoulos P, Gazetas G, Tassoulas JL. Rocking damping of arbitrarily-shaped embedded foundations. *J Geotech Eng ASCE* 1989;115(4):473–89.
- Gadre A, Dobry R. Lateral cyclic loading centrifuge tests on square embedded footing. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 1998;124(11): 1128–38.
- Gajan S, Kutter BL, Phalen JD, Hutchinson TC, Martin GR. Centrifuge modeling of load-deformation behavior of rocking shallow foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2005; 25:773–783.
- Gazetas G, Dobry R, Tassoulas JL. Vertical response of arbitrarily shaped embedded foundations. *J Geotech Eng ASCE* 1985;111(6):750–71.

- 
- Gazetas G, Tassoulas J. Horizontal stiffness of arbitrarily shaped embedded foundations. J Geotech Eng ASCE 1987;113(5):440–57.
- Gazetas G, Tassoulas JL. Horizontal damping of arbitrarily shaped embedded foundations. J Geotech Eng ASCE 1987;113(5):458–75.
- Gazetas G. Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. J Geotech Eng ASCE 1991;117(9):1363–81.
- Georgiadis, M. 1985. Load- path dependent stability of shallow footings. Soils and Foundations, 25(1): 84 – 88.
- Gerolymos N, Gazetas G (2006) Winkler model for lateral response of rigid caisson foundations in linear soil. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26 (2006), pp 347–361
- Gerolymos N, Gazetas G (2006) Development of Winkler model for static and dynamic response of caisson foundations with soil and interface nonlinearities. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26 (2006), pp 363–376
- Gerolymos N, Gazetas G (2006) Static and dynamic response of massive caisson foundations with soil and interface nonlinearities - Validation and results. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26 (2006), pp 377–394
- Gerolymos, N., Drosos, V., Gazetas, G. (2009). Seismic response of single-column bent on pile: evidence of beneficial role of pile and soil inelasticity. Bull Earthq Eng 7(2): 547–573 Special Issue:Earthquake Protection of Bridges.
- Gottardi G, Butterfield R. The displacement of a model rigid surface footing on dense sand under general planar loading. Soils and Foundations 1995; 35(3):71–82.
- Gottardi G, Houlsby GT, Butterfield R. Plastic response of circular footings on sand under general planar loading. Géotechnique 1999; 49(4): 453 – 469.

---

Gourvenec, S. & Randolph, M. F. (2003). Effect of strength nonhomogeneity on the shape and failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay. *Geotechnique* 53, No. 6, 575–586.

Gourvenec, S. "Bearing capacity under combined loading - a study of the effect of shear strength heterogeneity". Proc. , 9th Australian and New Zealand Conference on Geomechanics, Auckland, New Zealand, 2004, pp. 527-533.

Gourvenec, S. (2007). Failure envelopes for offshore shallow foundation under general loading, *Geotechnique*, 57(9): 715~728.

Gourvenec, S. (2008). Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loading, *Geotechnique*, 58(3): 177~185.

Grange S., Kotronis P. and Mazars J. (2008). A macro-element for a circular foundation to simulate 3D soil–structure interaction. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2008; 32:1205–1227

Hansen, J.B. (1970). "A revised and extended formula for bearing capacity." Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, Bulletin 28, pp. 5-11.

Harada T, Kubo K, Katayama T. Dynamic soil–structure interaction analysis by continuum formulation method. Report of the Institute of Industrial Science, vol. 29. The University of Tokyo; 1981 [issue no. 5].

Hill, R. 1950. *The mathematical theory of plasticity*. Clarendon Press, Oxford.

Houlsby GT, Cassidy MJ, Einav I. A generalised Winkler model for the behaviour of shallow foundations. *Géotechnique* 2005; 55(6):449–460.

Housner GW. The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1963; 53:403–417.

- 
- Hutchinson, T.C., Chai, Y. H., Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2004). Inelastic Seismic Response of Extended Pile-Shaft-Supported Bridge Structures. *Earthquake Spectra, Journal of the Earthquake Engineering Research Institute (EERI)*, 20(4): 1057-1080.
- Karabalis DL, Beskos DE. Dynamic response of 3-D embedded foundations by the boundary element method. *Comput Methods Appl Mech Eng* 1986;56:91–119.
- Kausel E, Roesset JM. Dynamic stiffness of circular foundations. *J Eng Mech Div ASCE* 1975;101(6):770–85.
- Le Pape Y, Sieffert JG. Application of thermodynamics to the global modelling of shallow foundations on frictional material. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2001; 25:1377–1408.
- Martin, C. M. (1994). Physical and numerical modelling of offshore foundations under combined loads. PhD thesis, University of Oxford.
- Martin, C. M. & Houlsby, G. T. (2000). Combined loading of spudcan foundations on clay: laboratory tests. *Geotechnique* 50, No. 4, 325–338.
- Martin, C. M. & Houlsby, G. T. (2001). Combined loading of spudcan foundations on clay: numerical modelling. *Geotechnique* 51, No. 8, 687–699.
- Meyerhof, G.G., (1953). The bearing capacity of footings under eccentric and inclined loads, *Proc. 3rd ICSMFE, Zurich*, pp 440- 445.
- Mitta A, Luco JE. Dynamic response of a square foundation embedded in an elastic half space. *Soil Dyn Earthq Eng* 1989;8.
- Montrasio, L., and Nova, R. 1988. Assestamenti di una fondazione modello sotto carico inclinato: risultati sperimentali e modellazione matematica. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 22(1): 35 – 49.

- 
- Mylonakis G. Elastodynamic model for large-diameter end-bearing shafts. *Soil Found.* 2001;41(3):31–44.
- Ngo-Tran, C. L. (1996). The analysis of offshore foundations subjected to combined loading. PhD thesis, University of Oxford.
- Nova, R. & Montrasio, L. (1991). Settlements of shallow foundations on sand. *Geotechnique* 41, No. 2, 243–256.
- Paolucci R. Simplified evaluation of earthquake-induced permanent displacements of shallow foundations. *Journal of Earthquake Engineering* 1997; 1(3):563–579.
- Pedretti S. Non-linear seismic soil foundation interaction: analysis and modelling method. Ph.D. Thesis, Dipartimento Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, 1998.
- Prager, W. (1959). An introduction to plasticity. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Prandtl, G. (1921). "Eindringungsfestigkeit und festigkeit von schneiden", *Zeit. f. Angew. Math. U. Mech.* 1: 15, 15- 20.
- Randolph, M.F., Gourvenec, S. (2011). *Offshore Geotechnical Engineering*, Spon Press, UK.
- Ricceri, G., and Simonini, P. 1989. Interaction diagrams for shallow footings on sand. In *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 13 – 18 August 1989. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands. pp. 89 – 95.
- Roscoe KH, Schofield AN. The stability of short pier foundations on sand. *British Welding Journal* 1956; August: 343–354.
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N. (1957). The stability of short pier foundations in sand, discussion, *British Welding Journal*, January, 12~18.

- 
- Saitoh M. Effective seismic motion of caisson and pile foundation. RTRI Rep 2001;46.
- Salencon, J. & Pecker, A. (1995). Ultimate bearing capacity of shallow foundations under inclined and eccentric loads. Part 1: Purely cohesive soil. *Eur. J. Mech. A/Solids* 14, No. 3, 349–375.
- Silva, P.F., Manzari, M.T. (2008). Nonlinear Pushover Analysis of Bridge Columns Supported on Full-Moment Connection CISS Piles on Clays. *EERI Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 3, August 2008, pp. 751-774.
- Skempton, A.W. 1951. The bearing capacity of clays. In *Proceedings of Building Research Congress*, London. Vol. 1, pp. 180- 189
- Taiebat, H. A., Carter, J. P. (2000). Numerical studies of the bearing capacity of shallow foundations on cohesive soil subjected to combined loading. *Geotechnique* 50, No. 4, 409–418.
- Taiebat, H. A. & Carter, J. P. (2002). A failure surface for the bearing capacity of circular footings on saturated clays. *Proc. 8th Int. Symp. Numerical Models in Geomechanics, NUMOG VIII*, Rome, 457–462.
- Tajimi H. Dynamic analysis of a structure embedded in an elastic stratum. *Proceedings of the fourth world conference on earthquake engineering*, Santiago, Chile; 1969.
- Tan, F. S. (1990). *Centrifuge and Theoretical Modelling of Conical Footings on Sand*. Ph. D. thesis, University of Cambridge.
- Tani, K. & Craig, W. H. (1995). Bearing capacity of circular foundations on soft clay of strength increasing with depth. *Soils Found.* 35, No. 4, 21–35.
- Tassoulas JL. *Elements for the numerical analysis of wave motion in layered media*. Research Report R81-2. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; 1981.

- 
- Ticof, J., (1977). "Surface footings on sand under general planar loads", PhD thesis, University of Southampton.
- Ukritchon, B., Whittle, A. J. & Sloan, S. W. (1998). Undrained limit analyses for combined loading of strip footings on clay. *J. Geotech. Geoenviron. Engng ASCE* 124, No. 3, 265–276.
- Wang Y.J., Yin J.H. and Lee C.F. (2001). The influence of a non-associated flow rule on the calculation of the factor of safety of soil slopes. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2001; 25:1351}1359 (DOI: 10.1002/nag.177)
- Watson, P. G. & Randolph, M. F. (1997). A yield envelope design approach for caisson foundations in calcareous sediments. *Proc. BOSS '97, The Hague* 1, 259–273.
- Yu HS, Rowe RK. Plasticity solutions for soil behaviour around contracting cavities and tunnels. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 1999;23:1245–79.
- Yun, G. & Bransby, M. F. (2007a). The horizontal-moment capacity of embedded foundations in undrained soil. *Can. Geotech. J.* 44, No. 4, 409–427.
- Zaharescu, E. (1961). Sur la stabilite des fondations rigides. *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech.*, Paris 1, 867–871.
- Παναγιωτίδου, Α.Ι., Γκαζέτας, Γ. και Γερόλυμος, Ν. (2010). Pushover and Inelastic-Seismic Response of Shallow Foundations Supporting a Slender Structure. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Βόλος 2010, 29 Σεπτεμβρίου – 1 Οκτωβρίου.