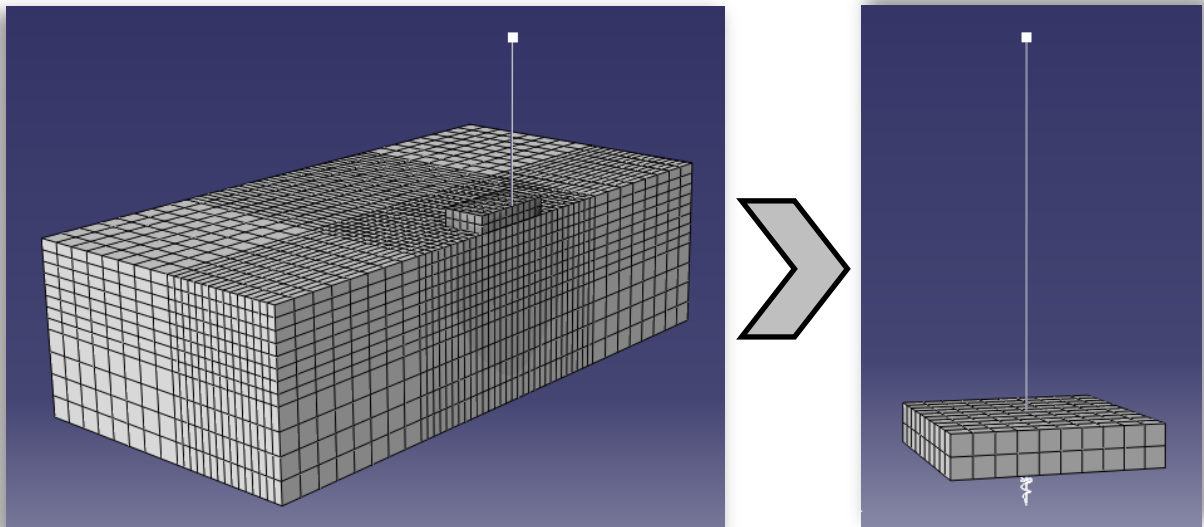


Μεταπτυχιακή Εργασία  
**Θάλειας Κοντορούπη**

Επιβλέποντες  
**Καθηγητής Γ. Γκαζέτας**  
**Επικ. Καθ. Ι. Αναστασόπουλος**

Ιούνιος 2012

**ΛΙΚΝΙΣΜΟΣ 1-ΒΑΘΜΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ επί ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ:  
Ανάπτυξη Απλοποιημένης Μη-Γραμμικής Μεθοδολογίας**



**1-DoF SYSTEM ROCKING on INELASTIC SOIL:  
Development of Simplified Non-Linear Methodology**

MSc Thesis

**Thaleia Kontoroupi**

Supervisors

**Professor G. Gazetas**  
**Assist. Prof. I. Anastasopoulos**

June 2012



Ευχαριστώ θερμά τον Δάσκαλο και επιβλέποντα καθηγητή κ. Γ. Γκαζέτα, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να είμαι μέλος της ερευνητικής ομάδας του και να εκπονήσω τη μεταπτυχιακή μου εργασία κοντά του.

Καθοριστική, στο εγχείρημα αυτής της εργασίας, ήταν η συμβολή του επίκουρου καθηγητή Ι. Αναστασόπουλου, χωρίς την πολύτιμη καθοδήγηση του οποίου, δεν θα είχε πραγματοποιηθεί ποτέ. Τον ευχαριστώ βαθύτατα.

Τέλος, θα ήθελα να αναφερθώ σε όλα τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του κ. Γ. Γκαζέτα, μεταδιδασκαστικούς ερευνητές, υποψήφιους διδάκτορες, μεταπτυχιακούς φοιτητές και τελειοφοίτους και να τους ευχαριστήσω για το ευχάριστο κλίμα που διαμορφώνουν καθημερινά στο εργαστήριο. Αυτός ο χρόνος πέρασε πολύ γρήγορα.



# Περιεχόμενα

---

## Κεφάλαιο 1ο

### Εισαγωγικά Στοιχεία & Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή .....	1 - 1
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	1 - 2
1.3 Σκοπός & Περιεχόμενο της Εργασίας .....	1 - 5
<b>Σχήματα Κεφαλαίου 1</b> .....	<b>1 - 9</b>

## Κεφάλαιο 2ο

### Διαδικασία Προσομοίωσης

2.1 Ορισμός του Προβλήματος .....	2 - 1
2.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης .....	2 - 2
2.2.1 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων .....	2 - 2
2.2.2 Εδαφικό Καταστατικό Προσομοίωμα .....	2 - 3
2.2.3 Επιβολή Στατικής & Δυναμικής Φόρτισης .....	2 - 6
<b>Σχήματα Κεφαλαίου 2</b> .....	<b>2 - 9</b>

## Κεφάλαιο 3ο

### Εφαρμογή της Μεθοδολογίας

3.1 Εισαγωγή – Ορισμοί .....	3 - 1
3.2 Επιλογή Μη-Γραμμικού Περιστροφικού Ελατηρίου $M - \theta$ .....	3 - 2
3.3 Επιλογή Συντελεστή Περιστροφικής Απόσβεσης $C_R$ .....	3 - 7
3.4 Επιλογή Καμπύλης Καθίζησης $\Delta w/B - \Gamma$ ωνίας Στροφής $\theta$ .....	3 - 11
3.5 Υπολογισμός Τελικής Καθίζησης $w$ & Χρονοϊστορίας $w - t$ .....	3 - 12
<b>Σχήματα Κεφαλαίου 3</b> .....	<b>3 - 13</b>

## Κεφάλαιο 4ο

### Αποτελέσματα Δυναμικής Ανάλυσης

4.1 Περιγραφή Εξεταζόμενου Συστήματος .....	4 - 1
4.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Δυναμικής Ανάλυσης .....	4 - 5
4.2.1 Η επίδραση της κατευθυντικότητας .....	4 - 8
4.2.2 Η επίδραση του συντελεστή ασφαλείας $F_S$ .....	4 - 9
4.2.3 Η επίδραση των χαρακτηριστικών της διέγερσης .....	4 - 10
4.2.4 Χρήση απλοποιημένων καμπυλών $M - \theta$ .....	4 - 10
4.2.5 Η επίδραση του συντελεστή περιστροφικής απόσβεσης $C_R$ .....	4 - 11
<b>Σχήματα Κεφαλαίου 4</b> .....	4 - 15

## Κεφάλαιο 5ο

### Συμπεράσματα & Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα .....	5 - 1
5.2 Προτάσεις .....	5 - 2

## Παράρτημα

### Διερεύνηση Στατικής Ισοδυναμίας

Π.1 Τετραγωνικό Θεμέλιο .....	Π - 1
Π.1.1 Εισαγωγή – Ορισμοί .....	Π - 1
Π.1.2 Επιρροή του Λόγου Εδαφικής Δυσκαμψίας $E_o/S_u$ .....	Π - 3
Π.1.3 Απόκριση Ισοδύναμων Συστημάτων .....	Π - 5
Π.1.4 Επιρροή του Συντελεστή Ασφαλείας $F_S$ .....	Π - 5
Π.1.5 Αρχική Περιστροφική Δυσκαμψία $K_R(0, F_S)$ .....	Π - 7
Π.1.6 Κανονικοποίηση των Αποτελεσμάτων .....	Π - 8
Π.2 Ορθογωνικό Θεμέλιο .....	Π - 9
Π.2.1 Εισαγωγή – Ορισμοί .....	Π - 9
Π.2.2 Επιρροή του Λόγου Εδαφικής Δυσκαμψίας $E_o/S_u$ .....	Π - 11

Π.2.3 Απόκριση Ισοδύναμων Συστημάτων .....	Π - 12
Π.2.4 Επιρροή του Συντελεστή Ασφαλείας $F_S$ .....	Π - 13
Π.2.5 Αρχική Περιστροφική Δυσκαμψία $K_R(0, F_S)$ .....	Π - 14
Π.2.6 Κανονικοποίηση των Αποτελεσμάτων .....	Π - 15
Π.3 Συμπεράσματα .....	Π - 16
<b>Σχήματα Παραρτήματος</b> .....	<b>Π - 19</b>
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>B - 1</b>





# Κεφάλαιο 1ο:

## Εισαγωγικά Στοιχεία & Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

---

### 1.1 Εισαγωγή

Η αλληλεπίδραση εδάφους – θεμελίου – ανωδομής μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά την ανάλυση της τελευταίας με την αντικατάσταση του συστήματος εδάφους – θεμελίου από καταλλήλως βαθμονομημένα στοιχεία, όπως ελατήρια ή μακροστοιχεία. Το όφελος που προκύπτει από μια τέτοια αντικατάσταση αφορά πρωτίστως το κόστος σε υπολογιστικό χρόνο, καθώς καταργεί την ανάγκη λεπτομερούς προσομοίωσης του εδάφους με πεπερασμένα στοιχεία, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει –με απλό τρόπο– την ενσωμάτωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους ως παραμέτρου της απόκρισης της κατασκευής και των ενδεχόμενων πλεονεκτημάτων αυτής (π.χ. τη μεταφορά μικρότερων φορτίων στην ανωδομή και τη μεγαλύτερη διαθέσιμη πλαστιμότητα [Anastasopoulos et al., 2010]). Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη αναφορά στη σημασία της ενσωμάτωσής της στο πρόβλημα της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής, καθώς πρόκειται για ένα σοβαρό επιχείρημα υπέρ της ανάπτυξης μιας απλοποιημένης μεθοδολογίας για να ληφθεί υπόψη η επίδρασή της.

Η σύγχρονη πρακτική στον αντισεισμικό σχεδιασμό των θεμελιώσεων, όπως αποτυπώνεται στους αντισεισμικούς κανονισμούς (π.χ. EC8), προνοεί για την αποφυγή της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του συστήματος εδάφους – θεμελίου. Με άλλα λόγια, η πλαστικοποίηση οδηγείται στα στοιχεία της ανωδομής, ενώ η απόκριση της θεμελίωσης πρέπει να παραμένει ελαστική. Συνεπώς, η κινητοποίηση μηχανισμών αστοχίας φέρουσας ικανότητας του εδάφους, η ολίσθηση στη διεπιφάνεια εδάφους – θεμελίου ή η αποκόλληση – ανασήκωμα επιφανειακού θεμελίου απαγορεύονται.

Ωστόσο, η κινητοποίηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους σε ένα σεισμικό συμβάν δεν συνεπάγεται απαραίτητως αστοχία εξαιτίας του ανακυκλικού και

κινηματικού χαρακτήρα της σεισμικής διέγερσης. Μάλιστα, η ολίσθηση, ο λικνισμός και η κινητοποίηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους είναι εντόνως μη-γραμμικοί μηχανισμοί που οδηγούν σε σημαντική απόσβεση ενέργειας προς άμυνα της ανωδομής έναντι εδαφικών κινήσεων που είναι μεγαλύτερες από αυτές του σχεδιασμού. Πλήθος ερευνητών που έχουν μελετήσει την ιδέα της πλαστικοποίησης στη στάθμη της θεμελίωσης έδειξαν πως, όχι μόνο η διαρροή του συστήματος εδάφους – θεμελίου είναι αναπόφευκτη, αλλά μπορεί να αποδειχθεί και ευεργετική για τη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής [Paolucci, 1997; Pecker, 1998, 2003; FEMA–356, 2000; Martin & Lam, 2000; Makris & Roussos, 2000; Faccioli et al., 2001; Kutter et al., 2003; Gazetas et al., 2003; Gazetas & Apostolou, 2005; Gajan et al., 2005; Harden et al., 2006; Paolucci et al., 2008; Kawashima et al., 2007; Gajan & Kutter, 2008; Chatzigogos et al., 2009; Gerolymos et al., 2009; Anastasopoulos et al. 2010].

Πράγματι, η **νέα φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού**, στην οποία η διαρροή του εδάφους χρησιμοποιείται για την προστασία της ανωδομής, που έχει προταθεί από τους Anastasopoulos et al. [2010], αποδείχθηκε πως μπορεί να παράσχει μεγαλύτερα περιθώρια ασφάλειας σε όρους απαιτήσεων πλαστιμότητας και να αποτρέψει την κατάρρευση της κατασκευής για διεγέρσεις που υπερβαίνουν τον σεισμό σχεδιασμού. Για τη διερεύνηση της ιδέας της **μόνωσης μέσω λικνισμού** μελετήθηκαν μονοβάθμια συστήματα, όπως τα βάθρα γεφυρών [Anastasopoulos et al., 2010] (**Σχήμα 1.1**), και απλές παλαισιωτές κατασκευές [Gelagoti et al., 2010] (**Σχήμα 1.2**). Το τίμημα, όμως, που καλείται να πληρώσει η κατασκευή συνίσταται σε ενδεχομένως αυξημένες τιμές παραμένουσας καθίζησης και στροφής.

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση:

### Λικνισμός Επιφανειακού Θεμελίου επί Ενδοσίμου Εδάφους

Η ενδοσιμότητα του εδάφους εισάγει πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας στο πρόβλημα της λικνιστικής απόκρισης επιφανειακού θεμελίου ως προς την περίπτωση της άκαμπτης βάσης. Επιπλέον, μία κατασκευή θεμελιωμένη επί

ενδοσίμου εδάφους εισέρχεται στη φάση της λικνιστικής απόκρισης για μικρότερα πλάτη διέγερσης απ' ό,τι στην περίπτωση επί άκαμπτης βάσης, ενώ μπορεί να υποστεί περιστροφική κίνηση δίχως απώλεια επαφής με το υποκείμενο έδαφος. Η λικνιστική πλέον απόκριση χαρακτηρίζεται, κατά κανόνα, από ανασήκωμα στη μία άκρη του θεμελίου, και βύθιση στην άλλη. Επίσης, η κρούση κατά τον λικνισμό είναι πιο απορροφητική σε σχέση με την περίπτωση άκαμπτης βάσης, οδηγώντας σε ταχύτερη εξασθένιση της ταλάντωσης.

Η απόκριση του επιφανειακού θεμελίου στην περίπτωση ενδοσίμου εδάφους είναι εντόνως μη-γραμμική, ακόμα και για την περίπτωση που το υποκείμενο έδαφος είναι ιδεωδώς ελαστικό, αφού το σύστημα χαρακτηρίζεται από γεωμετρική μη-γραμμικότητα και μη-γραμμικότητα διεπιφάνειας. Στην περίπτωση όπου το έδαφος είναι ανελαστικό, η μη-γραμμική συμπεριφορά εκδηλώνεται και με έναν επιπλέον μηχανισμό, την κινητοποίηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους (μη-γραμμικότητα υλικού). Η γεωμετρική μη-γραμμικότητα συνίσταται στη σταδιακή μείωση του ενεργού πλάτους του θεμελίου (μείωση της επιφάνειας επαφής λόγω αποκόλλησης από το έδαφος) και στα φαινόμενα  $P - \delta$  που αναπτύσσονται για μεγάλες γωνίες στροφής, ιδίως σε εύκαμπτες και υψίκορμες κατασκευές. Η μη-γραμμικότητα υλικού, συνίσταται αντίστοιχα στη μη-γραμμική, υστερητική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων του εδάφους.

Πλήθος ερευνητών έχουν ασχοληθεί με τη λικνιστική απόκριση άκαμπτων θεμελιώσεων επί ενδοσίμου ελαστικού εδάφους. Οι Psycharis & Jennings [1983] εισήγαγαν την ενδοσιμότητα του εδάφους με ένα ιξωδό - ελαστικό μοντέλο Winkler, στο οποίο τα ελατήρια δεν μπορούν να παραλάβουν εφελκυσμό και παράγαγαν αναλυτικές εκφράσεις που περιγράφουν την απόκριση του συστήματος κατά τη φάση της πλήρους επαφής και κατά την φάση του ανασηκώματος. Οι Koh et al. [1986] διεύρυναν την προηγούμενη εργασία εισάγοντας την ευκαμψία της ανωδομής. Επίσης, ο Psycharis [2007] επέκτεινε την προηγούμενη εργασία του μελετώντας τη δυναμική απόκριση άκαμπτης θεμελίωσης που συνδέεται μέσω κολώνας στην ανωδομή και εδράζεται σε ελαστικό μοντέλο Winkler με μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Οι Apostolou et al. [2003; 2007] χρησιμοποίησαν αναλύσεις

πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να θεωρήσουν το έδαφος ως ελαστικό συνεχές μέσο και να αποτυπώσουν πιο ρεαλιστικά την κατανομή των τάσεων κάτω από το θεμέλιο, εφόσον η γραμμική κατανομή των τάσεων του μοντέλου Winkler δεν μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά την συγκέντρωση των τάσεων επαφής στα άκρα της θεμελίωσης.

Ως προς τη δημοσιευμένη βιβλιογραφία για θεώρηση ανελαστικού εδάφους, οι Allotey & El Naggar [2003; 2008] μελέτησαν την λικνιστική απόκριση χρησιμοποιώντας ελαστοπλαστικό μοντέλο Winkler και παρήγαγαν λύση που επιτρέπει τον υπολογισμό του διαγράμματος ροπής – στροφής σε ανελαστικό έδαφος, αγνοώντας ωστόσο τα φαινόμενα P- $\delta$ . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ανέδειξαν την καθοριστική επίδραση του αντιστρόφου του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφου φορτίου στην απόκριση της θεμελίωσης μέσω ανασηκώματος ή διαρροής του εδάφους και στη μέγιστη τιμή της ροπής που αναπτύσσεται. Οι Raychowdhury & Hutchinson [2009] βαθμονόμησαν μέσω πειραμάτων σε φυγοκεντρική ένα μη-γραμμικό μοντέλο Winkler για διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της θεμελίωσης (τετραγωνικά έως λωριδωτά θεμέλια) και για διάφορους συντελεστές ασφαλείας υπό στατική και δυναμική διέγερση. Οι ίδιοι ερευνητές [Raychowdhury & Hutchinson, 2010] χρησιμοποίησαν το μη-γραμμικό μοντέλο Winkler που ανέπτυξαν για να αξιολογήσουν την απόδοση κτιρίων με διατμητικά τοιχώματα που εδράζονται σε επιφανειακή θεμελίωση.

Στην συνέχεια, οι Apostolou & Gazetas [2007] μελέτησαν λεπτομερώς τη λικνιστική απόκριση επιφανειακών θεμελιώσεων επί ενδοσίμου εδάφους χρησιμοποιώντας ένα μακροσκοπικό μοντέλο που συνυπολογίζει τις μη-γραμμικότητες του συστήματος εδάφους – θεμελίου. Παρήγαγαν αναλυτικές εκφράσεις για τη ροπή, τη στροφή και την κατακόρυφη μετακίνηση του θεμελίου τόσο για ελαστικό, όσο και για ανελαστικό έδαφος. Κατά αυτόν τον τρόπο προσέγγισαν το πεδίο μεγάλων μετατοπίσεων που αναπτύσσεται κατά την απόκριση τέτοιων συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα  $P - \delta$ , που αμελούνται με τη συμβατική μοντελοποίηση Winkler (**Σχήματα 1.3 – 1.4**).

Σημαντική προσπάθεια έχει επίσης καταβληθεί για την παραγωγή ενός μακροστοιχείου ικανού να περιγράψει την απόκριση τέτοιων συστημάτων. Οι Nova & Montrasio [1991] εισήγαγαν ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο με ιστροπική κράτυνση για το σύστημα εδάφους – θεμελίωσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο τροποποιήθηκε από τον Raolucci [1997] για την εφαρμογή του σε πραγματικές δυναμικές φορτίσεις και αργότερα βελτιώθηκε περαιτέρω [Raolucci, 2007; 2008] με την εισαγωγή ενός κανόνα απομείωσης για τις παραμέτρους δυσκαμψίας της θεμελίωσης ώστε να συμπεριλάβει τη μείωση της επιφάνειας επαφής εδάφους – θεμελίου, εξαιτίας των διαδοχικών κύκλων στροφής. Οι Cremer et al. [2002] παρουσίασαν ένα προηγμένο μη-γραμμικό μοντέλο μακροστοιχείου, ικανό να λαμβάνει υπόψη, τόσο τις γεωμετρικές μη-γραμμικότητες, όσο και τις μη-γραμμικότητες υλικού που συναντώνται.

### 1.3 Σκοπός & Περιεχόμενο της Εργασίας

Η παρούσα εργασία διερευνά τη δυνατότητα χρήσης καταλλήλως βαθμονομημένου ελατηρίου προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ανελαστικού εδάφους – επιφανειακού θεμελίου κατά τη δυναμική απόκριση του συστήματος εδάφους – θεμελίου – ανωδομής. Εστιάζει δε στη λικνιστική απόκριση της θεμελίωσης, οπότε το εν λόγω ελατήριο είναι περιστροφικό. Επιπλέον, στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων της παρούσας εξετάζονται ο μηχανισμός της αποκόλλησης του θεμελίου και ο μηχανισμός της κινητοποίησης της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, ενώ η ολίσθηση δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς δεσμεύεται η δυνατότητα οριζόντιας μετακίνησης στη βάση του θεμελίου. Συνεπώς, για να αποτυπωθεί η λικνιστική συμπεριφορά του θεμελίου επί ανελαστικού εδάφους, προτείνεται η χρήση ενός **μη-γραμμικού περιστροφικού ελατηρίου** σε συνδυασμό με κατάλληλο περιστροφικό αποσβεστήρα.

Αξιοποιώντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα [Gazetas et al., 2012] μονοτονικών στατικών αναλύσεων σχετικά με τη μείωση της τέμνουσας περιστροφικής δυσκαμψίας εδάφους – θεμελίου, ως προς την ελαστική της τιμή [Gazetas, 1987],

καθώς οι επιβαλλόμενες γωνίες αυξάνονται ή το θεμέλιο φορτίζεται ισχυρότερα, η εργασία προτείνει μια απλοποιημένη μη-γραμμική μεθολογία υπολογισμού της δυναμικής λικνιστικής απόκρισης (στροφών & καθιζήσεων) μεμονωμένου επιφανειακού θεμελίου εδραζόμενου σε ανελαστικό αργλικό εδαφικό σχηματισμό.

Εν αντιθέσει με τις καμπύλες τέμνουσας δυσκαμψίας  $K_R(\vartheta, F_S)$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  που μπορούν να αποτελέσουν βάση για την ανάπτυξη μιας ισοδύναμης γραμμικής επαναληπτικής μεθόδου [Paolucci et al., 2011], οι καμπύλες αναπτυσσόμενης ροπής θεμελίωσης  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  που εξάγονται από τις στατικές μονοτονικές μη-γραμμικές αναλύσεις για τους διάφορους τύπους επιφανειακών θεμελιώσεων (θεμελιολωρίδα, τετραγωνικό, ορθογωνικό 3:1 & κυκλικό) μπορούν να αξιοποιηθούν στην ανάπτυξη μιας απλοποιημένης μη-γραμμικής μεθολογίας, χωρίς να χρειάζεται το προσομοίωμα της υπό μελέτη κατασκευής να περιλαμβάνει το σύστημα εδάφους-θεμελίου, παρά μόνον την ανωδομή. Η μοναδική απαίτηση από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα δυναμικής ανάλυσης συνήθων κατασκευών για την εφαρμογή της μεθόδου, είναι η δυνατότητα εισαγωγής μη-γραμμικού ελατηρίου, που θεωρείται όμως πια δεδομένη για την πλειονότητα εξ αυτών.

Στο **2ο Κεφάλαιο** ορίζεται το πρόβλημα, περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης και η μεθοδολογία ανάλυσης που ακολουθήθηκε.

Στο **3ο Κεφάλαιο** περιγράφεται ο τρόπος εφαρμογής της μεθοδολογίας σε τετραγωνικό θεμέλιο (σε απόλυτη αντιστοιχία εφαρμόζεται και σε άλλα σχήματα μεμονωμένων επιφανειακών θεμελίων, αρκεί να καταρτιστούν οι αντίστοιχες σχέσεις). Τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου είναι τα εξής:

- i.* Επιλογή του κατάλληλου μη-γραμμικού περιστροφικού ελατηρίου  $M - \vartheta$  βάσει του είδους του μεμονωμένου θεμελίου και του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφου φορτίου  $F_S$ . Επειδή συνήθως οι καμπύλες θα διατίθενται σε αδιάστατη μορφή, θα πρέπει να γίνει και ο απαραίτητος υπολογισμός των τιμών που αφορούν την προκειμένη περίπτωση, ανάλογα με την ποσότητα ως προς την οποία έχει γίνει η κανονικοποίηση.

- ii.* Επιλογή της κατάλληλης τιμής περιστροφικού συντελεστή απόσβεσης  $C_R$ . Να σημειωθεί ότι οι προτεινόμενες τιμές του συντελεστή αυτού έχουν προκύψει βάσει της επιρροής της υστερητικής μόνον απόσβεσης, όχι και της απόσβεσης ακτινοβολίας.
- iii.* Δυναμική ανάλυση & εξαγωγή χρονοϊστοριών επιτάχυνσης της ανωδομής  $a - t$  και στροφής της θεμελίωσης  $\vartheta - t$ .
- iv.* Επιλογή της κατάλληλης καμπύλης αδιαστατοποιημένης καθίζησης  $\Delta w/B$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  βάσει του είδους του μεμονωμένου θεμελίου και του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακορύφου φορτίου  $F_S$ .
- v.* Υπολογισμός της καθίζησης  $\Delta w$  κάθε ημι-κύκλου της χρονοϊστορίας  $\vartheta - t$  και ύστερα άθροισμά αυτών. Έτσι, έχουμε στη διάθεση μας την τελική τιμή της καθίζησης, αλλά και την –κατά αδρή προσέγγιση– χρονοϊστορία καθιζήσεων  $w - t$ .

Στο **4ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθοδολογίας σε σύστημα ληγηρότητας  $2h/B = 4$ , πλάτους θεμελίου  $B = 2\text{m}$  και εδαφικών παραμέτρων  $E = 270\text{MPa}$  και  $S_u = 150\text{kPa}$  για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακορύφου φορτίου  $F_S$ . Το σύστημα υποβάλλεται σε πληθώρα σεισμικών διεγέρσεων. Πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων του πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με εκείνα του ελατηριωτού για την τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας της μεθοδολογίας, η οποία προκύπτει εξαιρετικά ικανοποιητική δεδομένου ότι πρόκειται για κατ'εξοχήν προσεγγιστική διαδικασία με αρκετές παραδοχές σε κάθε βήμα της.

Στο **5ο Κεφάλαιο** παρατίθενται τα κυριότερα συμπεράσματα και ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Στο **Παράρτημα** παρουσιάζεται η διερεύνηση της λικνιστικής συμπεριφοράς μονοβάθμιου ταλαντωτή επί τετραγωνικού και ορθογωνικού θεμελίου, καθώς και η απόδειξη της στατικής ισοδυναμίας συστημάτων που πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις.



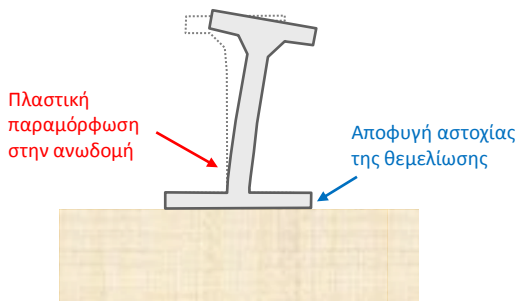


## Σχήματα **Κεφαλαίου 1**

---

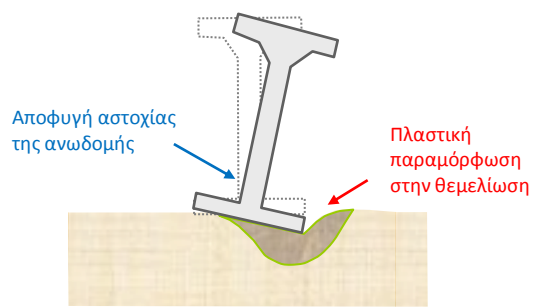


**Συμβατικός Ικανοτικός Σχεδιασμός**



**(α)**

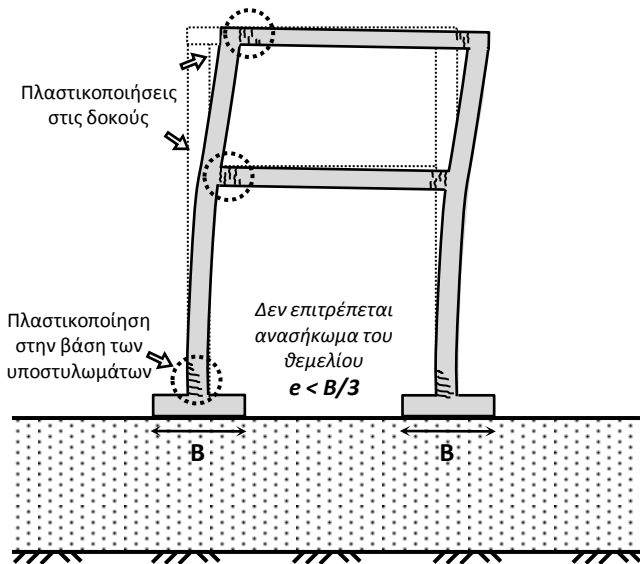
**Νέα Φιλοσοφία Σχεδιασμού**



**(β)**

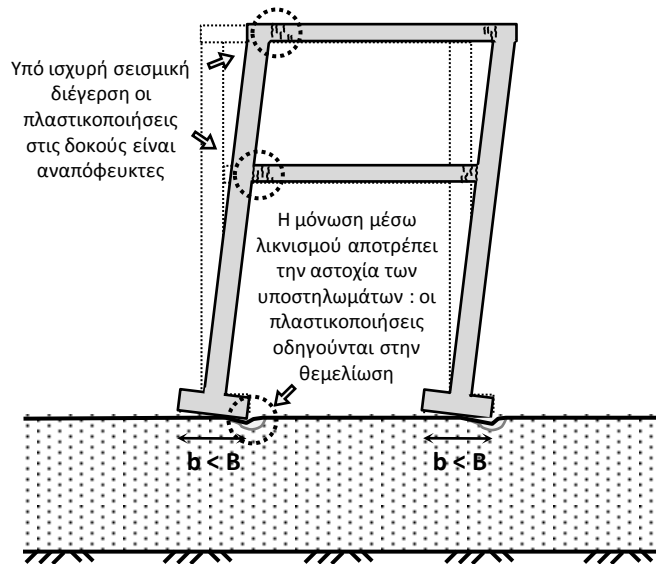
**Σχήμα 1.1** Σύγκριση **(α)** Συμβατικού Ικανοτικού Σχεδιασμού με τη **(β)** Νέα Φιλοσοφία Σχεδιασμού που εισήγαγαν οι Anastasopoulos et al. [2010].

**Συμβατικός Ικανοτικός Σχεδιασμός**



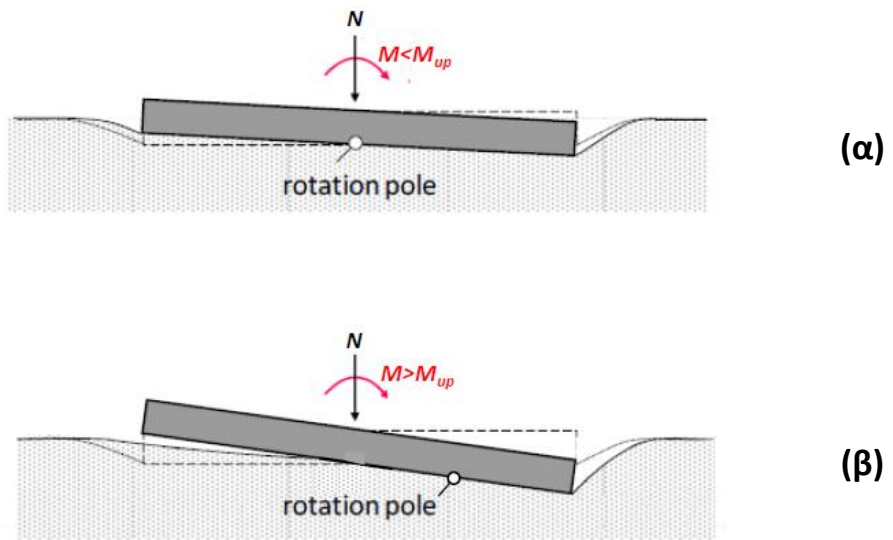
**(α)**

**Σχεδιασμός Μόνωσης μέσω Λικνισμού**

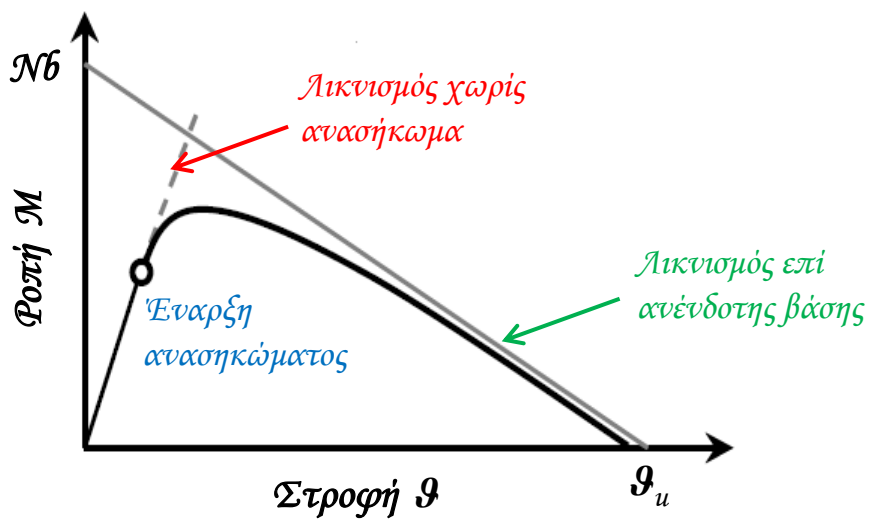


**(β)**

**Σχήμα 1.2** Σύγκριση **(α)** Συμβατικού Ικανοτικού Σχεδιασμού με τον **(β)** Σχεδιασμό Μόνωσης μέσω Λικνισμού που εισήγαγαν οι Gelagoti et al. [2010].



**Σχήμα 1.3** Λικνισμός άκαμπτου θεμελίου επί ενδοσίμου εδάφους (α) γραμμική φάση πλήρους επαφής (β) μη-γραμμικής φάσης με ανασήκωμα [Apostolou & Gazetas, 2007].



**Σχήμα 1.4** Καμπύλη ροπής-στροφής επιφανειακής θεμελίωσης με φαινόμενα P-δ [Apostolou & Gazetas, 2007].

# Κεφάλαιο 2ο:

## Διαδικασία Προσομοίωσης

---

### 2.1 Ορισμός του Προβλήματος

Υψίκορμες κατασκευές όπως βάθρα γεφυρών και πολυώροφα κτίρια υπόκεινται σε συνδυασμένη φόρτιση (τέμνουσας, αξονικού φορτίου και ροπής) κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Η απόκρισή τους επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη ροπή που αναπτύσσεται στη βάση τους και διαφοροποιείται σημαντικά όταν η κατασκευή εισέρχεται στη λικνιστική φάση και παρατηρείται ανασήκωμα της θεμελίωσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πολλοί ερευνητές έχουν παρατηρήσει την ευεργετική επίδραση του ανασηκώματος της θεμελίωσης και της κινητοποίησης μηχανισμών φέρουσας ικανότητας του εδάφους στην απόκριση τέτοιων κατασκευών υπό δυναμική φόρτιση.

Κατά τον Priestley [1996] η δυναμική συμπεριφορά γεφυρών κανονικού σχήματος, που διεγείρονται κατά την εγκάρσια διέυθυνση, μπορεί να προσεγγισθεί αδρά με την προσομοίωση ενός και μόνο βάρου (μονοβάθμιος ταλαντωτής). Η παρούσα εργασία διερευνά τη δυνατότητα υπολογισμού της δυναμικής λικνιστικής απόκρισης ενός τέτοιου μονοβάθμιου ταλαντωτή, όταν το σύστημα εδάφους – θεμελίου έχει αντικατασταθεί από μη-γραμμικό περιστροφικό ελατήριο και τον αντίστοιχο περιστροφικό αποσβεστήρα (**Σχήμα 2.1**).

Για την κατάλληλη βαθμονόμηση του μη-γραμμικού περιστροφικού ελατηρίου και τον υπολογισμό του συντελεστή περιστροφικής απόσβεσης πραγματοποιούνται στατικές μονοτονικές και ανακυκλικές τριδιάστατες αναλύσεις επιβαλλόμενης μετατόπισης, ενώ στη συνέχεια, για τη σύγκριση των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης ανωδομής  $\mathbf{a} - \mathbf{t}$  και στροφής θεμελίωσης  $\boldsymbol{\theta} - \mathbf{t}$  πλήρους και ελατηριωτού προσομοιώματος, δυναμικές τριδιάστατες αναλύσεις.

## 2.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης

### 2.2.1 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων

Για τη διεξαγωγή των απαιτούμενων στατικών (μονοτονικών & ανακυκλικών) και δυναμικών τριδιάστατων αναλύσεων διαμορφώνεται προσομοίωμα στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Μια κατασκευή συγκεντρωμένης μάζας στην κορυφή εδραζόμενη επί τετραγωνικού θεμελίου αντιπροσωπεύει το σύστημα καταστρώματος – βάρου – θεμελίωσης. Το βάρο προσομοιώνεται με ελαστικά γραμμικά στοιχεία δοκού (B31) κυκλικής διατομής, ενώ το κατάστρωμα αναπαρίσταται από ένα στοιχείο μάζας. Το δε θεμέλιο προσομοιώνεται με ελαστικά οκτακομβικά στοιχεία συνεχούς μέσου (C3D8) και θεωρείται αβαρές. Ο εν λόγω ταλαντωτής θεωρείται απολύτως άκαμπτος. Το έδαφος, μια ομοιογενής αργιλική στρώση, προσομοιώνεται με μη-γραμμικά οκτακομβικά στοιχεία συνεχούς μέσου (C3D8).

Για τη ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας εδάφους – θεμελίου χρησιμοποιούνται στοιχεία διεπιφάνειας που επιτρέπουν την αποκόλληση του θεμελίου από το υποκείμενο έδαφος. Επιλέγεται εκθετικός νόμος επαφής στη διεπιφάνεια (**Σχήμα 2.3**). Επιπλέον, δεδομένου ότι στόχος της παρούσας είναι η μελέτη της λικνιστικής συμπεριφοράς του συστήματος θεμελίου – εδάφους, θεωρείται πολύ μεγάλος συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια θεμελίου – εδάφους, ώστε να παρεμποδιστεί η ολίσθηση.

Η μη-γραμμικότητα υλικού, που εκδηλώνεται μέσω της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, καθώς και η μη-γραμμικότητα γεωμετρίας (φαινόμενα  $P - \delta$  & ανασήκωμα θεμελίου) λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Προκειμένου να εξοικονομηθεί χρόνος και υπολογιστικά μέσα, προσομοιώνεται με τριδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία μόνον το ήμισυ του θεμελίου και του υποκείμενου εδάφους. Η παραδοχή αυτή είναι αποδεκτή λόγω συμμετρίας, καθώς η ανάλυση περιορίζεται σε περιστροφή εντός ενός μόνο επιπέδου. Κινηματικοί

περιορισμοί επιβάλλονται στο επίπεδο συμμετρίας, οι οποίοι περιορίζουν την κίνηση κάθετα σε αυτό (προφανώς η παραπάνω διευκρίνιση αφορά όσες αναλύσεις περιλαμβάνουν το έδαφος, προτού αντικατασταθεί με ελατήρια και αποσβεστήρες).

Η προσομοίωση του συστήματος τετραγωνικού θεμελίου επί ανελαστικού εδάφους για τις στατικές και δυναμικές αναλύσεις φαίνεται στο **Σχήμα 2.2α**. Η αργλική εδαφική στρώση έχει πάχος  $H = 2B$ , μήκος  $L = 7B$  και πλάτος  $W/2 = 7B/2$ , όπου  $B$  το πλάτος του θεμελίου. Οι διαστάσεις του προσομοιώματος επιλέγονται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συμπεριφορά του εδάφους ως ομοιογενής ελαστικός ημίχωρος. Εν προκειμένω, η απόσταση των ορίων του προσομοιώματος είναι ικανοποιητική, εάν λάβει κανείς υπόψη ότι η περιοχή του εδάφους που επηρεάζεται (βολβός επιρροής) στην κατακόρυφη διεύθυνση κατά την επιβολή περιστροφικής φόρτισης είναι της τάξης των  $1 \div 2B$  [Gazetas, 1987]. Ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πυκνότερος στην περιοχή κάτω και γύρω από το θεμέλιο.

Η προσομοίωση του συστήματος τετραγωνικού θεμελίου επί ελατηρίων και αποσβεστήρων για τις στατικές και δυναμικές αναλύσεις φαίνεται στο **Σχήμα 2.2β**. Τα οκτακομβικά τριδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία που διαμορφώνουν το αβαρές άκαμπτο τετραγωνικό θεμέλιο θα μπορούσαν να παραληφθούν, διατηρούνται απλώς και μόνο για λόγους απεικόνισης. Το σύστημα καταστρώματος – βάθρου προσομοιώνεται, όπως προηγουμένως, με στοιχείο μάζας και ελαστικά γραμμικά στοιχεία δοκού κυκλικής διατομής αντίστοιχα. Τα ελατήρια (SPRING2) και οι αποσβεστήρες (DASHPOT2) ορίζονται από δύο σημεία, τον μεσαίο κόμβο της βάσης του θεμελίου και ένα σημείο (αυθαίρετα) ορισμένο 0.5m πιο κάτω κατά τον κατακόρυφο άξονα. Στον ανώτερο κόμβο δεσμεύονται οι εκτός επιπέδου μετακινήσεις (1 μετατόπιση & 2 στροφές). Ο δε κατώτερος κόμβος πακτώνεται.

### 2.2.2 Εδαφικό Καταστατικό Προσομοίωμα

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του εδάφους ακολουθεί το κριτήριο διαρροής Von Mises με μη-γραμμικό κινηματικό νόμο κράτυνσης και συσχετισμένο νόμο

πλαστικής ροής. Το συγκεκριμένο καταστατικό προσομοίωμα είναι κατάλληλο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς αργιλικών εδαφών υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises, η εξέλιξη των τάσεων περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha \quad (2.1)$$

όπου  $\sigma_0$  είναι η τιμή της τάσης σε μηδενική πλαστική παραμόρφωση, η οποία θεωρείται σταθερή, και  $\alpha$  είναι η συνιστώσα της κινηματικής κράτυνσης που ορίζει την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής στο χώρο των τάσεων. Η συνάρτηση  $F$  ορίζει την ανεξάρτητη από τις τάσεις επιφάνεια διαρροής:

$$F = f(\sigma - \alpha) - \sigma_0 \quad (2.2)$$

όπου η ισοδύναμη τάση Mises, συνυπολογίζοντας το  $\alpha$  είναι:

$$f(\sigma - \alpha) \quad (2.3)$$

Η πλαστική ροή θεωρείται συσχετισμένη, οπότε:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \dot{\epsilon}^{pl} \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (2.4)$$

Ο νόμος εξέλιξης των τάσεων αποτελείται από δύο συνιστώσες:

- έναν *ισοτροπικό* νόμο κράτυνσης, που περιγράφει την μεταβολή της ισοδύναμης τάσης που ορίζει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής  $\sigma_0$  ως μία συνάρτηση της πλαστικής παραμόρφωσης:

$$\sigma = \sigma_0 + Q_\infty \left( 1 - e^{-b \dot{\epsilon}^{pl}} \right) \quad (2.5)$$

όπου το  $Q_\infty$  και το  $b$  είναι παράμετροι του προσομοιώματος που καθορίζουν τη μέγιστη αλλαγή στο μέγεθος της επιφάνειας διαρροής και το ρυθμό αυτής της



αλλαγής με την  $\dot{\epsilon}^{pl}$ , αντίστοιχα. Για  $Q_{\infty} = 0$  το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής παραμένει σταθερό και το προσομοίωμα εκφυλίζεται σε μη-γραμμικό μοντέλο κινηματικής κράτυνσης.

- έναν μη-γραμμικό κινηματικό νόμο κράτυνσης που περιγράφει την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής στο πεδίο των τάσεων. Ο νόμος αυτός ορίζεται ως η υπέρθεση ενός καθαρά κινηματικού όρου (γραμμικός νόμος κράτυνσης Ziegler) και ενός όρου χαλάρωσης, που εισάγει τη μη-γραμμική συμπεριφορά. Η εξέλιξη της κινηματικής συνιστώσας της τάσης διαρροής περιγράφεται από την έκφραση:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\epsilon}^{pl} \quad (2.6)$$

όπου  $C$  το μέτρο ελαστικότητας για πολύ μικρές παραμορφώσεις

$$C = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} = E = 2(1 + \nu)G_0 \quad (2.7)$$

και  $\gamma$  η παράμετρος που καθορίζει το ρυθμό μείωσης της κινηματικής κράτυνσης κατά την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης.

Στο **Σχήμα 2.4** απεικονίζεται η εξέλιξη των συνιστωσών της κινηματικής και της ιστροπικής κράτυνσης για μονοαξονική και πολυαξονική φόρτιση.

Σύμφωνα με τον νόμο εξέλιξης για την κινηματική συνιστώσα της κράτυνσης, η τιμή της  $\alpha$  πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κύλινδρο ακτίνας:  $\sqrt{2/3} \cdot C/\gamma$ . Εφόσον η επιφάνεια διαρροής είναι φραγμένη, συνεπάγεται ότι όλα τα τασικά σημεία πρέπει να βρίσκονται εντός κυλίνδρου με ακτίνα  $\sqrt{2/3} \cdot \sigma_y$ , όπου  $\sigma_y$  η τάση διαρροής.

Για την περίπτωση των αργίλων, η μέγιστη τάση διαρροής υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι:

$$\sigma_y = \frac{C}{\gamma} + \sigma_0 \quad (2.8)$$

Σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises η μέγιστη τάση είναι:

$$\sigma_y = \sqrt{3} \cdot S_u \quad (2.9)$$

Επομένως από τις δύο προηγούμενες εκφράσεις προκύπτει πως:

$$\gamma = \frac{C}{\sqrt{3} \cdot S_u - \sigma_0} \quad (2.10)$$

Οι παράμετροι του καταστατικού προσομοιώματος βαθμονομήθηκαν βάσει των δημοσιευμένων καμπυλών  $\mathbf{G} - \boldsymbol{\gamma}$  κατά Vucetic & Dobry [1991], σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται από τους Gerolymos & Gazetas [2006].

Ο παραπάνω καταστατικός νόμος και το αντίστοιχο αριθμητικό προσομοίωμα έχουν δοκιμαστεί επιτυχώς, συγκρίνοντας την αριθμητικώς υπολογισμένη φέρουσα ικανότητα  $N_{uo}$  με την αναλυτικώς υπολογισμένη κατά Prandtl σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, όπου προέκυψε απόκλιση μικρότερη του 5%. Μικρές αποκλίσεις, έως 10%, προέκυψαν και για τα τριδιάστατα θεμέλια (κυκλικό, τετραγωνικό & ορθογωνικό). Επίσης, αξ σημειωθεί ότι η ελαστική δυσκαμψία του ομοιογενούς ημιχώρου προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις συστηματικά μεγαλύτερη από την αναλυτική τιμή της [Gazetas, 1987]. Η διακριτοποίηση του αριθμητικού προσομοιώματος (πυκνότητα κανάβου, μέγεθος και τύπος πεπερασμένων στοιχείων), καθώς και οι ιδιότητες της διεπιφάνειας φαίνεται να οδηγούν σε διαφοροποιήσεις της τάξης του 10% έως και 20%.

### 2.2.3 Επιβολή Στατικής & Δυναμικής Φόρτισης

Η στατική μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση επιβαλλόμενης μετατόπισης πραγματοποιείται σε δύο βήματα: αρχικά εφαρμόζονται τα κατακόρυφα στατικά φορτία του συστήματος και εν συνεχεία επιβάλλεται οριζόντια μετακίνηση στην

κορυφή του ταλαντωτή (κέντρο μάζας) μέχρι την ανατροπή του. Η διαδικασία ταυτίζεται, είτε πρόκειται για το σύστημα όπου το έδαφος προσομοιώνεται με πεπερασμένα στοιχεία, είτε για εκείνο στο οποίο έχει αντικατασταθεί με ελατήρια και αποσβεστήρες.

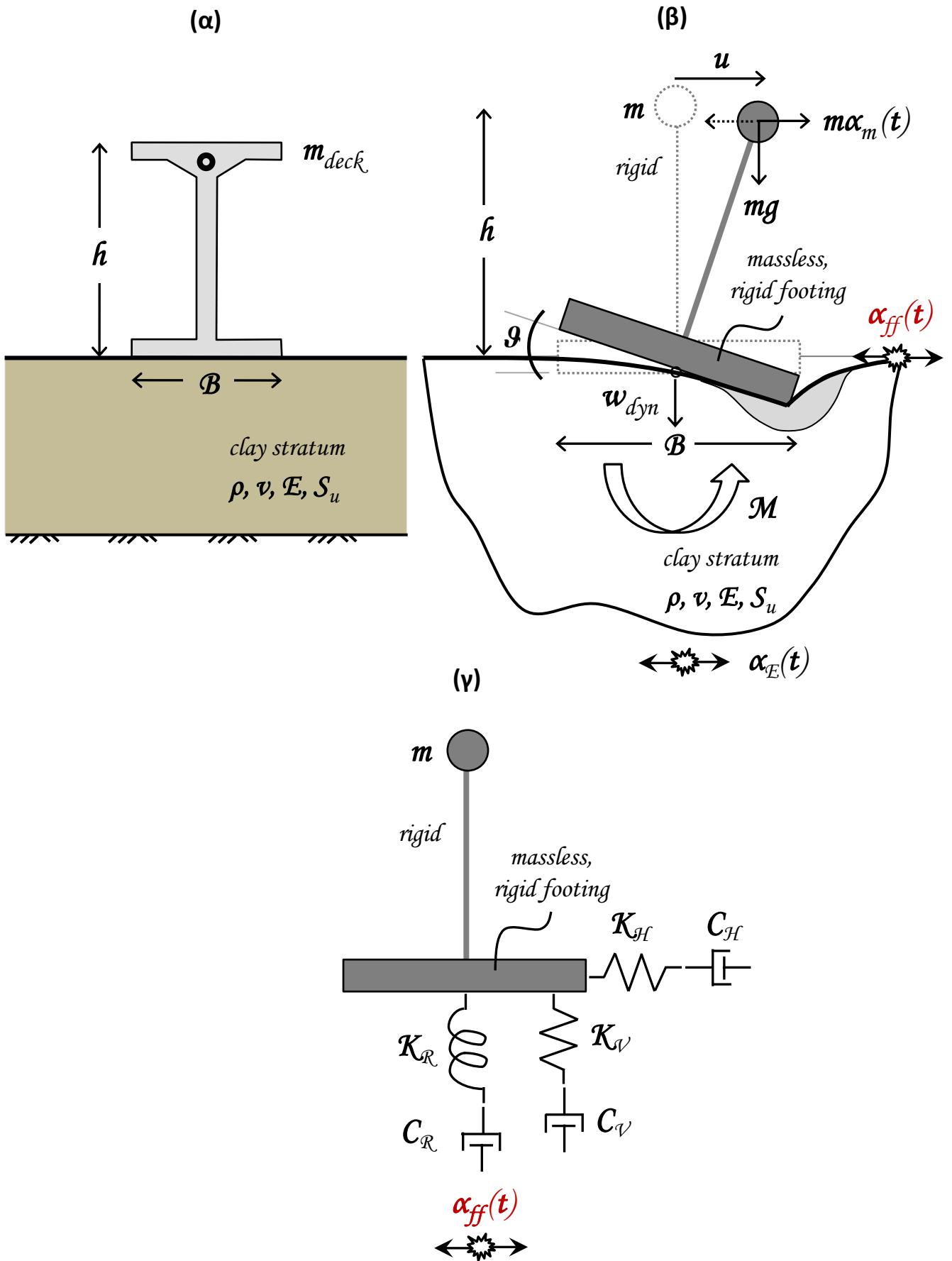
Κατά τη δυναμική φόρτιση το πλήρες προσομοίωμα υπόκειται σε πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, η επιβολή των οποίων γίνεται στη βάση της εδαφικής στρώσης (καταγραφές στο βράχο). Όσον αφορά το ελατηριωτό προσομοίωμα, η διέγερση επιβάλλεται στον κατώτερο κόμβο των ελατηρίων και αποσβεστήρων. Η διέγερση δεν είναι ίδια με αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως, αλλά η καταγραφή στο ελεύθερο πεδίο, όπως αυτή έχει μεταβληθεί λόγω της εδαφικής απόκρισης.



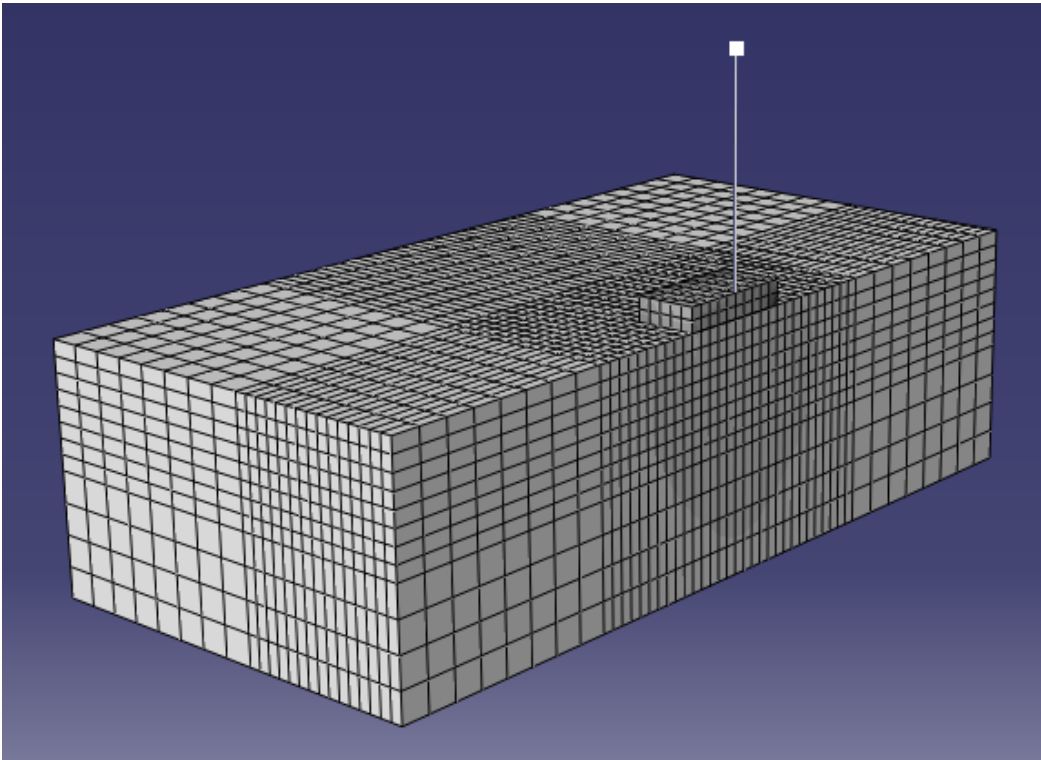
## Σχήματα Κεφαλαίου 2

---

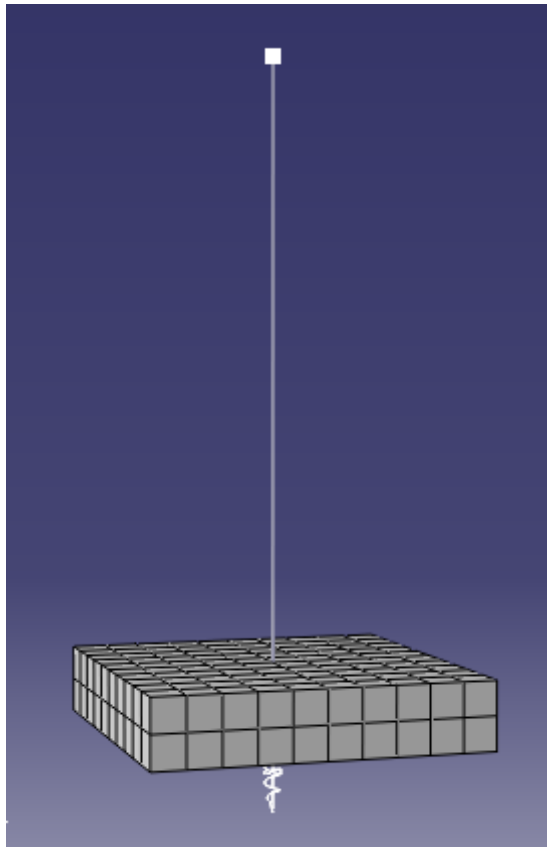




**Σχήμα 2.1** Ορισμός του Προβλήματος: (α) Σκαριφηματική απεικόνιση βάρου γέφυρας, (β) μονοβάθμιος ταλαντωτής επί τετραγωνικού θεμελίου επί ενδόσιμου ανελαστικού αργιλικού εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες, και (γ) ισοδύναμο σύστημα, όπου το έδαφος έχει αντικατασταθεί με ελατήρια & αποσβεστήρες.



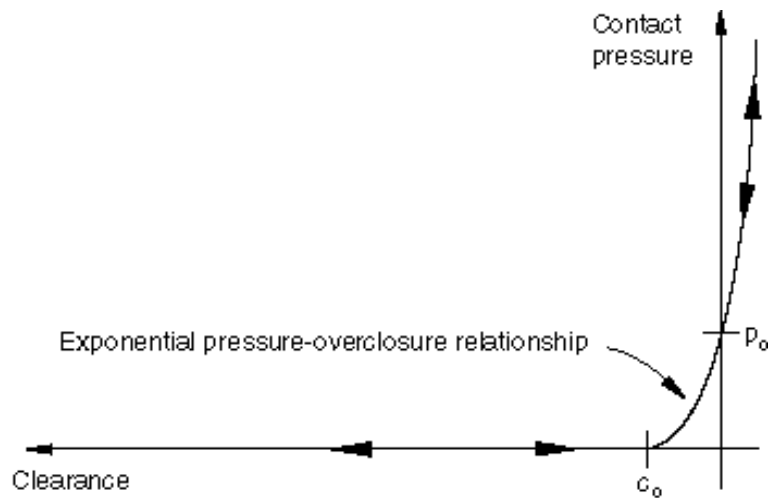
(α)



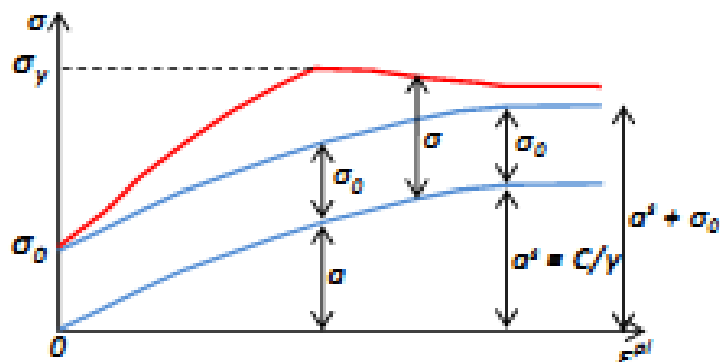
(β)

**Σχήμα 2.2** Τριδιάστατο προσομοίωμα (α) μονοβάθμιου ταλαντωτή επί τετραγωνικού θεμελίου επί ενδόσιμου ανελαστικού εδάφους, και (β) ισοδύναμου συστήματος, όπου το έδαφος έχει αντικατασταθεί με ελατήρια & αποσβεστήρες.

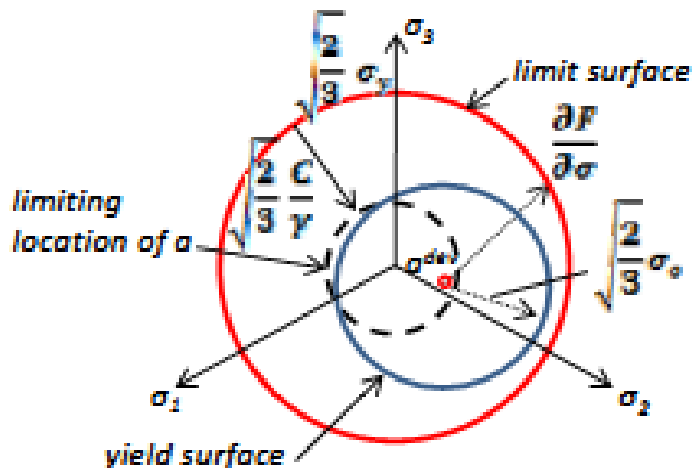




**Σχήμα 2.3** Εκθετικός νόμος επαφής στη διεπιφάνεια εδάφους - θεμελίου



(α)



(β)

**Σχήμα 2.4** Καταστατικό προσομοίωμα εδάφους: εξέλιξη των συνιστωσών της κινηματικής & της ιστροπικής κράτυνσης σε (α) απλοποιημένη μονοδιάστατη απεικόνιση και (β) τριδιάστατη απεικόνιση.



# Κεφάλαιο 3ο:

## Εφαρμογή της Μεθοδολογίας

---

### 3.1 Εισαγωγή - Ορισμοί

Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας απαιτείται η εξ αρχής γνώση **3 αδιαστατοποιημένων σχέσεων** συναρτήσει της γωνίας στροφής  $\theta$  του θεμελίου, οι οποίες επιλέγονται βάσει (α) του σχήματος του θεμελίου (τετραγωνικό, ορθογωνικό, κυκλικό ή λωριδωτό) και (β) του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφου φορτίου  $F_S$ . Πρόκειται για τις εξής:

- Καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\theta$
- Καμπύλη περιστροφικής απόσβεσης  $C_R$  – γωνίας στροφής  $\theta$
- Καμπύλη καθίζησης  $\Delta w$  – γωνίας στροφής  $\theta$

Οι παραπάνω σχέσεις σε αδιάστατη μορφή για τετραγωνικό θεμέλιο διατίθενται έτοιμες προς χρήση ως αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας. Για τα υπόλοιπα σχήματα θεμελίων η διαδικασία βρίσκεται σε απόλυτη αναλογία, απλώς διαφοροποιούνται οι 3 αδιαστατοποιημένες σχέσεις για να ταιριάζουν στο εκάστοτε σχήμα. Η ισχύς της αδιαστατοποίησης των καμπυλών  $M - \theta$  για τετραγωνικό & ορθογωνικό θεμέλιο τεκμηριώνεται στο παράρτημα, ενώ περαιτέρω διερεύνηση για τη δυναμική ισοδυναμία συστημάτων έχει πραγματοποιηθεί από την Kokkali [2010].

Στο **Σχήμα 3.1** απεικονίζονται οι παράμετροι του προβλήματος, παρουσιάζεται ο άκαμπτος μονοβάθμιος ταλαντωτής και το ισοδύναμο στερεό σώμα *επί άκαμπτης βάσης*, καθώς και ο άκαμπτος μονοβάθμιος ταλαντωτής *επί ενδοσίμου εδάφους*, ο οποίος και χρησιμοποιείται στις αναλύσεις.

Βάσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  του υπό εξέταση εδάφους σε κάθε περίπτωση, ορίστηκε ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας έναντι κατακόρυφης φόρτισης  $F_S$  ως εξής:

$$F_S = \frac{N_{uo}}{N} \quad (3.1)$$

όπου  $N$  το κατακόρυφο φορτίο του θεμελίου και  $N_{uo}$  το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει το σύστημα από τη σχέση:

$$N_{uo} = \pi + 2 \left( 1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) A S_u \cong \pi + 3 B^2 S_u \quad (3.2)$$

όπου  $A$  είναι το εμβαδό της επιφάνειας επαφής εδάφους θεμελίου,  $B$  η διάσταση παράλληλα στο επίπεδο περιστροφής και  $L$  η εγκάρσια (στη συγκεκριμένη περίπτωση ταυτίζονται). Η αναλυτική τιμή του οριακού φορτίου  $N_{uo}$  συγκρίνεται ικανοποιητικά με την τιμή που προκύπτει αν υποβληθεί το αριθμητικό προσομοίωμα σε στατική φόρτιση επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετατόπισης.

### 3.2 Επιλογή Μη-Γραμμικού Περιστροφικού Ελατηρίου $M - \theta$

Οι καμπύλες αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\theta$  για το τετραγωνικό θεμέλιο σχηματίζονται ύστερα από μια σειρά στατικών μονοτονικών αναλύσεων επιβαλλόμενης οριζόντιας μετατόπισης και έχουν οριζόντιο μετελαστικό κλάδο, ο οποίος υποδηλώνει την απουσία φαινομένων 2ας τάξεως. Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι διαθέσιμες οι καμπύλες  $M - \theta$  για  $F_S = 10, 5, 3.3, 2.5$  &  $2$ .

Συντελεστές ασφαλείας  $F_S$  μικρότεροι από 2 σπανιώς συναντώνται, καθώς δεν προτείνονται κατά τον σχεδιασμό, προκειμένου να περιοριστούν οι καθιζήσεις. Παρ'όλα αυτά, μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη σχέση  $M - \theta$  εφαρμόζοντας τις διαθέσιμες σχέσεις και για μικρότερους  $F_S$ .

Για μεγαλύτερους δε συντελεστές ασφαλείας  $F_S$  από 10 (και ενδεχομένως από 5), η μεθοδολογία δεν έχει νόημα – ως προς τον υπολογισμό καθιζήσεων τουλάχιστον – καθώς τότε, η λικνιστική απόκριση του θεμελίου επί *αργλικής* στρώσης δεν οδηγεί σε συσσώρευση καθιζήσεων, διότι η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ως επί το πλείστον από ανασήκωμα – αποκόλληση. Στην πράξη ούτε τέτοιοι  $F_S$  προτείνονται,

καθώς η κατασκευή οδηγείται συνήθως σε μεγάλες γωνίες στροφής, οι οποίες δεν είναι αποδεκτές. Πάντως για  $F_S \geq 10$  το έδαφος συμπεριφέρεται σχεδόν ελαστικά, θεωρήση ρεαλιστική για τη μελέτη είτε πολύ ελαφρά φορτισμένων θεμελίων, είτε πολύ σκληρών εδαφών.

Η αδιαστατοποίηση των καμπυλών  $M - \vartheta$  πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- είτε με το μέγεθος  $S_u B^3$  και μια χαρακτηριστική γωνία  $\vartheta_s$  [Gazetas et al., 2012] (**Σχήμα 3.2α**), η οποία για τετραγωνικό θεμέλιο λαμβάνει την εξής τιμή:

$$\vartheta_s \cong \frac{NB}{4K_R \theta, F_S} = \frac{NB}{4K_{R,elastic} \psi F_S} = \frac{NB}{4K_{R,elastic} \left(1.0 - \frac{0.8}{F_S}\right)} \quad (3.3)$$

όπου  $N$  το κατακόρυφο φορτίο του θεμελίου,  $B$  το πλάτος,  $K_R(\theta, F_S)$  η δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε μηδενική γωνία στροφής του θεμελίου για τον εκάστοτε συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ ,  $\psi(F_S)$  ο συντελεστής απομείωσης της δυσκαμψίας του ελαστικού ομοιογενούς ημιχώρου συναρτήσει του αντιστρόφου του κατακόρυφου συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  [Gazetas et al., 2012] και  $K_{R, elastic}$  η δυσκαμψία στον ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο [Gazetas, 1987], η οποία για τετραγωνικό θεμέλιο με πλευρά  $B = 2b$  δίνεται από τη σχέση:

$$K_{R,elastic} = 3.65 \frac{Gb^3}{1-\nu} \quad (3.4)$$

Στην περίπτωση ελαφριά φορτισμένων θεμελίων η γωνία  $\vartheta_s$  υποδηλώνει την αποκόλληση από το έδαφος, ενώ στην περίπτωση βαριά φορτισμένων θεμελίων, όπου το έδαφος αποκρίνεται ελαστοπλαστικά, λόγω των καθιζήσεων δεν σηματοδοτεί αποκόλληση, απλώς πλαστικοποίηση.

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή  $M_u$  (ροπή αντοχής) αυξάνει με τη μείωση του  $F_S$ , τουλάχιστον μέχρι την τιμή  $F_S = 2$  που φαίνεται στο **Σχήμα 3.2α**, όπως άλλωστε συμβαίνει και σε απόλυτα μεγέθη. Ελαφρώς παραπλανητικό, αλλά οφείλεται στην επιλογή των παραμέτρων αδιαστατοποίησης και μόνον, είναι το γεγονός ότι

η αρχική κλίση της καμπύλης αυξάνεται, όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ , ενώ διαισθητικά αναμένεται το αντίστροφο.

- είτε με τις αντίστοιχες παραμέτρους του ισοδύναμου στερεού σώματος επί άκαμπτης βάσης (**Σχήμα 3.2β**), οι οποίες συμβολίζονται με  $M_R$  &  $\vartheta_R$  και λαμβάνουν τις εξής τιμές:

$$M_R = \frac{mgB}{2} \quad (3.5)$$

$$\vartheta_R = \arctan B/2h \quad (3.6)$$

όπου  $m$  η μάζα του ταλαντωτή,  $B$  το πλάτος του θεμελίου και  $h$  το ύψος του ταλαντωτή (ή διαφορετικά το ύψος του κέντρου μάζας του ισοδύναμου στερεού σώματος).

Με την αδιαστατοποίηση αυτή, όπως φαίνεται στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του **Σχήματος 3.2β**, όσο μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας  $F_s$ , τόσο η αρχική κλίση της καμπύλης, όσο και η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή  $M_u$  μειώνονται. Σε απόλυτα μεγέθη αντιθέτως, μόνον η αρχική ελαστική κλίση παρουσιάζει μείωση, ενώ η  $M_u$  παρουσιάζει αυξητική τάση.

Εκτός όμως από το μη-γραμμικό περιστροφικό ελατήριο, που κυρίως μας ενδιαφέρει σε αυτήν την εργασία, διότι έχουμε απομονώσει και μελετούμε την περιστροφική συμπεριφορά, τοποθετούμε στον κώδικα Abaqus και γραμμικά ελατήρια κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση. Εφόσον μάλιστα η διέγερση επιβάλλεται στον κατώτερο κόμβο των ελατηρίων (και όχι του ταλαντωτή), η ύπαρξη του οριζόντιου ελατηρίου είναι απαραίτητη για την ενεργοποίηση του περιστροφικού. Η σταθερά των ελατηρίων αυτών λαμβάνεται από τις σχέσεις της ελαστικής στατικής κατακόρυφης & οριζόντιας δυσκαμψίας εδάφους – θεμελίου [Gazetas, 1987]:

$$K_z = \frac{4.54Gb}{1-\nu}, \text{ όπου } b \text{ το ημιπλάτος του θεμελίου} \quad (3.7)$$

$$K_H = \frac{9Gb}{2-v}, \text{ όπου } b \text{ το ημιπλάτος του θεμελίου} \quad (3.8)$$

Αυτό είναι, παραδείγματος χάριν, ένα σημείο το οποίο θα μπορούσε να μελετηθεί εκτενέστερα, κατά πόσον δηλαδή επηρεάζει την απόκριση η τιμή της σταθεράς του κατακόρυφου και –κυρίως– του οριζώντιου ελατηρίου.

Σε δεύτερη φάση, γίνεται μια προσπάθεια απλοποίησης της μορφής των προς χρήση καμπυλών  $M - \vartheta$  κάθε είδους επιφανειακού θεμελίου, ούτως ώστε αυτή να δίνεται από μια απλή σχέση συναρτήσεως μόνον του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφου φορτίου  $F_S$ . Μπορούμε να διακρίνουμε 3 κλάδους σε καθεμία από αυτές, τον 1ο ευθύγραμμο – οιονεί ελαστικό, τον 3ο όπου πλέον η αναπτυσσόμενη ροπή έχει λάβει τη μέγιστη τιμή της και τον 2ο μεταβατικό κλάδο μεταξύ των προαναφερθέντων. Εν γένει, ο μεταβατικός κλάδος διαφέρει –ως προς τη μορφή του– μεταξύ των μικρών και των μεγάλων συντελεστών ασφαλείας, καταβάλλεται όμως προσπάθεια να εξαχθεί ενιαία σχέση. Για το τετραγωνικό θεμέλιο τα απλοποιημένα διαγράμματα, αποτελούμενα από διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.5**.

– Αν η αδιαστατοποίηση έχει πραγματοποιηθεί ως προς τα μεγέθη  $S_u B^3$  &  $\vartheta_s$ , τότε:

Η μέγιστη τιμή αδιαστατοποιημένης ροπής  $M_u / S_u B^3$  αναπτύσσεται περίπου για  $\vartheta / \vartheta_s \geq 10$  και λαμβάνεται από τις αναλυτικές καμπύλες αλληλεπίδρασης κατά Gourvenec [2007] (**Σχήμα 3.3β**) συναρτήσεως του αντιστρόφου του συντελεστή ασφαλείας  $\chi = 1/F_S = n_u = N_u / N_{uo}$ :

$$m_u = 0.5 n_u - n_u^2 \quad (3.9)$$

$$\frac{M_u}{S_u B^3} = \pi + 3 m_u = \pi + 3 \cdot 0.5 n_u - n_u^2 \quad (3.10)$$

όπου  $m_u = M_u / N_{uo} B$ .

Τα ενδιαμέσα σημεία του μεταβατικού κλάδου έχουν οριστεί ως ποσοστά της μέγιστης αδιαστατοποιημένης αναπτυσσόμενης ροπής  $M_u/S_u B^3$  όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3.1**, ενώ συνολικά η κατασκευή της απλοποιημένης καμπύλης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.3α**.

Η αρχική κλίση λαμβάνεται σταθερή μέχρι  $\vartheta/\vartheta_s = 1/3$  για κάθε συντελεστή ασφαλείας  $F_s$  και η τιμή της είναι συνάρτηση μόνον του συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ , διότι ισχύουν τα εξής:

$$\left. \begin{aligned} \frac{M}{S_u B^3} = \frac{M}{\vartheta} \frac{\vartheta_s}{S_u B^3} \\ \frac{M}{\vartheta} = K_R \cdot 0, F_s \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \left. \begin{aligned} \frac{M}{S_u B^3} = K_R \cdot 0, F_s \frac{\vartheta_s}{S_u B^3} \\ \vartheta_s \cong \frac{mgB}{4K_R \cdot 0, F_s} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \left. \begin{aligned} \frac{M}{S_u B^3} = K_R \cdot \vartheta, F_s \frac{mgB}{4K_R \cdot \vartheta, F_s \cdot S_u B^3} \\ F_s = \frac{N_{uo}}{N} = \frac{(\pi+3) S_u B^2}{mg} \Leftrightarrow \frac{mg}{S_u B^2} = \frac{(\pi+3)}{F_s} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \\ \frac{M}{S_u B^3} \cong \frac{\pi+3}{4} \frac{1}{F_s} \tag{3.11}$$

– Αν η αδιαστατοποίηση έχει πραγματοποιηθεί ως προς τα μεγέθη  $M_R$  &  $\vartheta_R$ , τότε:

Η μέγιστη τιμή αδιαστατοποιημένης ροπής  $M_u/M_R$  αναπτύσσεται για  $\vartheta/\vartheta_R \geq 0.05$  και λαμβάνεται κατά Kutter [reference] συναρτήσει του αντιστρόφου του συντελεστή ασφαλείας  $\chi = 1/F_s = N_u/N_{uo}$  από τη σχέση  $M_u/M_R = 1 - \chi$ .

Τα ενδιαμέσα σημεία ορίζονται σύμφωνα με τον **Πίνακα 3.2**, ενώ συνολικά η κατασκευή της απλοποιημένης καμπύλης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.4**.

Η αρχική κλίση λαμβάνεται σταθερή μέχρι  $\vartheta/\vartheta_R = 0.0015$  για κάθε συντελεστή ασφαλείας  $F_s$  και η τιμή της είναι συνάρτηση του συντελεστή ασφαλείας, της περιστροφικής δυσκαμψίας του ελαστικού ημιχώρου και της λυγηρότητας του συστήματος (αφού υπεισέρχεται στον υπολογισμό του όρου  $\vartheta_R$  το ύψος  $h$  του μονοβάθμιου ταλαντωτή):



$$\left. \begin{array}{l} \frac{M}{M_R} = \frac{M}{\vartheta} \frac{\vartheta_R}{M_R} \\ \frac{M}{\vartheta} = K_R \quad 0, F_S \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left. \begin{array}{l} \frac{M}{M_R} = K_R \quad 0, F_S \frac{\vartheta_R}{M_R} \\ \vartheta_R = \frac{B}{2h} \quad \& \quad M_R = \frac{mgB}{2} \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left. \begin{array}{l} \frac{M}{M_R} = K_R \quad 0, F_S \frac{1}{mgh} \\ K_R \quad 0, F_S = \left(1 - \frac{0.8}{F_S}\right) K_{R,elastic} \end{array} \right\} \Leftrightarrow \\
 \frac{M}{M_R} = \left(1 - \frac{0.8}{F_S}\right) K_{R,elastic} \frac{1}{mgh} \quad (3.12)$$

### 3.3 Επιλογή Συντελεστή Περιστροφικής Απόσβεσης $C_R$

Από τη στιγμή που αντικαθίστανται τα πεπερασμένα στοιχεία του εδάφους (το καταστατικό προσομοίωμα των οποίων διέθετε απόσβεση) με μη-γραμμικό περιστροφικό ελατήριο, οφείλει να προστεθεί και ο αντίστοιχος αποσβεστήρας στην περιστροφική διεύθυνση για να επιτευχθεί η ισοδύναμη απόκριση του συστήματος σε δυναμική φόρτιση. Υπενθυμίζεται ότι το μη-γραμμικό περιστροφικό ελατήριο που εισάγεται είναι ελαστικό, δεν παρουσιάζει δηλαδή υστερητική συμπεριφορά, οπότε κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης και επαναφόρτισης ακολουθεί την ίδια πορεία, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.6**, εξού και η ανάγκη εισαγωγής αποσβεστήρα.

Η συνολική απόσβεση  $C_R$  του συστήματος έχει τρεις συνιστώσες:

- μια *υστερητική* συνιστώσα που είναι συνάρτηση των επιμέρους απωλειών ενέργειας σε κάθε εδαφικό στοιχείο,
- μια *ιξώδη* συνιστώσα, προϊόν ακτινοβολίας ενός μέρους της επιβαλλόμενης στο θεμέλιο ενέργειας, μέσω κυμάτων που «διασπείρονται» προς όλες τις κατευθύνσεις &
- μια συνιστώσα λόγω των *κρούσεων* του θεμελίου με το υποκείμενο έδαφος που ακολουθούν την αποκόλληση – ανασήκωμά του στις περιπτώσεις μεγάλου συντελεστή ασφαλείας.

Στην παρούσα μεθοδολογία δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του συντελεστή  $C_R$  η απόσβεση ακτινοβολίας και εκείνη λόγω των κρούσεων, παρά μόνον η υστερητική. Το πλήρες προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, διαθέτει συνοριακές συνθήκες τέτοιες, που ούτως ή άλλως δεν επιτρέπουν να ληφθεί υπόψη η απόσβεση ακτινοβολίας. Το κατά πόσον λοιπόν επηρεάζεται η απόκριση του συστήματος από την απουσία της ιζώδους συνιστώσας της απόσβεσης αποτελεί επίσης αντικείμενο προς περαιτέρω διερεύνηση. Ο συντελεστής περιστροφικής απόσβεσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_R = \frac{2K_R \xi}{\omega} \quad (3.13)$$

Στον κώδικα Abaqus μπορεί να εισαχθεί μόνο μια τιμή για τον συντελεστή περιστροφικής απόσβεσης  $C_R$  –όχι μια συνάρτηση ως προς τη γωνία στροφής  $\theta$ – οπότε πρέπει αναγκαστικά να γίνει επιλογή μιας χαρακτηριστικής τιμής από το διάγραμμα  $C_R - \theta$ , που να αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά του συστήματος για τον αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ .

Στην περίπτωση ελεύθερης ταλάντωσης, η κυκλική συχνότητα  $\omega = 2\pi f$  αφορά την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή ενώ, στην περίπτωση εξαναγκασμένης ταλάντωσης, τη συχνότητα της διέγερσης. Σε περίπτωση μιας πραγματικής σεισμικής καταγραφής, με πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, μια αντιπροσωπευτική τιμή μπορεί να θεωρηθεί η δεσπόζουσα συχνότητα του ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων. Παρ' όλα αυτά, από τις δυναμικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, προκύπτει ότι καλύτερη σύγκριση μεταξύ πλήρους και ελατηριωτού μοντέλου προκύπτει όταν ως  $\omega$  λαμβάνεται η αρχική (για μηδενική γωνία στροφής  $\theta$ ) λικνιστική ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή. Αυτό γίνεται αντιληπτό για ιδιαίτερα υψίσυχνες διεγέρσεις, όπως παραδείγματος χάριν την καταγραφή Lucerne\_000 από το σεισμό Landers 1992.

Για να μελετηθεί η υστερητική απόσβεση των μονοβάθμιων συστημάτων, δηλαδή η απόσβεση εκείνη που είναι απόρροια της ανελαστικής σχέσης  $\sigma - \epsilon$  του εδαφικού υλικού, πραγματοποιήθηκε σειρά στατικών ανακυκλικών αναλύσεων

επιβαλλόμενης οριζόντιας μετατόπισης σταθερού πλάτους και υπολογίστηκε, για κάθε περίπτωση πλάτους  $\vartheta$  & συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ , ο αντίστοιχος λόγος απόσβεσης  $\xi$ , ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = \frac{\Delta E}{4\pi E_{el}} \quad (3.14)$$

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι όσο μικραίνει ο συντελεστής ασφαλείας  $F_s$ , τόσο αυξάνεται ο λόγος απόσβεσης  $\xi$  για όλο το φάσμα επιβαλλόμενων γωνιών  $\vartheta$ . Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, καθώς οι απώλειες ενέργειας είναι μεγαλύτερες, όσο η συμπεριφορά του συστήματος γίνεται περισσότερο ελαστοπλαστική (βλ. επιφάνεια βρόχων υστέρησης για συγκεκριμένο πλάτος  $\vartheta$  στο **Σχήμα 3.7**). Οι τιμές του λόγου απόσβεσης  $\xi$ , που διατίθενται στον **Πίνακα 3.3**, είναι εξ ορισμού αδιάστατες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιονδήποτε μονοβάθμιο ταλαντωτή (ανεξαρτήτως πλάτους θεμελίου  $B$ , αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_w$ , μέτρου ελαστικότητας  $E$  ή λυγηρότητας  $2h/B$ ).

Ο λόγος απόσβεσης  $\xi$  είναι αύξουσα συνάρτηση του πλάτους των παραμορφώσεων και στο **Σχήμα 3.8α** αυτό φαίνεται συναρτήσει του κατακόρυφου συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ . Ταυτόχρονα η περιστροφική δυσκαμψία  $K_R(\vartheta, F_s)$  είναι φθίνουσα συνάρτηση του πλάτους των παραμορφώσεων (**Σχήμα 3.8β**), οπότε θα μπορούσε να υποθέσει κανείς ότι ο συντελεστής απόσβεσης τελικά θα παραμείνει σχεδόν αμετάβλητος συναρτήσει της επιβαλλόμενης γωνίας στροφής  $\vartheta$ . Δεν συμβαίνει ακριβώς έτσι, αλλά στο **Σχήμα 3.8γ, δ** παρατηρείται συστηματικά, για όλους τους συντελεστές ασφαλείας, ότι από μια αρχική τιμή (η οποία εξαρτάται από τον  $F_s$ ) αυξάνεται για γωνίες μέχρι  $\theta \approx 10^{-3}$ , όπου και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, ενώ στη συνέχεια για μεγαλύτερες γωνίες μειώνεται, έως ότου πρακτικά να μηδενιστεί για  $\theta \geq 10^{-1}$ . Οι αδιαστατοποιημένες τιμές του συντελεστή απόσβεσης  $C_R$  δίνονται στον **Πίνακα 3.4**.

Η ευαισθησία της δυναμικής απόκρισης στην τιμή του συντελεστή  $C_R$  διερευνάται μέσω παραμετρικών αναλύσεων, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο. Το σύστημα δείχνει αρκετά ευαίσθητο ως προς την τιμή του

συντελεστή  $C_R$ . Γενικώς, παρατηρείται συστηματικά η τάση ότι καλύτερα αποτελέσματα (δηλαδή ομοιότερες ιστορίες  $\mathbf{a} - \mathbf{t}$  &  $\mathbf{\vartheta} - \mathbf{t}$ ) προκύπτουν όταν ο  $C_R$  λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, όπως αυτή προκύπτει από το διάγραμμα  $C_R - \vartheta$  για κάθε συντελεστή ασφαλείας. Οπότε προτείνεται απευθείας η χρήση της τιμής για  $\theta = 10^{-3}$  για τον εκάστοτε  $F_S$ :

$$C_{R, \theta = 10^{-3}, F_S} = \frac{2K_R \theta, F_S \xi \theta, F_S}{\omega} = \frac{2 \frac{M \theta, F_S}{\theta} \xi \theta, F_S}{\omega} \quad (3.15)$$

Ας σημειωθεί ότι οι διεγέρσεις που επιβάλλονται οδηγούν το σύστημα σε γωνίες μεγαλύτερες από  $\vartheta \approx 10^{-3}$ , περί τη  $\vartheta \approx 10^{-2}$ , όπου η τιμή του συντελεστή απόσβεσης  $C_R$  έχει ήδη μειωθεί (διότι για  $\vartheta > 10^{-3}$  το γινόμενο  $K_R \cdot \xi$  συνεχώς μειώνεται). Ταυτόχρονα, όμως, μεταβάλλεται (μειώνεται) και η λικνιστική ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή συναρτήσει της γωνίας στροφής  $\vartheta$ . Η μείωση αυτή έχει ακριβώς την αντίθετη επίδραση στην τιμή του  $C_R$ , απ'ότι προηγουμένως είχε το γινόμενο  $K_R \cdot \xi$ , συμβάλλει δηλαδή στην αύξησή του. Αυτή ίσως αποτελεί και μια πιθανή εξήγηση για το γεγονός ότι λαμβάνοντας την τιμή της κορυφής του διαγράμματος, που κατά τα άλλα αντιστοιχεί σε μικρότερη γωνία από εκείνη όπου οδηγείται το σύστημα, προκύπτει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Εκτός όμως από την περιστροφική απόσβεση  $C_R$  που κυρίως μας ενδιαφέρει σε αυτήν την εργασία, διότι έχουμε απομονώσει και μελετούμε την περιστροφική συμπεριφορά, θα τοποθετήσουμε στον κώδικα Abaqus και συντελεστές απόσβεσης  $C_Z$  &  $C_H$  κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση αντίστοιχα. Οι τιμές τους προκύπτουν και πάλι από την εφαρμογή των σχέσεων  $C_Z = 2K_Z \xi / \omega$  και  $C_H = 2K_H \xi / \omega$  αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις λαμβάνονται, με αρκετή αυθαιρεσία (γεγονός όμως που δεν μας προβληματίζει, καθώς η απόκριση δεν παρουσιάζει ευαισθησία στη μεταβολή των εν λόγω τιμών),  $\xi = 0.05$  και  $\omega$  ίση με τη λικνιστική ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή, ενώ οι δυσκαμψίες υπολογίζονται με τις ελαστικές τιμές, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οπότε:

$$C_z = \frac{2K_z \xi}{\omega} \quad (3.16)$$

$$C_H = \frac{2K_H \xi}{\omega} \quad (3.17)$$

## 2.4 Επιλογή Καμπύλης Καθίζησης $\Delta w/B$ – Γωνίας Στροφής $\theta$

Ύστερα από μια σειρά στατικών ανακυκλικών αναλύσεων επιβαλλόμενης οριζόντιας μετατόπισης έχουν καταρτιστεί και διαγράμματα που συσχετίζουν τον ρυθμό αδιαστατοποιημένης καθίζησης  $\Delta w/B$  με τη γωνία στροφής χορδής  $\theta$  για κάθε είδος θεμελίου και συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακορύφου φορτίου  $F_S$ . Η σχέση που διέπει τα δύο αυτά μεγέθη είναι ως επί το πλείστον γραμμική, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.9**. Για μεγάλους συντελεστές ασφαλείας  $F_S = 10$  &  $5$  προκύπτει από το **Σχήμα 3.9** ότι οι καθιζήσεις είναι αμελητέες, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις δυναμικές αναλύσεις, όπως θα φανεί σε επόμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα για τον  $F_S = 5$ , παρατηρείται μια μικρή καθίζηση αν η σεισμική διέγερση στην οποία υπόκειται το σύστημα είναι μεγάλης διάρκειας. Γι' αυτό θα αγνοήσουμε την καμπύλη που προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση για  $F_S = 5$ , και θα κατασκευαστεί (κατ' αναλογία με τις υπόλοιπες) γραμμική σχέση που να συνδέει την καθίζηση με τη στροφή (βλ. **Πίνακα 3.4**).

Το καθένα από τα διαγράμματα του **Σχήματος 3.9** κατασκευάζεται ως εξής: πραγματοποιείται μια στατική ανακυκλική ανάλυση 7 κύκλων αυξανόμενου πλάτους ( $\theta = \pm 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\pm 10^{-2}$ ,  $\pm 2 \cdot 10^{-2}$ ,  $\pm 3 \cdot 10^{-2}$ ,  $\pm 4 \cdot 10^{-2}$  &  $\pm 5 \cdot 10^{-2}$ ) και υπολογίζεται η αδιαστατοποιημένη, ως προς το πλάτος του θεμελίου  $B$ , αθροιστική καθίζηση  $w/B$  στο τέλος κάθε κύκλου. Από την αθροιστική καθίζηση αφαιρείται η αρχική τιμή για  $\theta = 0$ , η οποία οφείλεται στα κατακόρυφα φορτία, έτσι ώστε όλες οι καμπύλες να ξεκινούν από μηδενική τιμή καθίζησης. Στη συνέχεια υπολογίζεται και η αδιαστατοποιημένη καθίζηση  $\Delta w/B$  στο τέλος κάθε κύκλου, με αφαίρεση από κάθε τιμή της προηγούμενης. Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε σε μια σχέση που

συνδέει την καθίζηση με τη στροφή, η οποία βεβαίως δεν είναι απόλυτα ακριβής (αφού η αλληλουχία των κύκλων παίζει ρόλο στη συσσώρευση της καθίζησης), αλλά στο επόμενο κεφάλαιο αυτό ακριβώς διερευνάται, δηλαδή κατά πόσον η προσέγγιση οδηγεί σε ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της προσέγγισης δοκιμάστηκε αρχικά η μέθοδος υπολογισμού της καθίζησης σε χρονοϊστορία  $\vartheta - t$  που προέκυψε κατευθείαν από το προσομοίωμα με το έδαφος, ώστε να διαπιστωθεί ότι λειτουργεί και έχει νόημα η εφαρμογή της σε χρονοϊστορίες που προέκυψαν από το ελατηριωτό προσομοίωμα. Πράγματι, διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα.

## 2.5 Υπολογισμός Τελικής Καθίζησης $w$ & Χρονοϊστορίας $w - t$

Στη χρονοϊστορία  $\vartheta - t$  που προκύπτει από τη δυναμική ανάλυση εντοπίζονται οι διακριτοί ημι-κύκλοι. Σε κάθε ημι-κύκλο πλάτους  $\vartheta$ , αντιστοιχίζεται από το διάγραμμα  $\Delta w - \vartheta$  η τιμή  $\Delta w$  (ή υπολογίζεται απευθείας από τις προσεγγιστικές γραμμικές σχέσεις του Πίνακα 3.5). Το ήμισυ αυτής είναι η περίπου η καθίζηση που αντιστοιχεί στον εκάστοτε ημι-κύκλο. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται η τιμή της τελικής αθροιστικής καθίζησης, αλλά και η –κατά προσέγγιση– χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων.

Αξίζει να σημειωθεί, παρ'όλο που ίσως έχει ήδη καταστεί σαφές, ότι η παρούσα μεθοδολογία αναφέρεται στον υπολογισμό των **δυναμικών** καθιζήσεων, δεν υπολογίζει τις καθιζήσεις λόγω της επιβολής κατακορύφων φορτίων.

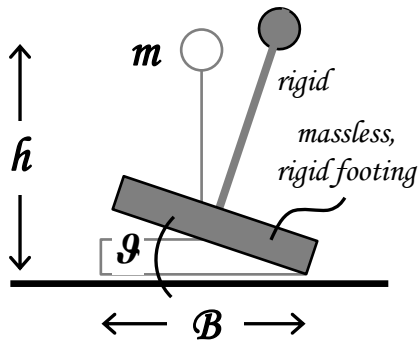
## Σχήματα Κεφαλαίου 3

---

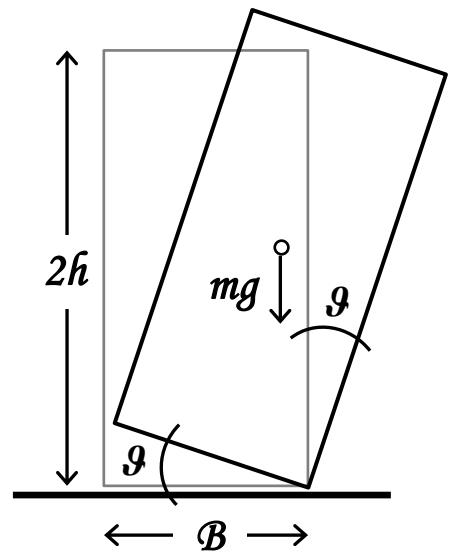




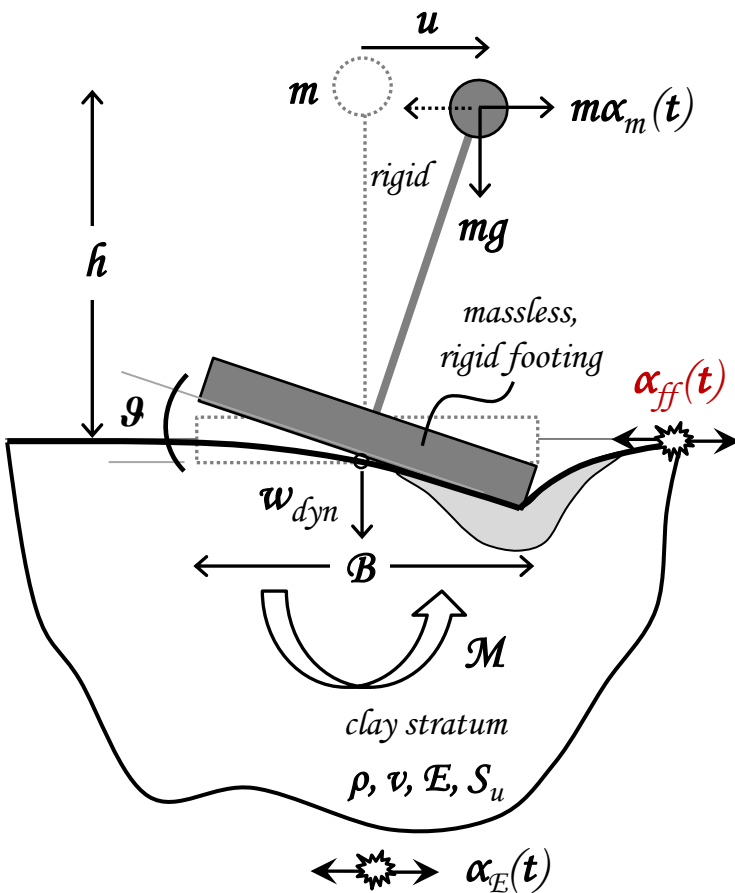
(α)



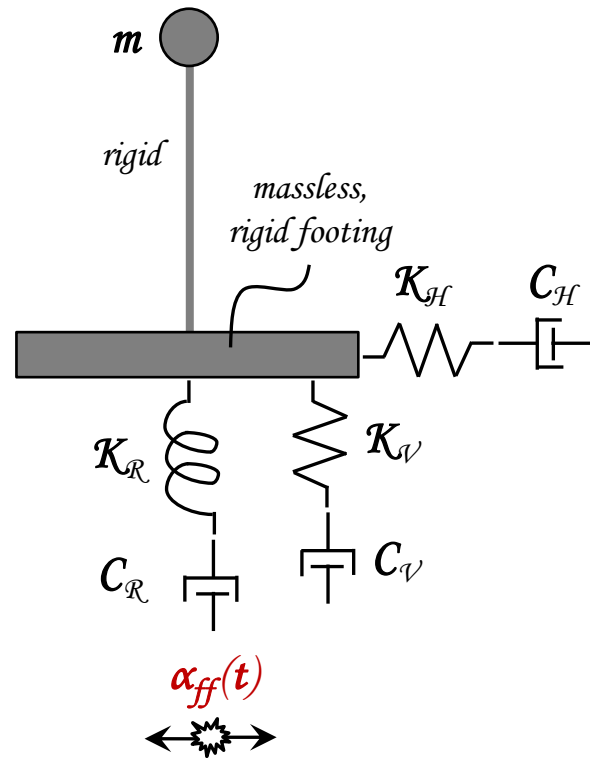
(β)



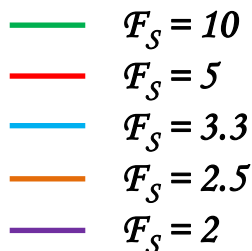
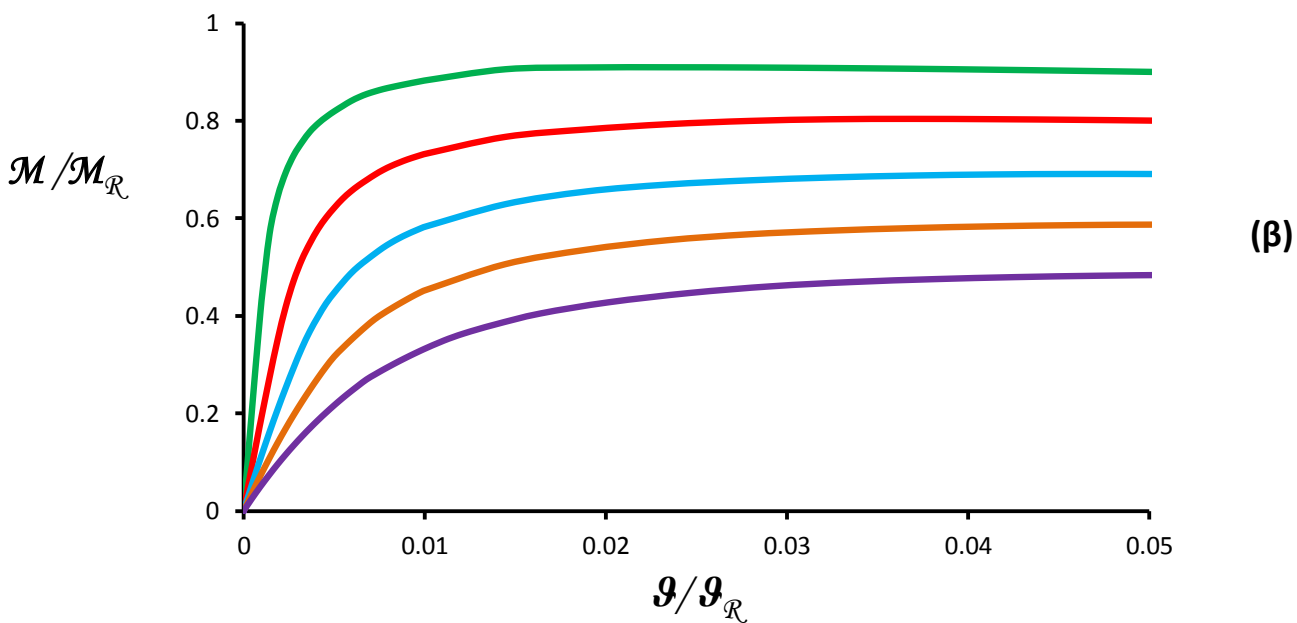
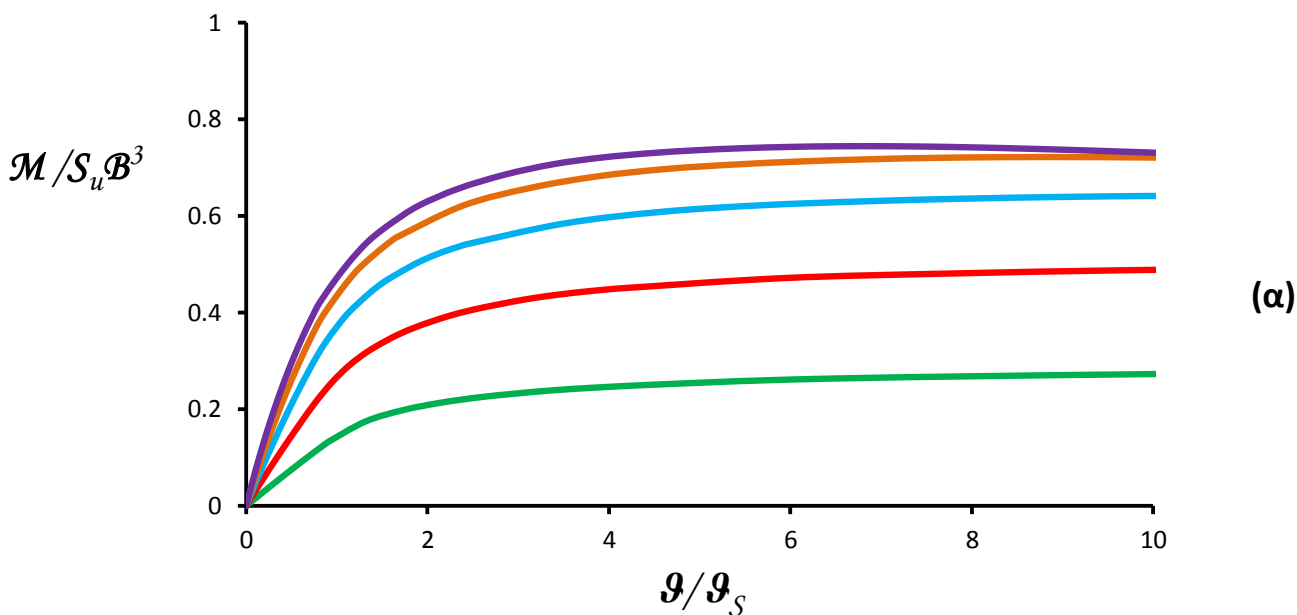
(γ)



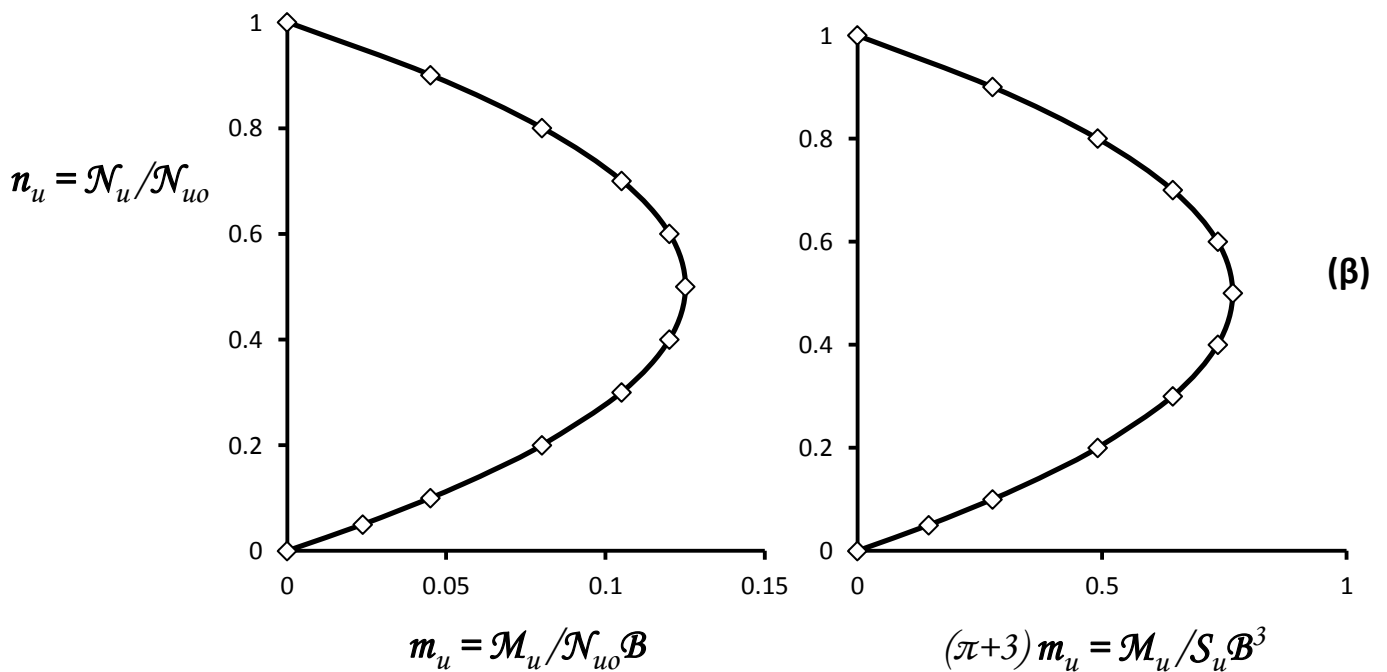
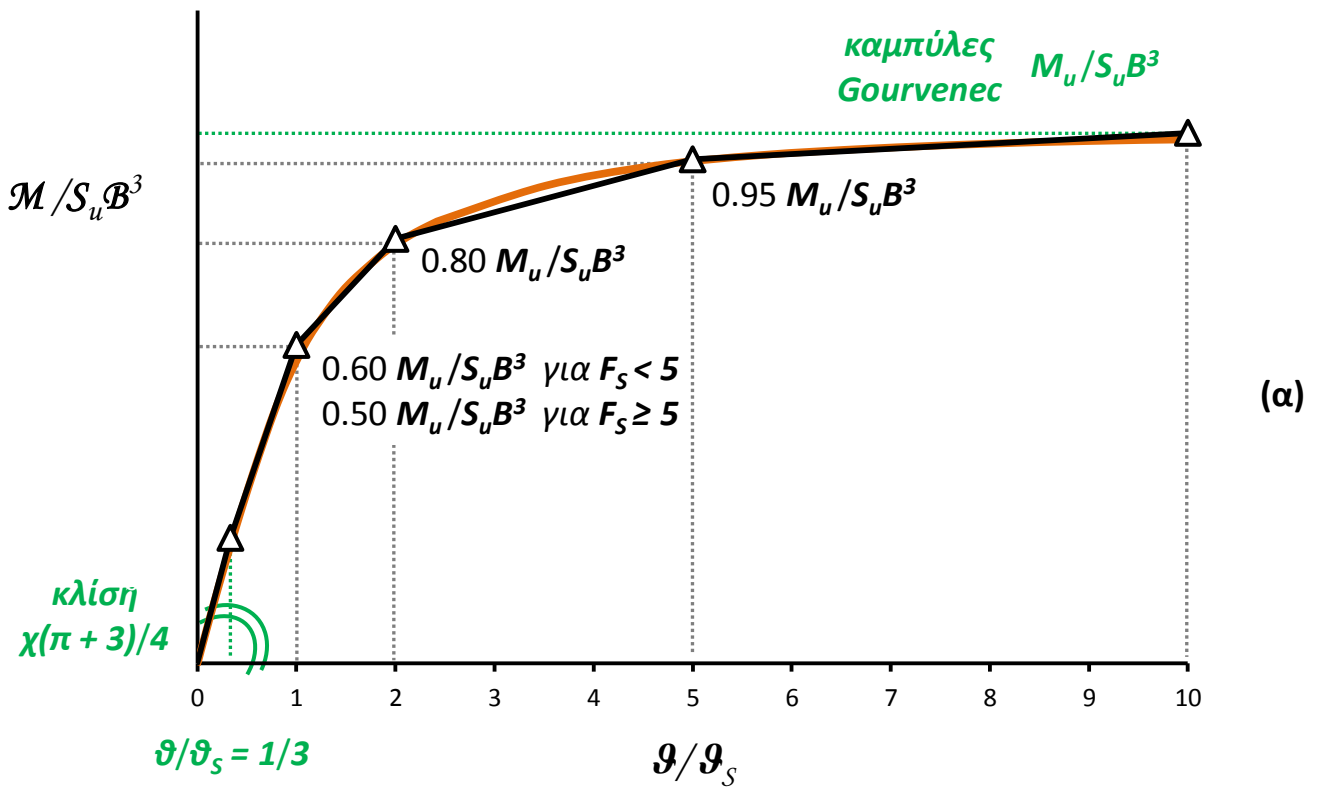
(δ)



**Σχήμα 3.1** Σχηματική απεικόνιση παραμέτρων του προβλήματος: (α) άκαμπτος μονοβάθμιος ταλαντωτής επί άκαμπτης Βάσης, (β) ισοδύναμο στερεό σώμα επί άκαμπτης βάσης, (γ) άκαμπτος μονοβάθμιος ταλαντωτής επί ενδοσίμου εδάφους & (δ) ισοδύναμος άκαμπτος ταλαντωτής επί ελατηρίων & αποσβεστήρων.



**Σχήμα 3.2** Αδιαστατοποιημένες καμπύλες αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  τετραγωνικού θεμελίου για συντελεστές ασφαλείας  $F_S = 10, 5, 3.3, 2.5$  &  $2$  ως προς (α)  $S_u B^3$  &  $\vartheta_S$  και (β) τις παραμέτρους του ισοδύναμου στερεού σώματος επί άκαμπτης βάσης  $M_R$  &  $\vartheta_R$ .



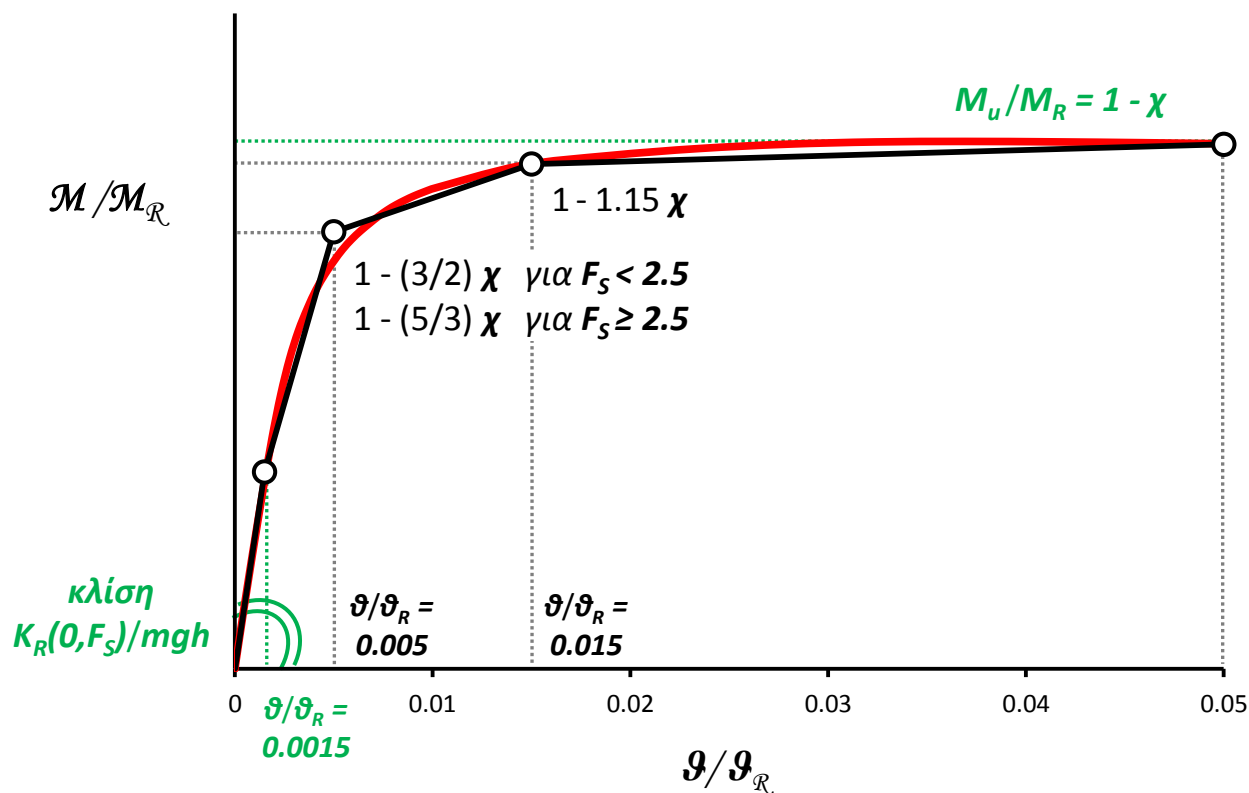
**Σχήμα 3.3 (α)** Απλοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\theta$  τετραγωνικού θεμελίου για αδιαστατοποίηση ως προς  $S_u B^3$  &  $\theta_s$  και **(β)** καμπύλες Γουνενεσ απ' όπου προκύπτει η μέγιστη τιμή  $M_u/S_u B^3$  για κάθε συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ .

**Πίνακας 3.1** Κατασκευή μεταβατικού κλάδου καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  για αδιαστατοποίηση ως προς  $S_u B^3$  &  $\vartheta_s$ .

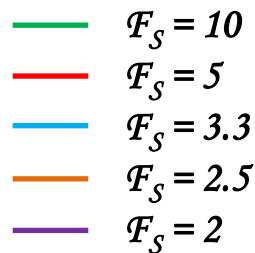
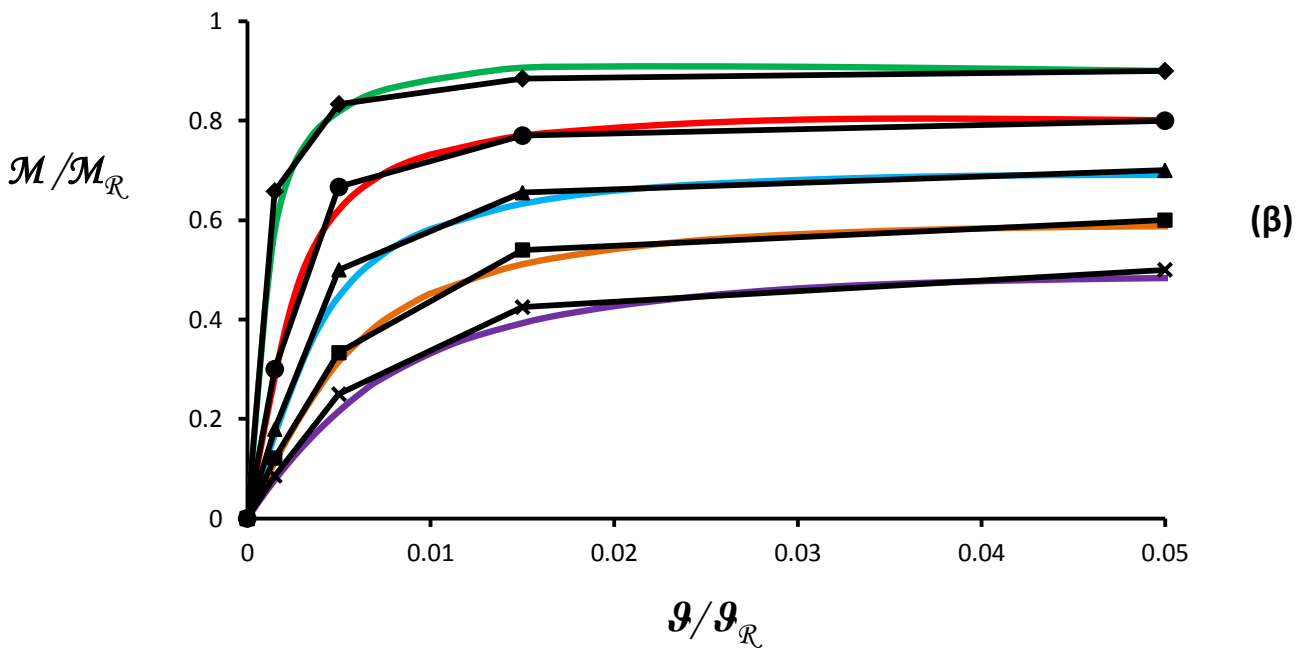
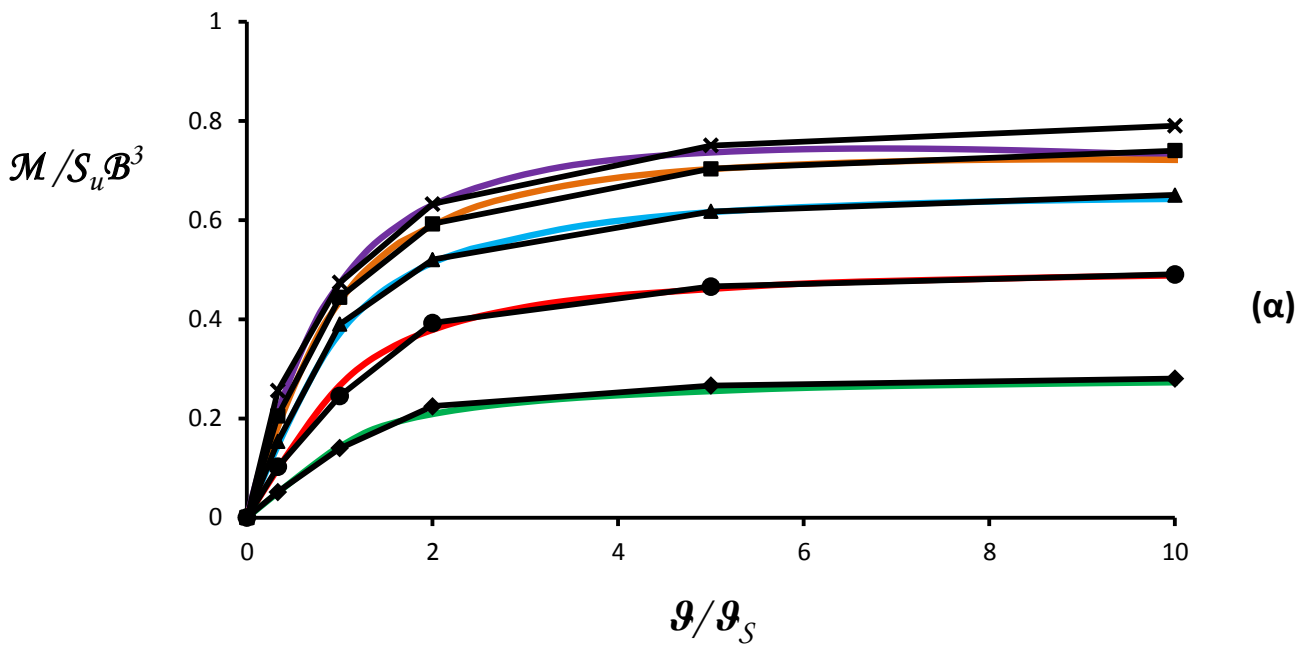
$\vartheta/\vartheta_s$	$M/S_u B^3$
5	$0.95 \cdot M_u/S_u B^3$
2	$0.80 \cdot M_u/S_u B^3$
1	$0.60 \cdot M_u/S_u B^3$ για $F_S < 5$ $0.50 \cdot M_u/S_u B^3$ για $F_S \geq 5$

**Πίνακας 3.2** Κατασκευή μεταβατικού κλάδου καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  για αδιαστατοποίηση ως προς τα μεγέθη του ισοδύναμου στερεού σώματος επί άκαμπτης βάσης  $M_R$  &  $\vartheta_R$ .

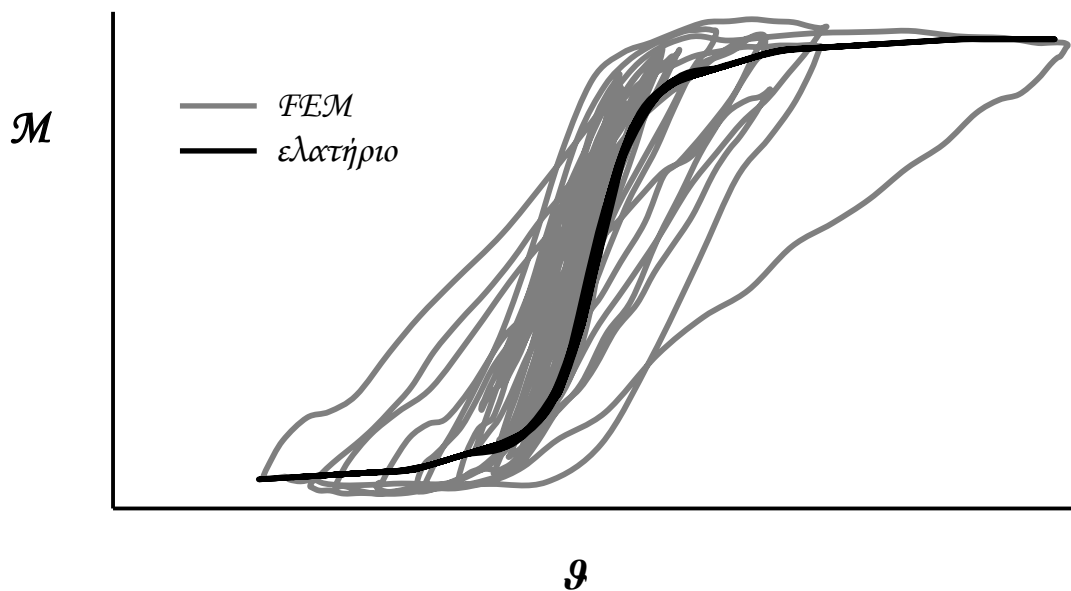
$\vartheta/\vartheta_R$	$M/M_R$
0.005	$M_u/M_R - (2/3)\chi = 1 - (5/3)\chi$ για $F_S \geq 2.5$ $M_u/M_R - (1/2)\chi = 1 - (3/2)\chi$ για $F_S < 2.5$
0.015	$M_u/M_R - 0.15\chi = 1 - 1.15\chi$



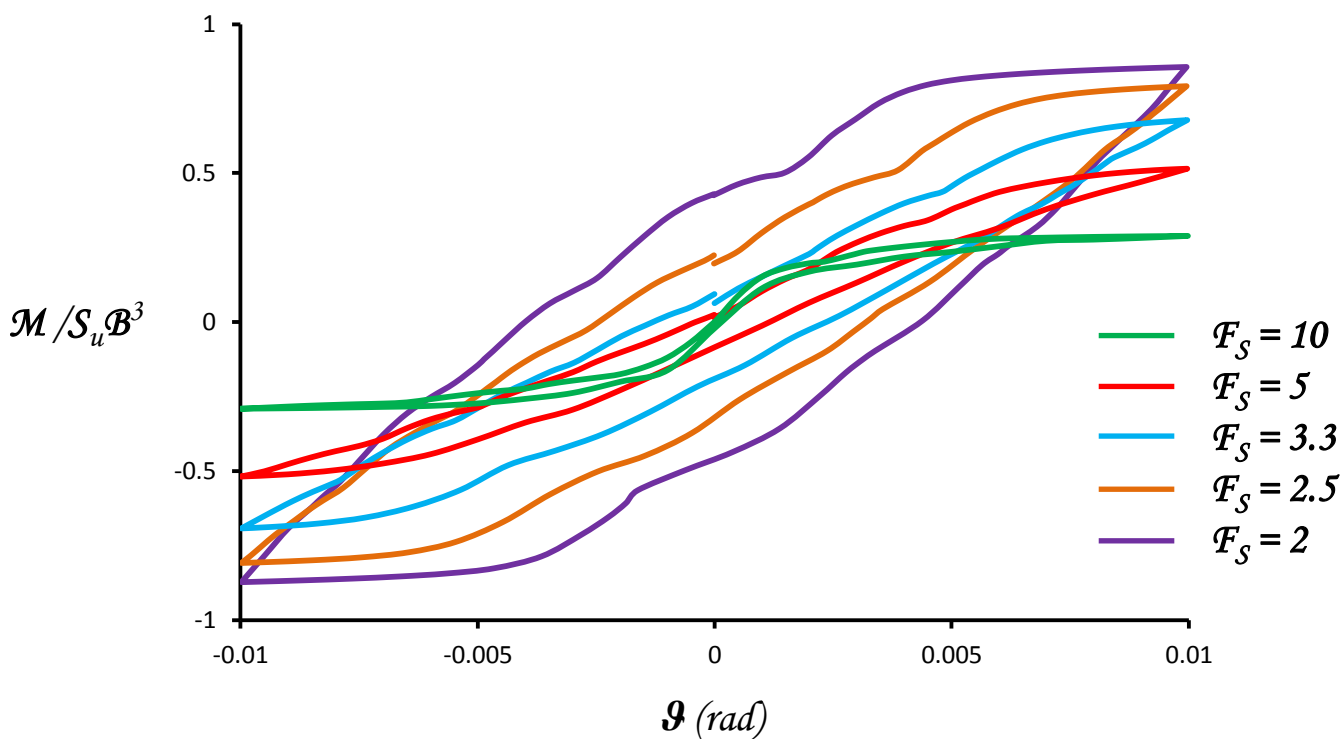
**Σχήμα 3.4** Απλοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  τετραγωνικού θεμελίου για αδιαστατοποίηση ως προς τα μεγέθη του ισοδύναμου στερεού σώματος επί άκαμπτης βάσης  $M_R$  &  $\vartheta_R$ .



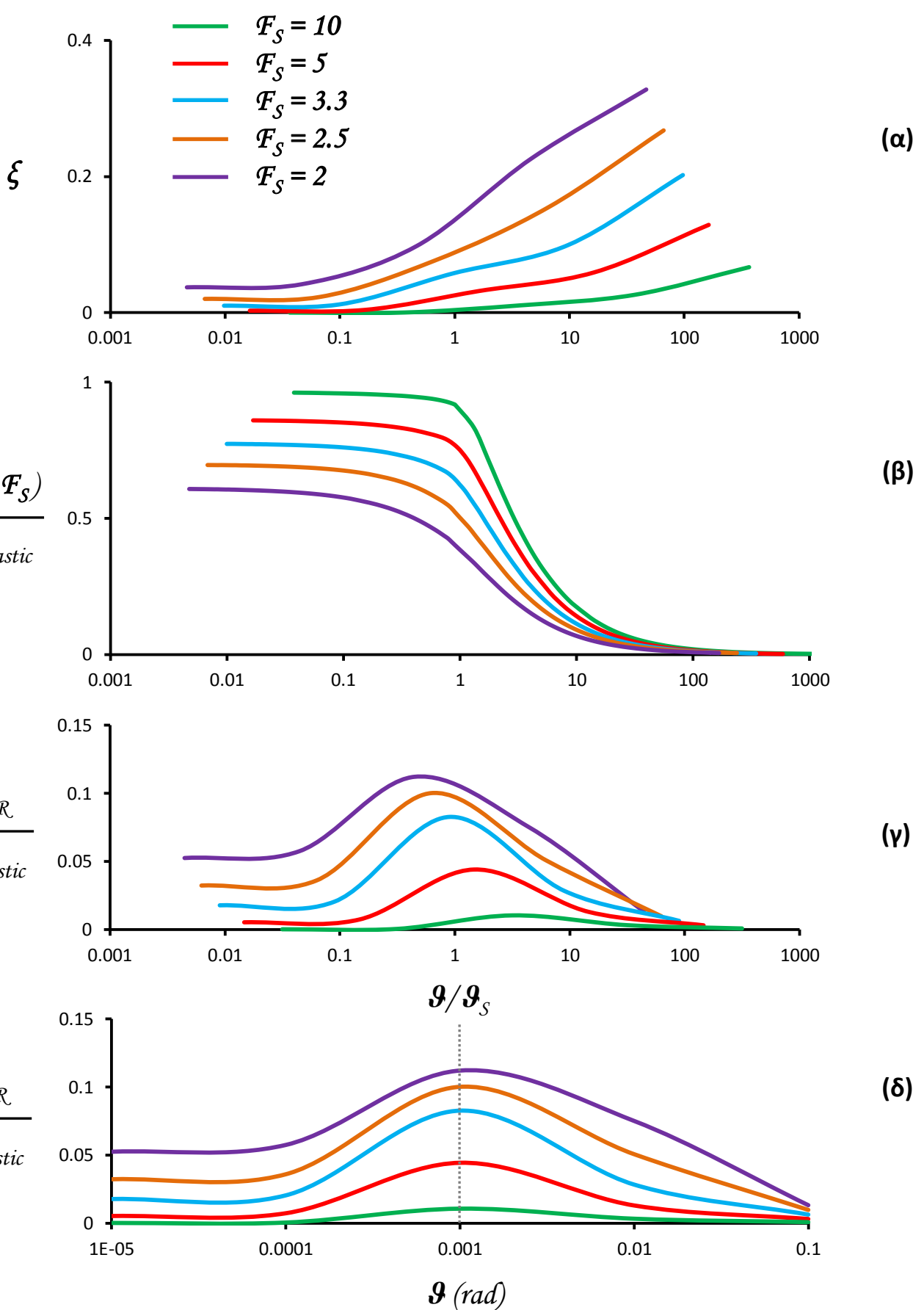
**Σχήμα 3.5** Απλοποιημένες αδιάστατες καμπύλες αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  τετραγωνικού θεμελίου για συντελεστές ασφαλείας  $F_S = 10, 5, 3.3, 2.5$  &  $2$ , ως προς (α)  $S_u B^3$  &  $\vartheta_S$  και (β) τα μεγέθη που αφορούν το ισοδύναμο στερεό σώμα επί άκαμπτης βάσης  $M_R$  &  $\vartheta_R$ .



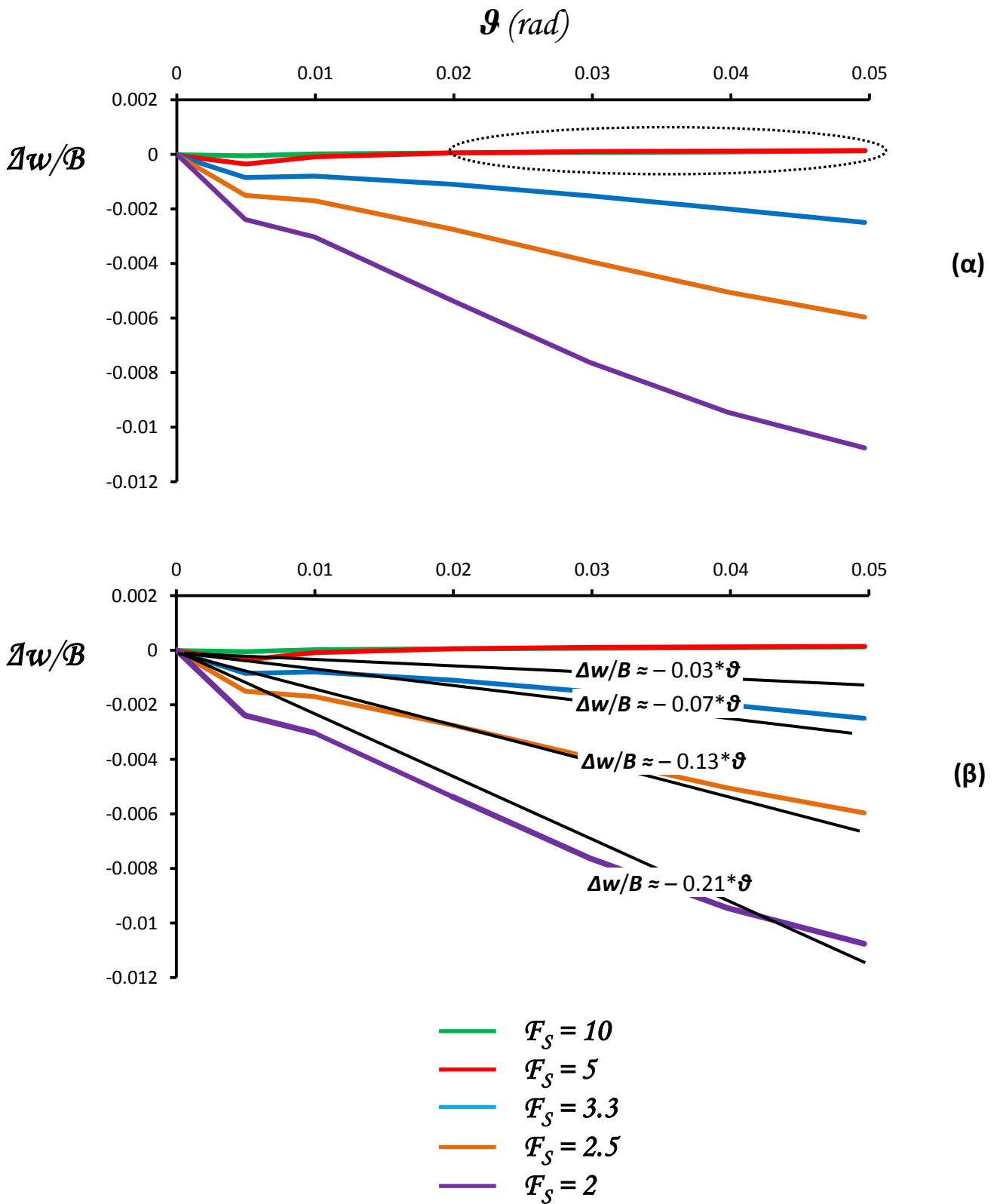
**Σχήμα 3.6** Σύγκριση καμπυλών αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  τετραγωνικού θεμελίου, όπως προέκυψαν από δυναμική ανάλυση του ελατηριωτού & του πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.



**Σχήμα 3.7** Βρόχοι υστέρησης  $M - \vartheta$ , όπως προέκυψαν από στατικές ανακυκλικές αναλύσεις πλάτους  $\vartheta = 0.01$ , τετραγωνικού θεμελίου για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ .



**Σχήμα 3.8** Υπολογισμός συντελεστή περιστροφικής απόσβεσης  $C_R$  τετραγωνικού θεμελίου: (α) καμπύλες λόγου απόσβεσης  $\xi$  – γωνίας στρώσης  $\theta/\theta_S$ , όπως προέκυψαν από στατικές ανακυκλικές αναλύσεις, (β) καμπύλες περιστροφικής δυσκαμψίας  $K_R(\theta, F_S)/K_{R, elastic}$  – γωνίας στρώσης  $\theta/\theta_S$ , όπως προέκυψαν από στατικές μονοτονικές αναλύσεις και (γ), (δ) καμπύλες συντελεστή περιστροφικής Απόσβεσης  $C_R$  – γωνίας στρώσης  $\theta/\theta_S$  ή  $\theta$  αντίστοιχα, για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ .



**Σχήμα 3.9 (α)** Καμπύλες αδιαστατοποιημένης καθίζησης  $\Delta w/B$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$ , όπως προέκυψαν από στατικές ανακυκλικές αναλύσεις & **(β)** γραμμικές σχέσεις  $\Delta w/B$  –  $\vartheta$  για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας  $\mathcal{F}_S$ .



**Πίνακας 3.3** Τιμές του λόγου απόσβεσης  $\xi$  για διάφορες τιμές γωνίας στροφής  $\vartheta$  και συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ .

$\xi$ (%)		$F_S$				
		10	5	3.3	2.5	2
$\vartheta$	0.00001	0.01	0.3	1.0	2.0	3.7
	0.0001	0.02	0.4	1.2	2.3	4.2
	0.001	1.1	3.2	5.8	7.6	9.8
	0.01	2.6	5.9	9.9	15.5	22.7
	0.01	6.7	12.9	20.2	26.8	32.8

**Πίνακας 3.4** Τιμές του αδιαστατοποιημένου συντελεστή απόσβεσης  $\omega C_R / K_{R, \text{elastic}}$  για διάφορες τιμές γωνίας στροφής  $\vartheta$  και συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ .

$\omega C_R / K_{R, \text{elastic}}$		$F_S$				
		10	5	3.3	2.5	2
$\vartheta$	0.00001	0.0002	0.0051	0.0176	0.0322	0.0524
	0.0001	0.0005	0.0071	0.0203	0.0359	0.0574
	0.001	0.0105	0.0442	0.0825	0.1002	0.1121
	0.01	0.0032	0.0128	0.0282	0.0506	0.0751
	0.01	0.0008	0.0029	0.0061	0.0096	0.0131

**Πίνακας 3.5** Γραμμικές σχέσεις καθίζησης  $\Delta w/B$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  συναρτήσει του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ .

$F_S$	$\Delta w/B - \vartheta$
2	$\Delta w/B \approx -0.21 * \vartheta$
2.5	$\Delta w/B \approx -0.13 * \vartheta$
3.3	$\Delta w/B \approx -0.07 * \vartheta$
5	$\Delta w/B \approx -0.03 * \vartheta$
10	$\Delta w/B \approx -0.01 * \vartheta$



# Κεφάλαιο 4ο:

## Αποτελέσματα Δυναμικής Ανάλυσης

---

### 4.1 Περιγραφή Εξεταζόμενου Συστήματος

Προς τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο εφαρμογή σε σύστημα λυγηρότητας  $2h/B = 4$ , πλάτους θεμελίου  $B = 2\text{m}$ , εδαφικών παραμέτρων  $E = 270\text{MPa}$  και  $S_u = 150\text{kPa}$  για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακορύφου φορτίου  $F_s$  (**Σχήμα 4.1**). Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης της λικνιστικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος σε στατική μονοτονική φόρτιση επιβαλλόμενης μετατόπισης, ενώ στη συνέχεια τα συγκριτικά αποτελέσματα, μεταξύ πλήρους και ελατηριωτού προσομοιώματος, σε δυναμική φόρτιση.

Στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζονται τα διαγράμματα λικνιστικής ιδιοπεριόδου  $T_n$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  του εξεταζόμενου συστήματος για διάφορους συντελεστές ασφαλείας έναντι κατακορύφου φορτίου  $F_s$ , όπως προέκυψαν από στατικές μονοτονικές αναλύσεις επιβαλλόμενης μετατόπισης [Gazetas et al., 2012]. Εξαιτίας της σχετικώς μεγάλης λυγηρότητας  $2h/B = 4$ , η κυρίαρχη ιδιομορφή ταλάντωσης είναι η λικνιστική, ενώ στην πράξη το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ανάστροφο εκκρεμές. Θεωρώντας, λοιπόν, γραμμική προσέγγιση για μικρές γωνίες  $\vartheta$ , αγνοώντας οποιαδήποτε οριζόντια μετατόπιση του θεμελίου και λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα  $P - \delta$ , η διαφορική εξίσωση ελεύθερης ταλάντωσης εκφράζεται ως:

$$(mh^2)\ddot{\vartheta} + (K_R - mgh)\vartheta \approx 0 \quad (4.1)$$

$$T_n \approx 2\pi \sqrt{\frac{mh^2}{K_R - mgh}} \quad (4.2)$$

όπου  $K_R = K_R(\vartheta, F_S)$ , δηλαδή σε κάθε τιμή της γωνίας  $\vartheta$  και του συντελεστή ασφαλείας  $F_S = N_{uo}/mg$  αντιστοιχεί μια μοναδική τιμή  $K_R$ .

Η αρχική λικνιστική ιδιοπερίοδος (για  $\vartheta = 0$ ) εκφράζεται ως:

$$T_n(0, F_S) \approx 2\pi \sqrt{\frac{N_{uo} h^2}{F_S g K_{R,elastic} \psi(F_S)}} \quad (4.3)$$

και είναι φθίνουσα συνάρτηση του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ , όπως φαίνεται καθαρά στο μεγεθυμένο διάγραμμα του **Σχήματος 4.2**. Για μικρές τιμές  $\vartheta$  (<0.05 rad), η  $T_n$  αυξάνεται σχεδόν με σταθερό ρυθμό, αλλά στη συνέχεια η αύξηση πραγματοποιείται εκθετικά μέχρι να απειριστεί τείνοντας ασυμπτωματικά στη γωνία ανατροπής  $\vartheta = \vartheta_u$ . Για τους  $F_S$  που εξετάζονται στην παρούσα εργασία οι  $T_n(0, F_S)$  κυμαίνονται από 0.2sec έως 0.54sec. Για μεγάλες τιμές  $F_S$ , η  $\vartheta_u$  αποτελεί καθαρά γεωμετρικό μέγεθος και δίνεται από τη σχέση του στερεού σώματος επί άκαμπτης βάσης:

$$\vartheta_u \approx \arctan \frac{b}{h} \approx \frac{b}{h} \approx 0.245 \quad (4.4)$$

Η εντυπωσιακή αυτή αύξηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του συστήματος αποτελεί έναν από τους βασικούς λόγους που η μη-γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού λειτουργούν ως μόνωση για την ανωδομή σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών διεγέρσεων, οι οποίες εισάγουν μεγάλες παραμορφώσεις.

Στο **Σχήμα 4.3** συνοψίζεται η συμπεριφορά του μονοβάθμιου συστήματος σε στατική μονοτονική φόρτιση με τις αδιαστατοποιημένες καμπύλες (α) οριζόντιου φορτίου  $F/S_u B^2$  – οριζόντιας μετατόπισης  $\delta/B$  καταστρώματος, (β) αναπτυσσόμενης ροπής  $M/S_u B^3$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  θεμελίου, (γ) καθίζησης  $w/B$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  θεμελίου & (δ) αναπτυσσόμενης ροπής  $M/S_u B^3$  – καθίζησης  $w/B$  θεμελίου για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακορύφου φορτίου  $F_S$ . Μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής: στο διάγραμμα ροπής  $M/S_u B^3$  – στροφής  $\vartheta$ , για το φάσμα συντελεστών ασφαλείας  $F_S$  που εξετάζεται, όσο μικραίνει ο  $F_S$ , τόσο

αυξάνει η ροπή αντοχής  $M_u / S_u B^3$  (βλ. διαγράμματα αλληλεπίδρασης Gourvenec), ενώ μικραίνει η τιμή της γωνίας ανατροπής του συστήματος  $\theta_u$ . Σχετικά με τις καθιζήσεις παρατηρούμε ότι, σε στατική μονοτονική φόρτιση και για θεμέλιο επί αργιλικής στρώσης τουλάχιστον, ο συντελεστής ασφαλείας  $F_S = 2$ , αποτελεί ένα κατώφλι: για  $F_S > 2$  κυριαρχεί η αποκόλληση – ανασήκωμα του θεμελίου, ως τρόπος ανάληψης της ροπής, ενώ για  $F_S \leq 2$  κυριαρχεί η πλαστικοποίηση του υποκείμενου εδάφους – κινητοποίηση της φέρουσας ικανότητας, με αποτέλεσμα και την ανάπτυξη καθιζήσεων.

Στο **Σχήμα 4.4α** φαίνονται οι απλοποιημένες καμπύλες που ορίζουν τη συμπεριφορά του μη-γραμμικού ελαστικού περιστροφικού ελατηρίου. Στο σημείο αυτό, αν παρατηρήσει κανείς πόσο γρήγορα (δηλαδή για πόσο μικρή τιμή της γωνίας  $\theta$ ) το σύστημα φτάνει στην αντοχή του, ειδικότερα στην περίπτωση μεγάλου συντελεστή ασφαλείας. Αν ληφθεί, λοιπόν, υπόψη ότι οι επιβαλλόμενες διεγέρσεις οδηγούν το σύστημα πέραν της τιμής  $\theta = 10^{-2}$ , γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι μικρό ρόλο διαδραματίζει η ακριβής μορφή των καμπυλών, και συγκεκριμένα η συναρμογή μεταξύ οιονεί ελαστικού και πλαστικού κλάδου. Επιπλέον, η μεθοδολογία προτείνεται για τον υπολογισμό της απόκρισης *λικνιζόμενων* συστημάτων, συνεπώς *προϋποθέτει* ότι το σύστημα θα έχει εισέλθει στον πλαστικό κλάδο είτε λόγω ανασηκώματος του θεμελίου, είτε λόγω κινητοποίησης της φέρουσας ικανότητας του υποκείμενου εδάφους, είτε λόγω και των δύο φαινομένων ταυτοχρόνως. Αυτό σημαίνει ότι, σε περίπτωση διέγερσης κατά την οποία η θεμελίωση αποκρίνεται ελαστικά, η παρούσα μεθοδολογία δεν έχει νόημα. Η ελαστική απόκριση της θεμελίωσης υποδηλώνει ότι ο σχεδιασμός έχει πραγματοποιηθεί κατά τη συμβατική προσέγγιση, και όχι σύμφωνα με τη νέα φιλοσοφία σχεδιασμού, η οποία αξιοποιεί τη διαρροή του εδάφους ως ασπίδα προστασίας της ανωδομής. Στο **Σχήμα 4.4β** φαίνονται οι τιμές του συντελεστή απόσβεσης  $C_R$  που εισάγονται στις αναλύσεις του ελατηριωτού μοντέλου κατά τα λεγόμενα του προηγούμενου κεφαλαίου, ενώ στον **Πίνακα 4.1** παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός του  $C_R$  για το εξεταζόμενο σύστημα.

Ο ταλαντωτής υποβάλλεται στον εξιδανικευμένο παλμό TsangIΧΑ συχνότητας 2Hz και πλάτους 0.2g & 0.4g (**Σχήμα 4.5**), καθώς και σε μια σειρά από πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, ήπιες έως μετρίως ισχυρές, συγκεκριμένα:

---

**ήπιες έως  
μετρίως ισχυρές  
διεγέρσεις**

*El Centro\_180 1940, Καλαμάτα 1986, Lucerne\_000 1992,  
Πύργος 1993, Rinaldi\_318 1994, Αίγιο 1995, Sakarya 1999,  
Yarimca\_060 1999, Izmit\_090 1999, Duzce\_180 1999,  
Λευκάδα 2003*

---

Οι παραπάνω καταγραφές, καθώς και τα φάσματα απόκρισής τους σε όρους επιταχύνσεων για  $\xi = 5\%$  παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.5**. Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα φασμάτων απόκρισης συμπεριλαμβάνεται και το φάσμα σχεδιασμού (μαύρο χρώμα), το οποίο στην περιοχή ενδιαφέροντος  $T_n = 0.20 - 0.54\text{sec}$  λαμβάνει σε ορισμένες περιπτώσεις τιμές μικρότερες από εκείνες των διεγέρσεων που εξετάζονται (Lucerne\_000, Rinaldi\_318, Duzce\_180 και Λευκάδα). Περίπτωση διέγερσης που καλύπτεται από το φάσμα σχεδιασμού αποτελεί η καταγραφή El Centro\_180 από τον σεισμό Imperial Valley του 1940 (κόκκινο χρώμα), το φάσμα της οποίας είναι σχεδόν ισοδύναμο με εκείνο του σχεδιασμού.

Στο πλήρες προσομοίωμα, όπου το έδαφος προσομοιώνεται με τριδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, η σεισμική διέγερση κατά τη δυναμική ανάλυση επιβάλλεται στους κόμβους της βάσης της εδαφικής στρώσης (επιταχυνσιογράφημα στον βράχο), οπότε η καταγραφή στη στάθμη της θεμελίωσης έχει διαφοροποιηθεί λόγω της εδαφικής απόκρισης. Για να είναι λοιπόν ισοδύναμα τα δύο συστήματα, στην περίπτωση της αντικατάστασης του εδάφους με ελατήρια και αποσβεστήρες, επιβάλλεται στο θεμέλιο η χρονοϊστορία επιταχύνσεων που καταγράφεται στη στάθμη της θεμελίωσης στο ελεύθερο πεδίο.

## 4.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Δυναμικής Ανάλυσης

Στα **Σχήματα 4.6 – 4.57** παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης για το πλήρες και το ελατηριωτό προσομοίωμα για όλες τις διεγέρσεις και τους συντελεστές ασφαλείας που εξετάστηκαν. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα έχουν τη μορφή χρονοϊστοριών επιτάχυνσης  $\alpha - t$  και μετακίνησης  $u/B - t$  ανωδομής, χρονοϊστοριών στροφής  $\vartheta - t$  και καθίζησης  $w_{dyn}/B - t$  στη στάθμη της θεμελίωσης, καθώς και βρόχων αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  στη θεμελίωση – γωνίας στροφής  $\vartheta$ . Επιπλέον, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αναπτυσσόμενης ροπής  $M/S_u B^3 -$  καθίζησης  $w_{dyn}/B$  και καθίζησης  $w_{dyn}/B -$  στροφής  $\vartheta$  του πλήρους προσομοιώματος μόνον, ώστε να υπάρχει πλήρης εποπτεία του τρόπου με τον οποίο συσσωρεύονται οι καθιζήσεις.

Αρχικά εξετάστηκε ο εξιδανικευμένος παλμός TsanglXA (Σχήματα **4.6 – 4.13**) συχνότητας 2Hz, για πλάτη 0.2g και 0.4g (αυτές αποτελούν συνήθεις τιμές PGA ήπιων διεγέρσεων), ώστε να διαπιστωθεί ότι η μεθοδολογία λειτουργεί σε απλή περίπτωση διέγερσης, και έπειτα να προχωρήσει η εφαρμογή της σε πραγματικές καταγραφές που περιλαμβάνουν πλήθος συχνοτήτων. Οι προκύπτουσες χρονοϊστορίες από το πλήρες και το ελατηριωτό προσομοίωμα είναι σχεδόν πανομοιότυπες. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται είναι οι εξής: (α) υπερεκτίμηση της μέγιστης γωνίας στροφής  $\max\vartheta$  από το ελατηριωτό προσομοίωμα για  $F_s = 2.5$  & 2, (β) υπερεκτίμηση της καθίζησης από το ελατηριωτό προσομοίωμα για  $F_s = 5$  & 3.3, αυτό όμως δεν μας απασχολεί ιδιαίτερα, διότι στη συνέχεια θα διαπιστωθεί ότι οι σχέσεις  $\Delta w/B - \vartheta$ , που προτάθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, προβλέπουν ικανοποιητικότητα την καθίζηση σε περιπτώσεις πραγματικών διεγέρσεων, και (γ) μικρότερη τιμή ροπής αντοχής  $M_u$  για το ελατηριωτό προσομοίωμα, καθώς οι μεν μέγιστες τιμές για τη βαθμονόμηση του ελατηρίου έχουν ληφθεί από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης της Gournenec, ενώ παρατηρείται συστηματικά ότι η αριθμητική ανάλυση οδηγεί σε τιμές μεγαλύτερες κατά περίπου 10%. Σχετικά με την επιλογή της τιμής του συντελεστή απόσβεσης  $C_R$ , ακόμα και στην περίπτωση του εξιδανικευμένου αυτού παλμού, ο οποίος περιλαμβάνει μόνο μια συχνότητα, προέκυψε ότι το αποτέλεσμα είναι καλύτερο αν

ως  $\omega$  ληφθεί η ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή και όχι η δεσπόζουσα συχνότητα της διέγερσης (η διαφορά ήταν μεν μικρή, αλλά ήταν διακριτή).

Περνώντας τώρα στις πραγματικές διεγέρσεις, θα γίνει αναλυτική περιγραφή μόνο τριών εξ αυτών, ενώ έπειτα θα σχολιαστούν ορισμένες παράμετροι που δείχνουν να επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Γενικώς, στην περίπτωση των πραγματικών διεγέρσεων δεν αναμένουμε τόσο τη σύμπτωση των διαφόρων χρονοϊστοριών, όσο μια πρόβλεψη των **μεγίστων** τιμών γωνίας στροφής  $\vartheta$  και καθίζησης  $w$ .

Ας εστιάσουμε λοιπόν σε μια ήπια καταγραφή μικρής διάρκειας, όπως εκείνη από τον σεισμό της Καλαμάτας του 1986 (**Σχήματα 4.14 – 4.17**) και σε μια ήπια καταγραφή μεγαλύτερης διάρκειας όπως η El Centro\_180 του 1940 (**Σχήματα 4.30 - 4.33**). Όσον αφορά την πρώτη, παρατηρούμε, εκτός από σύμπτωση των μεγίστων, και απόλυτη σύμπτωση χρονοϊστοριών, χωρίς καμία διαφορά φάσης, για  $F_S = 5$ . Μάλιστα, σχετικά με την παράξενη μορφή της χρονοϊστορίας επιτάχυνσης ανωδομής  $a - t$  του ελατηριωτού μοντέλου (η οποία «κόβεται» απότομα σε μια μέγιστη τιμή), αυτή υποδηλώνει ότι το σύστημα έφτασε στην αντοχή του, όπως αυτή ορίζεται από την καμπύλη  $M - \vartheta$  του ελατηρίου, και έχει εισέλθει για τα καλά στον πλαστικό κλάδο. Το ίδιο ακριβώς συμπέρασμα εξάγεται και από το διάγραμμα αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$ , αφού διαγράφεται σαφώς ο οριζόντιος ελαστικός κλάδος του ελατηρίου. Με ιδιαίτερη επιτυχία προβλέπεται και η συνολική δυναμική καθίζηση  $w_{dyn}/B$  του θεμελίου, αν και εν προκειμένω έχει αμελητέα τιμή, λόγω της υψηλής τιμής του  $F_S$ . Για  $F_S = 3.3$  η σύγκριση είναι εξίσου καλή, τόσο σε όρους μεγίστων, όσο και σε όρους χρονοϊστοριών. Καθώς όμως μικραίνει ακόμα περισσότερο ο συντελεστής ασφαλείας  $F_S$  και λαμβάνει τις τιμές 2.5 και 2, το πλήρες προσομοίωμα αποκτά ελαφρά παραμένουσα στροφή, κάτι που προφανώς δεν μπορεί να αποτυπωθεί από το ελαστικό μη-γραμμικό ελατήριο. Παρ'όλα αυτά, η εκτίμηση των μεγίστων τιμών στροφής  $\vartheta$  και καθίζησης  $w_{dyn}/B$  εξακολουθεί να είναι αξιόπιστη. Στην περίπτωση δε  $F_S = 2$ , χάνεται η ακριβής αλληλουχία των κύκλων.



Η καταγραφή El Centro\_180 εξετάζεται για δύο λόγους: πρώτον διότι αποτελεί περίπτωση «σεισμού σχεδιασμού» λόγω της μορφής του φάσματος απόκρισης σε όρους επιταχύνσεων και δεύτερον, διότι πρόκειται για καταγραφή μακρινού πεδίου, απαλλαγμένη από φαινόμενα κατευθυντικότητας, γεγονός που την καθιστά ιδανική για το μη-γραμμικό ελαστικό ελατήριο της μεθοδολογίας, το οποίο αδυνατεί να αποτυπώσει παραμένουσες στροφές. Για  $F_S = 5$ , η μεθοδολογία δεν δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε όρους χρονοϊστορίας στροφών  $\theta$ , ενώ όσον αφορά την εκτίμηση της μέγιστης τιμής  $\theta$ , είναι μεν καλύτερη, αλλά και πάλι υποεκτιμάται. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι για  $F_S = 5$  είναι εντόνως μη-γραμμική η απόκριση λόγω του ανασηκώματος του θεμελίου και σε αυτήν την περίπτωση είναι δυσκολότερη η ορθή εκτίμηση του συντελεστή απόσβεσης  $C_R$ . Υπενθυμίζεται δε ότι η εκτίμηση του  $C_R$  έχει πραγματοποιηθεί μόνον βάσει της υστερητικής απόσβεσης, δηλαδή της απόσβεσης που παρέχει το εδαφικό υλικό, η οποία στην περίπτωση  $F_S = 5$  είναι αμελητέα. Ταυτόχρονα όμως, μέρος της ενέργειας αποσβέννυται και λόγω των κρούσεων με το υποκείμενο έδαφος, που έπονται της αποκόλλησης – ανασηκώματος του θεμελίου, κάτι που δεν έχει διερευνηθεί στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Ενδεχομένως για μια άλλη τιμή  $C_R$ , και όχι αυτήν που προτείνεται για την εφαρμογή της μεθόδου, μπορεί το αποτέλεσμα να ήταν εξαιρετικό. Για τους υπόλοιπους συντελεστές ασφαλείας πάντως, η σύγκριση είναι πολύ καλή, τόσο σε όρους μεγίστων, όσο και χρονοϊστοριών, καθώς πράγματι, δεν εμφανίζεται σε καμία περίπτωση παραμένουσα στροφή του θεμελίου.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με μια ισχυρότερη καταγραφή (εντός όμως των ορίων εκείνων ώστε να μην προκληθεί ανατροπή της κατασκευής), όπως τη Rinaldi\_318 (Σχήματα 4.38 – 4.41) από τον σεισμό Northridge του 1994. Σχετικά με την καταγραφή αυτή, η οποία για το εξεταζόμενο σύστημα αποτελεί μια ακραία περίπτωση φόρτισης, καθώς οδηγεί σε τιμή γωνίας στροφής 5 έως 10 φορές μεγαλύτερη απ’ότι η El Centro\_180 (καθώς και όλες οι υπόλοιπες διεγέρσεις που εξετάστηκαν), η σύγκριση είναι πολύ καλή για  $F_S = 5$  και 3.3, όπου ακόμα δεν έχει προλάβει να συσσωρευθεί παραμένουσα στροφή  $\theta$ . Το γεγονός ότι η διέγερση αυτή είναι πολύ ισχυρή για το εν λόγω σύστημα φαίνεται και από τη χρονοϊστορία  $\alpha$

–  $t$ , η οποία «κόβεται» πολύ απότομα, και για μεγάλη διάρκεια εντός κάθε κύκλου, όταν η επιτάχυνση φτάνει στη μέγιστη τιμή της. Επίσης σε αυτή τη διέγερση παρατηρούμε ότι προς το τέλος της, χάνεται η αλληλουχία των κύκλων, αλλά αυτό δεν έχει τελικά μεγάλη σημασία, καθώς πρόκειται για κύκλους χωρίς σημαντικό πλάτος. Για  $F_S = 2.5$  και εντονότερα για 2, η συσσώρευση στροφής είναι τέτοια, που η μεθοδολογία αδυνατεί να προβλέψει με επιτυχία ακόμα και τη μέγιστη τιμή της, εκτός από τη χρονοϊστορία της. Παρ'όλα αυτά, η εκτίμηση της συνολικής καθίζησης είναι ικανοποιητική για όλους τους  $F_S$ . Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό, ότι τα διαγράμματα  $M - \vartheta$  καταρτίζονται με τη ροπή που αναπτύσσεται στη βάση του θεμελίου και όχι με εκείνη στην κορυφή του ταλαντωτή, εξού και δεν παρατηρείται πτώση της αντοχής, αλλά παραμένει σταθερή, παρ'όλο που το σύστημα έχει φτάσει σε μεγάλες τιμές στροφής περί τα  $10^{-1}$  rad.

#### 4.2.1 Η επίδραση της κατευθυντικότητας

Πολλές από τις σεισμικές καταγραφές που επιστρατεύονται στην παρούσα εργασία είναι επηρεασμένες από *φαινόμενα κατευθυντικότητας* λόγω εγγύτητας στο σεισμογόνο ρήγμα. Εν γένει, οι χρονοϊστορίες στροφής του θεμελίου  $\vartheta - t$  προκύπτουν ικανοποιητικά όμοιες, μόνον στις περίπτωση διεγέρσεων οι οποίες δεν διαθέτουν κάποιον διακριτό παλμό κατευθυντικότητας (βλ. El Centro\_180 1940), καθώς σε αντίθετη περίπτωση, αυτός οδηγεί σε παραμένουσες στροφές  $\vartheta_{res}$ , οι οποίες δεν μπορούν να γίνουν «αντιληπτές» από το ελατηριωτό προσομοίωμα (βλ. μεταξύ άλλων: Πύργος 1993, Αίγιο 1995, Izmit\_090 1999, Yarımcı\_060 1999). Σε συνδυασμό, επιπλέον, με το γεγονός ότι, από τη στιγμή που το σύστημα αποκτήσει παραμένουσα στροφή  $\vartheta_{res}$ , ο ρυθμός συσσώρευσης καθίζησης μειώνεται ραγδαία (ή ακόμα και μηδενίζεται), η υπολογιζόμενη καθίζηση  $w$  από την εφαρμογή της μεθοδολογίας προκύπτει συνήθως υπερεκτιμημένη. Είναι δυνατόν, εξ αρχής, με προσεκτική παρατήρηση της καταγραφής, να διαπιστωθεί αν η διέγερση εμπεριέχει κάποιον σημαντικό παλμό κατευθυντικότητας, ώστε να υπάρχει η αίσθηση αν τα αποτελέσματα, σε όρους χρονοϊστορίας, είναι ρεαλιστικά ή όχι. Σε όρους μεγίστων

πάντως, οι τιμές που προκύπτουν από το ελατηριωτό προσομοίωμα είναι ικανοποιητικές, όπως στην περίπτωση της Yarımcı\_060 (**Σχήματα 4.50 – 4.53**). Παρ' όλο που η χρονοϊστορία στροφής  $\theta - t$  του θεμελίου διαφοροποιείται σημαντικά στην περίπτωση ύπαρξης φαινομένων κατευθυντικότητας, αυτή που φυσικά δεν σημειώνει μεταβολή, είναι η χρονοϊστορία επιταχύνσης  $a - t$  στην κορυφή της άκαμπτης ανωδομής.

#### 4.2.2 Η επίδραση του συντελεστή ασφαλείας $F_s$

Σε γενικές γραμμές, μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι η ακρίβεια της μεθοδολογίας είναι σχεδόν ίδια για όλο το φάσμα συντελεστών ασφαλείας που εξετάστηκε, καθώς δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές. Ίσως μπορούμε να διακρίνουμε μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις, σε όρους χρονοϊστοριών, στην περίπτωση του μεγαλύτερου συντελεστή ασφαλείας  $F_s = 5$ , όπου κυριαρχεί η αποκόλληση – ανασήκωμα του θεμελίου και του μικρότερου  $F_s = 2$ , όπου κυριαρχεί η κινητοποίηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Στη μεν πρώτη περίπτωση το φαινόμενο είναι εντόνως μη-γραμμικό λόγω του ανασηκώματος, οπότε καθίσταται δυσκολότερος ο ορθός προσδιορισμός του συντελεστή απόσβεσης  $C_R$ , ενώ στη δεύτερη περίπτωση, ο μικρός  $F_s$  διευκολύνει τη συσσώρευση στροφής λόγω των εντονότερων πλαστικοποιήσεων, η οποία δεν αποτυπώνεται στο ελατήριο. Το φαινόμενο που παρατηρείται για μικρό  $F_s = 2$  επιδεινώνεται περαιτέρω από την παρουσία παλμού κατευθυντικότητας στο εκάστοτε επιταχυνσιογράφημα. Θετικό πάντως είναι το γεγονός ότι η πρόβλεψη των μεγίστων τιμών στροφής και καθίζησης δείχνει σχετικά αναισθητη στην εμφάνιση ή όχι παραμένουσας στροφής, όπως παρατηρείται φερ' ειπείν στις καταγραφές της Καλαμάτας, Izmit\_090, Yarımcı\_060 και Duzce 180.

Τα **Σχήματα 4.58 – 4.60** περιέχουν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλους τους σεισμούς και συντελεστές ασφαλείας. Τα εν λόγω διαγράμματα παρουσιάζουν τη συσχέτιση μεταξύ μεγίστων τιμών στροφής  $\max\theta_{FEM}$  &  $\max\theta_{SPR}$  και δυναμικής καθίζησης  $\max(w/B)_{FEM}$  &  $\max(w/B)_{SPR}$  πλήρους και ελατηριωτού προσομοιώματος

αντίστοιχα. Παρατηρείται το εξής παράδοξο: η συσχέτιση της μέγιστης δυναμικής καθίζησης μεταξύ πλήρους και ελατηριωτού προσοιώματος είναι καλύτερη από εκείνη της γωνίας στροφής  $\theta$ , παρ'όλο που υπολογίζεται όχι ευθέως, αλλά, μέσω μιας προσεγγιστικής σχέσης, από τη χρονοϊστορία στροφής!

### 4.2.3 Η επίδραση των χαρακτηριστικών της διέγερσης

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε διέγερσης που μελετώνται είναι η δεσπόζουσα περίοδος  $T_p$  και οι μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης  $PGA$  και ταχύτητας  $PGV$ . Στα Σχήματα 4.61 – 4.64 παρουσιάζονται οι μέγιστες οι τιμές στροφής και καθίζησης του πλήρους και ελατηριωτού προσομοιώματος ως προς τις παραπάνω παραμέτρους. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι δεν υπάρχει κάποια σαφής σχέση μεταξύ της μεταβολής των παραμέτρων αυτών και της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Αποκλίση της εκτιμώμενης τιμής από την πραγματική (όπως προκύπτει από το πλήρες μοντέλο) μπορεί να προκύψει για οποιονδήποτε λόγο  $T_p/T_n$ , και οποιαδήποτε τιμή  $PGA$  και  $PGV$  δεν παρατηρείται κάποια συστηματική τάση.

### 4.2.4 Χρήση απλοποιημένων καμπυλών $M - \theta$

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν εξαχθεί χρησιμοποιώντας για τη βαθμονόμηση των ελατηρίων τις απλοποιημένες καμπύλες  $M - \theta$ , οι οποίες αποτελούνται από διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι το πρόβλημα δεν παρουσιάζει ευαισθησία ως προς η μορφή των καμπυλών  $M - \theta$ . Μπορούμε να ισχυριστούμε μάλιστα ότι η βασικότερη πληροφορία είναι η τιμή της ροπής αντοχής, ύστερα η αρχική κλίση του οιονεί ελαστικού κλάδου, ενώ η συναρμογή μεταξύ των δύο αυτών περιοχών παίζει αμελητέο ρόλο. Όσο πιο έντονη πλαστικοποίηση του συστήματος προκαλεί η εκάστοτε διέγερση, τόσο περισσότερο αληθεύει η παραπάνω πρόταση.

#### 4.2.5 Η επίδραση του συντελεστή περιστροφικής απόσβεσης $C_R$

Η μεγαλύτερη δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά τη διαμόρφωση της εν λόγω μεθοδολογίας ήταν κατά την επιλογή κατάλληλης τιμής για τον συντελεστή περιστροφικής απόσβεσης  $C_R$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στη μεταβολή της τιμής αυτής, εξού και ύστερα από πληθώρα δοκιμών διαπιστώθηκε ότι καλύτερη σύγκλιση προκύπτει όταν (α) ως συχνότητα ληφθεί η ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή για μηδενική γωνία στροφής και (β) από το διάγραμμα  $C_R - \vartheta$  ληφθεί η μέγιστη τιμή, η οποία αντιστοιχεί σε  $\vartheta \approx 10^{-3}$ . Μια πιθανή εξήγηση για τη συγκεκριμένη επιλογή είναι η εξής: οι διεγέρσεις που επιβάλλονται οδηγούν το σύστημα σε γωνίες μεγαλύτερες από  $\vartheta \approx 10^{-3}$ , περί τη  $\vartheta \approx 10^{-2}$ , όπου η τιμή του συντελεστή απόσβεσης  $C_R$  έχει ήδη μειωθεί (διότι για  $\vartheta > 10^{-3}$  το γινόμενο  $K_R \cdot \xi$  συνεχώς μειώνεται). Ταυτόχρονα, όμως, μεταβάλλεται (μειώνεται) και η λικνιστική ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή συναρτήσει της γωνίας στροφής  $\vartheta$ . Η μείωση αυτή έχει ακριβώς την αντίθετη επίδραση στην τιμή του  $C_R$ , απ'ότι προηγουμένως είχε το γινόμενο  $K_R \cdot \xi$ , συμβάλλει δηλαδή στην αύξησή του.

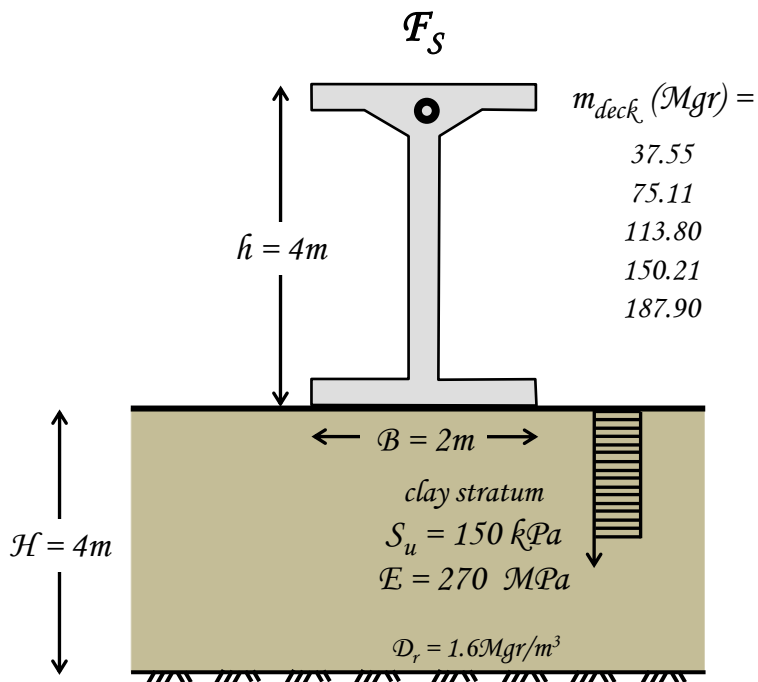


## Σχήματα **Κεφαλαίου 4**

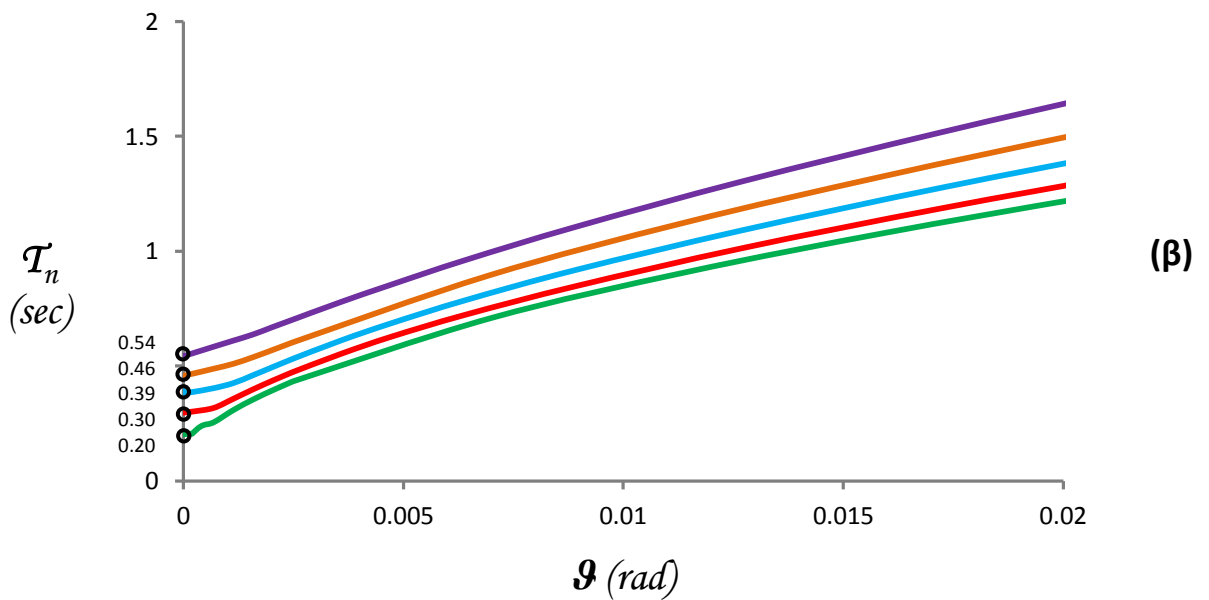
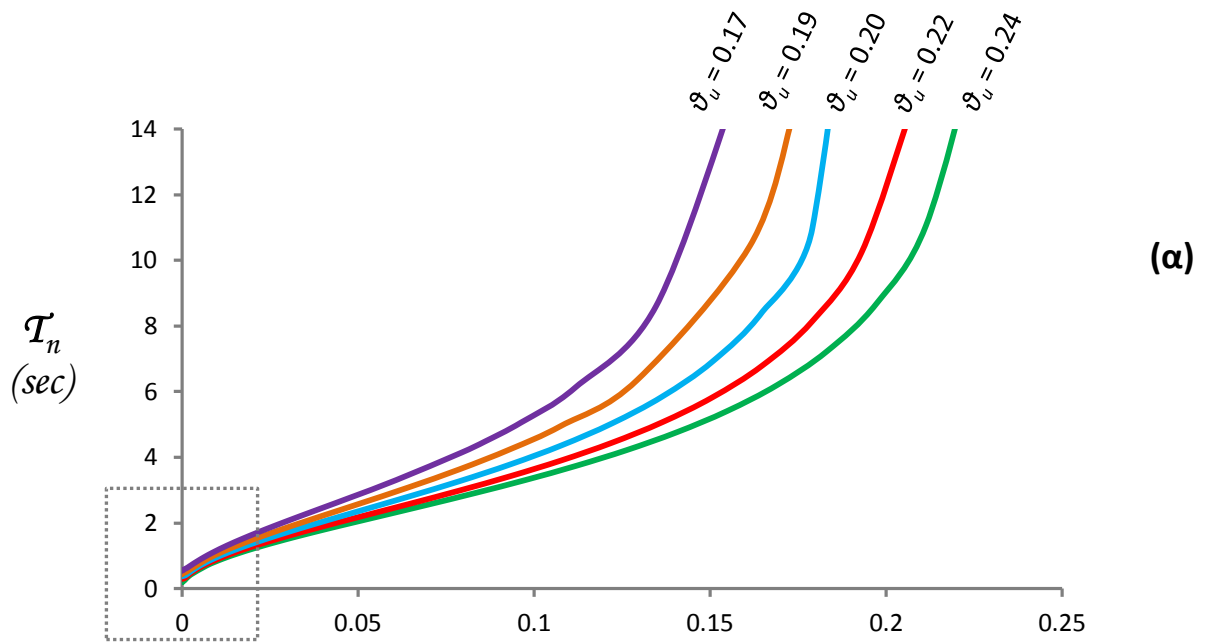
---





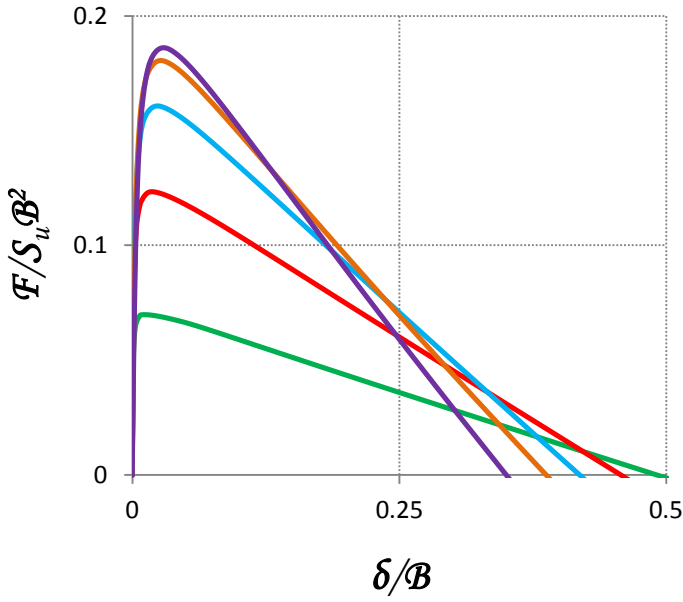
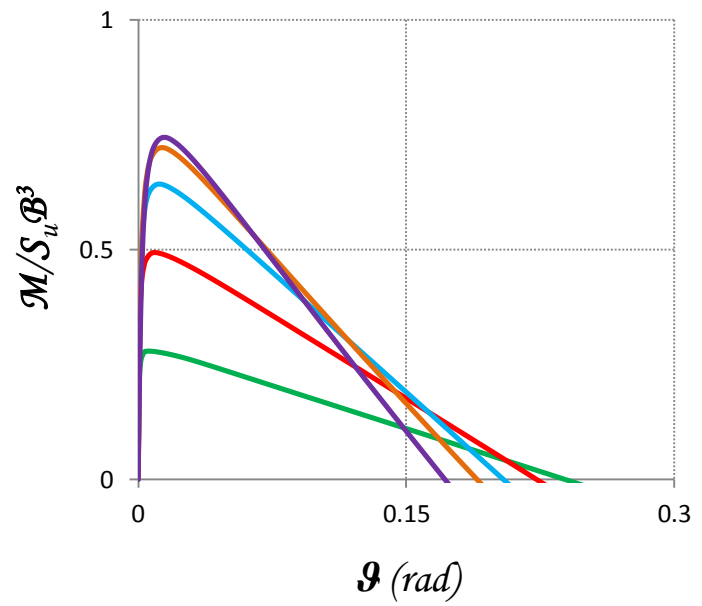
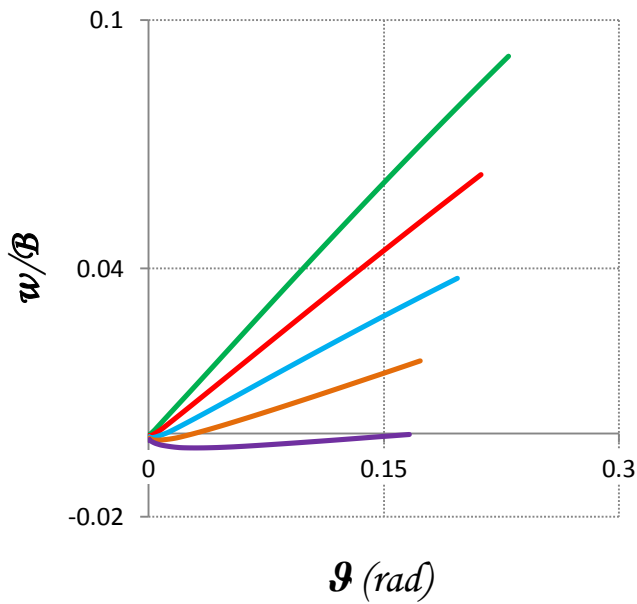
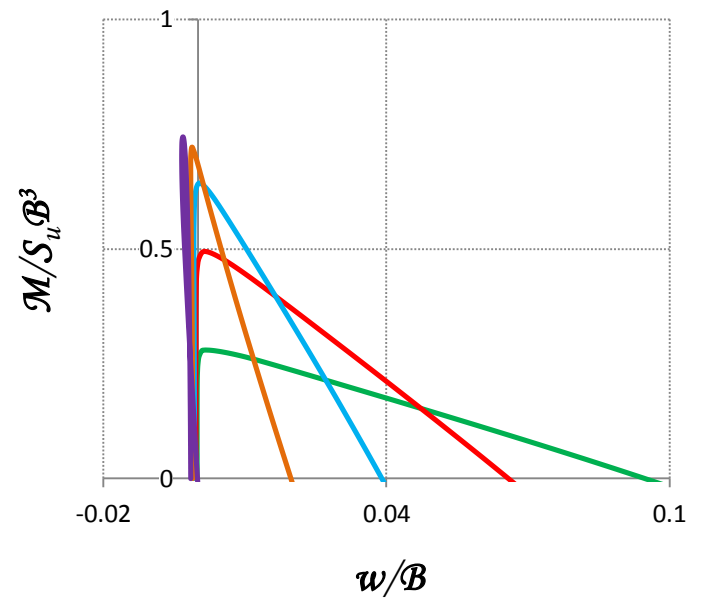


**Σχήμα 4.1** Σχηματική απεικόνιση εξεταζόμενου συστήματος.



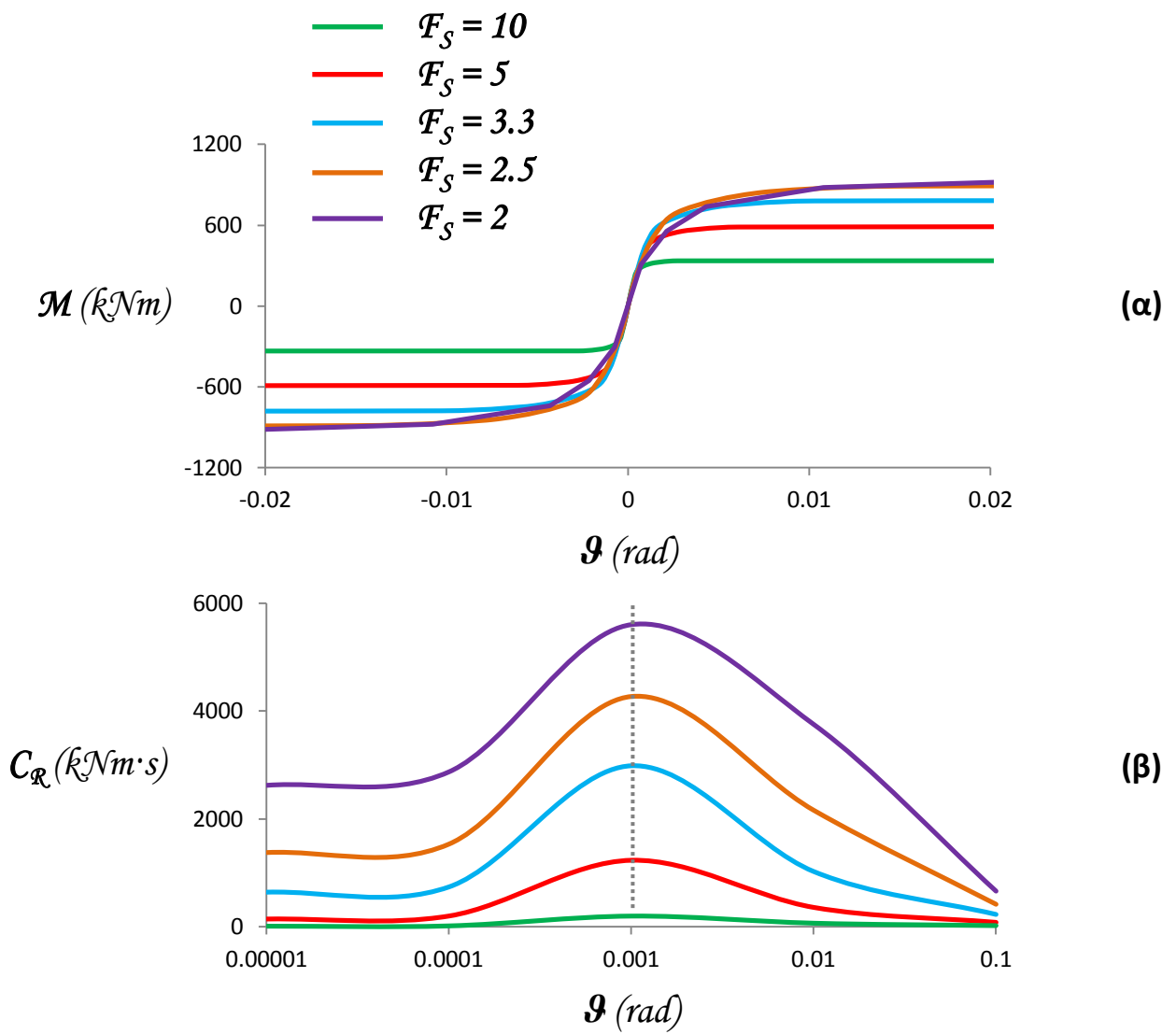
- $F_s = 10$
- $F_s = 5$
- $F_s = 3.3$
- $F_s = 2.5$
- $F_s = 2$

**Σχήμα 4.2** Λικνιστική Ιδιοπερίοδος  $T_n$  – γωνία στροφής  $\theta$  του εξεταζόμενου συστήματος για διάφορους συντελεστές ασφαλείας έναντι κατακόρυφου φορτίου  $F_s$ , για όλο το φάσμα γωνιών στροφής (α) και σε μεγέθυνση το φάσμα γωνιών στροφής πρακτικού ενδιαφέροντος (β) [Gazetas et al., 2012].

**(α)****(β)****(γ)****(δ)**

- $F_S = 10$
- $F_S = 5$
- $F_S = 3.3$
- $F_S = 2.5$
- $F_S = 2$

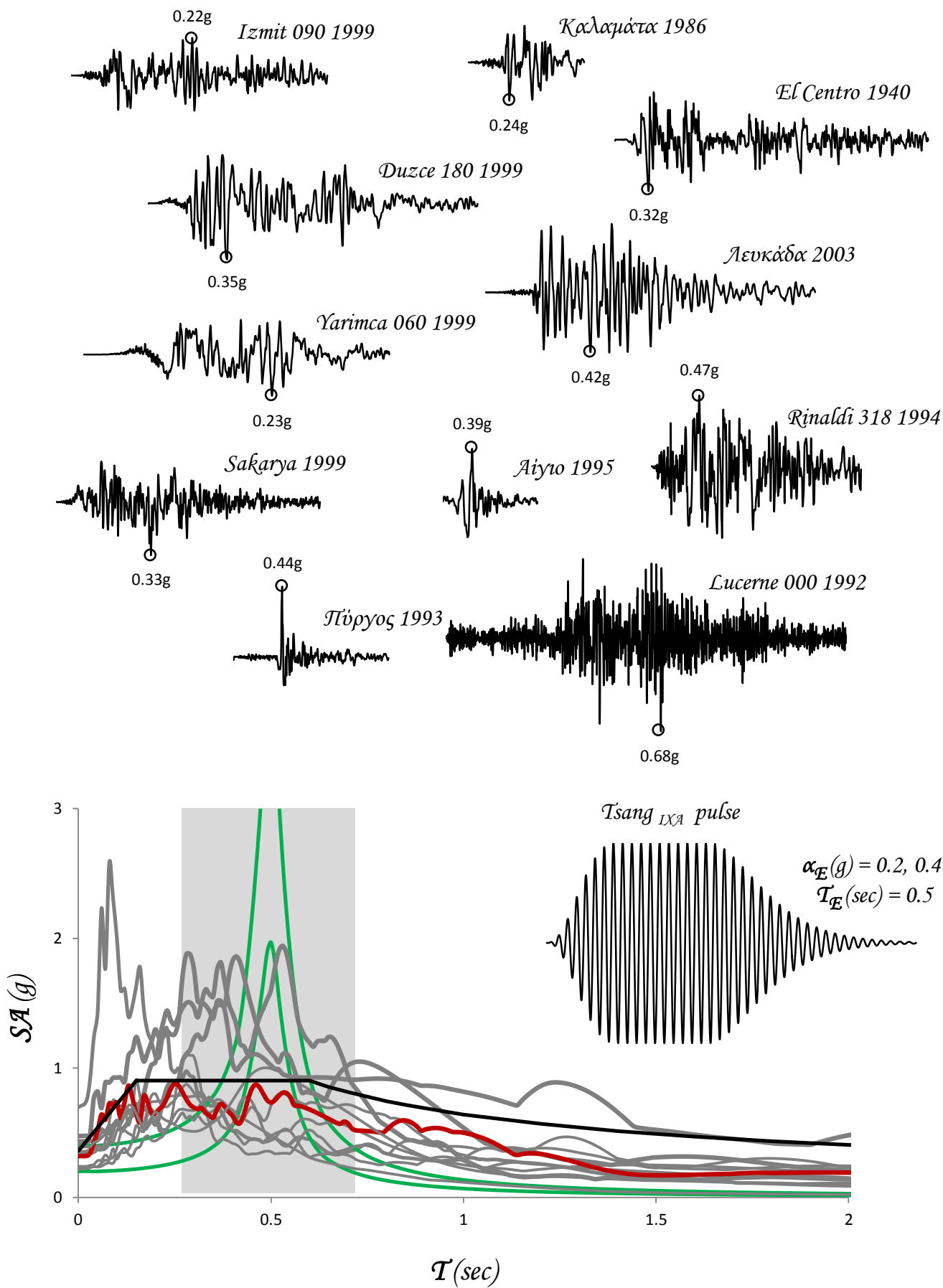
**Σχήμα 4.3** Αδιαστατοποιημένες Καμπύλες **(α)** οριζόντιου φορτίου  $F/S_u B^2$  – οριζόντιας μετατόπισης  $\delta/B$  καταστώματος, **(β)** αναπτυσσόμενης ροπής  $M/S_u B^3$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  θεμελίου, **(γ)** καθίζησης  $w/B$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  θεμελίου & **(δ)** αναπτυσσόμενης ροπής  $M/S_u B^3$  – καθίζησης  $w/B$  θεμελίου για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφου φορτίου  $F_S$ .



**Σχήμα 4.4** Απλοποιημένες καμπύλες **(α)** αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  θεμελίου & **(β)** συντελεστή περιστροφικής απόσβεσης  $C_R$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  θεμελίου για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφου φορτίου  $F_S$ .

**Πίνακας 4.1** Αναλυτικός υπολογισμός συντελεστή περιστροφικής απόσβεσης  $C_R$  του εξεταζόμενου συστήματος για κάθε περίπτωση συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφου φορτίου  $F_S$ .

$F_S$	10	5	3.3	2.5	2
$K_{R, \text{elastic}}$ (kNm)	535000	535000	535000	535000	535000
$T_n$ (s)	0.2	0.3	0.39	0.46	0.54
$\omega_n$ (rad/s)	31.4	20.9	16.1	13.7	11.6
$\omega_n C_R / K_{R, \text{elastic}}$	0.01	0.044	0.083	0.100	0.112
$C_R$ (kNm.s)	<b>200</b>	<b>1100</b>	<b>2800</b>	<b>4000</b>	<b>5200</b>

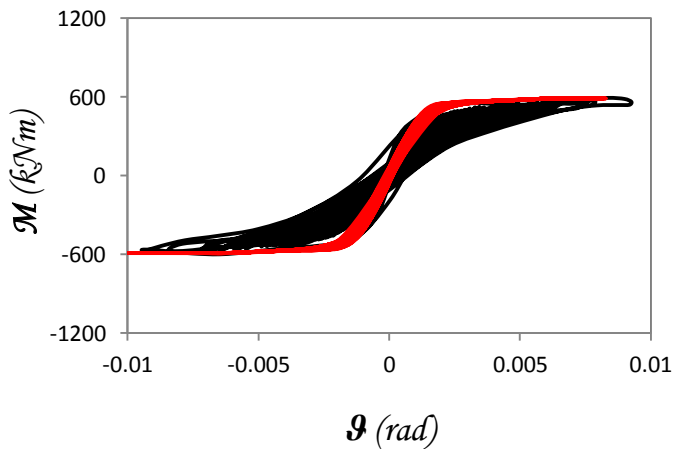
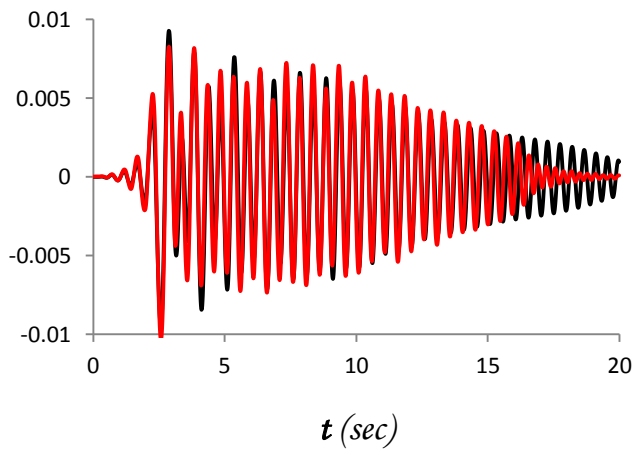
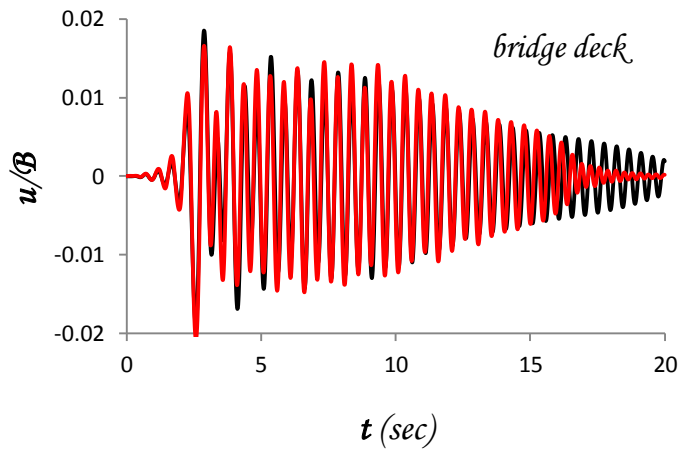
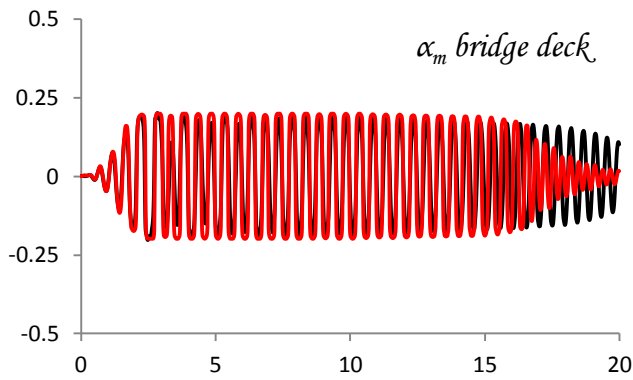
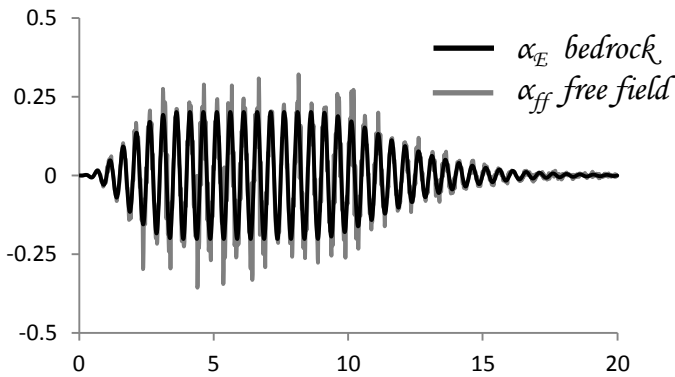
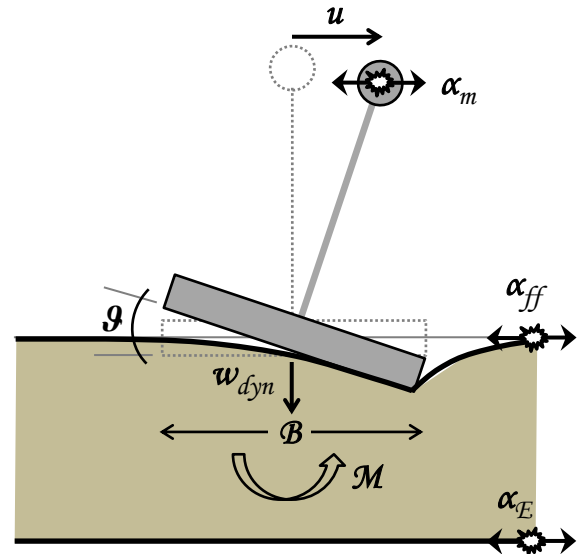


**Σχήμα 4.5** Επιβαλλόμενες διεγέρσεις στη βάση της αργιλικής στρώσης: εξιδανικευμένος παλμός Tsang IXA συχνότητας 2Hz, 11 πραγματικές καταγραφές και ελαστικό φάσμα απόκρισης ( $\xi = 5\%$ )..

*Tsang* <sub>IXA</sub> 2

$$F_S = 5$$

$$\alpha_E = 0.2g$$



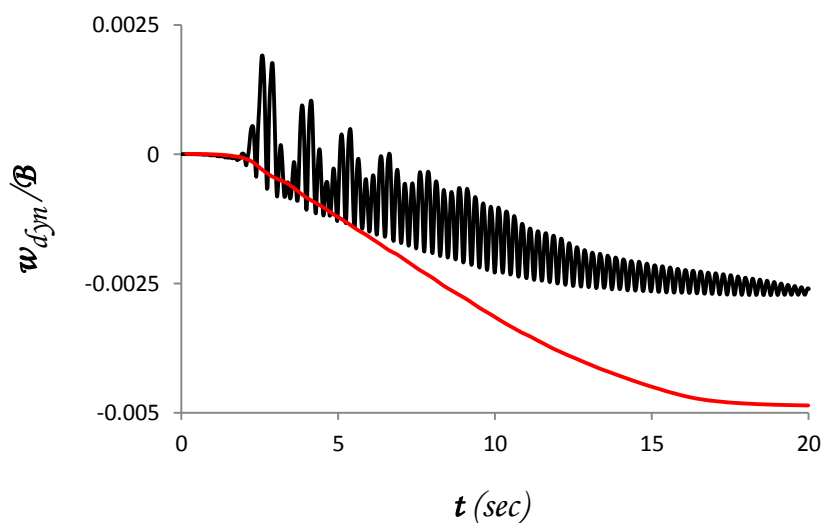
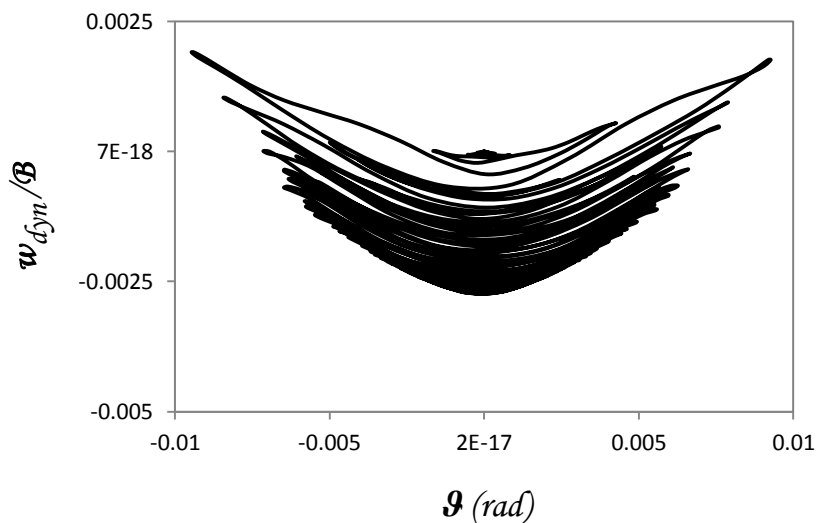
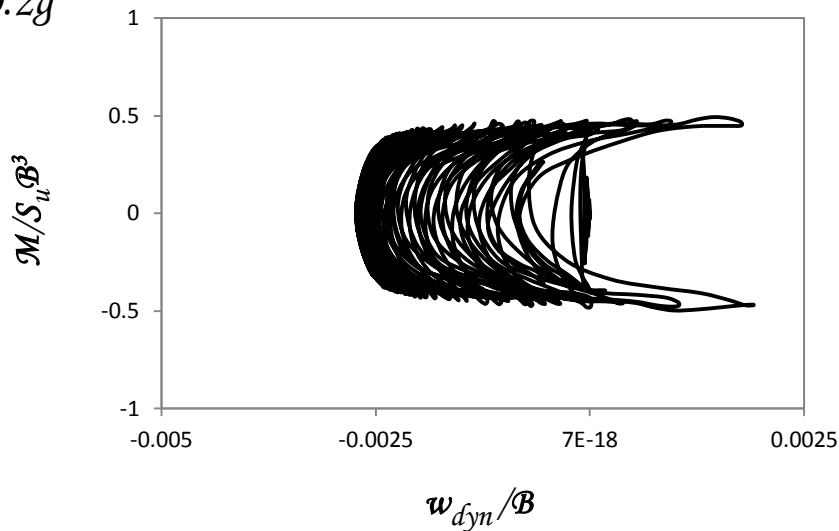
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.6α *Tsang* <sub>IXA</sub> 2 πλάτους 0.2g. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

*Tsang*  $IXA$  2

$$F_S = 5$$

$$\alpha_E = 0.2g$$

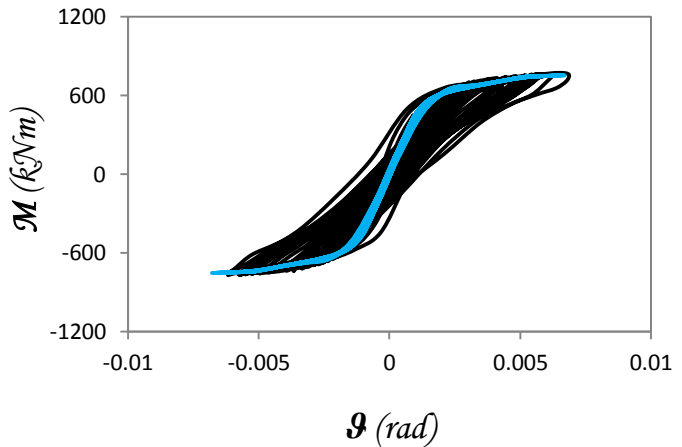
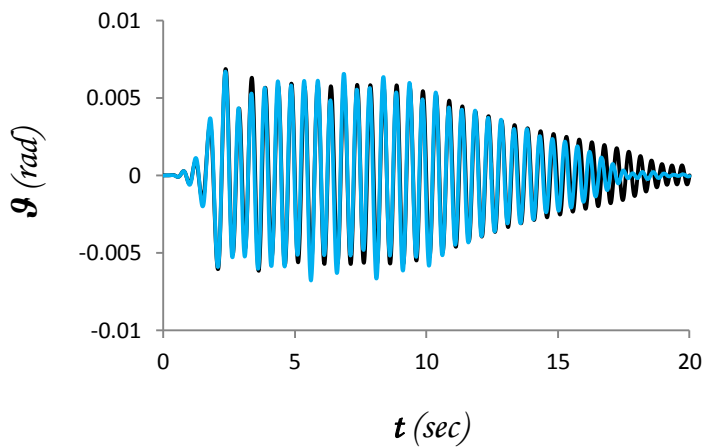
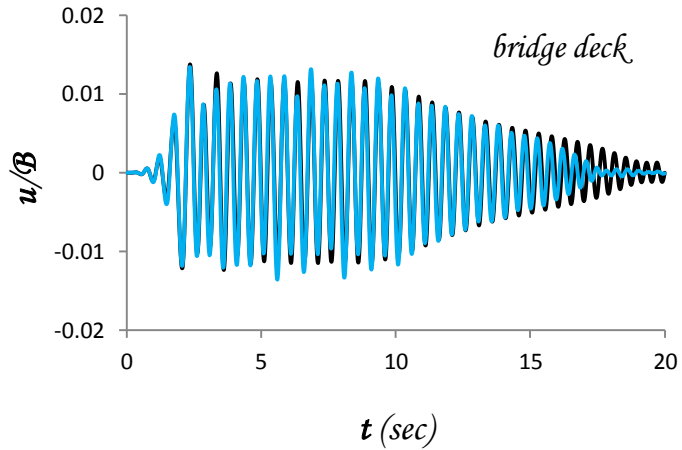
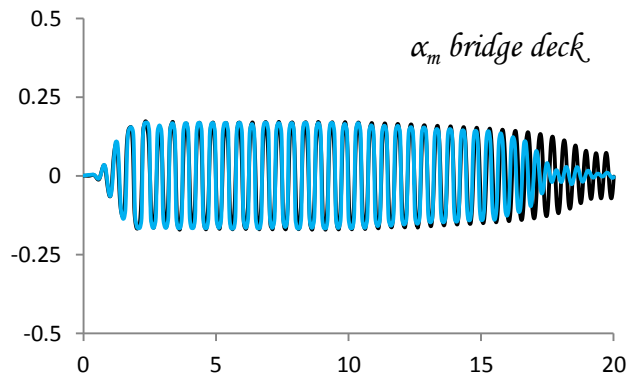
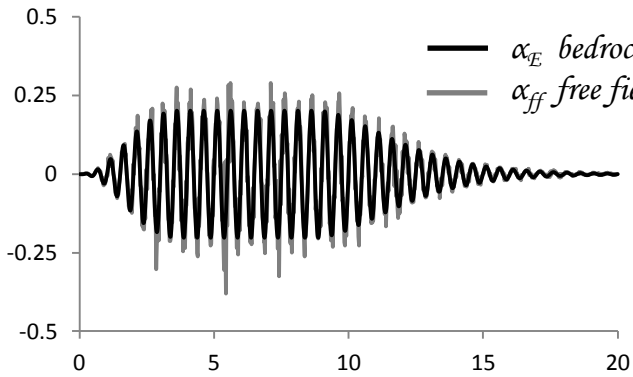
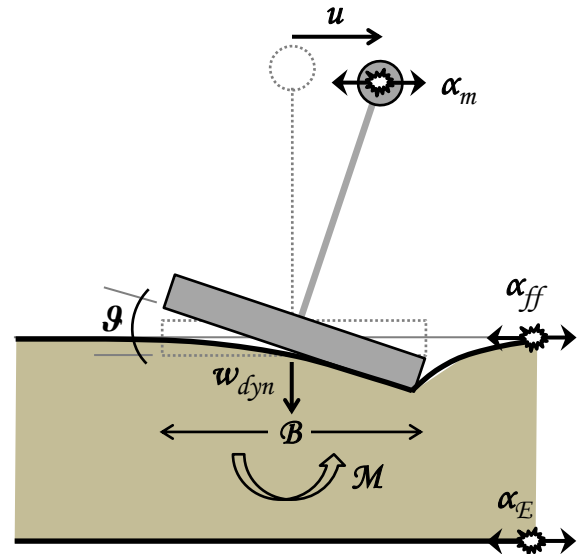


**Σχήμα 4.6β** *Tsang*  $IXA$  2 πλάτους 0.2g. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

*Tsang* IXA 2

$$F_S = 3.3$$

$$\alpha_E = 0.2g$$



— FEM  
— Ελατήριο

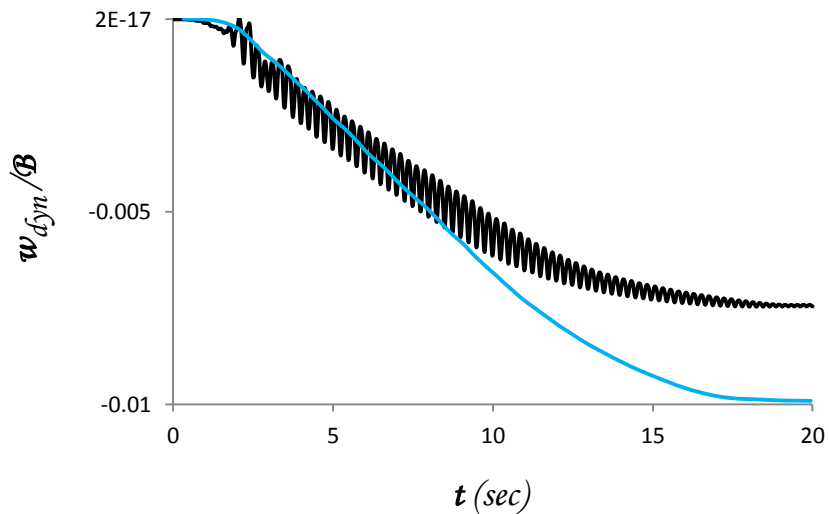
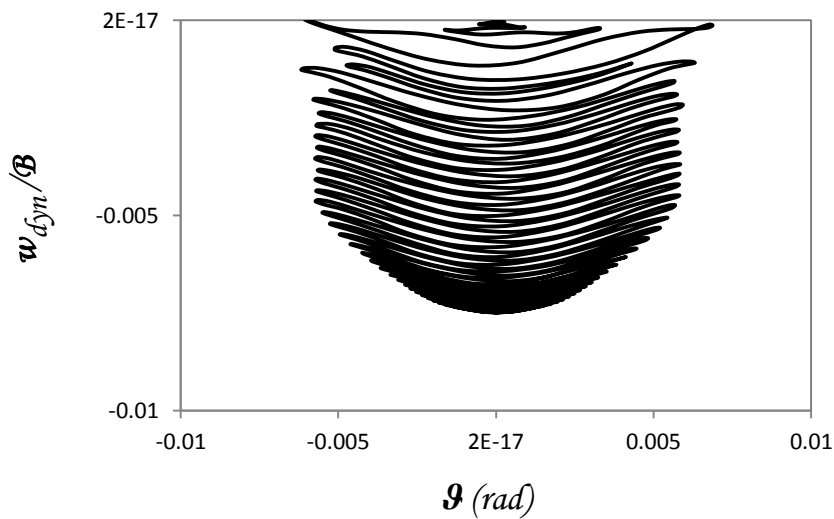
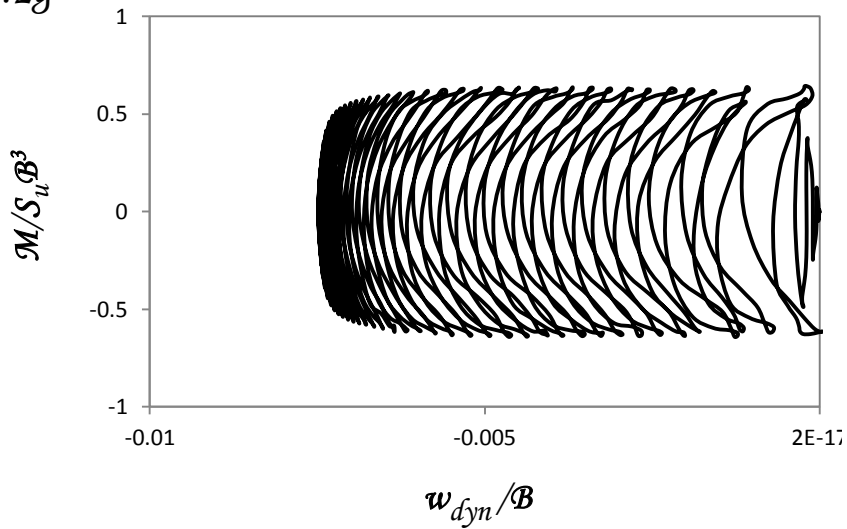
**Σχήμα 4.7α** *Tsang* IXA 2 πλάτους 0.2g. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



*Tsang*  $_{IXA} 2$

$$F_S = 3.3$$

$$\alpha_E = 0.2g$$

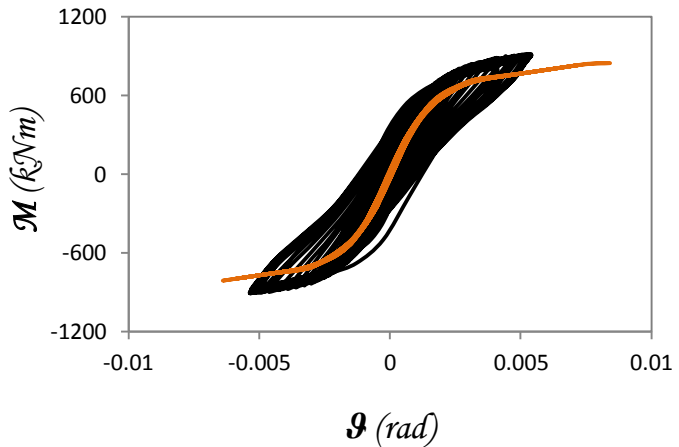
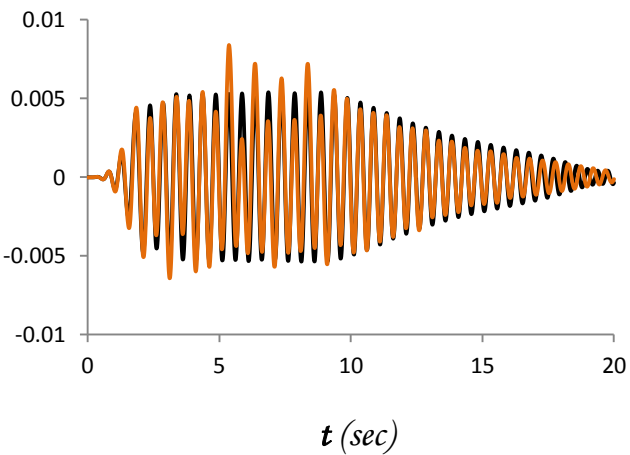
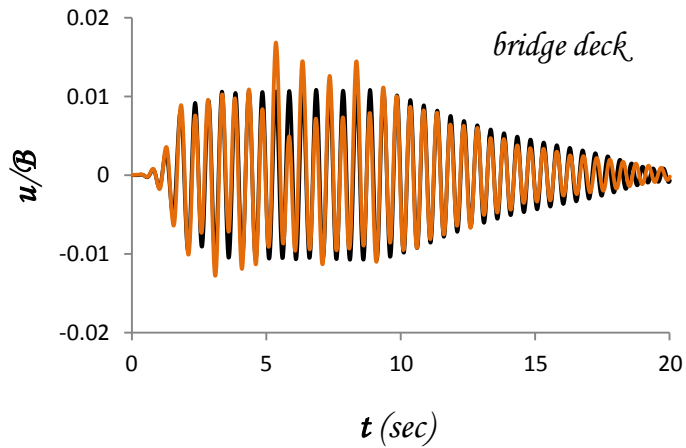
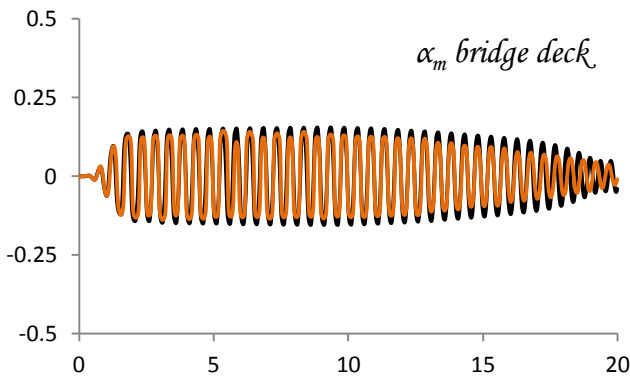
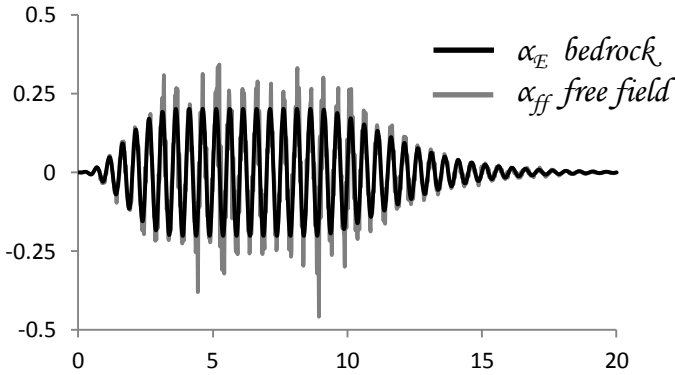
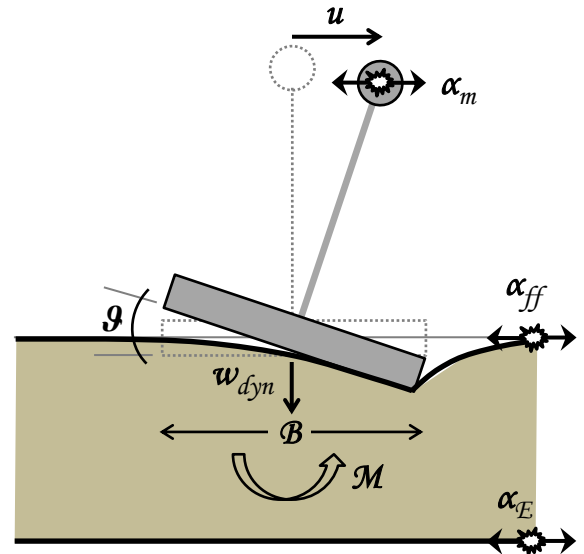


**Σχήμα 4.7β** *Tsang*  $_{IXA} 2$  πλάτους 0.2g. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

*Tsang* IXA 2

$$F_S = 2.5$$

$$\alpha_E = 0.2g$$



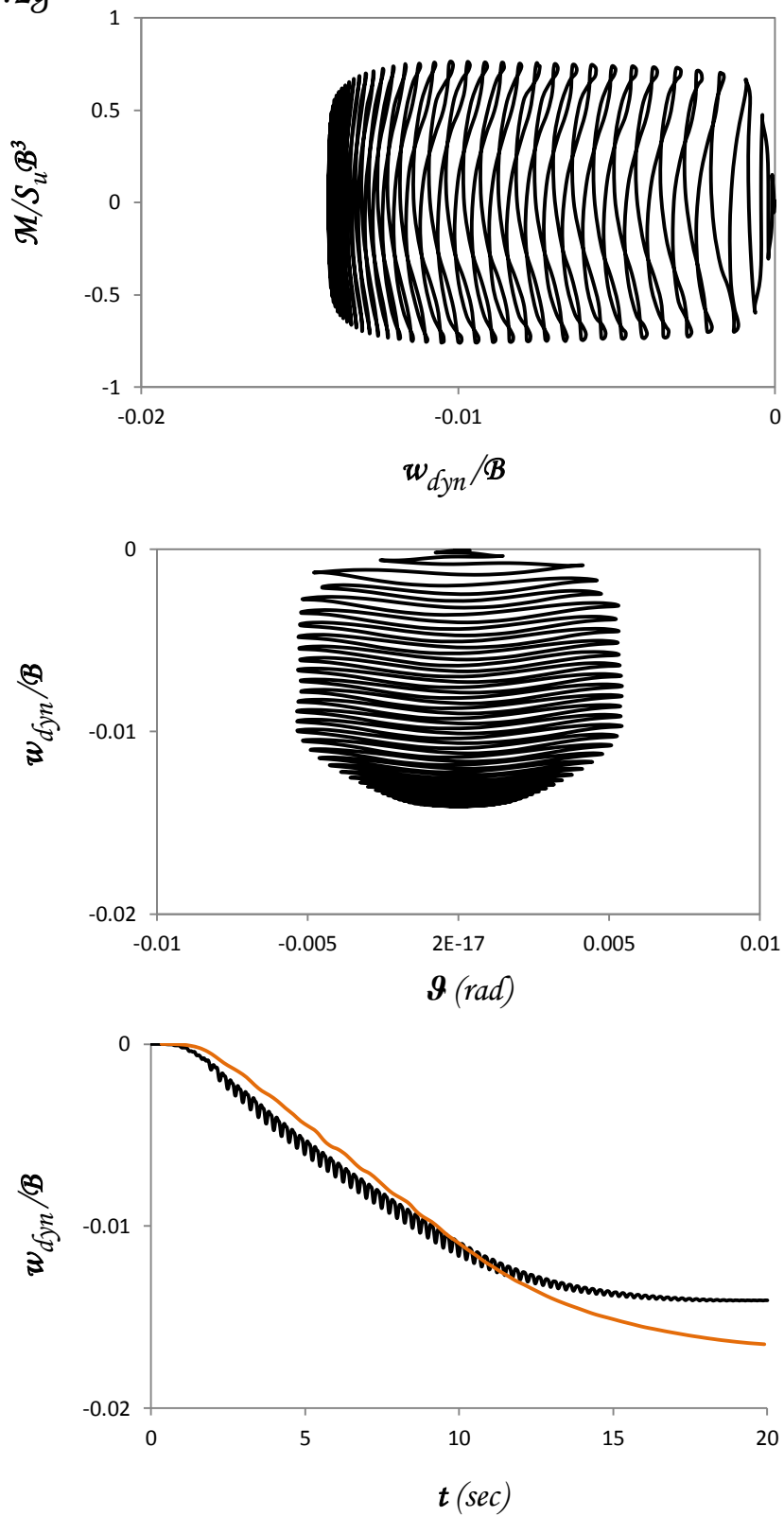
— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.8α** *Tsang* IXA 2 πλάτους 0.2g. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

*Tsang*  $_{IXA} 2$

$$F_S = 2.5$$

$$\alpha_E = 0.2g$$

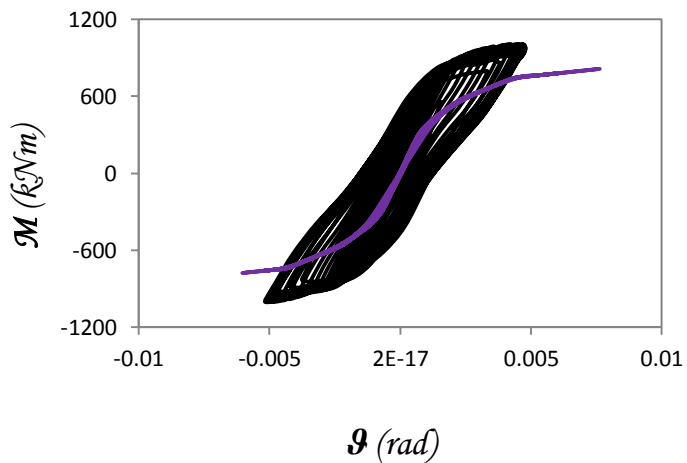
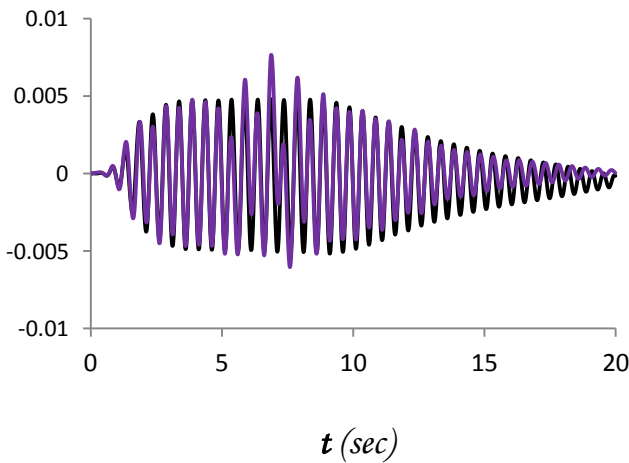
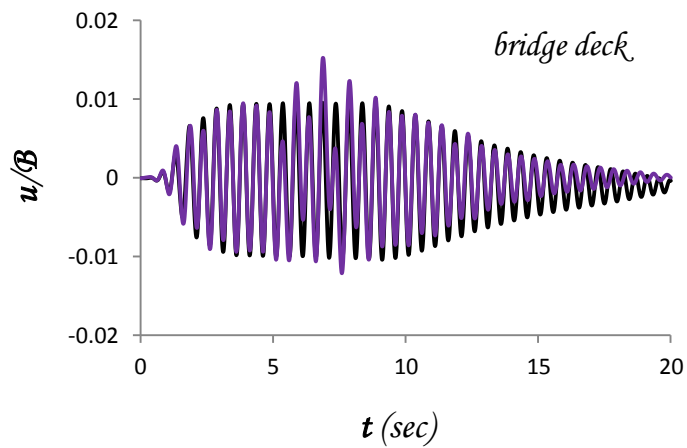
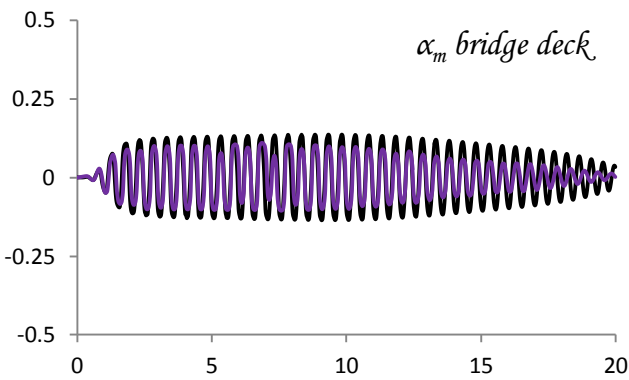
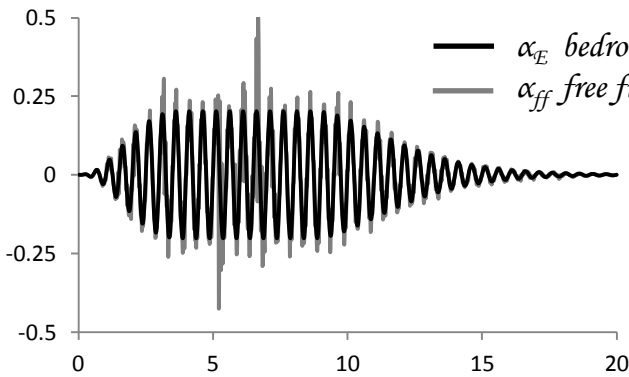
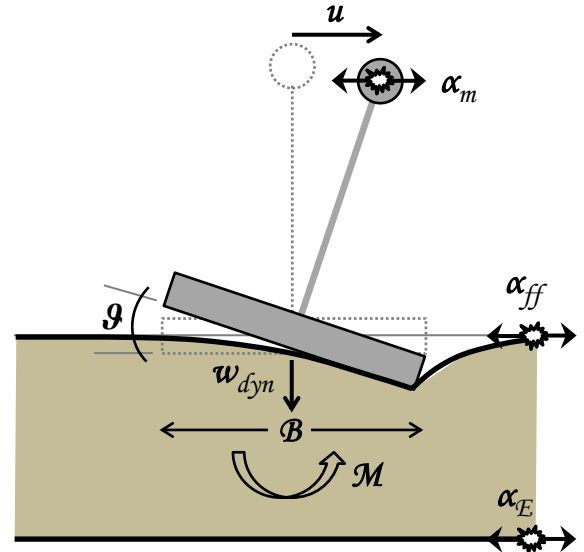


**Σχήμα 4.8β** *Tsang*  $_{IXA} 2$  πλάτους 0.2g. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

*Tsang*  $IXA$  2

$$F_S = 2$$

$$\alpha_E = 0.2g$$



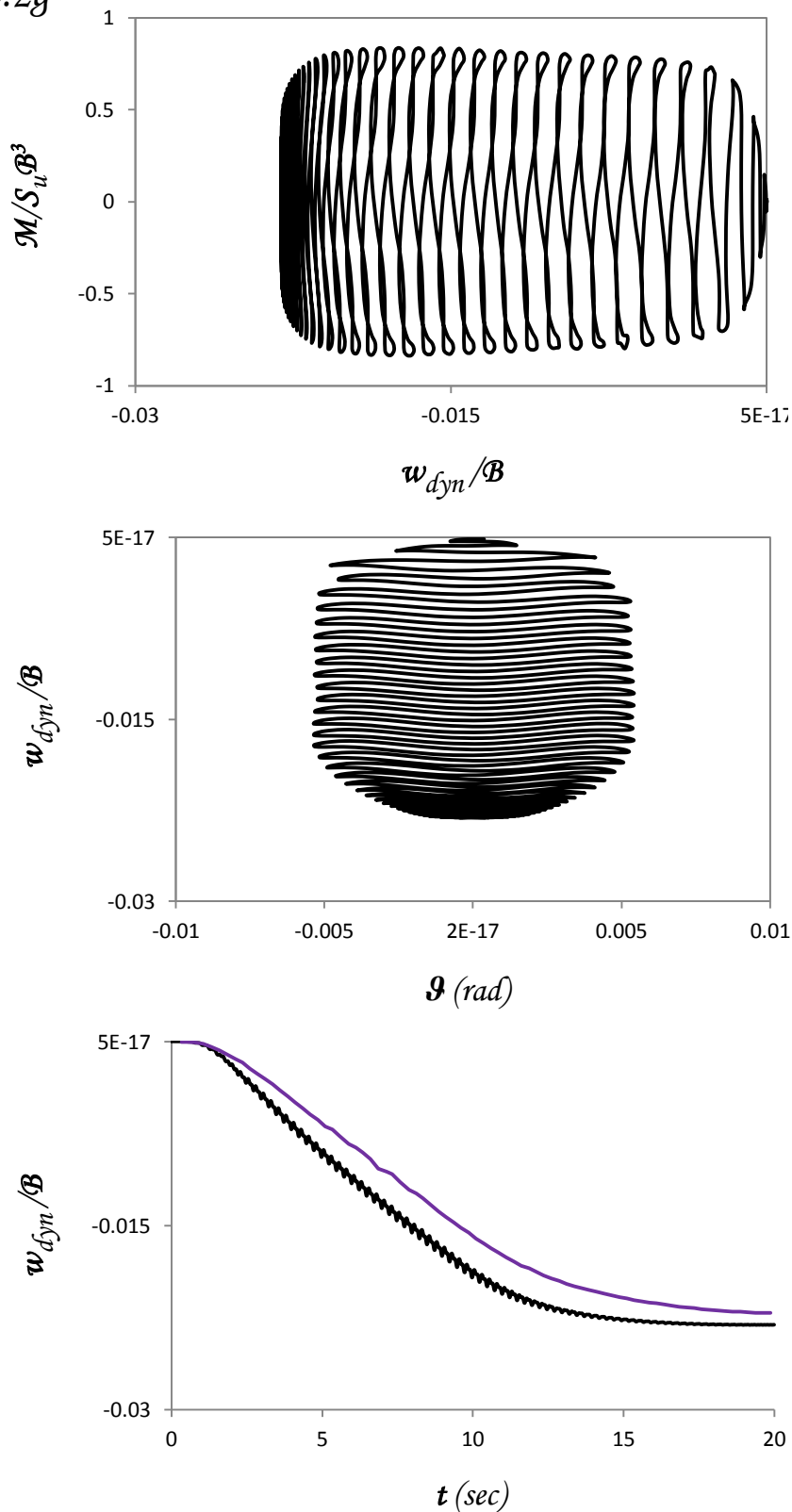
— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.9α** *Tsang*  $IXA$  2 πλάτους 0.2g. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

*Tsang*  $IXA$  2

$$F_S = 2$$

$$\alpha_E = 0.2g$$

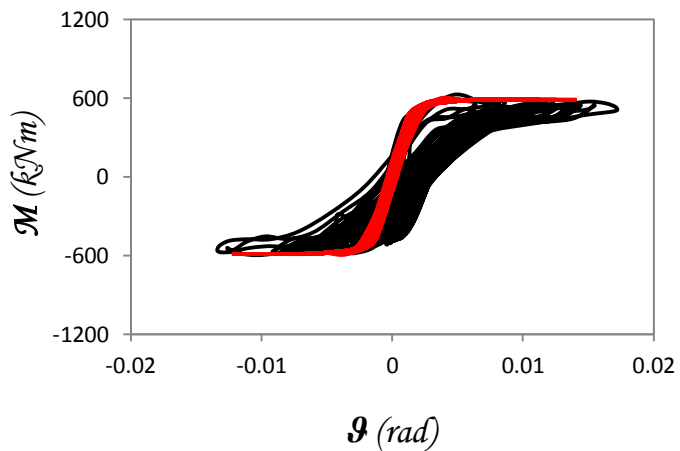
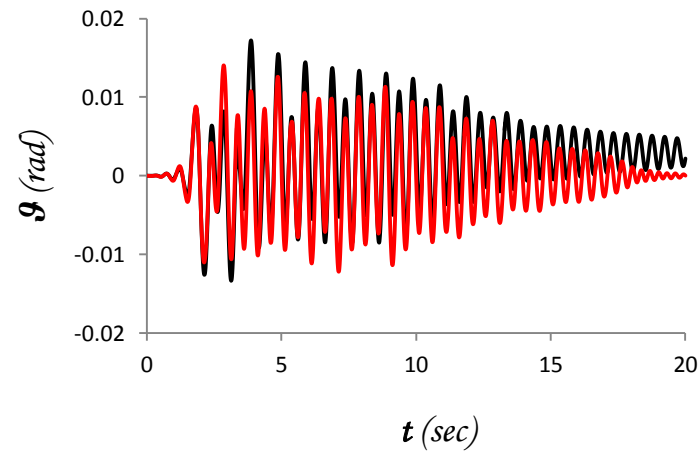
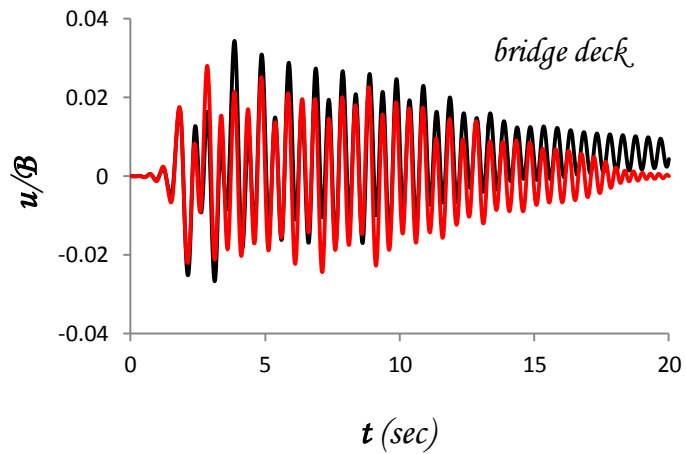
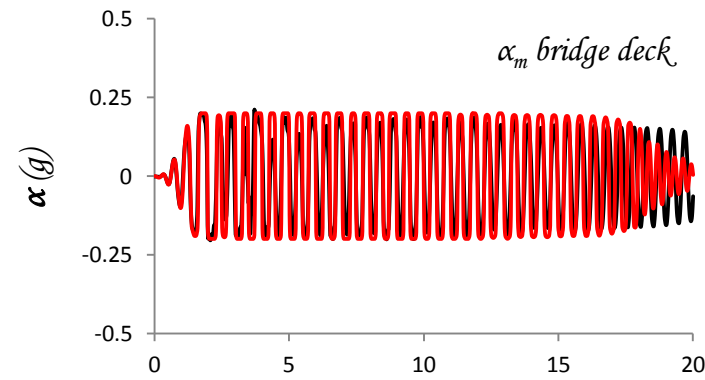
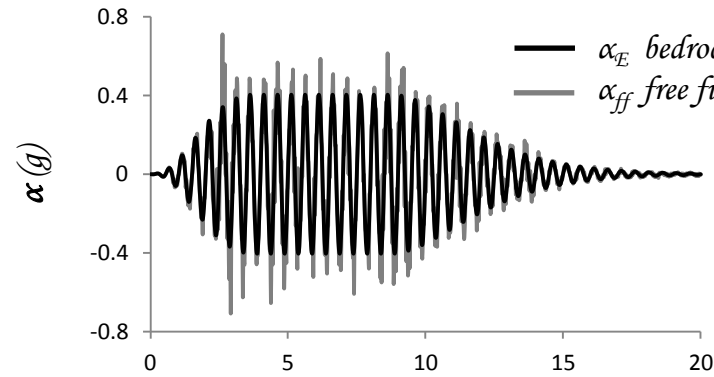
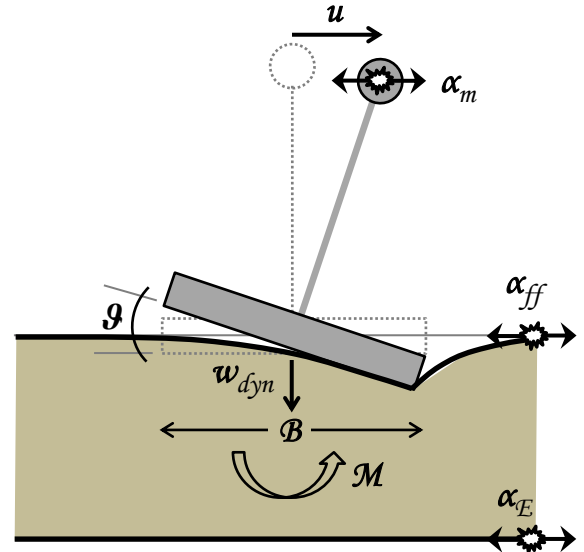


**Σχήμα 4.9β** *Tsang*  $IXA$  2 πλάτους 0.2g. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

*Tsang* IXA 2

$$F_S = 5$$

$$\alpha_E = 0.4g$$



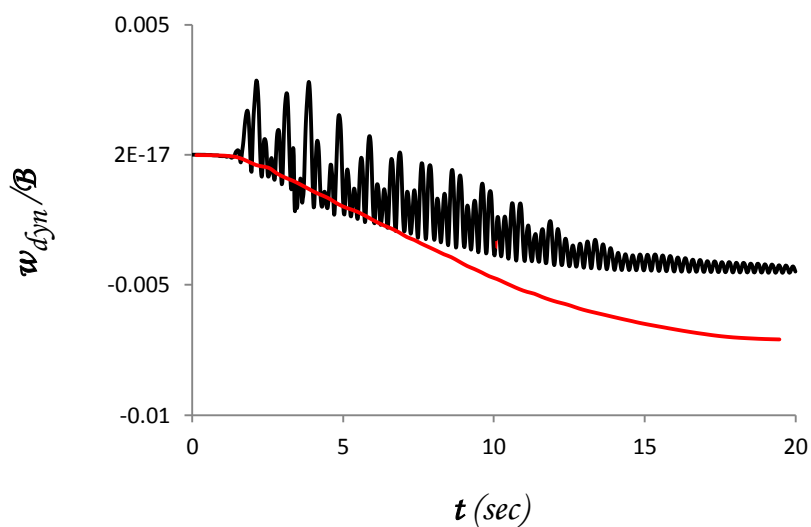
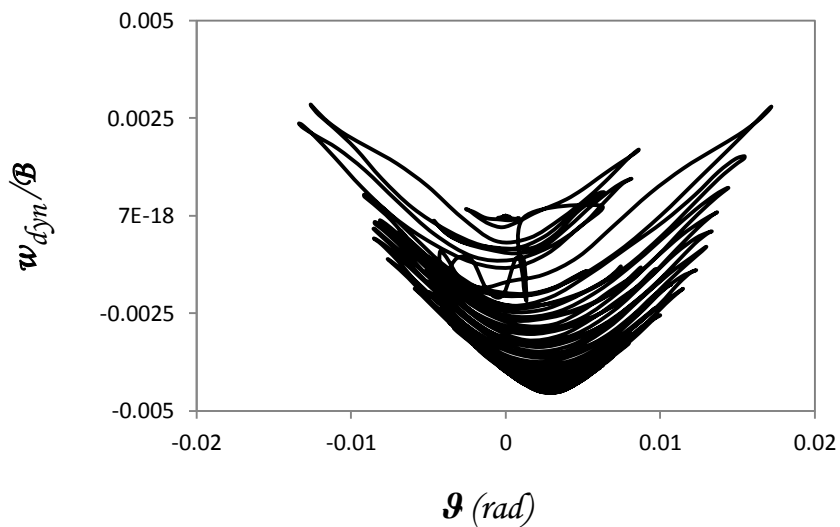
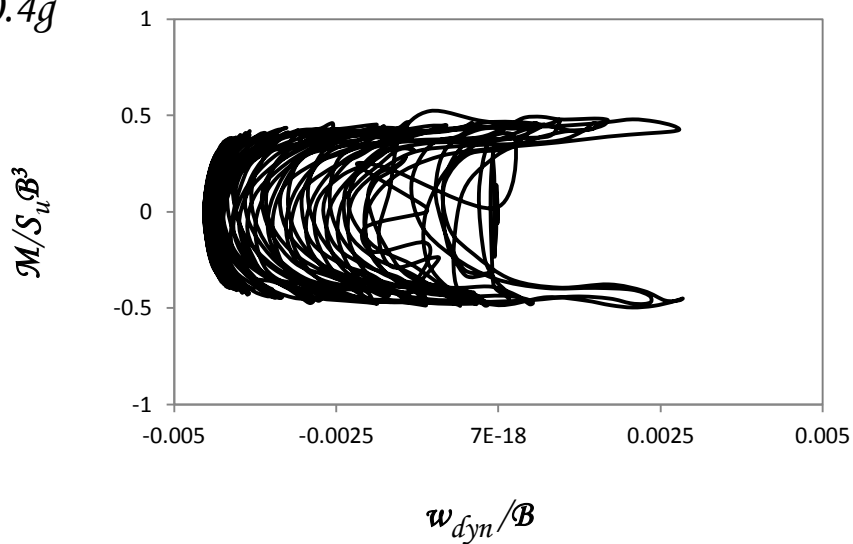
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.10α *Tsang* IXA 2 πλάτους 0.4g. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

*Tsang*  $IXA$  2

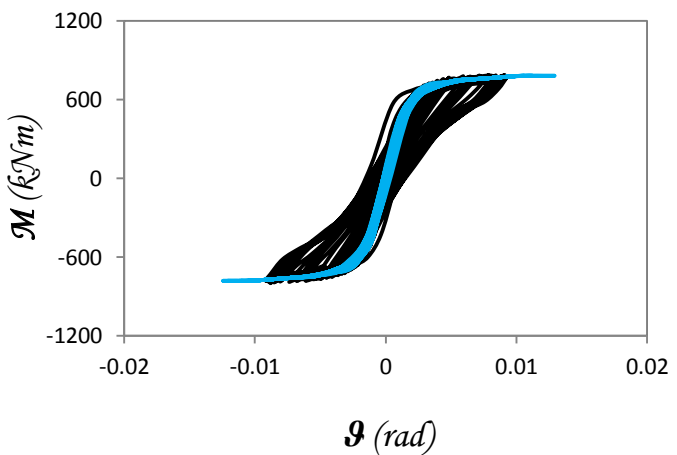
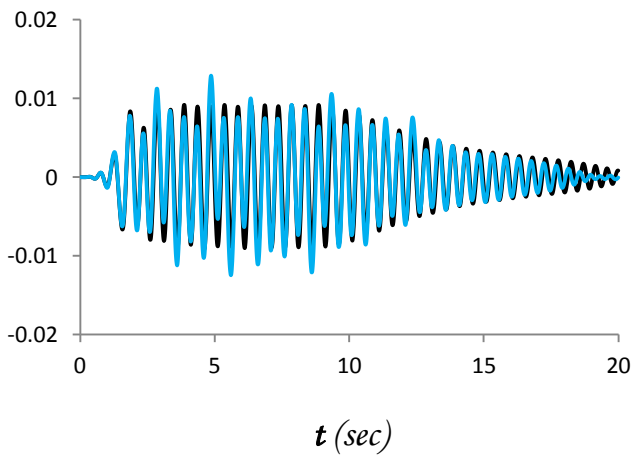
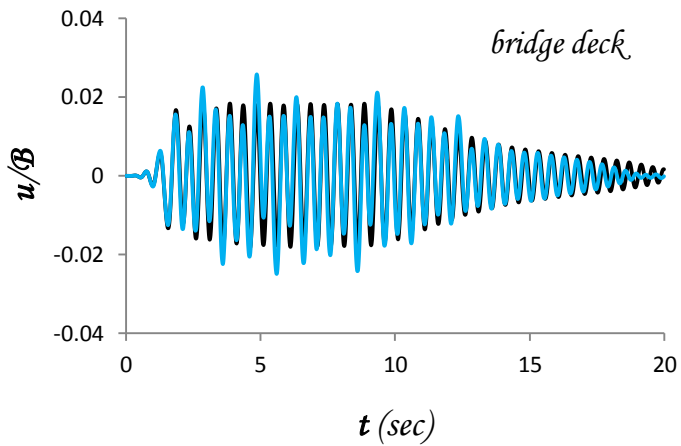
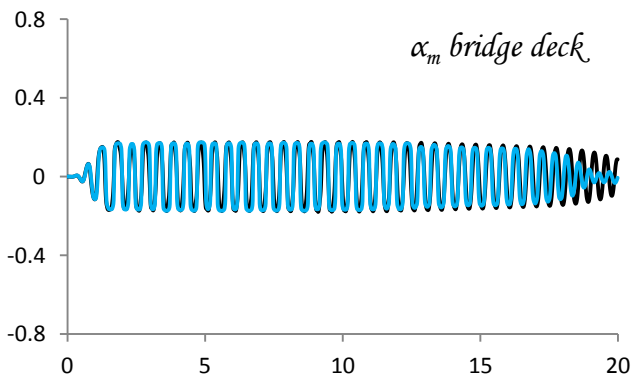
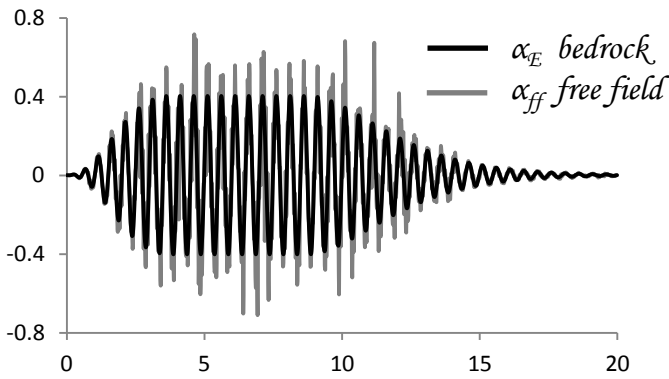
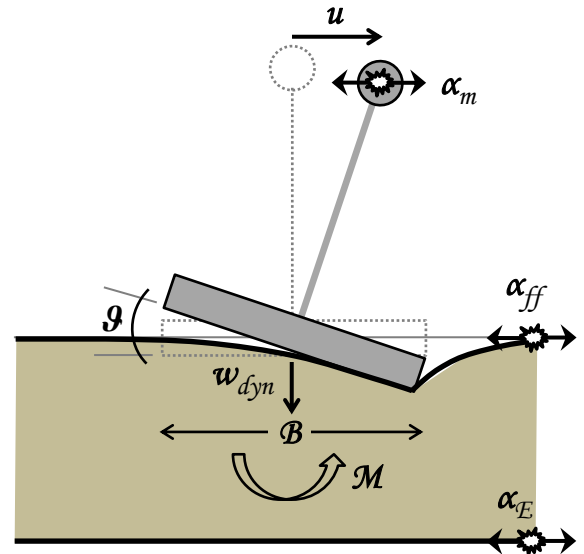
$$F_S = 5$$

$$\alpha_E = 0.4g$$



**Σχήμα 4.10β** *Tsang*  $IXA$  2 πλάτους 0.4g. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

*Tsang* IXA 2  
 $F_S = 3.3$   
 $\alpha_E = 0.4g$



— FEM  
— Ελατήριο

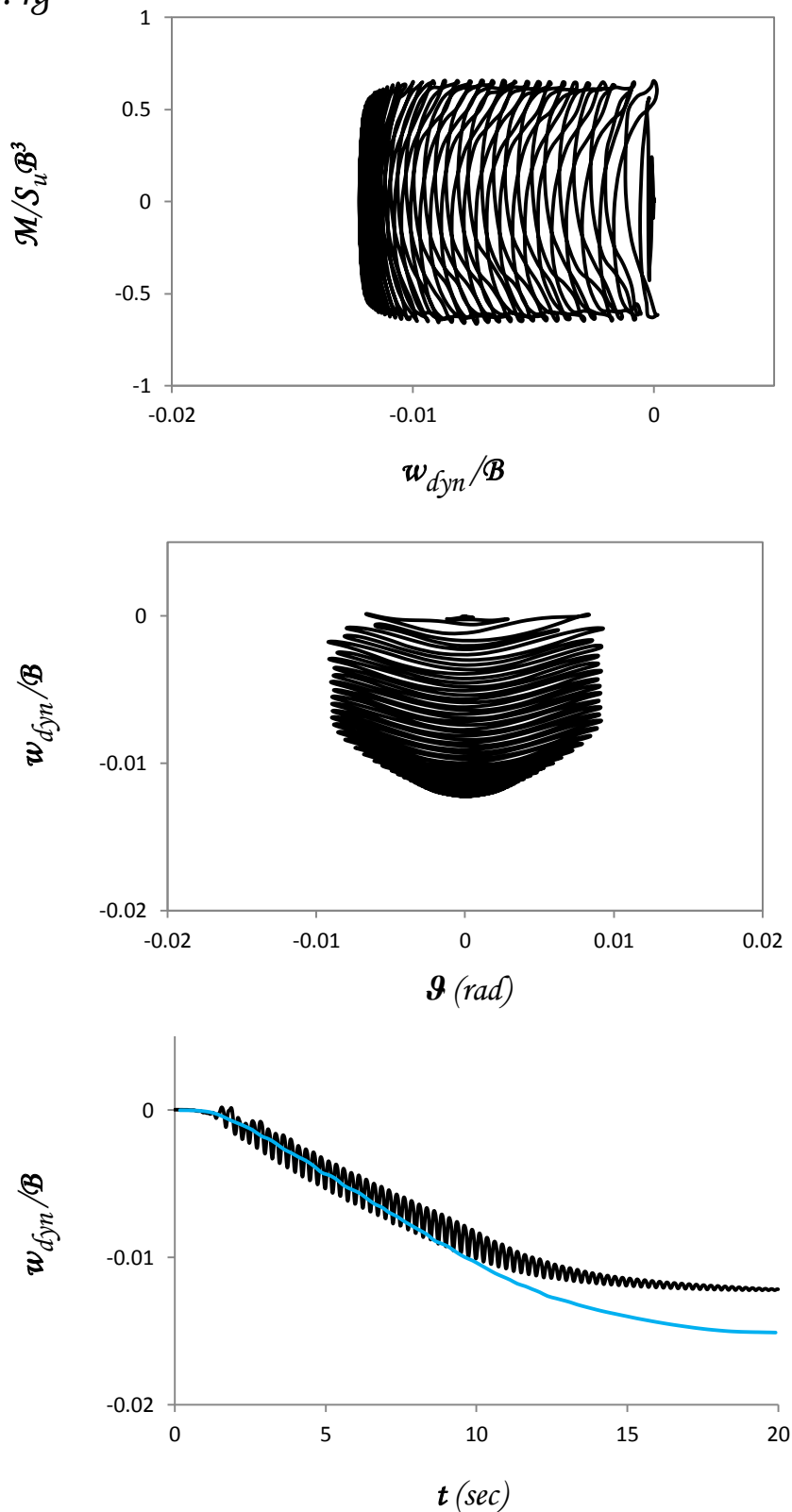
**Σχήμα 4.11α** *Tsang* IXA 2 πλάτους 0.4g. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



*Tsang*  $_{IXA} 2$

$$F_S = 3.3$$

$$\alpha_E = 0.4g$$

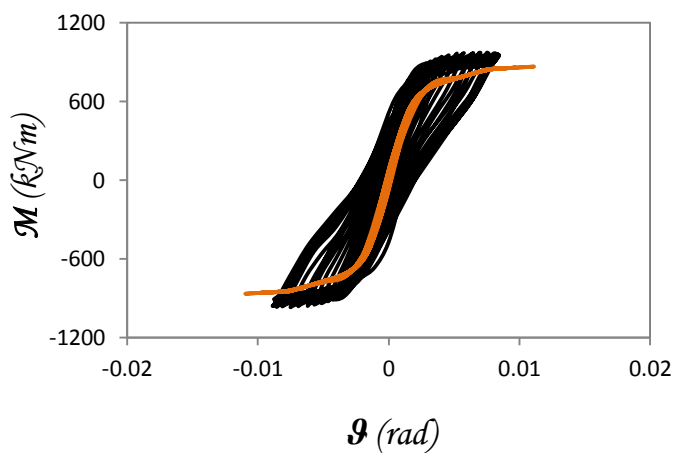
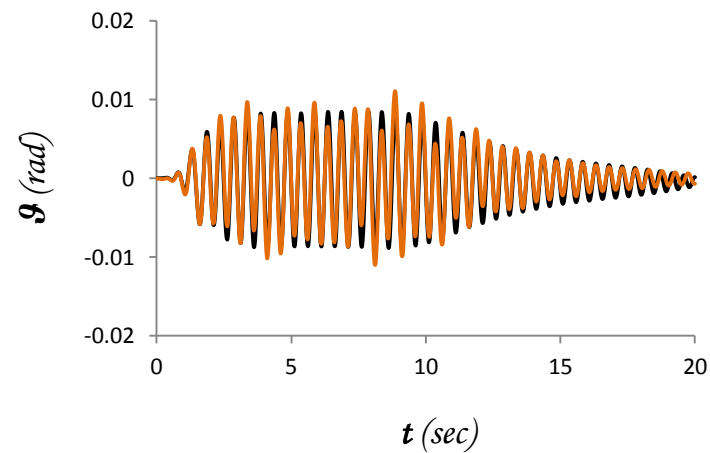
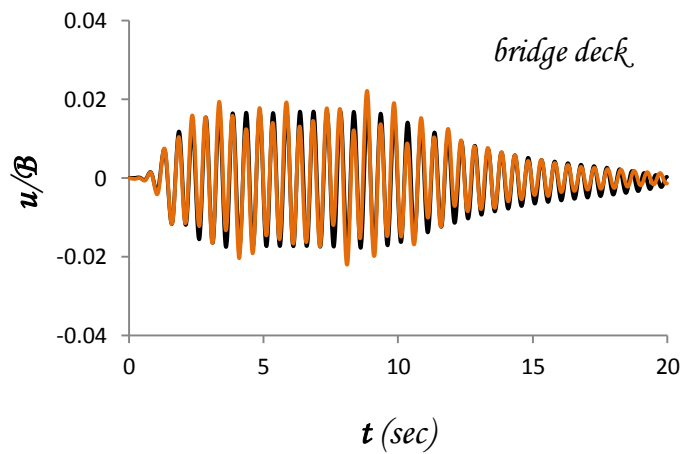
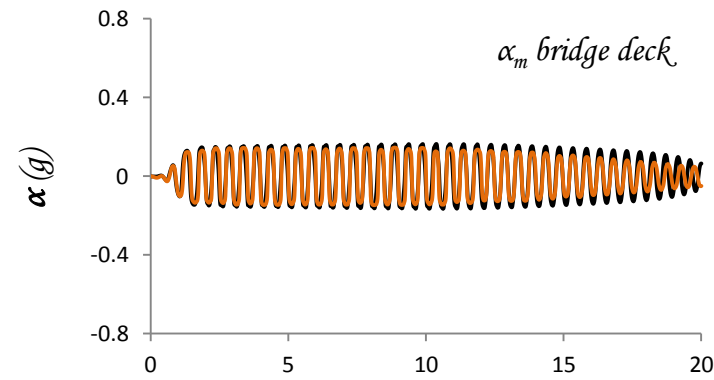
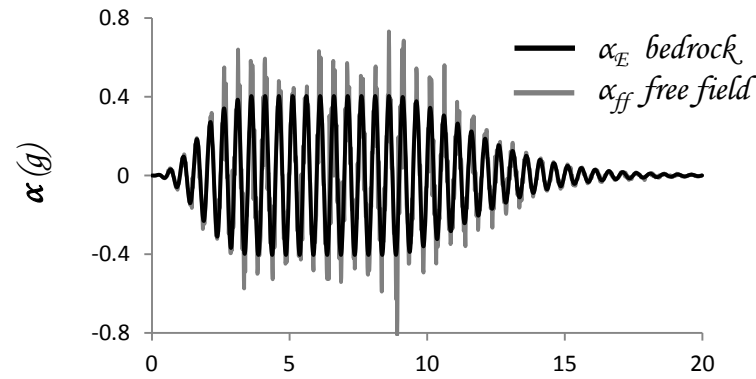
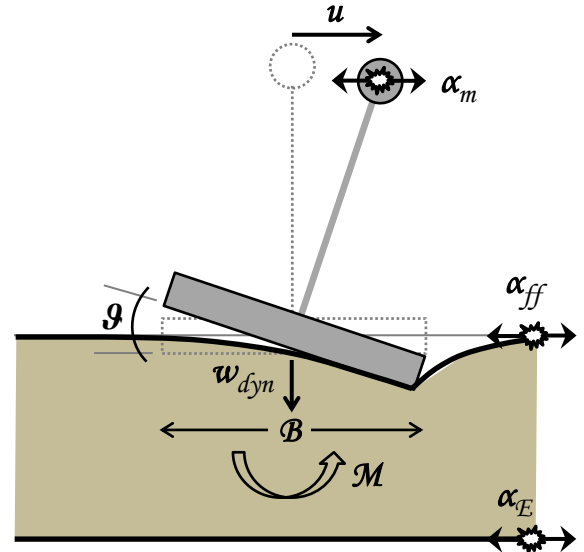


**Σχήμα 4.11β** *Tsang*  $_{IXA} 2$  πλάτους 0.4g. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

*Tsang* IXA 2

$$F_S = 2.5$$

$$\alpha_E = 0.4g$$



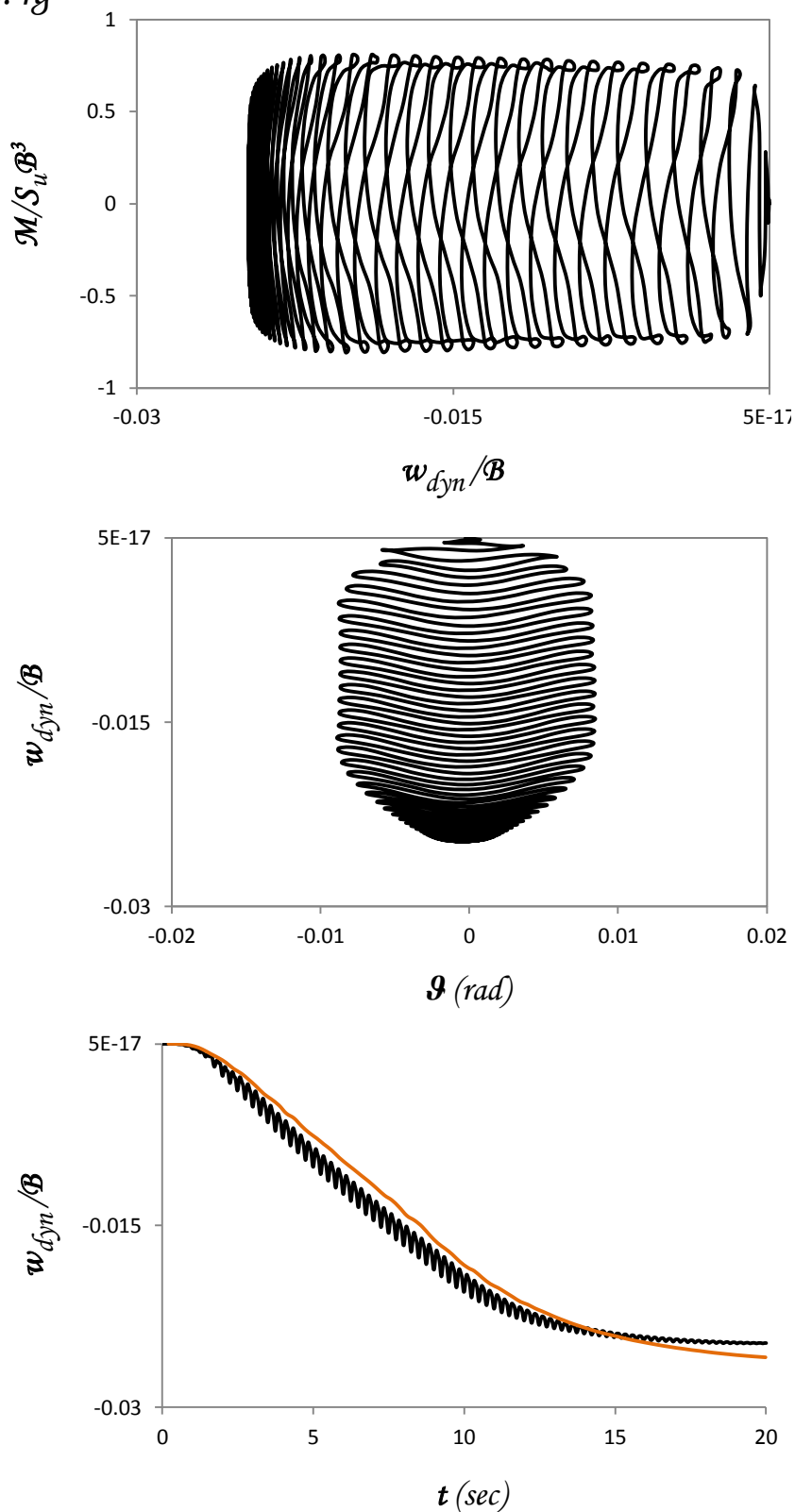
— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.12α** *Tsang* IXA 2 πλάτους 0.4g. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

*Tsang*  $IXA$  2

$$F_S = 2.5$$

$$\alpha_E = 0.4g$$

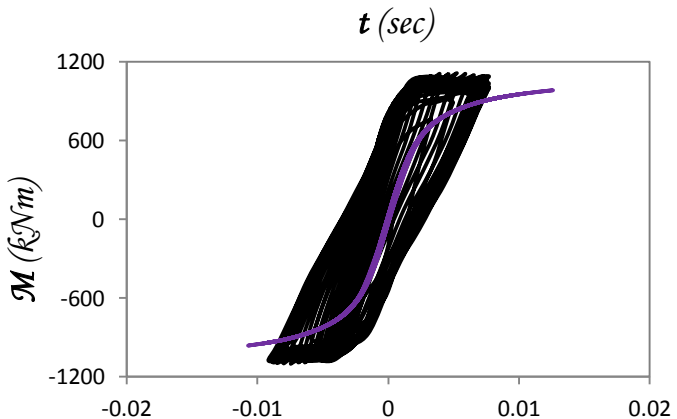
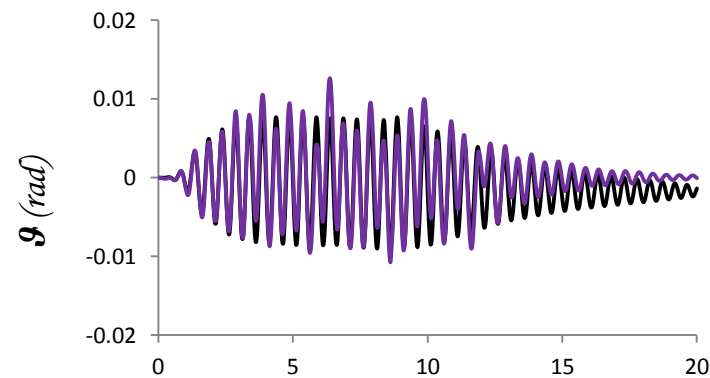
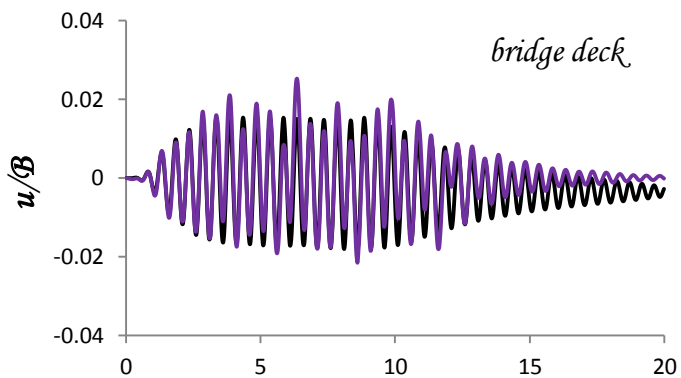
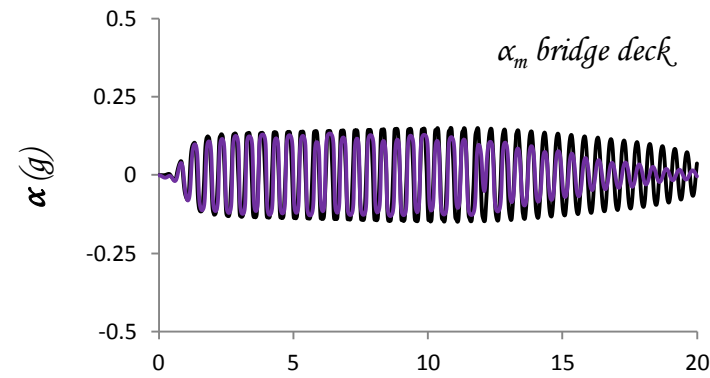
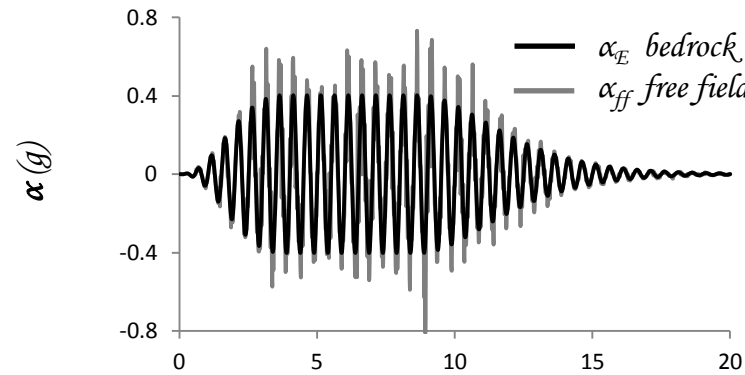
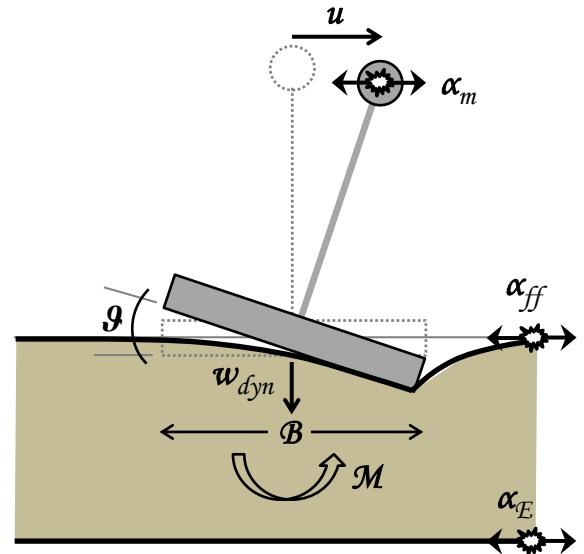


**Σχήμα 4.12β** *Tsang*  $IXA$  2 πλάτους 0.4g. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

*Tsang* IXA 2

$$F_S = 2$$

$$\alpha_E = 0.4g$$



*t (sec)*

*ϑ (rad)*

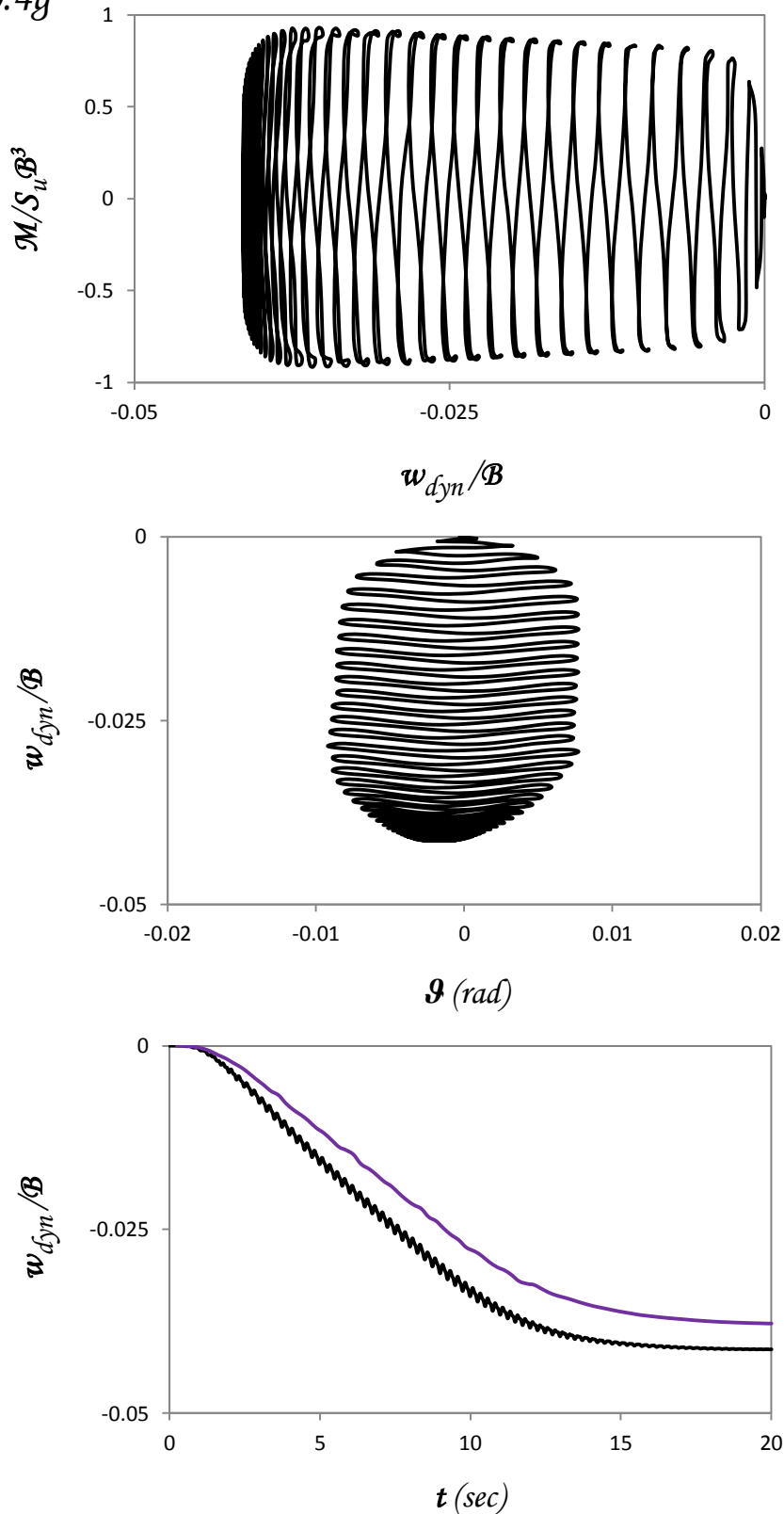
— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.13α** *Tsang* IXA 2 πλάτους 0.4g. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

*Tsang*  $IXA$  2

$$F_S = 2$$

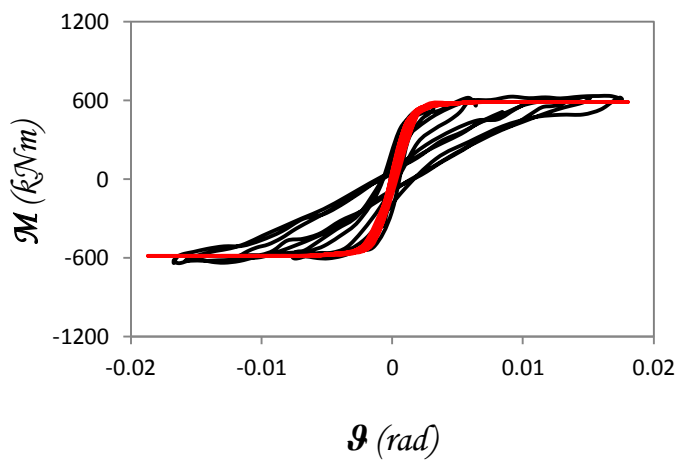
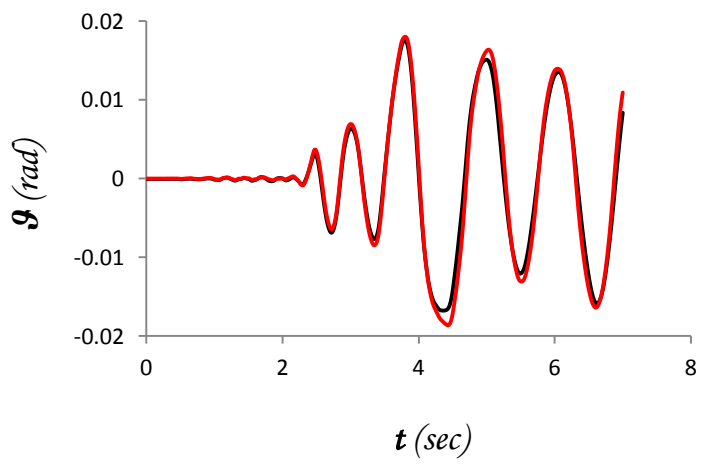
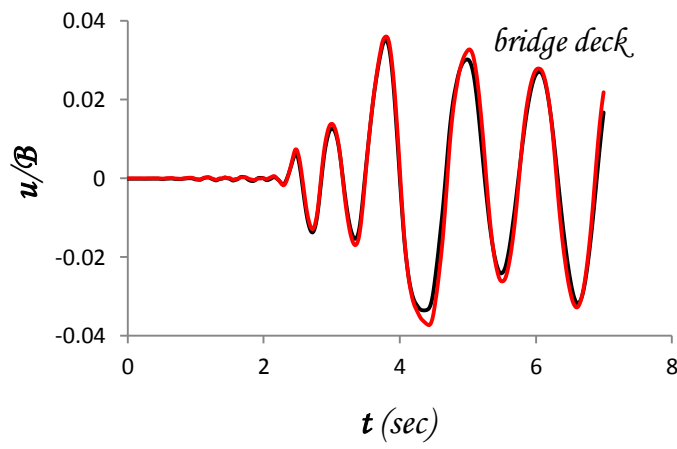
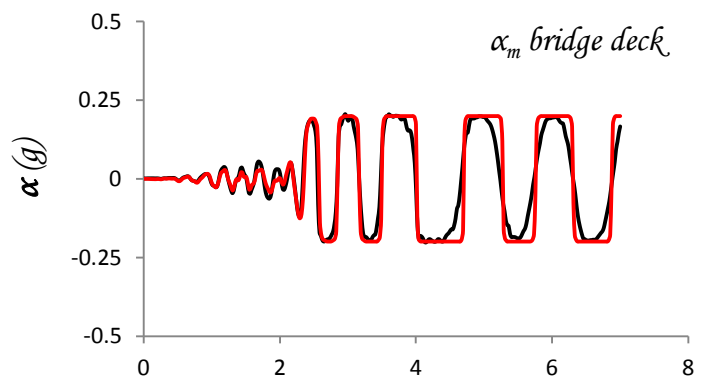
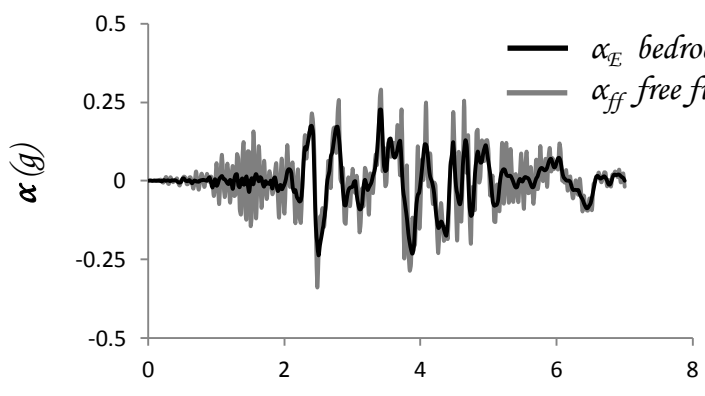
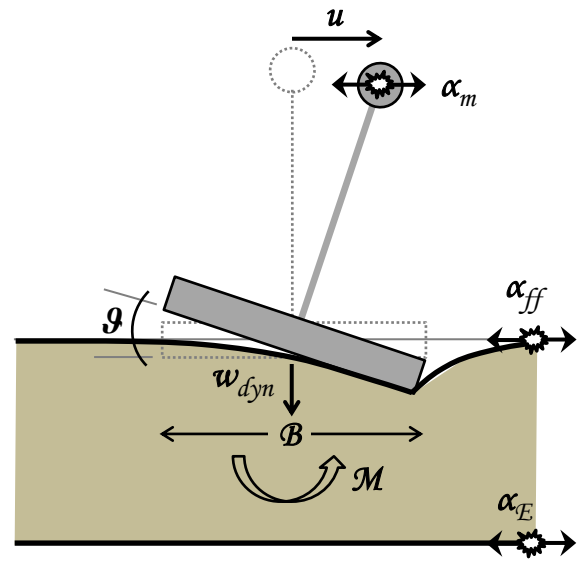
$$\alpha_E = 0.4g$$



**Σχήμα 4.13β** *Tsang*  $IXA$  2 πλάτους 0.4g. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

# Καλαμάτα 1986

$$F_S = 5$$

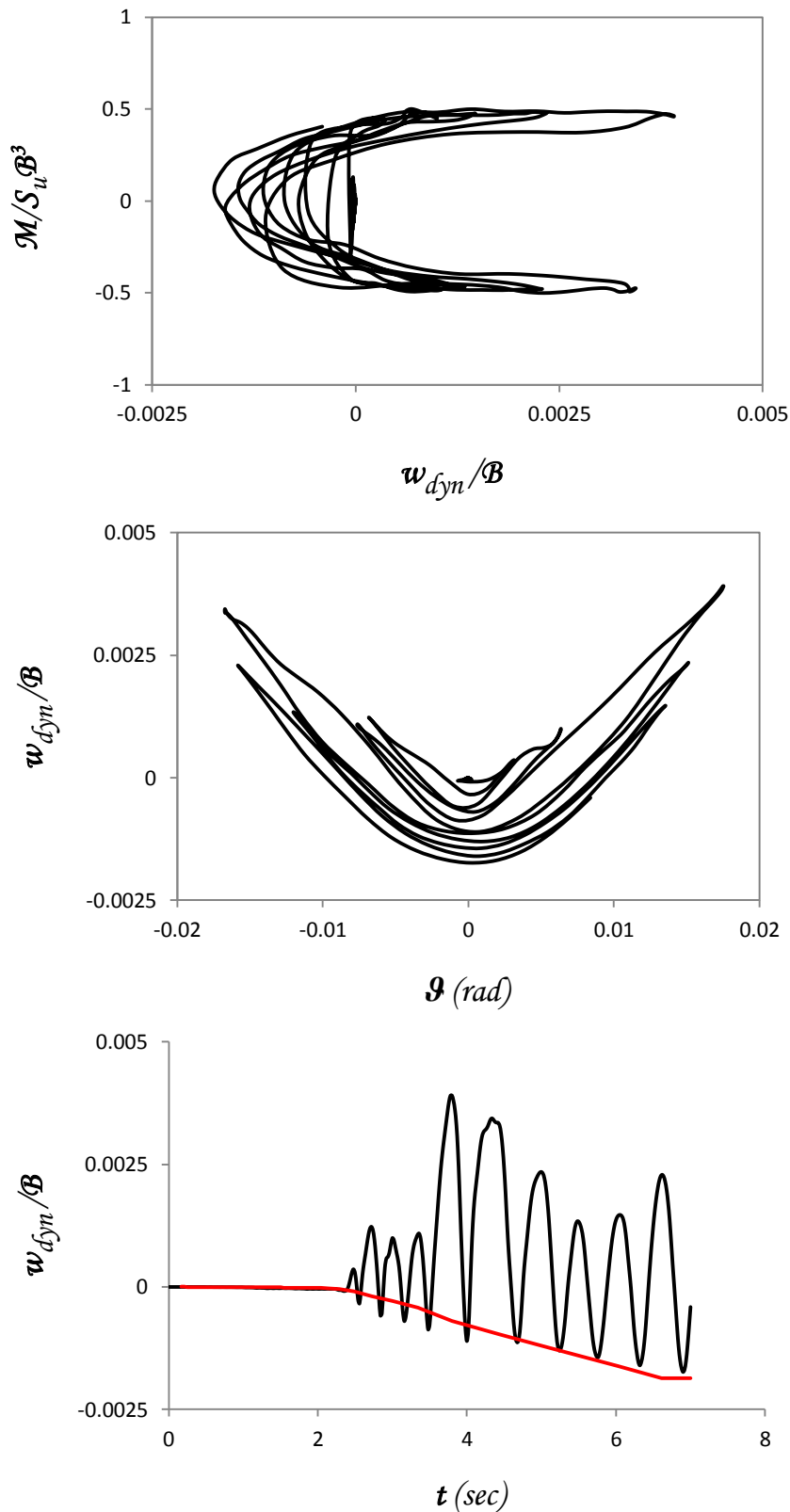


— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.14α** Καλαμάτα 1986. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta - \epsilon$ λατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

# Καλαμάτα 1986

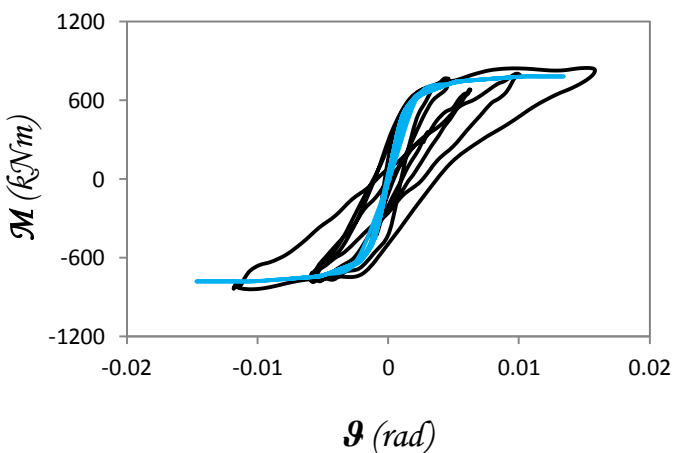
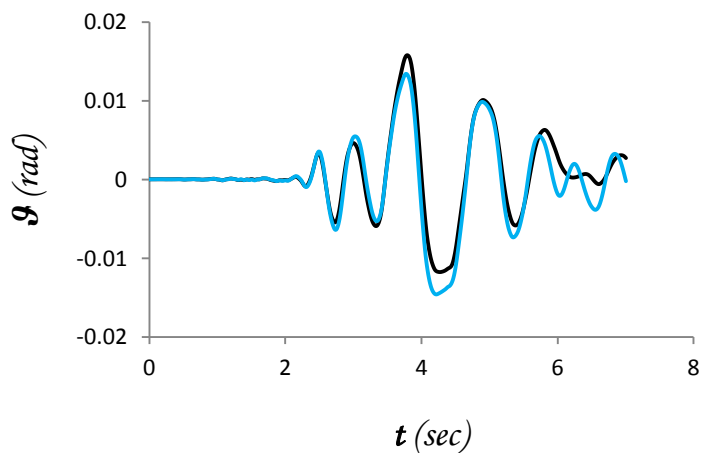
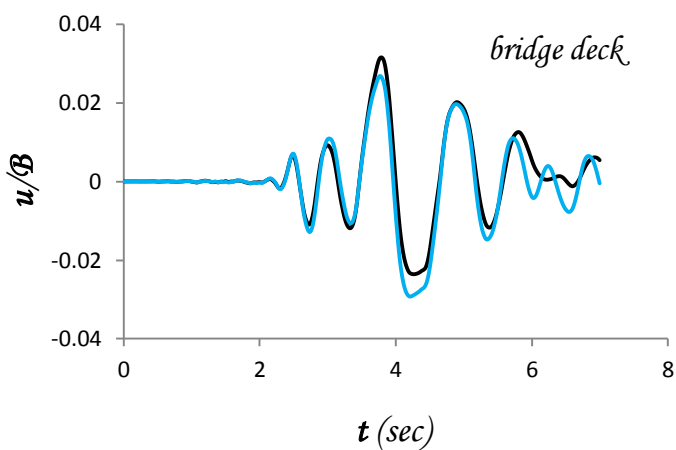
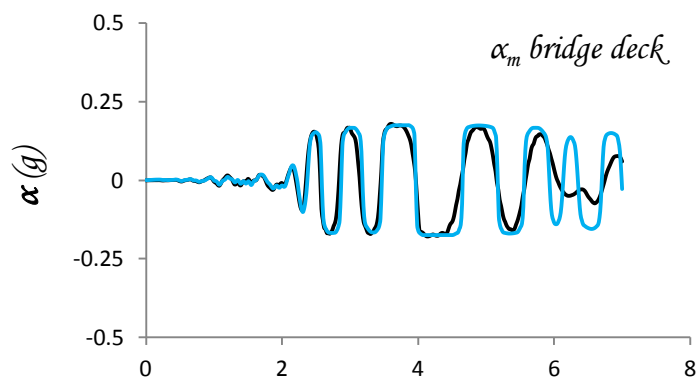
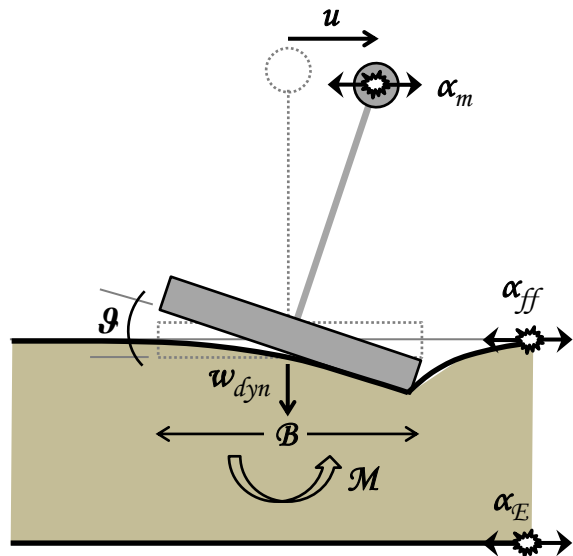
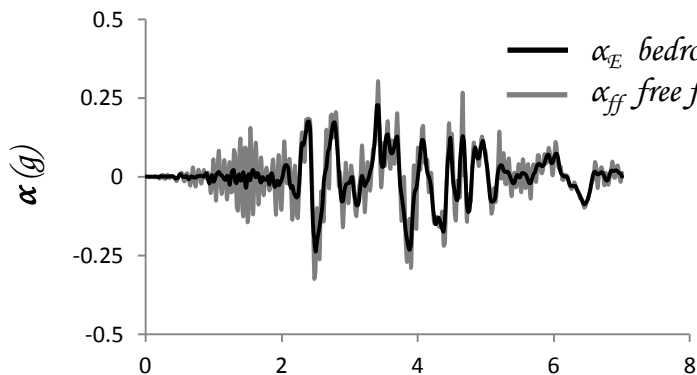
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.14β** Καλαμάτα 1986. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Καλαμάτα 1986

$$F_S = 3.3$$



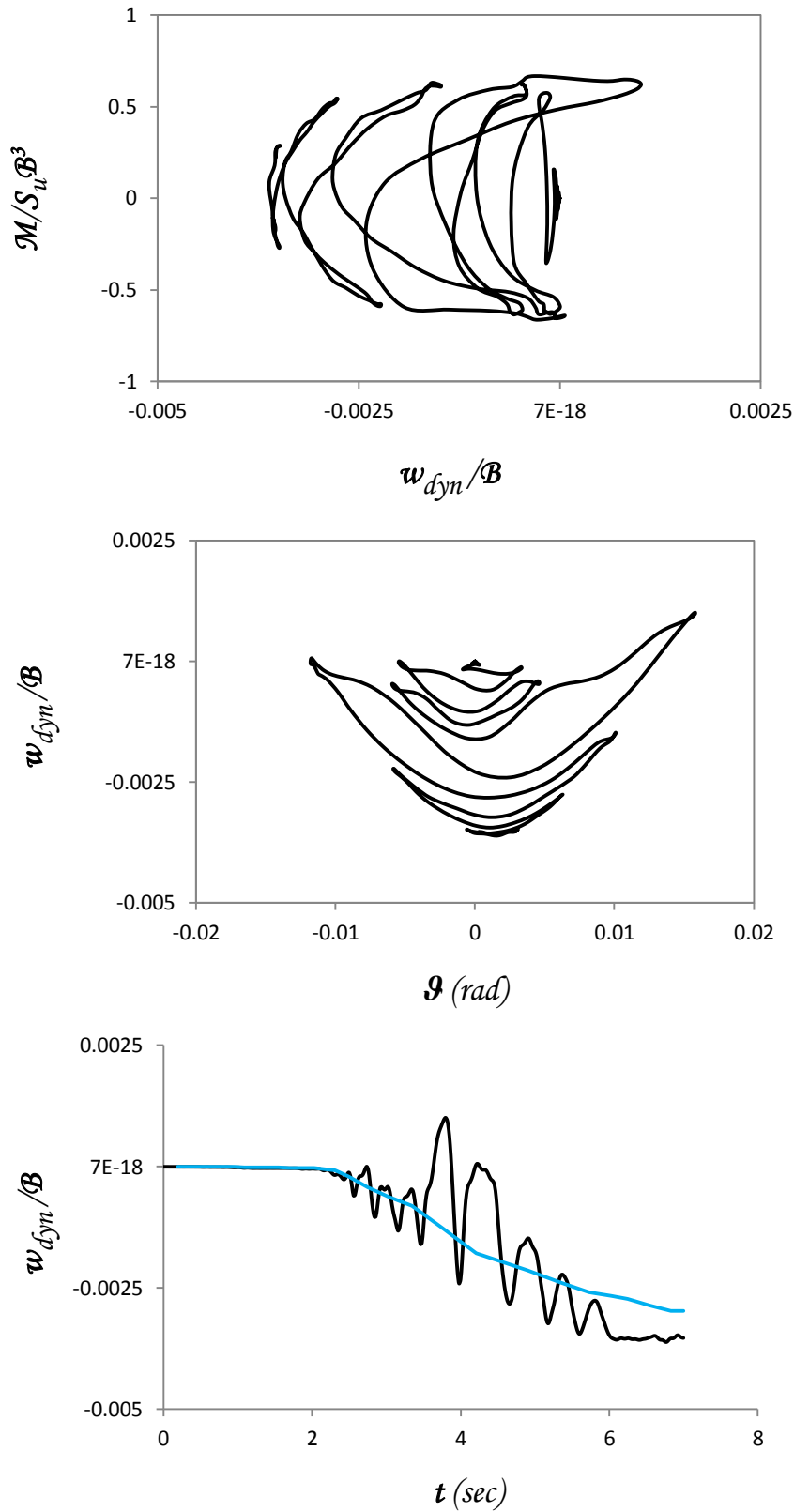
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.15α Καλαμάτα 1986. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



# Καλαμάτα 1986

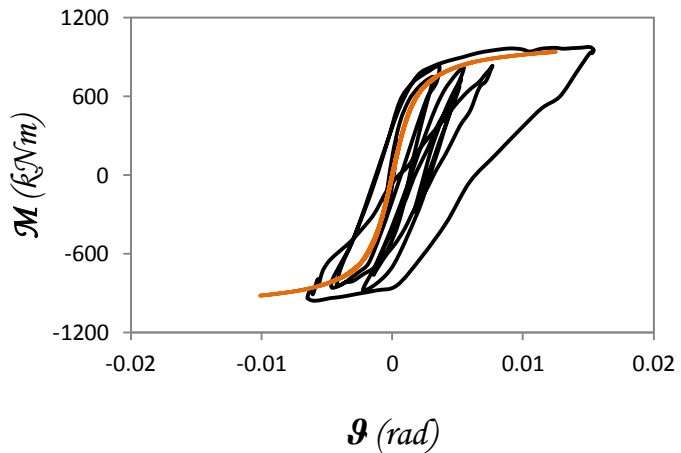
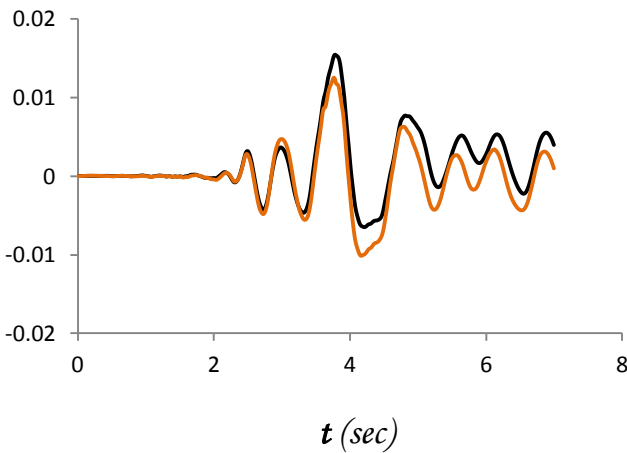
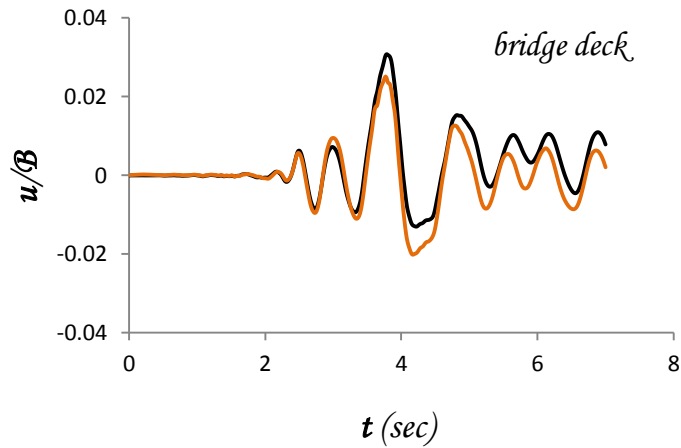
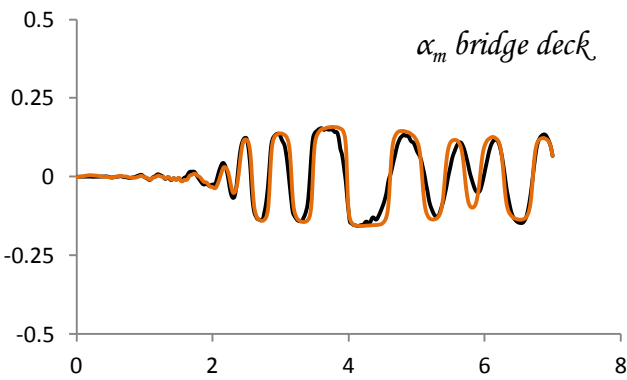
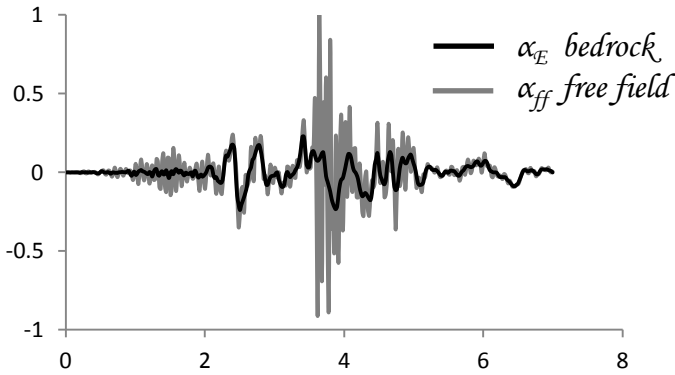
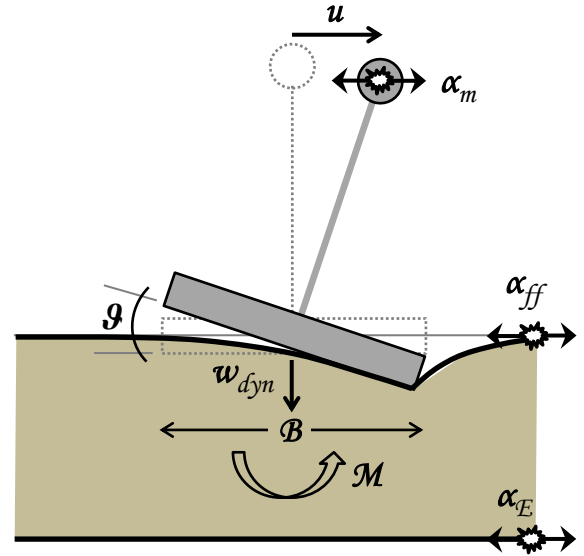
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.15β** Καλαμάτα 1986. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Καλαμάτα 1986

$$F_S = 2.5$$

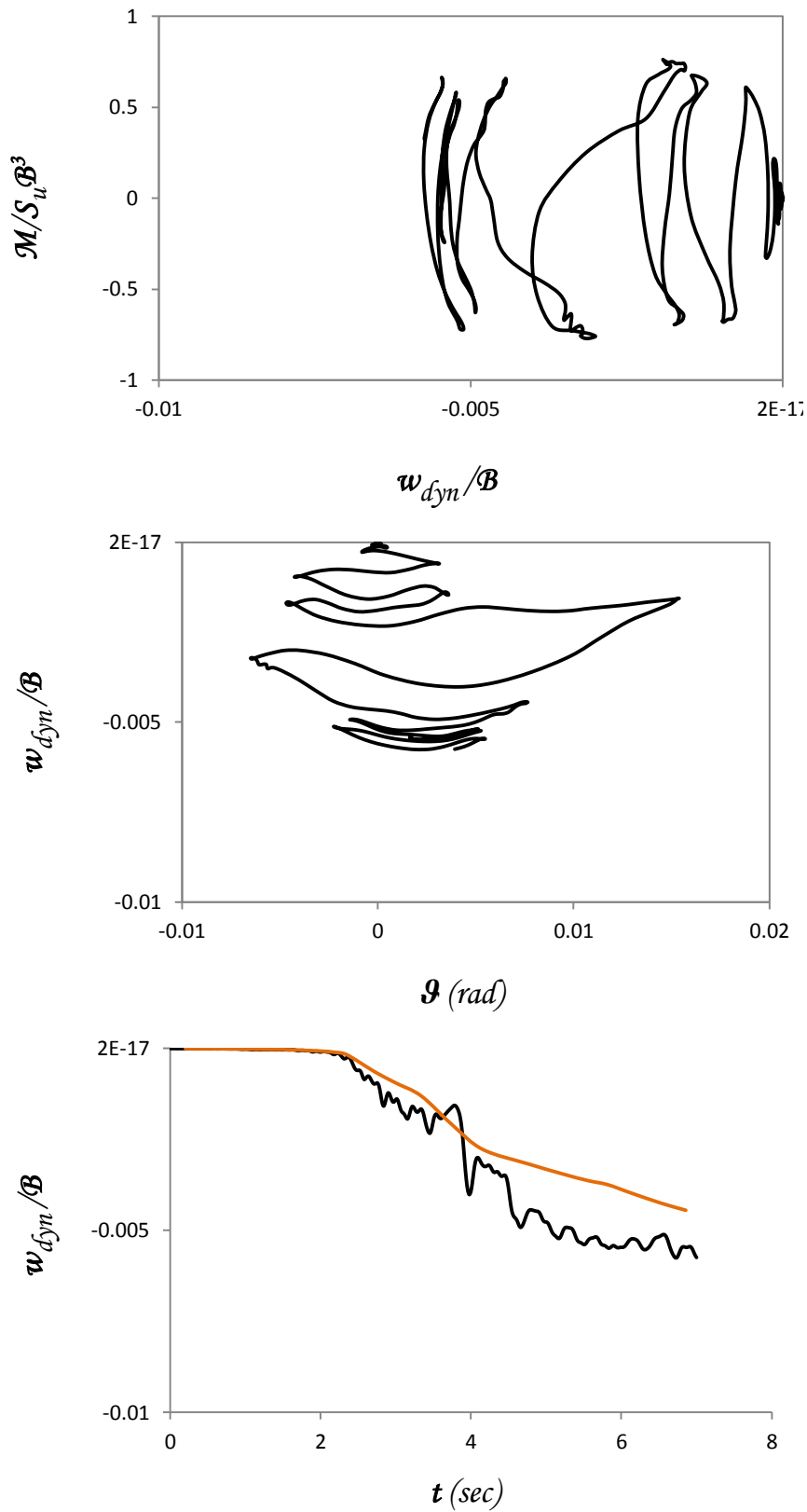


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.16α Καλαμάτα 1986. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

# Καλαμάτα 1986

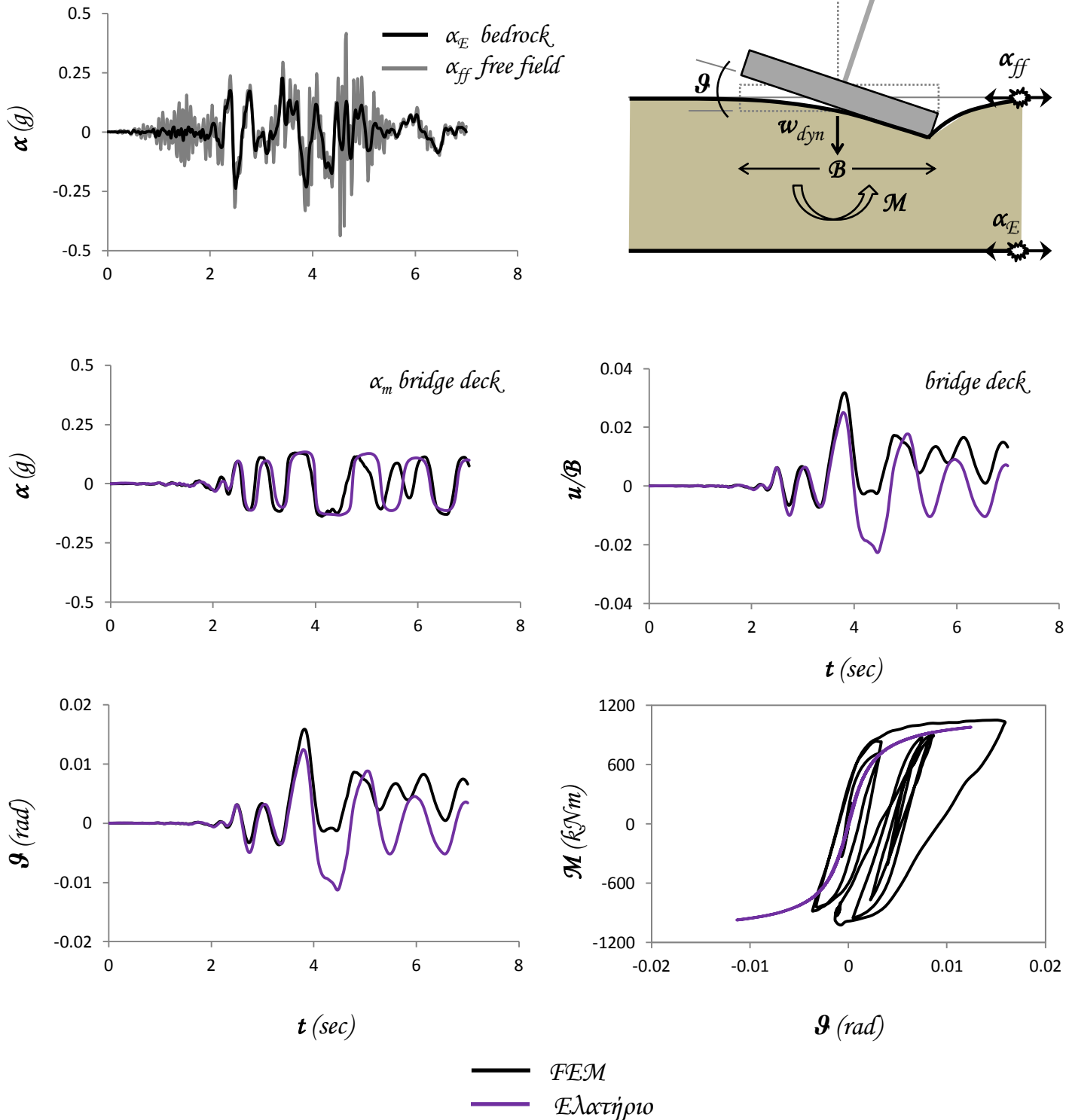
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.16β** Καλαμάτα 1986. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Καλαμάτα 1986

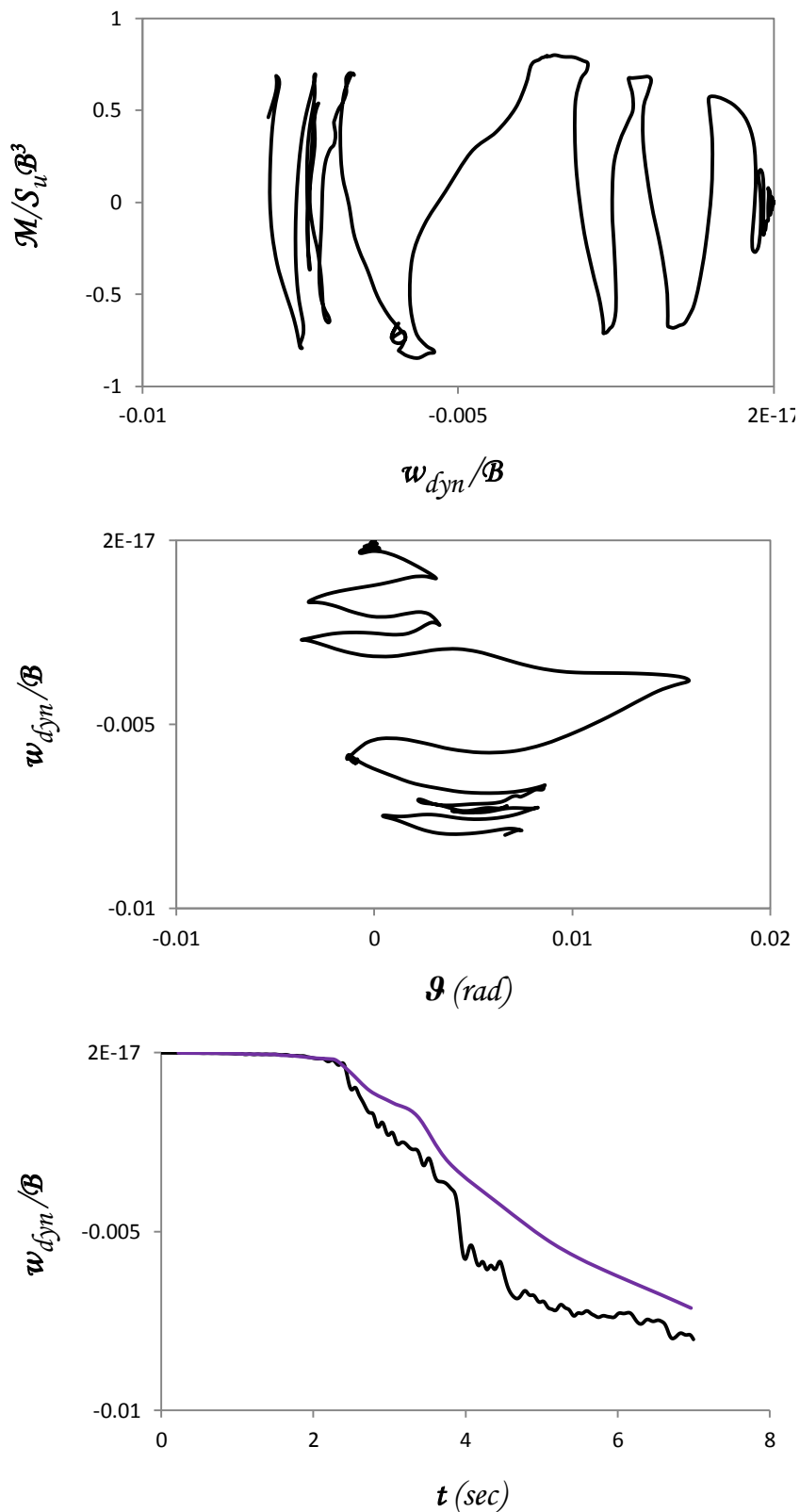
$$F_S = 2$$



Σχήμα 4.17α Καλαμάτα 1986. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Καλαμάτα 1986

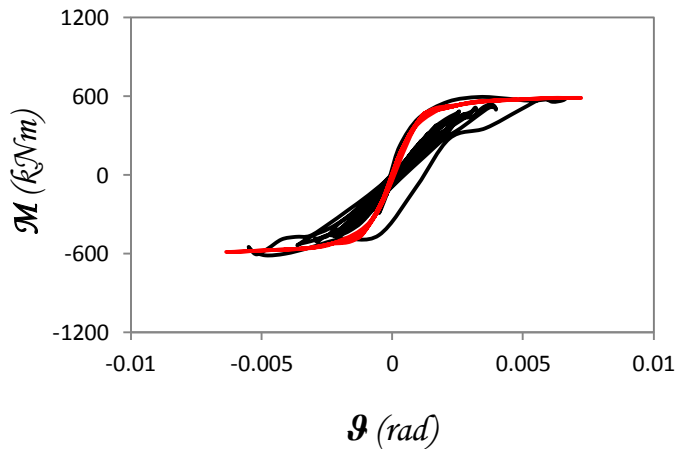
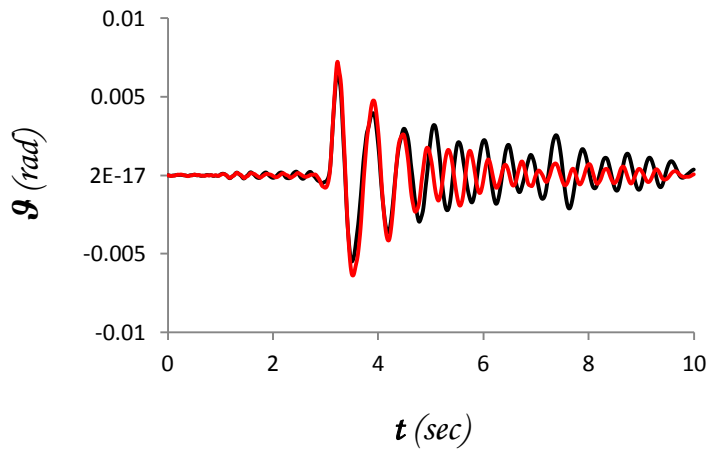
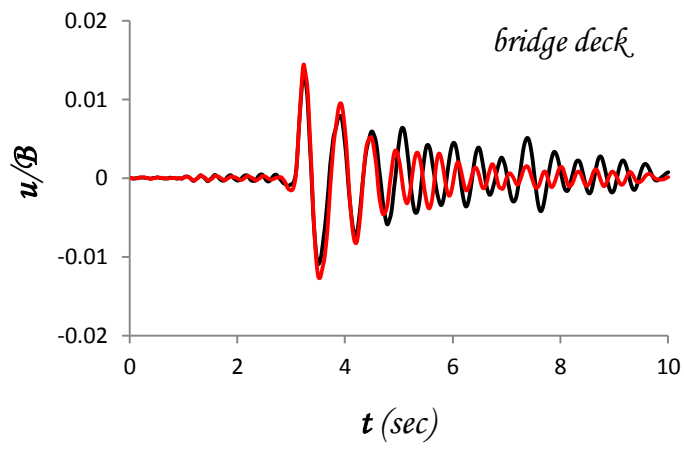
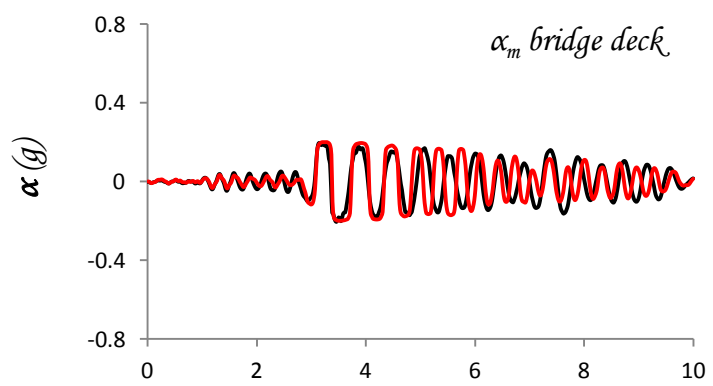
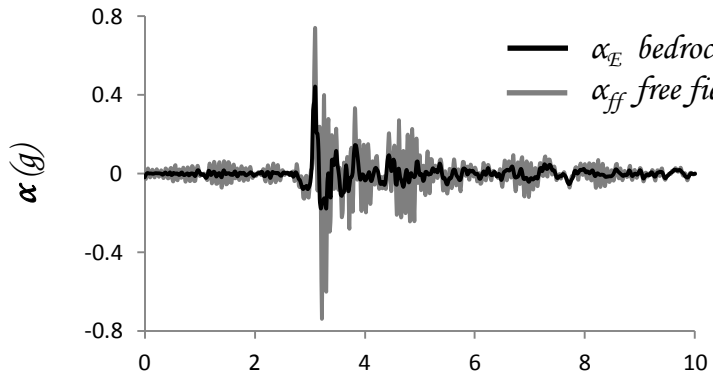
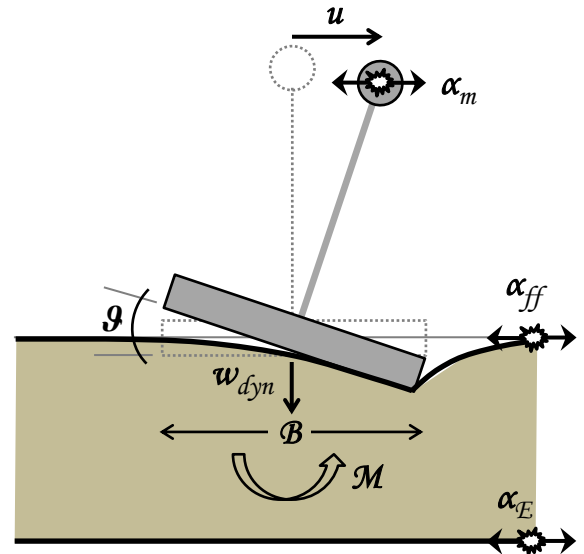
$$F_S = 2$$



**Σχήμα 4.17β** Καλαμάτα 1986. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση ιστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Πύργος 1993

$$F_S = 5$$

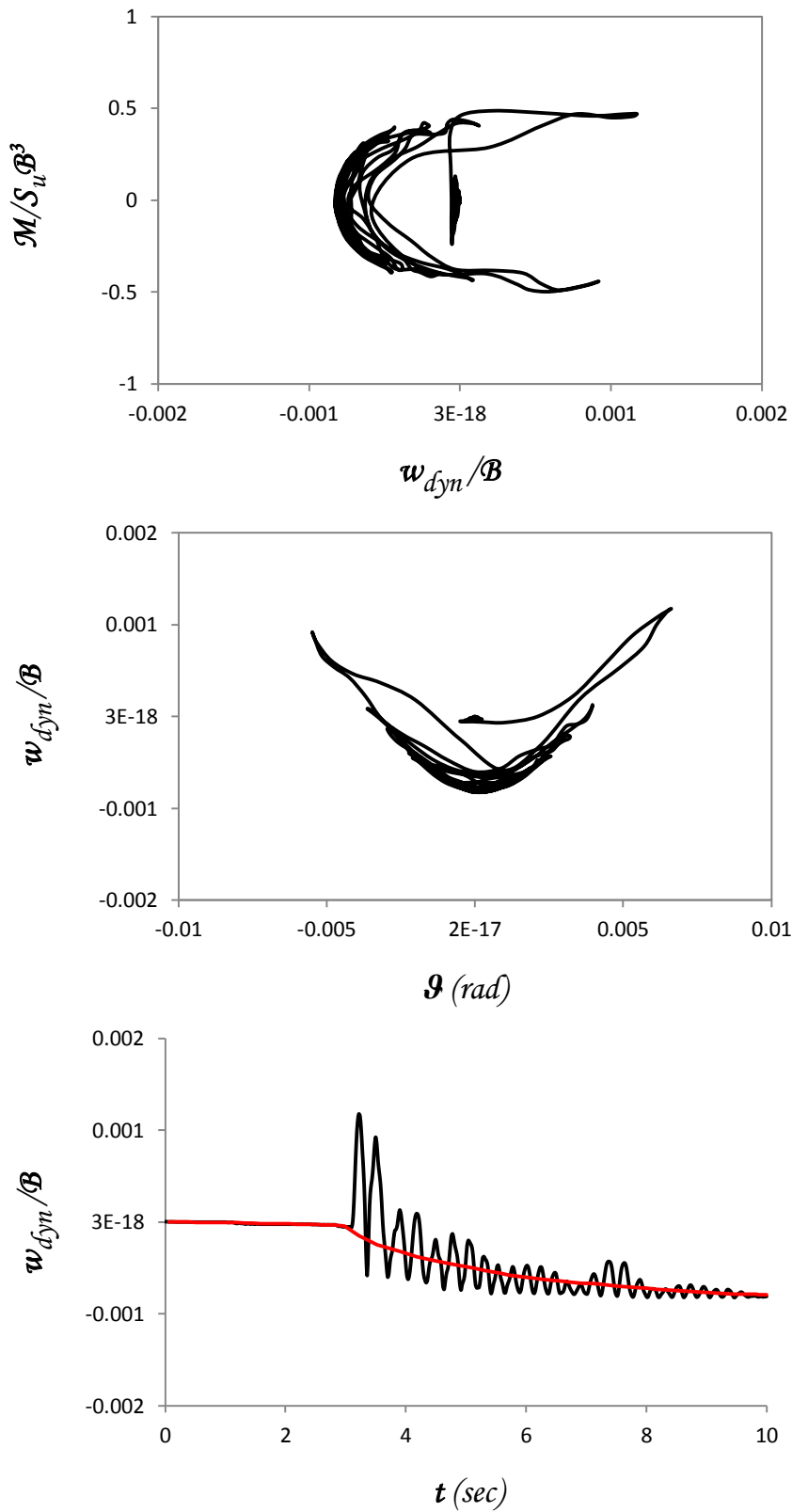


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.18α Πύργος 1993. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Πύργος 1993

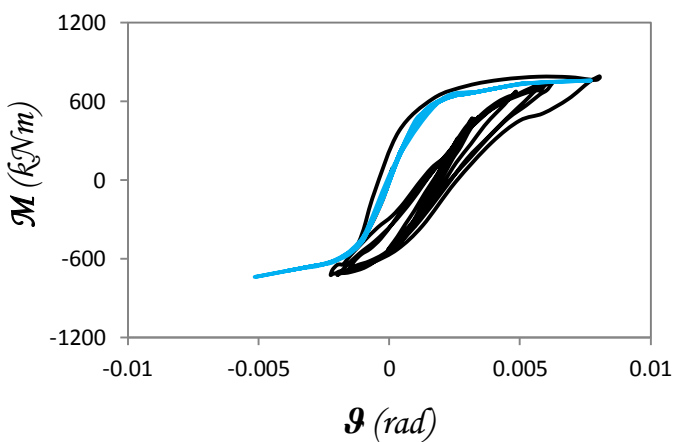
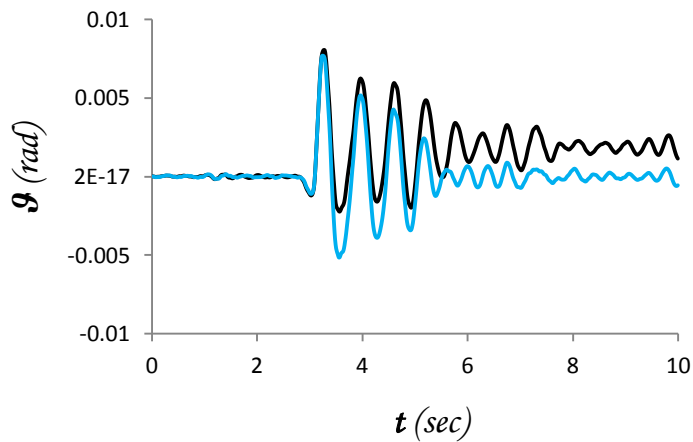
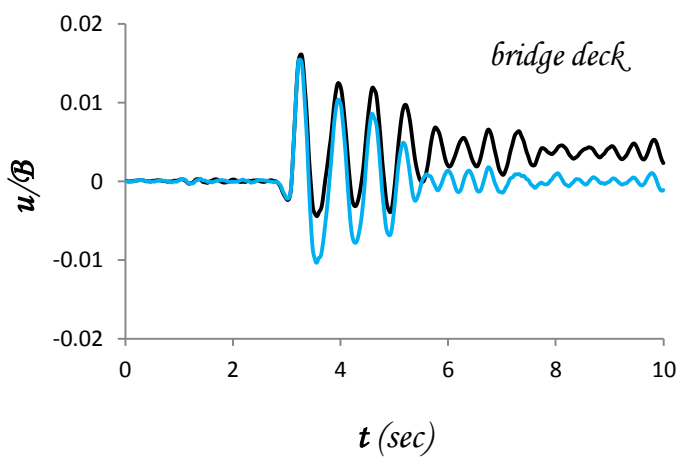
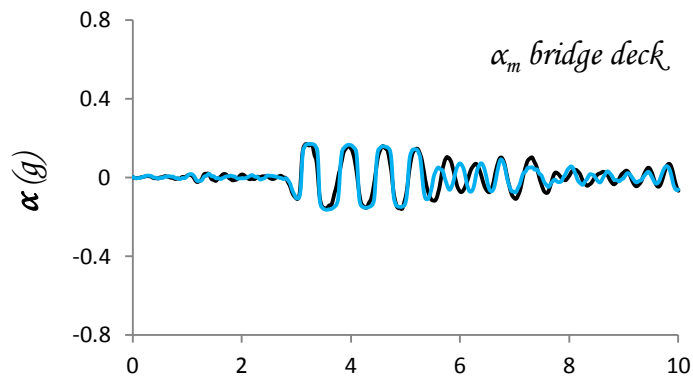
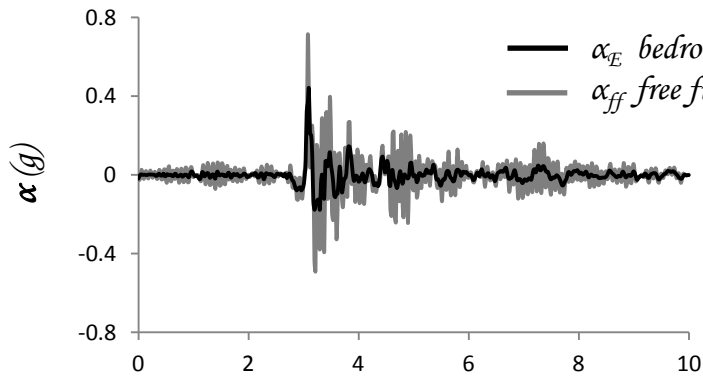
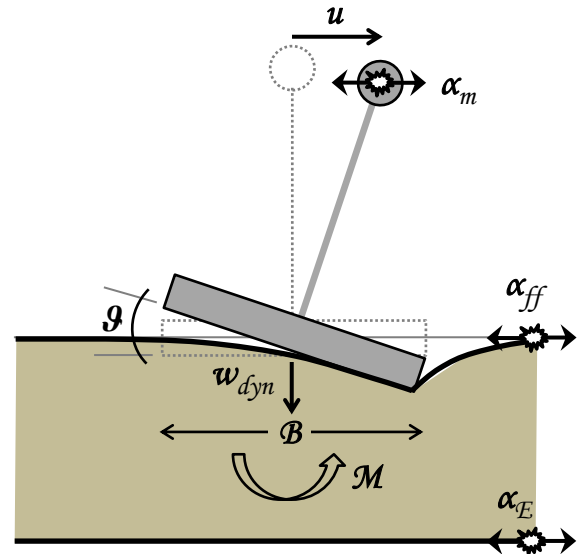
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.18β Πύργος 1993.** Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Πύργος 1993

$$F_S = 3.3$$



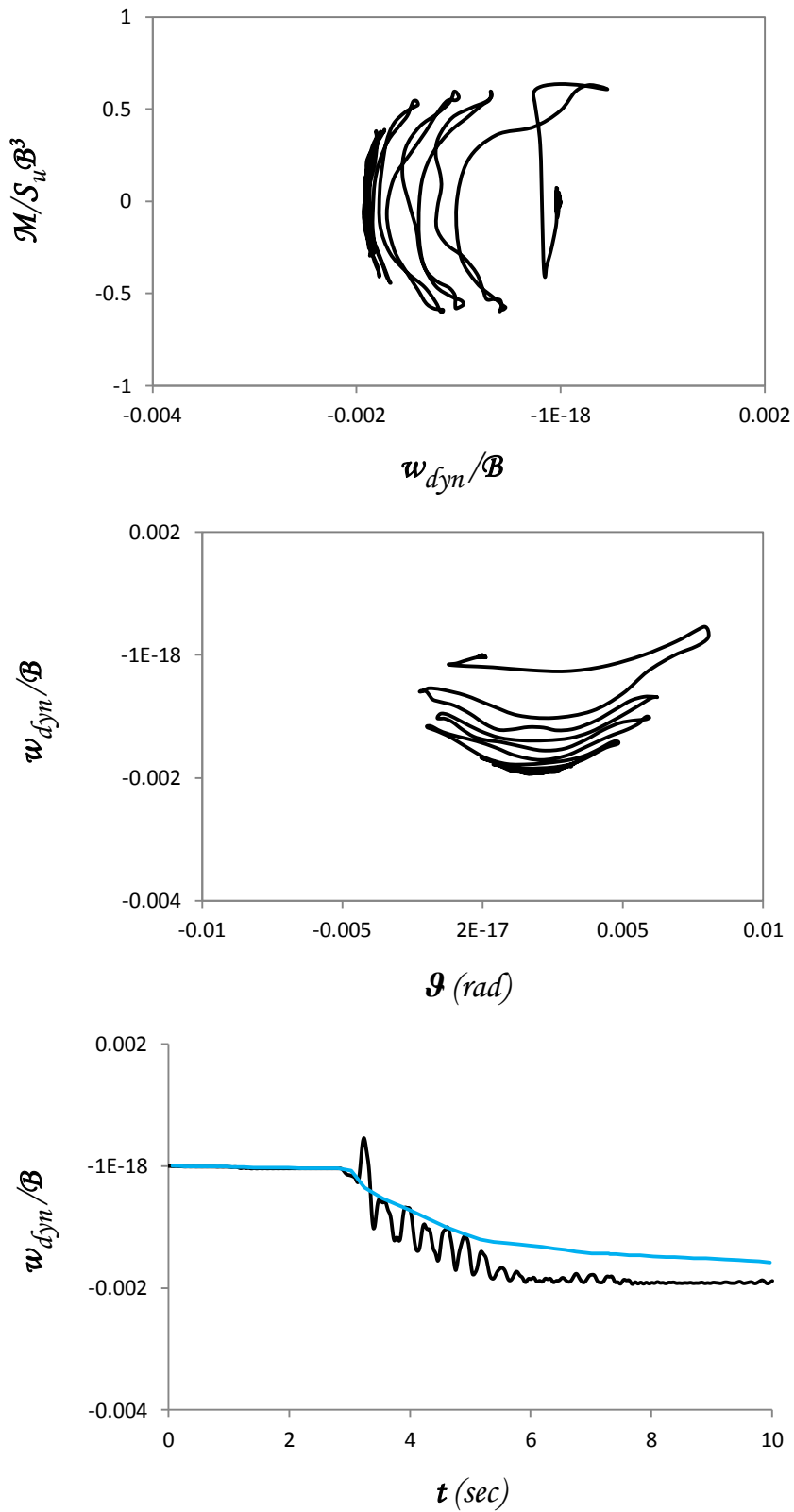
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.19α Πύργος 1993. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Πύργος 1993

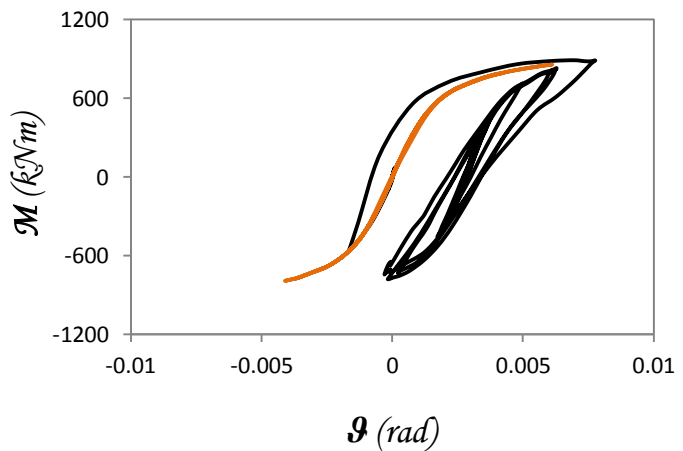
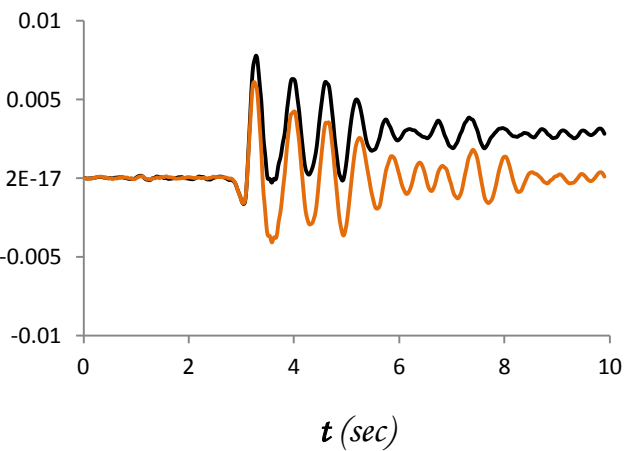
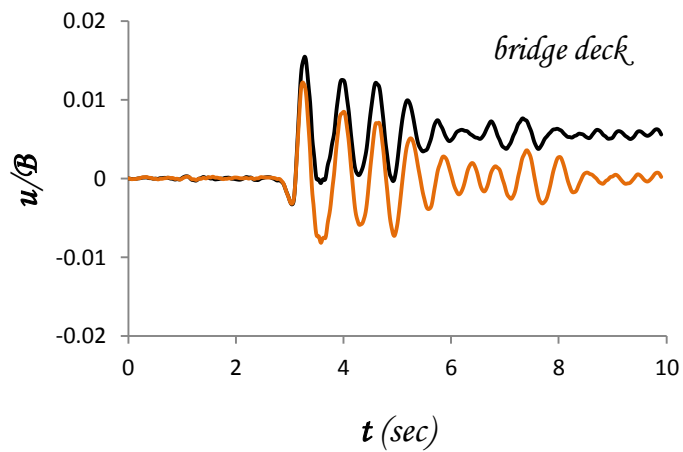
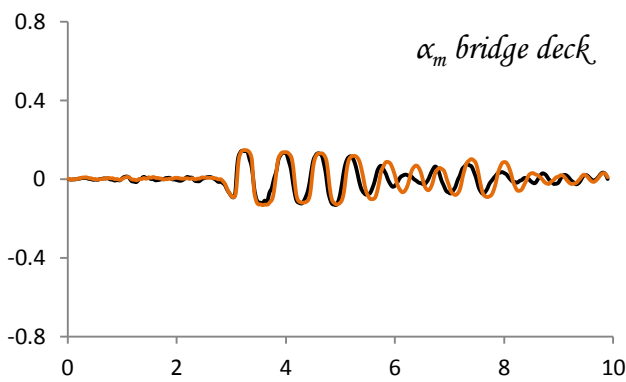
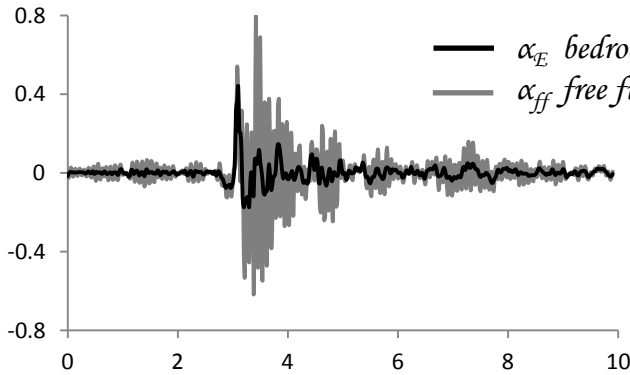
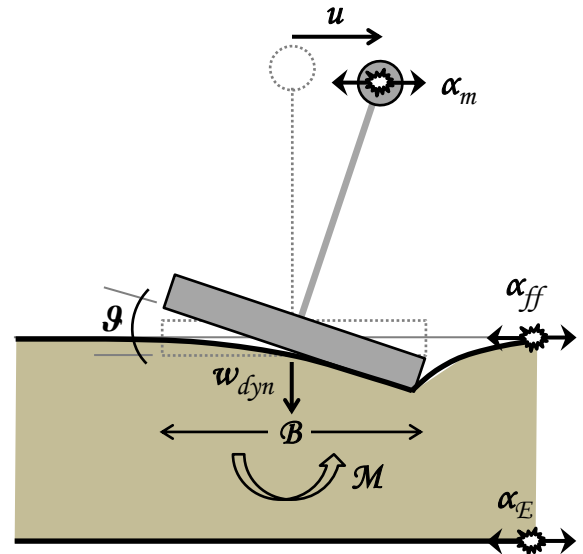
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.19β Πύργος 1993.** Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Πύργος 1993

$$F_S = 2.5$$

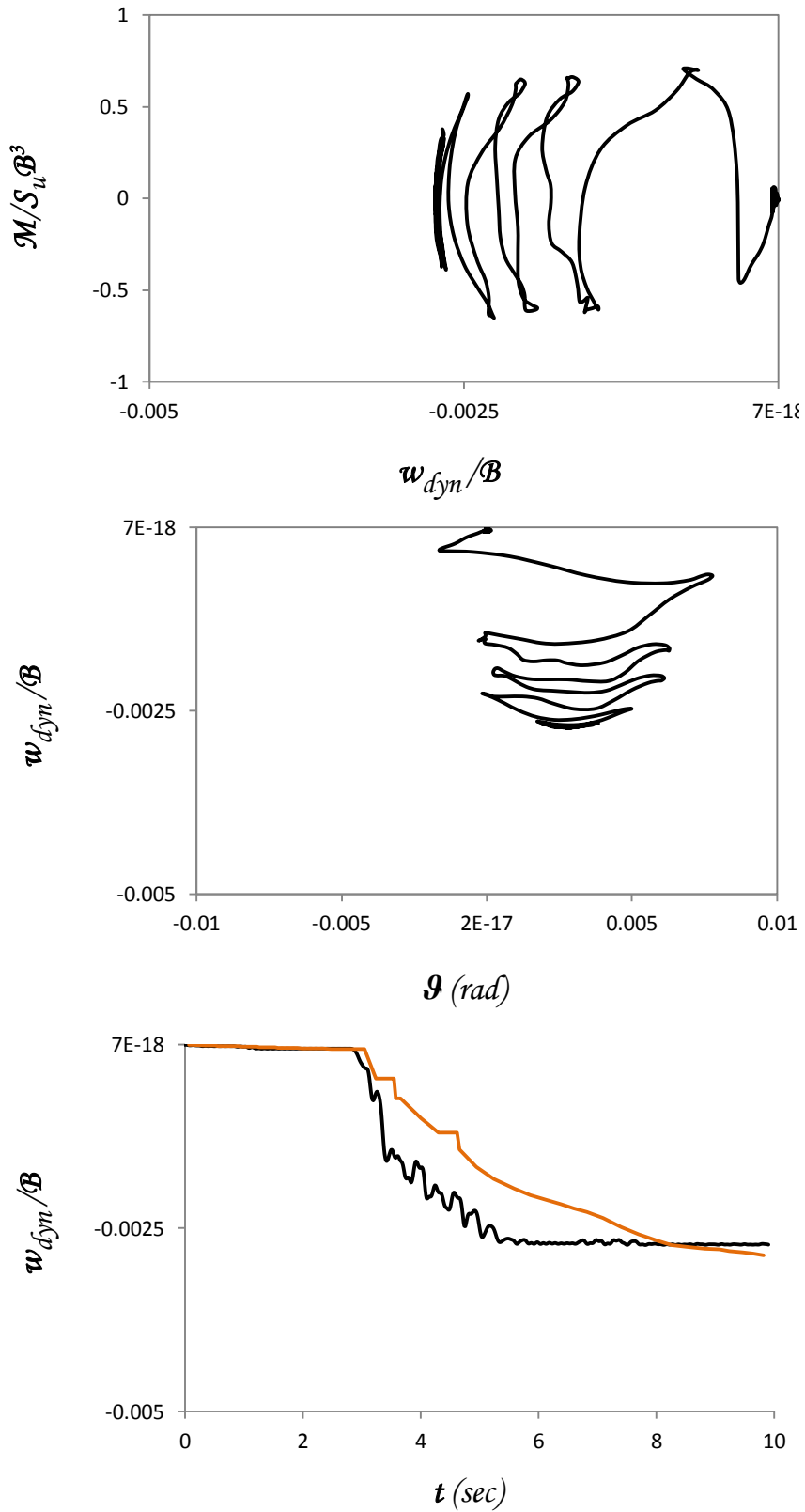


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.20α Πύργος 1993. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Πύργος 1993

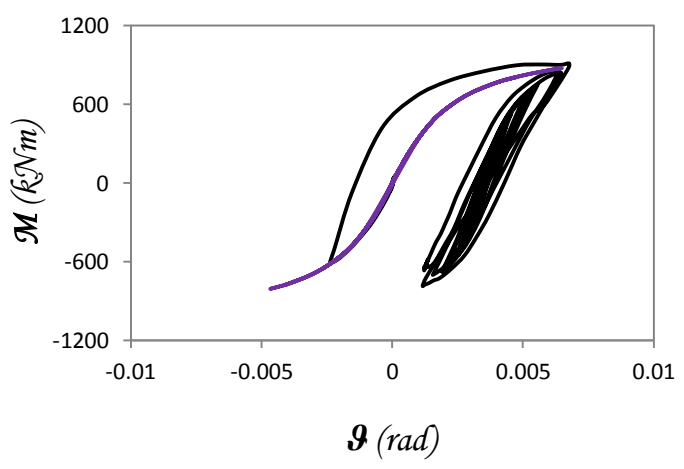
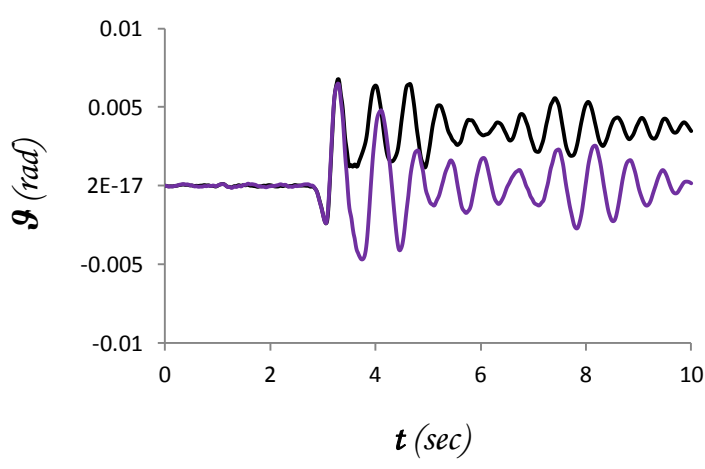
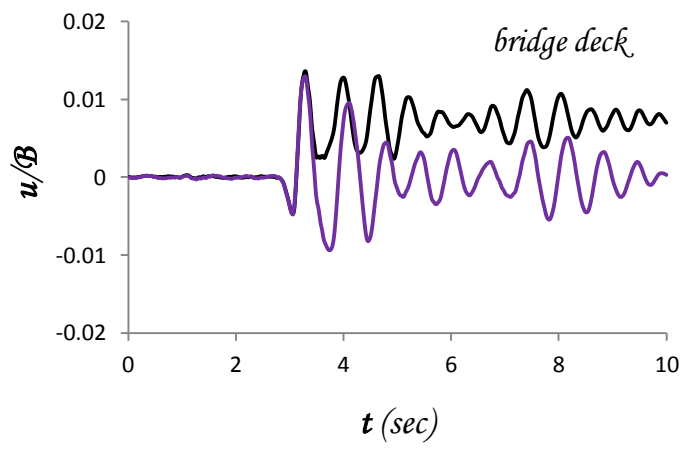
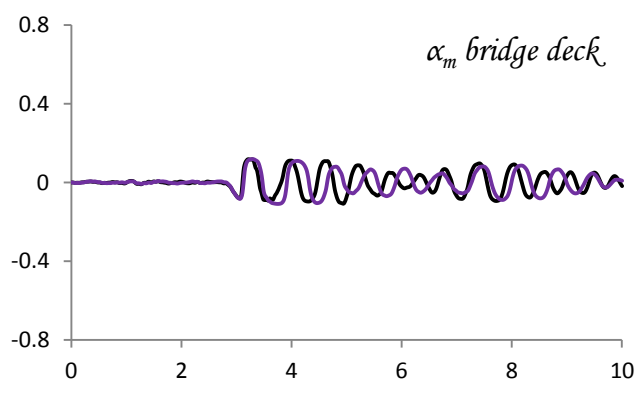
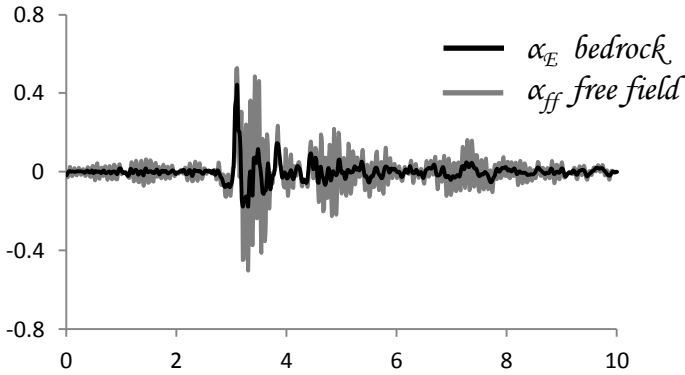
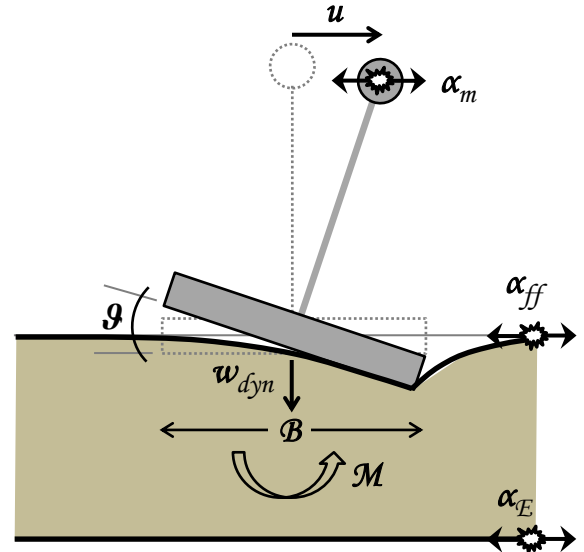
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.20β Πύργος 1993.** Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Πύργος 1993

$$F_S = 2$$

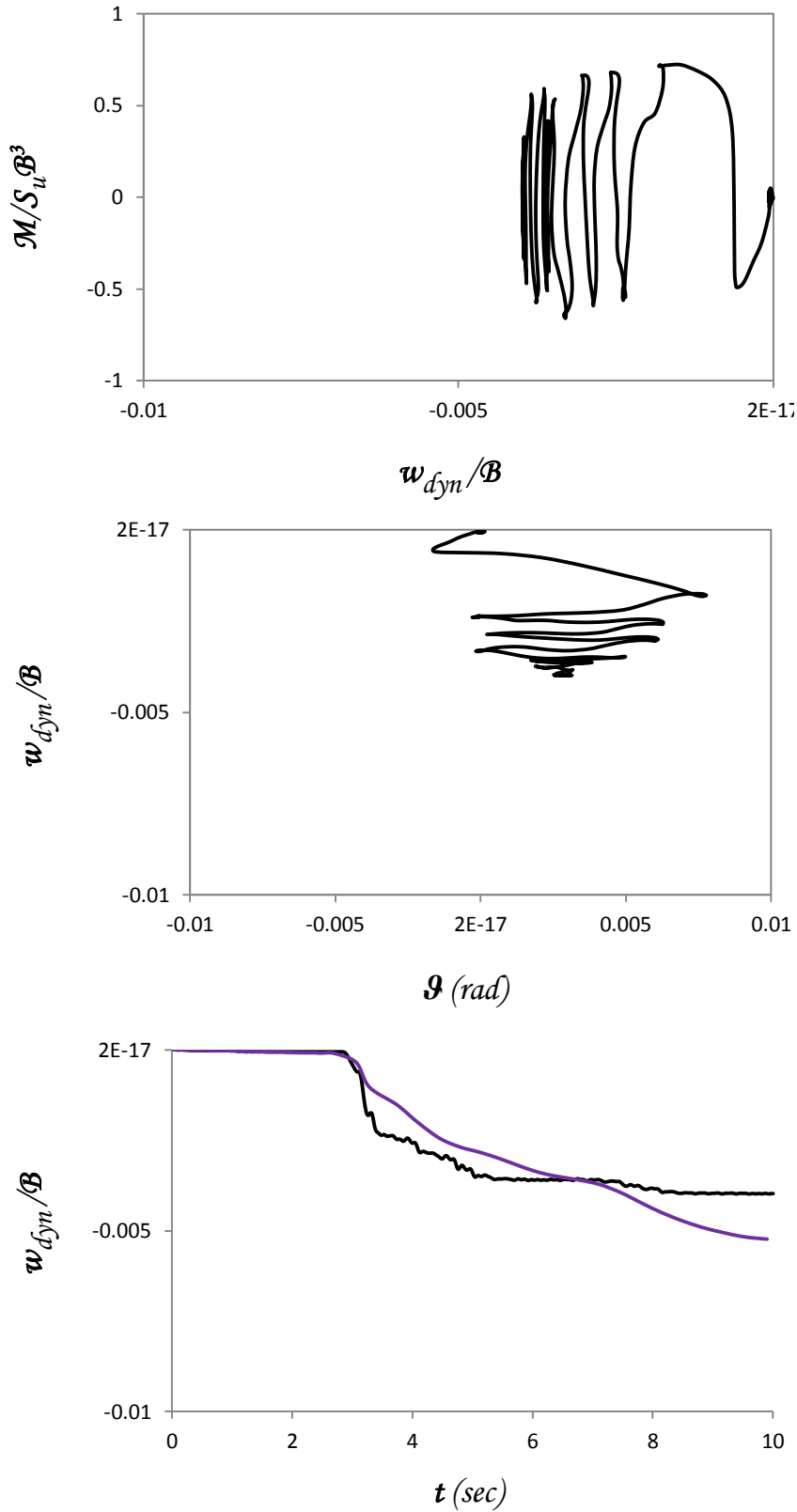


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.21α Πύργος 1993. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Πύργος 1993

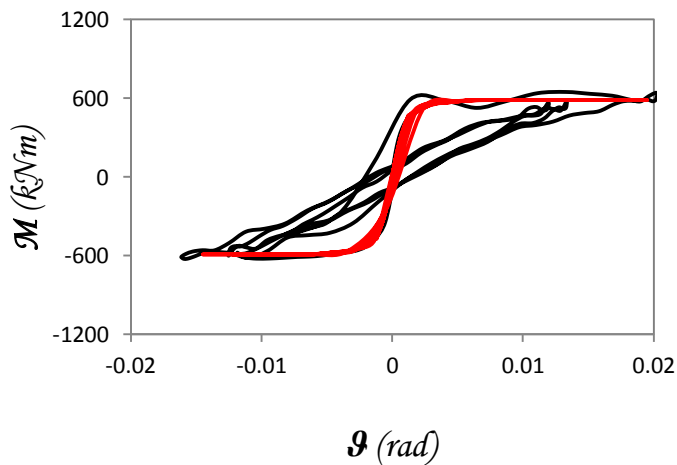
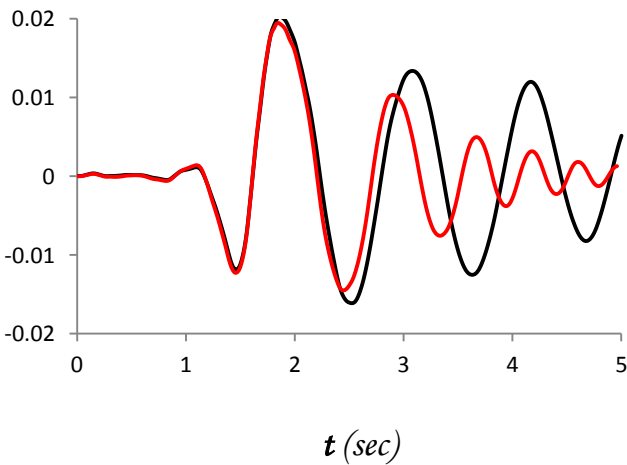
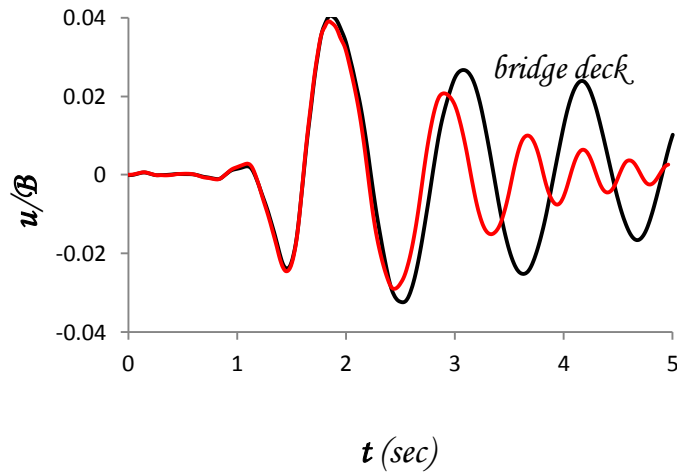
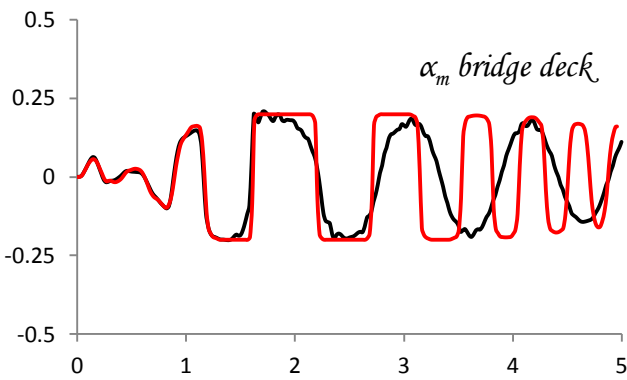
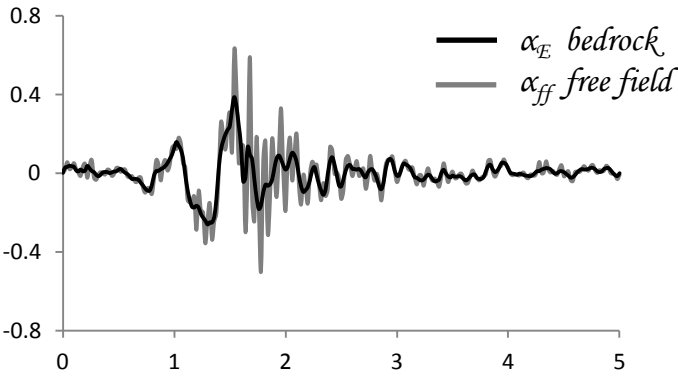
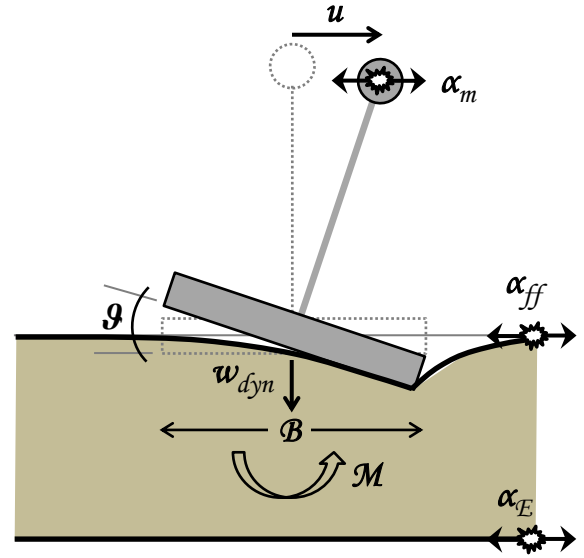
$$F_S = 2$$



**Σχήμα 4.21β Πύργος 1993.** Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Αίγιο 1995

$$F_S = 5$$

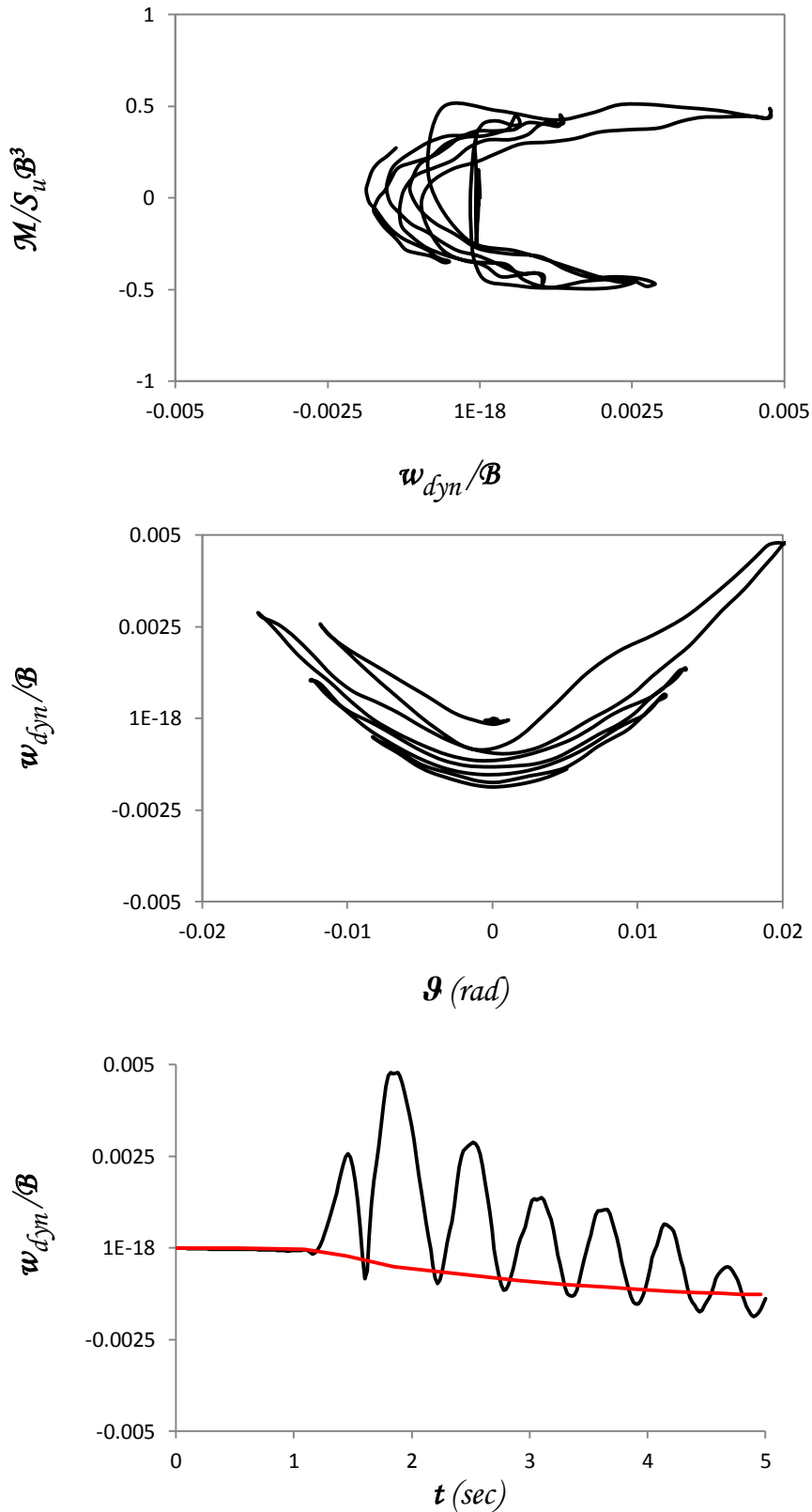


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.22α Αίγιο 1995. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

*Αίγιο 1995*

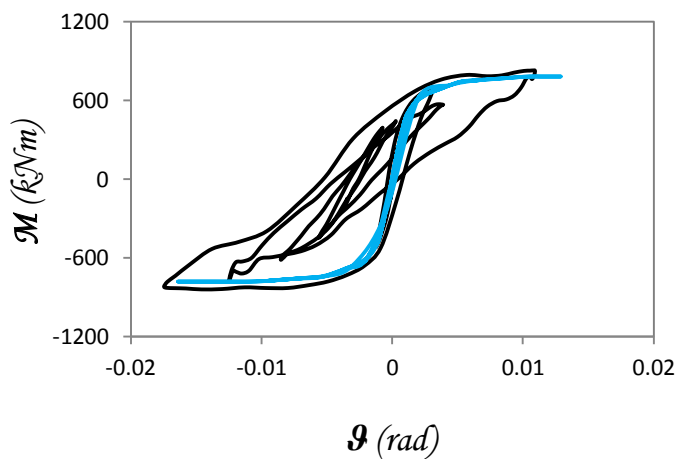
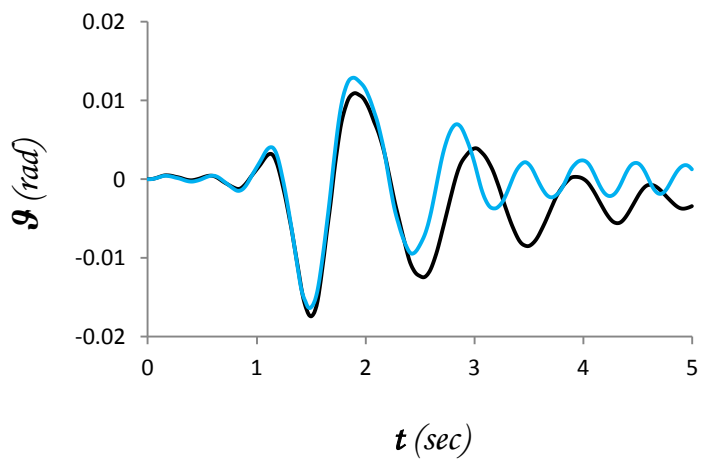
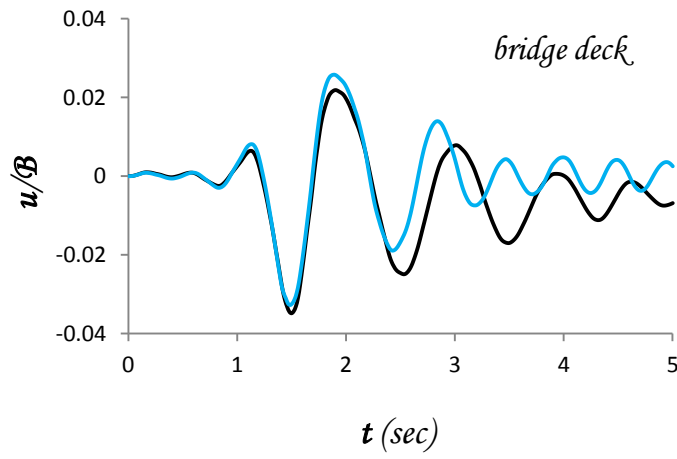
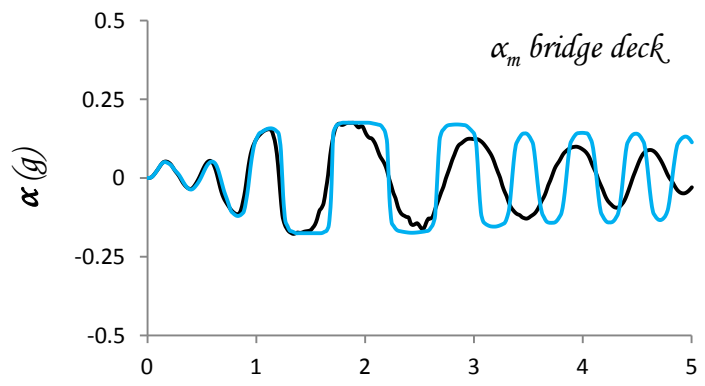
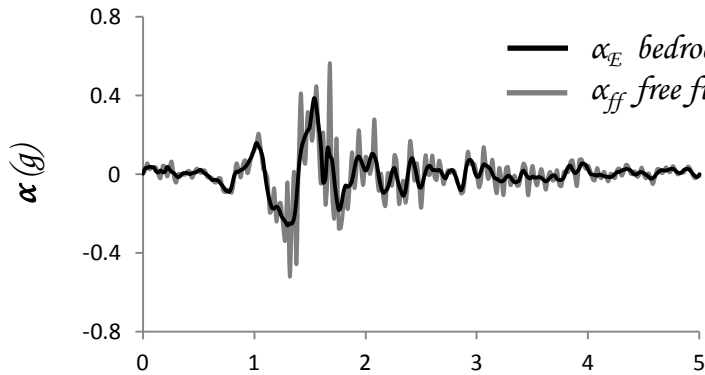
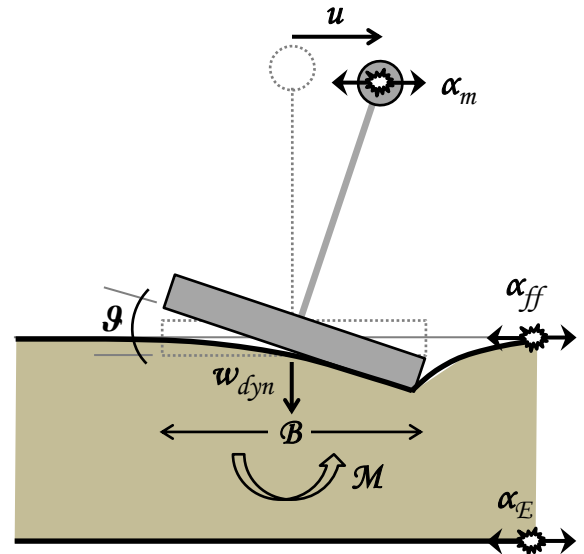
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.22β** *Αίγιο 1995*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Αίγιο 1995

$$F_S = 3.3$$



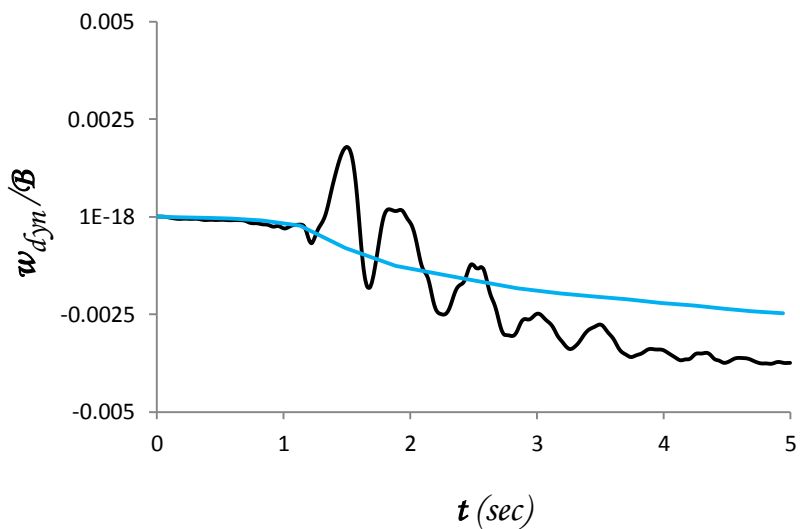
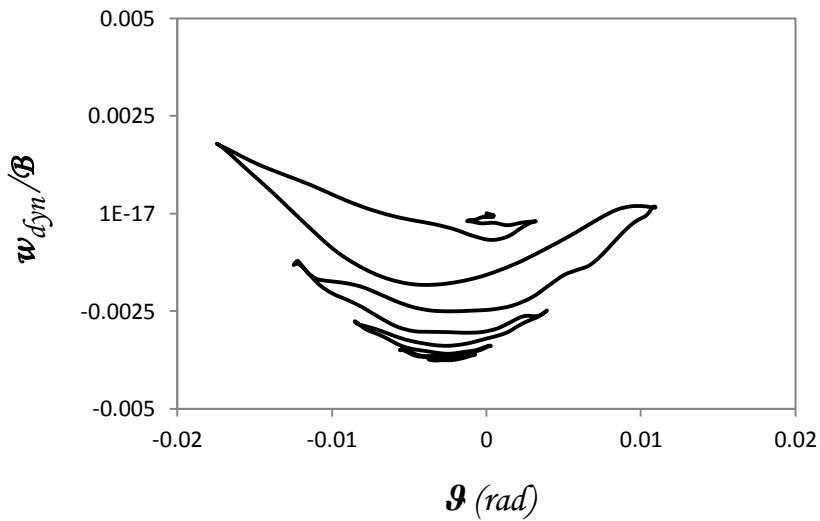
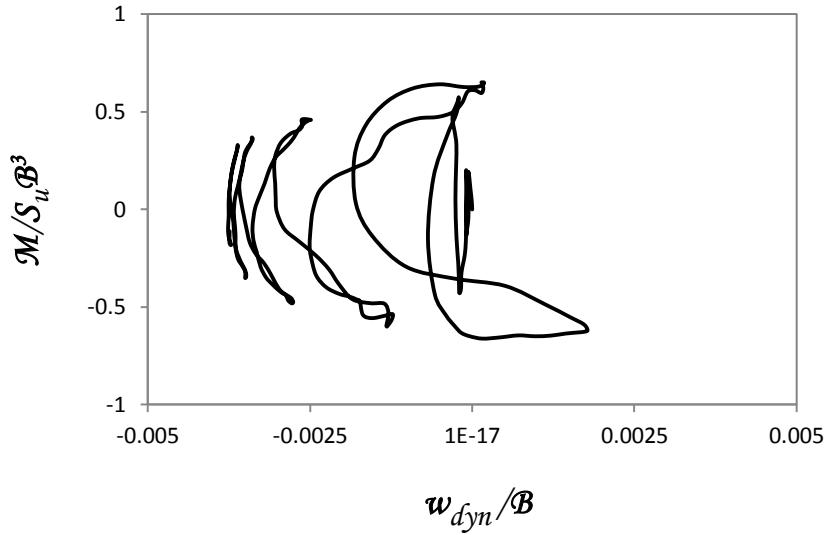
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.23α Αίγιο 1995. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Αίγιο 1995

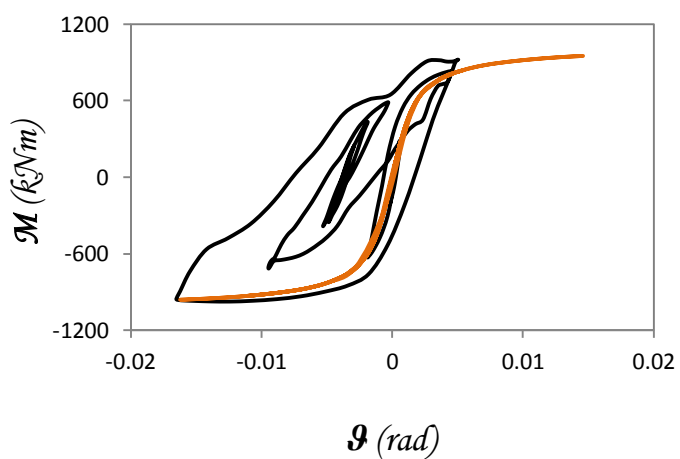
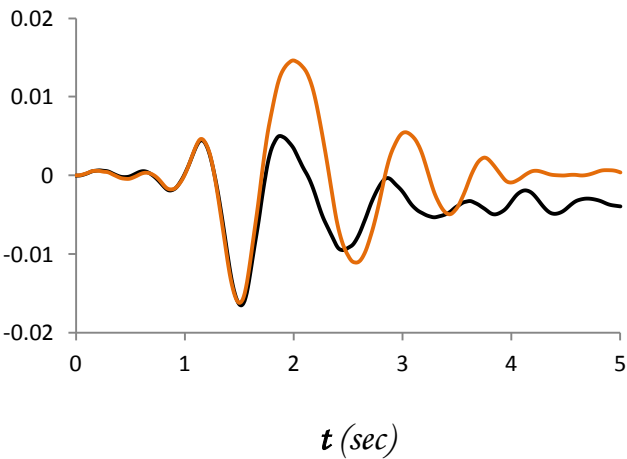
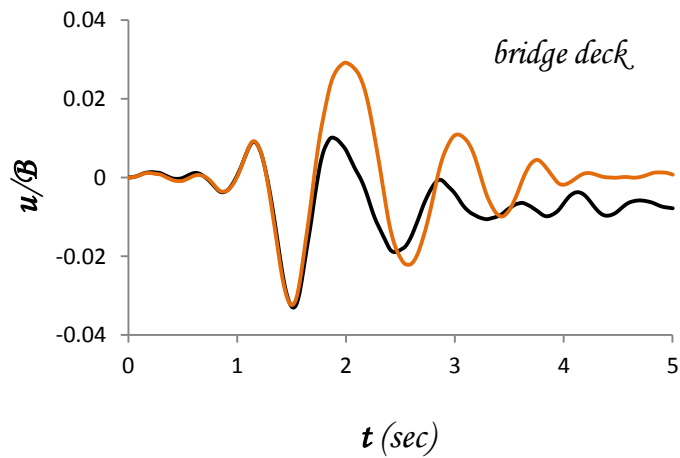
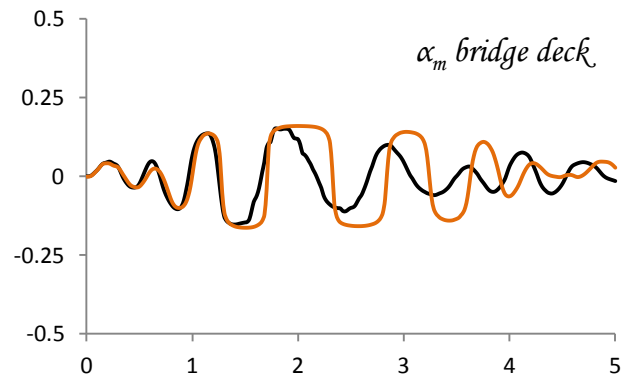
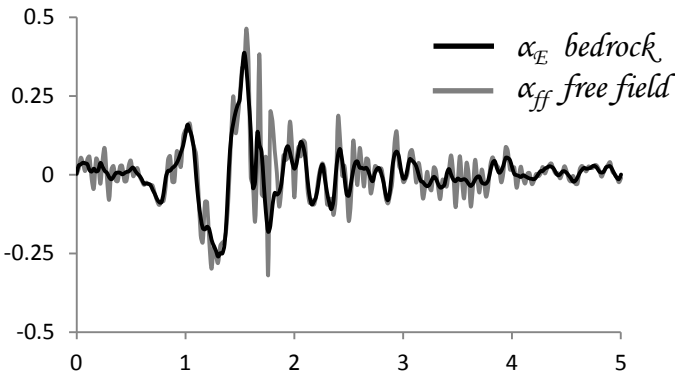
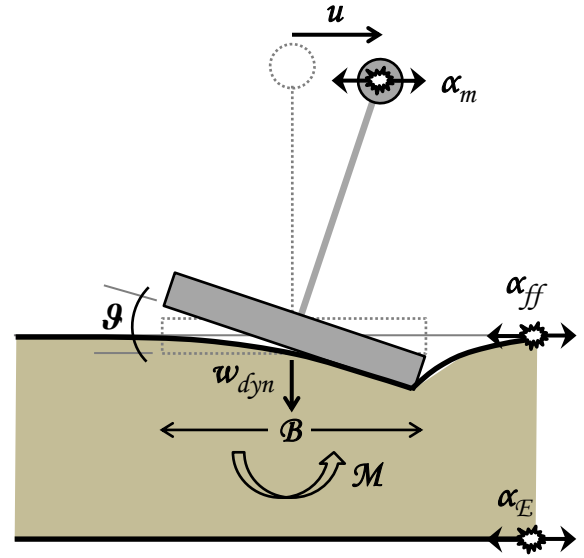
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.23β** Αίγιο 1995. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S=3.3$ .

*Αίγιο 1995*

$$F_S = 2.5$$

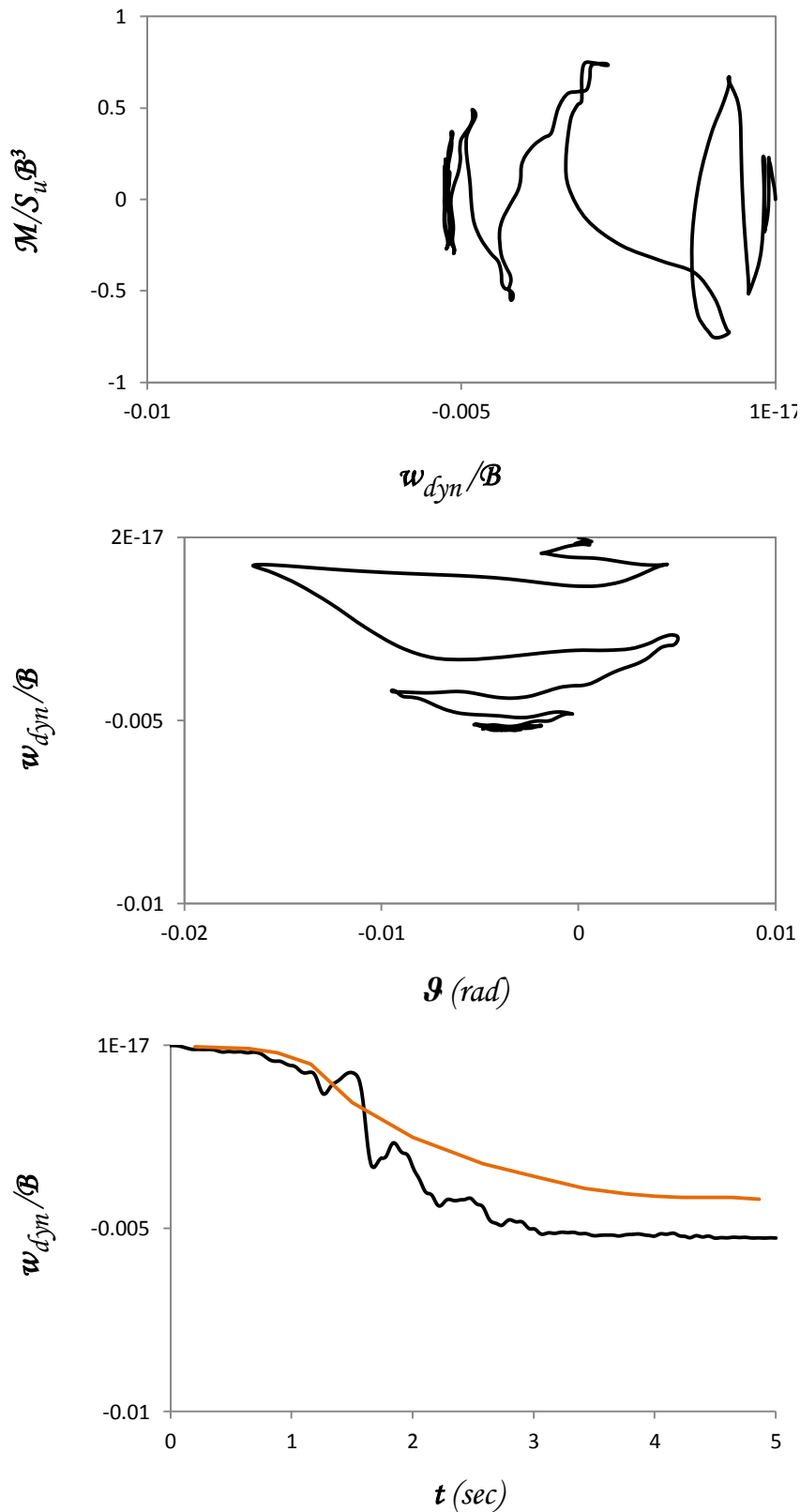


— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.24α** *Αίγιο 1995*. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

*Αίγιο 1995*

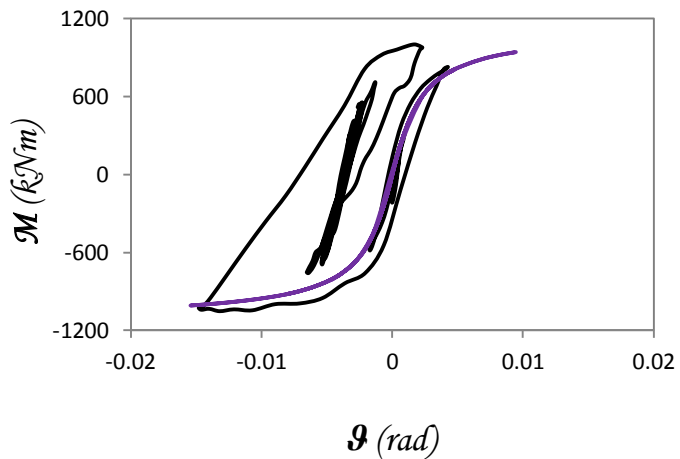
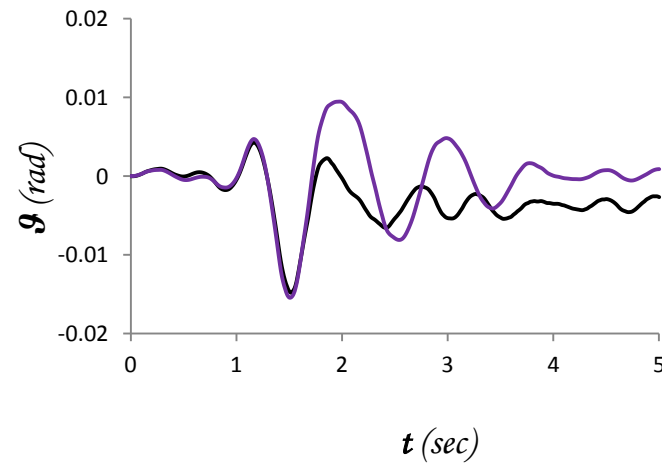
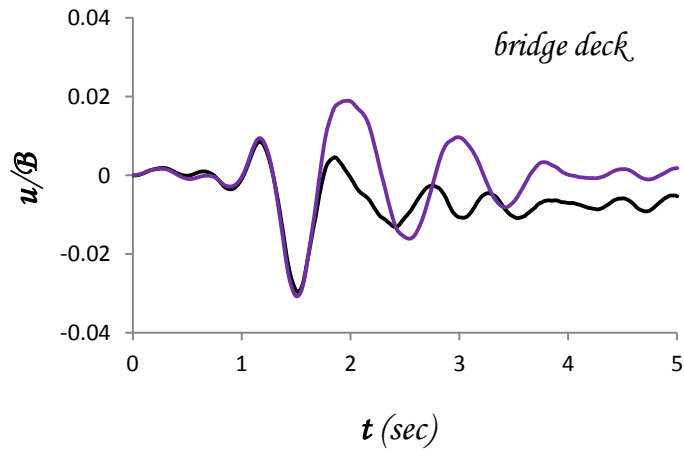
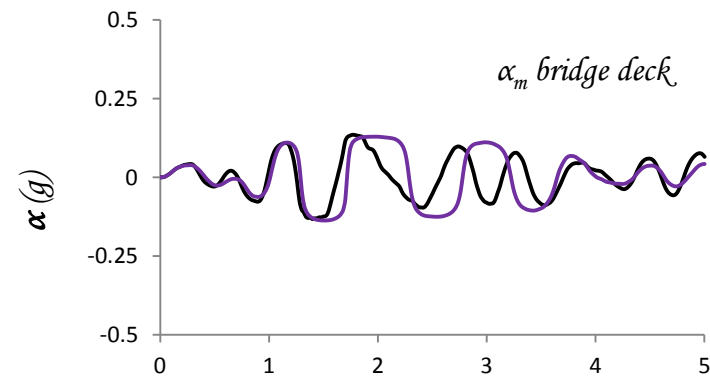
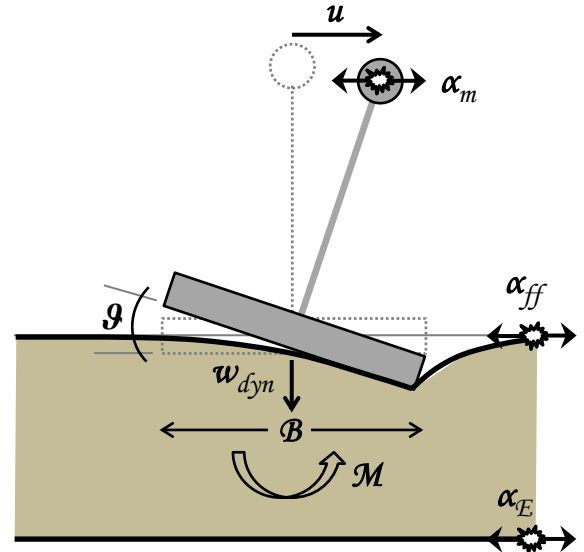
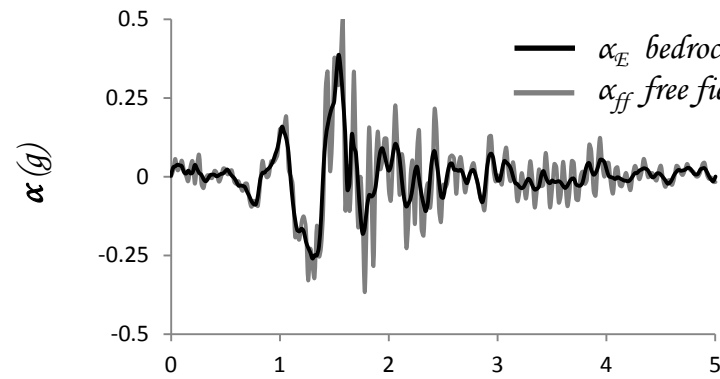
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.24β** *Αίγιο 1995*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

*Αίγιο 1995*

$$F_S = 2$$

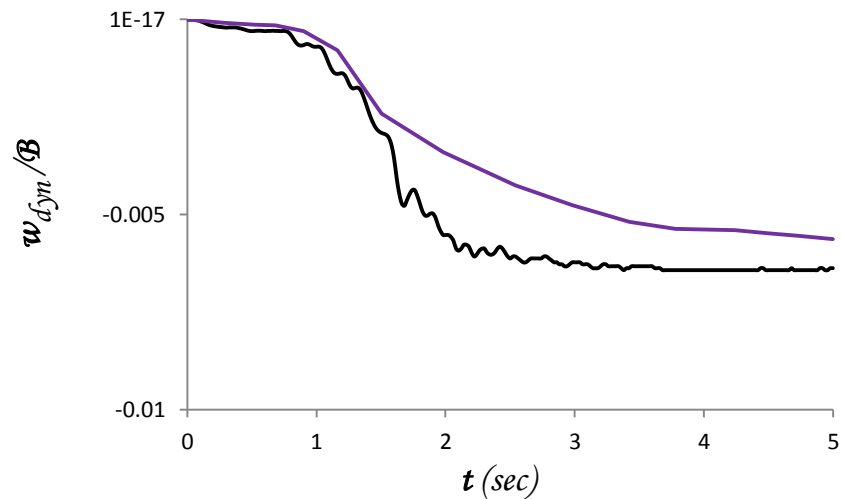
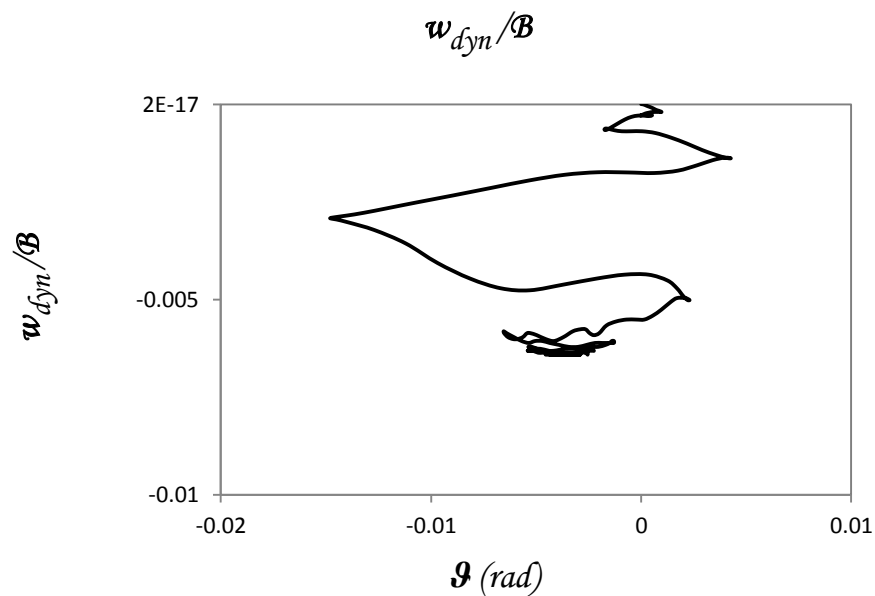
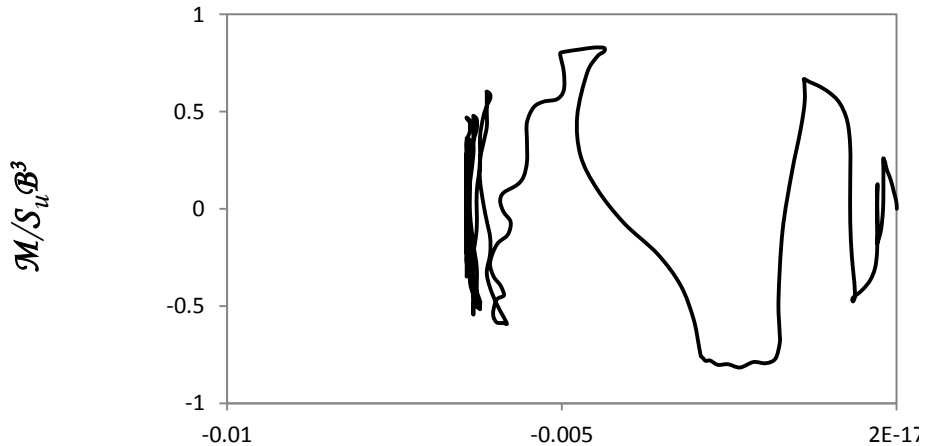


— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.25α** *Αίγιο 1995*. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Αίγιο 1995

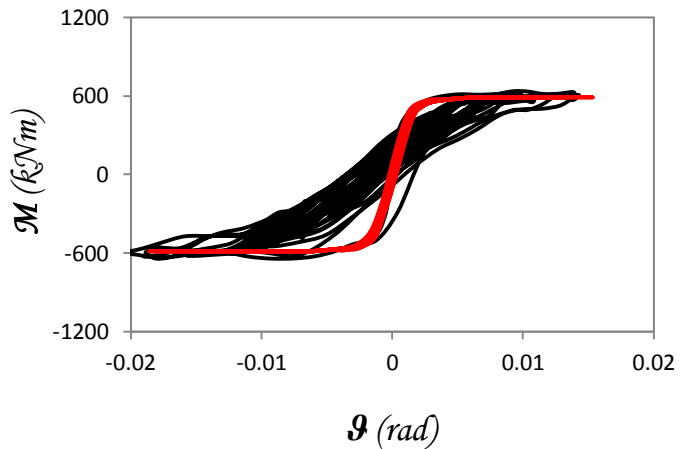
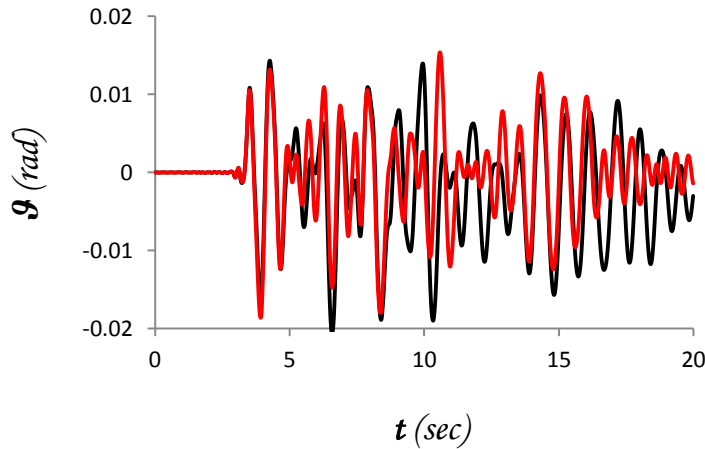
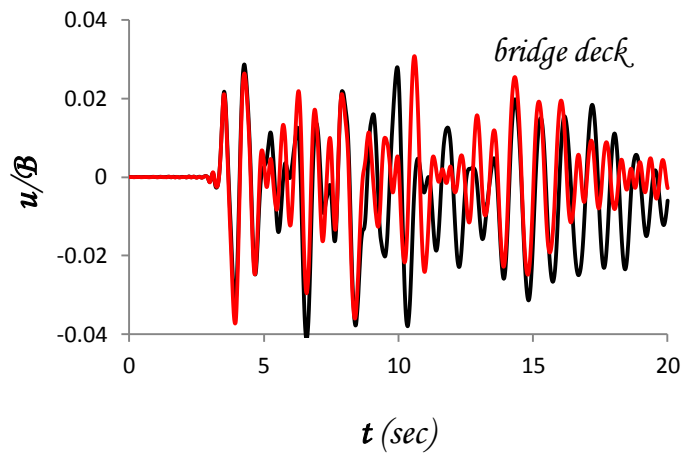
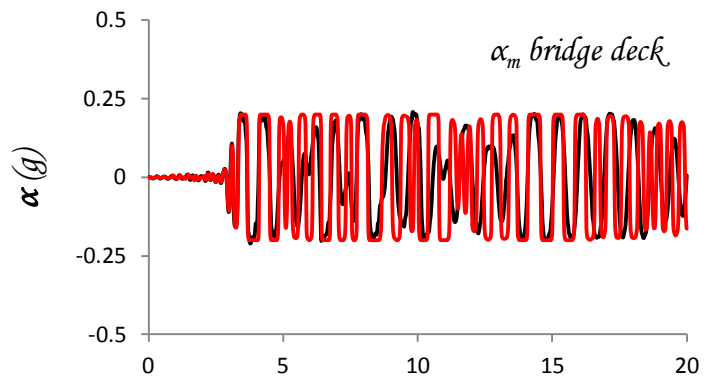
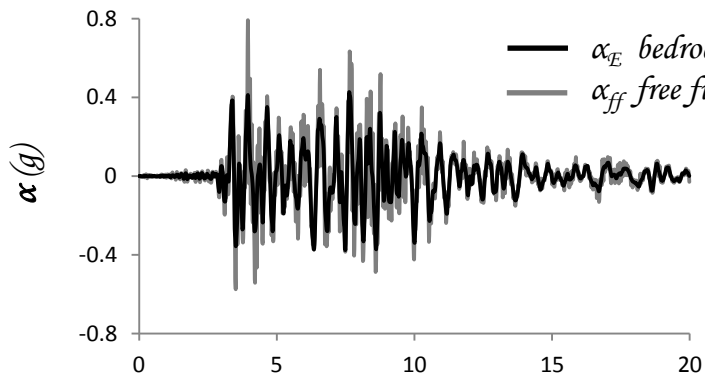
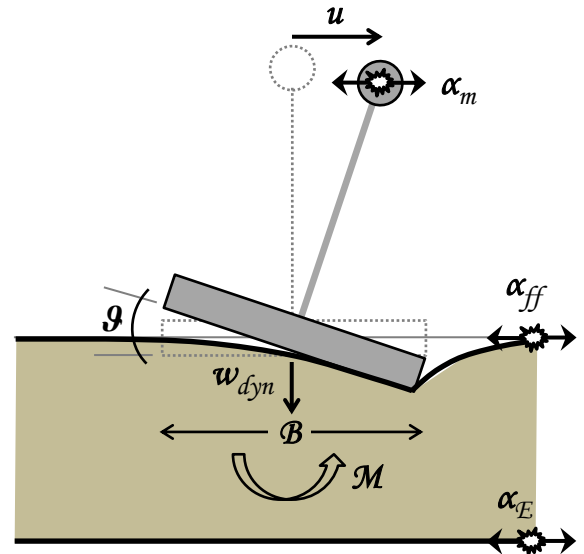
$$F_S = 2$$



**Σχήμα 4.25β** Αίγιο 1995. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Λευκάδα 2003

$$F_S = 5$$

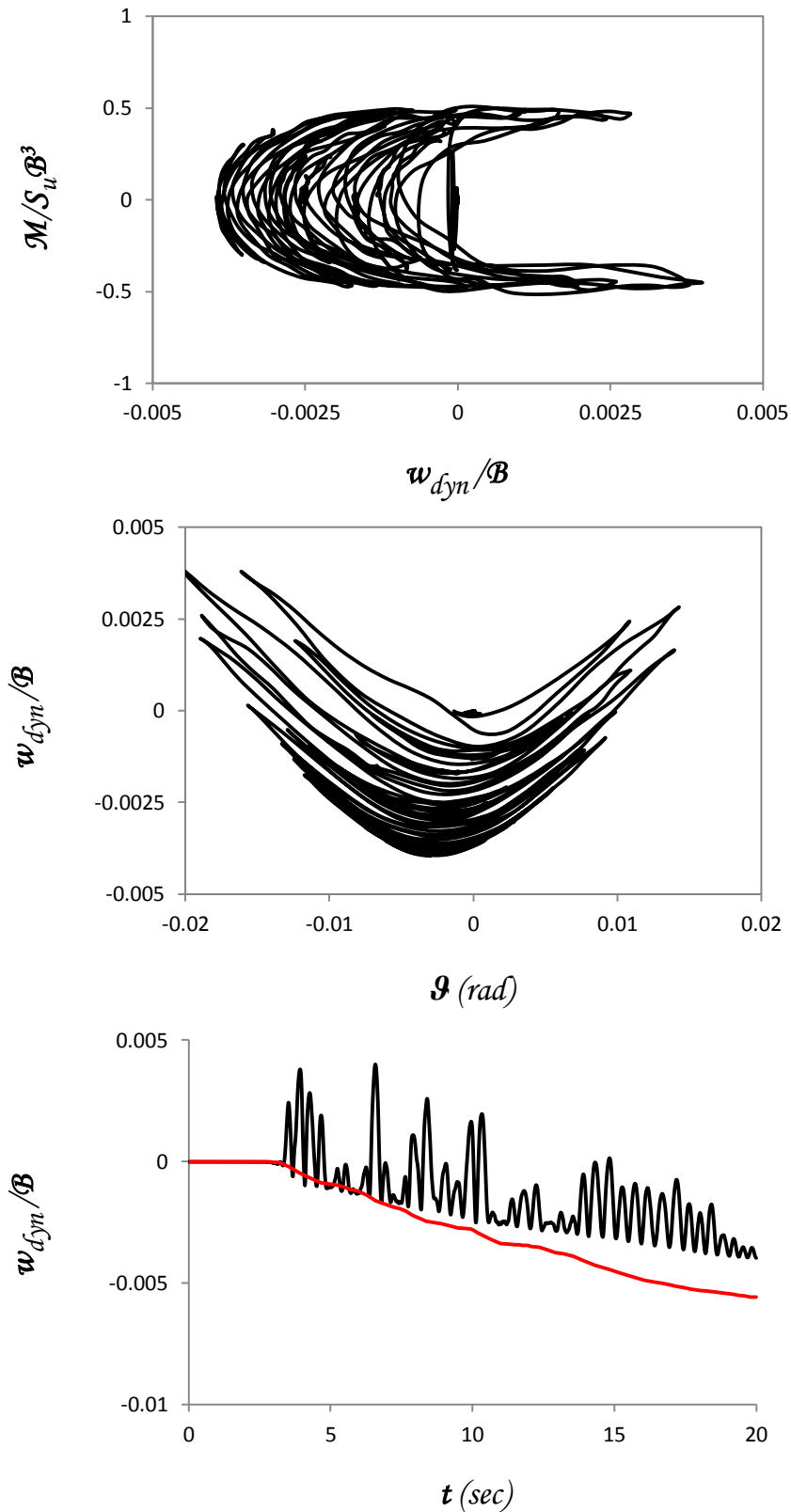


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.26α Λευκάδα 2003. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - \epsilon$ λατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Λευκάδα 2003

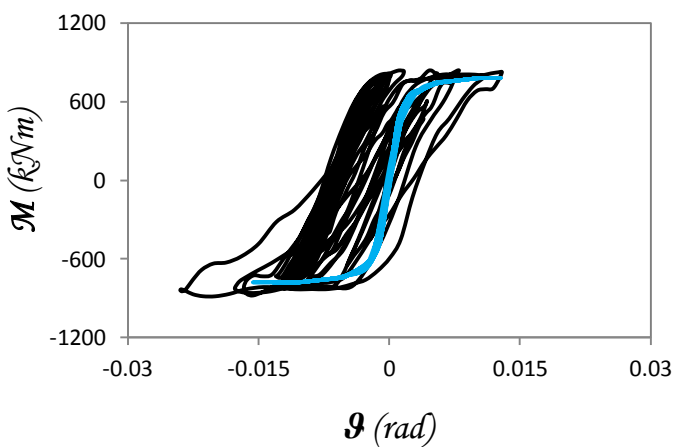
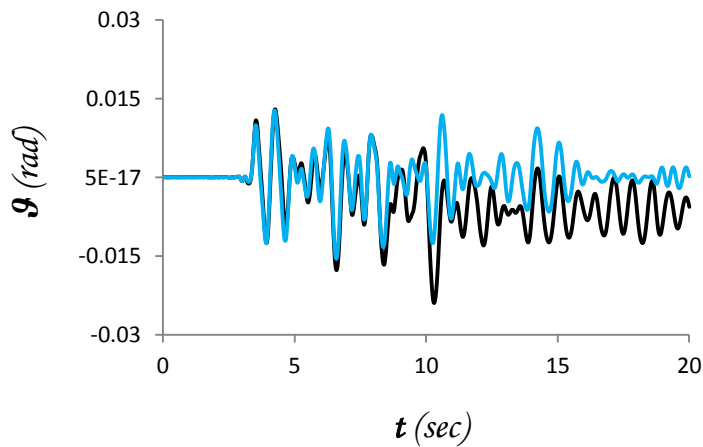
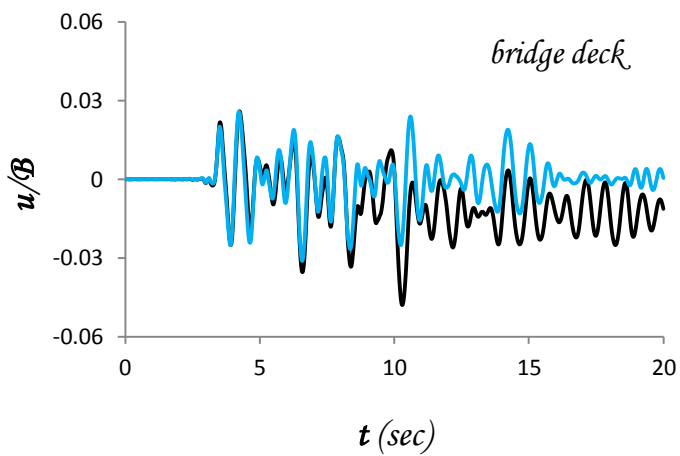
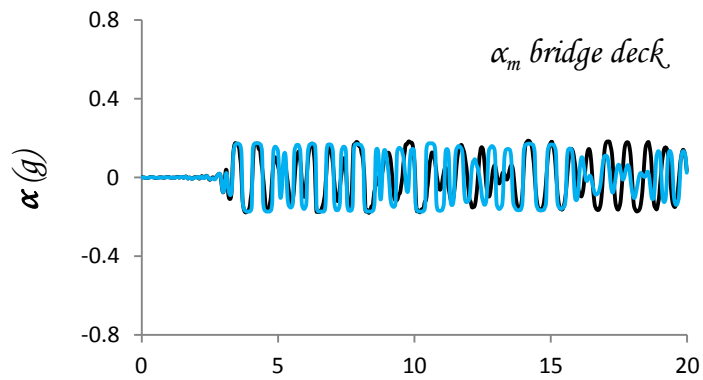
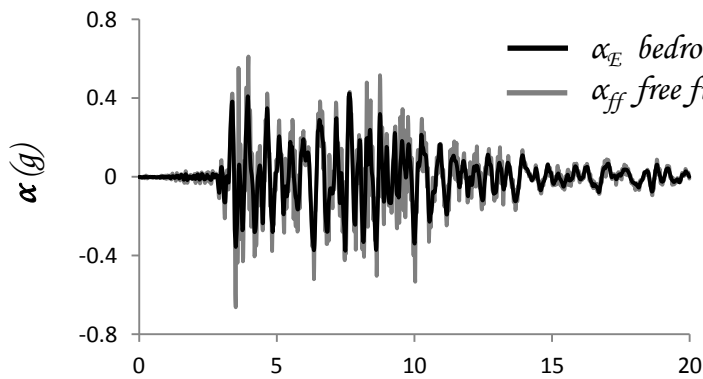
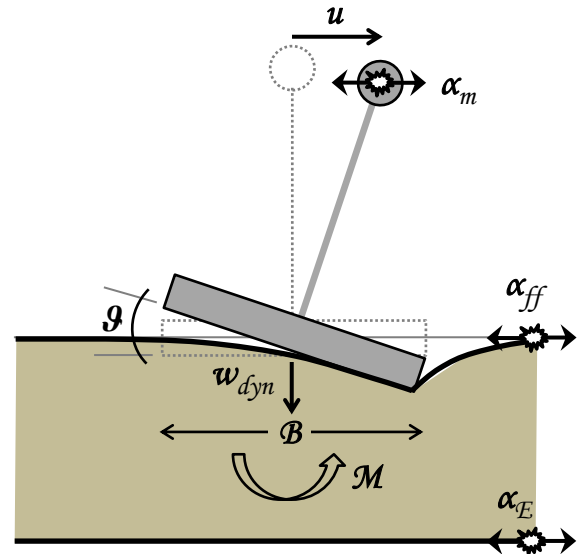
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.26β** Λευκάδα 2003. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Λευκάδα 2003

$$F_S = 3.3$$



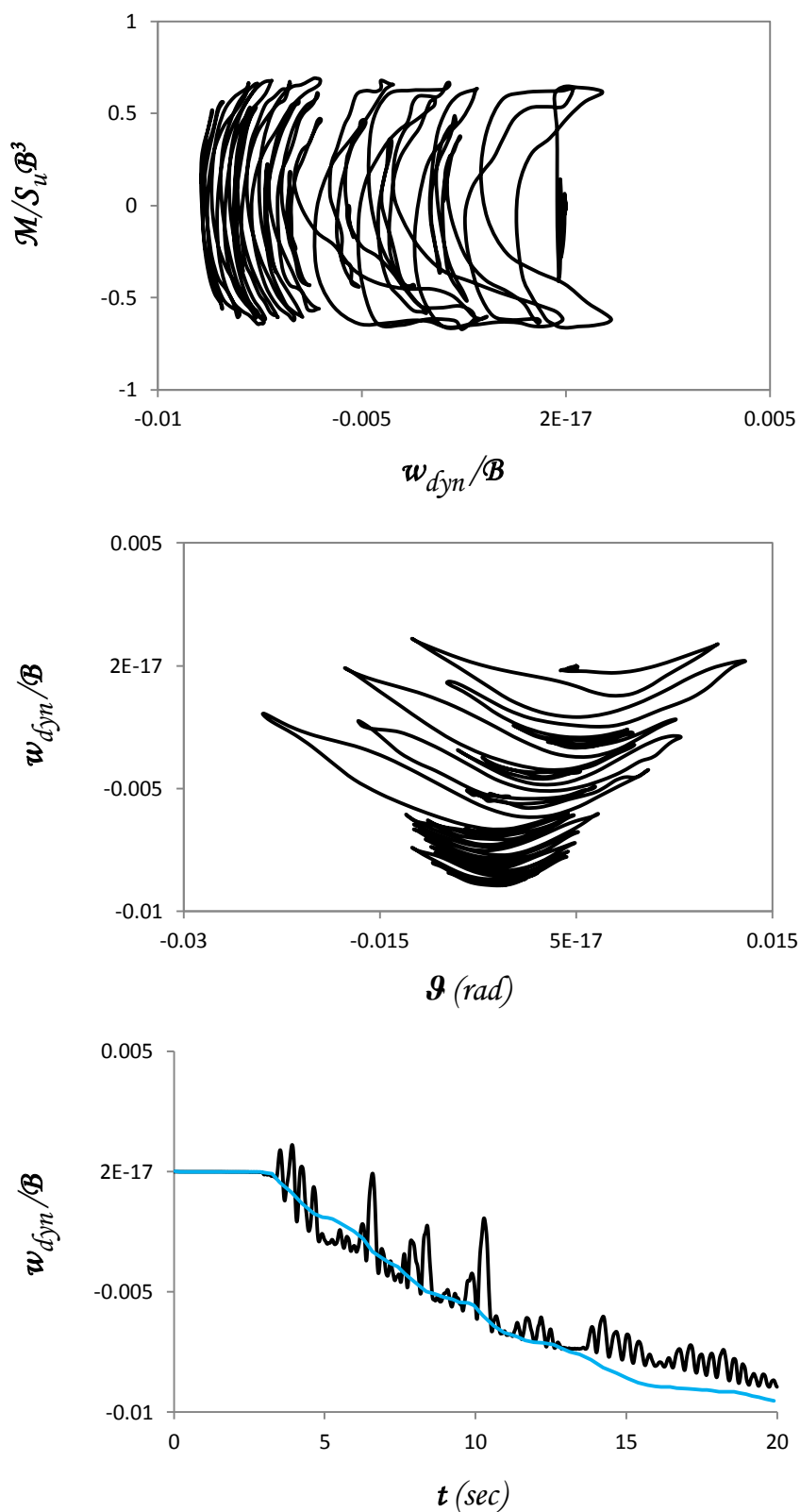
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.27α Λευκάδα 2003. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Λευκάδα 2003

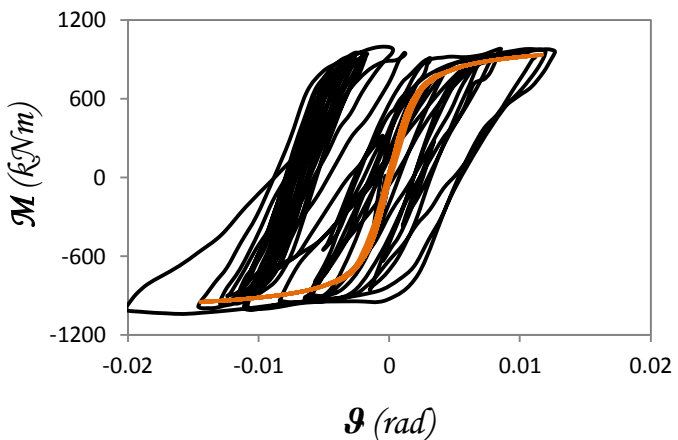
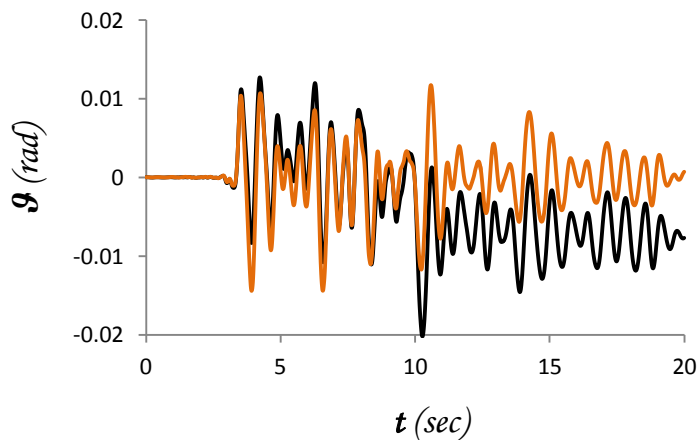
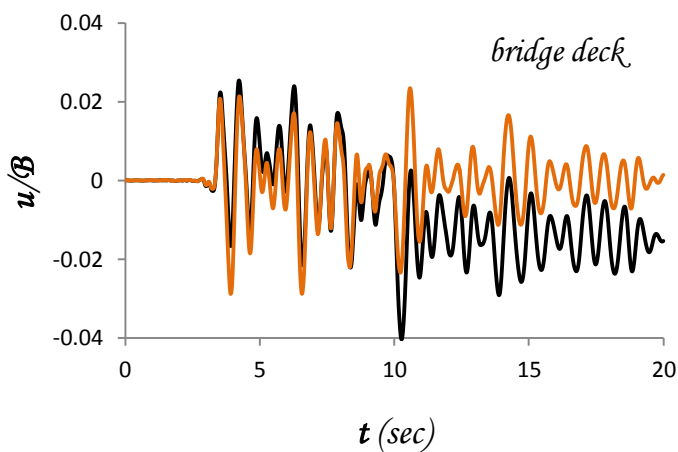
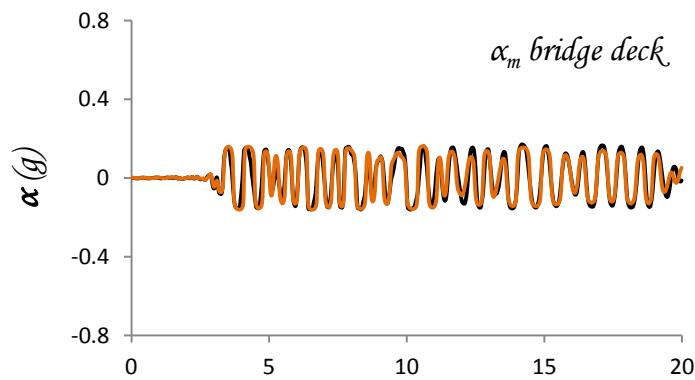
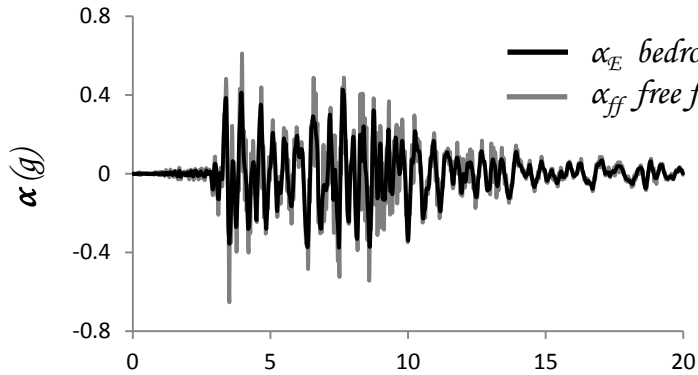
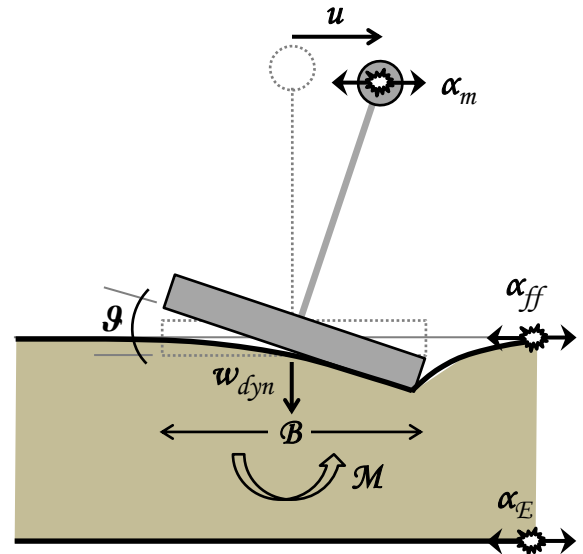
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.27β** Λευκάδα 2003. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Λευκάδα 2003

$$F_S = 2.5$$

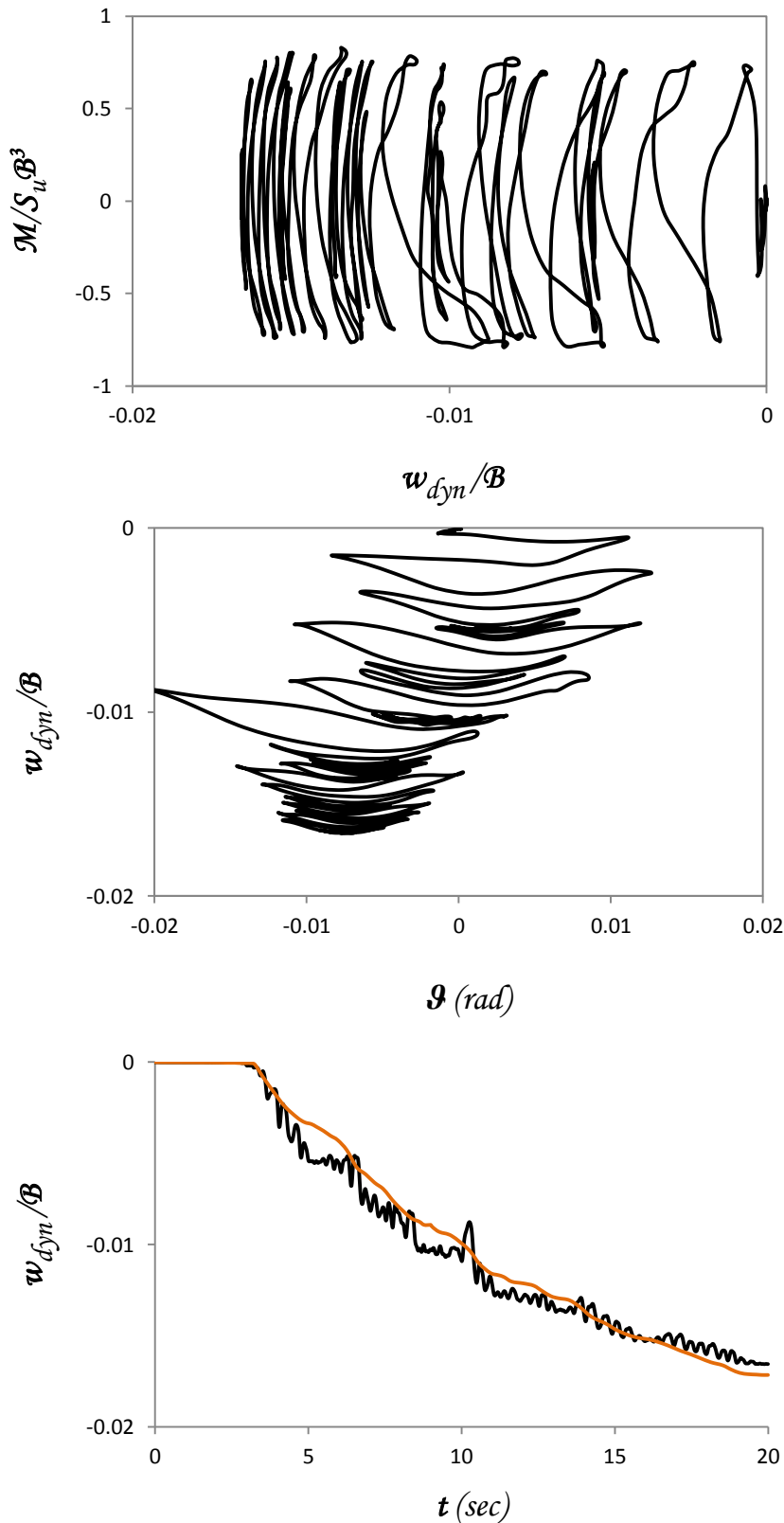


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.28α Λευκάδα 2003. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Λευκάδα 2003

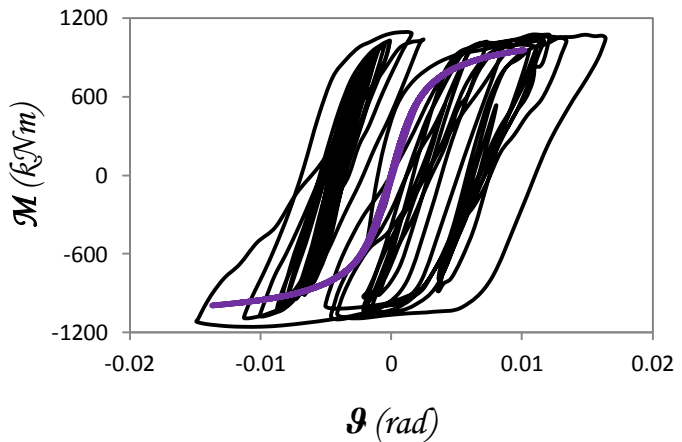
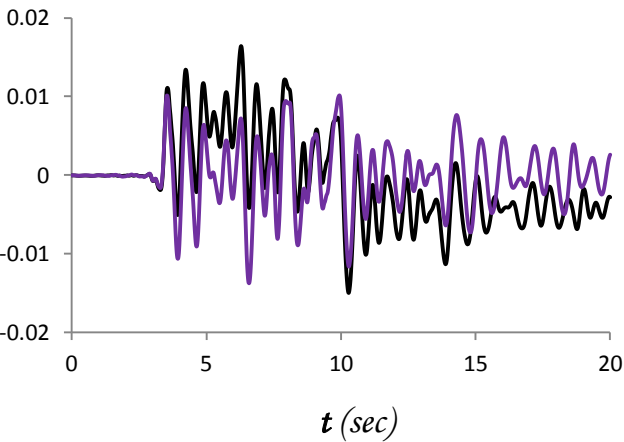
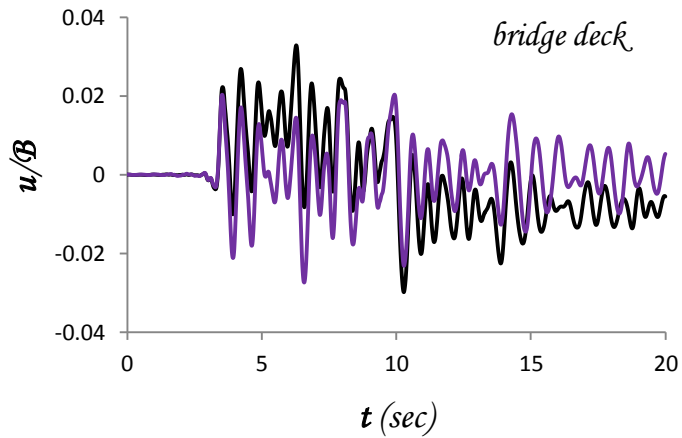
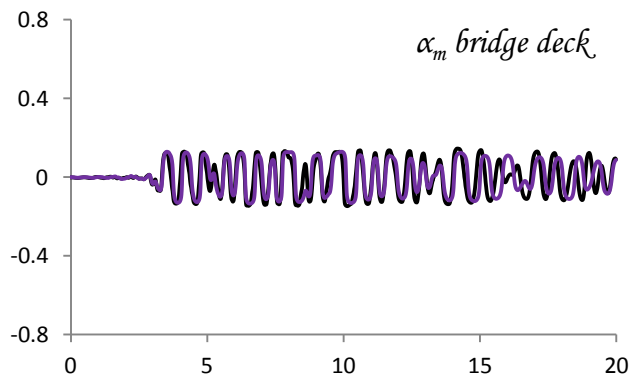
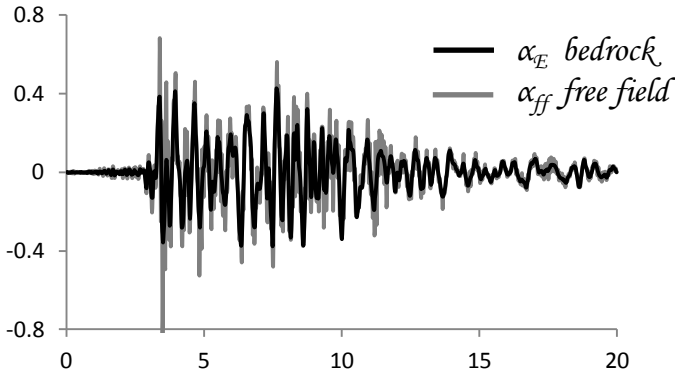
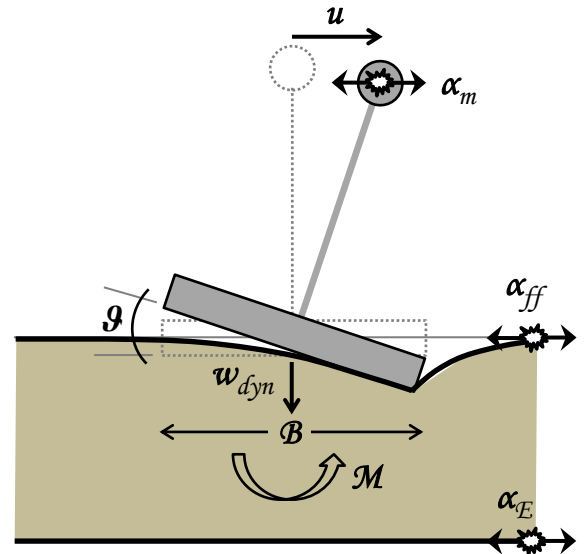
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.28β** Λευκάδα 2003. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Λευκάδα 2003

$$F_S = 2$$

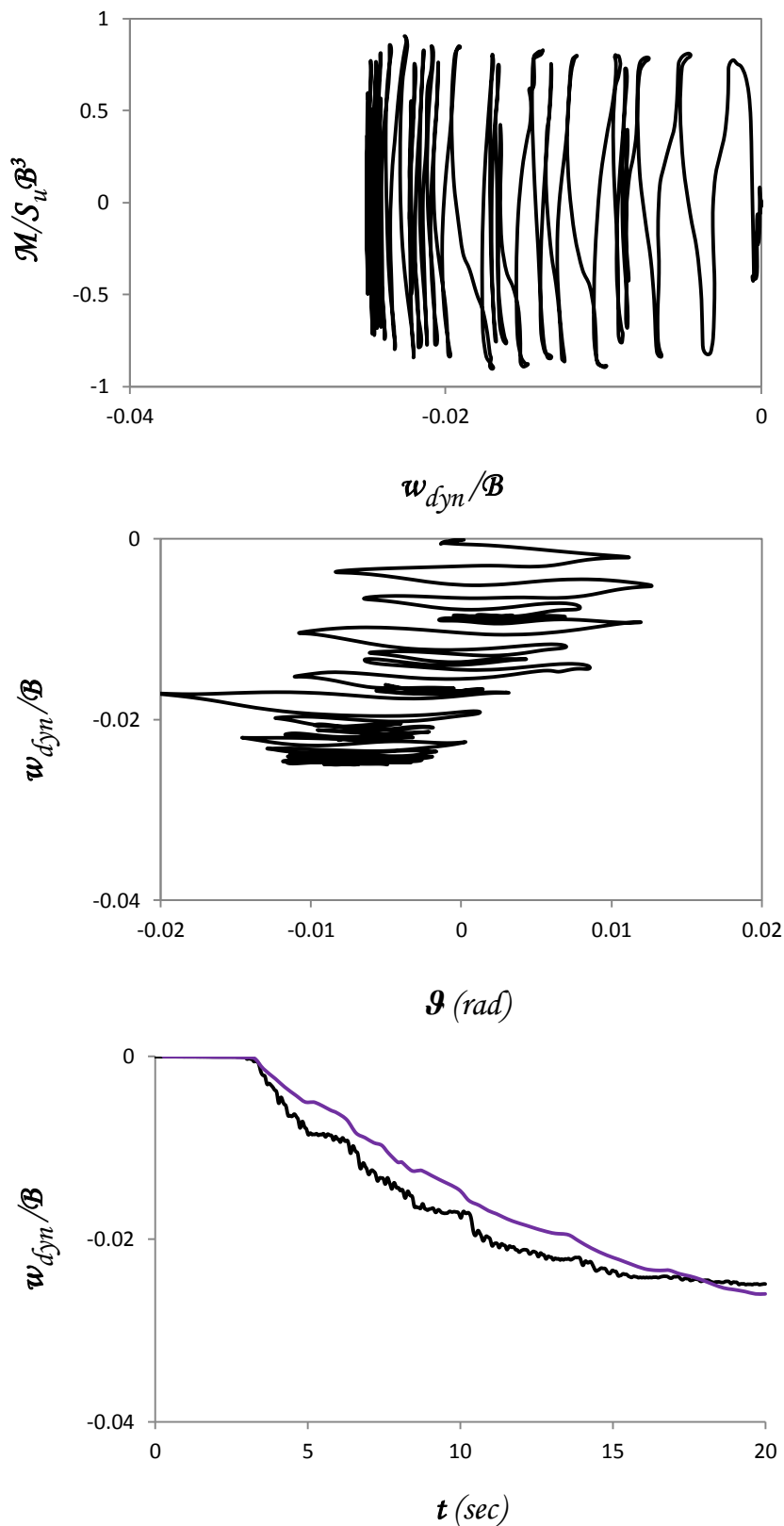


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.29α Λευκάδα 2003. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Λευκάδα 2003

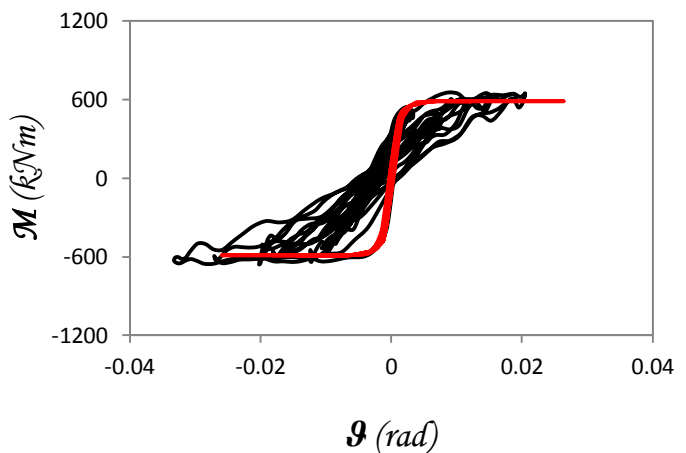
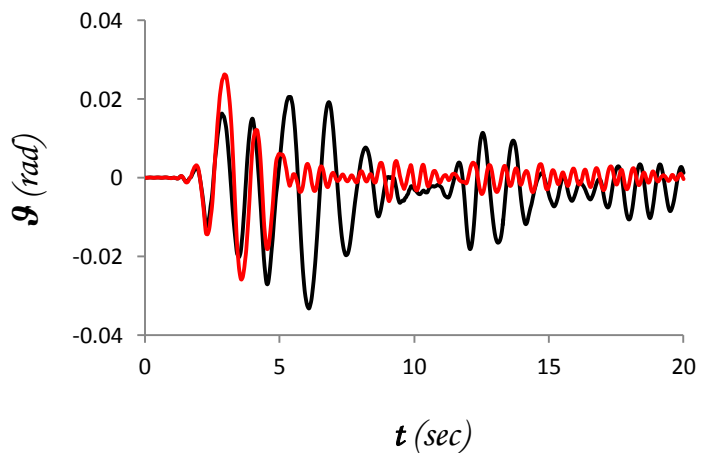
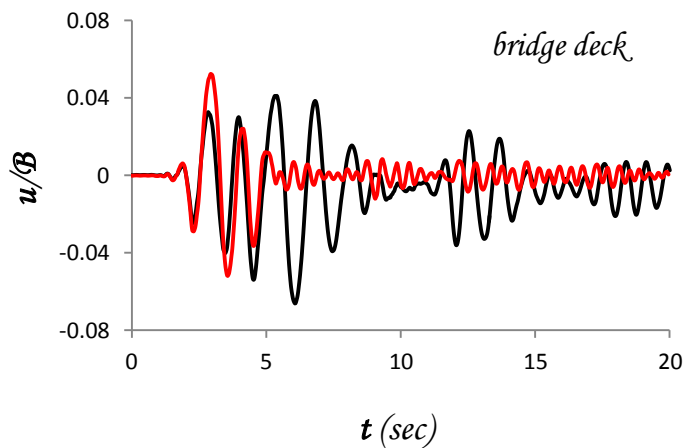
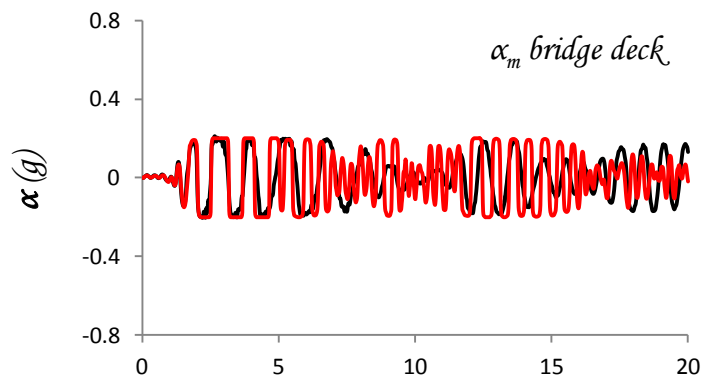
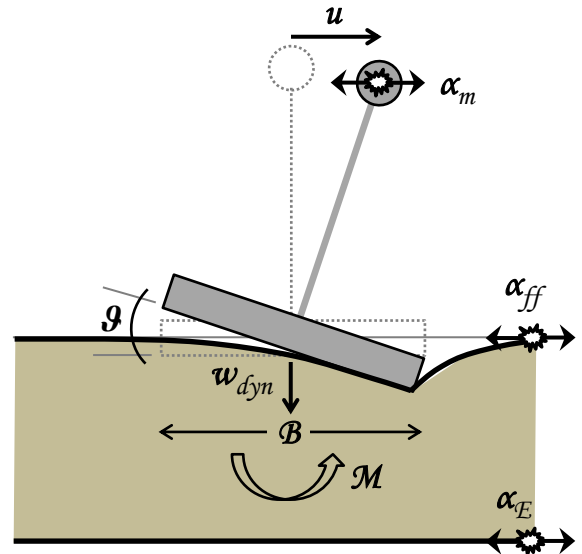
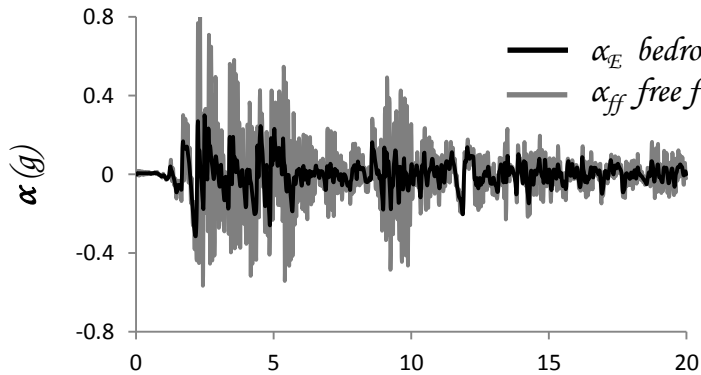
$$F_S = 2$$



**Σχήμα 4.29β** Λευκάδα 2003. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

*El Centro\_180 1940*

$F_S = 5$

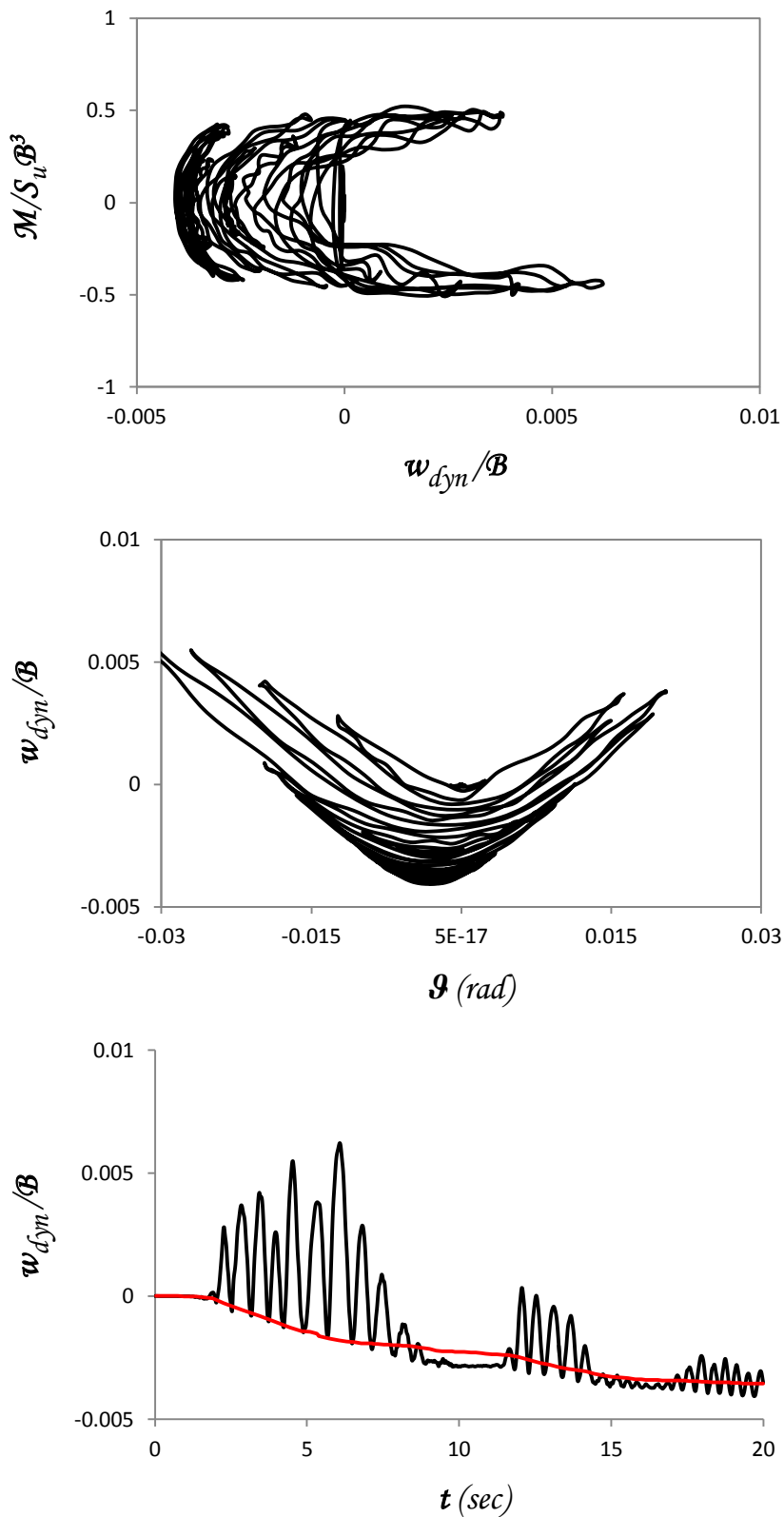


— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.30α** *El Centro\_180 1940*. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

*El Centro\_180 1940*

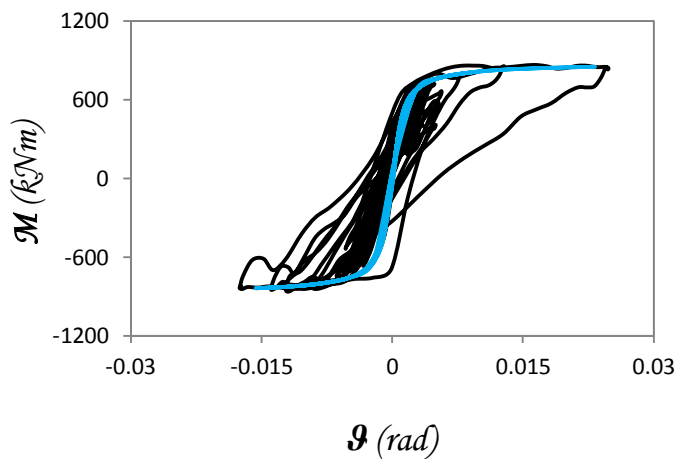
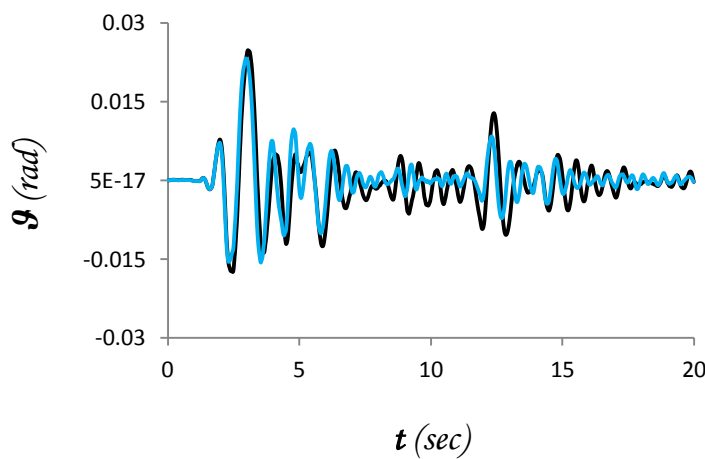
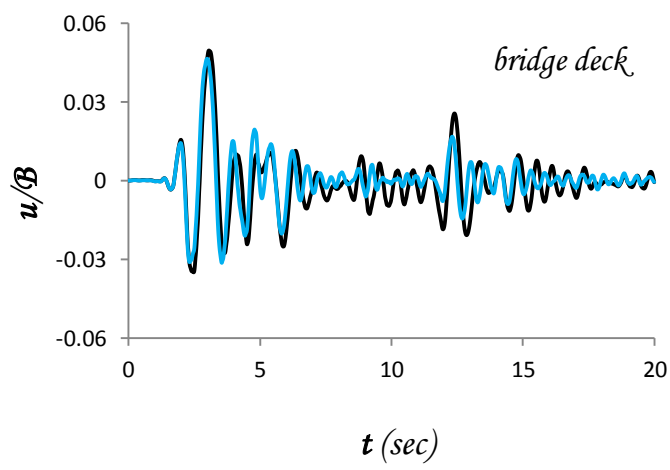
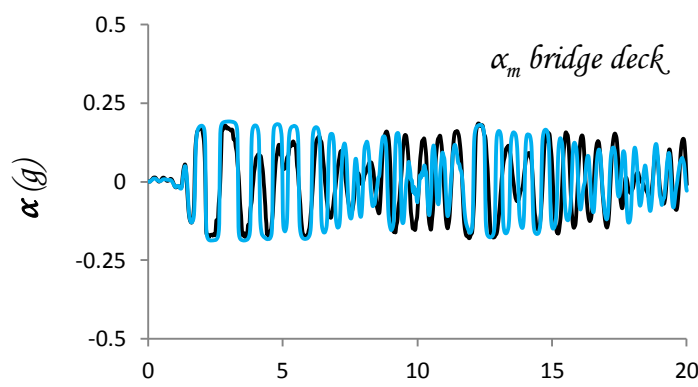
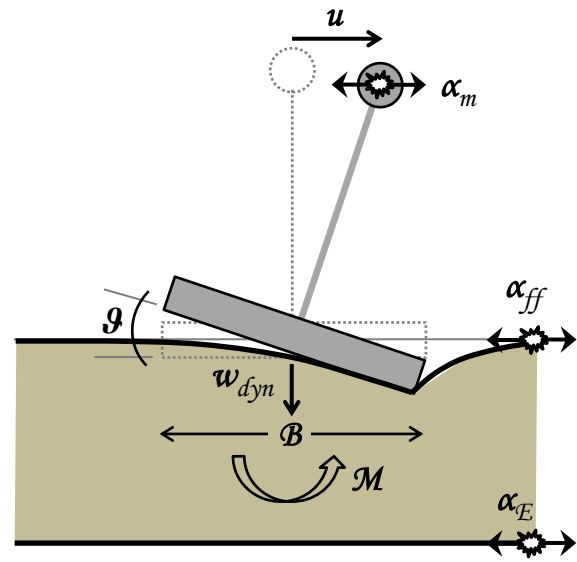
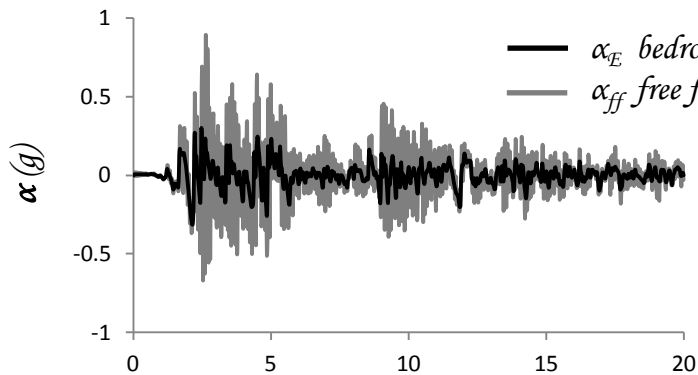
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.30β** *El Centro\_180 1940*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

*El Centro\_180 1940*

$$F_S = 3.3$$



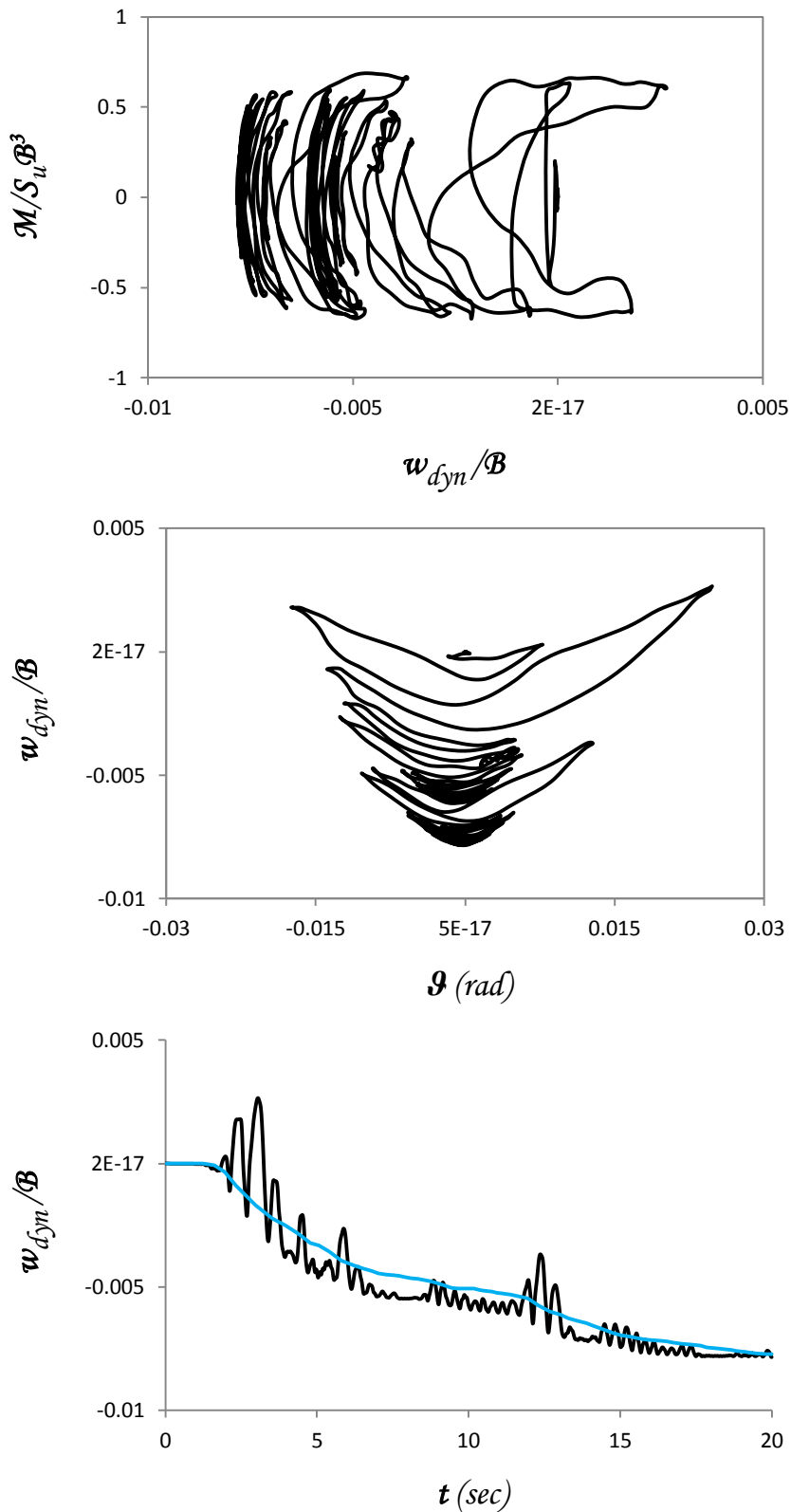
— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.31α** *El Centro\_180 1940*. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \theta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



*El Centro\_180 1940*

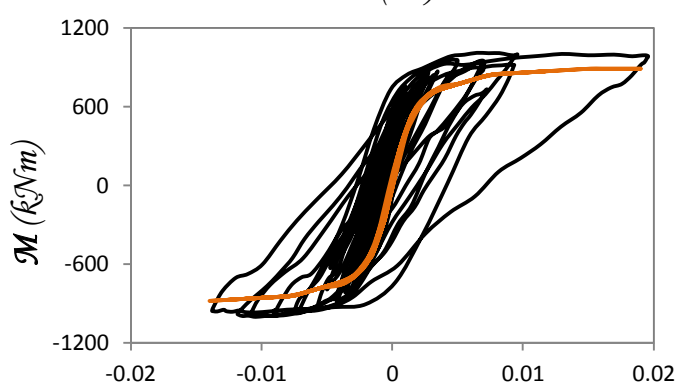
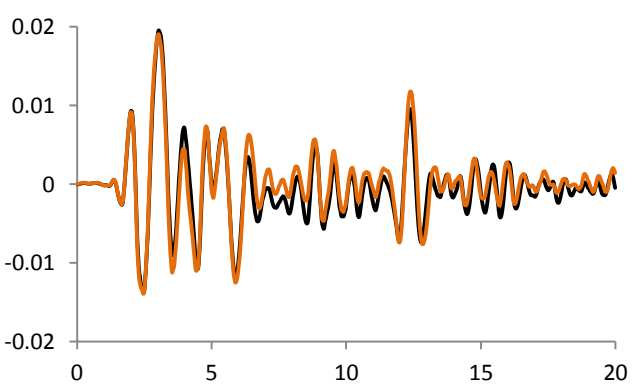
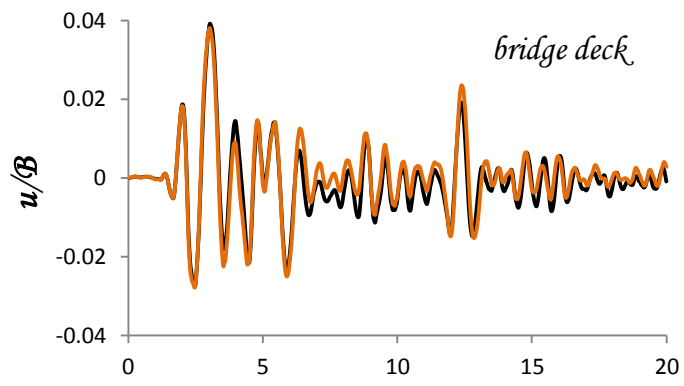
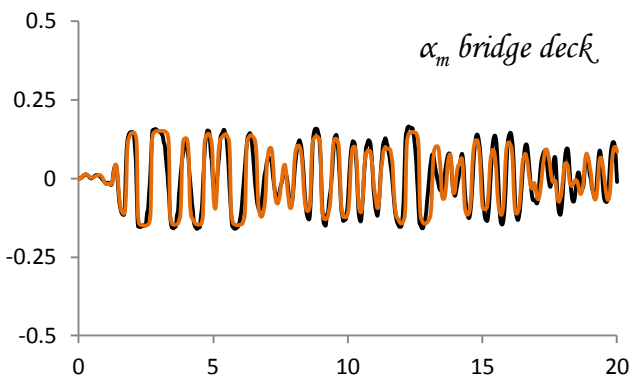
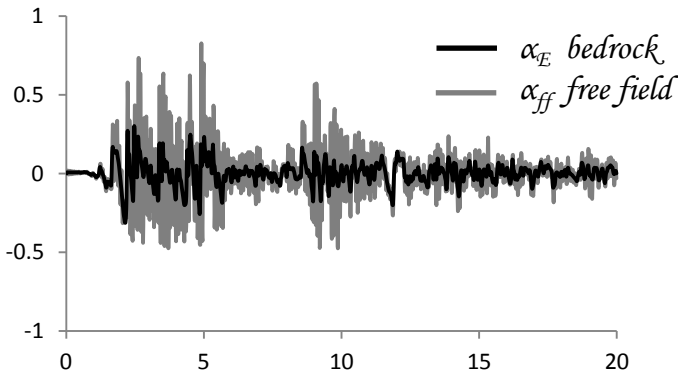
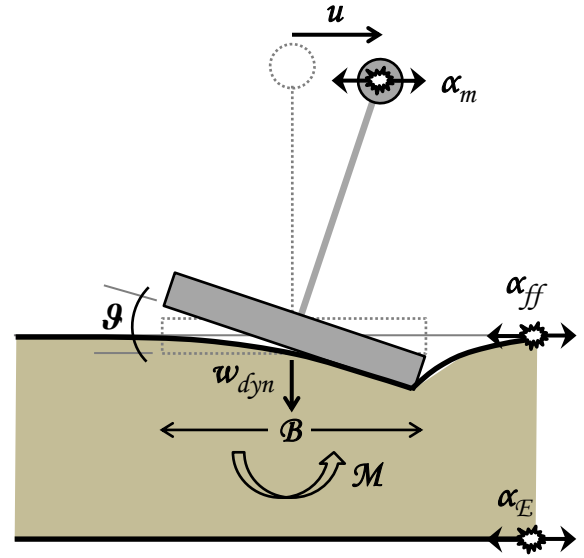
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.31β** *El Centro\_180 1940*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

*El Centro\_180 1940*

$$F_S = 2.5$$

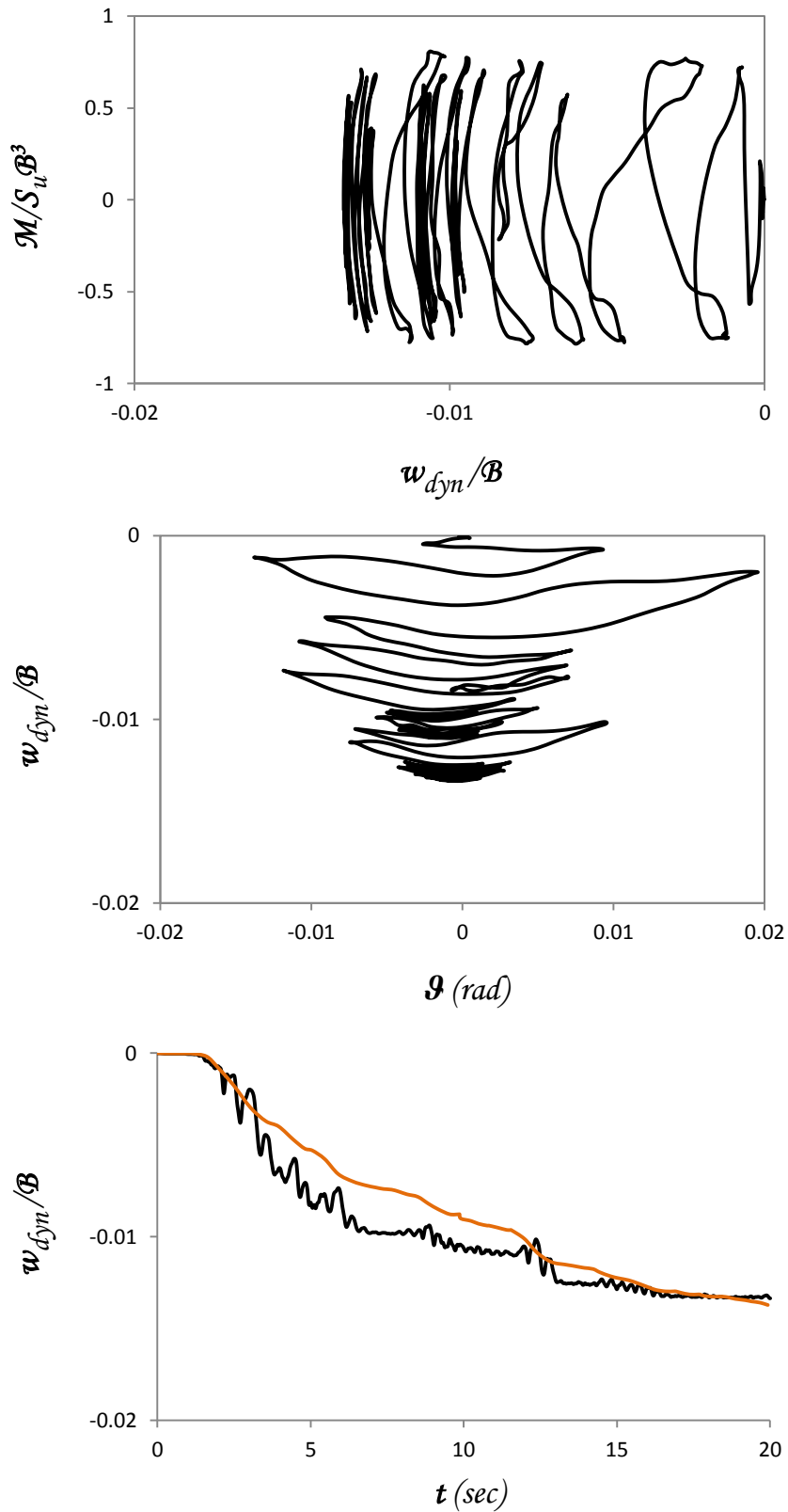


— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.32α** *El Centro\_180 1940*. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

*El Centro\_180 1940*

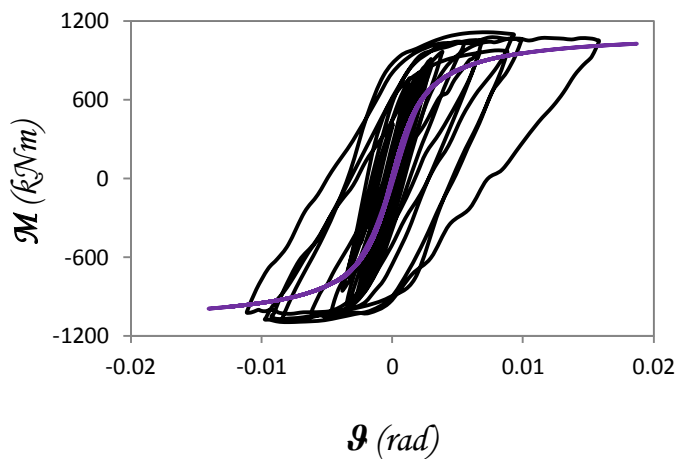
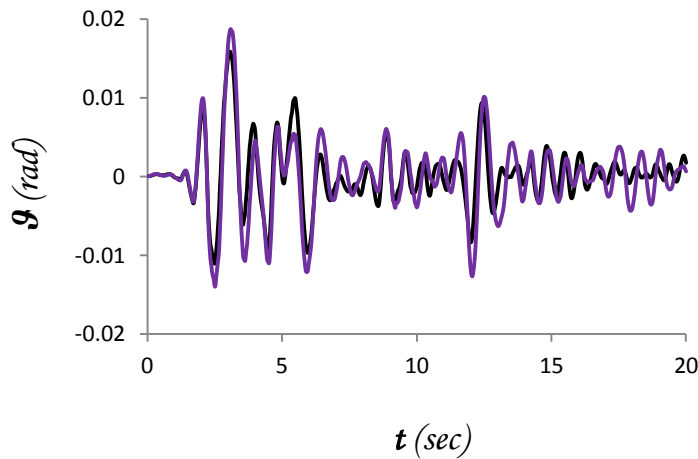
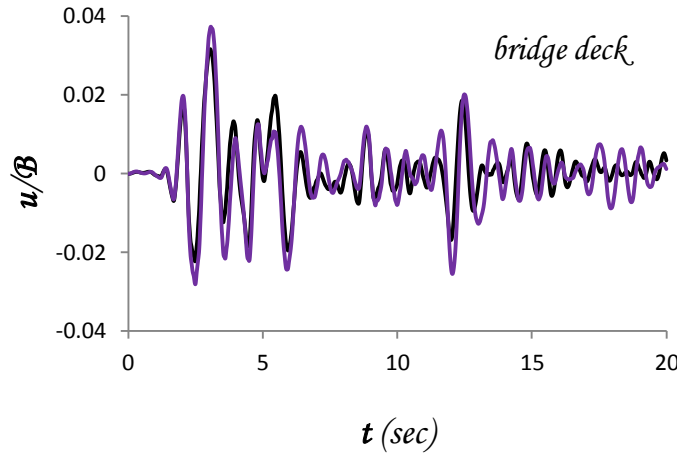
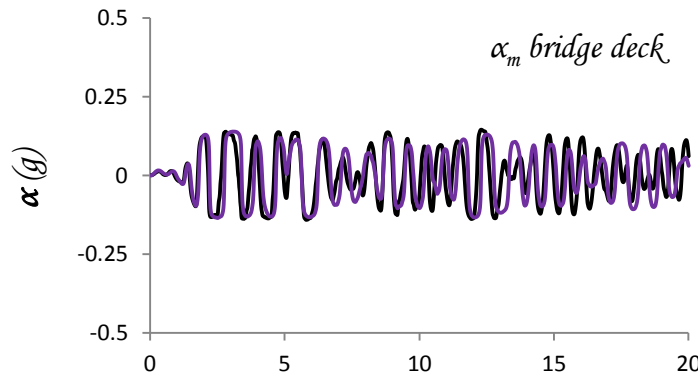
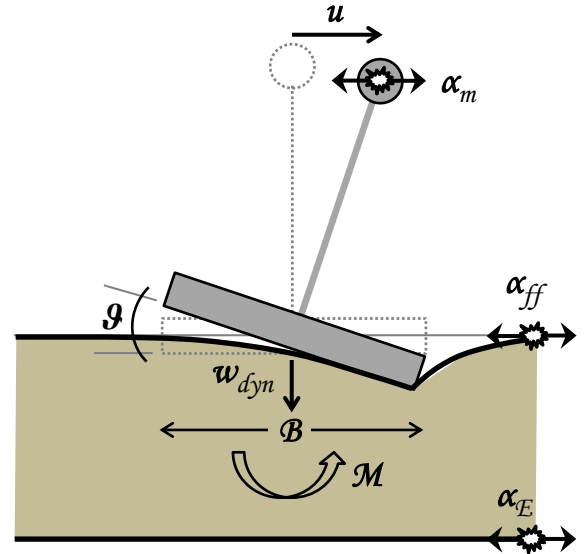
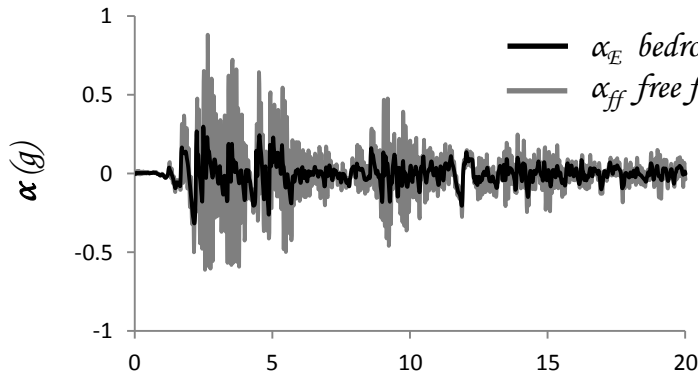
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.32β** *El Centro\_180 1940*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

*El Centro\_180 1940*

$$F_S = 2$$

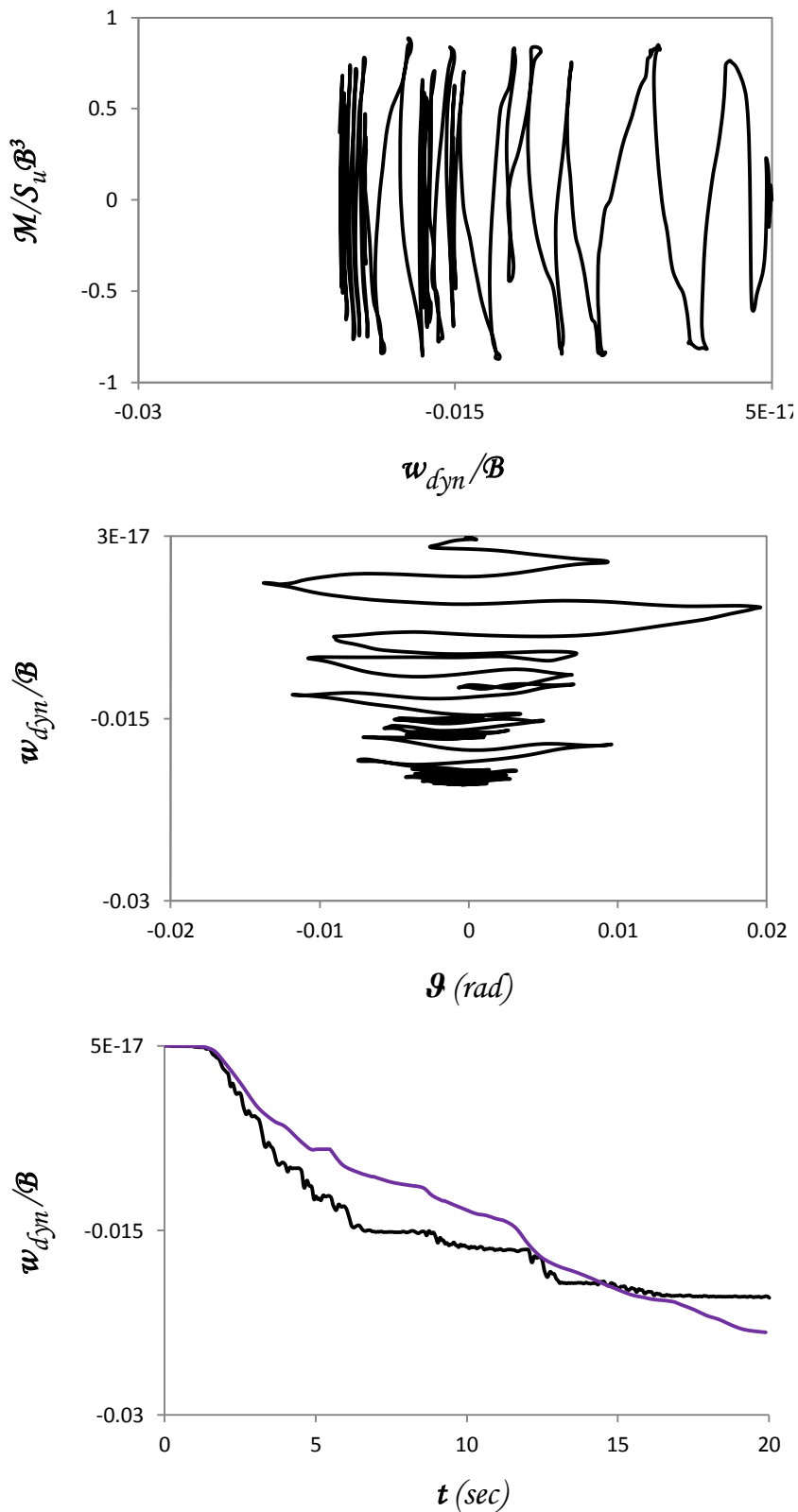


— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.33α** *El Centro\_180 1940*. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

*El Centro\_180 1940*

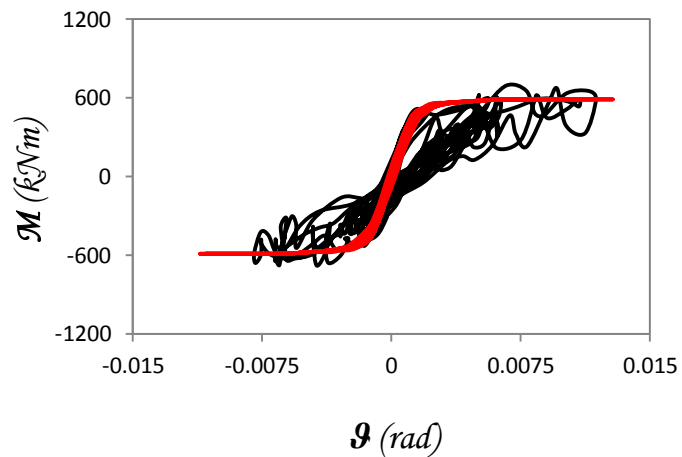
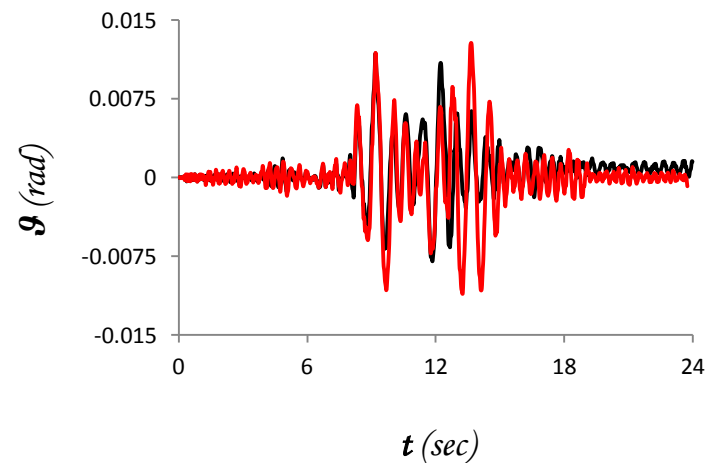
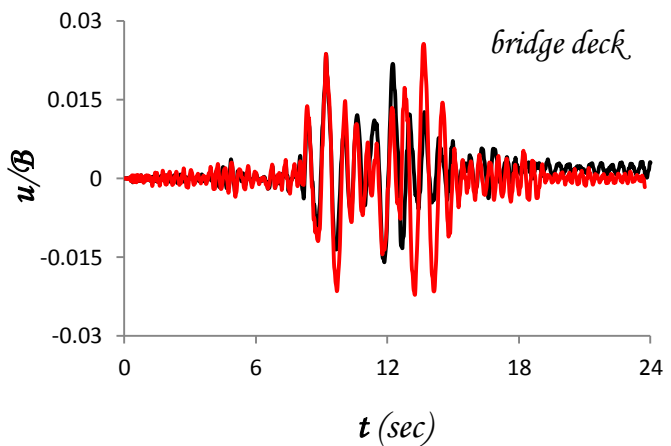
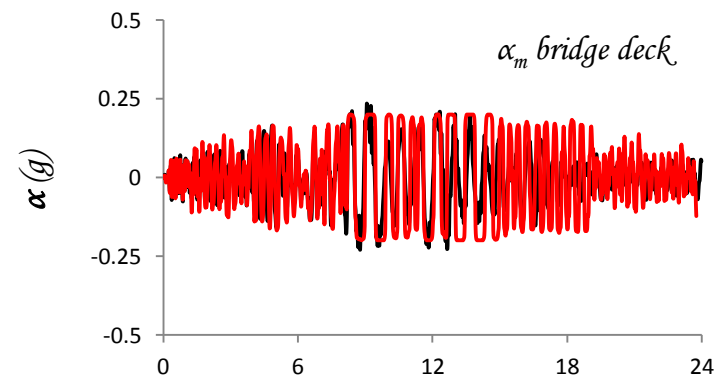
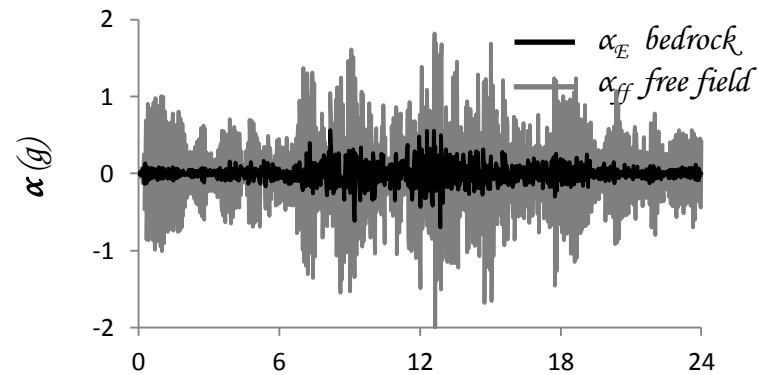
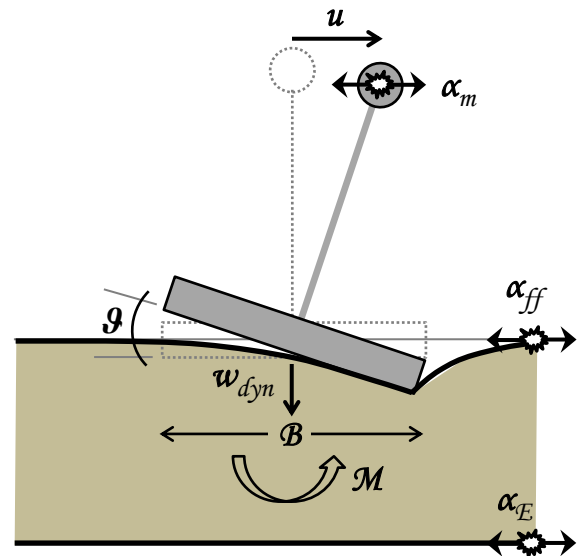
$$F_S = 2$$



**Σχήμα 4.33β** *El Centro\_180 1940*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Lucerne\_000 1992

$$F_S = 5$$

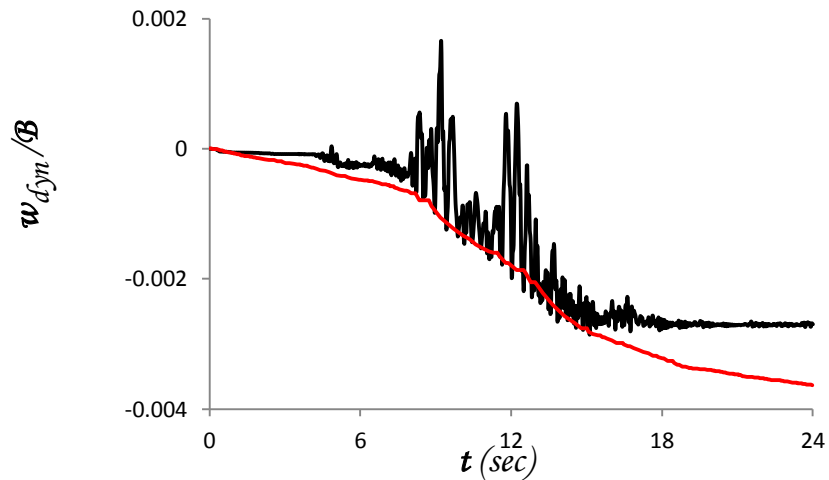
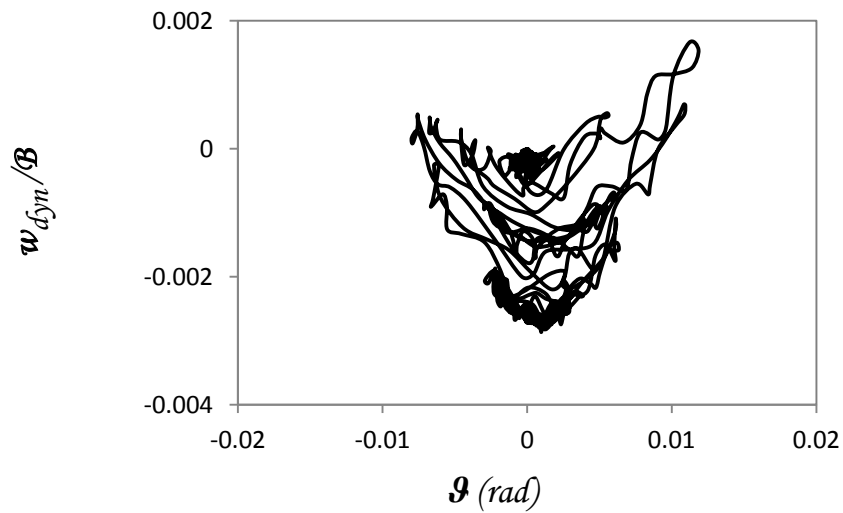
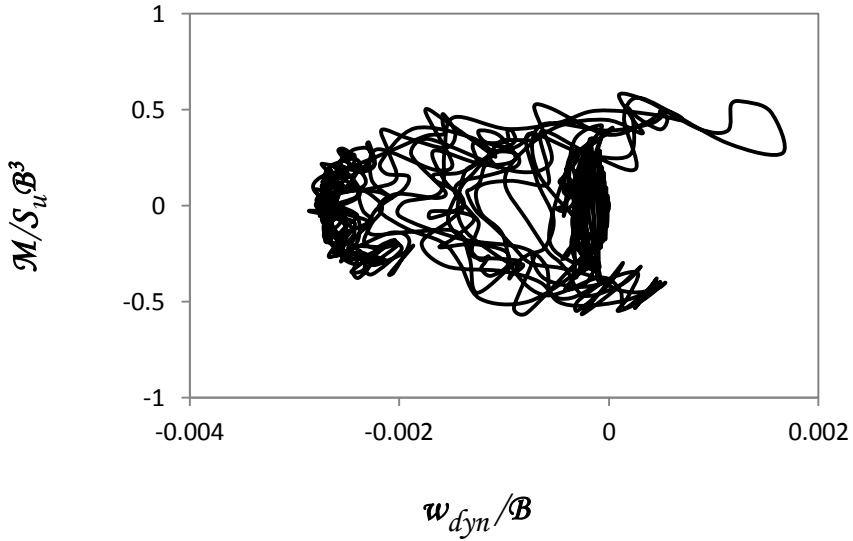


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.34α Lucerne\_000 1992. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - \epsilon$ λατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Lucerne\_000 1994

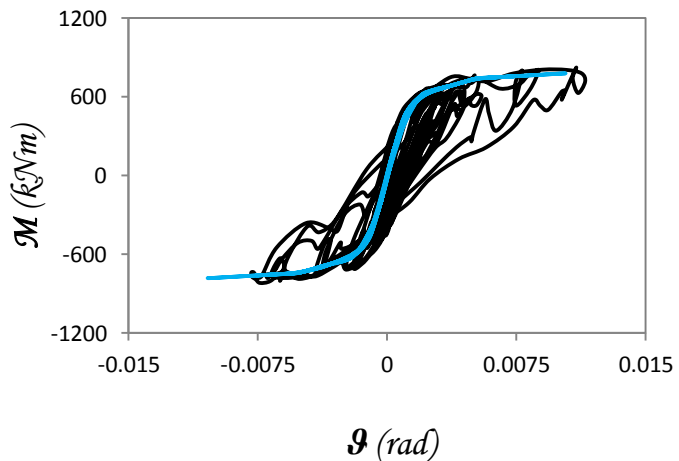
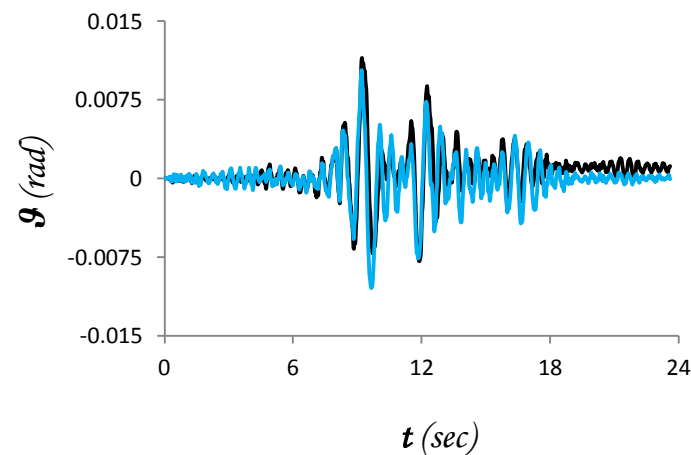
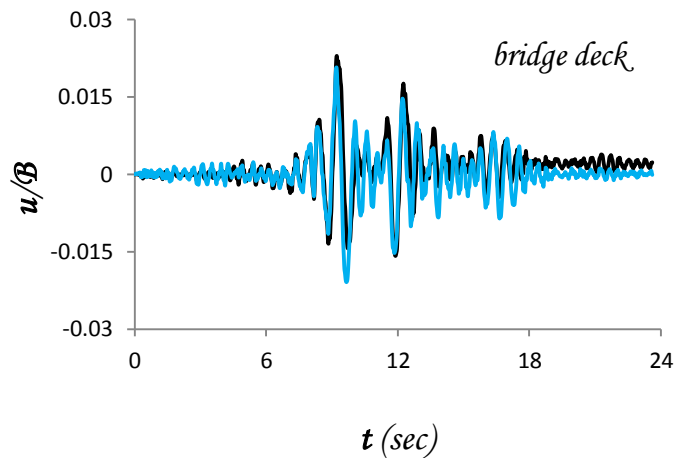
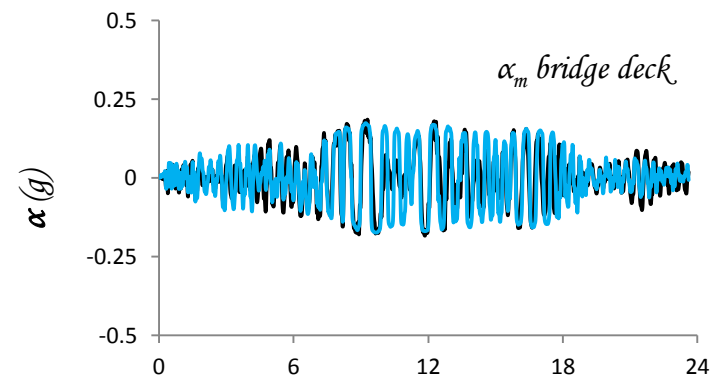
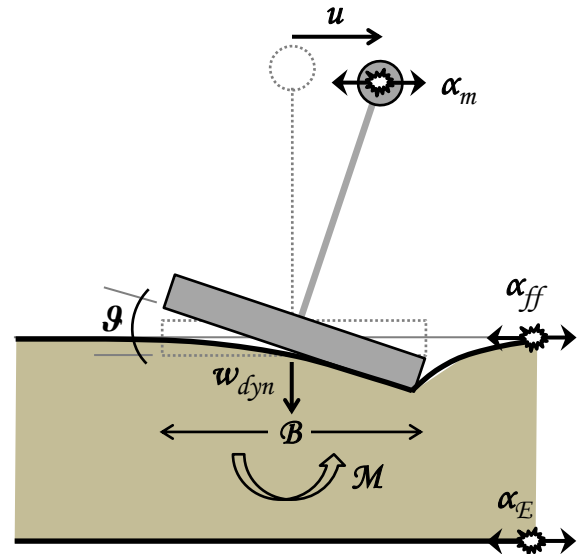
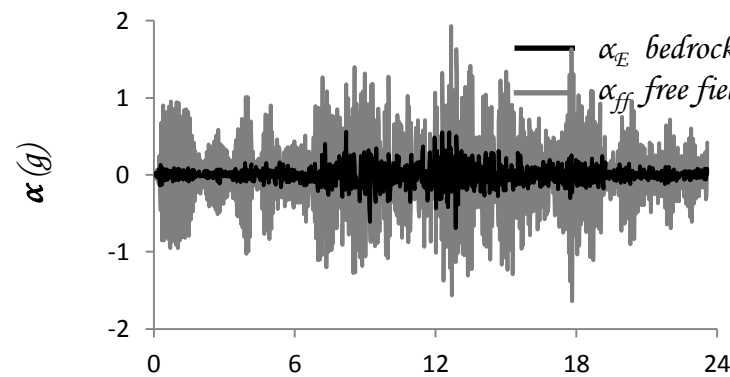
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.34β** *Lucerne\_000 1992*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Lucerne\_000 1992

$$F_S = 3.3$$



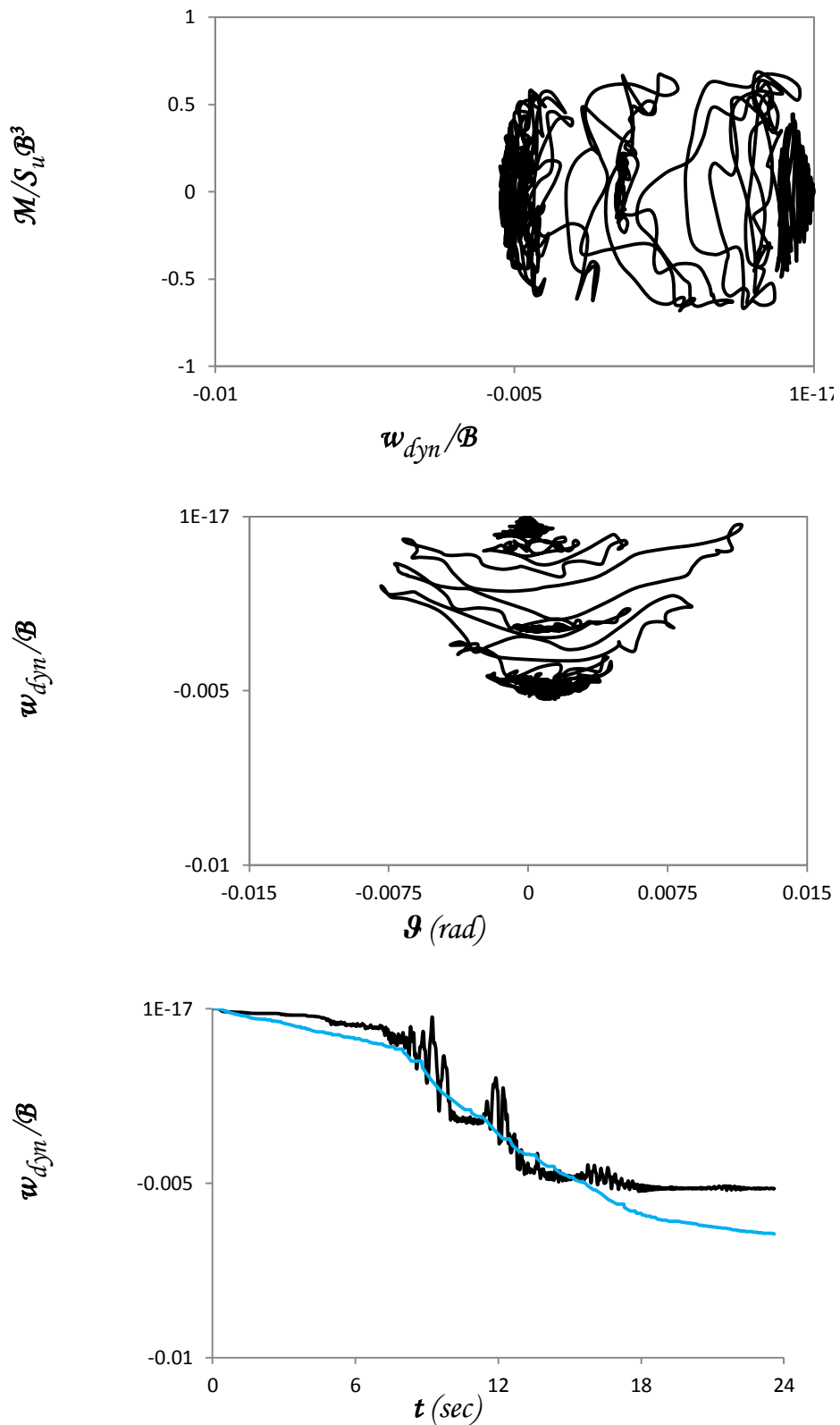
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.35α Lucerne\_000 1992. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Lucerne\_000 1994

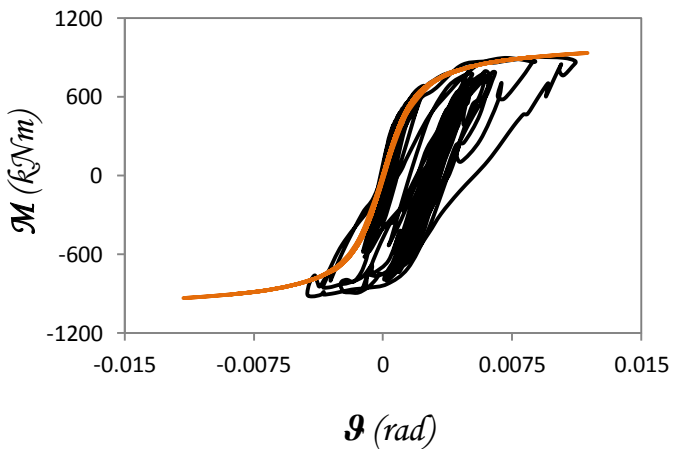
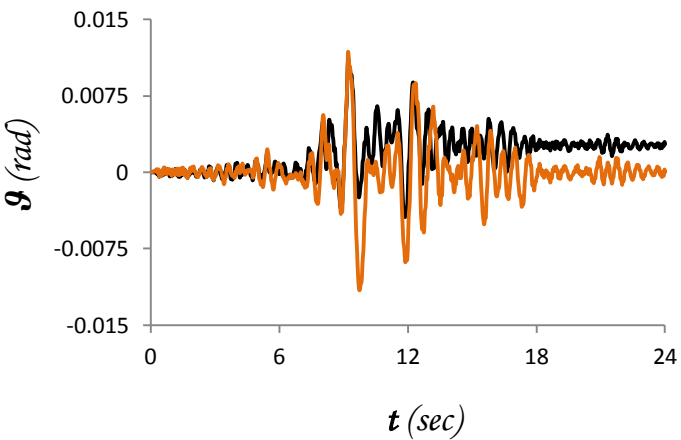
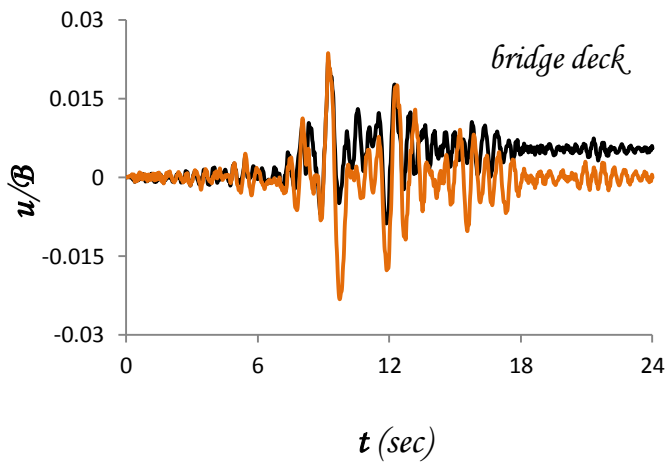
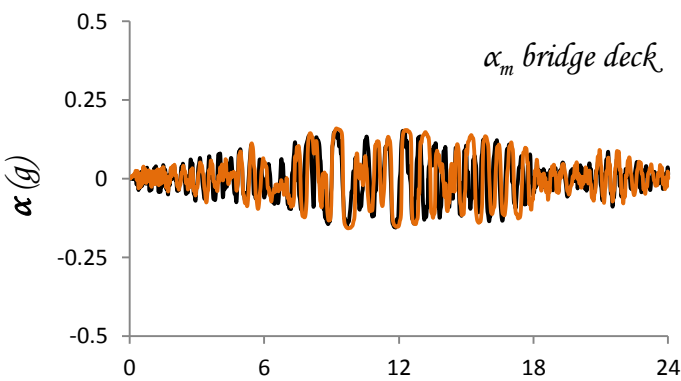
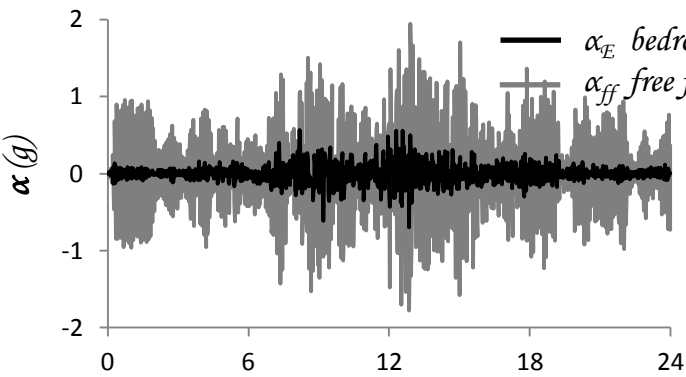
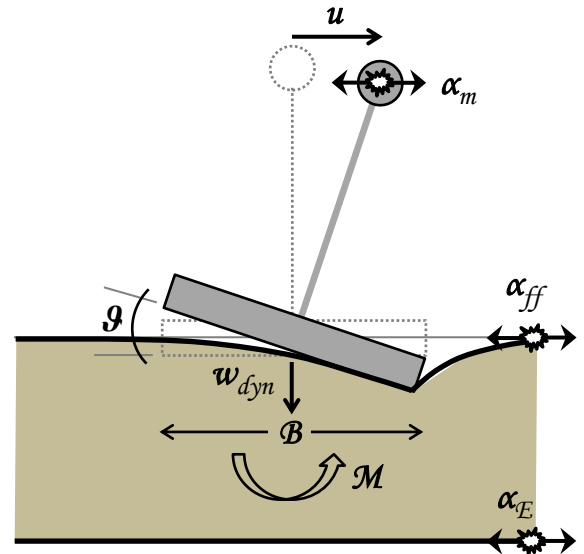
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.35β** *Lucerne\_000 1992*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Lucerne\_000 1992

$$F_S = 2.5$$

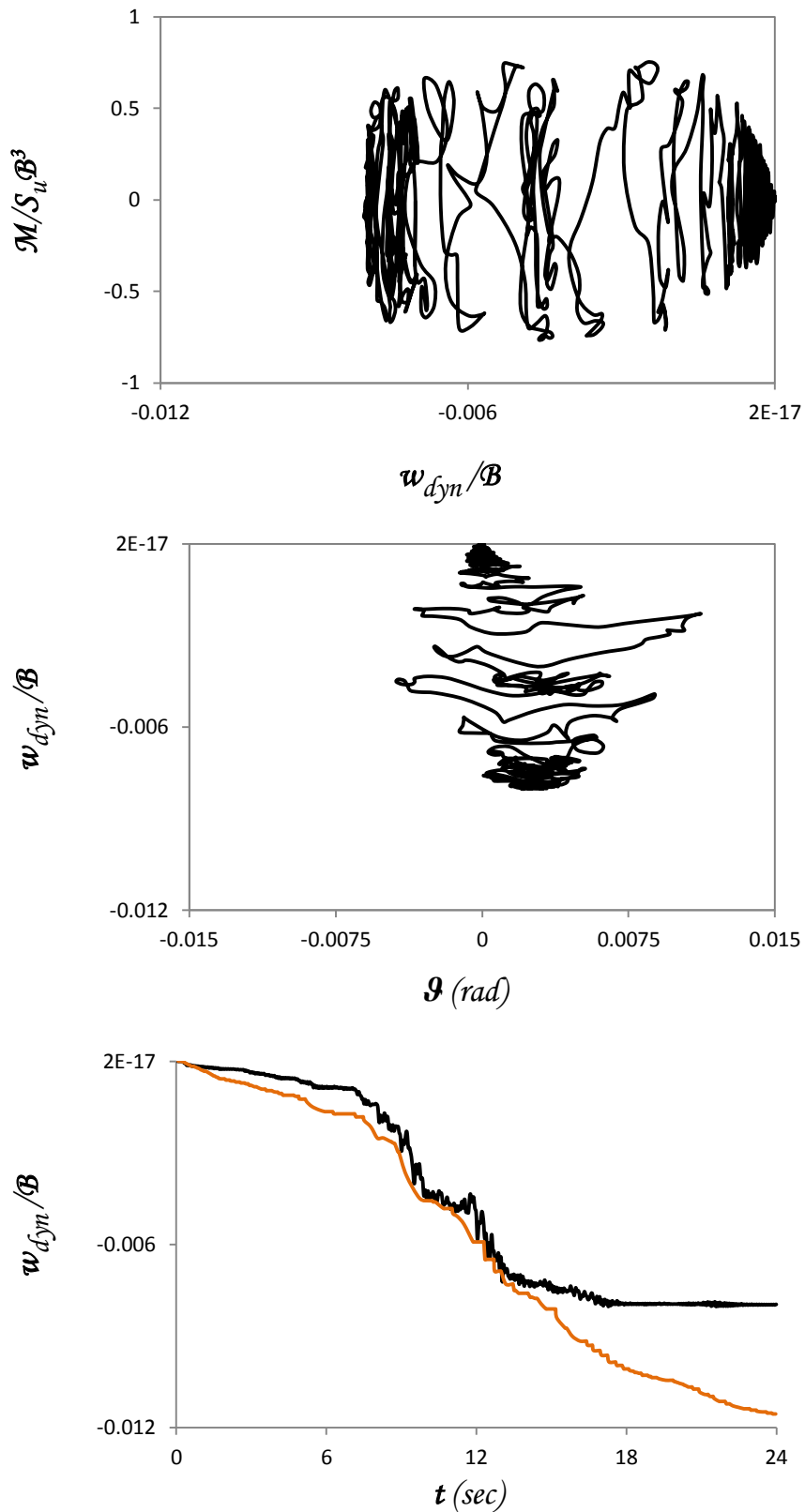


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.36α Lucerne\_000 1992. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Lucerne\_000 1994

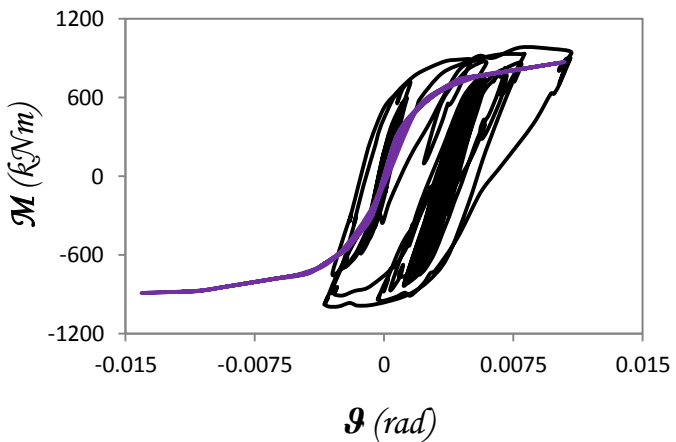
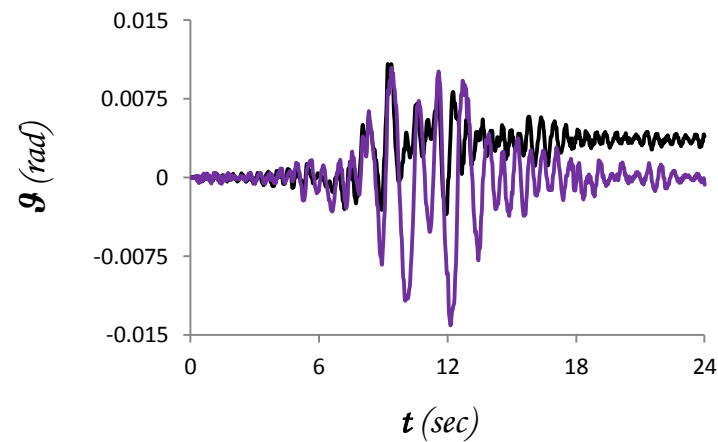
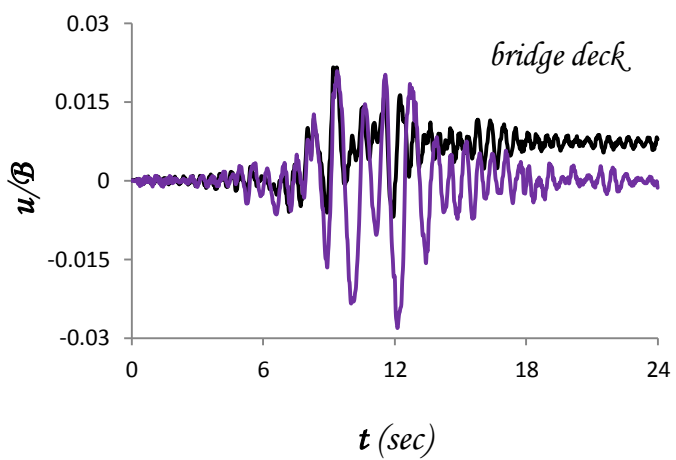
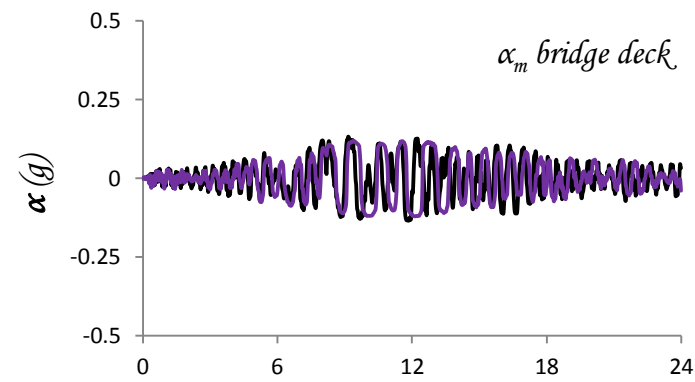
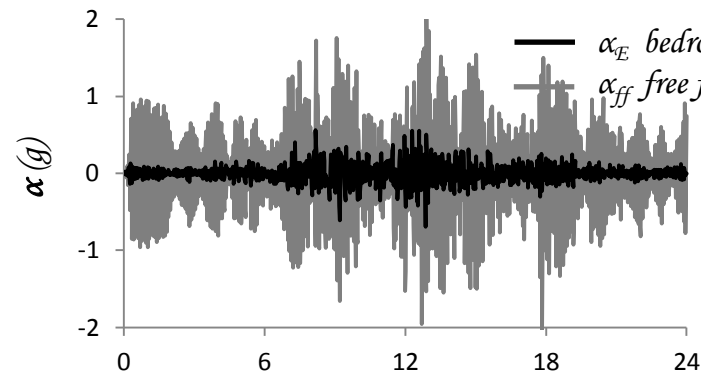
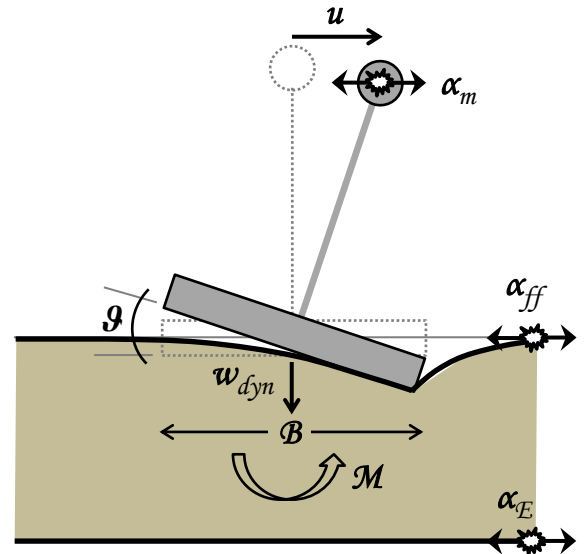
$$F_S = 2.5$$



Σχήμα 4.36β *Lucerne\_000 1992*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Lucerne\_000 1992

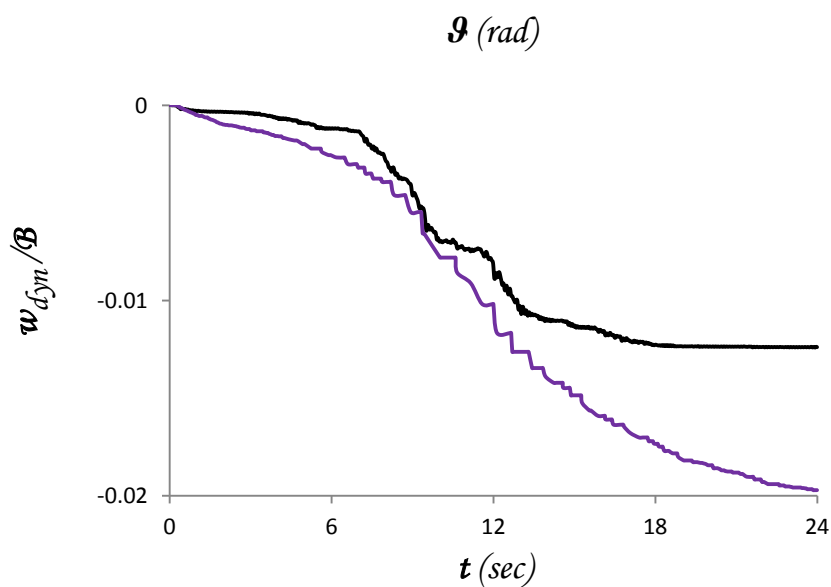
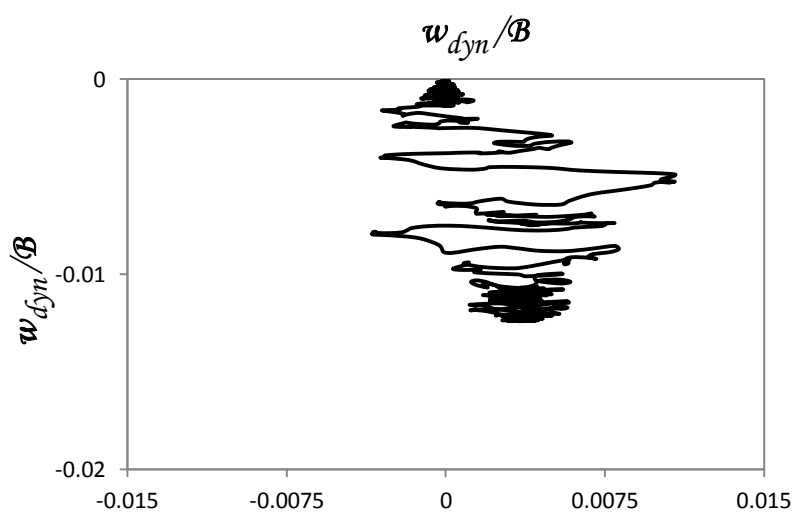
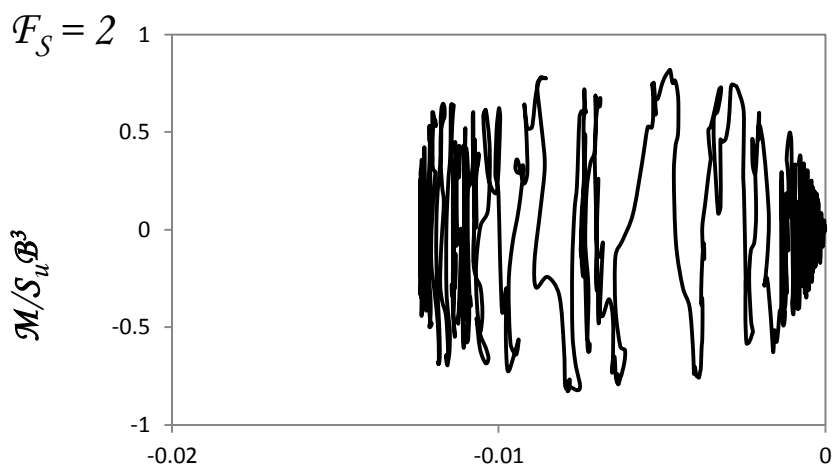
$$F_S = 2$$



— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.37α Lucerne\_000 1992. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

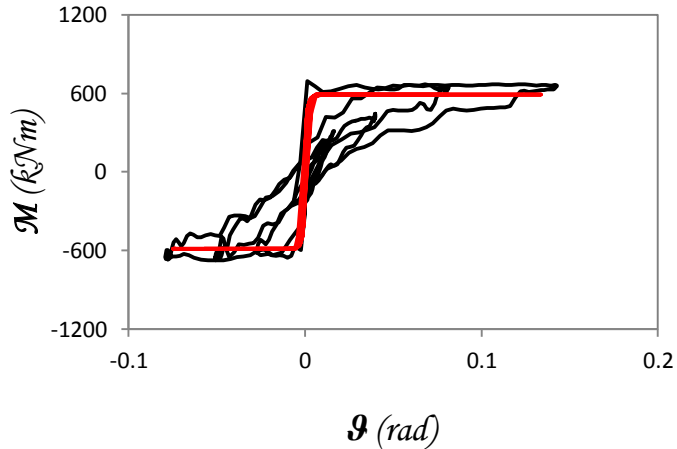
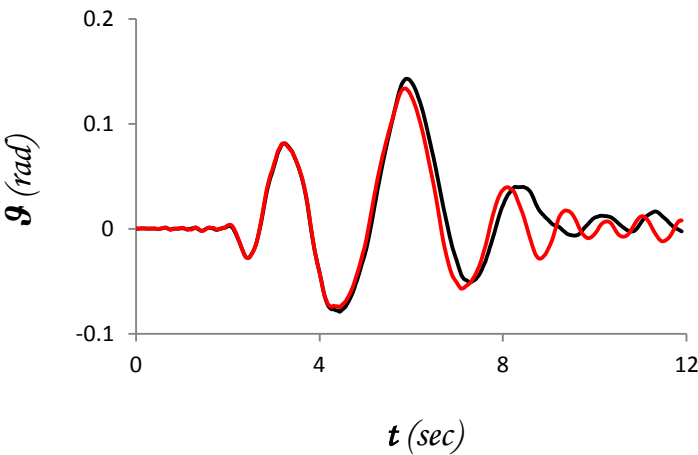
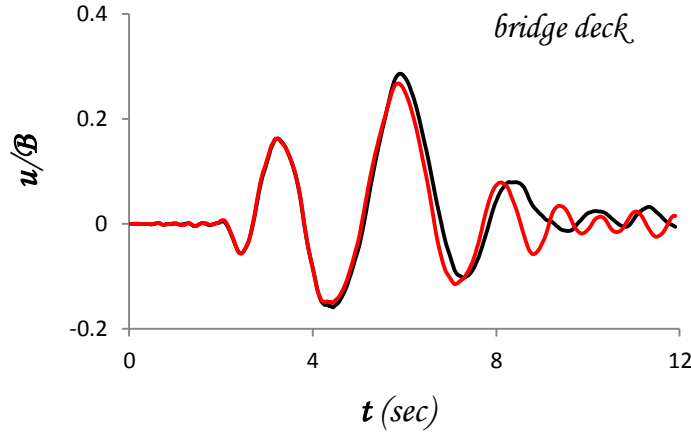
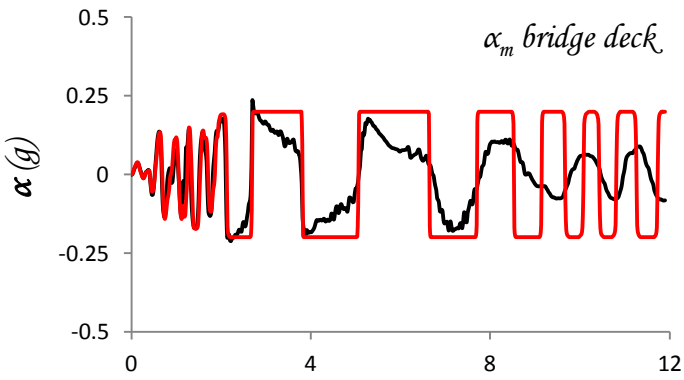
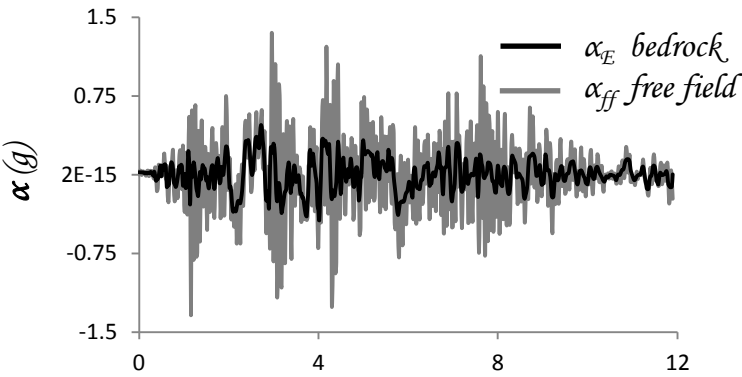
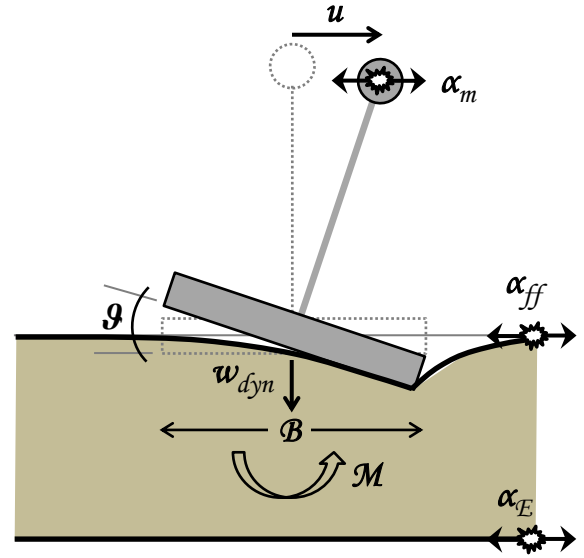
Lucerne\_000 1994



**Σχήμα 4.37β** *Lucerne\_000 1992*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Rinaldi\_318 1994

$$F_S = 5$$

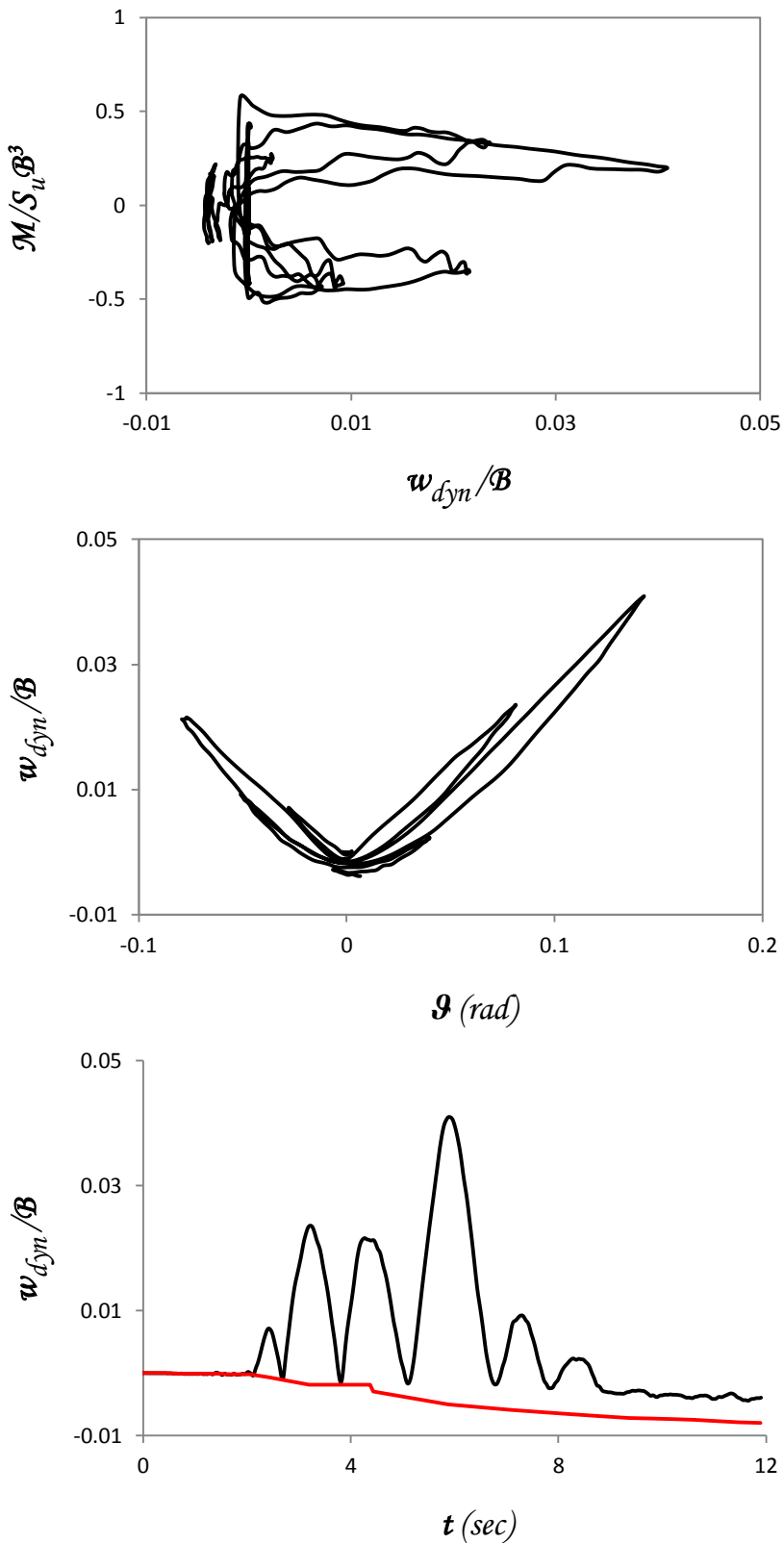


— FEM  
 — Ελατήριο

Σχήμα 4.38α Rinaldi\_318 1994. Σύγκριση χρονοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Rinaldi\_318 1994

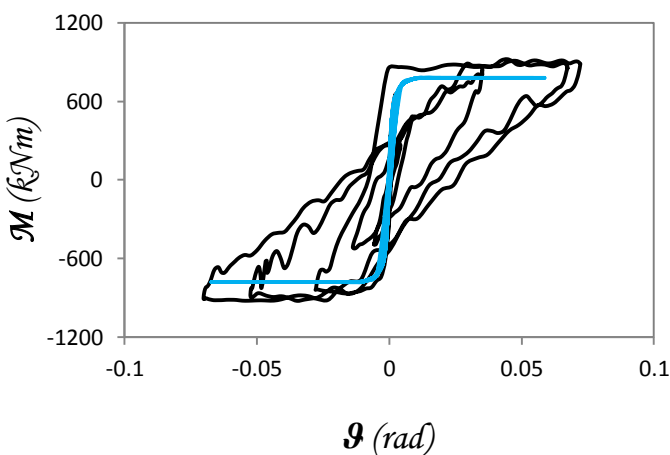
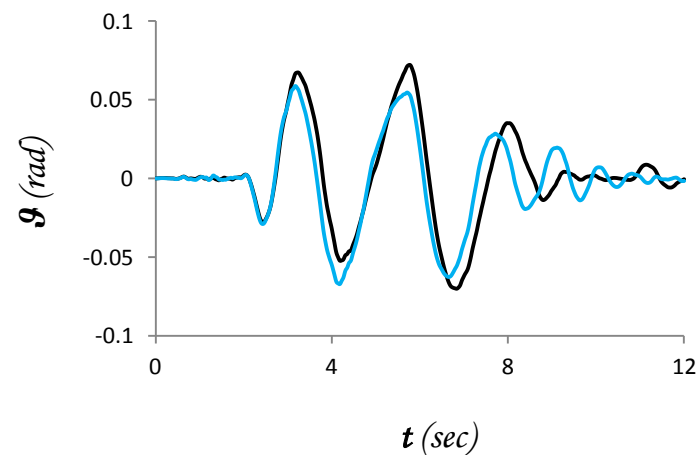
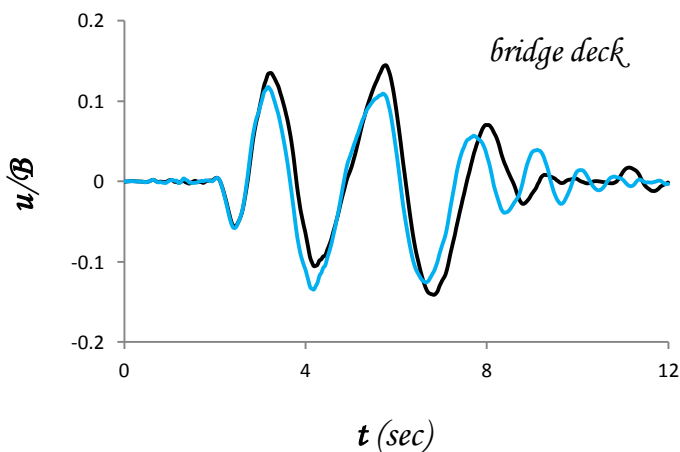
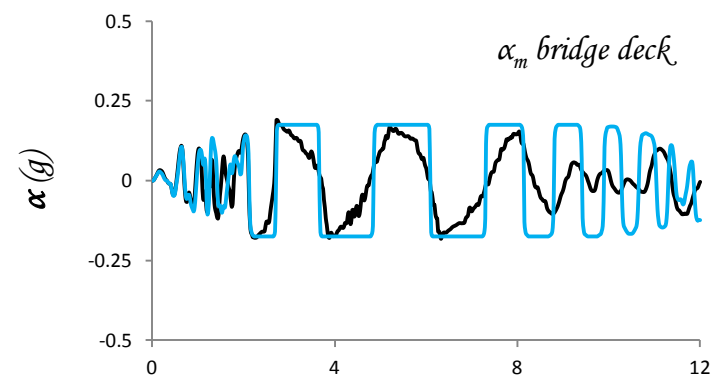
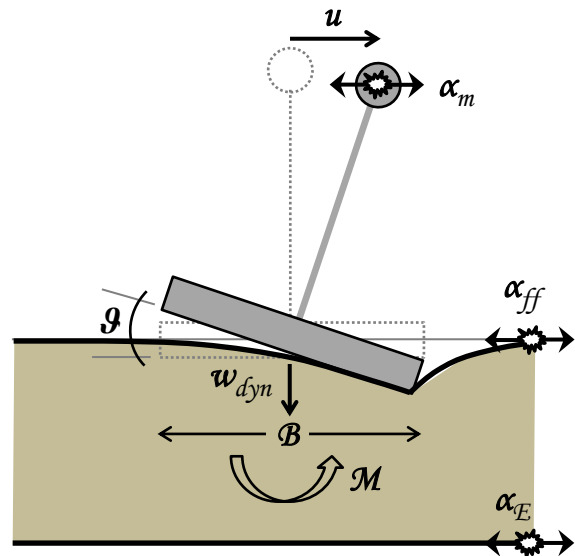
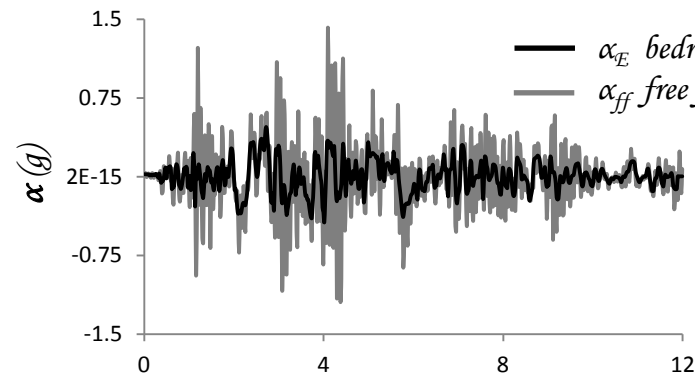
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.38β** Rinaldi\_318 1994. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Rinaldi\_318 1994

$$F_S = 3.3$$



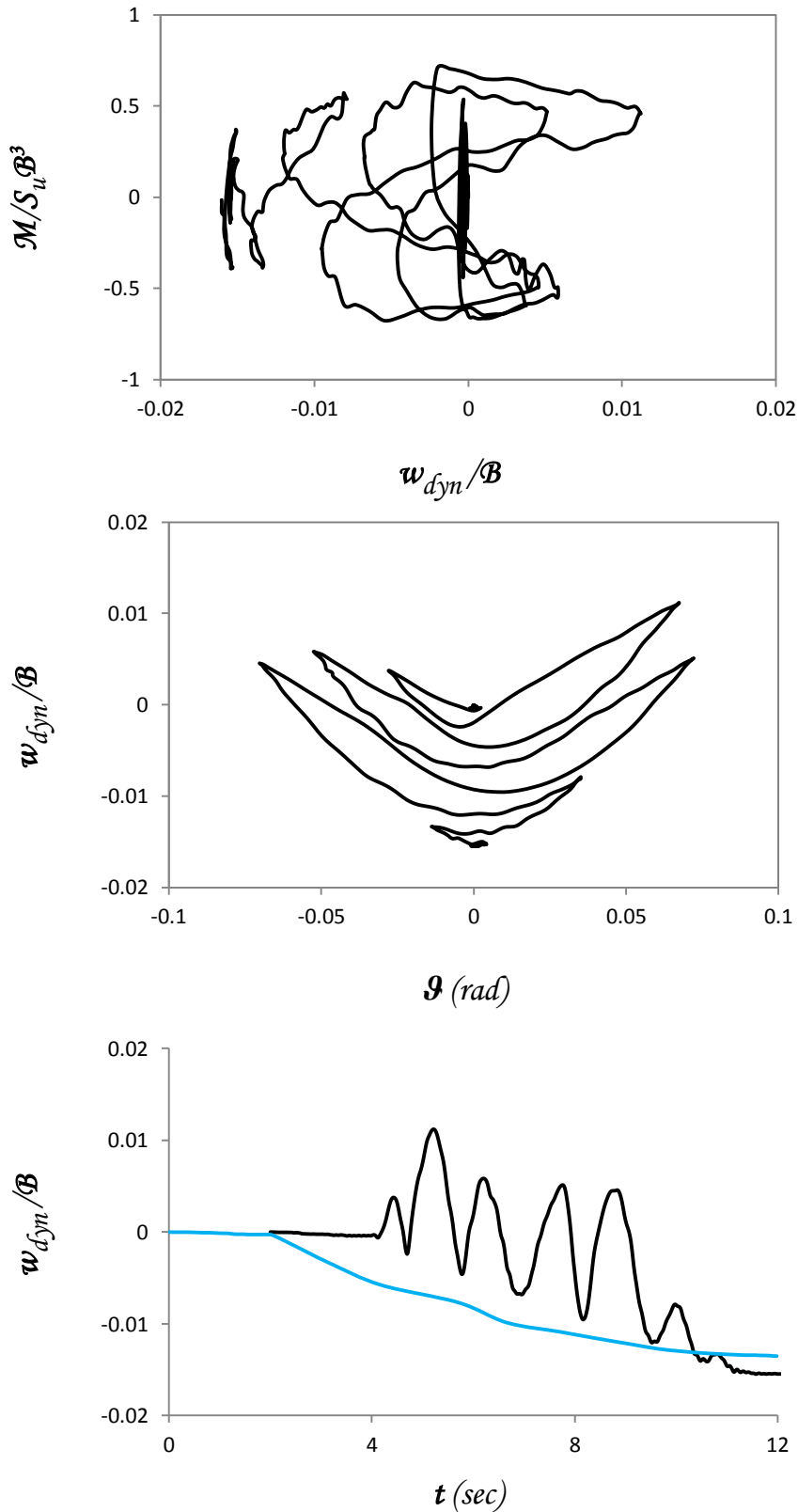
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.39α Rinaldi\_318 1994. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - \epsilon$ λατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Rinaldi\_318 1994

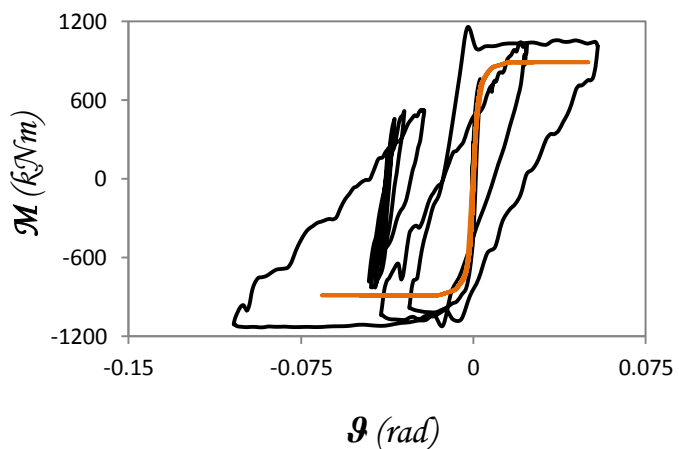
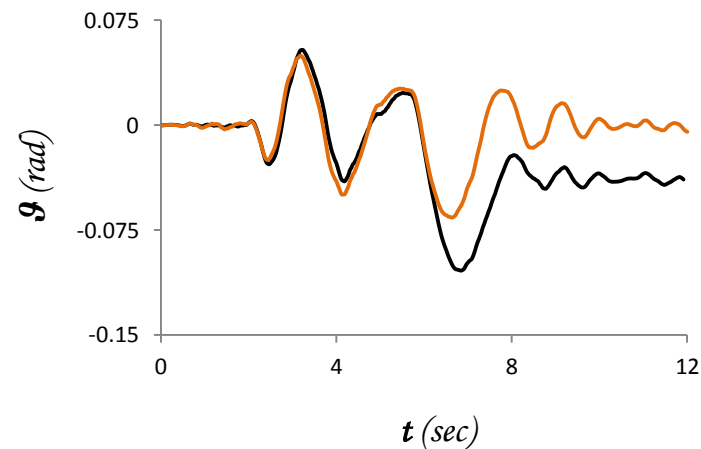
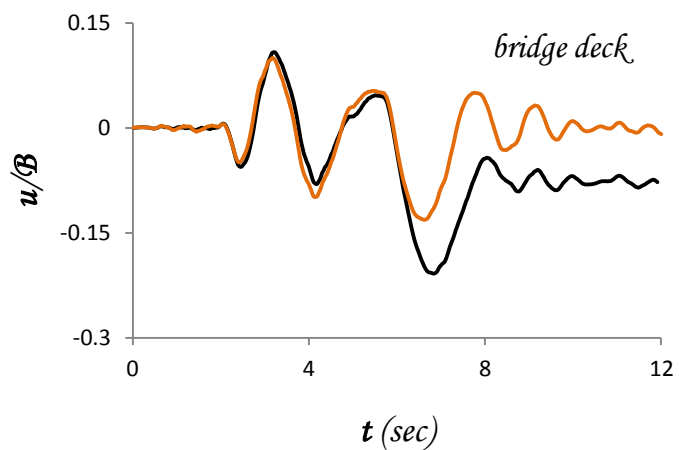
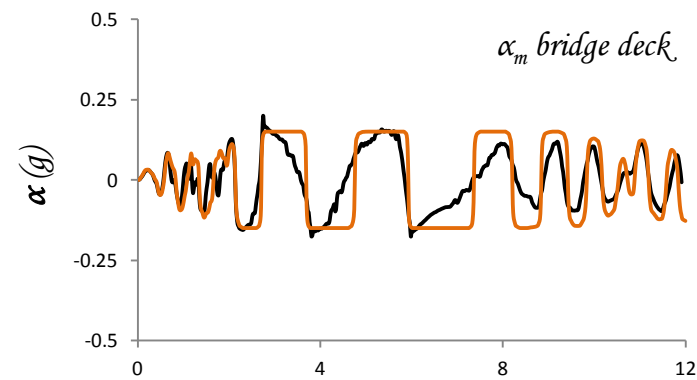
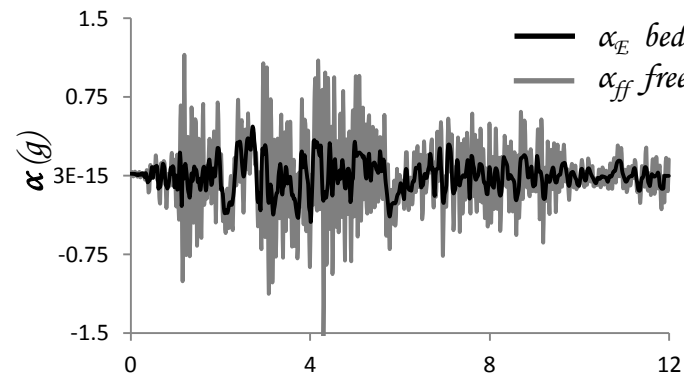
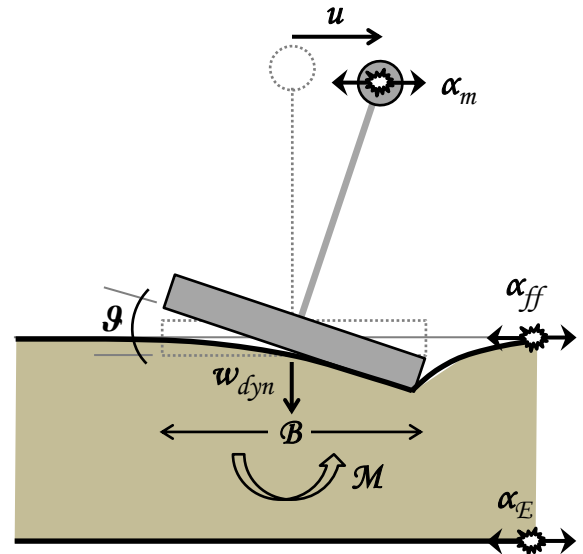
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.39β** Rinaldi\_318 1994. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Rinaldi\_318 1994

$$F_S = 2.5$$

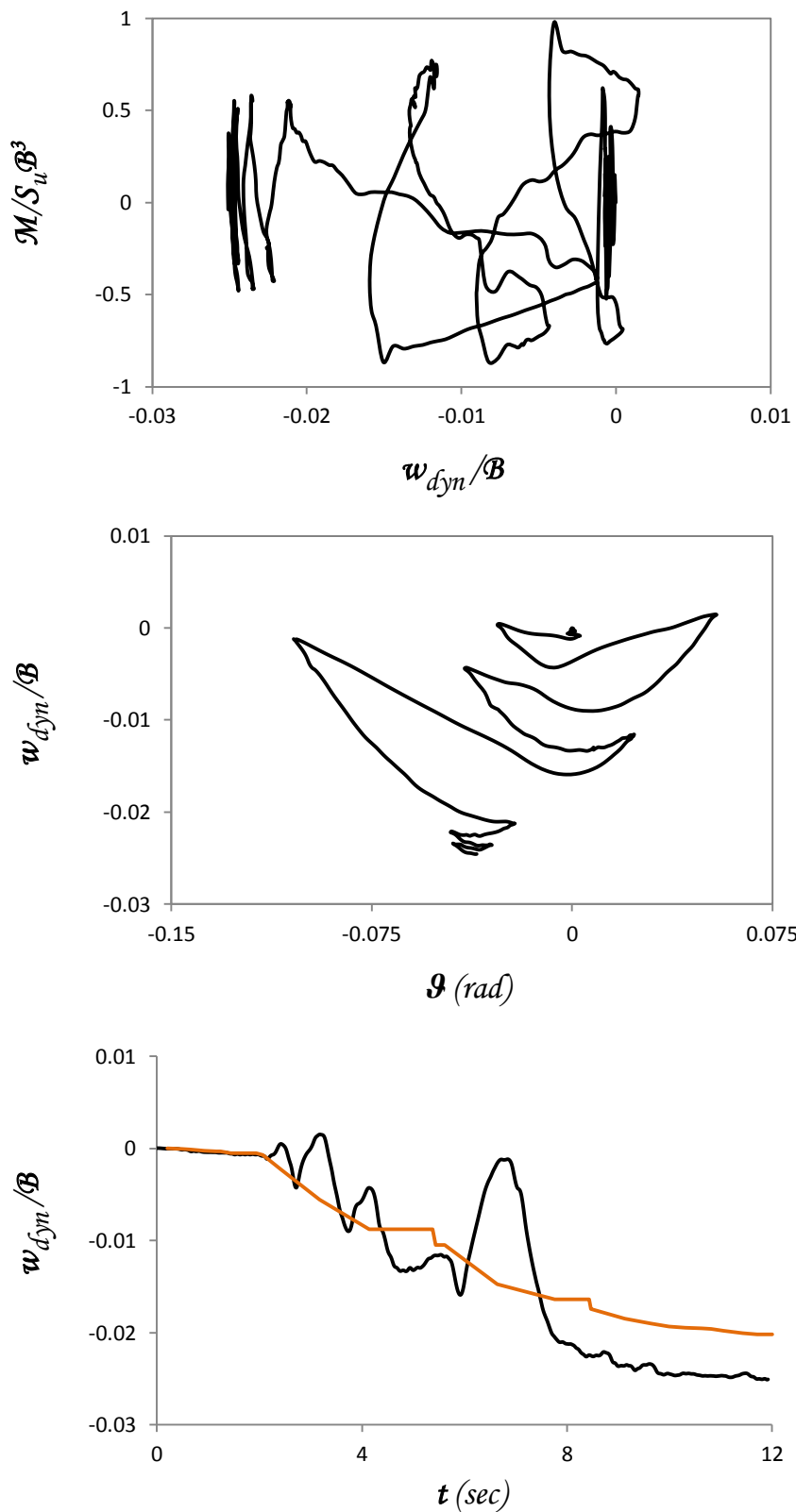


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.40α Rinaldi\_318 1994. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \theta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Rinaldi\_318 1994

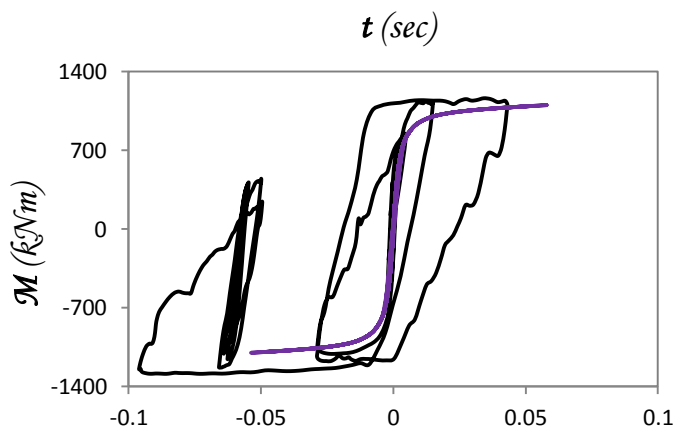
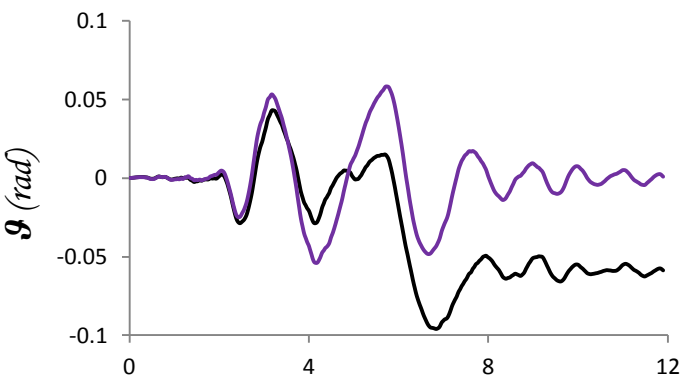
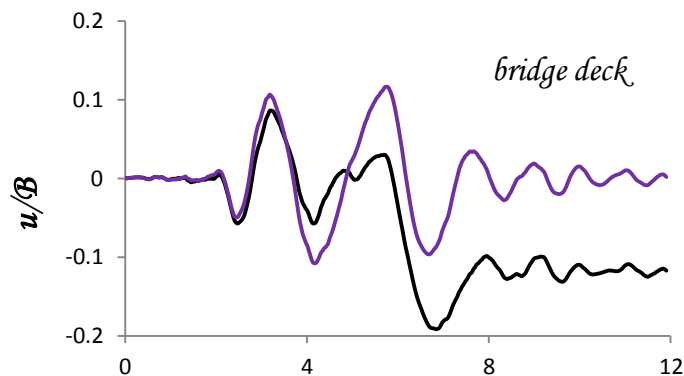
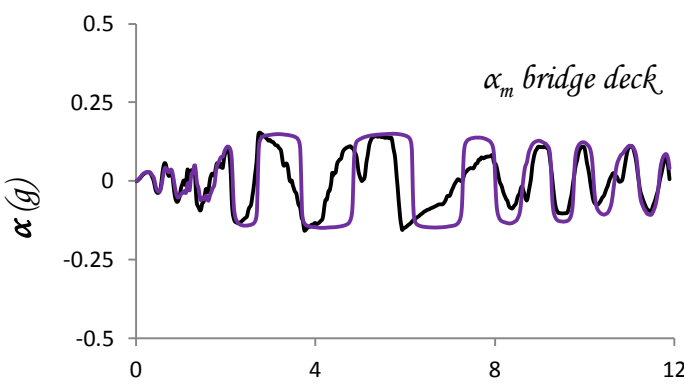
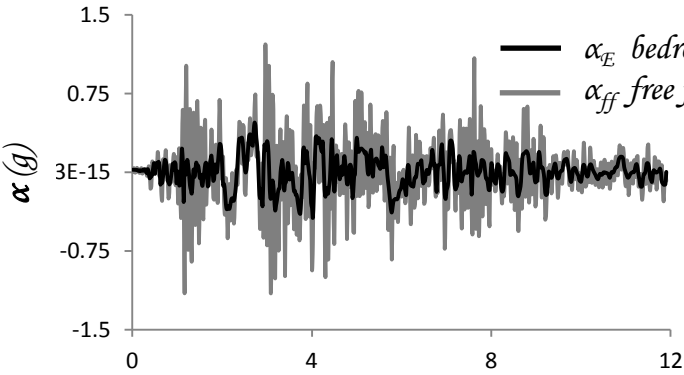
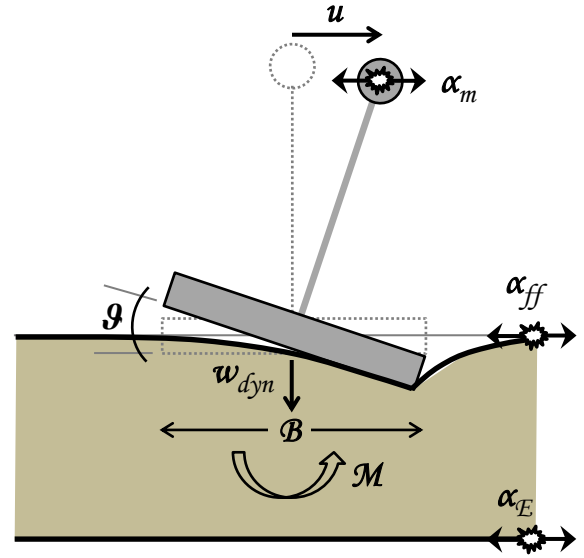
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.40β** Rinaldi\_318 1994. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Rinaldi\_318 1994

$$F_S = 2$$



t(sec)

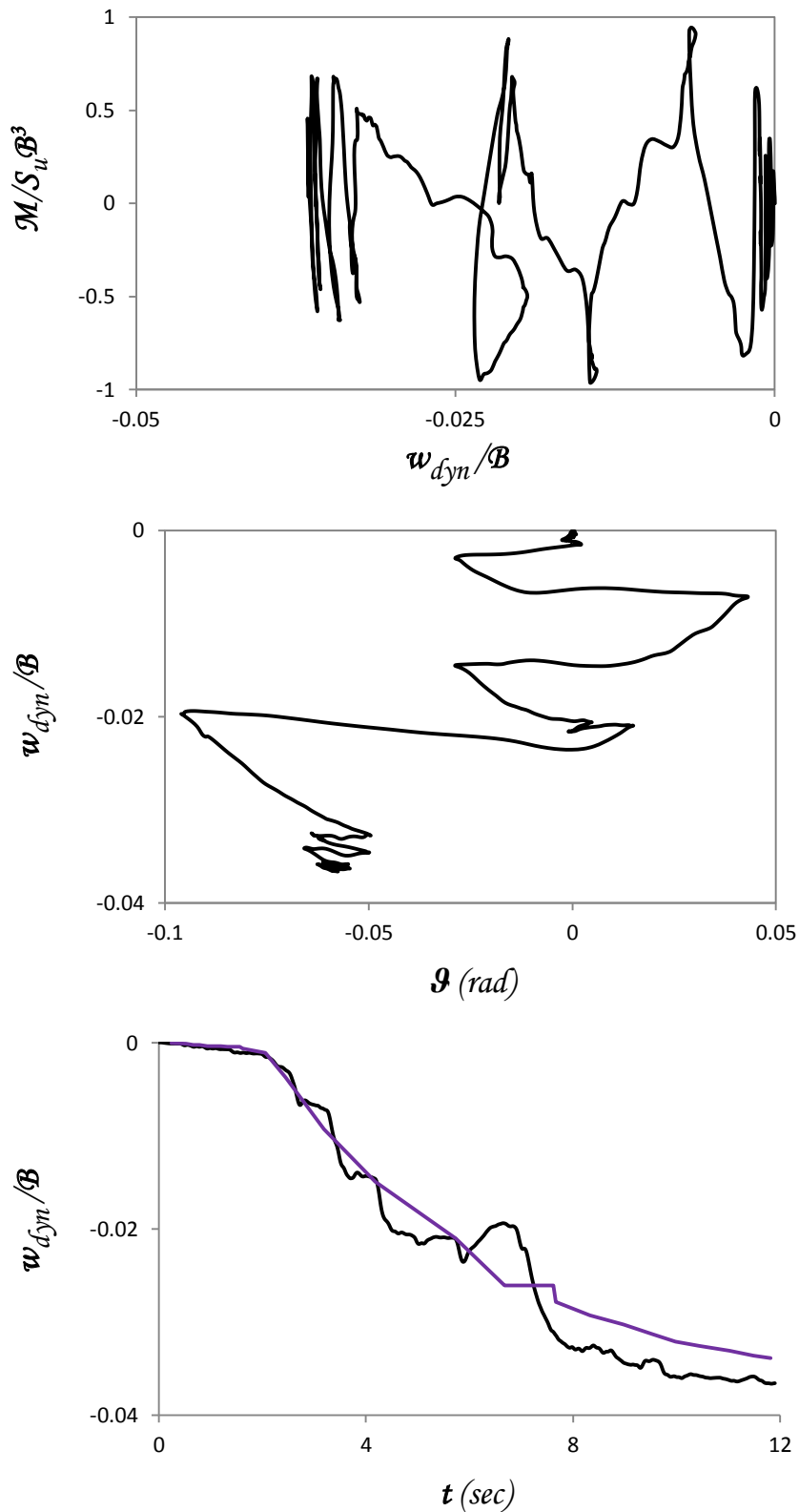
ϑ(rad)

— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.41α Rinaldi\_318 1994. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Rinaldi\_318 1994

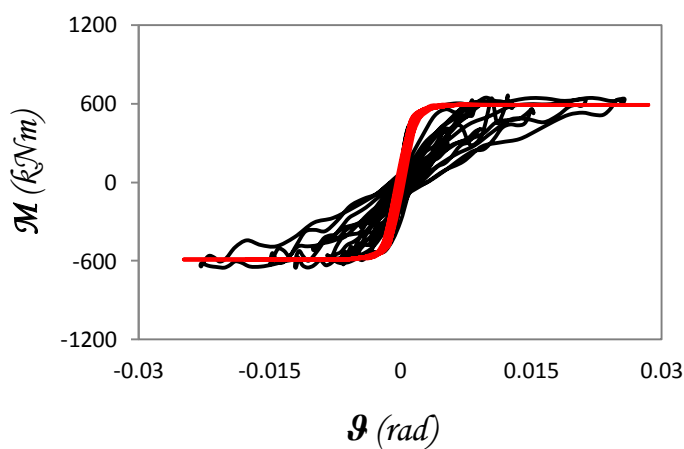
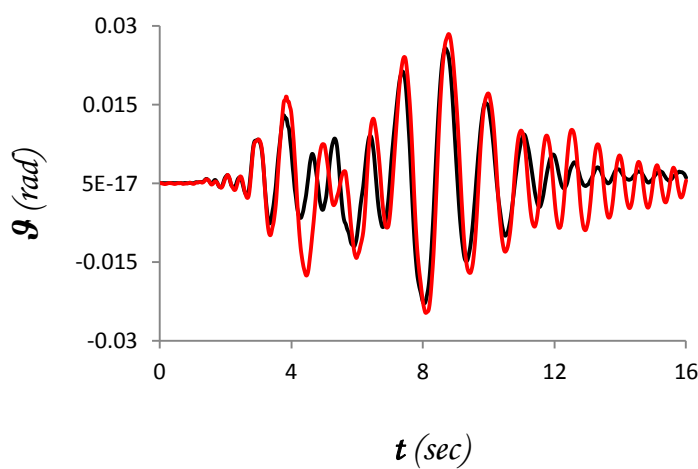
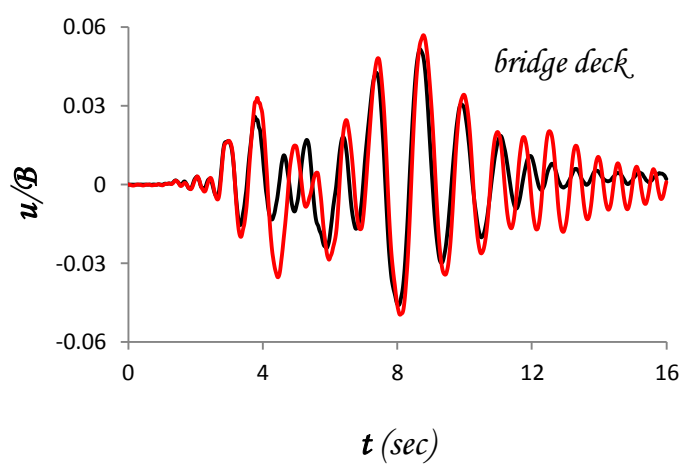
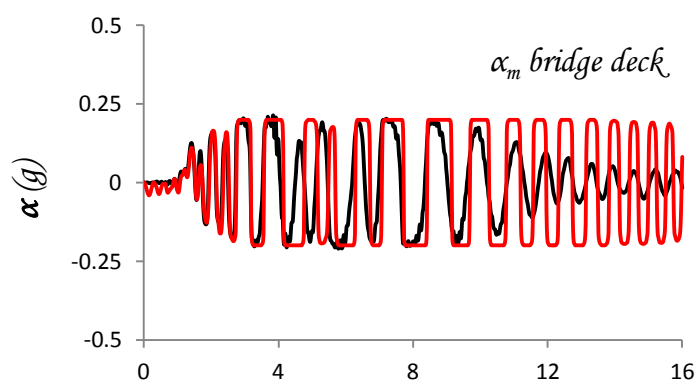
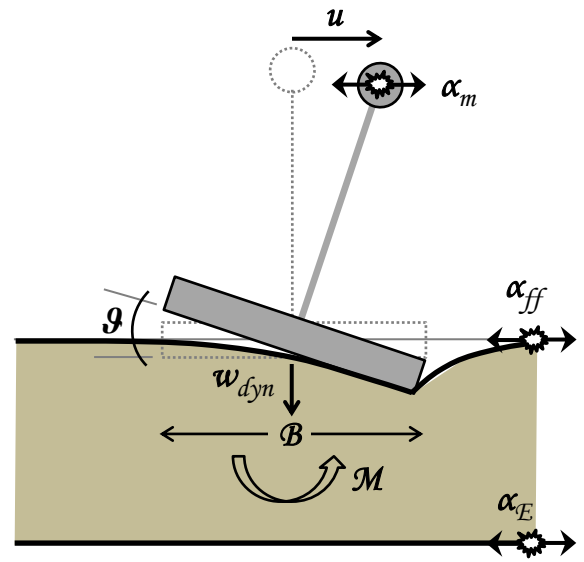
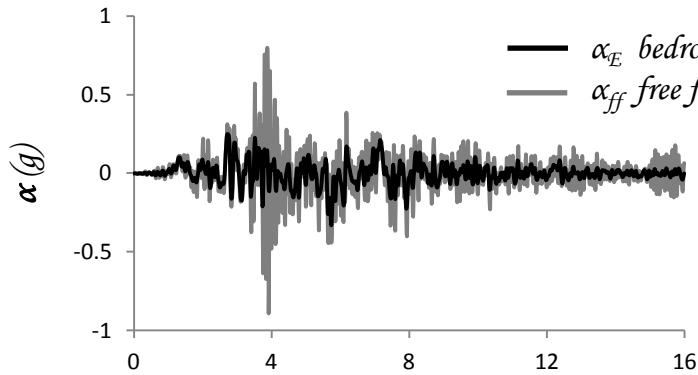
$$F_S = 2$$



Σχήμα 4.41β Rinaldi\_318 1994. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Sakarya 1999

$$F_S = 5$$

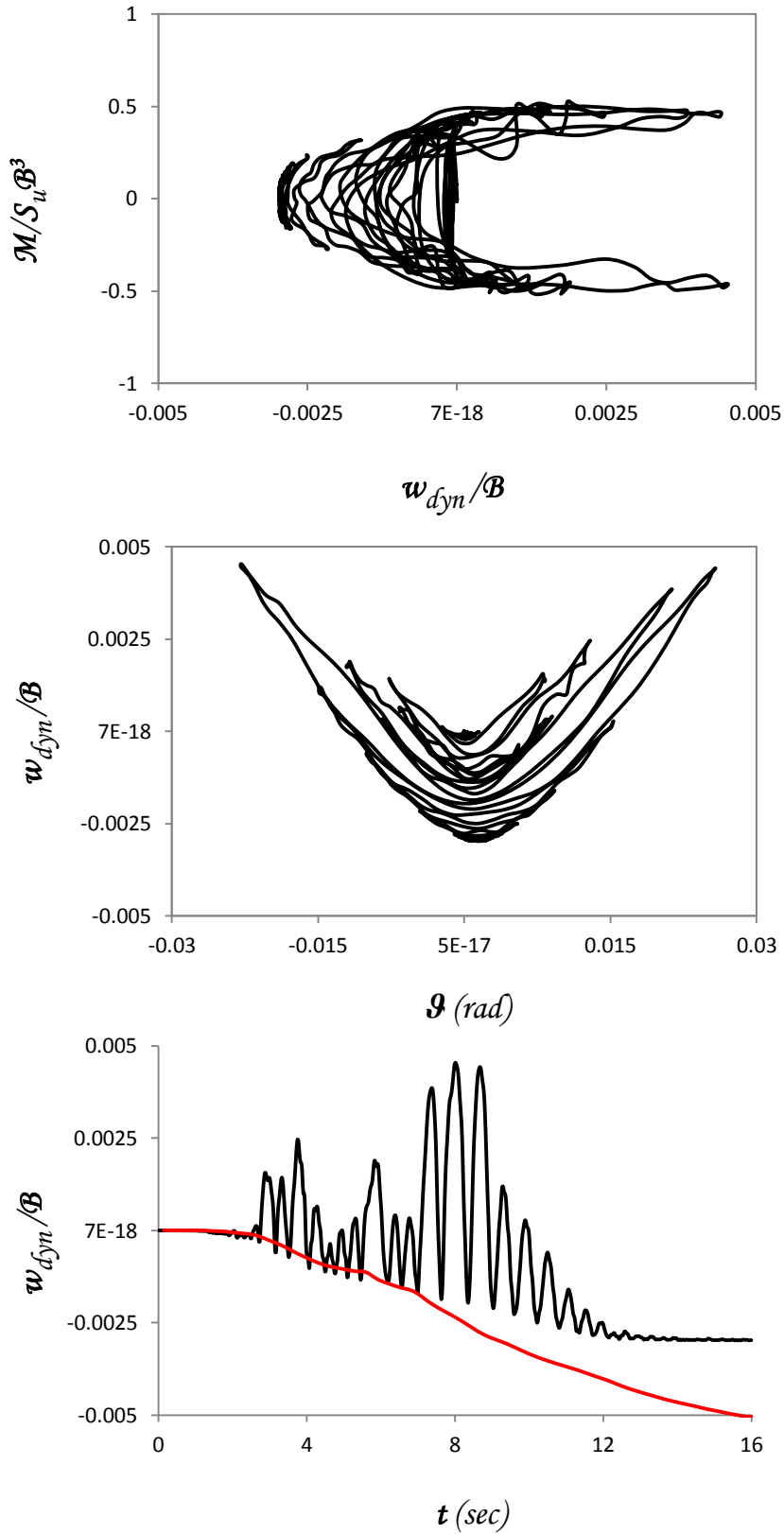


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.42α Sakarya 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Sakarya 1999

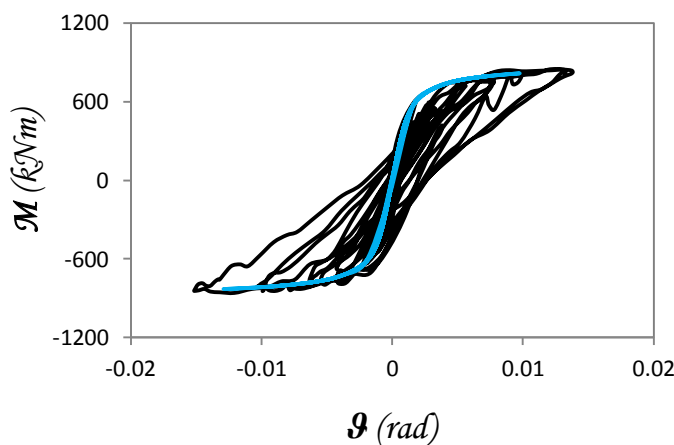
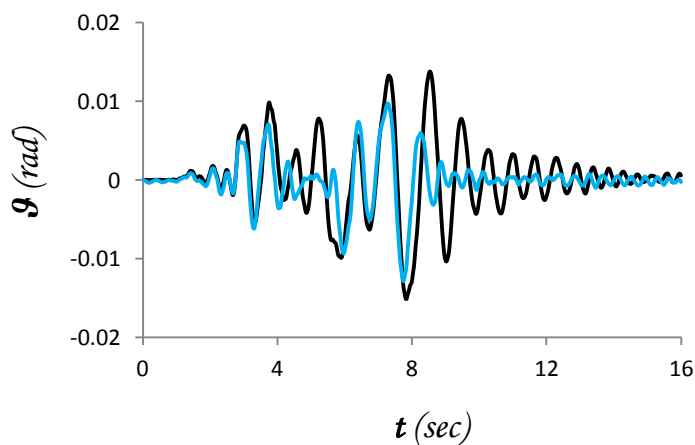
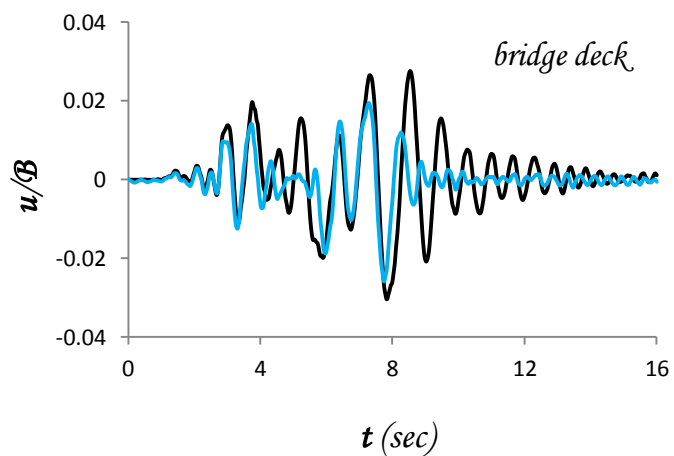
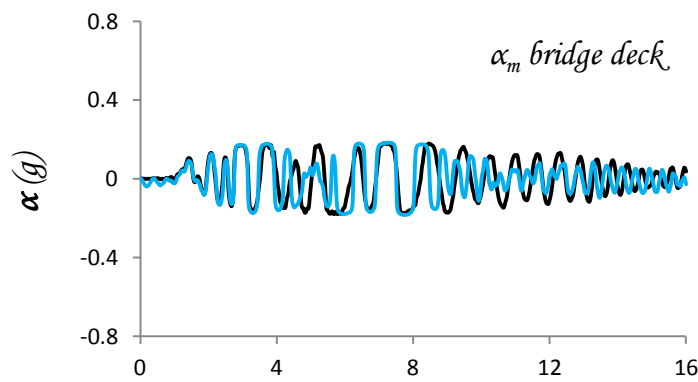
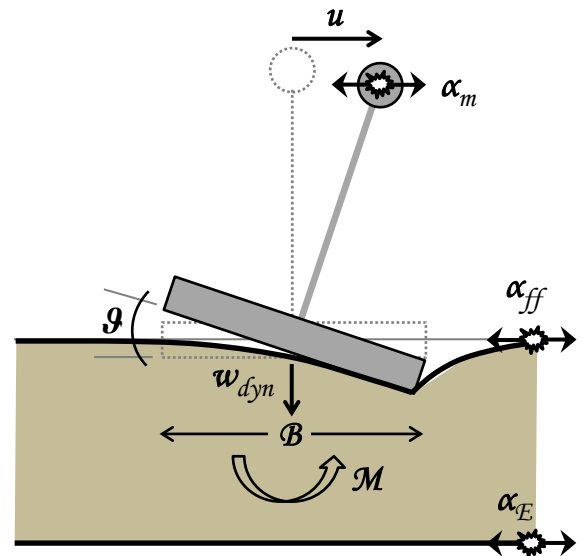
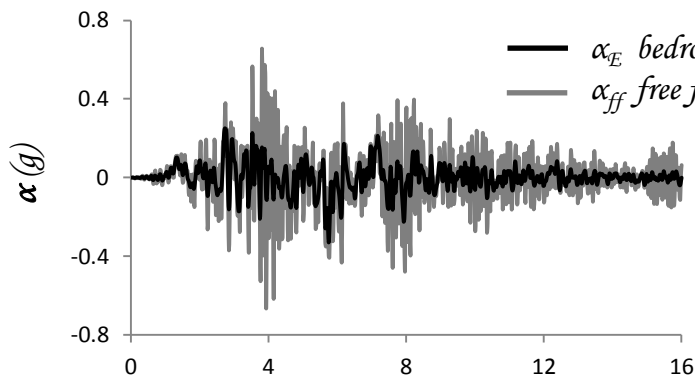
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.42β** Sakarya 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Sakarya 1999

$$F_S = 3.3$$



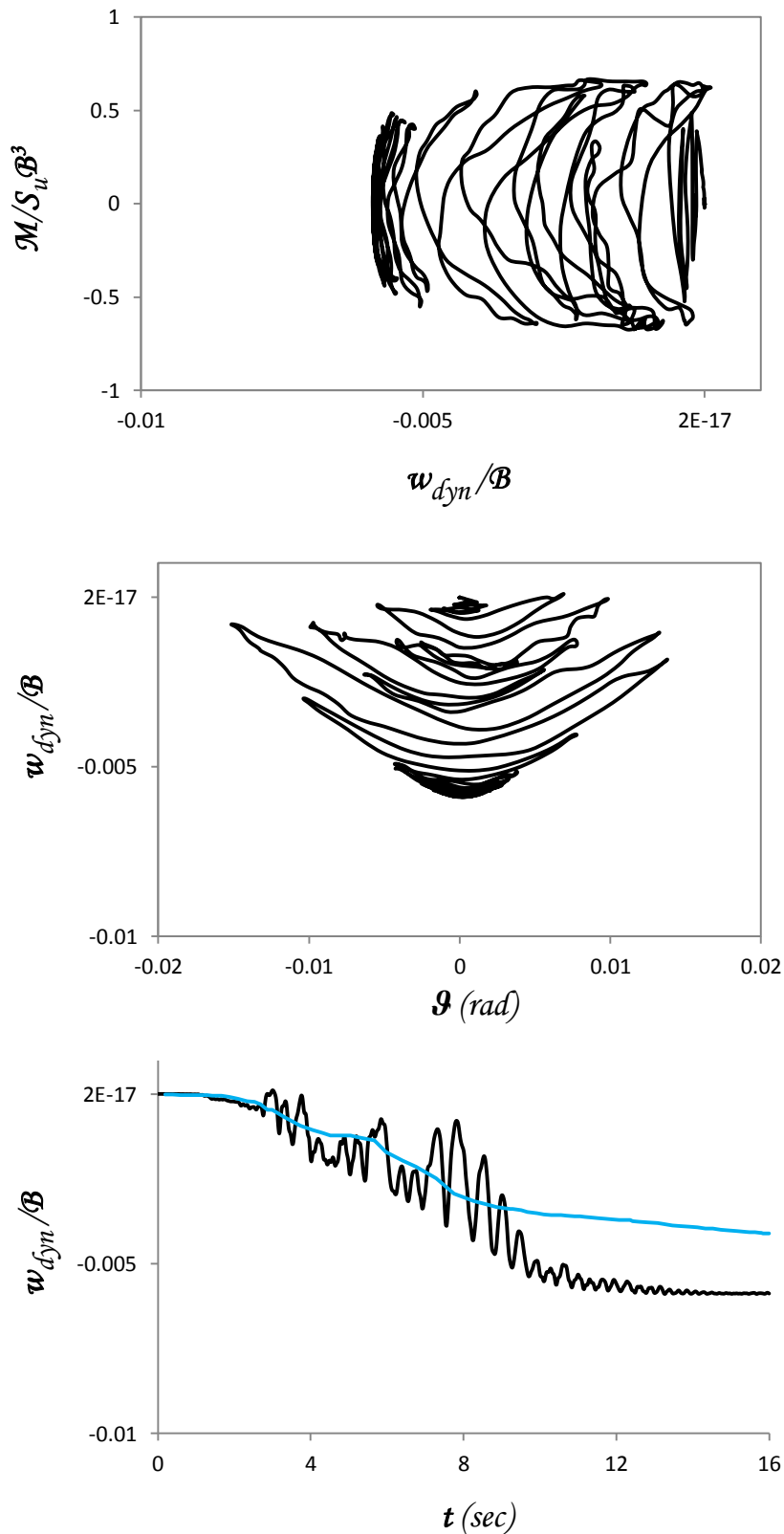
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.43α Sakarya 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Sakarya 1999

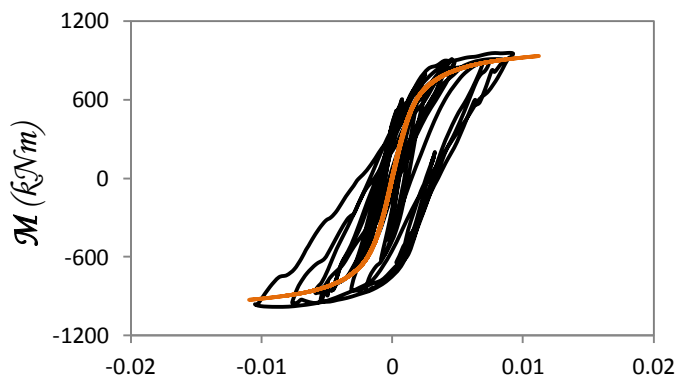
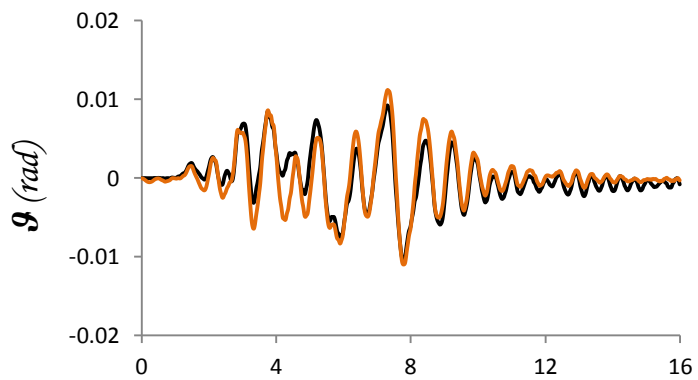
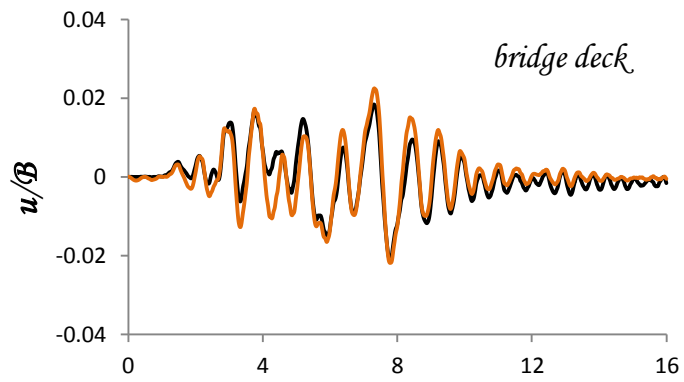
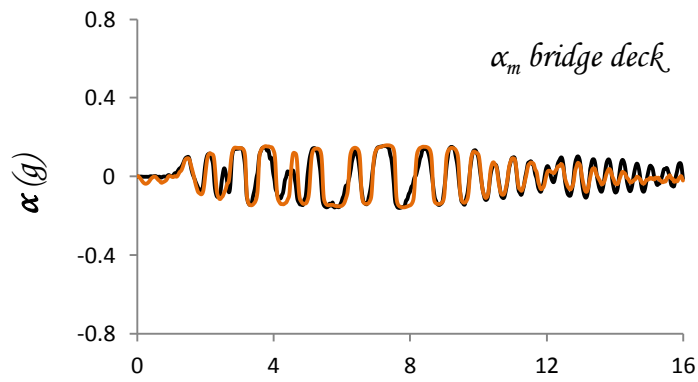
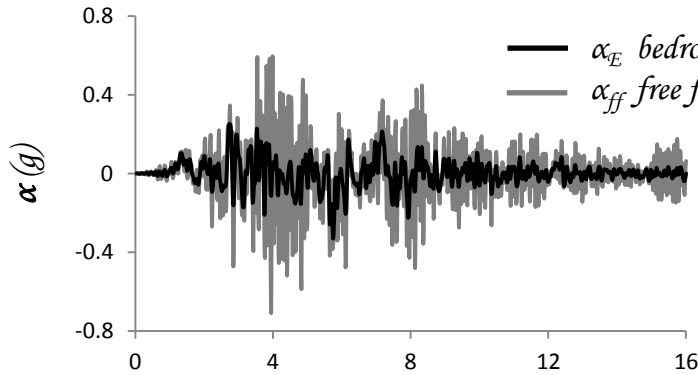
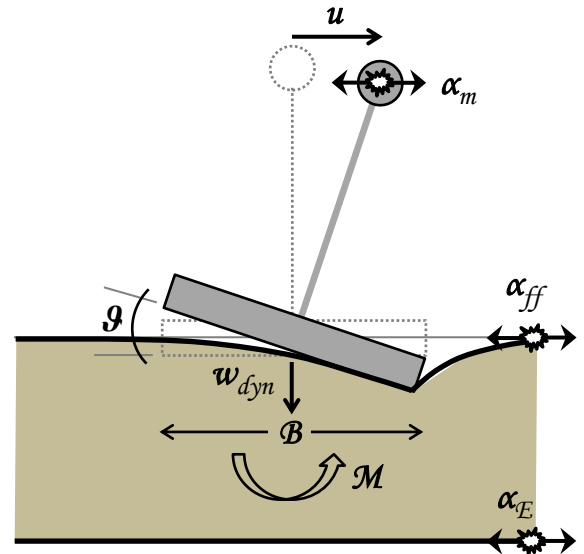
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.43β** Sakarya 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w$  –  $t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Sakarya 1999

$$F_S = 2.5$$



$t(sec)$

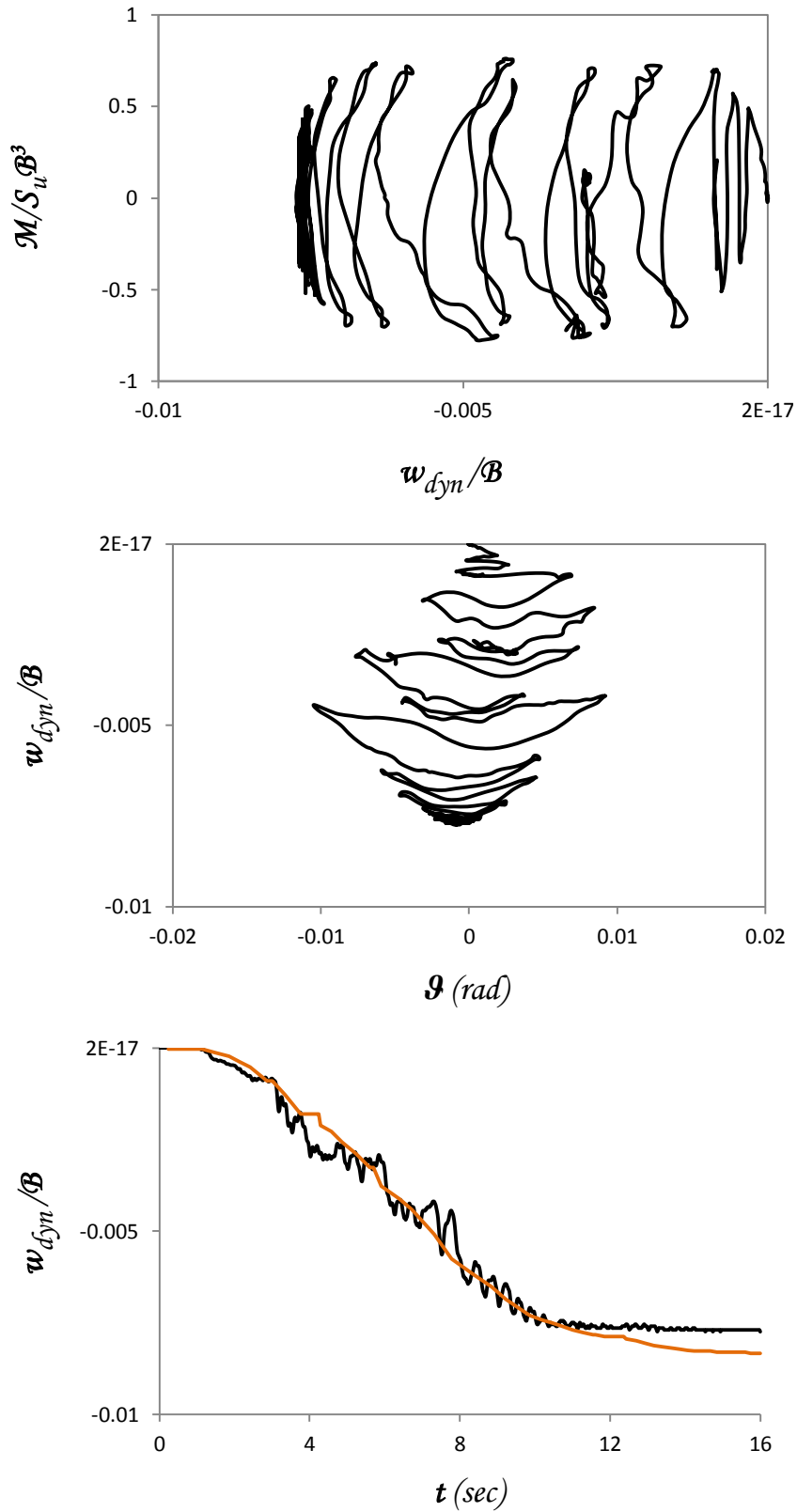
$\vartheta(rad)$

— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.44α Sakarya 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Sakarya 1999

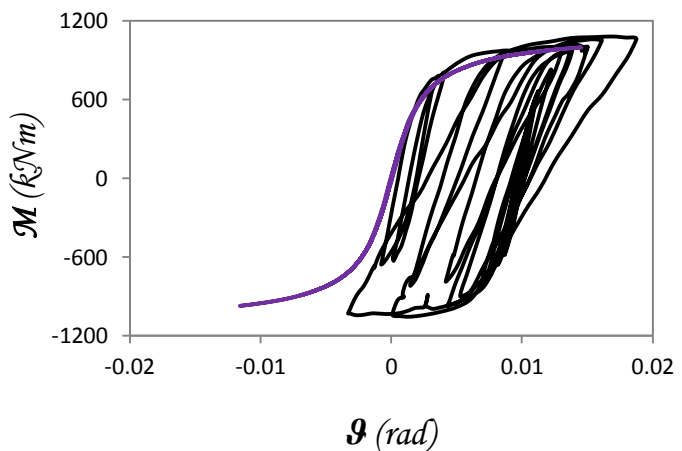
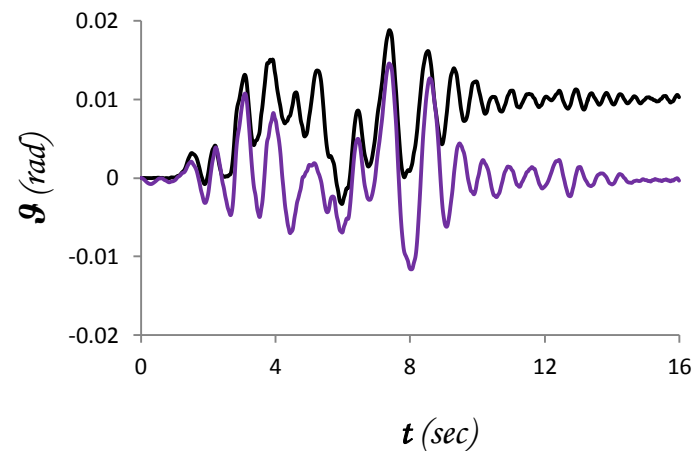
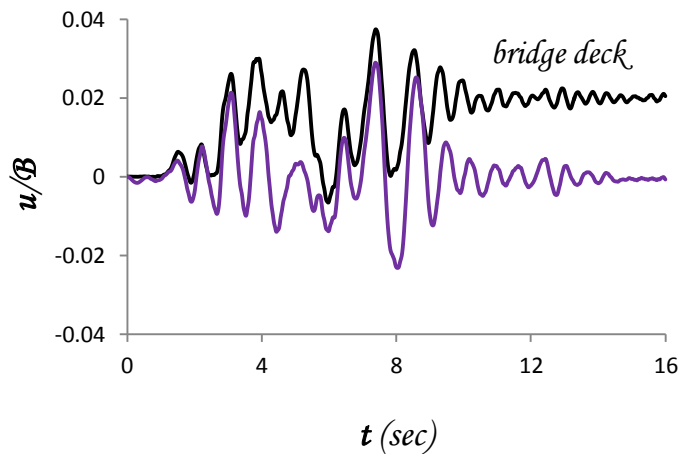
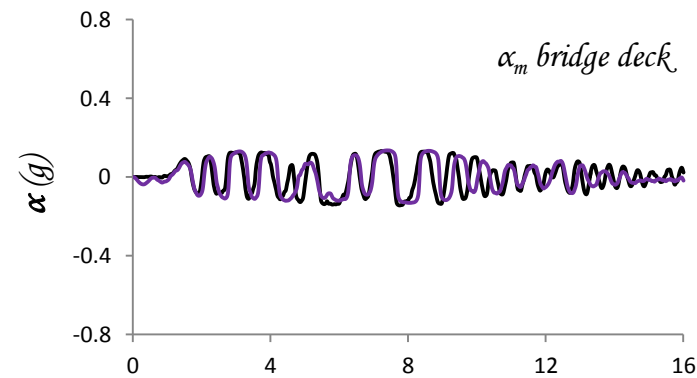
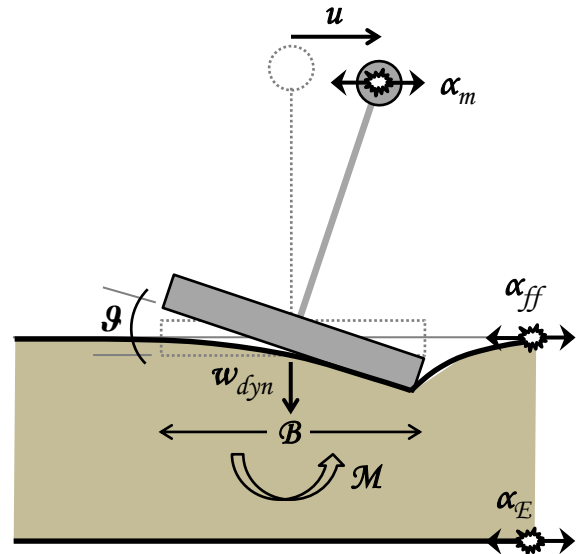
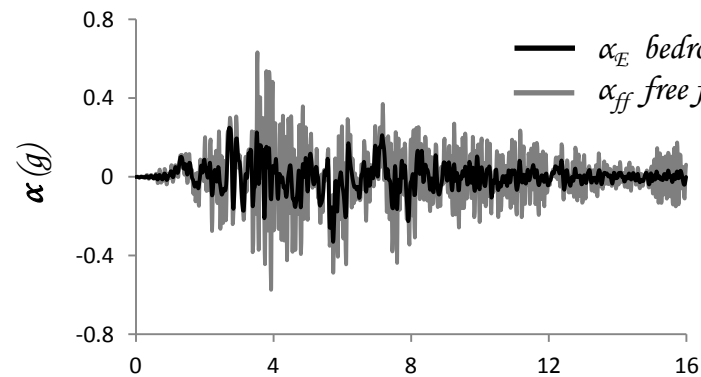
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.44β** Sakarya 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Sakarya 1999

$$F_S = 2$$

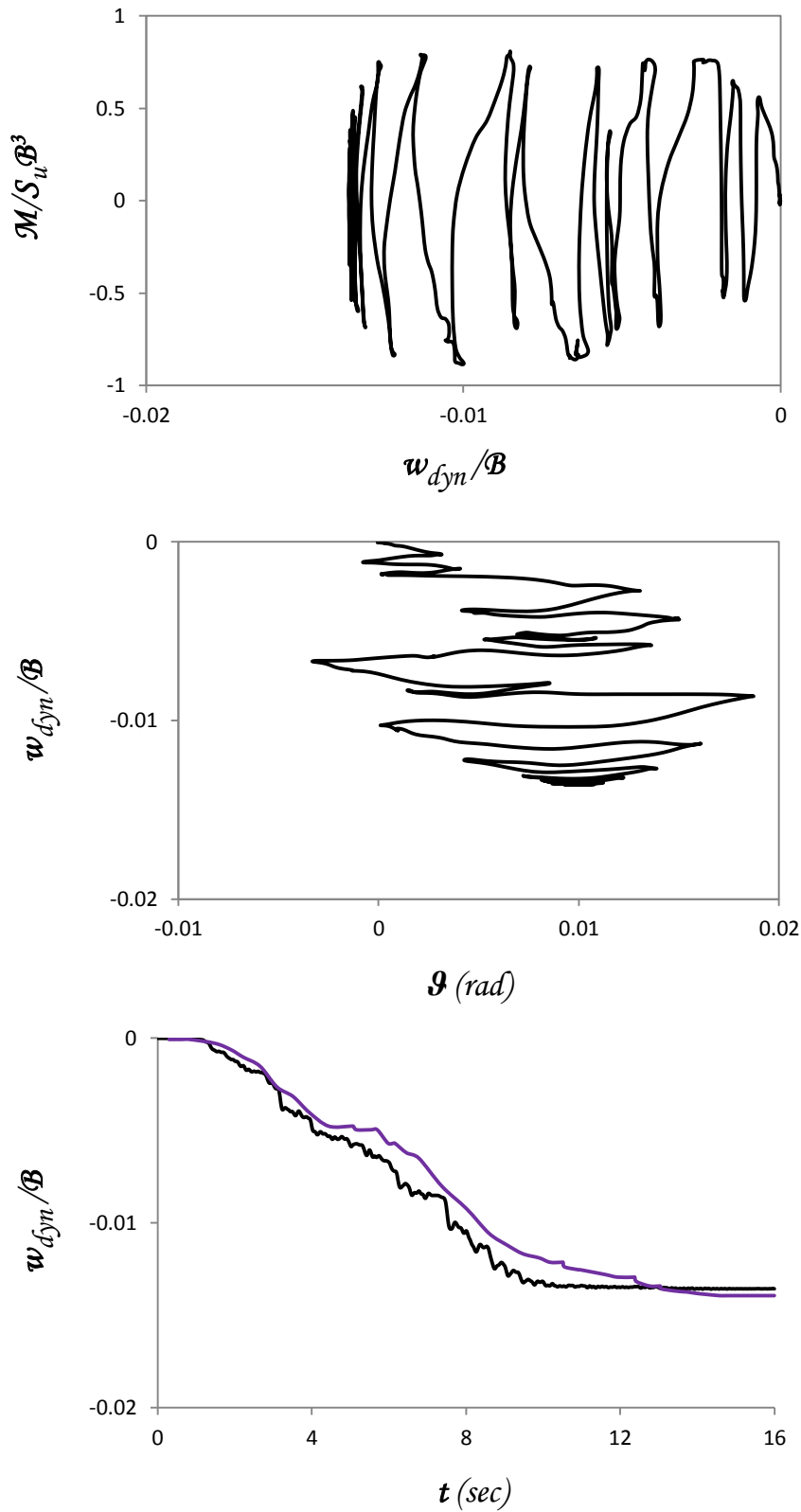


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.45α Sakarya 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Sakarya 1999

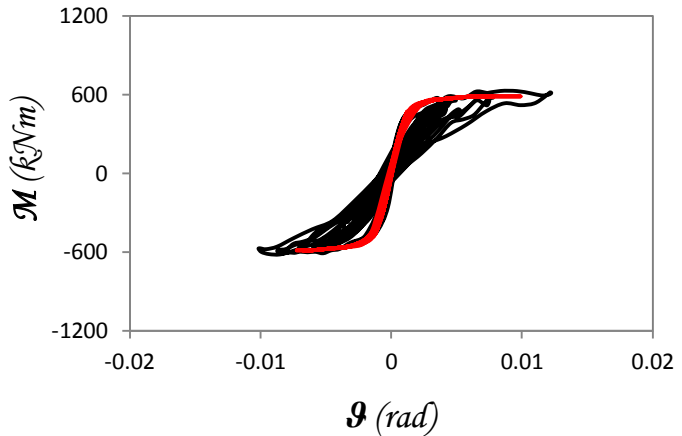
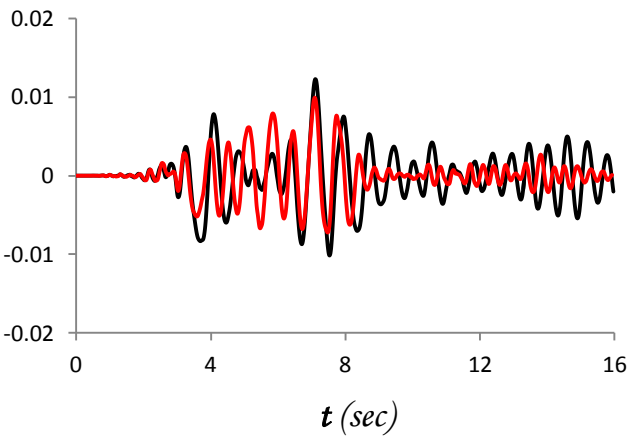
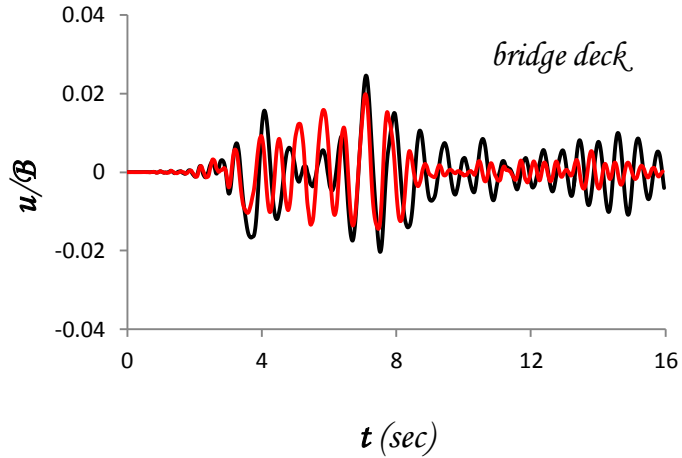
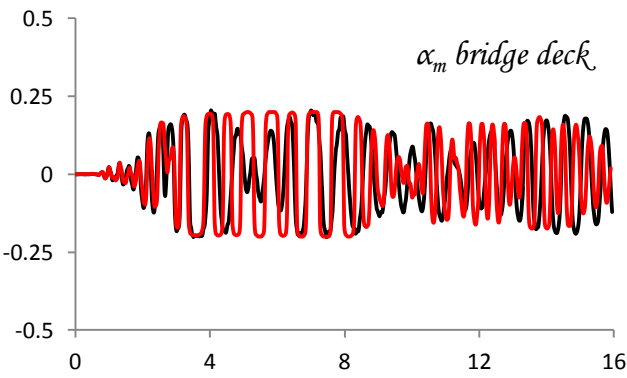
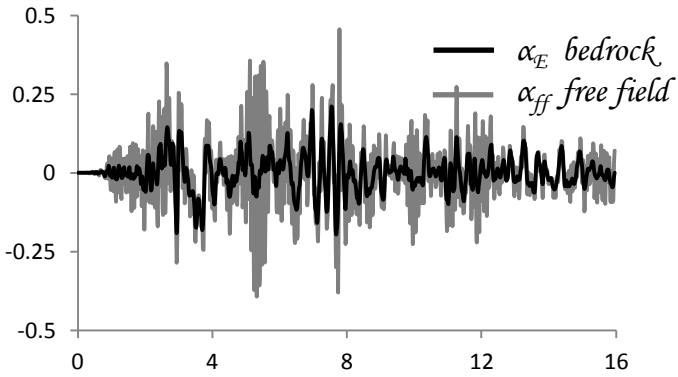
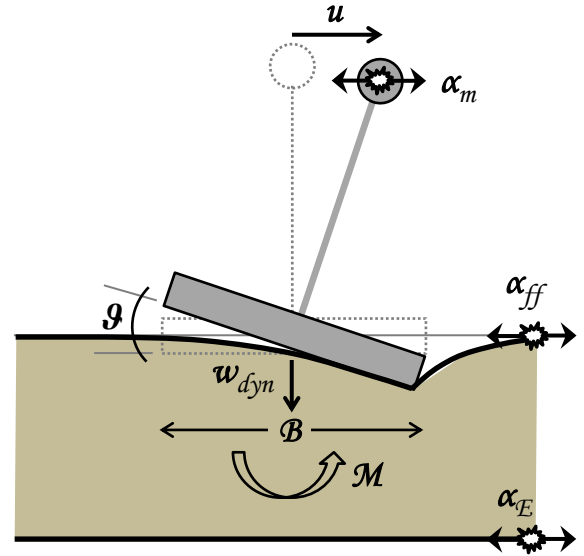
$$F_S = 2$$



**Σχήμα 4.45β** Sakarya 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Izmit\_090 1999

$$F_S = 5$$

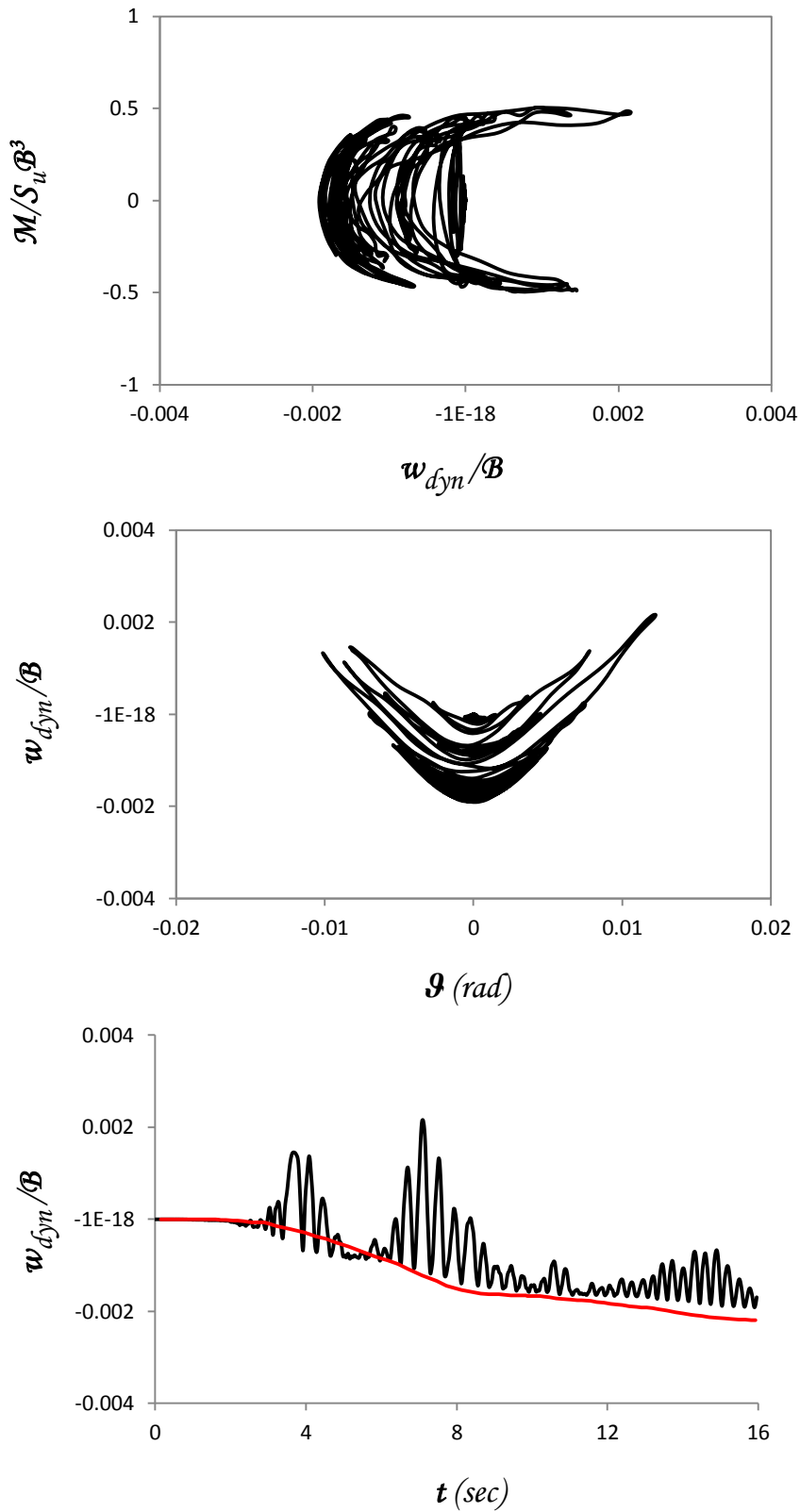


— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.46α** *Izmit\_090 1999*. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - \text{ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για } F_S = 5$ .

Izmit\_090 1999

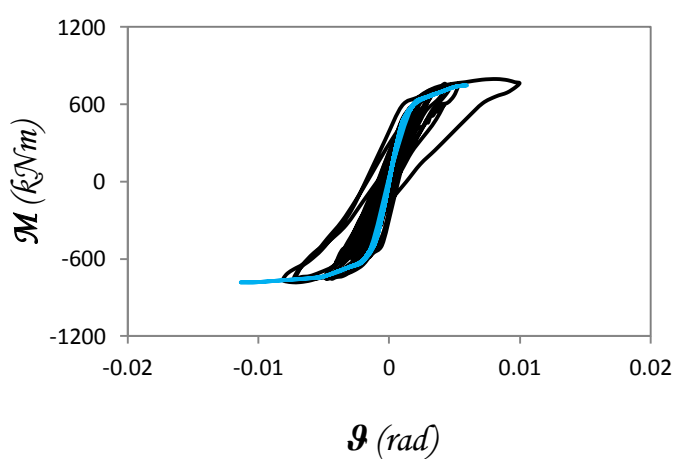
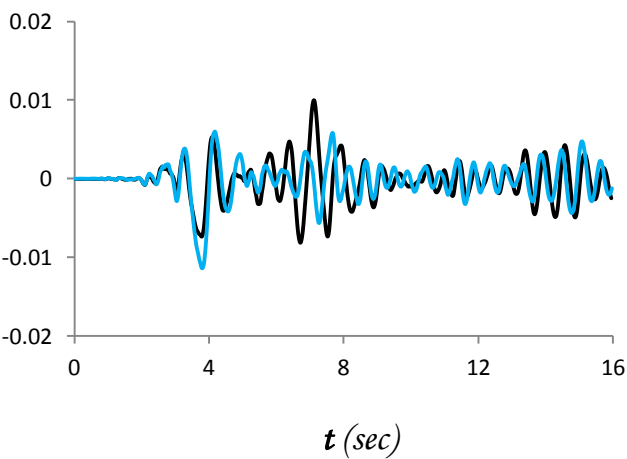
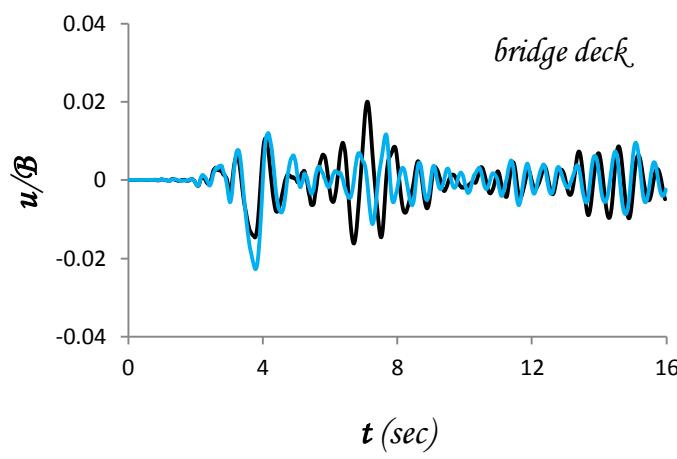
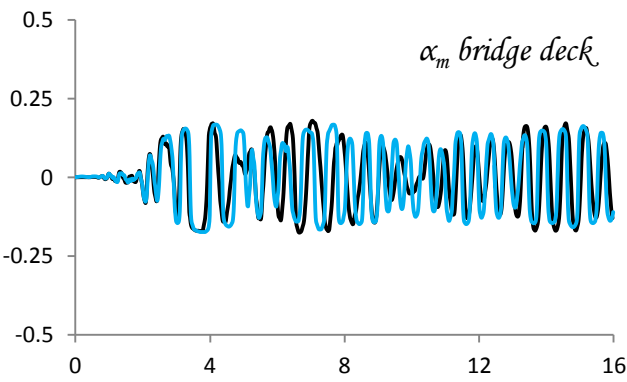
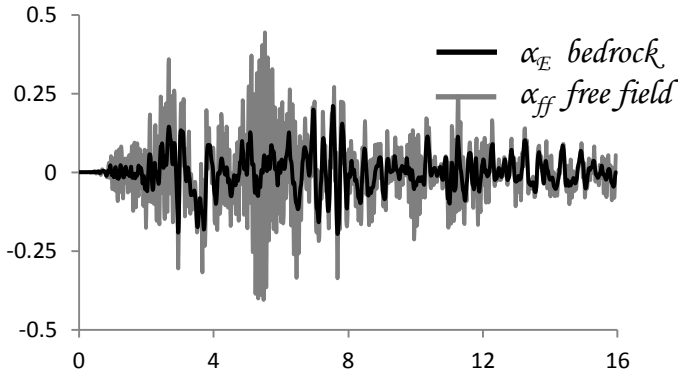
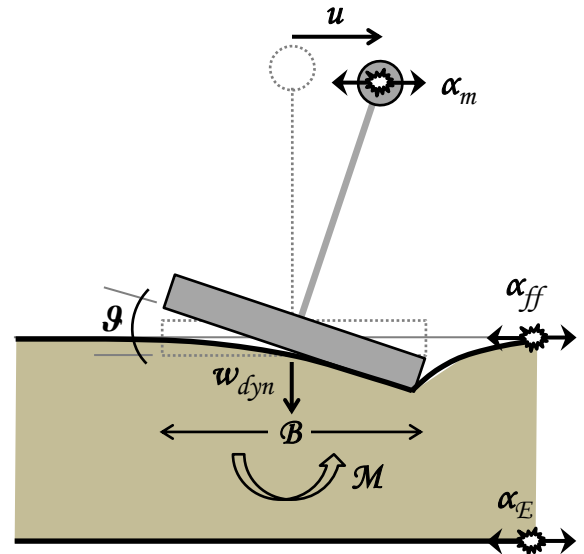
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.46β** *Izmit\_090 1999*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Izmit\_090 1999

$$F_S = 3.3$$



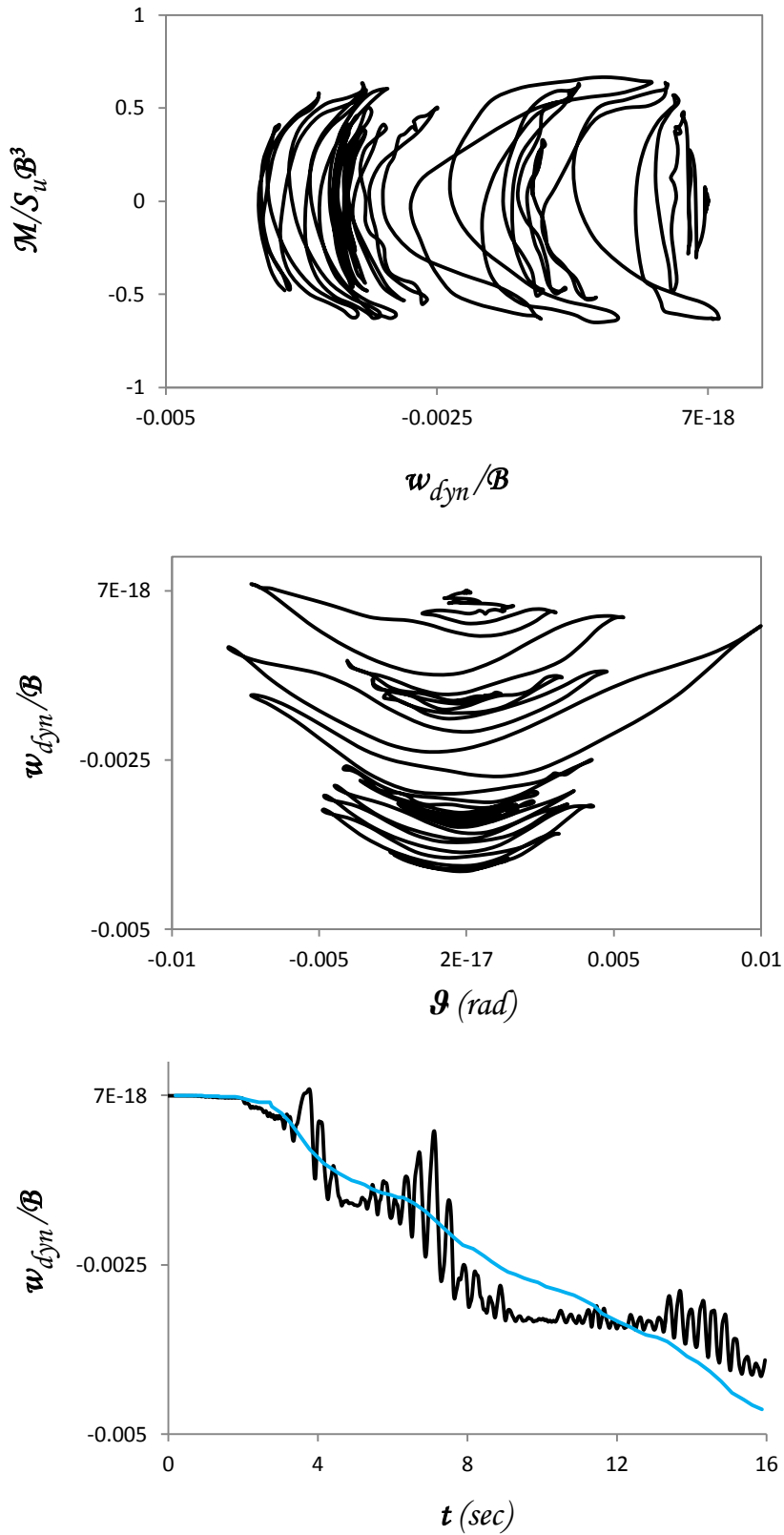
— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.47α** *Izmit\_090 1999*. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  – ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Izmit\_090 1999

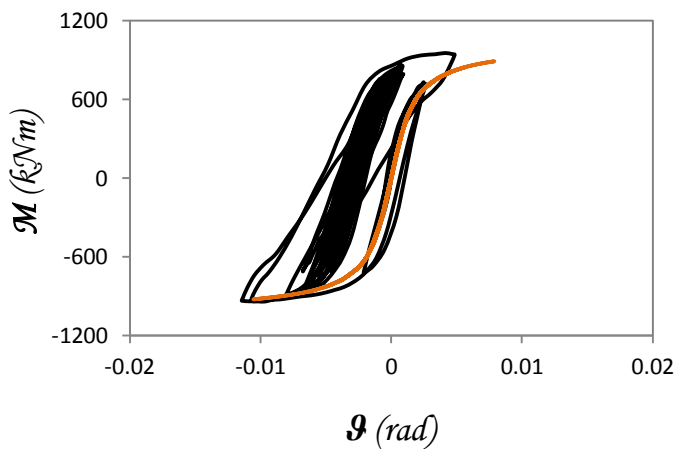
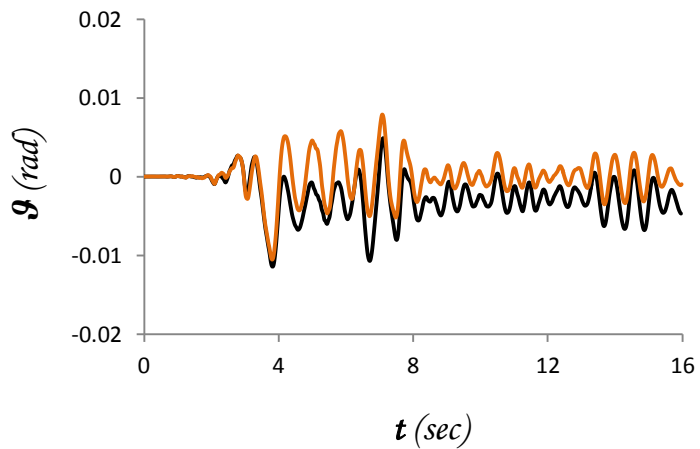
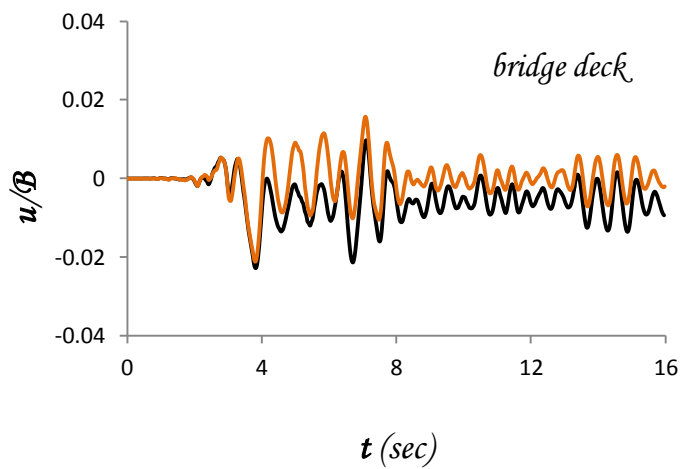
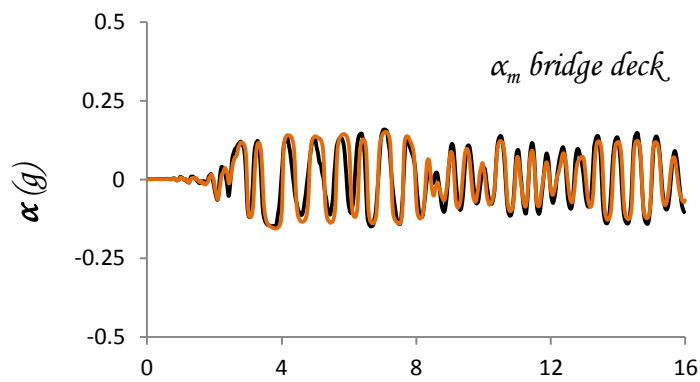
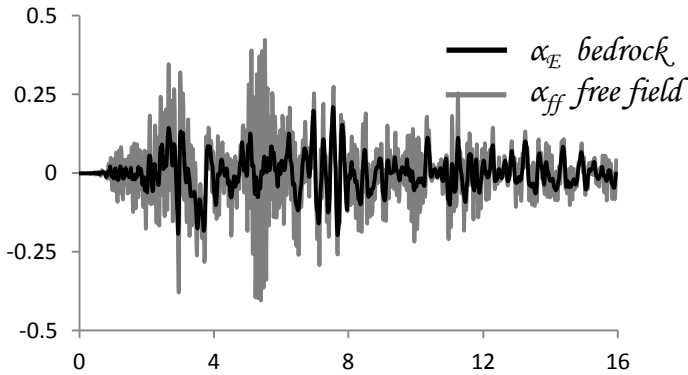
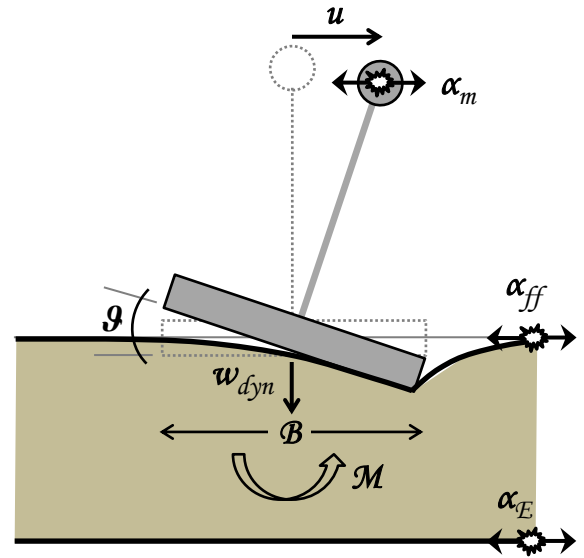
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.47β** Izmit\_090 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Izmit\_090 1999

$$F_S = 2.5$$

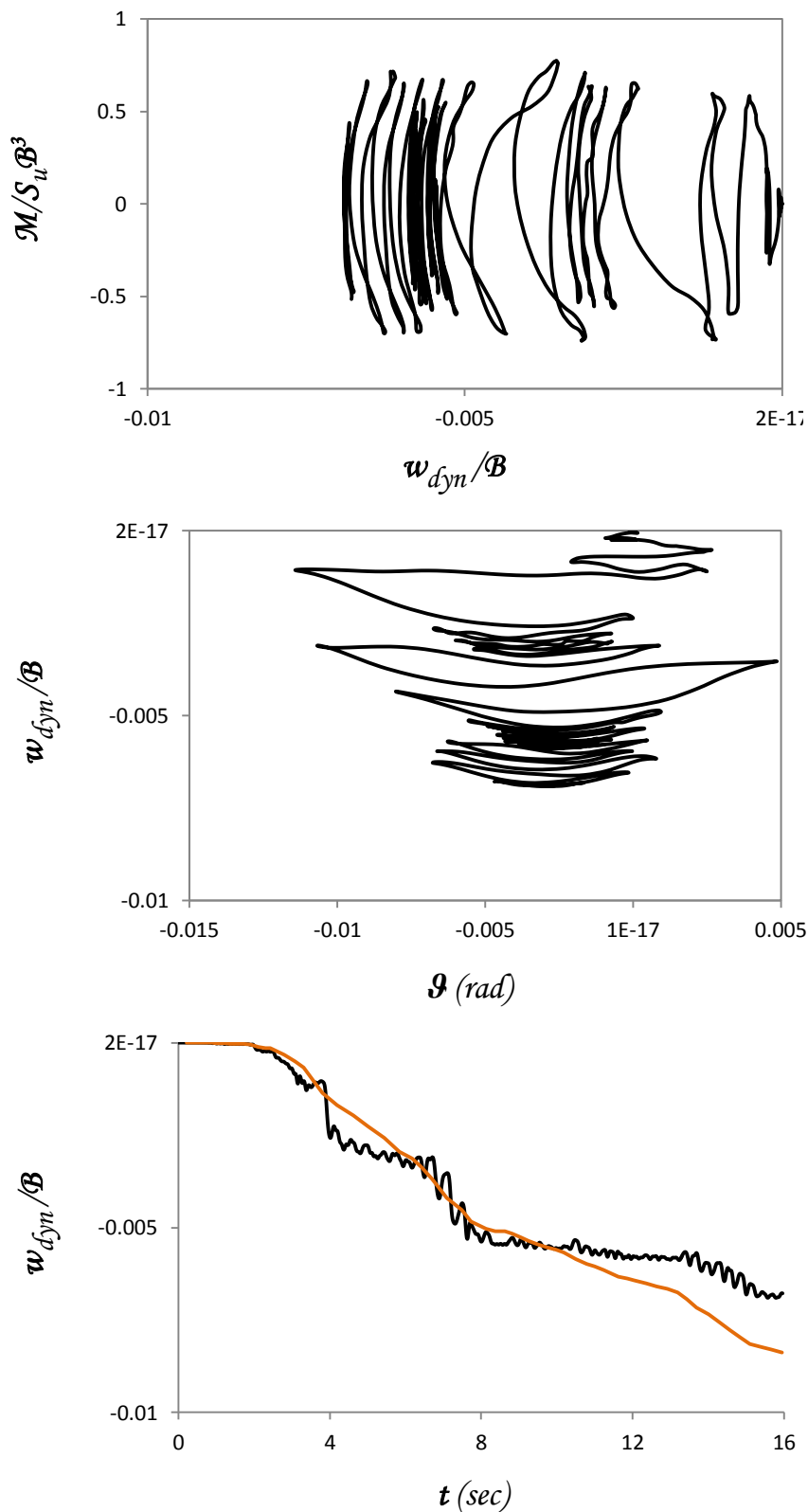


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.48α Izmit\_090 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - \text{ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για } F_S = 2.5$ .

Izmit\_090 1999

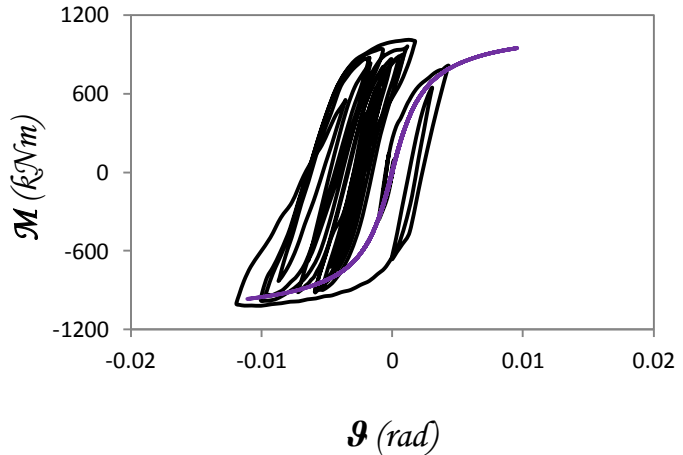
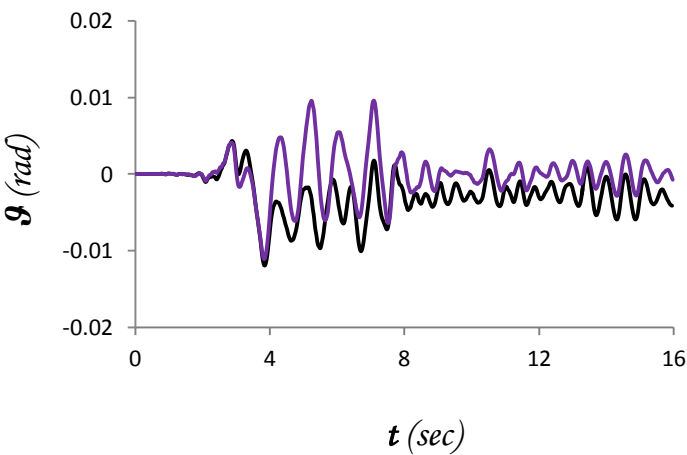
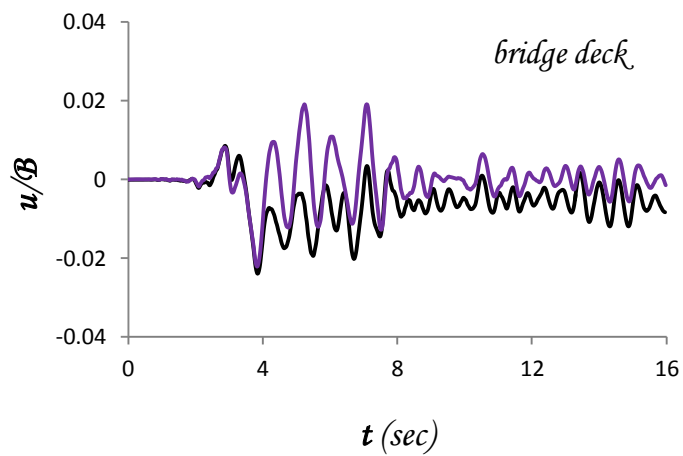
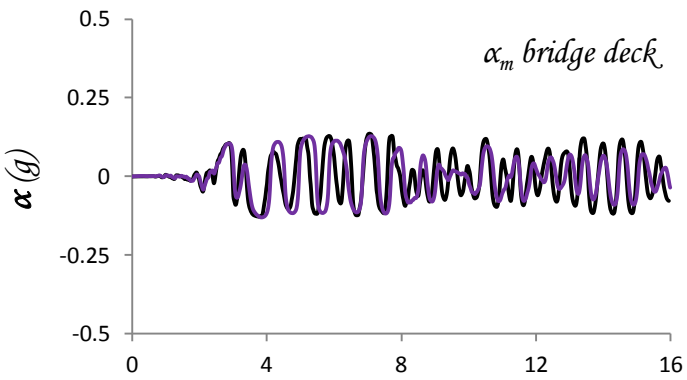
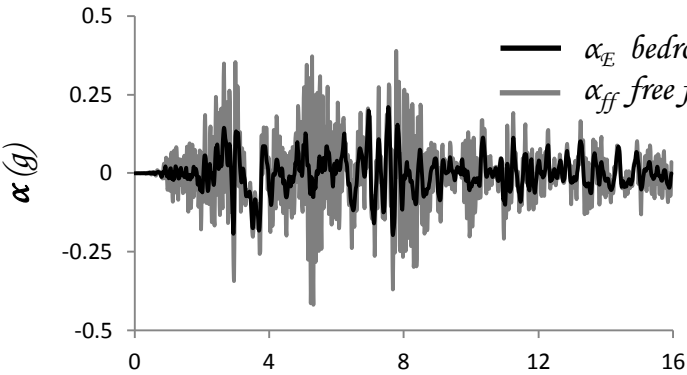
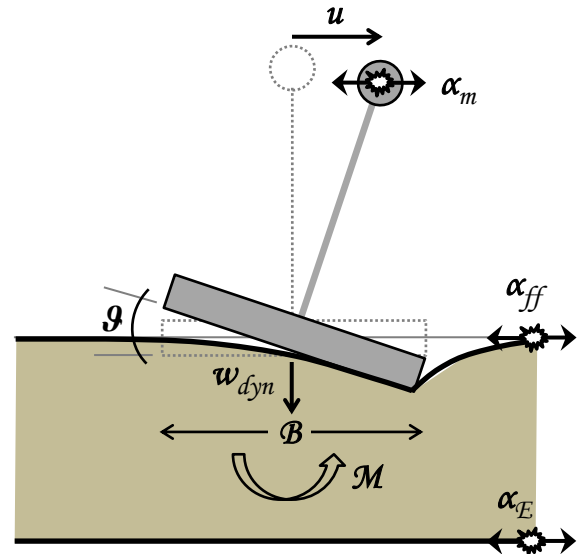
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.48β** *Izmit\_090 1999*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Izmit\_090 1999

$$F_S = 2$$

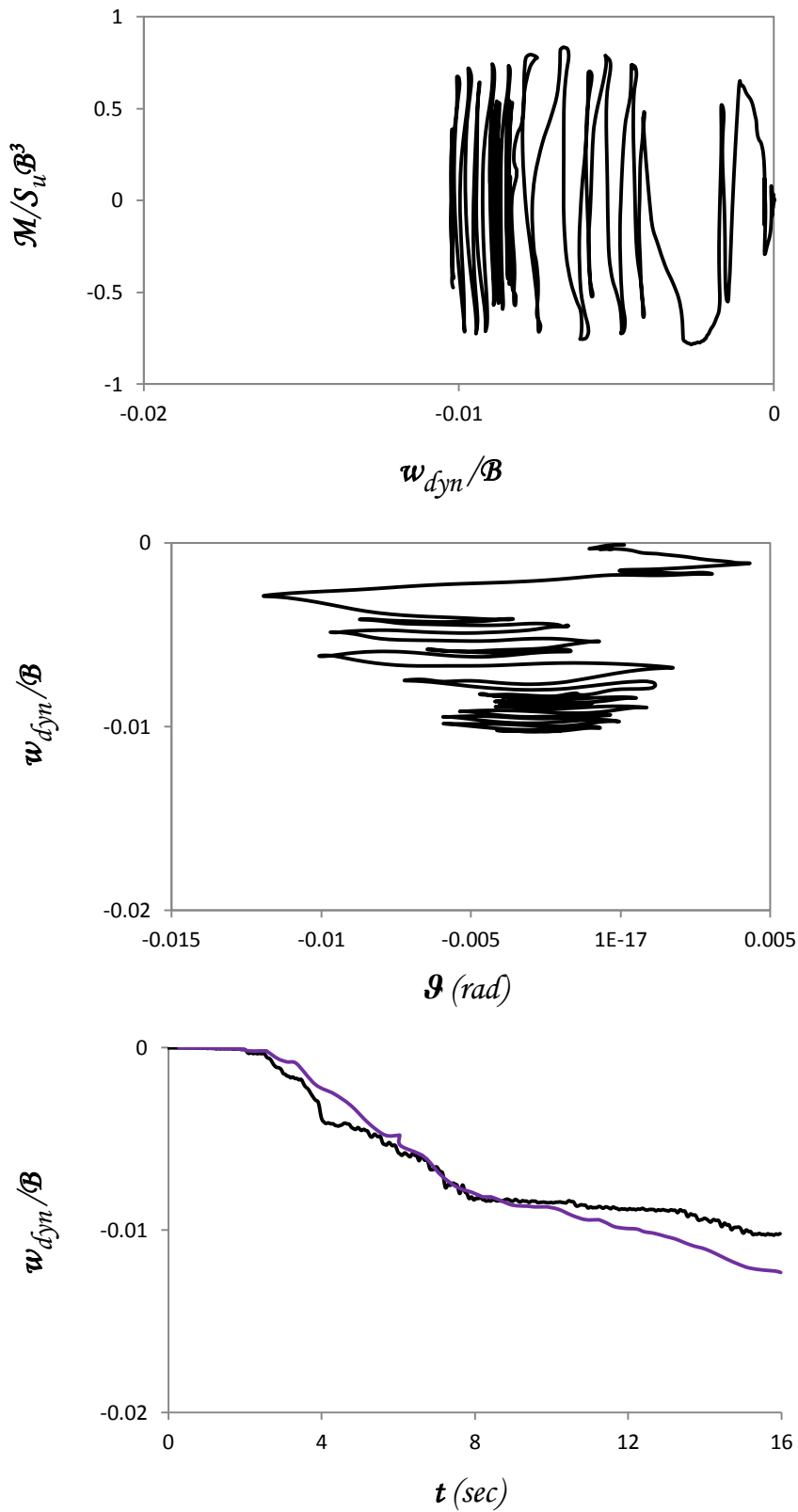


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.49α Izmit\_090 1999. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta - \text{ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για } F_S = 2$ .

Izmit\_090 1999

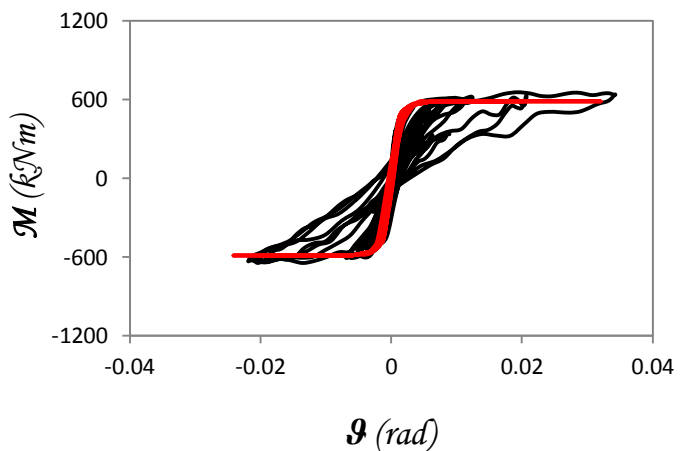
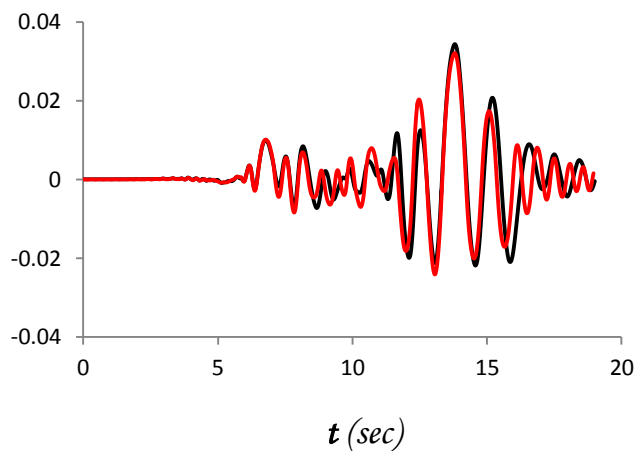
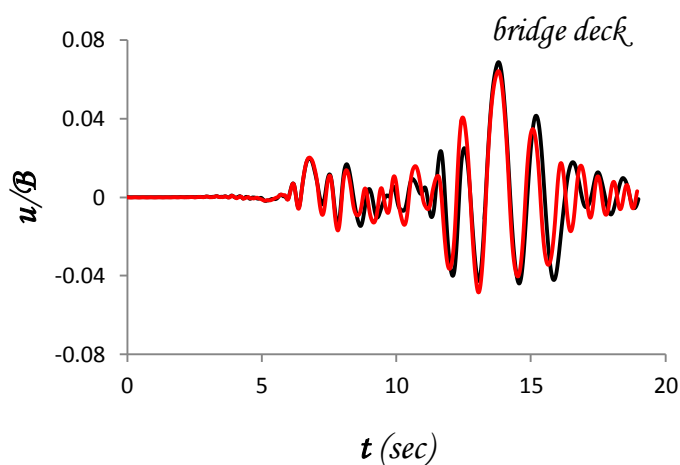
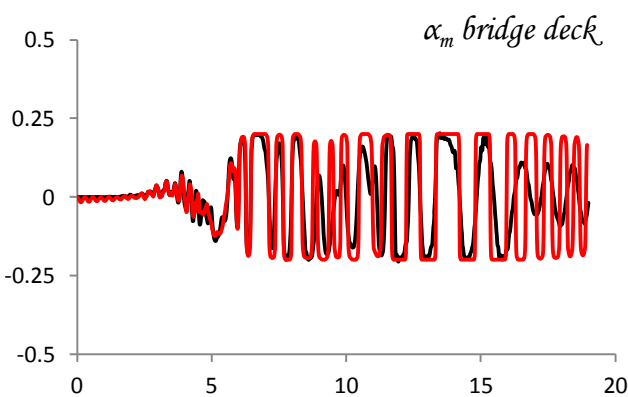
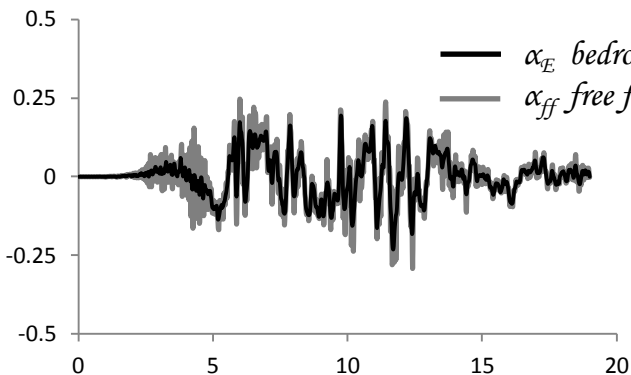
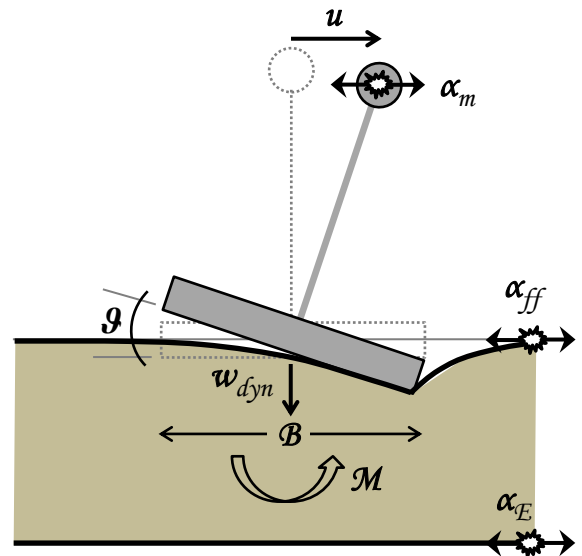
$$F_S = 2$$



**Σχήμα 4.49β** *Izmit\_090 1999*. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Yarimca\_060 1999

$$F_S = 5$$

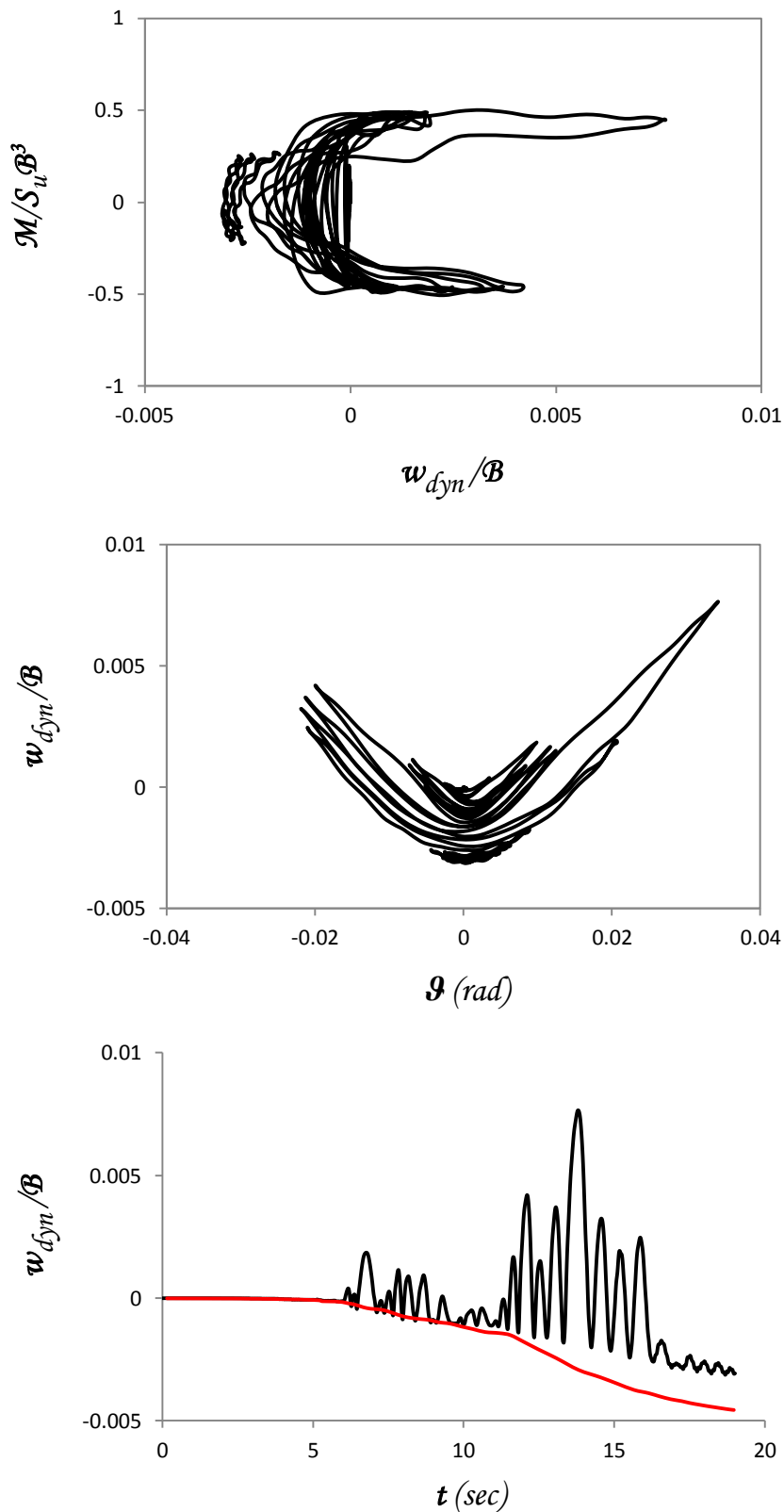


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.50α Yarimca\_060 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \theta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Yarimca\_060 1999

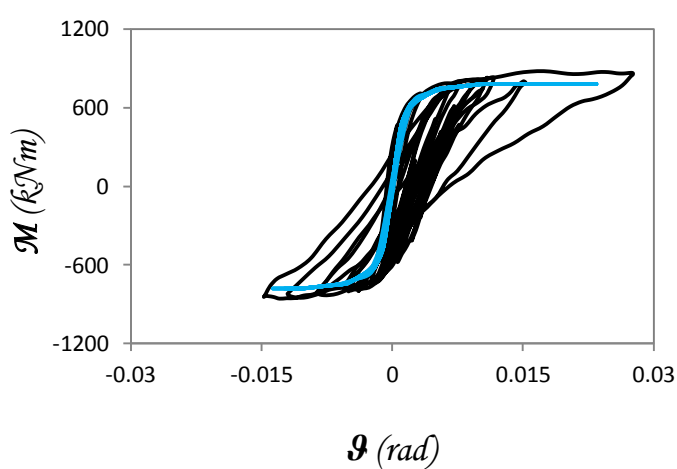
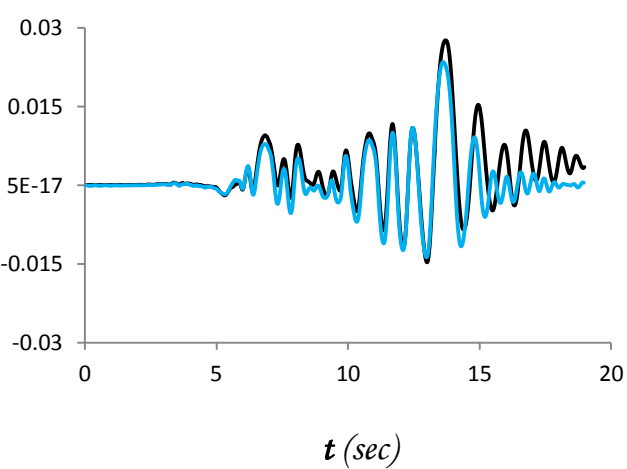
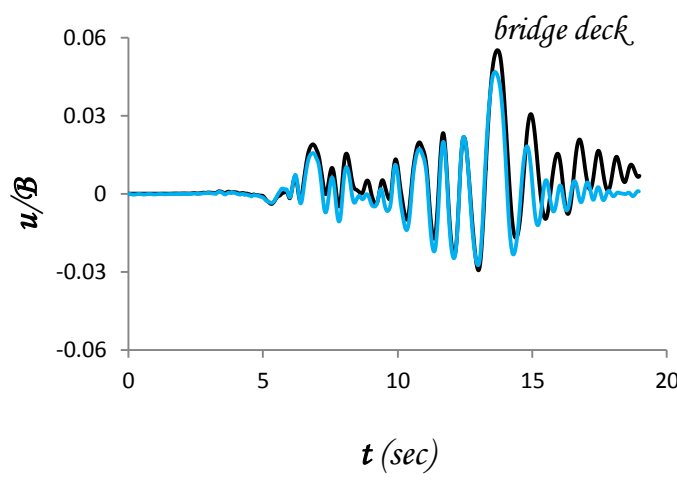
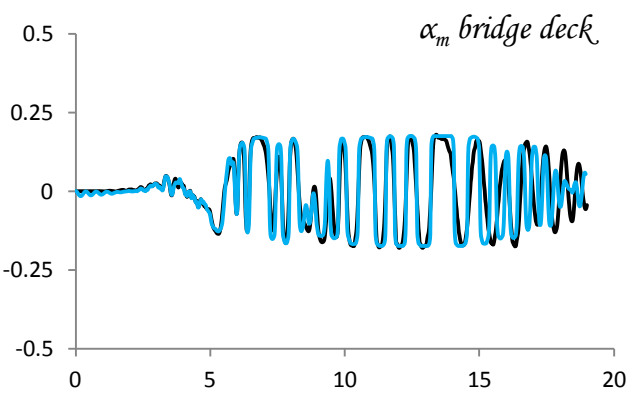
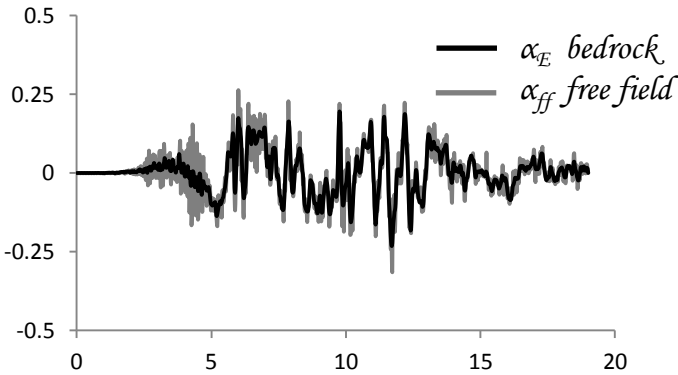
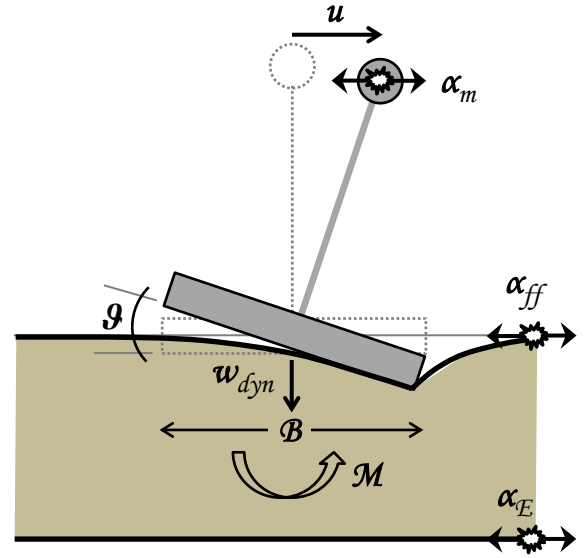
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.50β** Yarimca\_060 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Yarimca\_060 1999

$$F_S = 3.3$$



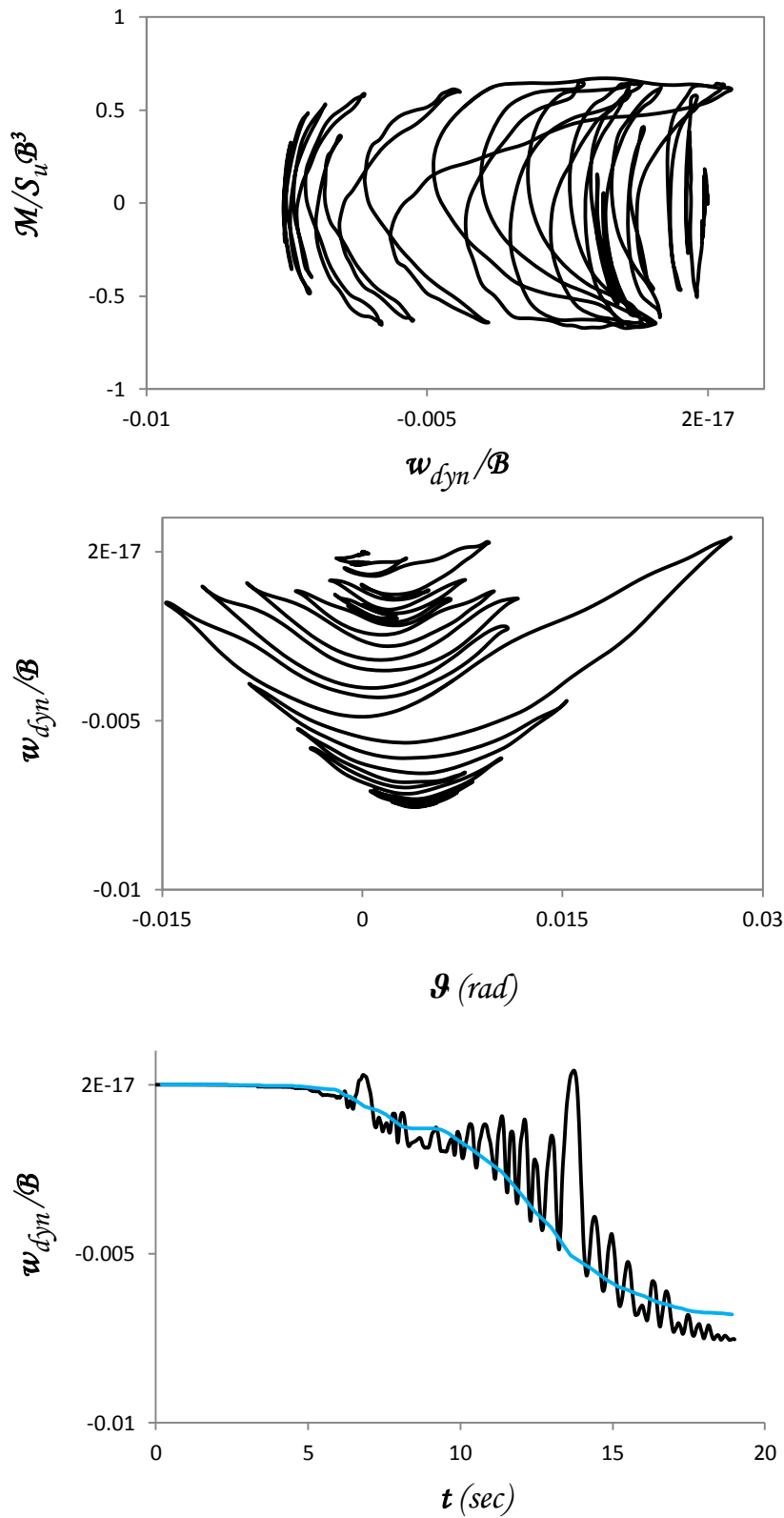
— FEM  
— Ελατήριο

**Σχήμα 4.51α** Yarimca\_060 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Yarimca\_060 1999

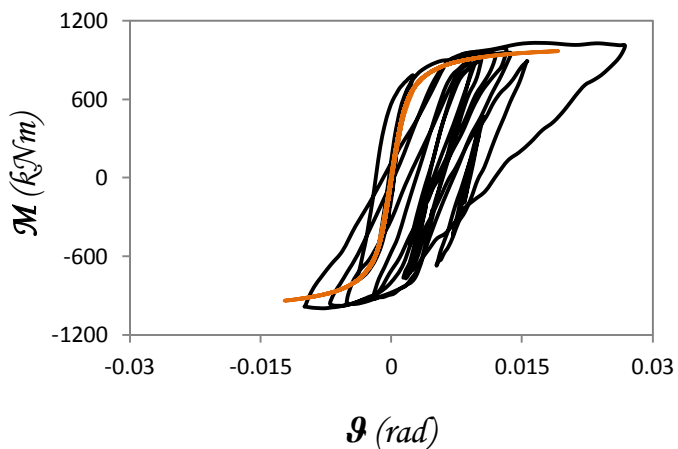
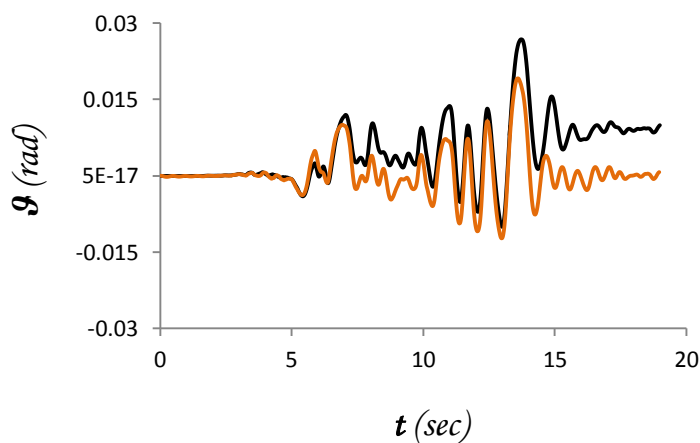
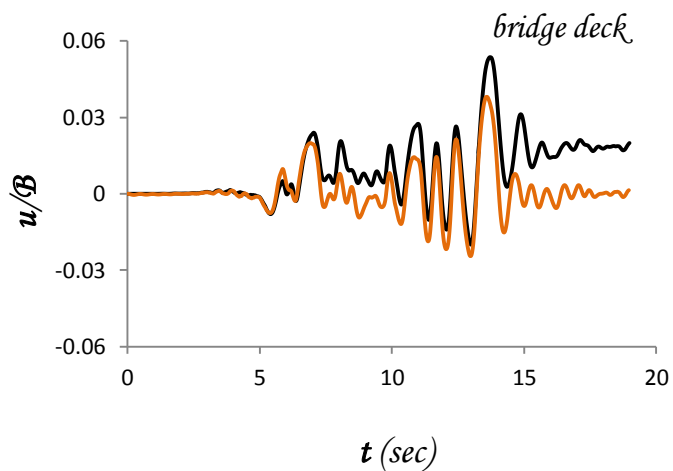
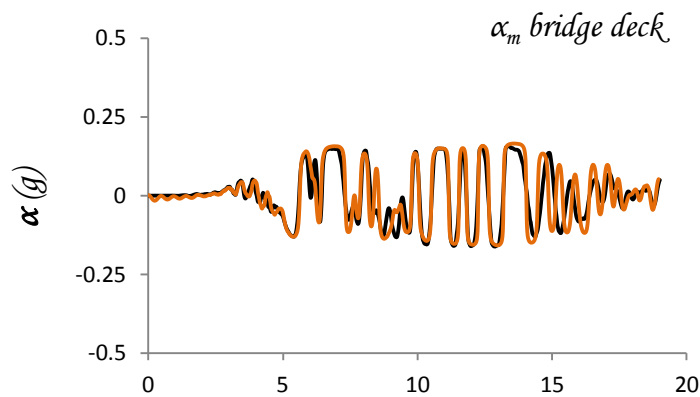
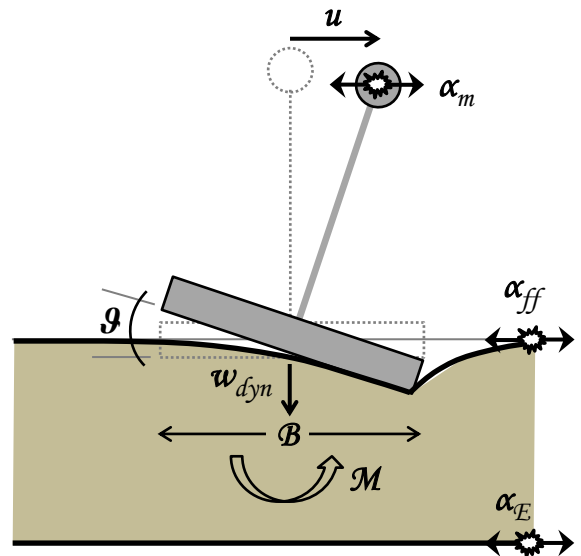
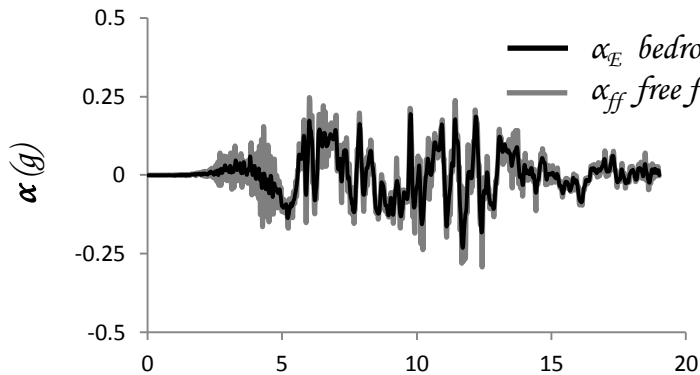
$$F_s = 3.3$$



**Σχήμα 4.51β** Yarimca\_060 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_s = 3.3$ .

Yarimca\_060 1999

$$F_S = 2.5$$

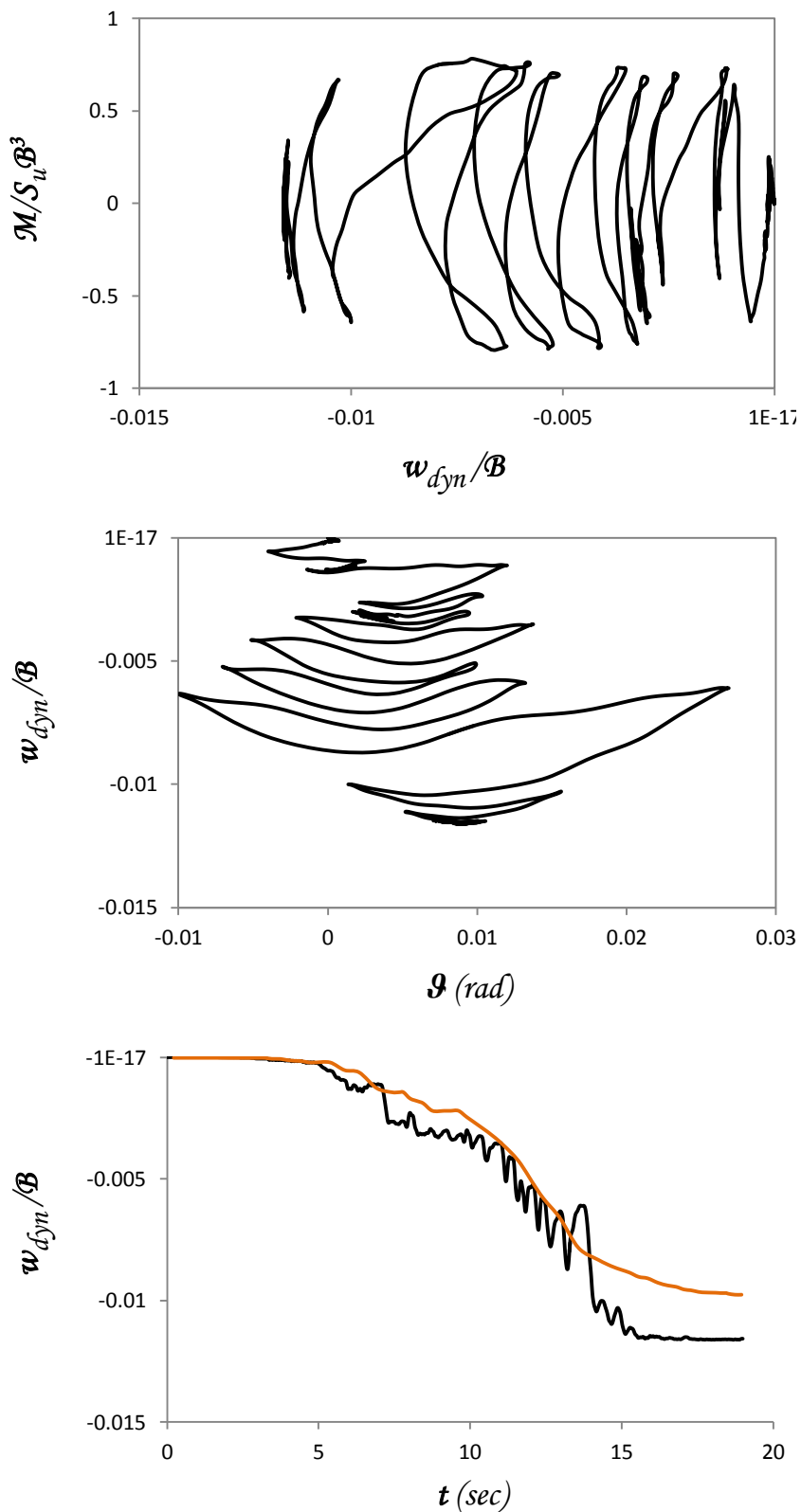


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.52α Yarimca\_060 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Yarimca\_060 1999

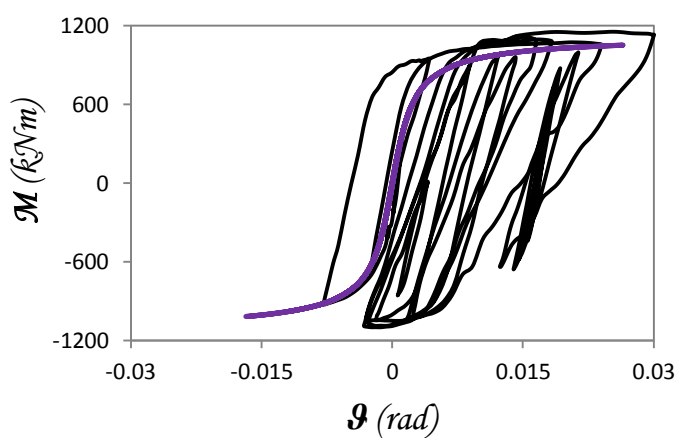
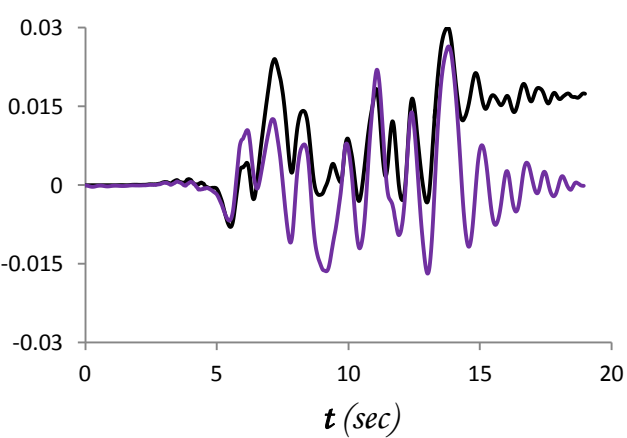
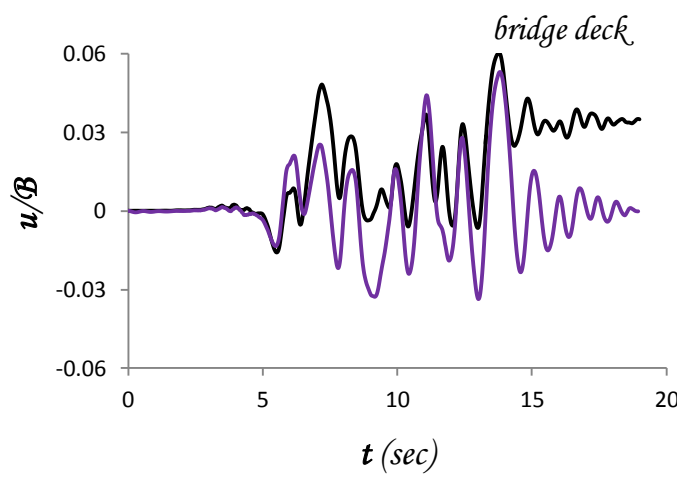
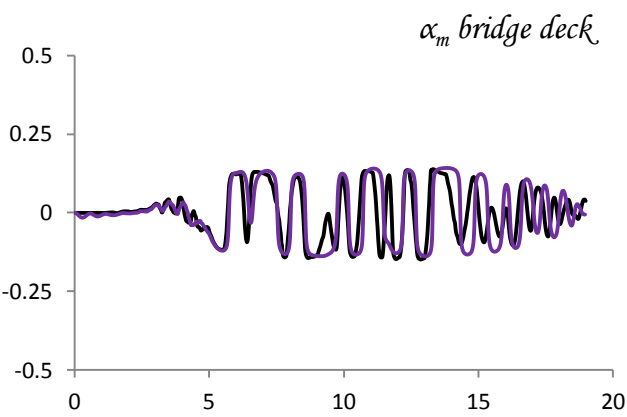
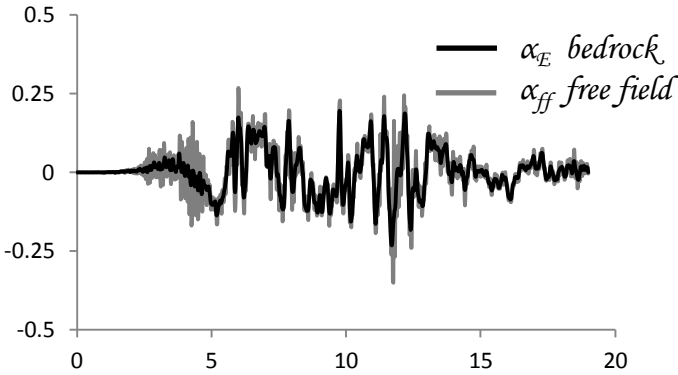
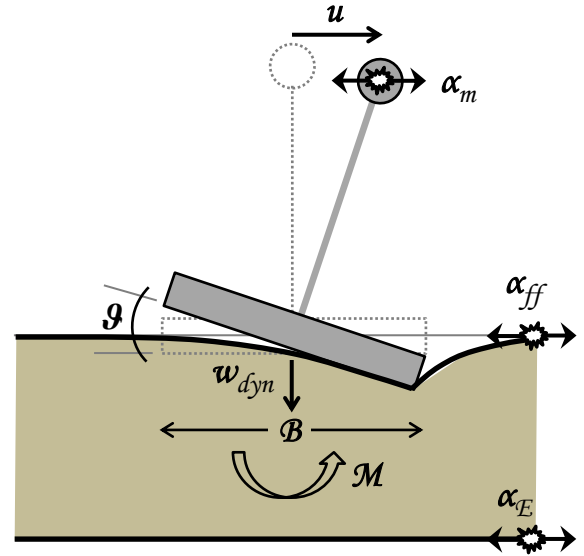
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.52β** Yarimca\_060 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Yarimca\_060 1999

$$F_S = 2$$

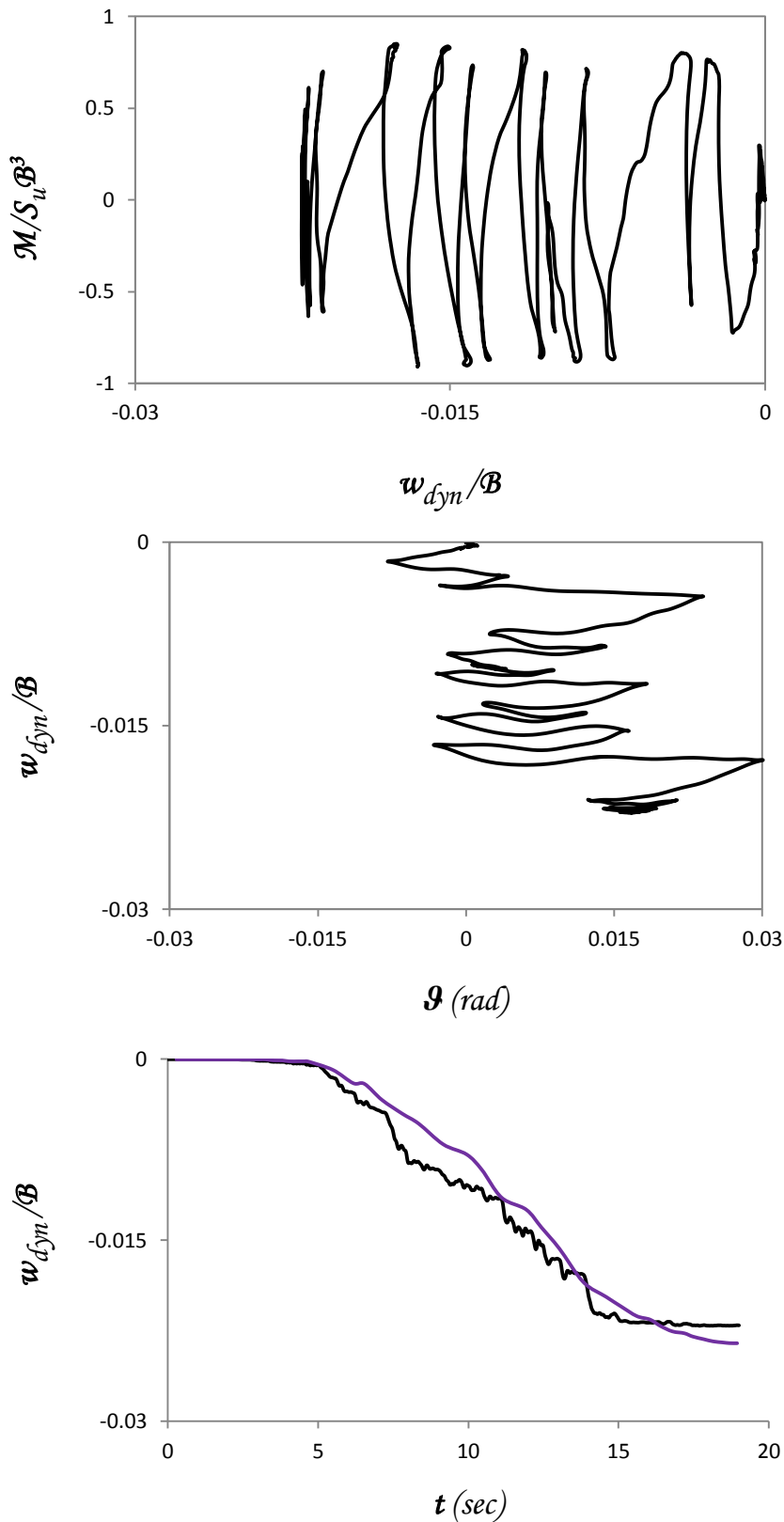


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.53α Yarimca\_060 1999. Σύγκριση χρονιοιστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονιοιστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  - γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Yarimca\_060 1999

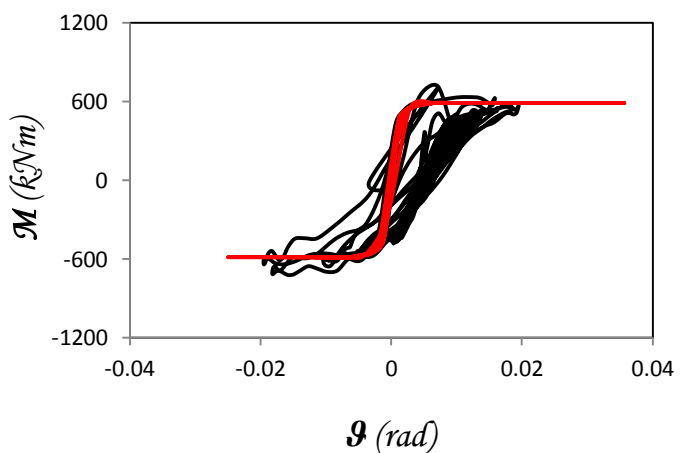
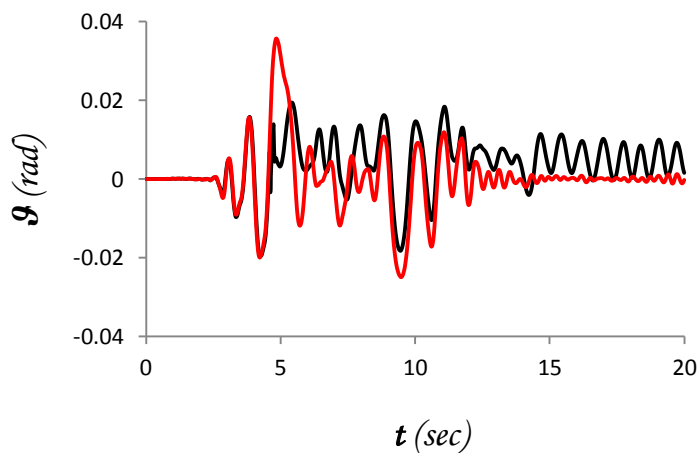
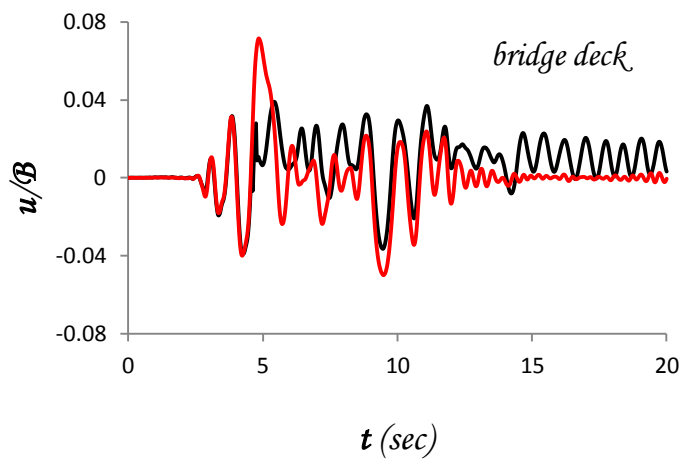
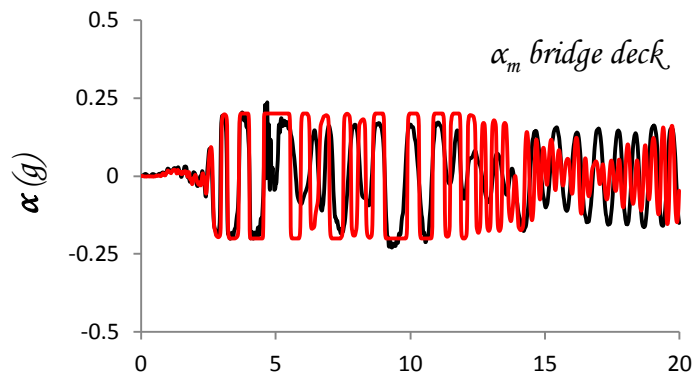
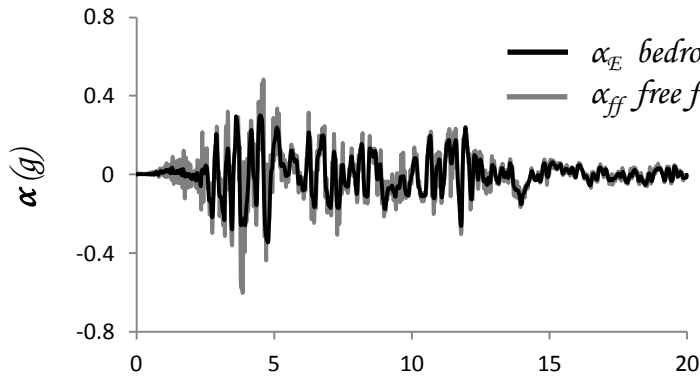
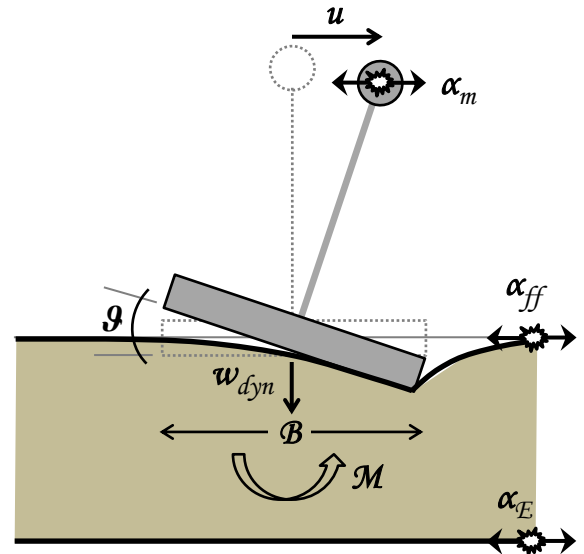
$$F_S = 2$$



**Σχήμα 4.53β** Yarimca\_060 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Duzce\_180 1999

$$F_S = 5$$

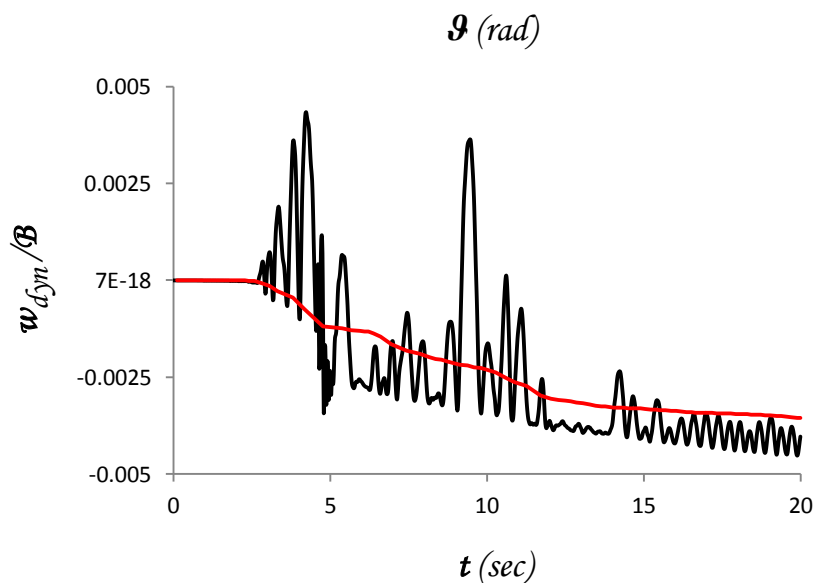
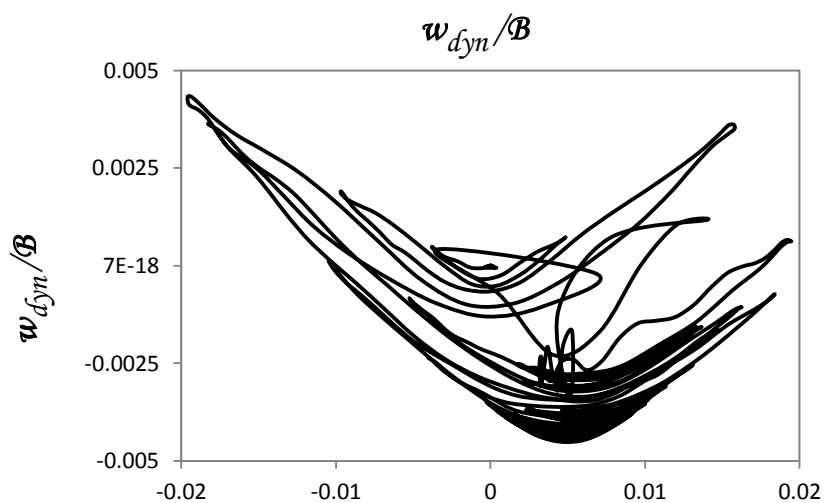
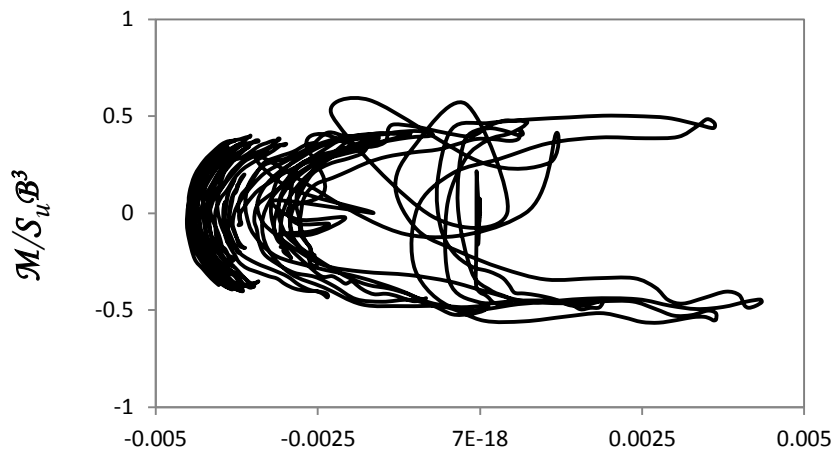


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.54α Duzce\_180 1999. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Duzce\_180 1999

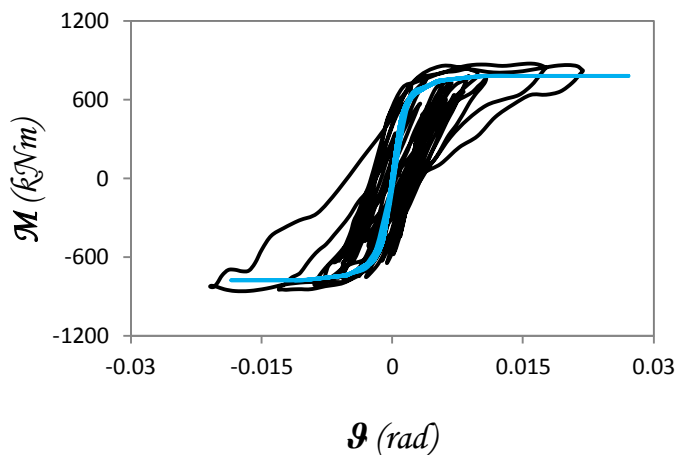
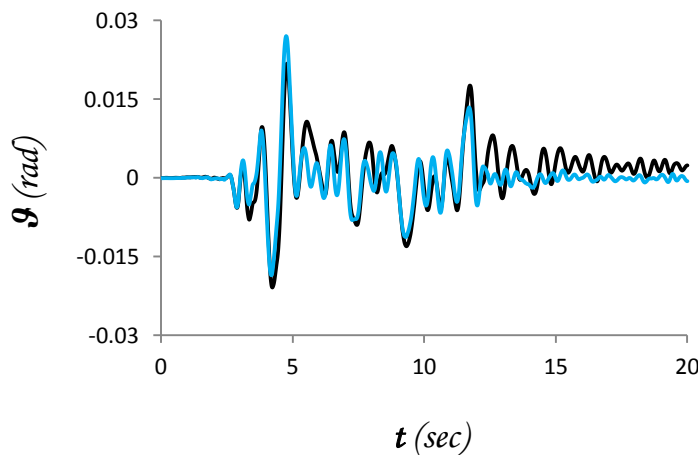
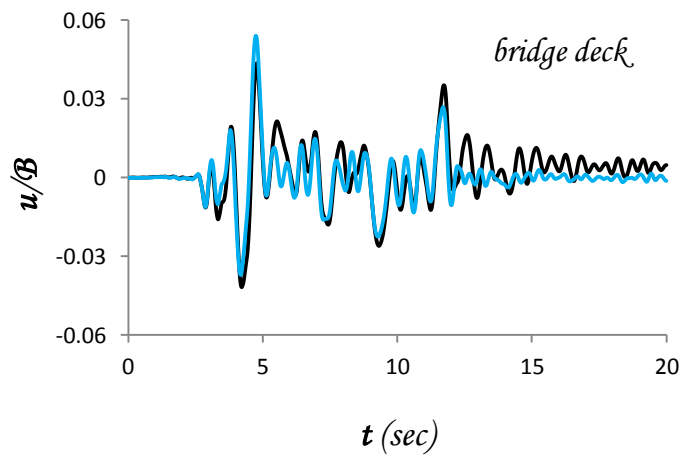
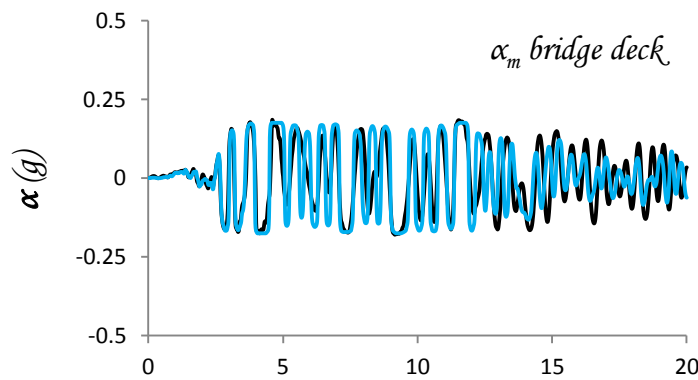
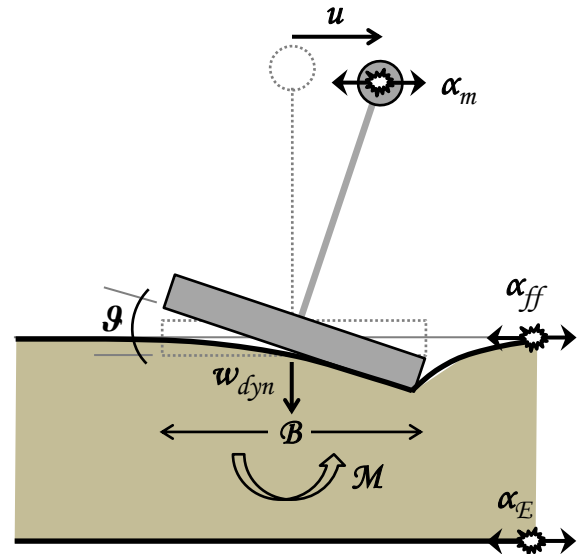
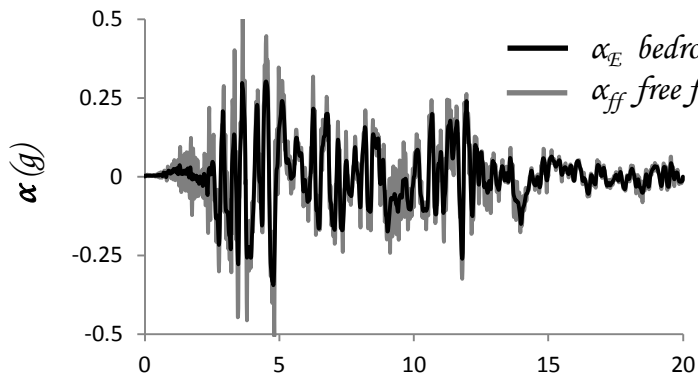
$$F_S = 5$$



**Σχήμα 4.54β** Duzce\_180 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 5$ .

Duzce\_180 1999

$$F_S = 3.3$$



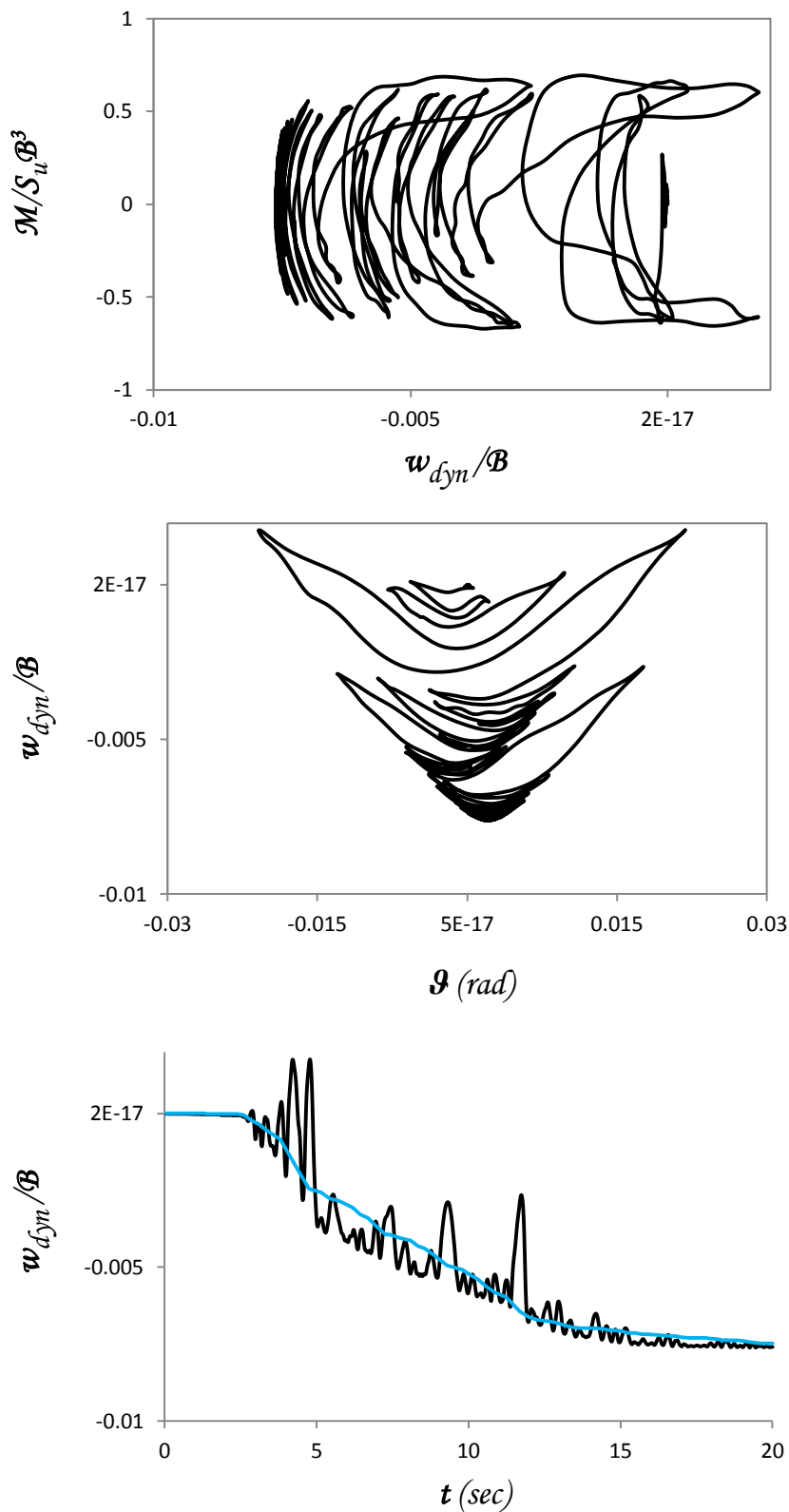
— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.55α Duzce\_180 1999. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \theta$  γωνίας στροφής θεμελίου  $\theta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .



Duzce\_180 1999

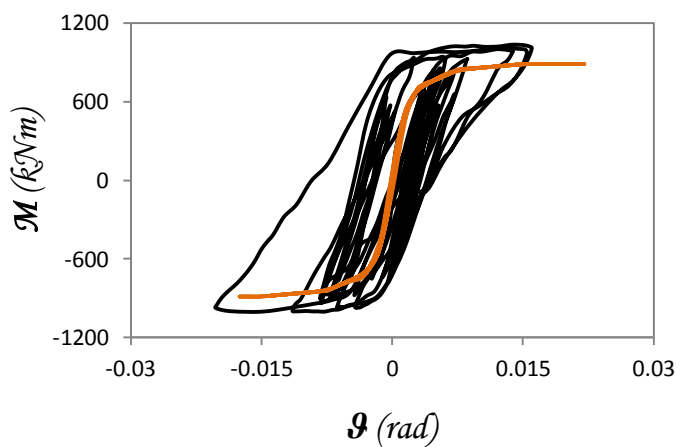
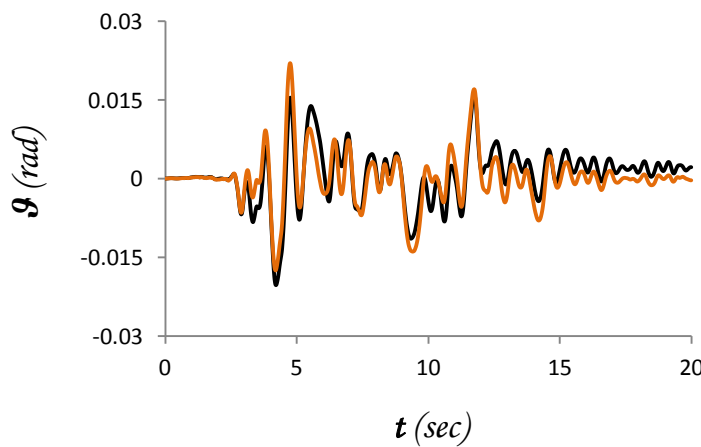
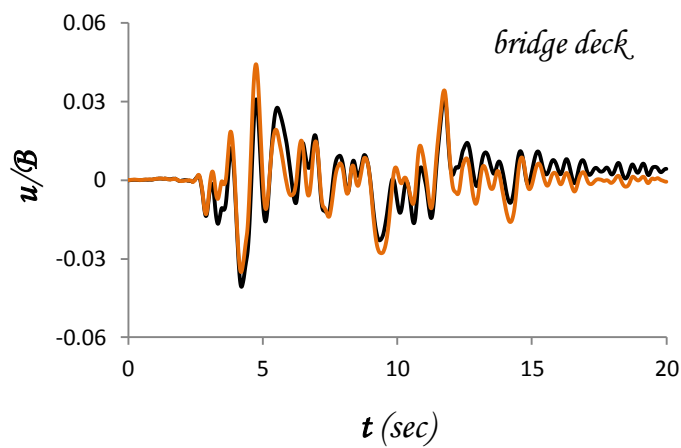
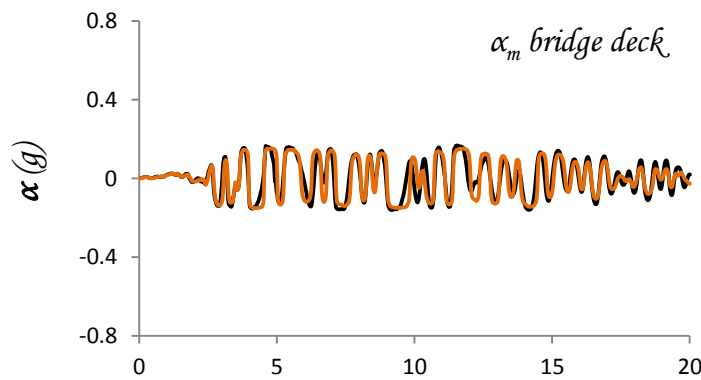
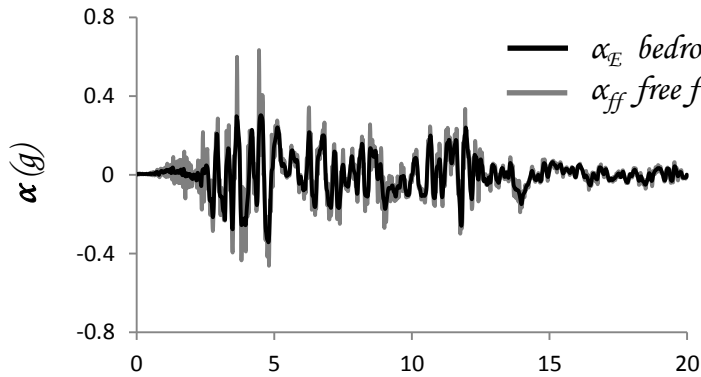
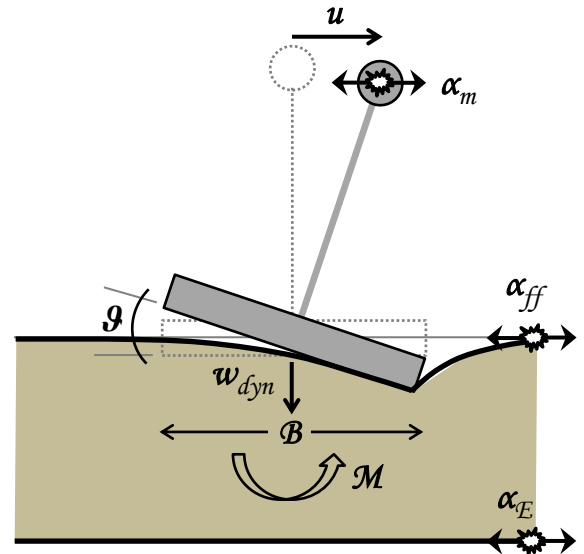
$$F_S = 3.3$$



**Σχήμα 4.55β** Duzce\_180 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 3.3$ .

Duzce\_180 1999

$$F_S = 2.5$$

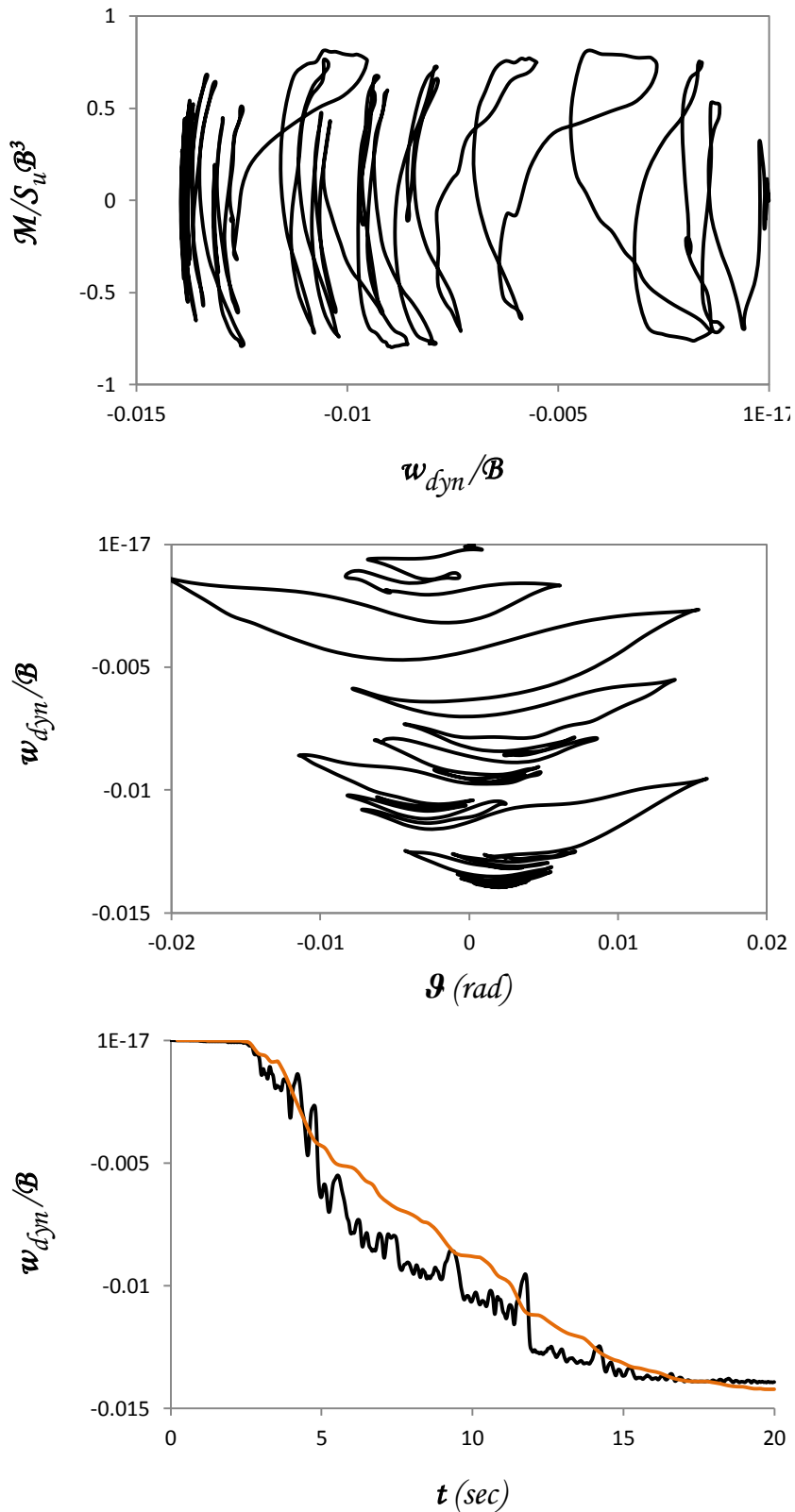


— FEM  
— Ελατήριο

Σχήμα 4.56α Duzce\_180 1999. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρώσης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Duzce\_180 1999

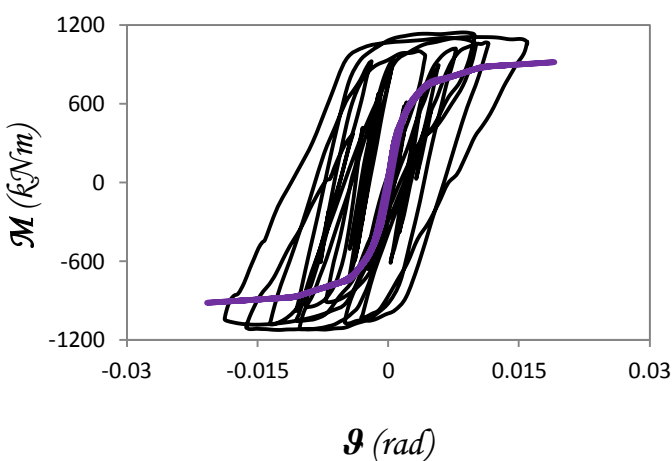
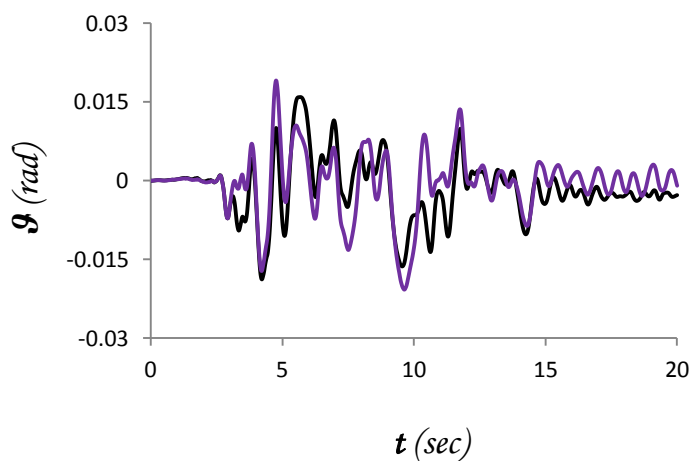
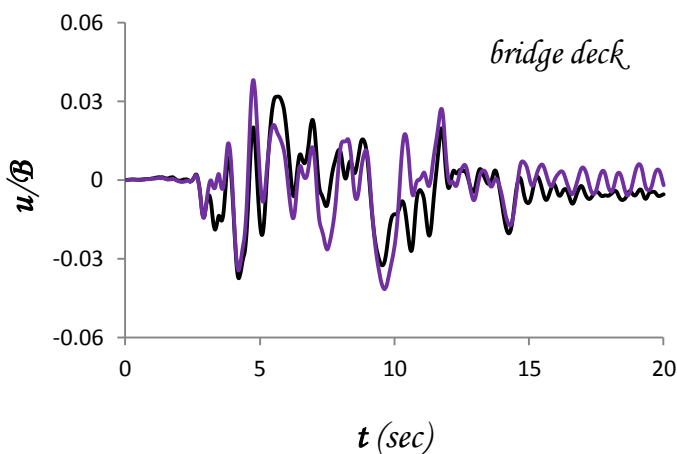
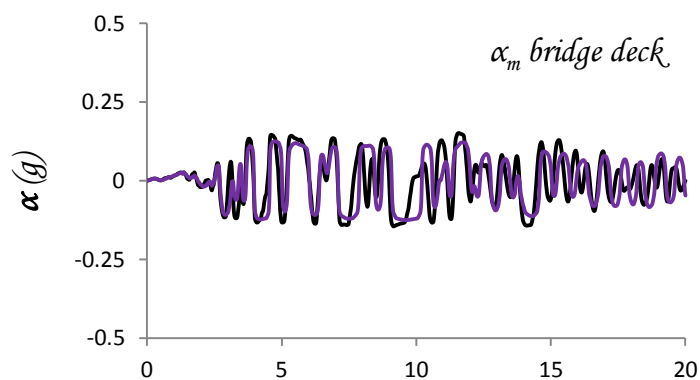
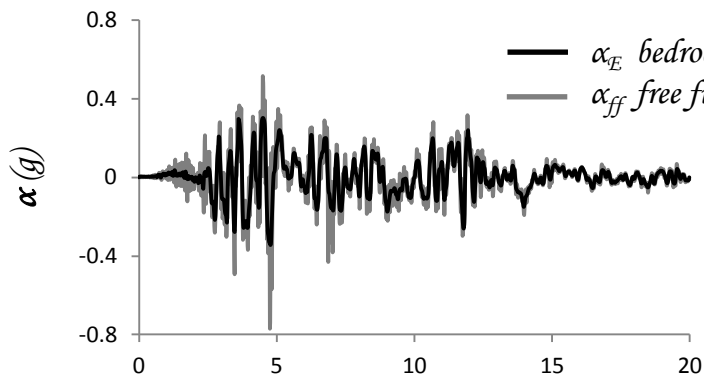
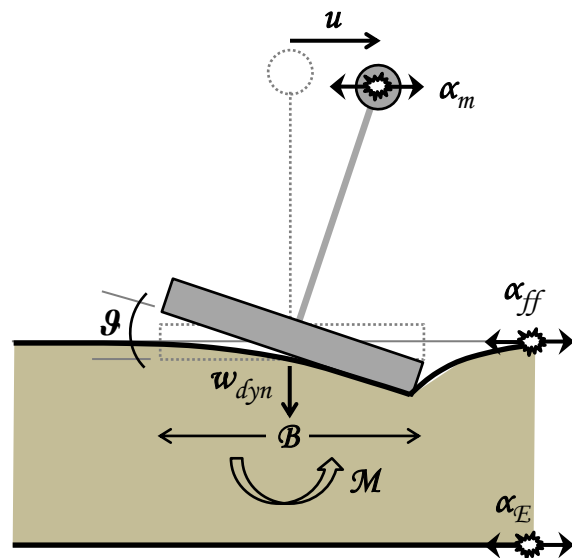
$$F_S = 2.5$$



**Σχήμα 4.56β** Duzce\_180 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2.5$ .

Duzce\_180 1999

$$F_S = 2$$

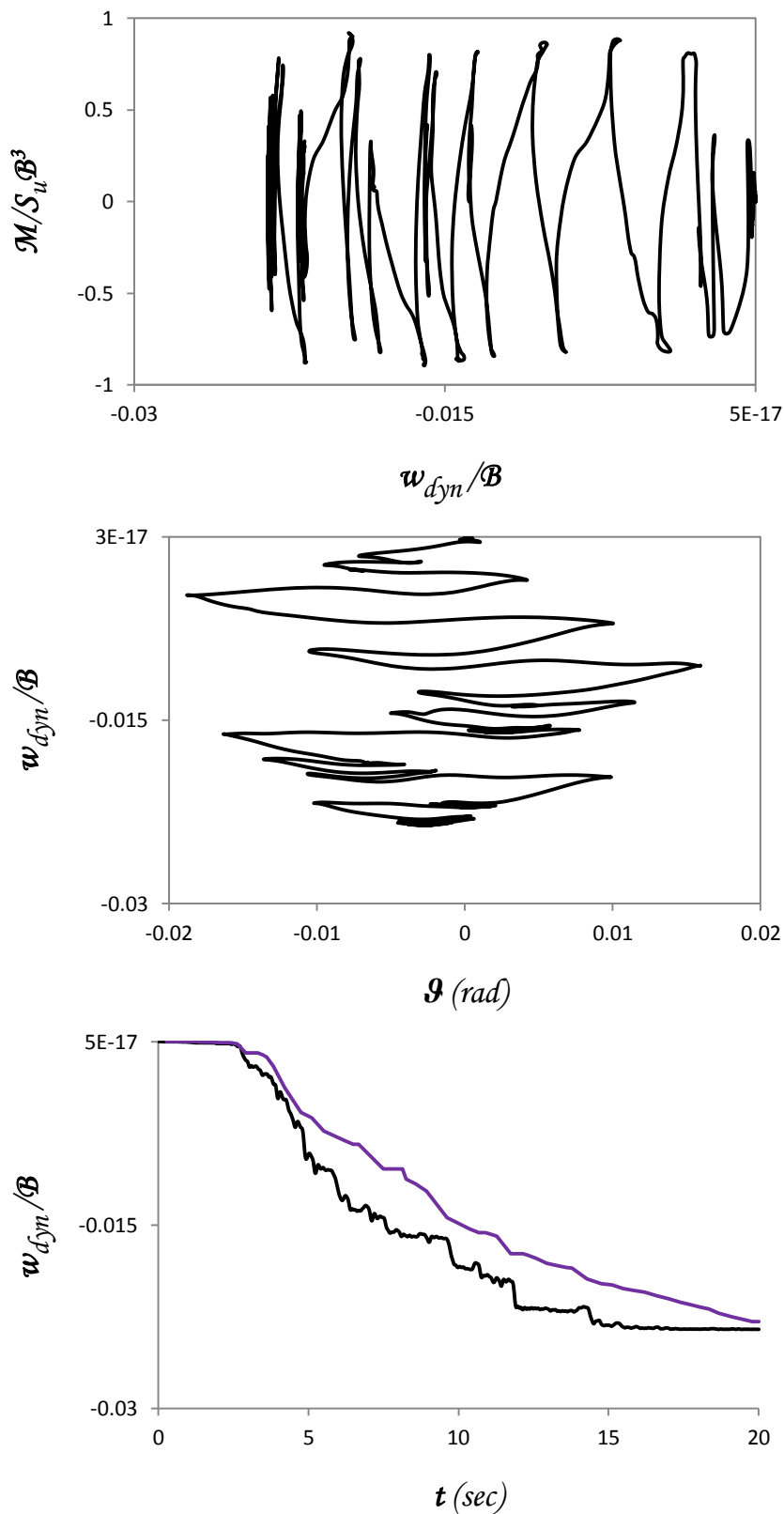


— FEM  
 — Ελατήριο

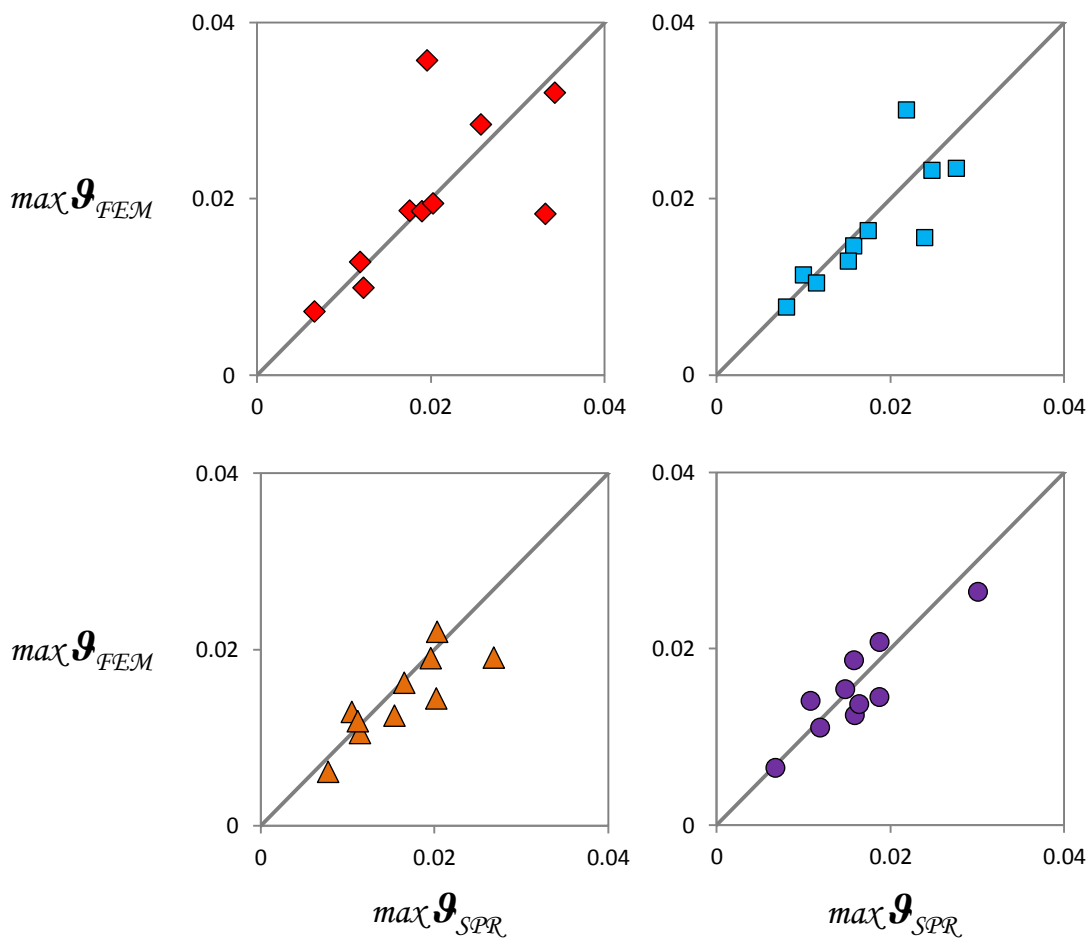
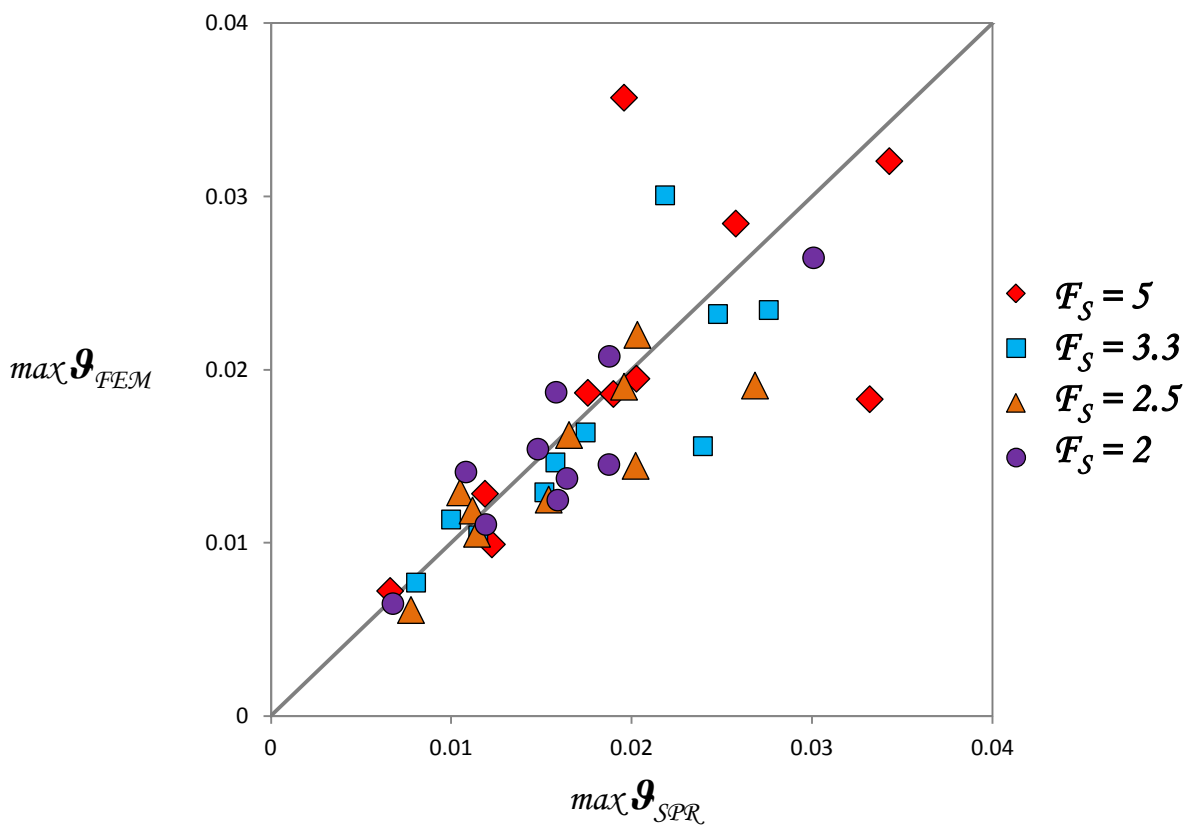
Σχήμα 4.57α Duzce\_180 1999. Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης & οριζόντιας μετατόπισης καταστρώματος  $\alpha - t$  &  $u/B - t$  αντίστοιχα, χρονοϊστορίας γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta - t$  και καμπύλης αναπτυσσόμενης ροπής  $M - \vartheta$  γωνίας στρόφης θεμελίου  $\vartheta$  - ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .

Duzce\_180 1999

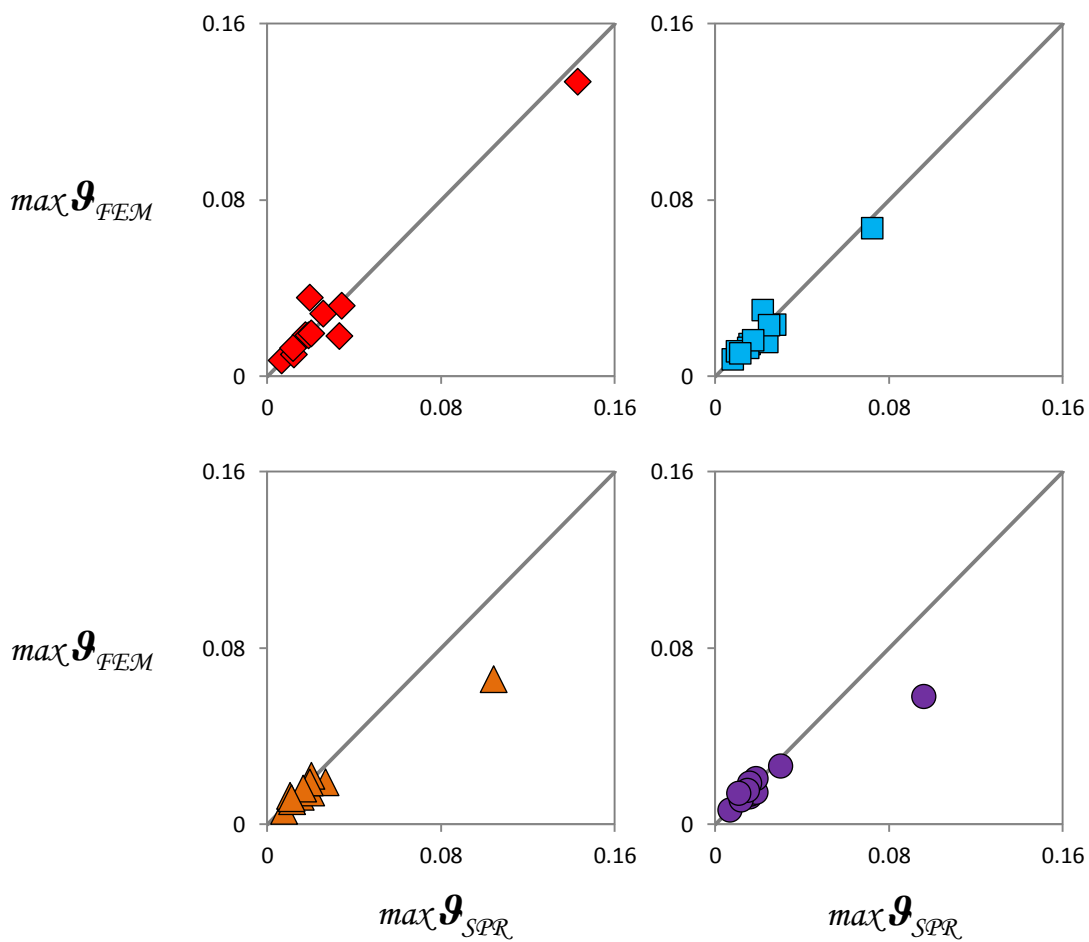
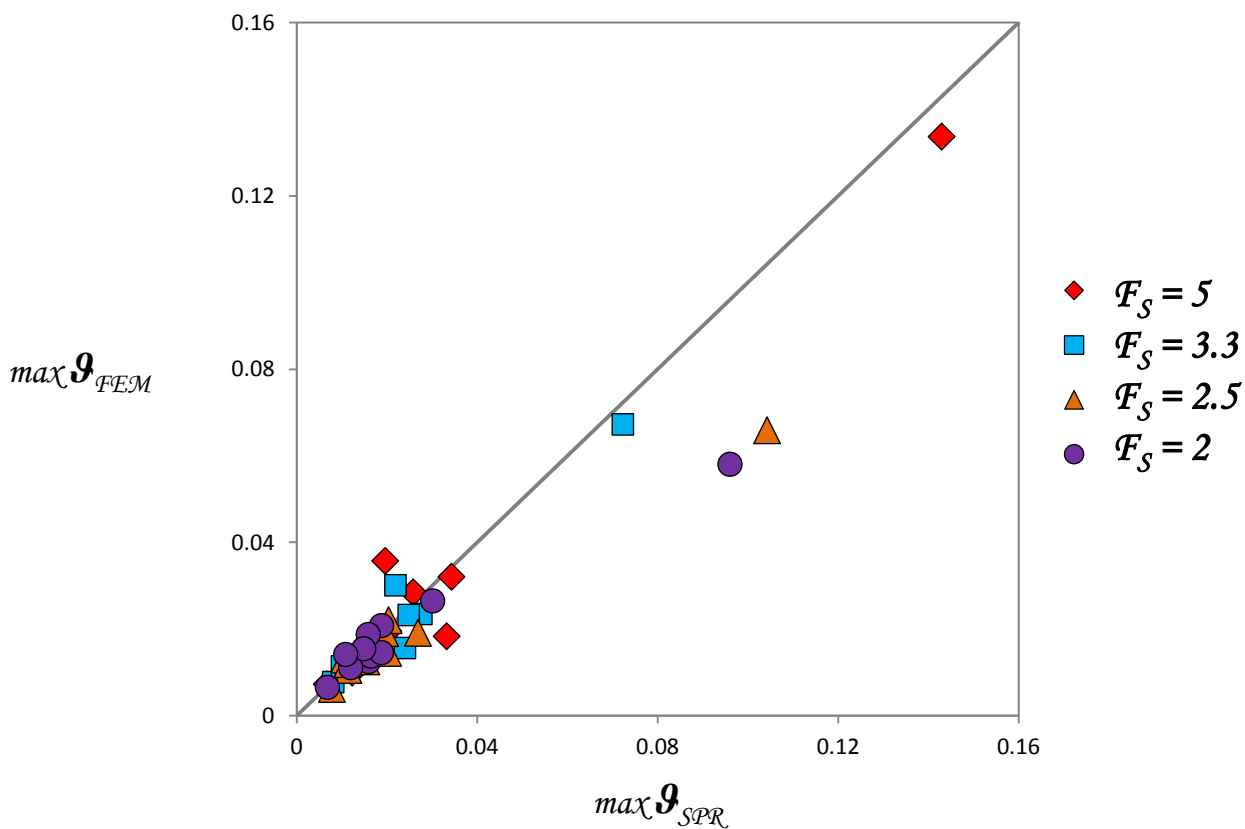
$$F_S = 2$$



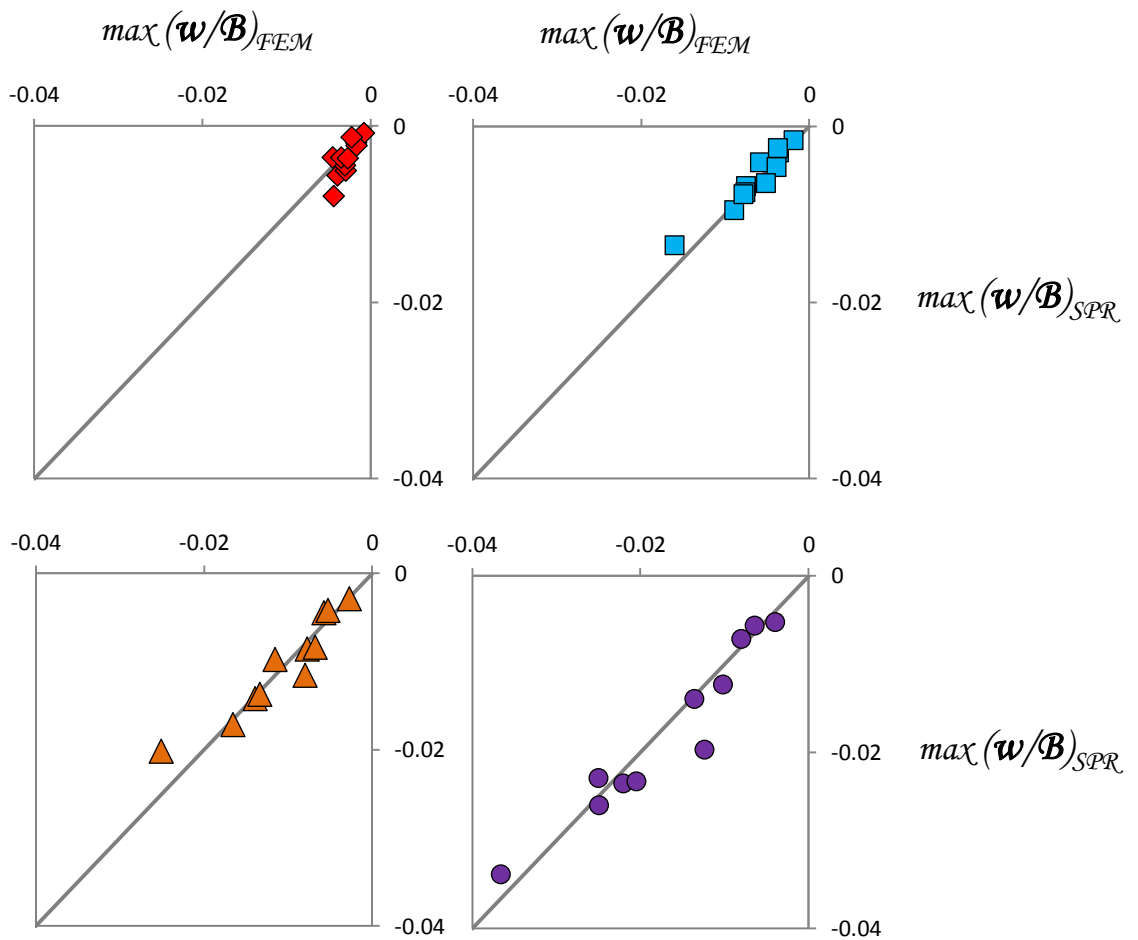
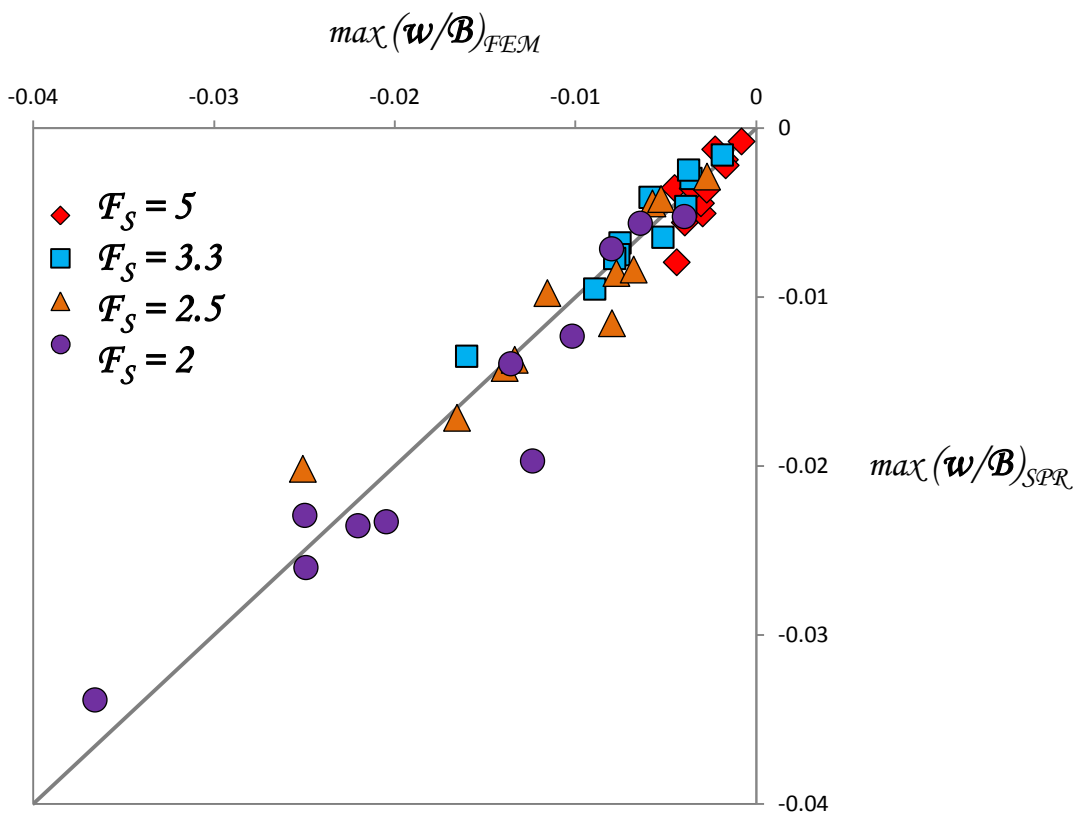
**Σχήμα 4.57β** Duzce\_180 1999. Αδιαστατοποιημένη καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – καθίζησης θεμελίου  $w$  & καθίζησης  $w$  – γωνίας στροφής θεμελίου  $\vartheta$  πλήρους προσομοιώματος & σύγκριση χρονοϊστορίας καθίζησης  $w - t$  ελατηριωτού και πλήρους προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων για  $F_S = 2$ .



**Σχήμα 4.58** Συσχέτιση μέγιστης γωνίας στροφής πλήρους προσομοιώματος  $\max \vartheta_{FEM}$  και ελατηριωτού προσομοιώματος  $\max \vartheta_{SPR}$  για όλες τις πραγματικές διεγέρσεις και τους συντελεστές ασφαλείας που εξετάστηκαν για τιμές γωνιών μέχρι  $\vartheta = 0.04 \text{ rad}$ .

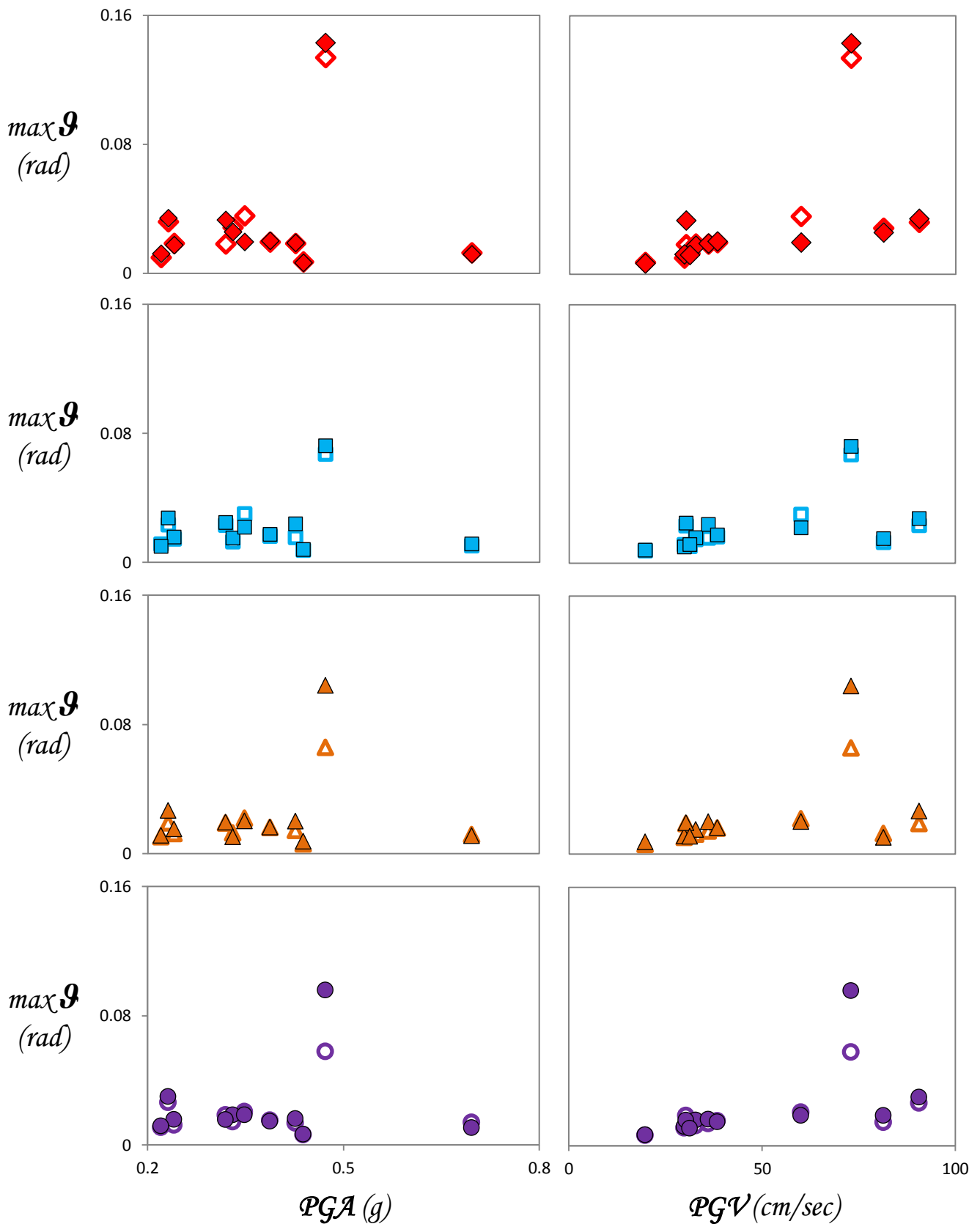


**Σχήμα 4.59** Συσχέτιση μέγιστης γωνίας στροφής πλήρους προσομοιώματος  $\max \vartheta_{FEM}$  και ελατηριωτού προσομοιώματος  $\max \vartheta_{SPR}$  για όλες τις πραγματικές διεγέρσεις και τους συντελεστές ασφαλείας που εξετάστηκαν για τιμές γωνιών μέχρι  $\vartheta = 0.16 \text{rad}$ .

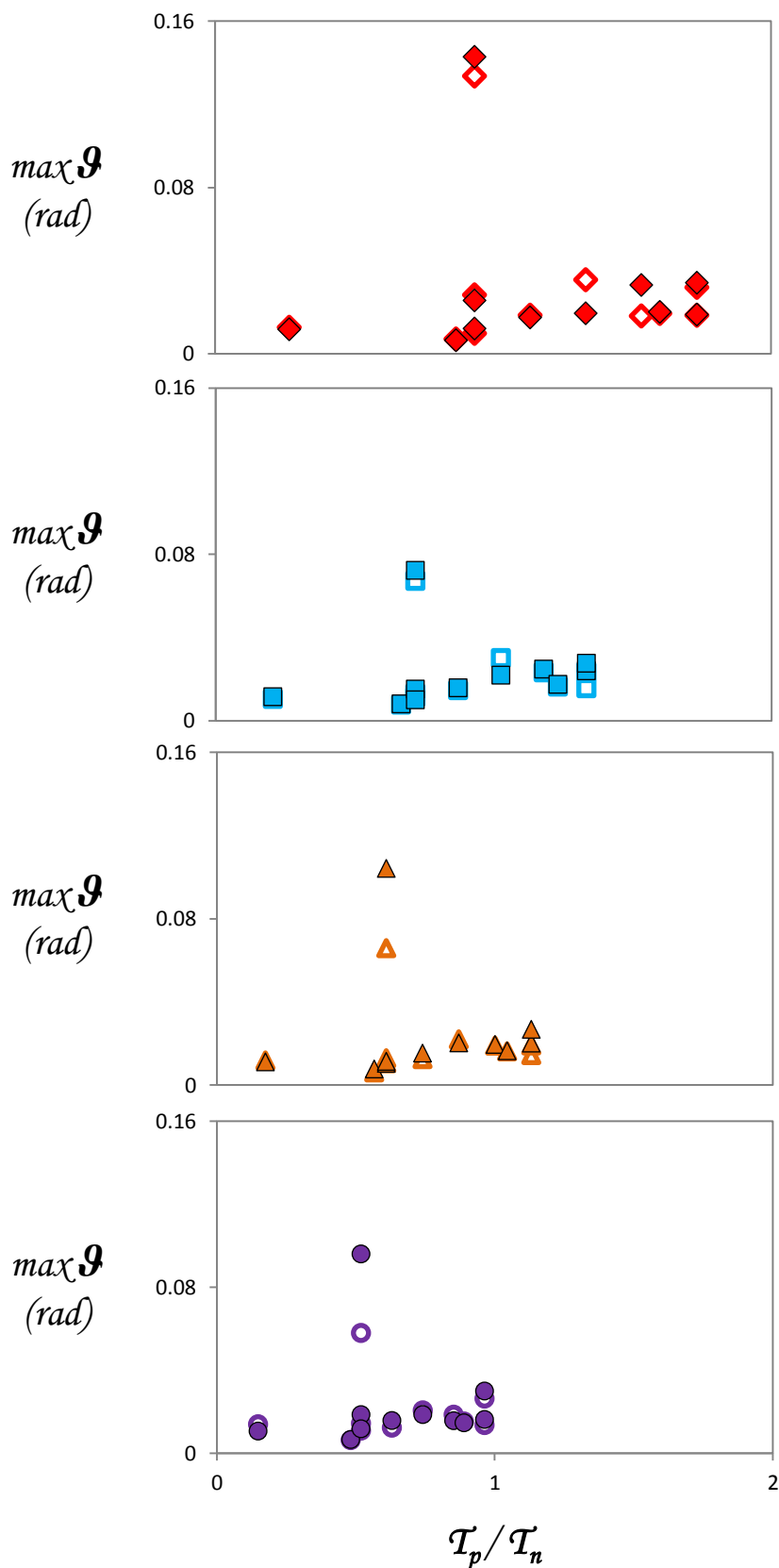


**Σχήμα 4.60** Συσχέτιση μέγιστης καθίζησης πλήρους προσομοιώματος  $\max(\mathbf{w}/\mathbf{B})_{FEM}$  και ελατηριωτού προσομοιώματος  $\max(\mathbf{w}/\mathbf{B})_{SPR}$  για όλες τις πραγματικές διεγέρσεις και τους συντελεστές ασφαλείας που εξετάστηκαν.



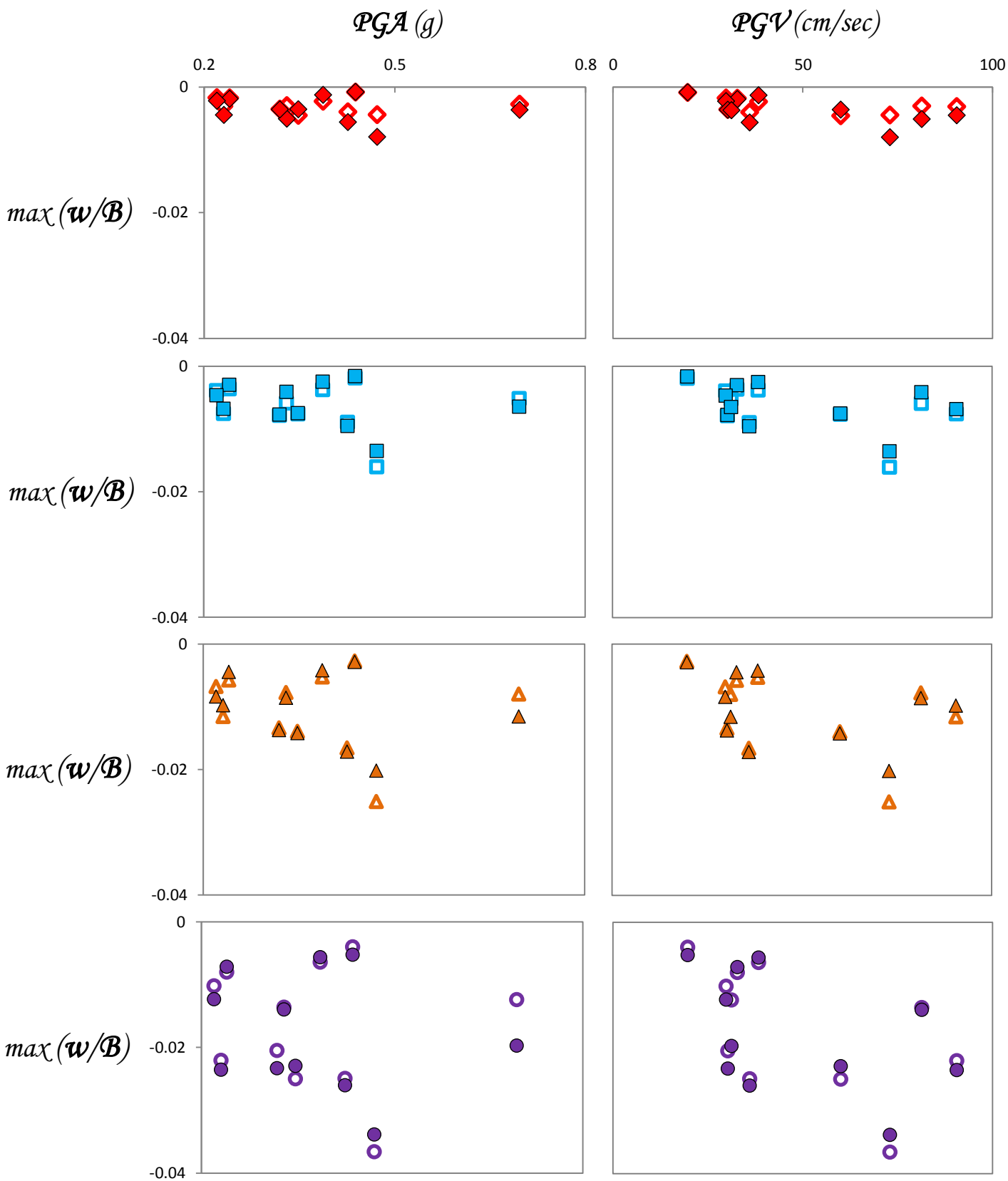


**Σχήμα 4.61** Μέγιστη γωνία στροφής πλήρους  $\max \theta_{\text{FEM}}$  και ελατηριωτού προσομοιώματος  $\max \theta_{\text{SPR}}$  για όλες τις πραγματικές διεγέρσεις και τους συντελεστές ασφαλείας ως προς την εκάστοτε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $PGA$  (αριστερά) και ταχύτητα  $PGV$  (δεξιά).

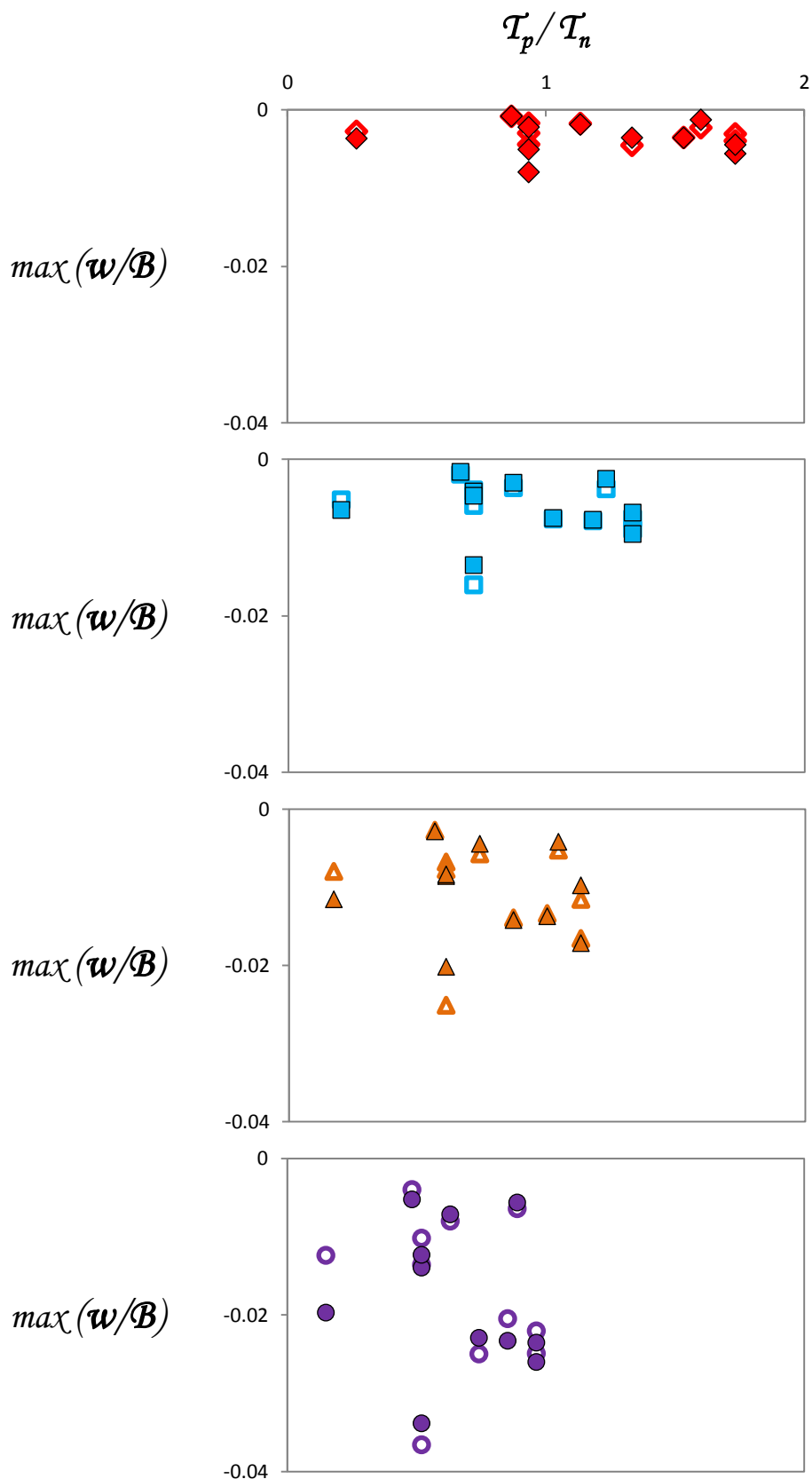


- |                      |                        |                        |                      |
|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| ◆ $F_S = 5$ FEM      | ■ $F_S = 3.3$ FEM      | ▲ $F_S = 2.5$ FEM      | ● $F_S = 2$ FEM      |
| ◇ $F_S = 5$ ελατήριο | □ $F_S = 3.3$ ελατήριο | △ $F_S = 2.5$ ελατήριο | ○ $F_S = 2$ ελατήριο |

**Σχήμα 4.62** Μέγιστη γωνία στροφής πλήρους  $\max \theta_{\text{FEM}}$  και ελατηριωτού προσομοιώματος  $\max \theta_{\text{SPR}}$  για όλες τις πραγματικές διεγέρσεις και τους συντελεστές ασφαλείας ως προς τον λόγο δεσπόζουσας περιόδου της εκάστοτε διέγερσης προς την εκάστοτε τιμή λικνιστικής ιδιοπεριόδου ταλάντωσης  $T_p/T_n$ .



**Σχήμα 4.63** Μέγιστη καθίζηση πλήρους  $\max(w/B)_{FEM}$  και ελατηριωτού προσομοιώματος  $\max(w/B)_{SPR}$  για όλες τις πραγματικές διεγέρσεις και τους συντελεστές ασφαλείας ως προς την εκάστοτε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $PGA$  (αριστερά) και ταχύτητα  $PGV$  (δεξιά).



**Σχήμα 4.64** Μέγιστη καθίζηση πλήρους  $\max(w/B)_{FEM}$  και ελατηριωτού προσομοιώματος  $\max(w/B)_{SPR}$  για όλες τις πραγματικές διεγέρσεις και τους συντελεστές ασφαλείας ως προς τον λόγο δεσπόζουσας περιόδου της εκάστοτε διέγερσης προς την εκάστοτε τιμή λικνιστικής ιδιοπεριόδου ταλάντωσης  $T_p/T_n$ .

# Κεφάλαιο 5ο:

## Συμπεράσματα & Προτάσεις

---

### 5.1 Συμπεράσματα

Η απλοποιημένη μη-γραμμική μεθοδολογία για τον υπολογισμό της δυναμικής λικνιστικής απόκρισης μονοβάθμιου συστήματος που προτείνεται από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, έχει ως στόχο να παράσχει μια εκτίμηση (προκαταρκτική τουλάχιστον) της αναμενόμενης μέγιστης στροφής  $\theta$  και καθίζησης  $w$  του θεμελίου, εφόσον ο σχεδιασμός της γίνει έτσι, ώστε να επιτρέπεται η διαρροή του εδάφους [Anastasopoulos, 2010; Gelagoti 2010]. Όπως αποδείχθηκε, η μεθοδολογία προβλέπει με επιτυχία τη μέγιστη στροφή και καθίζηση του τετραγωνικού θεμελίου, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις πετυχαίνει και την αναπαραγωγή ολόκληρης της χρονοϊστορίας στροφής. Επειδή όμως δεν είναι ξεκάθαρο υπό ποιες προϋποθέσεις επιτυγχάνεται απόλυτη ομοιότητα σε όρους χρονοϊστορίας, προτείνεται η αξιοποίηση μόνο των μεγίστων τιμών. Επιπλέον, αξιοσημείωτη είναι η ακρίβεια με την οποία προβλέπεται η τιμή της μέγιστης καθίζησης, κάτι που συνήθως δεν ενσωματώνεται σε αντίστοιχες μεθοδολογίες. Τέλος, η σημαντικότερη δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της παρούσας αφορούσε τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή απόσβεσης  $C_R$ . Απ' ότι φαίνεται, στην επιλογή της κατάλληλης τιμής  $C_R$  βρίσκεται το κλειδί της επιτυχίας της μεθοδολογίας, καθώς πρόκειται για την καθοριστικότερη παράμετρο του προβλήματος.

### 5.2 Προτάσεις

Από τη στιγμή που επαληθεύθηκε η ισχύς της μεθοδολογίας σε μονοβάθμιο σύστημα, θα ήταν σκόπιμο να διερευνηθεί η εφαρμογή της και σε απλές πλαισιωτές κατασκευές, όπου το πρόβλημα είναι σαφώς πιο σύνθετο. Η λικνιστική απόκριση

πλαίσιου διαφέρει σημαντικά από αυτή του μονοβάθμιου συστήματος, διότι ο συντελεστής ασφαλείας έναντι κατακορύφου φορτίου  $F_s$ , καθώς και ο λόγος ροπής προς τέμνουσα  $M/Q$  κάθε θεμελίου δεν διατηρούνται πλέον σταθεροί, αλλά μεταβάλλονται αναλόγως της φοράς της φόρτισης.

Ως προς τα μονοβάθμια συστήματα, θα μπορούσε να εξεταστεί ακριβώς το ίδιο πρόβλημα, αλλά επί *αμμώδους* εδαφικής στρώσης, η οποία αποτελεί ίσως την απλούστερη περίπτωση ανομοιογενούς εδαφικού προφίλ συναρτήσει του βάθους. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει και η δυνατότητα άμεσης σύγκρισης με πειραματικά αποτελέσματα.

Επιπλέον ο μονοβάθμιος ταλαντωτής στον οποίο εφαρμόστηκε η μεθοδολογία είναι απείρως άκαμπτος, θεώρηση συνήθως μη-ρεαλιστική για υψίκορμα λικνιζόμενα συστήματα. Αξίζει να εφαρμοστεί και σε συστήματα πεπερασμένης δυσκαμψίας, όπου η επιρροή των φαινομένων  $P - \delta$  είναι εντονότερη, για να διαπιστωθεί αν και τότε τα αποτελέσματα προκύπτουν εξίσου όμοια.

# Παράρτημα:

## Διερεύνηση Στατικής Ισοδυναμίας

---

Στόχος του παρόντος παραρτήματος είναι η μελέτη της λικνιστικής συμπεριφοράς, καθώς και η απόδειξη της στατικής ισοδυναμίας σε μονοτονική φόρτιση, μονοβάθμιων ταλαντωτών επί τετραγωνικού και ορθογωνικού θεμελίου (με λόγο πλευρών 3:1) εδραζόμενων επί αργιλικής στρώσης. Το πρώτο σχήμα συναντάται σε μεμονωμένα θεμέλια υποστυλωμάτων, το δε δεύτερο είναι τυπικό για θεμέλια τοιχωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος. Οι εξαγόμενες αδιάστατες καμπύλες αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\theta$  χρησιμοποιούνται ως πρώτο βήμα στην εφαρμογή της προτεινόμενης απλοποιημένης μη-γραμμικής μεθοδολογίας. Τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συστημάτων επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να πληρούν και τις προϋποθέσεις των δυναμικώς ισοδυνάμων συστημάτων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα Π.1**.

## Π.1 Τετραγωνικό Θεμέλιο

### Π.1.1 Εισαγωγή - Ορισμοί

Η παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος περιλαμβάνει την επιρροή των ακόλουθων παραγόντων. Αρχικά μελετάται η επιρροή των εδαφικών ιδιοτήτων για διάφορες τιμές της ευρέως χρησιμοποιούμενης συσχέτισης μεταξύ μέτρου ελαστικότητας  $E_o$  και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  αργιλικών εδαφών:  $E_o/S_u = 800$  έως  $1800$ . Εξετάζονται περιπτώσεις κατά τις οποίες μεταβάλλεται, είτε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας, είτε της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.

Βάσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  του υπό εξέταση εδάφους σε κάθε περίπτωση, ορίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας έναντι κατακόρυφης φόρτισης  $F_s$  ως εξής:

$$F_S = \frac{N_{uo}}{N} \quad (\Pi.1)$$

όπου  $N$  το κατακόρυφο φορτίο του θεμελίου και  $N_{uo}$  το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει το σύστημα από τη σχέση:

$$N_{uo} = (\pi + 2) \left( 1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) A S_u \cong (\pi + 3) B^2 S_u \quad (\Pi.2)$$

όπου  $A$  είναι το εμβαδό της επιφάνειας επαφής εδάφους θεμελίου,  $B$  η διάσταση παράλληλα στο επίπεδο περιστροφής και  $L$  η εγκάρσια (στη συγκεκριμένη περίπτωση ταυτίζονται). Η αναλυτική τιμή του οριακού φορτίου  $N_{uo}$  συγκρίνεται ικανοποιητικά με την τιμή που προκύπτει αν υποβληθεί το αριθμητικό προσομοίωμα σε στατική φόρτιση επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετατόπισης.

Στη συνέχεια εξετάζεται η ισοδυναμία συστημάτων με διαφορετικό πλάτος θεμελίου  $B$  εδραζόμενων σε αργιλικές στρώσεις διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών  $E_o$  και  $S_u$ , με ίδιο όμως λόγο δυσκαμψίας εδάφους  $E_o/S_u$  και με ίδιο συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ .

Στο τελευταίο μέρος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας  $F_S = 10, 5, 3.3, 2.5, 2, 1.7, 1.4, 1.25$  &  $1.1$  πλήρως αδιαστατοποιημένα. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων αδιαστατοποιημένης τέμνουσας δυσκαμψίας  $K_R(\vartheta, F_S)/K_{R,elastic}$  συναρτήσεως της γωνίας στροφής  $\vartheta$  του θεμελίου, ακολουθώντας τη λογική μιας ισοδύναμης ελαστικής δυσκαμψίας που αντιστοιχεί στην εκάστοτε τιμή της γωνίας  $\vartheta$ , και αδιαστατοποιημένης αναπτυσσόμενης ροπής  $M/S_u B^3$  συναρτήσεως της γωνίας στροφής  $\vartheta$  του θεμελίου.

Σημειώνεται ότι τα διαγράμματα δεν περιλαμβάνουν φαινόμενα  $P - \delta$ , οπότε έχουν καθολική ισχύ και δεν αναφέρονται σε κάποιο σύστημα συγκεκριμένης λυγηρότητας. Ως μέγεθος αναφοράς για την αδιαστατοποίηση της περιστροφικής δυσκαμψίας  $K_R(\vartheta, F_S)$  χρησιμοποιείται η δυσκαμψία στον ομοιογενή ελαστικό



ημίχωρο η οποία συμβολίζεται με  $K_{R,elastic}$  και για το τετραγωνικό θεμέλιο με πλευρά  $B = 2b$  δίνεται από τη σχέση:

$$K_{R,elastic} \cong 3.65 \frac{Gb^3}{1-\nu} \quad (\text{Π.3})$$

Για την αδιαστατοποίηση δε της γωνίας στροφής  $\vartheta$  χρησιμοποιείται η “χαρακτηριστική” γωνία  $\vartheta_s$  [Gazetas et al., 2012] (στην περίπτωση βαριά φορτισμένων θεμελίων, όπου το έδαφος αποκρίνεται ελαστοπλαστικά, η γωνία αυτή δεν σημαίνει αποκόλληση, όπως στην περίπτωση ελαφρά φορτισμένων θεμελίων, και αυτό λόγω των καθιζήσεων):

$$\vartheta_s \cong \frac{NB}{4K_{R,elastic}\psi(F_s)} \cdot \left[ 1 - 0.22 \left( 1 - \frac{1}{F_s} \right)^2 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.2} \right] \quad (\text{Π.4})$$

όπου  $N$  το κατακόρυφο φορτίο του θεμελίου,  $B$  το πλάτος και  $\psi(F_s)$  ο συντελεστής απομείωσης της δυσκαμψίας του ελαστικού ομοιογενούς ημιχώρου, ο τρόπος υπολογισμού του οποίου, συναρτήσει του αντιστρόφου του κατακόρυφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi = 1/F_s = N/N_{uo}$ , παρουσιάζεται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

Επιπλέον των παραπάνω διαγραμμάτων, παρουσιάζονται και οι συσχετίσεις του αντιστρόφου του κατακόρυφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi = 1/F_s = N/N_{uo}$  με τη μέγιστη αδιαστατοποιημένη ροπή  $M_u/S_u B^3$ , καθώς και με την αδιαστατοποιημένη γωνία ανατροπής, ως προς τη γωνία ανατροπής επί άκαμπτης βάσης  $\vartheta_R = \arctan(B/2h)$ . Στις δύο αυτές περιπτώσεις, το σύστημα έχει λυγηρότητα  $2h/B = 4$  και αυτά είναι τα μοναδικά διαγράμματα στα οποία υπεισέρχονται φαινόμενα  $P - \delta$ .

### Π.1.2 Επιρροή του Λόγου Εδαφικής Δυσκαμψίας $E_o/S_u$

Εξετάζονται συστήματα ίδιου συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ , κοινού πλάτους θεμελίου  $B$ , εδραζόμενα σε αργιλικό στρώμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  και διαφορετικού λόγου εδαφικής δυσκαμψίας  $E_o/S_u$ .

Στα **Σχήματα Π.2** και **Π.3** παρουσιάζεται η απόκριση συστημάτων με πλάτος θεμελίου  $B = 2\text{m}$  για την περίπτωση  $S_u = 150\text{kPa}$ , για λόγους  $E_o/S_u = 1800 \rightarrow E_o = 270\text{MPa}$ ,  $E_o/S_u = 1200 \rightarrow E_o = 180\text{MPa}$  και  $E_o/S_u = 800 \rightarrow E_o = 120\text{MPa}$  για συντελεστές ασφαλείας  $F_s = 10, 5 \text{ \& } 2$ . Εφόσον διατηρείται το  $S_u = 150\text{kPa}$ , η αλλαγή του λόγου  $E_o/S_u$  οδηγεί σε αλλαγή της παραμορφωσιμότητας του εδάφους: όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος δυσκαμψίας, τόσο πιο δυσπαραμόρφωτο είναι το έδαφος.

Σε όρους  $K_R(\vartheta, F_s)/K_{R,elastic} - \vartheta$  παρατηρούμε πως οι καμπύλες έχουν την ίδια μορφή, αλλά είναι μετατοπισμένες ως προς τον οριζόντιο άξονα. Αν όμως ο οριζόντιος άξονας αδιαστατοποιηθεί ως προς τη “χαρακτηριστική” γωνία  $\vartheta_s$ , όπως αυτή ορίστηκε προηγουμένως, τότε οι καμπύλες ταυτίζονται και το πρόβλημα είναι πλέον ανεξάρτητο του μέτρου ελαστικότητας.

Σε όρους  $M/S_u B^3 - \vartheta$  παρατηρούμε πως όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ασφαλείας, τόσο μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται μεταξύ των καμπυλών στο τμήμα της συναρμογής μεταξύ ελαστικού και πλαστικού κλάδου. Όμως αφού ο οριζόντιος άξονας αδιαστατοποιηθεί ως προς τη “χαρακτηριστική” γωνία  $\vartheta_s$ , οι διαφορές εξαλείφονται και οι καμπύλες ταυτίζονται. Επίσης φαίνεται παραπλανητικό, αλλά οφείλεται απλώς και μόνο στον όρο ως προς τον οποίο πραγματοποιείται η αδιαστατοποίηση, ότι καθώς μικραίνει ο  $F_s$ , η κλίση του ελαστικού κλάδου γίνεται πιο απότομη. Ας σημειωθεί ότι η κράτυνση του πλαστικού κλάδου που παρατηρείται για συντελεστή ασφαλείας  $F_s = 2$  οφείλεται σε αδυναμία του ίδιου του προσομοιώματος και δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Επιπλέον, προκειμένου να αποδειχθεί η ισχύς της κανονικοποίησης, ανεξαρτήτως και της τιμής που λαμβάνει η  $S_u$  για σταθερό λόγο  $E_o/S_u$  και συγκεκριμένο πλάτος θεμελίου  $B$ , παρουσιάζεται στα **Σχήματα Π.4** και **Π.5** η περίπτωση του θεμελίου πλάτους  $B = 2\text{m}$  για  $S_u = 50\text{kPa}$  και  $S_u = 150\text{kPa}$  με σταθερό όμως  $E_o/S_u = 1200$ .

### Π.1.3 Απόκριση Ισοδύναμων Συστημάτων

Εξετάζεται η ισοδυναμία συστημάτων ίδιου συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ , διαφορετικού πλάτους θεμελίου  $B = 2, 4 \text{ \& } 6\text{ m}$  εδραζόμενων σε αργλικές στρώσεις διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών  $E_o$  και  $S_u$ , με ίδιο λόγο δυσκαμψίας εδάφους  $E_o/S_u = 1200$ .

Στα **Σχήματα Π.6** και **Π.7** παρουσιάζεται η απόκριση τριών συστημάτων σε όρους  $K_R(\vartheta, F_S)/K_{R,elastic} - \vartheta$  και  $M_u/S_u B^3 - \vartheta$  αντίστοιχα, για τρεις συντελεστές ασφαλείας: πολύ μεγάλος  $F_S = 10$ , συνήθης  $F_S = 5$  και μικρός  $F_S = 2$  με τα χαρακτηριστικά τους να σημειώνονται στον **Πίνακα Π.1**:

**Πίνακας Π.1** Χαρακτηριστικά Εξεταζόμενων Ισοδύναμων Συστημάτων

$B$ (m)	$S_u$ (kPa)	$E_o$ (MPa)	$S_u B^3$ (kNm)
2	50	60	400
4	100	100	6400
6	150	180	32400

Παρατηρούμε ότι καί στις τρεις περιπτώσεις τα τρία συστήματα έχουν ακριβώς την ίδια απόκριση, οπότε αρκεί να μελετήσουμε την συμπεριφορά ενός. Προφανώς σε απόλυτους όρους τα 3 συστήματα δεν έχουν την ίδια δυσκαμψία, ούτε αναπτύσσουν την ίδια ροπή.

### Π.1.4 Επιρροή του Συντελεστή Ασφαλείας $F_S$

Εξετάζονται συστήματα διαφορετικού συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ , κοινού πλάτους θεμελίου  $B = 2\text{ m}$  (εφόσον προηγουμένως αποδείχθηκε η ισοδυναμία) εδραζόμενα σε έδαφος με ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά  $E_o = 270\text{ MPa}$ ,  $S_u = 150\text{ kPa}$ .

Με την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε όρους  $K_R(\vartheta, F_S)/K_{R,elastic} - \vartheta$  στο **Σχήμα Π.8** γίνεται φανερή η έντονη επίδραση του  $F_S$  στην αρχική δυσκαμψία του συστήματος. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: στις περιπτώσεις των βαριά

φορτισμένων θεμελίων αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις στο έδαφος ήδη από το στάδιο επιβολής των κατακόρυφων φορτίων. Επομένως, όσο πιο βαριά φορτισμένο είναι το θεμέλιο, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μείωση της αρχικής περιστροφικής δυσκαμψίας σε σχέση με την ελαστική τιμή για τον ημίχωρο.

Επιπλέον, στο **Σχήμα Π.8**, παρατηρούμε ότι η μορφή της κάθε καμπύλης είναι διαφορετική. Σε πολύ αδρές γραμμές, μπορούμε να διακρίνουμε δύο ομάδες καμπυλών: (α) μεγάλοι  $F_S = 10$  & 5, και (β) μικροί  $F_S = 3.3, 2.5, 2, 1.7, 1.4, 1.25$  & 1.1. Η διαφορά στη μορφή των καμπυλών είναι επακόλουθο της διαφορετικής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα “ελαφρώς” σε σχέση με τα “βαρέως” φορτισμένα θεμέλια υπό μονοτονική φόρτιση. Για ελαφρά φορτισμένα συστήματα οι πλαστικοποιήσεις του εδάφους είναι περιορισμένες και κυριαρχεί το ανασήκωμα του θεμελίου ως τρόπος ανάληψης της επιβαλλόμενης οριζόντιας φόρτισης. Αντιθέτως, στα βαριά φορτισμένα συστήματα οι πλαστικοποιήσεις είναι εκτεταμένες και έχουν υψηλές τιμές, συνοδευόμενες από μεγάλες καθιζήσεις, ενώ η αποκόλληση του θεμελίου είναι ανεπαίσθητη.

Παρατηρούμε στο **Σχήμα Π.9** ότι δεν υπάρχει μονοτονική σχέση ανάμεσα στον  $F_S$  και στη μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή  $M_u$  όταν αυτή αδιαστατοποιείται ως προς  $S_u B^3$ : η  $M_u$  αυξάνει με τη μείωση του  $F_S$  μέχρι τον  $F_S = 2$  και από εκεί και πέρα μείωση του  $F_S$  οδηγεί σε μείωσή της. Για ακόμα μια φορά σημειώνεται ότι η κράτυνση του πλαστικού κλάδου για  $F_S < 2$  είναι πλασματική, δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Παρατηρούμε επίσης, όπως αναμενόταν, τη μείωση της αρχικής κλίσης της καμπύλης, όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Το **Σχήμα Π.10** παρουσιάζει με πιο εποπτικό τρόπο την σχέση μεταξύ του αντιστρόφου του  $F_S$  και της αδιαστατοποιημένης μέγιστης αναπτυσσόμενης ροπής  $M_u/S_u B^3$ , όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Εναλλακτικά η καμπύλη αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής χορδής  $\theta$  μπορεί να αδιαστατοποιηθεί ως προς τα μεγέθη που αντιστοιχούν στην ανατροπή του στερεού σώματος επί άκαμπτης βάσης  $M_R$  &  $\theta_R$ , ήτοι:

$$M_R = \frac{mgB}{2} \quad (\text{Π.5})$$

$$\vartheta_R = \arctan(B/2h) \quad (\text{Π.6})$$

Με αυτή την αδιαστατοποίηση τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του **Σχήματος Π.11** είναι περισσότερο εύληπτα, καθώς όσο μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας  $F_S$ , τόσο η αρχική κλίση της καμπύλης, όσο και η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή μειώνονται.

Όσον αφορά τη γωνία ανατροπής  $\vartheta_u$ , παρατηρούμε ότι υπάρχει μονοτονική σχέση με τον  $F_S$ : όσο μειώνεται ο  $F_S$ , τόσο μειώνεται η  $\vartheta_u$ . Το **Σχήμα Π.12** παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ του  $F_S$  και της αδιαστατοποιημένης γωνίας ανατροπής  $\vartheta_u/\vartheta_R$ , όπου  $\vartheta_R$  η αντίστοιχη γωνία ανατροπής του στερεού σώματος επί άκαμπτης βάσης. Επομένως, η  $\vartheta_u$  άκαμπτου σώματος επί ενδοσίμου ελαστοπλαστικού εδάφους είναι γενικά μικρότερη από τη  $\vartheta_R$  εξαιτίας των δημιουργούμενων πλαστικοποιήσεων.

### Π.1.5 Αρχική Περιστροφική Δυσκαμψία $K_R(0, F_S)$

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η ύπαρξη αρχικών πλαστικοποιήσεων λόγω των κατακόρυφων φορτίων οδηγεί σε μείωση της αρχικής δυσκαμψίας του συστήματος εδάφους-θεμελίου. Άρα, ακόμα και για μηδενική στροφή  $\vartheta$  του θεμελίου, η τιμή της περιστροφικής δυσκαμψίας θα είναι μικρότερη εκείνης που αντιστοιχεί στον ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο. Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων μπορεί να εξαχθεί μια συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφης φόρτισης  $F_S$  και της αρχικής δυσκαμψίας του συστήματος ανηγμένης στην αντίστοιχη ελαστική. Στο **Σχήμα Π.13** απεικονίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και η προσεγγιστική σχέση που προτείνεται για τετραγωνικό θεμέλιο:

$$\psi(F_S) = \frac{K_R(0, F_S)}{K_{R,elastic}} \cong 1.09 - \frac{0.83}{F_S} \quad (\text{Π.7})$$

Αυτή η συσχέτιση αποτελεί μία ακόμα επέκταση της χρήσης δυσκαμψίας του ομοιογενούς ελαστικού ημιχώρου, η οποία μας δίνει μία πολύ σημαντική πληροφορία: μπορούμε να εκτιμήσουμε την αρχική δυσκαμψία εδάφους-θεμελίου σε ανελαστικό έδαφος, με τη χρήση μίας απλής αναλυτικής σχέσης.

### Π.1.6 Κανονικοποίηση των Αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, συμπεραίνουμε ότι η βασική παράμετρος του προβλήματος είναι ο συντελεστής ασφαλείας  $F_S$ . Ο  $F_S$  καθορίζει τη μορφή της μείωσης της περιστροφικής δυσκαμψίας συναρτήσει της γωνίας στροφής του θεμελίου. Αυτό καθιστά δυσχερή την προσπάθεια εξαγωγής μίας καμπύλης ανεξάρτητης του  $F_S$ . Έτσι, η προσπάθεια κανονικοποίησης των αποτελεσμάτων επικεντρώνεται στην εξαγωγή καμπυλών συναρτήσει του  $F_S$ .

Η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται με χρήση της “χαρακτηριστικής” γωνίας  $\vartheta_S$ :

$$\vartheta_S \cong \frac{NB}{4K_{R,elastic} \left(1.09 - \frac{0.83}{F_S}\right)} \cdot \left[ 1 - 0.22 \left(1 - \frac{1}{F_S}\right)^2 \left(\frac{B}{L}\right)^{0.2} \right] \quad (\text{Π.8})$$

Στα ελαφρά φορτισμένα συστήματα κυριαρχεί η αποκόλληση, ενώ στα βαριά φορτισμένα η κινητοποίηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους ως τρόπος ανάληψης της ροπής από οριζόντια φορτία.

Στο **Σχήμα Π.14** δίνονται οι τελικές μορφές των καμπυλών κανονικοποιημένης τέμνουσας δυσκαμψίας - γωνίας στροφής του θεμελίου σε όρους  $K_R(\vartheta, F_S)/K_{R,elastic} - \vartheta/\vartheta_S$ . Εναλλακτικά, παρουσιάζεται το ίδιο διάγραμμα στο **Σχήμα Π.15**, αλλά με αδιαστατοποιημένη την τέμνουσα δυσκαμψία ως προς την αρχική δυσκαμψία για μηδενική γωνία στροφής  $\vartheta$  του θεμελίου για τον αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  κάθε φορά, επομένως  $K_R(\vartheta, F_S)/K_{R,elastic} \psi(F_S) - \vartheta/\vartheta_S$ . Συμπερασματικά, οι

καμπύλες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή της δυσκαμψίας ενός ισοδύναμου γραμμικού συστήματος δεδομένης της γωνίας στροφής του  $\vartheta$ .

## Π.2 Ορθογωνικό Θεμέλιο

### Π.2.1 Εισαγωγή - Ορισμοί

Οι παράμετροι του προβλήματος με ορθογωνικό θεμέλιο σε τριδιάστατες συνθήκες είναι κοινές με αυτές που εξετάστηκαν στην περίπτωση του τετραγωνικού. Αρχικά μελετάται η επιρροή των εδαφικών ιδιοτήτων για διάφορες τιμές την ευρέως χρησιμοποιούμενης συσχέτισης μεταξύ μέτρου ελαστικότητας  $E_o$  και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$ , όπως προηγουμένως. Εξετάζονται περιπτώσεις κατά τις οποίες μεταβάλλεται, είτε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας, είτε της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι κατακόρυφης φόρτισης  $F_S$  ορίζεται ως εξής:

$$F_S = \frac{N_{uo}}{N} \quad (\text{Π.9})$$

όπου  $N$  το κατακόρυφο φορτίο του θεμελίου και  $N_{uo}$  το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει το σύστημα από τη σχέση:

$$N_{uo} = (\pi + 2) \left( 1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) A S_u \cong 1.065 (\pi + 2) B^3 S_u \quad (\text{Π.10})$$

όπου  $A$  είναι το εμβαδό της επιφάνειας επαφής εδάφους θεμελίου,  $B$  η διάσταση παράλληλα στο επίπεδο περιστροφής (μεγαλύτερη σε μήκος) και  $L$  η εγκάρσια. Και σε αυτή την περίπτωση, η αναλυτική τιμή του οριακού φορτίου  $N_{uo}$  συγκρίνεται ικανοποιητικά με την τιμή που προκύπτει αν υποβληθεί το αριθμητικό προσομοίωμα σε στατική φόρτιση επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετατόπισης.

Στη συνέχεια εξετάζεται η ισοδυναμία συστημάτων με διαφορετικό πλάτος θεμελίου  $B$  εδραζόμενων σε αργιλικές στρώσεις διαφορετικών μηχανικών

χαρακτηριστικών  $E_o$  και  $S_u$ , με ίδιο λόγο δυσκαμψίας εδάφους  $E_o/S_u$  και με ίδιο συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ . Στο τελευταίο μέρος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές του συντελεστή ασφαλείας  $F_s = 10, 5, 3.3, 2.5, 2, 1.7, 1.4, 1.25$  &  $1.1$  πλήρως αδιαστατοποιημένα.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων αδιαστατοποιημένης τέμνουσας δυσκαμψίας  $K_R(\vartheta, F_s)/K_{R,elastic}$  συναρτήσεως της γωνίας στροφής  $\vartheta$  του θεμελίου, ακολουθώντας τη λογική μιας ισοδύναμης ελαστικής δυσκαμψίας που αντιστοιχεί στην εκάστοτε τιμή της γωνίας  $\vartheta$ . Τα διαγράμματα δεν περιλαμβάνουν φαινόμενα  $P - \delta$ , οπότε έχουν καθολική ισχύ και δεν αναφέρονται σε κάποιο σύστημα συγκεκριμένης λυγηρότητας. Ως μέγεθος αναφοράς για την αδιαστατοποίηση της περιστροφικής δυσκαμψίας  $K_R(\vartheta, F_s)$  χρησιμοποιείται η δυσκαμψία στον ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο η οποία συμβολίζεται με  $K_{R,elastic}$  και για το ορθογωνικό θεμέλιο πλάτους  $B = 2b >$  μήκους  $L = 2l$  δίνεται από τη σχέση:

$$K_{R,elastic} \cong 3.72 \frac{Gb^3}{1-\nu} l/b^{0.60} \quad (\text{Π.11})$$

Για την αδιαστατοποίηση δε της γωνίας στροφής  $\vartheta$  χρησιμοποιείται η “χαρακτηριστική” γωνία  $\vartheta_s$  [Gazetas et al., 2012] (στην περίπτωση βαριά φορτισμένων θεμελίων, που το έδαφος αποκρίνεται ελαστοπλαστικά, η γωνία αυτή δεν σημαίνει αποκόλληση, όπως στην περίπτωση ελαφρά φορτισμένων θεμελίων, και αυτό λόγω των καθιζήσεων):

$$\vartheta_s \cong \frac{NB}{4K_{R,elastic}\psi(F_s)} \cdot \left[ 1 - 0.22 \left( 1 - \frac{1}{F_s} \right)^2 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.2} \right] \quad (\text{Π.12})$$

όπου  $N$  το κατακόρυφο φορτίο του θεμελίου,  $B$  το πλάτος και  $\psi(F_s)$  ο συντελεστής απομείωσης της δυσκαμψίας του ελαστικού ομοιογενούς ημιχώρου, ο τρόπος υπολογισμού του οποίου, συναρτήσεως του αντιστρόφου του κατακόρυφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi = 1/F_s = N_u/N_{uo}$ , παρουσιάζεται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.



Επιπλέον των παραπάνω διαγραμμάτων, παρουσιάζονται και οι συσχετίσεις του αντιστρόφου του κατακόρυφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi = 1/F_s = N_u/N_{uo}$  με τη μέγιστη αδιαστατοποιημένη ροπή  $M_u/S_u B^2 L$ , καθώς και με την αδιαστατοποιημένη γωνία ανατροπής, ως προς τη γωνία ανατροπής επί άκαμπτης βάσης  $\vartheta_R = \arctan(B/2h)$ . Στις δύο αυτές περιπτώσεις, το σύστημα έχει λυγηρότητα  $2h/B=4$  και αυτά είναι τα μοναδικά διαγράμματα στα οποία υπεισέρχονται φαινόμενα  $P - \delta$ .

## Π.2.2 Επιρροή του Λόγου Εδαφικής Δυσκαμψίας $E_o/S_u$

Εξετάζονται συστήματα ίδιου συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ , κοινού πλάτους θεμελίου  $B$ , εδραζόμενα σε αργιλικό στρώμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  και διαφορετικού λόγου εδαφικής δυσκαμψίας  $E_o/S_u$ .

Στα Σχήματα Π.16 και Π.17 παρουσιάζεται η απόκριση συστημάτων με πλάτος θεμελίου  $B = 6\text{m}$  και εγκάρσια διάσταση  $L = 2\text{m}$  για την περίπτωση  $S_u = 150\text{kPa}$ , για λόγους  $E_o/S_u = 1800 \rightarrow E_o = 270\text{MPa}$ ,  $E_o/S_u = 1200 \rightarrow E_o = 180\text{MPa}$  και  $E_o/S_u = 800 \rightarrow E_o = 120\text{MPa}$  για συντελεστές ασφαλείας  $F_s = 10, 5 \text{ \& } 2$ .

Σε όρους  $K_R(\vartheta, F_s)/K_{R,elastic} - \vartheta$  παρατηρούμε πως οι καμπύλες έχουν την ίδια μορφή, αλλά είναι μετατοπισμένες ως προς τον οριζόντιο άξονα. Αν όμως ο οριζόντιος άξονας αδιαστατοποιηθεί ως προς τη “χαρακτηριστική” γωνία  $\vartheta_s$ , όπως αυτή ορίστηκε προηγουμένως, τότε οι καμπύλες ταυτίζονται και το πρόβλημα είναι πλέον ανεξάρτητο του μέτρου ελαστικότητας.

Σε όρους  $M/S_u B^2 L - \vartheta$  παρατηρούμε πως όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ασφαλείας, τόσο μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται μεταξύ των καμπυλών στο τμήμα της συναρμογής μεταξύ ελαστικού και πλαστικού κλάδου. Όμως αφού ο οριζόντιος άξονας αδιαστατοποιηθεί ως προς τη “χαρακτηριστική” γωνία  $\vartheta_s$ , οι διαφορές εξαλείφονται και οι καμπύλες ταυτίζονται. Επίσης φαίνεται παραπλανητικό, αλλά οφείλεται απλώς και μόνο στον όρο ως προς τον οποίο πραγματοποιείται η αδιαστατοποίηση, ότι καθώς μικραίνει ο  $F_s$ , η κλίση του ελαστικού κλάδου γίνεται πιο απότομη. Ας σημειωθεί ότι η κράτυνση του

πλαστικού κλάδου που παρατηρείται για συντελεστή ασφαλείας  $F_S = 2$  οφείλεται σε αδυναμία του ίδιου του προσομοιώματος και δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Επιπλέον, προκειμένου να αποδειχθεί η ισχύς της κανονικοποίησης, ανεξαρτήτως και της τιμής που λαμβάνει η  $S_u$  για σταθερό λόγο  $E_o/S_u$  και συγκεκριμένο πλάτος θεμελίου  $B$ , παρουσιάζεται στα **Σχήματα Π.18** και **Π.19** με πλάτος  $B = 6\text{m}$  &  $L = 2\text{m}$  για  $S_u = 120\text{kPa}$  και  $S_u = 150\text{kPa}$  με σταθερό όμως  $E_o/S_u = 1200$ .

### Π.2.3 Απόκριση Ισοδύναμων Συστημάτων

Εξετάζεται η ισοδυναμία συστημάτων ίδιου συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ , διαφορετικού πλάτους θεμελίου  $B = 4.5, 6.0$  &  $7.5\text{m}$  (εγκάρσια διάστασης  $L = 1.5, 2.0$  &  $2.5\text{m}$ , αντιστοίχως) εδραζόμενων σε αργλικές στρώσεις διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών  $E_o$  και  $S_u$ , με ίδιο λόγο δυσκαμψίας εδάφους  $E_o/S_u = 1200$ .

Στα **Σχήματα Π.20** & **Π.21** παρουσιάζεται η απόκριση τριών συστημάτων σε όρους  $M_u/S_u B^2 L - \vartheta$  και  $K_R(\vartheta, F_S)/K_{R,elastic} - \vartheta$  για τρεις συντελεστές ασφαλείας: πολύ μεγάλος  $F_S = 10$ , συνήθης  $F_S = 5$  και μικρός  $F_S = 2$  με τα χαρακτηριστικά τους να σημειώνονται στον **Πίνακα Π.2**:

**Πίνακας Π.2** Χαρακτηριστικά Εξεταζόμενων Ισοδύναμων Συστημάτων

B (m)	L (m)	$S_u$ (kPa)	$E_o$ (MPa)	$S_u B^2 L$ (kNm)
4.5	1.5	96	115.2	2916
6	2	120	144	8640
7.5	2.5	150	180	21094

Παρατηρούμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις τα τρία συστήματα έχουν ακριβώς την ίδια απόκριση, οπότε αρκεί να μελετήσουμε την συμπεριφορά ενός. Προφανώς σε

απόλυτους όρους τα 3 συστήματα δεν έχουν την ίδια δυσκαμψία ούτε αναπτύσσουν την ίδια ροπή.

## Π.2.4 Επιρροή του Συντελεστή Ασφαλείας $F_s$

Εξετάζονται συστήματα διαφορετικού συντελεστή ασφαλείας  $F_s$ , κοινού πλάτους θεμελίου  $B = 6$  m και  $L = 2$  m (εφόσον προηγουμένως αποδείχθηκε η ισοδυναμία) εδραζόμενα σε έδαφος με ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά  $E_o = 270$  MPa,  $S_u = 150$  kPa.

Με την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε όρους  $K_R(\vartheta, F_s)/K_{R,elastic} - \vartheta$  στο **Σχήμα Π.22** γίνεται φανερή η έντονη επίδραση του  $F_s$  στην αρχική δυσκαμψία του συστήματος – ποιοτικά όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Παρατηρούμε στο **Σχήμα Π.23** ότι δεν υπάρχει μονοτονική σχέση ανάμεσα στον  $F_s$  και στη μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή  $M_u$  όταν αυτή αδιαστατοποιείται ως προς  $S_u B^2 L$ : η  $M_u$  αυξάνει με τη μείωση του  $F_s$  μέχρι τον  $F_s = 2$  και από εκεί και πέρα μείωση του  $F_s$  οδηγεί σε μείωσή της. Για ακόμα μια φορά σημειώνεται ότι η κράτυνση του πλαστικού κλάδου για  $F_s < 2$  είναι πλασματική, δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Παρατηρούμε επίσης, όπως αναμενόταν, τη μείωση της αρχικής κλίσης της καμπύλης, όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Το **Σχήμα Π.24** παρουσιάζει με πιο εποπτικό τρόπο την σχέση μεταξύ του αντιστρόφου του  $F_s$  και της αδιαστατοποιημένης μέγιστης αναπτυσσόμενης ροπής  $M_u/S_u B^2 L$ , όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Όπως και για την προηγούμενη περίπτωση, σε πολύ αδρές γραμμές, μπορούμε να διακρίνουμε δύο ομάδες καμπυλών (**Σχήμα Π.23**): (α) μεγάλοι  $F_s = 10, 5$  και (β) μικροί  $F_s = 3.3, 2.5, 2, 1.7, 1.4, 1.25$  &  $1.1$ . Όσον αφορά την πρώτη ομάδα καμπυλών, που περιλαμβάνει τα ελαφρά φορτισμένα θεμέλια, η μορφή της μείωσης της δυσκαμψίας έχει ως εξής: αρχική δυσκαμψία περίπου ίση με την ελαστική στον ημίχωρο, ένα πλατό μέχρι την αντίστοιχη γωνία αποκόλλησης και στη συνέχεια απότομη πτώση. Η δε δεύτερη ομάδα καμπυλών, που περιλαμβάνει τους συνήθεις και τους μικρούς συντελεστές ασφαλείας, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

μειωμένη αρχική δυσκαμψία σε σχέση με την ελαστική, λόγω πλαστικοποιήσεων από τα κατακόρυφα φορτία, και συνεχή, ομαλότερη σχετικά πτώση της δυσκαμψίας.

Με την εναλλακτική αδιαστατοποίηση, ως προς τα μεγέθη  $M_R$  &  $\vartheta_R$  που αντιστοιχούν στην ανατροπή του στερεού σώματος, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του **Σχήματος Π.25** είναι περισσότερο εύληπτα, καθώς όσο μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας  $F_S$ , τόσο η αρχική κλίση της καμπύλης, όσο και η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή μειώνονται.

Όσον αφορά τη γωνία ανατροπής  $\vartheta_u$ , παρατηρούμε ότι υπάρχει μονοτονική σχέση με τον  $F_S$ : όσο μειώνεται ο  $F_S$ , τόσο μειώνεται η  $\vartheta_u$ . Το **Σχήμα Π.26** παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ του  $F_S$  και αδιαστατοποιημένης γωνίας ανατροπής  $\vartheta_u/\vartheta_R$ , όπου  $\vartheta_R$  η αντίστοιχη γωνία ανατροπής του άκαμπτου σώματος επί άκαμπτης βάσης. Επομένως, η  $\vartheta_u$  άκαμπτου σώματος επί ενδόσιμου ελαστοπλαστικού εδάφους είναι γενικά μικρότερη από την  $\vartheta_R$  εξαιτίας των δημιουργούμενων πλαστικοποιήσεων.

### **Π.2.5 Αρχική Περιστροφική Δυσκαμψία $K_R(0, F_S)$**

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η ύπαρξη αρχικών πλαστικοποιήσεων λόγω των κατακόρυφων φορτίων οδηγεί σε μείωση της αρχικής δυσκαμψίας του συστήματος εδάφους-θεμελίου. Άρα, ακόμα και για μηδενική στροφή  $\vartheta$  του θεμελίου, η τιμή της περιστροφικής δυσκαμψίας θα είναι μικρότερη εκείνης που αντιστοιχεί στον ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο. Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων μπορεί να εξαχθεί μία συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφης φόρτισης  $F_S$  και της αρχικής δυσκαμψίας του συστήματος ανηγμένης στην αντίστοιχη ελαστική.

Στο **Σχήμα Π.27** απεικονίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και η προσεγγιστική σχέση που προτείνεται:

$$\psi(F_S) = \frac{K_R(0, F_S)}{K_{R,elastic}} \cong 1.08 - \frac{1.02}{F_S} \quad (\text{Π.13})$$

## Π.2.6 Κανονικοποίηση των Αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, συμπεραίνουμε ότι η βασική παράμετρος του προβλήματος είναι ο συντελεστής ασφαλείας  $F_S$ . Ο  $F_S$  καθορίζει τη μορφή της μείωσης της περιστροφικής δυσκαμψίας συναρτήσει της γωνίας στροφής του θεμελίου. Αυτό καθιστά δυσχερή την προσπάθεια εξαγωγής μίας καμπύλης ανεξάρτητης του  $F_S$ . Έτσι, η προσπάθεια κανονικοποίησης των αποτελεσμάτων επικεντρώνεται στην εξαγωγή καμπυλών συναρτήσει του  $F_S$ .

Η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται με χρήση της “χαρακτηριστικής” γωνίας  $\vartheta_S$ :

$$\vartheta_S \cong \frac{NB}{4K_{R,elastic} \left(1.08 - \frac{1.02}{F_S}\right)} \cdot \left[1 - 0.22 \left(1 - \frac{1}{F_S}\right)^2 \left(\frac{B}{L}\right)^{0.2}\right] \quad (\text{Π.14})$$

Όπως σχολιάστηκε και παραπάνω, στα ελαφρά φορτισμένα συστήματα κυριαρχεί η αποκόλληση, ενώ στα βαριά φορτισμένα η κινητοποίηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους ως τρόπος ανάληψης της ροπής από οριζόντια φορτία.

Στο **Σχήμα Π.28** δίνονται οι τελικές μορφές των καμπυλών κανονικοποιημένης τέμνουσας δυσκαμψίας - γωνίας στροφής του θεμελίου σε όρους  $K_R(\vartheta, F_S)/K_{R,elastic} - \vartheta/\vartheta_S$ . Εναλλακτικά, παρουσιάζεται το ίδιο διάγραμμα στο **Σχήμα Π.29**, αλλά με αδιαστατοποιημένη την τέμνουσα δυσκαμψία ως προς την αρχική δυσκαμψία για μηδενική γωνία στροφής  $\vartheta$  του θεμελίου  $K_R(\vartheta, F_S)/K_{R,elastic} \psi(F_S) - \vartheta/\vartheta_S$  για τον αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  κάθε φορά. Οι καμπύλες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή της δυσκαμψίας ενός ισοδύναμου γραμμικού συστήματος δεδομένης της γωνίας στροφής του  $\vartheta$ .

### Π.3 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

- Μέσω των αδιάστατων καμπυλών επιτυγχάνεται ο ποσοτικός προσδιορισμός της μείωσης της περιστροφικής δυσκαμψίας συναρτήσει της γωνίας στροφής του θεμελίου. Έτσι, οι καμπύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή ρεαλιστικών τιμών της περιστροφικής δυσκαμψίας. Εν τω μεταξύ, ύστερα από την κανονικοποίηση των αξόνων ως προς  $K_{R,elastic}\psi(F_S)$  και  $\vartheta_S$  αντίστοιχα, προκύπτει ότι, για δεδομένο συντελεστή ασφαλείας  $F_S$ , οι καμπύλες κάθε σχήματος θεμελίου (λωρίδας, τετραγώνου, κύκλου & ορθογωνίου 3:1) είναι μοναδικές (**Σχήμα Π.30**). Το γεγονός ότι οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται επιτρέπει την ασφαλή χρήση τους για την προκαταρκτική ισοδύναμη ελαστική ανάλυση *οποιουδήποτε* (εντός λογικού πλασίου) σχήματος θεμελίου. Αντιστοίχως μπορούν να εξαχθούν μοναδικές καμπύλες αναπτυσσόμενης ροπής  $M$  – γωνίας στροφής  $\vartheta$  του θεμελίου για να χρησιμοποιηθούν σε μια προκαταρκτική μη-γραμμική ελαστοπλαστική ανάλυση *οποιουδήποτε* σχήματος θεμελίου [Gazetas et al., 2012].
- Η ύπαρξη αρχικών πλαστικοποιήσεων λόγω των κατακόρυφων φορτίων οδηγεί σε μείωση της αρχικής δυσκαμψίας του συστήματος εδάφους-θεμελίου. Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων μπορεί να εξαχθεί μία συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατακόρυφης φόρτισης  $F_S$  και της αρχικής δυσκαμψίας του συστήματος ανηγμένης στην αντίστοιχη ελαστική. Στο **Σχήμα Π.31** απεικονίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και η προσεγγιστική σχέση που προτείνεται [Gazetas et al., 2012]:

$$\psi(F_S) = \frac{K_R(0, F_S)}{K_{R,elastic}} \cong 1 - \frac{0.8}{F_S} \quad (\text{Π.15})$$

Αυτή η συσχέτιση αποτελεί μία συγκεντρωτική προσέγγιση, ανεξαρτήτως του είδους της θεμελίωσης που εξετάζεται. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι προτιμότερο να ακολουθήσει κανείς τις επιμέρους σχέσεις που δίνονται για το

εκάστοτε είδος επιφανειακής θεμελίωσης. Αξίζει να σημειωθεί πως το “ορθογωνικό” θεμέλιο προσομοιάζει την περιστροφή ενός επιφανειακού θεμελίου τοιχώματος (περιστροφή εντός του επιπέδου του τοιχώματος). Σε αυτό το είδος θεμελίωσης παρατηρούμε μεγαλύτερη μείωση της αρχικής περιστροφικής δυσκαμψίας σε σχέση με τα υπόλοιπα επιφανειακά θεμέλια που εξετάστηκαν για μικρούς συντελεστές ασφαλείας. Αυτή η συμπεριφορά είναι ενδεχομένως αναμενόμενη λόγω της μεγαλύτερης σημασίας που έχουν οι πλαστικοποιήσεις του εδάφους. Συγκεκριμένα, οι πλαστικοποιήσεις που συγκεντρώνονται στις γωνίες του θεμελίου παίζουν μεγαλύτερο ρόλο όταν η κρίσιμη πλευρά είναι η μικρότερη σε μήκος.

- Η κανονικοποίηση της γωνίας στροφής με την προτεινόμενη “χαρακτηριστική γωνία” δύσκαμπτου θεμελίου επί ανελαστικού εδάφους  $\theta_s$  είναι ακριβής για ελαφρά φορτισμένα θεμέλια (μεγάλους  $F_s$ ), όπου κυριαρχεί το ανασήκωμα του θεμελίου. Αποφεύγεται η χρήση του όρου “γωνία αποκόλλησης”, καθώς για τα βαριά φορτισμένα θεμέλια στην πραγματικότητα μπορεί να μην υπάρξει καθόλου αποκόλληση. Ωστόσο, η χρήση αυτής της γωνίας για την κανονικοποίηση των διαγραμμάτων της δυσκαμψίας είναι ιδιαίτερα επιτυχής, τόσο για μεγάλους, όσο και για μικρότερους συντελεστές ασφαλείας και ως εκ τούτου υιοθετείται.
- Η κυριότερη παράμετρος του ανελαστικού προβλήματος που εξετάστηκε ήταν ο συντελεστής ασφαλείας έναντι κατακόρυφης φόρτισης  $F_s$ . Όσο μικραίνει ο  $F_s$ , δηλαδή όσο πιο βαριά φορτισμένο είναι ένας σύστημα, τόσο πιο έντονες είναι οι πλαστικοποιήσεις στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο. Επομένως, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της αρχικής περιστροφικής δυσκαμψίας σε σχέση με την αντίστοιχη ελαστική τιμή. Επιπλέον, ο  $F_s$  έχει επίδραση στη μορφή της μείωσης της περιστροφικής δυσκαμψίας συναρτήσει της γωνίας στροφής: στα ελαφρά φορτισμένα θεμέλια (μεγάλοι  $F_s$ ) κυριαρχεί η αποκόλληση του θεμελίου ως τρόπος ανάληψης της ροπής από οριζόντια φορτία. Αντιθέτως, στα βαριά φορτισμένα θεμέλια (μικροί  $F_s$ ) κυριαρχεί η κινητοποίηση μηχανισμών φέρουσας ικανότητας, ενώ η αποκόλληση του θεμελίου είναι αμελητέα.

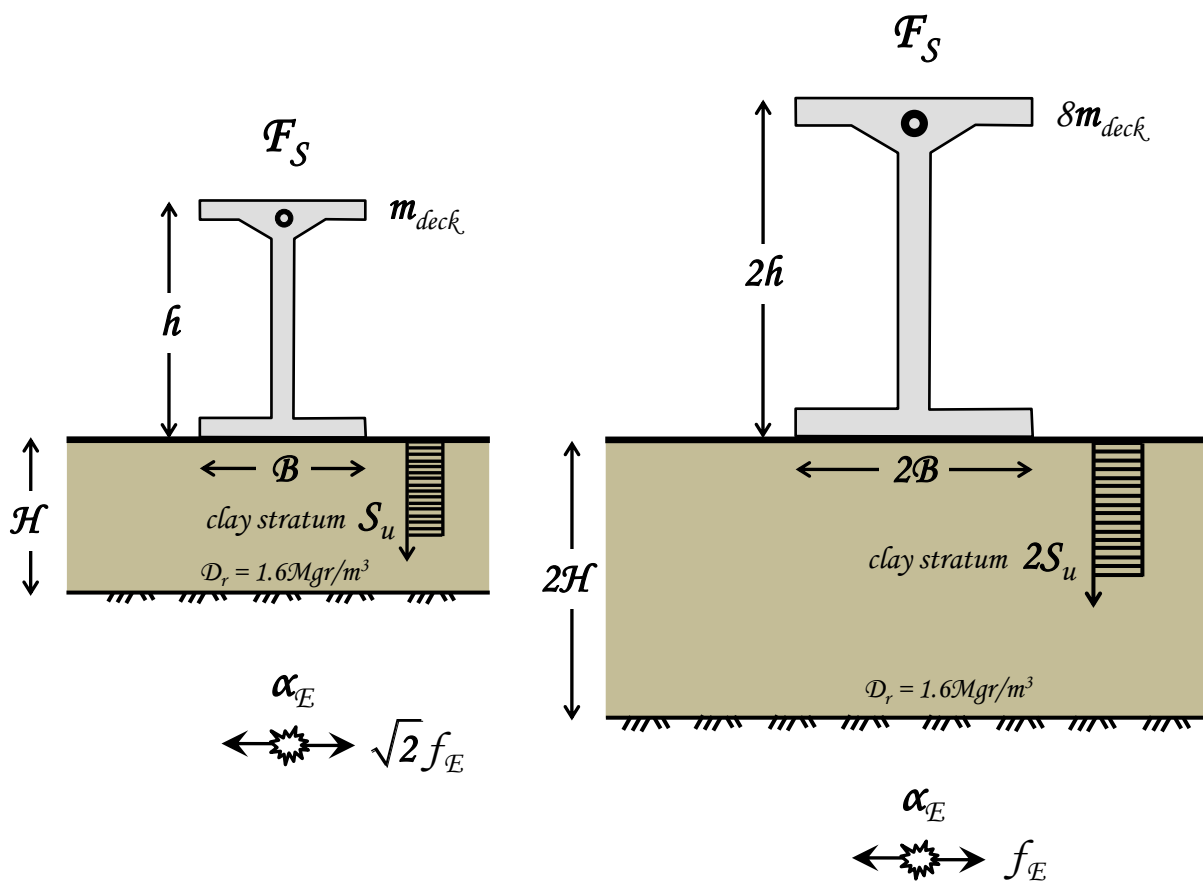




Σχήματα Παραρτήματος

---

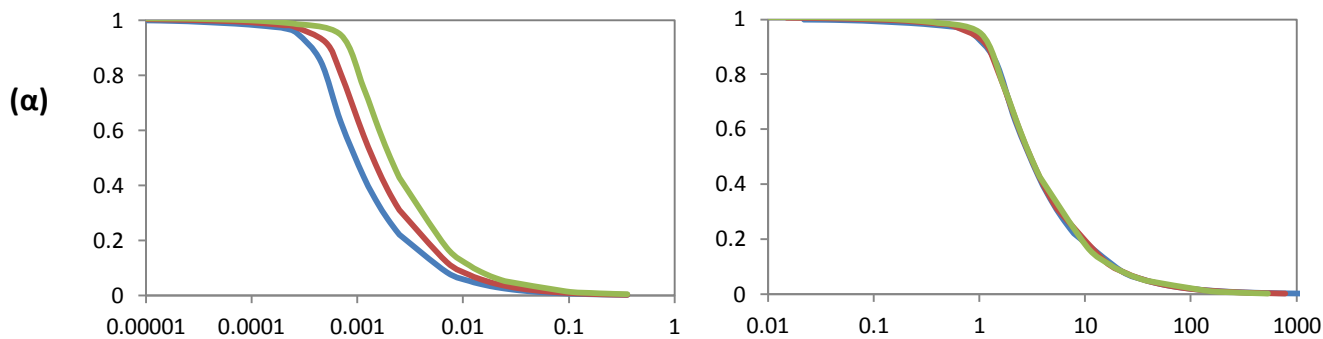




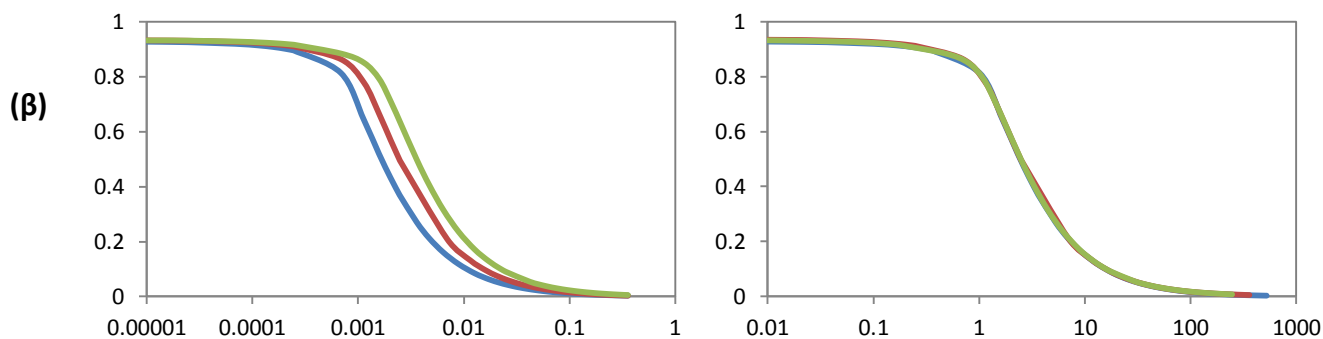
Σχήμα Π.1 Στατικός & Δυναμικός Ισοδύναμα Συστήματα.

$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$

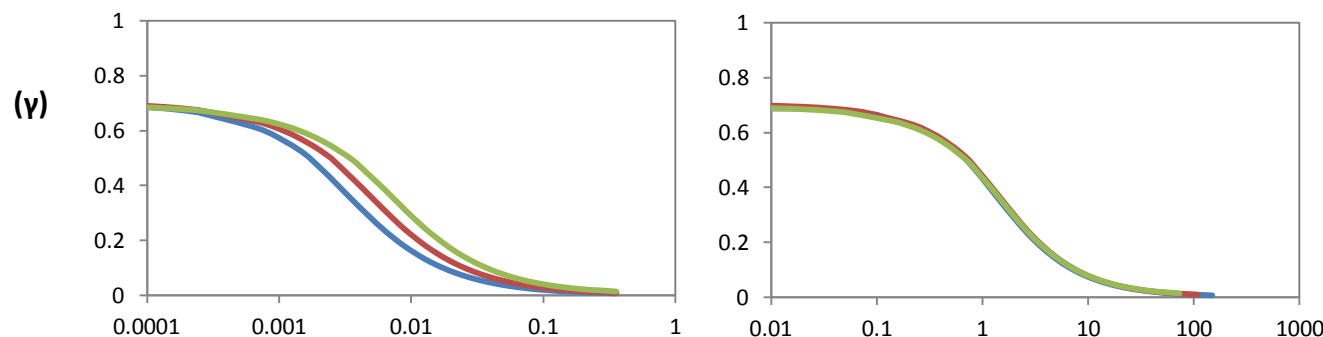
$F_S = 10$



$F_S = 5$



$F_S = 2$

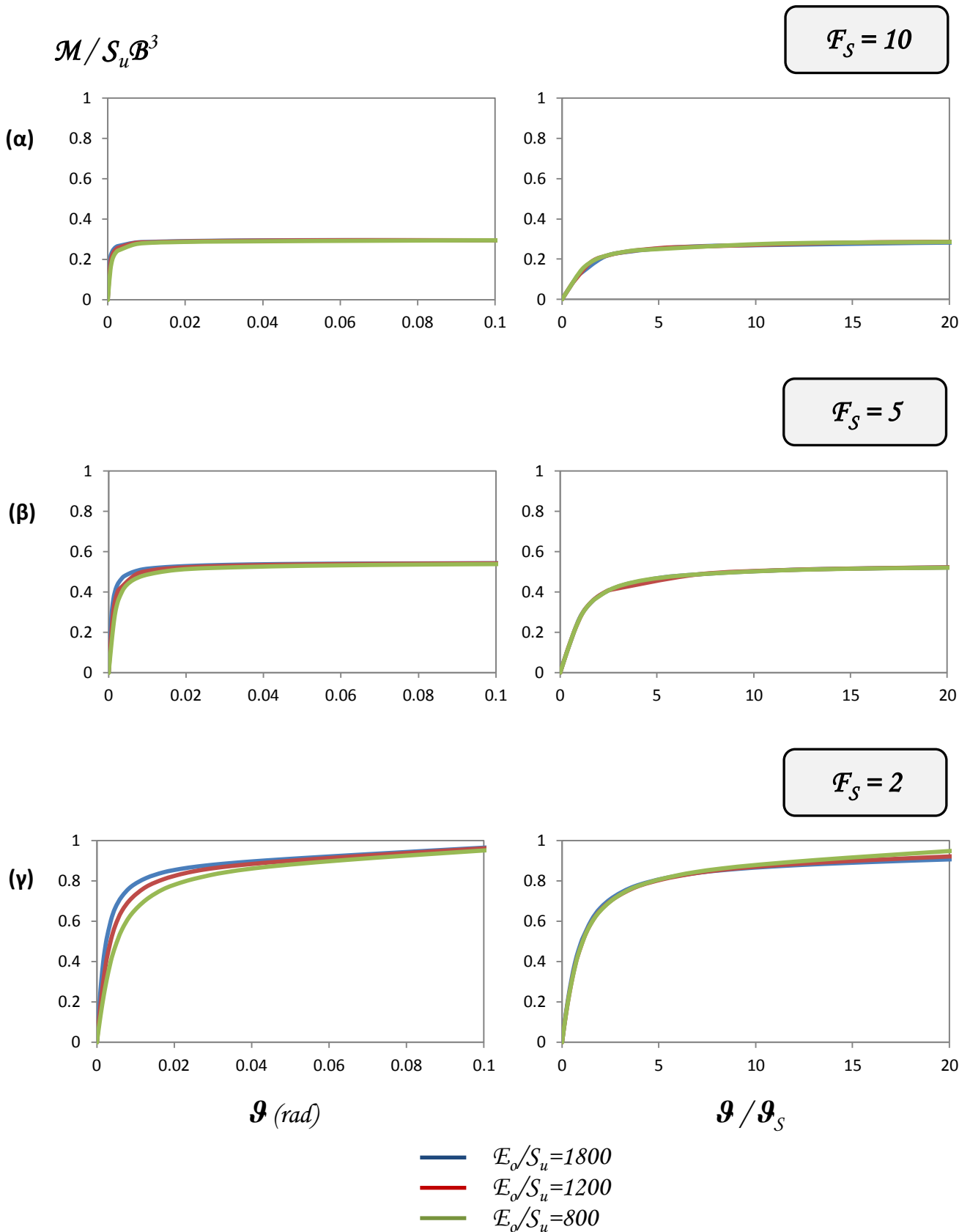


$\vartheta$  (rad)

$\vartheta / \vartheta_S$

- $E_o/S_u = 1800$
- $E_o/S_u = 1200$
- $E_o/S_u = 800$

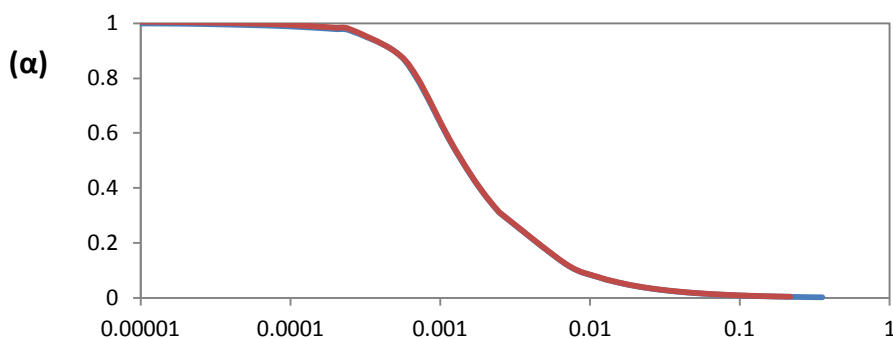
**Σχήμα Π.2** Επιρροή του λόγου εδαφικής δυσκαμψίας  $E_o/S_u$  με  $S_u=150\text{kPa}$  για τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στροφής  $\vartheta$  ή Αδιαστατοποιημένη γωνία στροφής  $\vartheta/\vartheta_S$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .



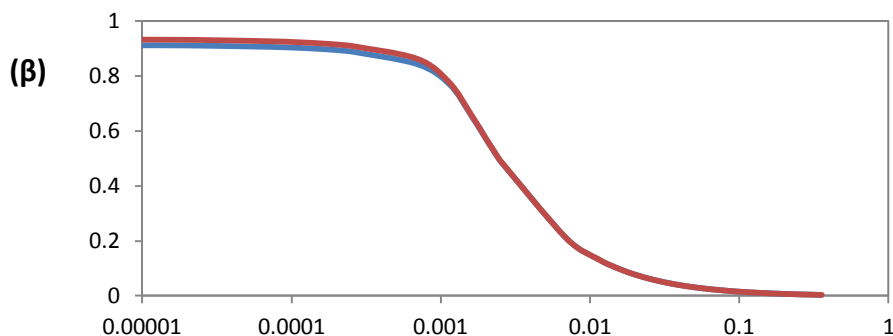
**Σχήμα Π.3** Επιρροή του λόγου εδαφικής δυσκαμψίας  $E_o/S_u$  με  $S_u=150\text{kPa}$  για τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $M/S_u B^3$  – γωνία στροφής  $\vartheta$  ή Αδιαστατοποιημένη γωνία στροφής  $\vartheta/\vartheta_S$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .

$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$

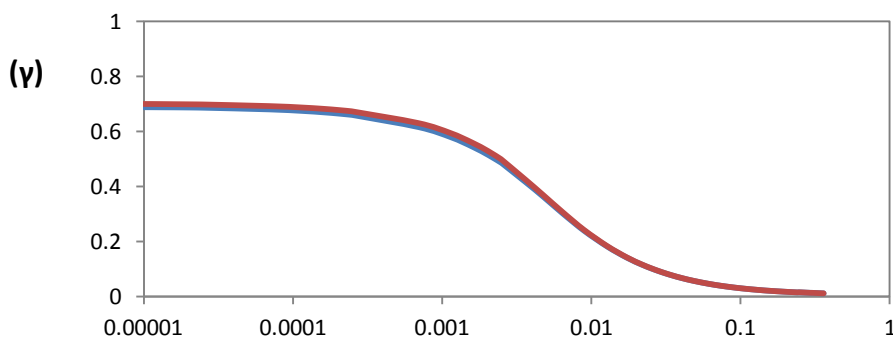
$$F_S = 10$$



$$F_S = 5$$



$$F_S = 2$$

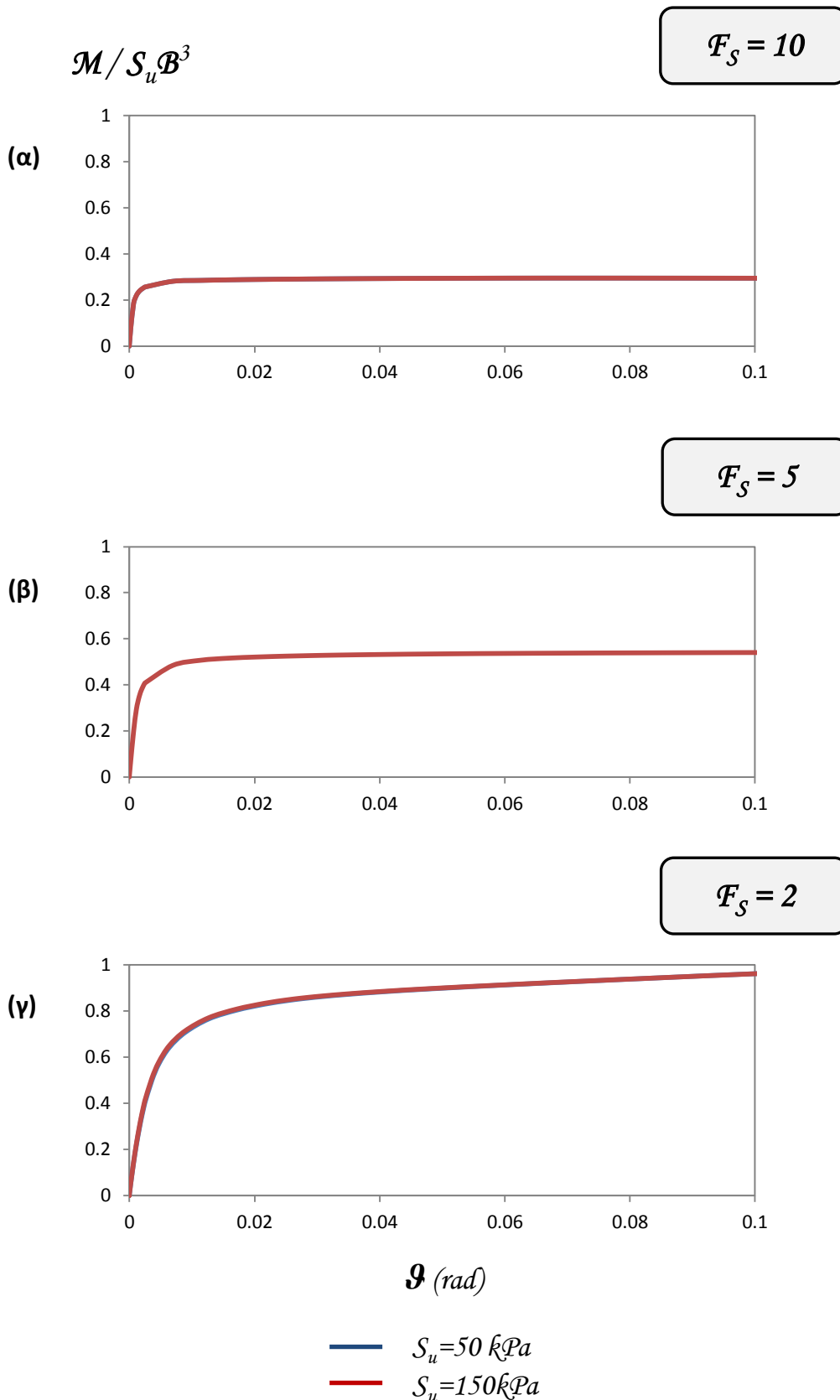


$\vartheta$  (rad)

—  $S_u = 50 \text{ kPa}$

—  $S_u = 150 \text{ kPa}$

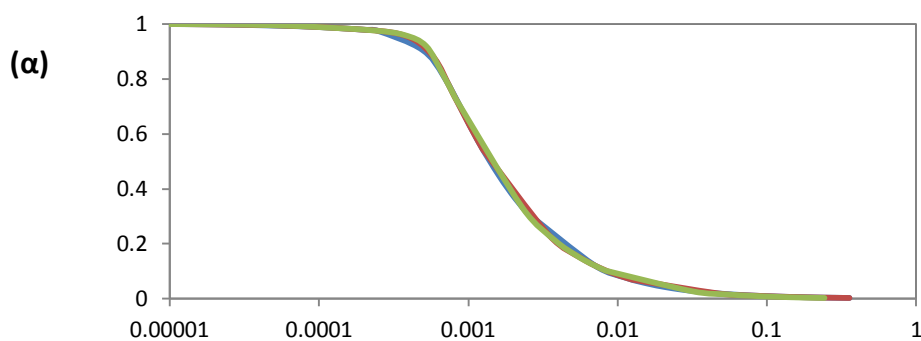
**Σχήμα Π.4** Επιρροή της μεταβολής του  $S_u$  με σταθερό  $E_o/S_u=1200$  για τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S)/\mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στροφής  $\vartheta$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .



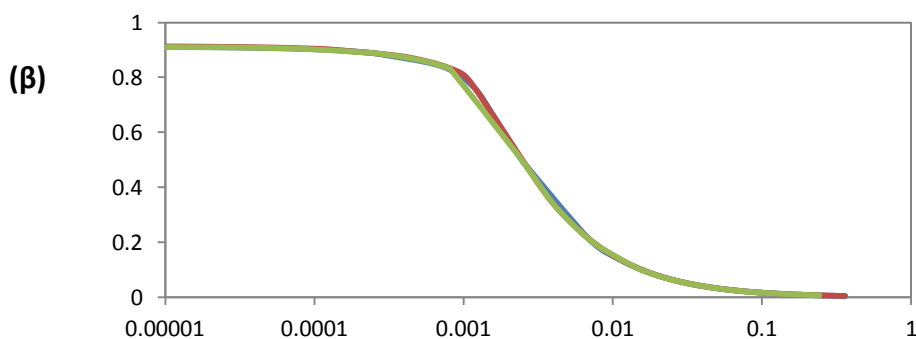
**Σχήμα Π.5** Επιρροή της μεταβολής του  $S_u$  με σταθερό  $E_o/S_u=1200$  για **τετραγωνικό θεμέλιο** πλάτους  $B=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $M/S_u B^3$  – γωνία στροφής  $\theta$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .

$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$

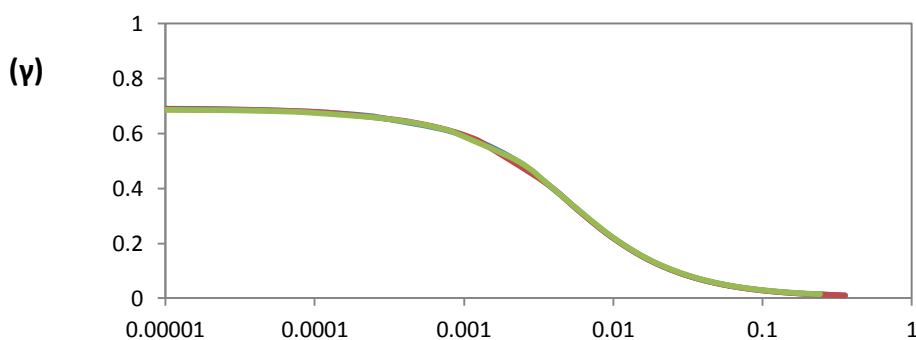
$$F_S = 10$$



$$F_S = 5$$



$$F_S = 2$$

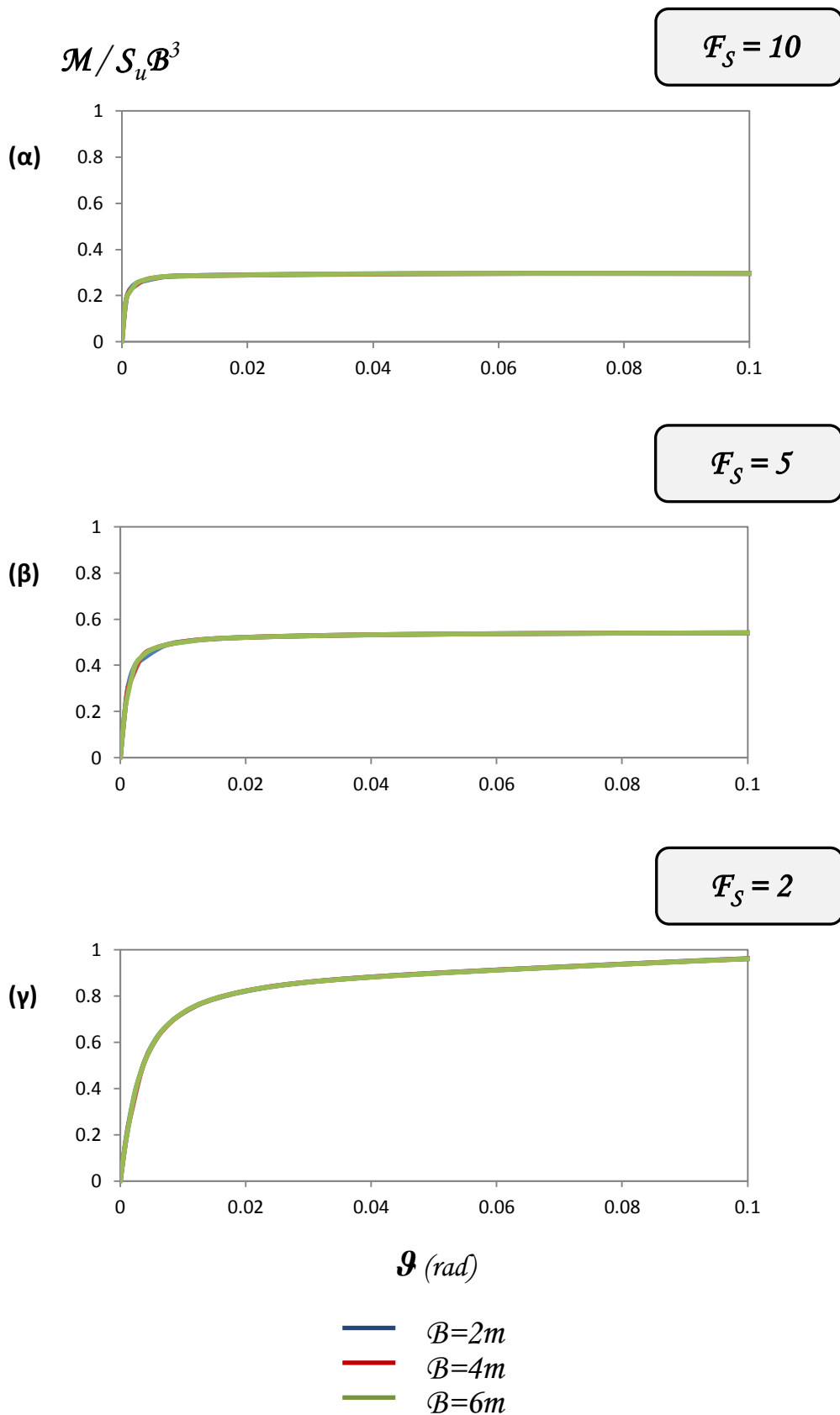


$\vartheta$  (rad)

- $B=2m$
- $B=4m$
- $B=6m$

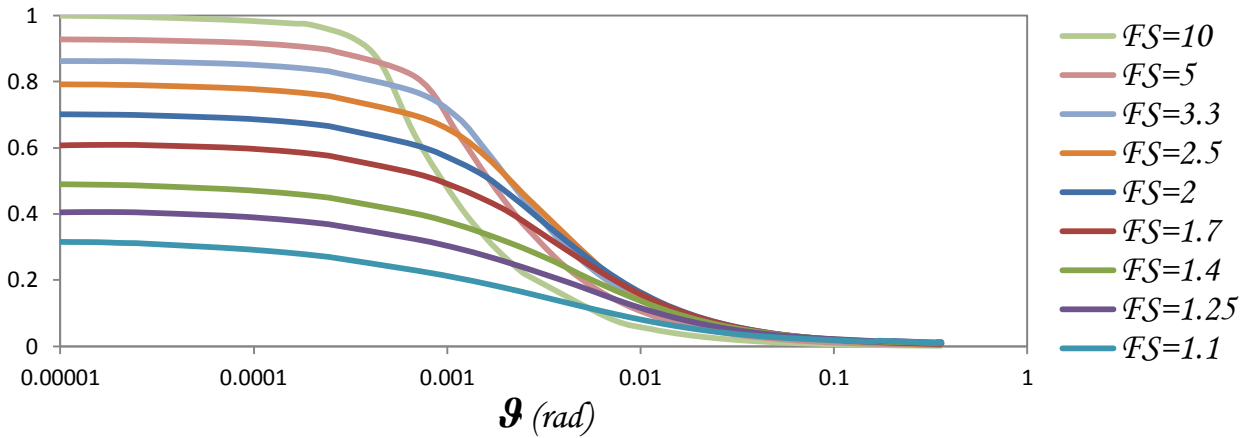
**Σχήμα Π.6** Ισοδύναμα Συστήματα με  $E_o/S_o=1200$  για **τετραγωνικά θεμέλια** πλάτους  $B = 2, 4 \text{ \& } 6 \text{ m}$ . Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$  - γωνία στροφής  $\vartheta$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .





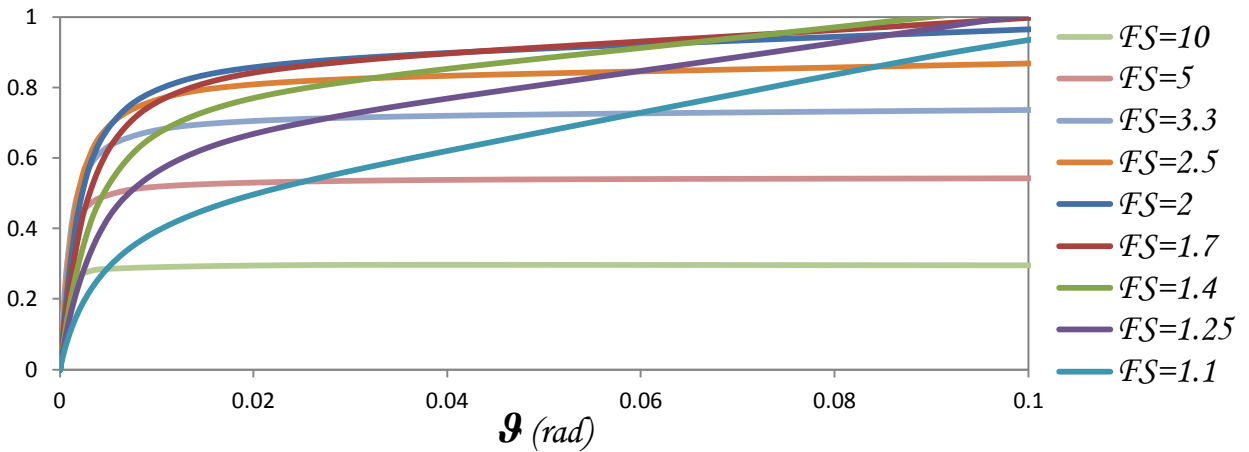
**Σχήμα Π.7** Ισοδύναμα Συστήματα με  $E_o/S_u=1200$  για τετραγωνικά θεμέλια πλάτους  $B = 2, 4$  &  $6$  m. Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $M/S_u B^3$  – γωνία στροφής  $\theta$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .

$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$



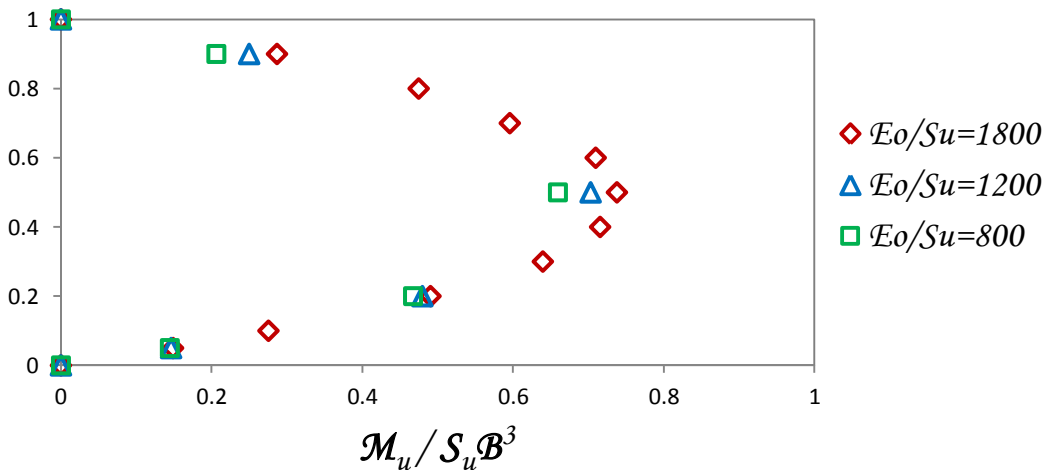
Σχήμα Π.8 Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για  $E_o/S_u=1800$ ,  $S_u=150\text{kPa}$ . Τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S)/\mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στροφής  $\vartheta$ .

$$\mathcal{M} / S_u B^3$$



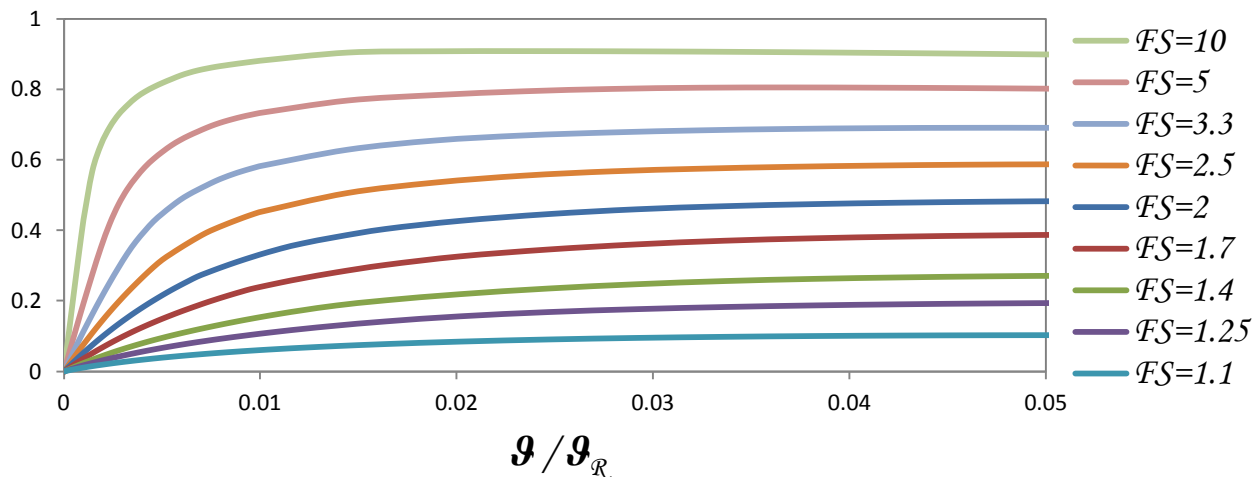
Σχήμα Π.9 Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για  $E_o/S_u=1800$ ,  $S_u=150\text{kPa}$ . Τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $\mathcal{M}/S_u B^3$  – γωνία στροφής  $\vartheta$ .

$$\chi = 1/F_S = \mathcal{N}_u / \mathcal{N}_{uo}$$



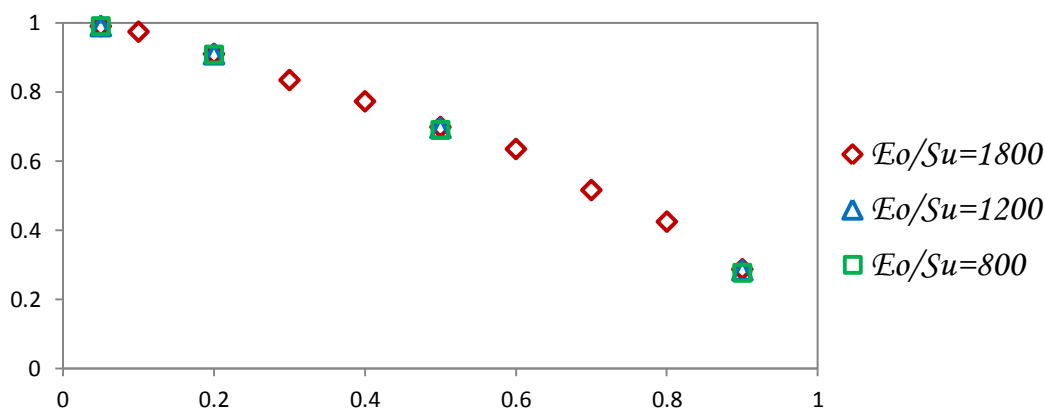
Σχήμα Π.10 Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για διάφορα  $E_o/S_u$ . Τετραγωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=2\text{m}$  με λυγνότητα  $2h/B = 4$ . Σχέση αντιστρόφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi$  – μέγιστης αδιαστατοποιημένης ροπής  $\mathcal{M}_u/\mathcal{N}_{uo}B$ .

$M/M_R$



**Σχήμα Π.11** Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για  $E_o/S_u=1800$ ,  $S_u=150\text{kPa}$ . **Τετραγωνικό θεμέλιο** πλάτους  $B=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $M/M_R$  – γωνία στροφής  $\theta/\theta_R$ .

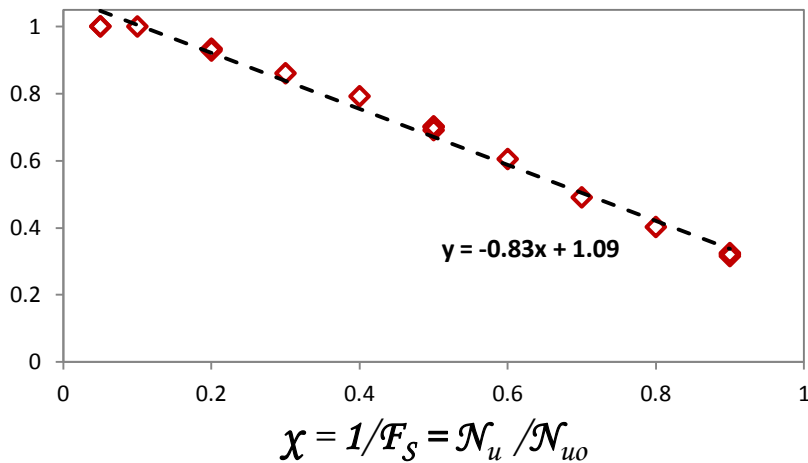
$\theta_u/\theta_R$



$$\chi = 1/F_S = N_u / N_{uo}$$

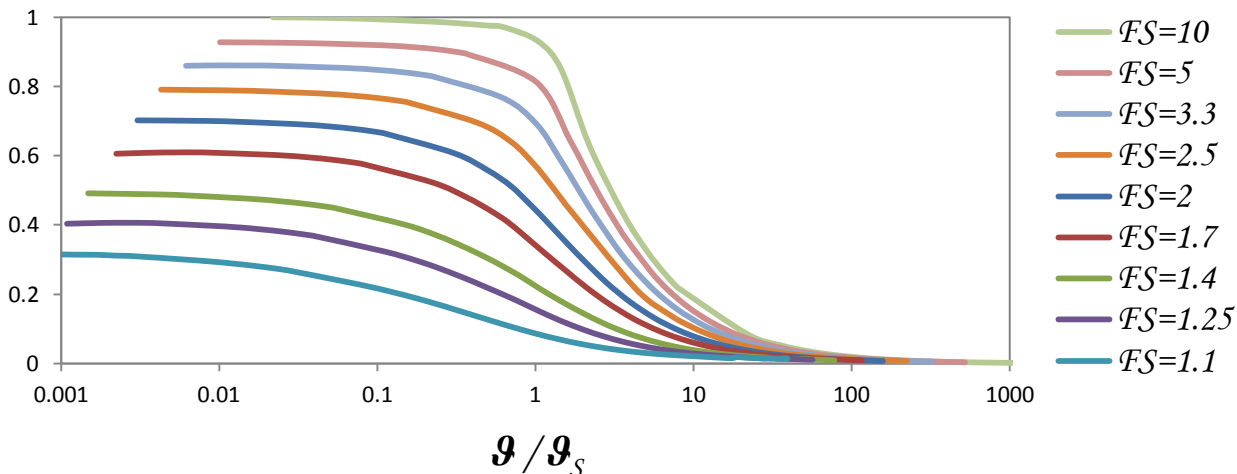
**Σχήμα Π.12** Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για διάφορα  $E_o/S_u$ . **Τετραγωνικό θεμέλιο** πλάτους  $B=2\text{m}$  με λυγηρότητα  $2h/B = 4$ . Σχέση αντιστρόφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi$  – αδιαστατοποιημένης γωνίας ανατροπής  $\theta_u/\theta_R$ .

$$\mathcal{K}_R(0, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$



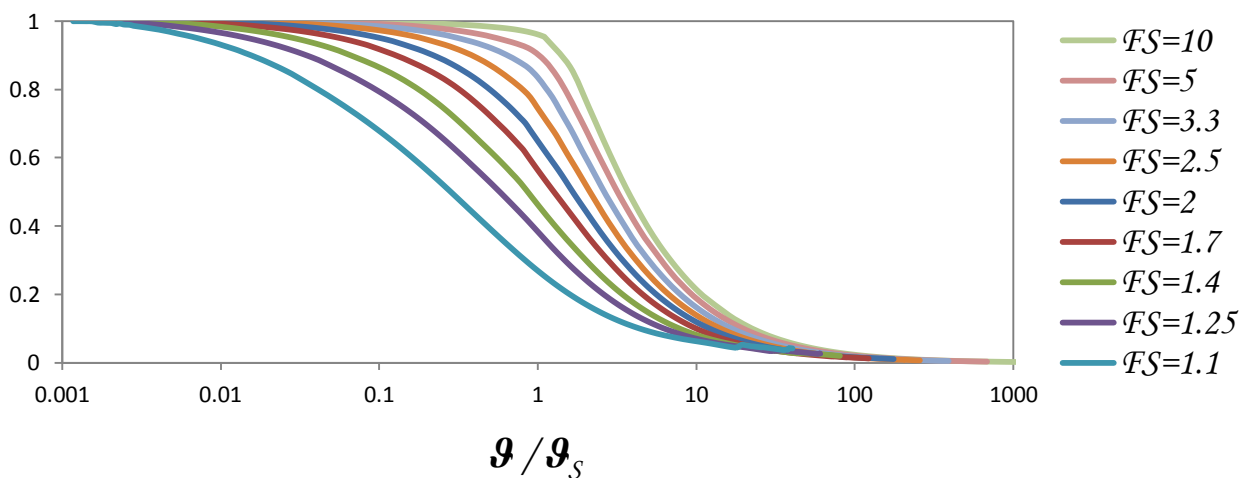
Σχήμα Π.13 Συσχέτιση της απομείωσης της αρχικής περιστροφικής δυσκαμψίας  $\mathcal{K}_R(0, F_S)$  ως προς την ελαστική  $\mathcal{K}_{R, elastic}$  συναρτήσει του αντιστρόφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi=1/F_S$  για τετραγωνικό θεμέλιο.

$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$



Σχήμα Π.14 Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στροφής  $\vartheta / \vartheta_S$  για τετραγωνικό θεμέλιο.

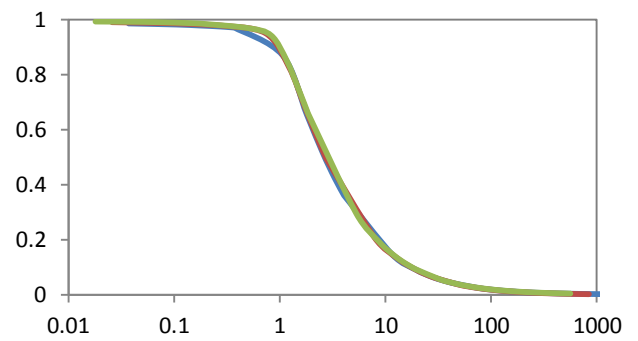
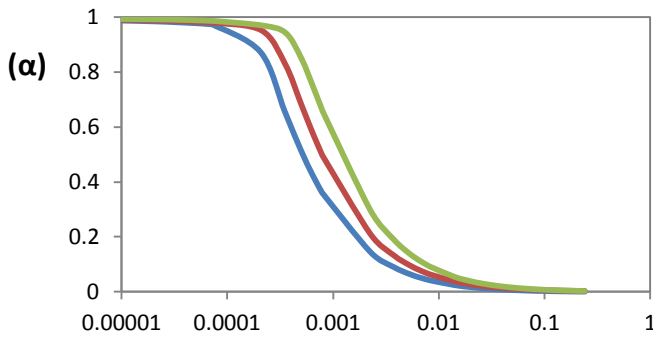
$$\mathcal{K}_R(0, F_S) / \mathcal{K}_R(\vartheta, F_S)$$



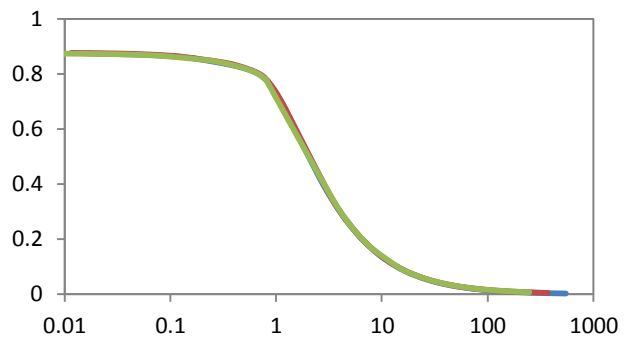
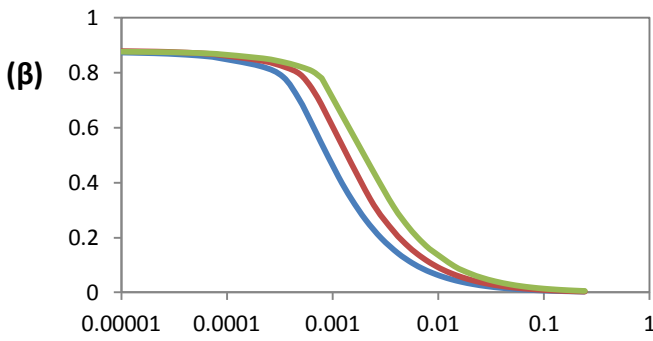
Σχήμα Π.15 Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_R(0, F_S)$  – γωνία στροφής  $\vartheta / \vartheta_S$  για τετραγωνικό θεμέλιο.

$F_S = 10$

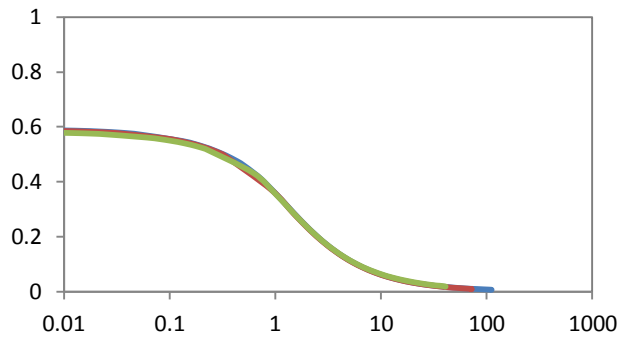
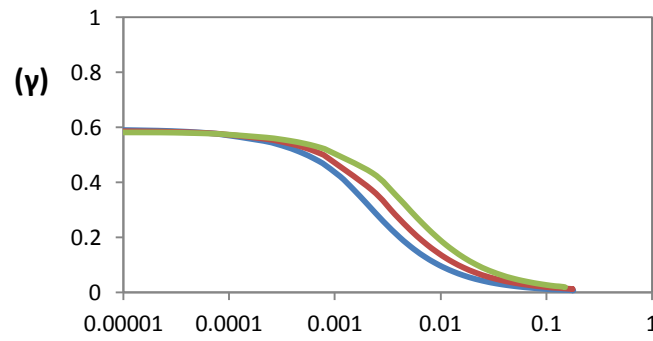
$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$



$F_S = 5$



$F_S = 2$



$\vartheta$  (rad)

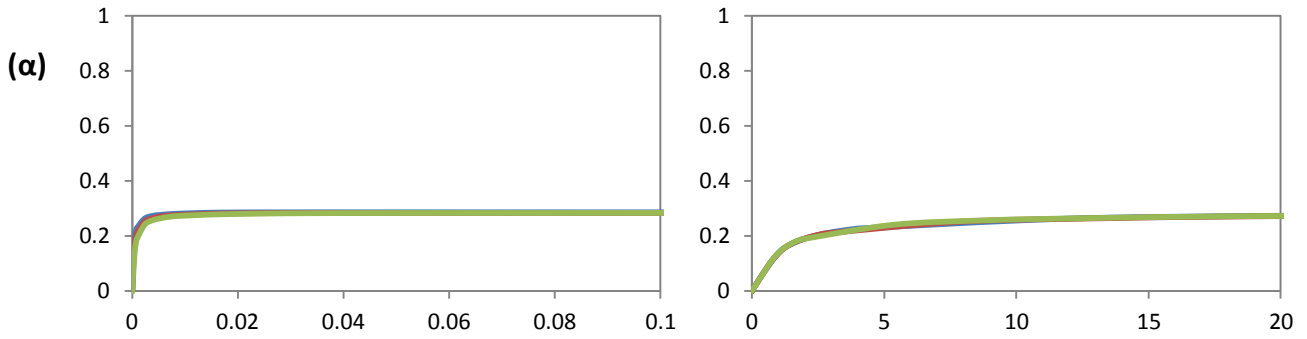
$\vartheta / \vartheta_S$

- $E_o/S_u=1800$
- $E_o/S_u=1200$
- $E_o/S_u=800$

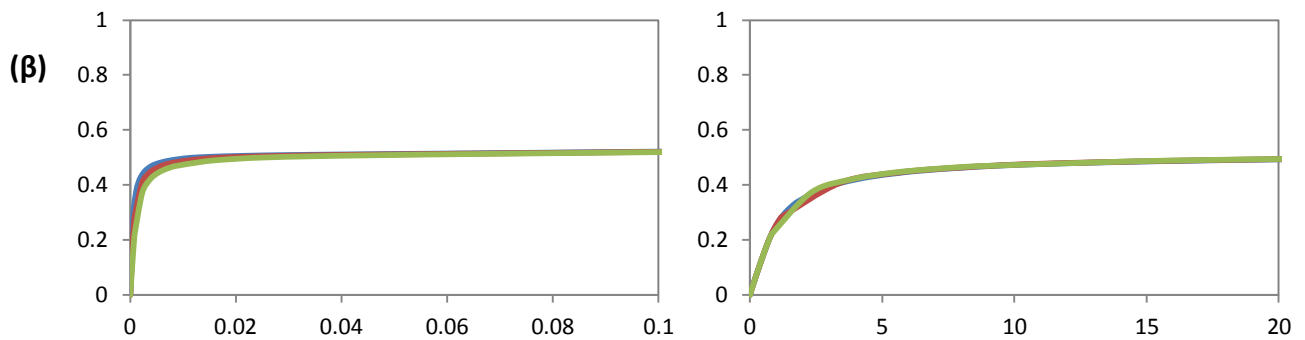
**Σχήμα Π.16** Επιρροή του λόγου εδαφικής δυσκαμψίας  $E_o/S_u$  με  $S_u=150\text{kPa}$  για ορθογωνικό θεμέλιο πλάτους  $B=6\text{m}$  & εγκάρσιας διάστασης  $L=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\theta, F_S)/\mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στρώσης  $\vartheta$  ή κανονικοποιημένη γωνία στρώσης  $\vartheta/\vartheta_S$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .

$$M/S_u B^2 L$$

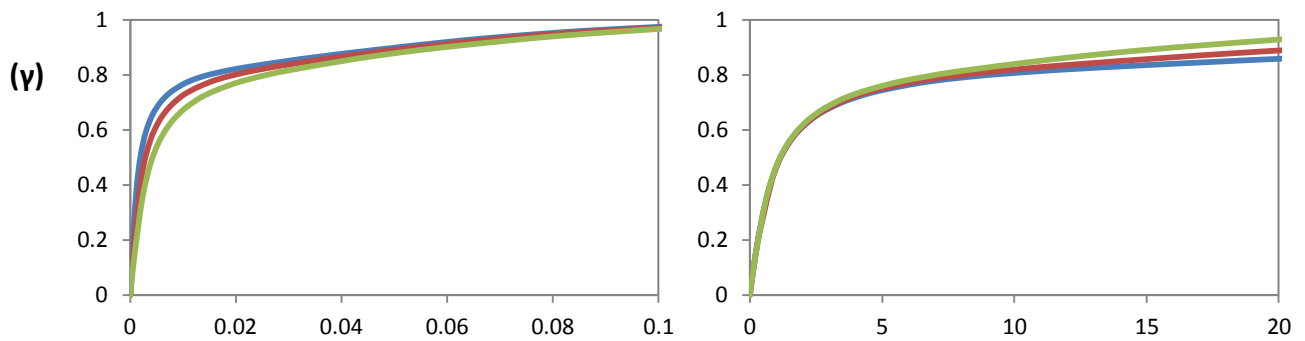
$$F_S = 10$$



$$F_S = 5$$



$$F_S = 2$$



$$\theta \text{ (rad)}$$

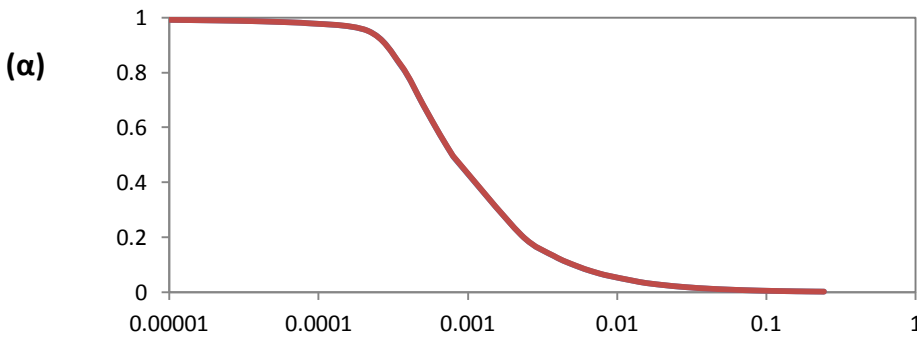
$$\theta / \theta_S$$

- $E_o/S_u = 1800$
- $E_o/S_u = 1200$
- $E_o/S_u = 800$

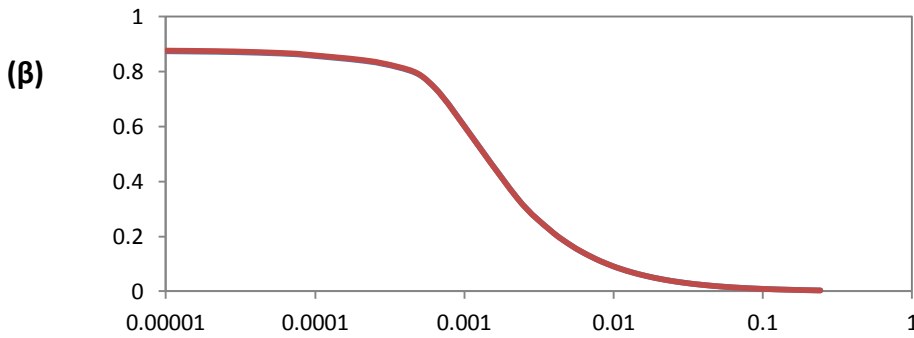
**Σχήμα Π.17** Επιρροή του λόγου εδαφικής δυσκαμψίας  $E_o/S_u$  με  $S_u=150\text{kPa}$  για **ορθογωνικό θεμέλιο** πλάτους  $B=6\text{m}$  & εγκάρσιας διάστασης  $L=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $M/S_u B^2 L$  – γωνία στροφής  $\theta$  ή κανονικοποιημένη γωνία στροφής  $\theta/\theta_S$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .

$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$

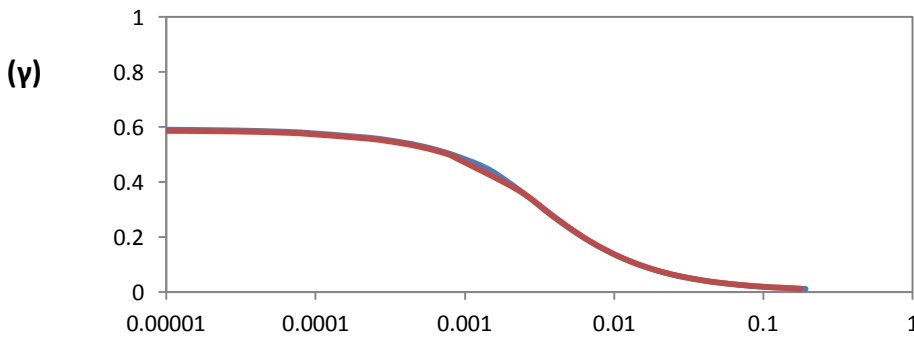
$$F_S = 10$$



$$F_S = 5$$



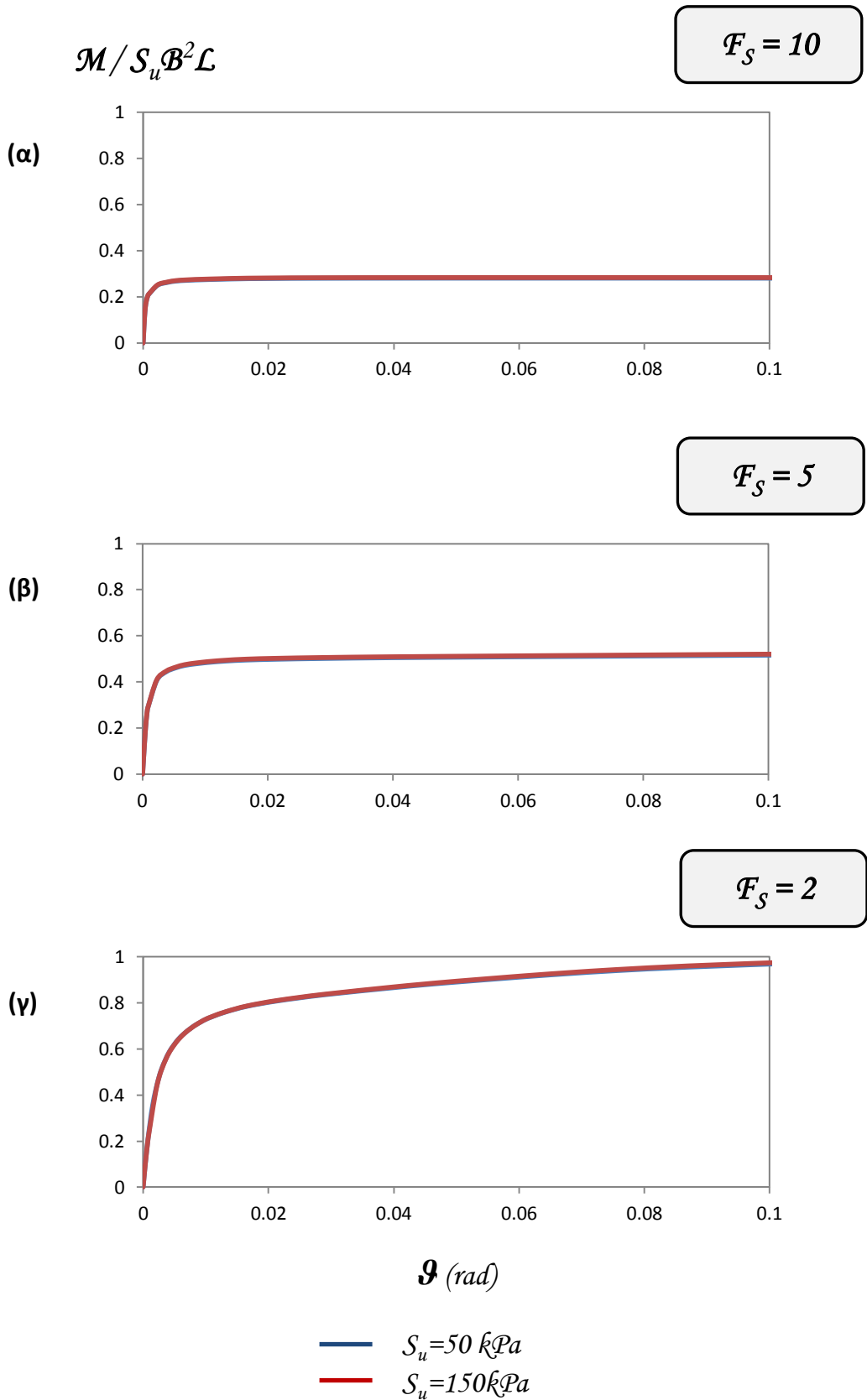
$$F_S = 2$$



$\vartheta$  (rad)

—  $S_u = 50 \text{ kPa}$   
 —  $S_u = 150 \text{ kPa}$

**Σχήμα Π.18** Επιρροή της μεταβολής του  $S_u$  με σταθερό  $E_o/S_u=1200$  για **ορθογωνικό θεμέλιο** πλάτους  $B=6\text{m}$  & εγκάρσιας διάστασης  $L=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στροφής  $\vartheta$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .

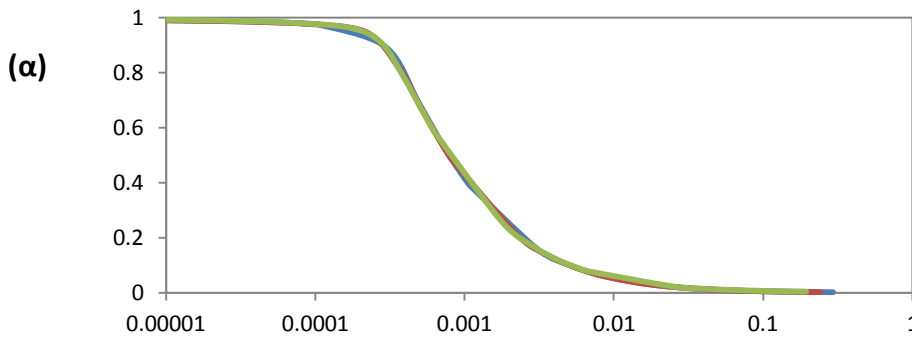


**Σχήμα Π.19** Επιρροή της μεταβολής του  $S_u$  με σταθερό  $E_o/S_u=1200$  για **ορθογωνικό θεμέλιο** πλάτους  $B=6\text{m}$  & εγκάρσιας διάστασης  $L=2\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $M/S_u B^2 L$ – γωνία στροφής  $\theta$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .

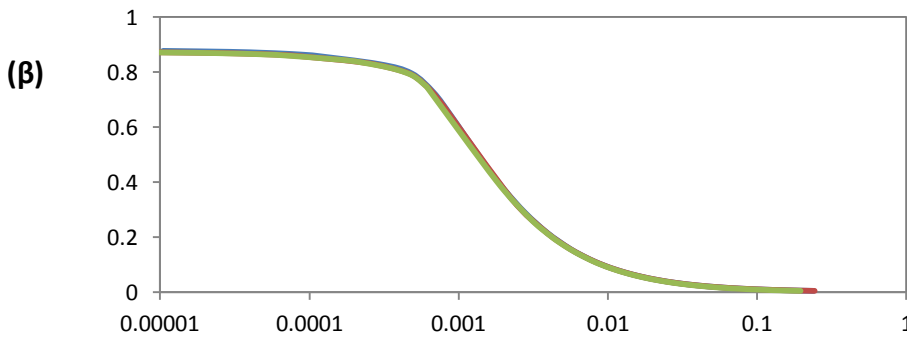


$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$

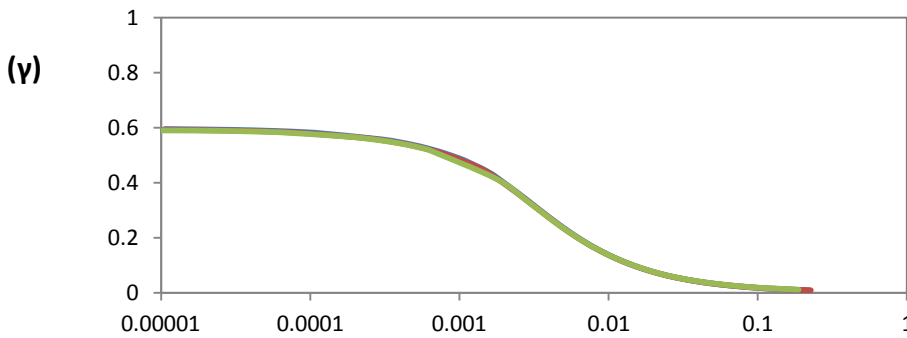
$$F_S = 10$$



$$F_S = 5$$



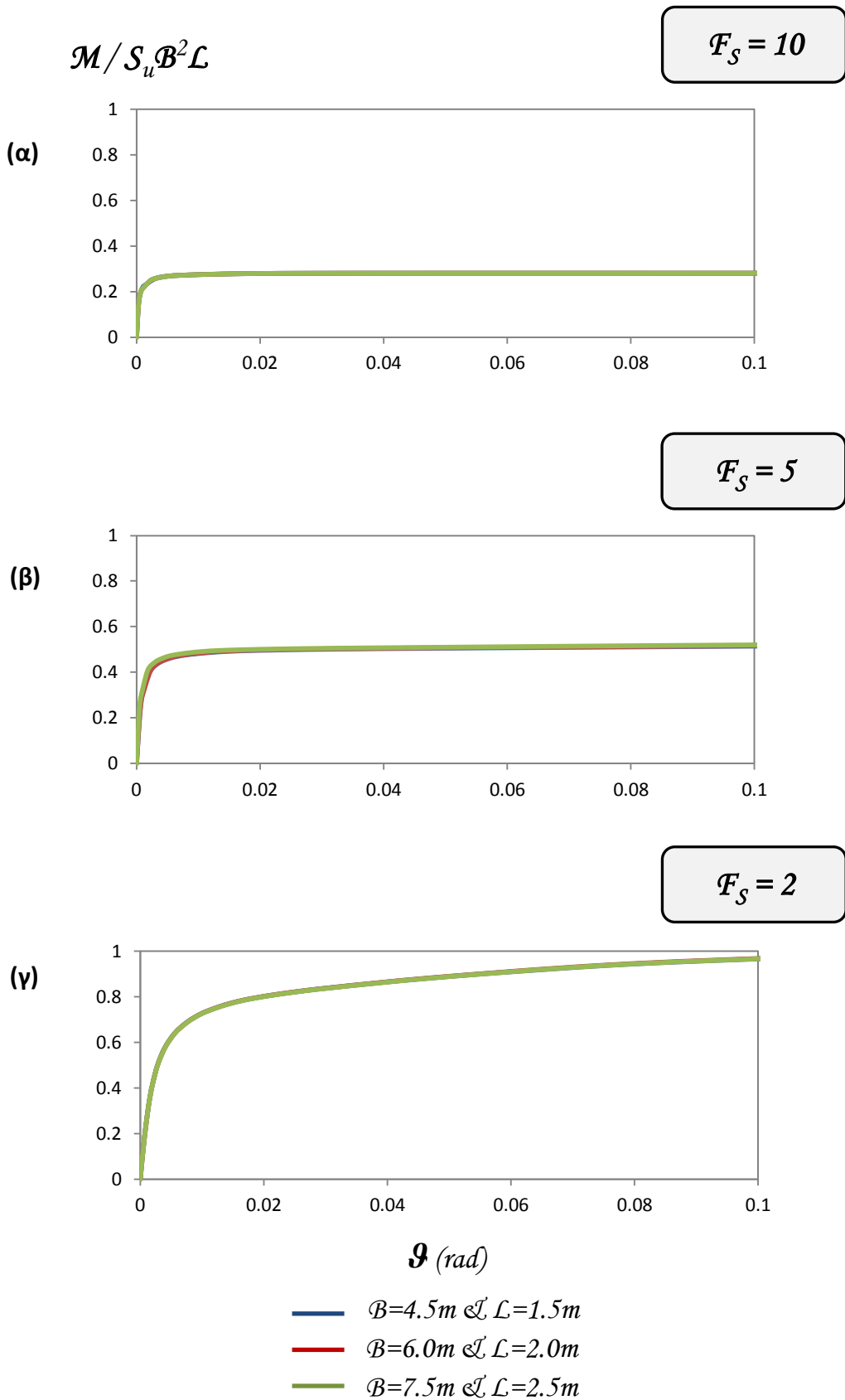
$$F_S = 2$$



$\vartheta$  (rad)

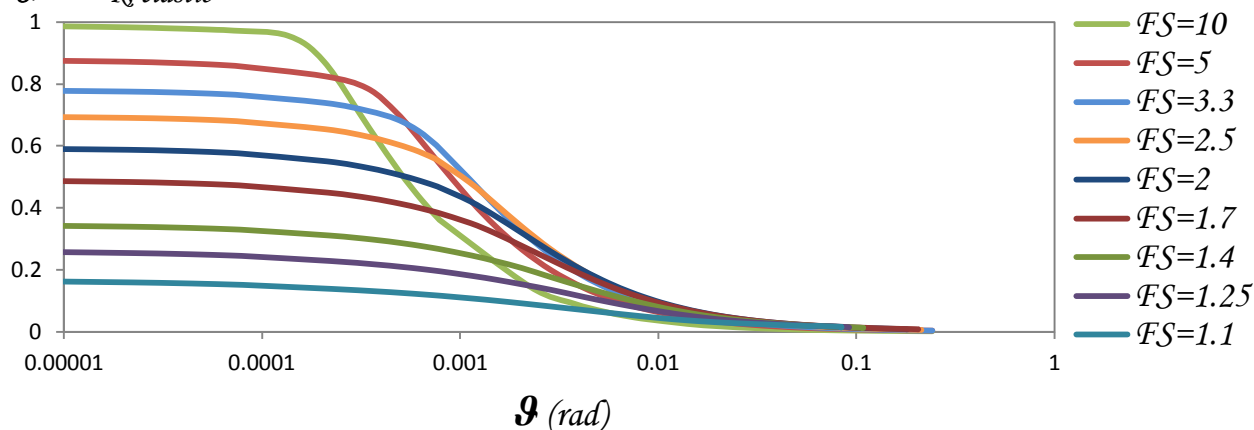
- $B=4.5m \ \mathcal{L}=1.5m$
- $B=6.0m \ \mathcal{L}=2.0m$
- $B=7.5m \ \mathcal{L}=2.5m$

**Σχήμα Π.20** Ισοδύναμα Συστήματα με  $E_o/S_u=1200$  για **ορθογώνιο θεμέλιο** πλάτους  $B=4.5, 6.0$  &  $7.5$  m. Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στροφής  $\vartheta$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .



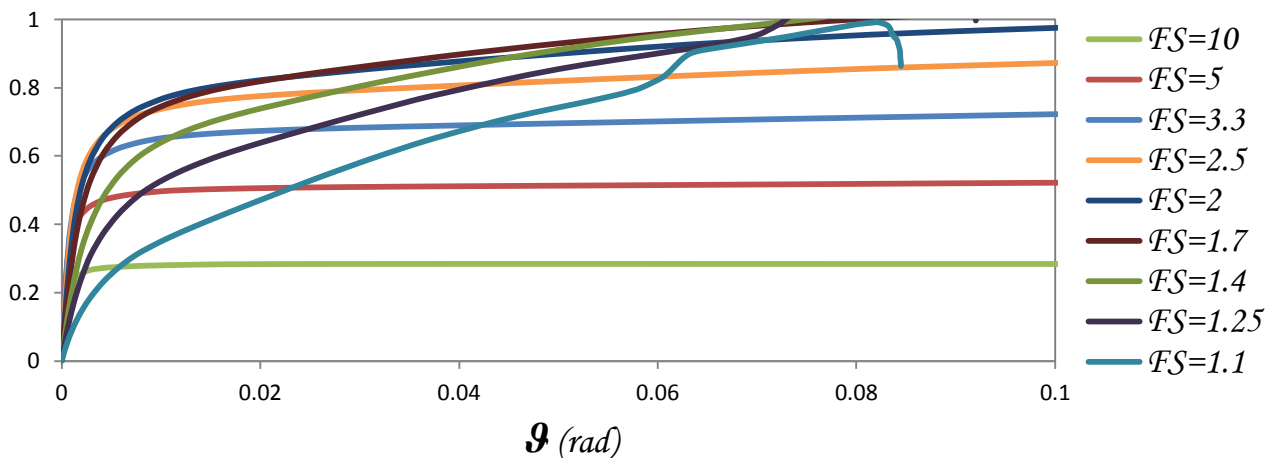
**Σχήμα Π.21** Ισοδύναμα Συστήματα με  $E_o/S_u=1200$  για **ορθογωνικό θεμέλιο** πλάτους  $B=4.5, 6.0$  &  $7.5$  m. Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $M/S_u B^2 L$  – γωνία στρώσης  $\theta$  για συντελεστές ασφαλείας (α)  $F_S=10$ , (β)  $F_S=5$ , (γ)  $F_S=2$ .

$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$



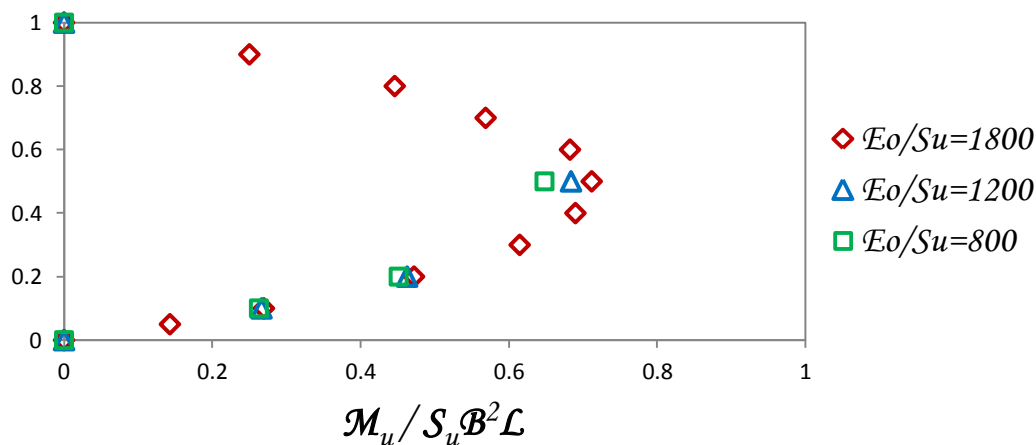
Σχήμα Π.22 Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για  $E_o/S_u=1800$ ,  $S_u=150\text{kPa}$ . Ορθογώνιο θεμέλιο πλάτους  $B=6\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S)/\mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στροφής  $\vartheta$ .

$$\mathcal{M} / S_u B^2 L$$



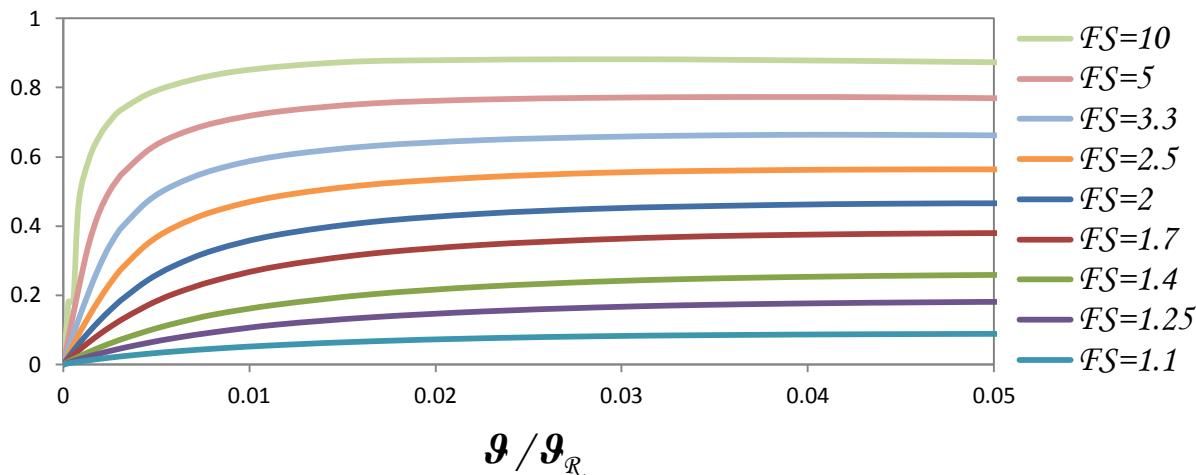
Σχήμα Π.23 Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για  $E_o/S_u=1800$ ,  $S_u=150\text{kPa}$ . Ορθογώνιο θεμέλιο πλάτους  $B=6\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $\mathcal{M}/S_u B^2 L$  – γωνία στροφής  $\vartheta$ .

$$\chi = 1/F_S = \mathcal{N}_u / \mathcal{N}_{uo}$$



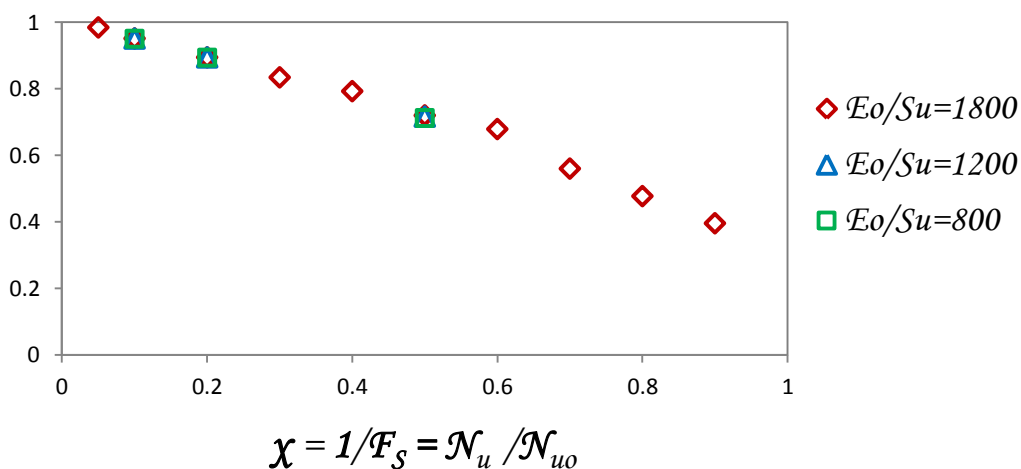
Σχήμα Π.24 Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για διάφορα  $E_o/S_u$ . Ορθογώνιο θεμέλιο πλάτους  $B=6\text{m}$  με λυγηρότητα  $2h/B = 4$ . Σχέση αντιστρόφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi$  – μέγιστης αδιαστατοποιημένης ροπής  $\mathcal{M}_u/\mathcal{N}_{uo} B$ .

$M/M_R$



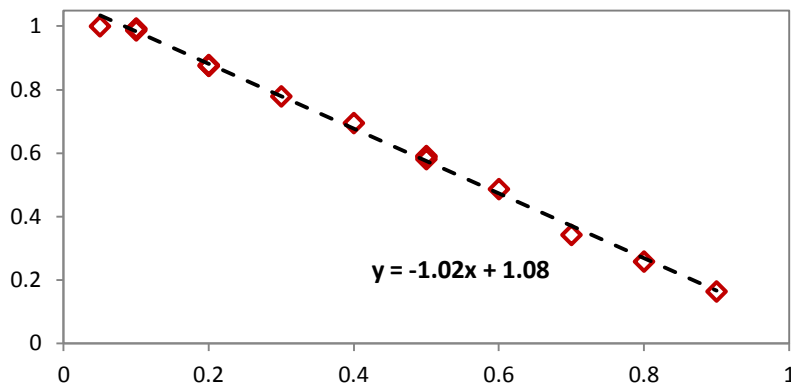
**Σχήμα Π.25** Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για  $E_o/S_u=1800$ ,  $S_u=150\text{kPa}$ . **Ορθογώνιο θεμέλιο** πλάτους  $B=6\text{m}$ . Αδιαστατοποιημένη αναπτυσσόμενη ροπή  $M/M_R$  – γωνία στροφής  $\theta/\theta_R$ .

$\theta_u/\theta_R$



**Σχήμα Π.26** Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας  $F_S$  για διάφορα  $E_o/S_u$ . **Ορθογώνιο θεμέλιο** πλάτους  $B=6\text{m}$  με λυγηρότητα  $2h/B = 4$ . Σχέση αντιστρόφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi$  – αδιαστατοποιημένης γωνίας ανατροπής  $\theta_u/\theta_R$ .

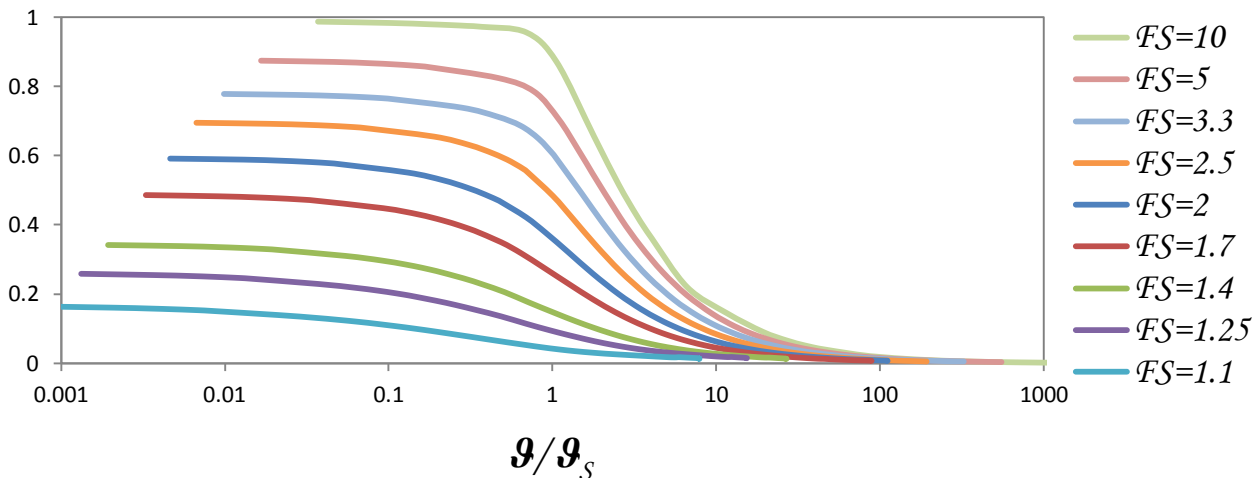
$$\mathcal{K}_R(0, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$



$$\chi = 1/F_S = \mathcal{N}_u / \mathcal{N}_{u0}$$

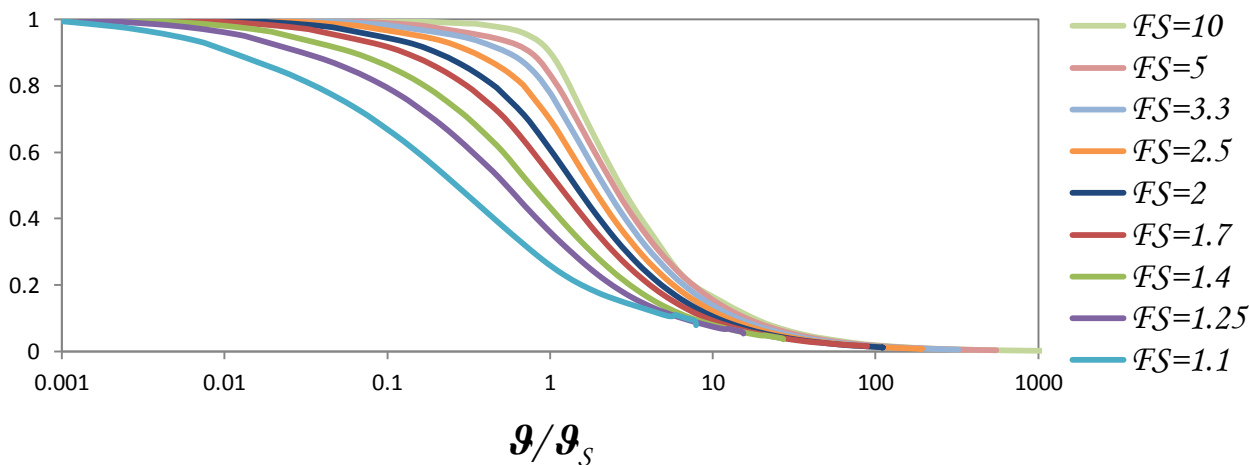
Σχήμα Π.27 Συσχέτιση της απομείωσης της αρχικής περιστροφικής δυσκαμψίας  $\mathcal{K}_R(0, F_S)$  ως προς την ελαστική  $\mathcal{K}_{R, elastic}$  συναρτήσει του αντιστρόφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi=1/F_S$  για ορθογωνικό θεμέλιο.

$$\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$$

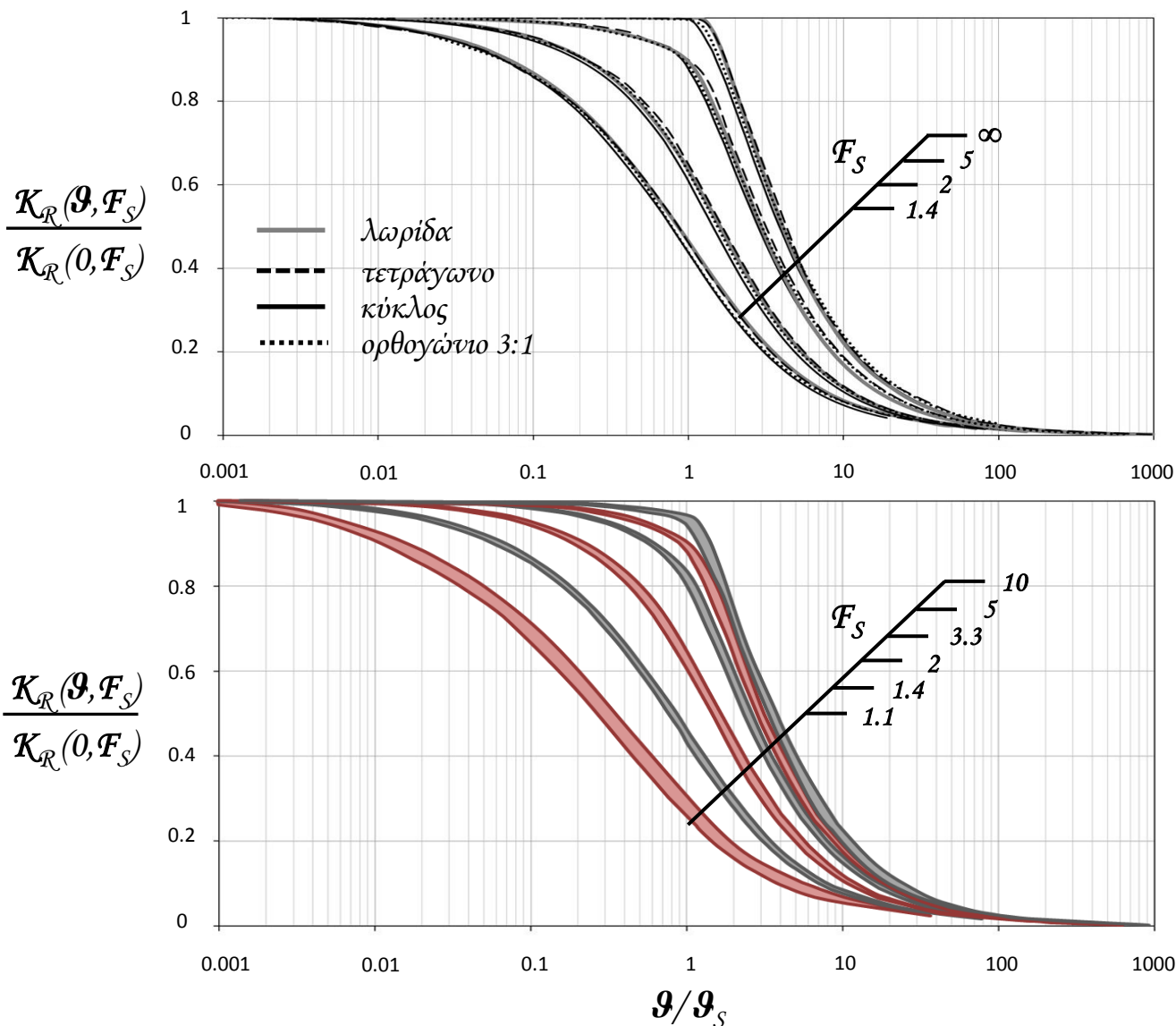


Σχήμα Π.28 Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_{R, elastic}$  – γωνία στροφής  $\vartheta / \vartheta_S$  για ορθογωνικό θεμέλιο.

$$\mathcal{K}_R(0, F_S) / \mathcal{K}_R(\vartheta, F_S)$$

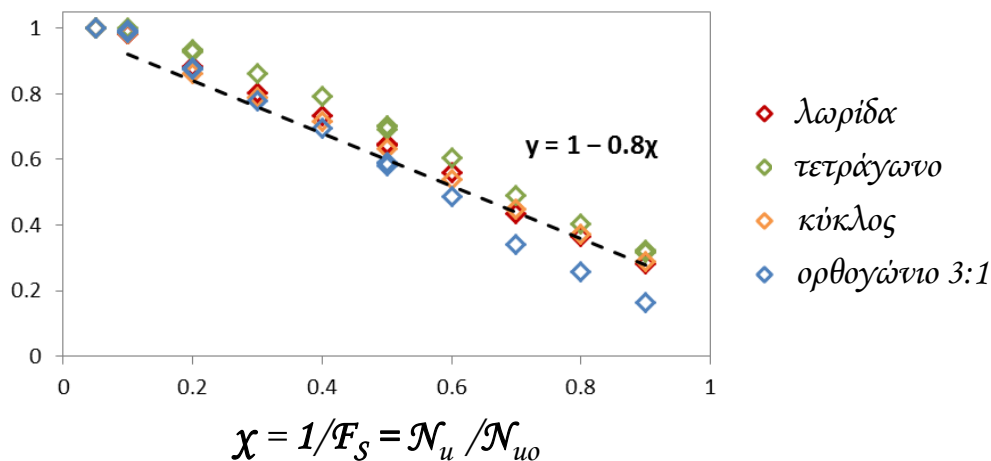


Σχήμα Π.29 Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $\mathcal{K}_R(\vartheta, F_S) / \mathcal{K}_R(0, F_S)$  – γωνία στροφής  $\vartheta / \vartheta_S$  για ορθογωνικό θεμέλιο.



**Σχήμα Π.30** Αδιαστατοποιημένη περιστροφική δυσκαμψία  $K_R(\vartheta, F_S)/K_R(0, F_S)$  – γωνία στροφής  $\vartheta/\vartheta_S$ . Το άνω διάγραμμα απεικονίζει λεπτομερώς τα αποτελέσματα για **κάθε τύπο θεμελίωσης** (λωρίδα, τετράγωνο, κύκλος, ορθογώνιο 3:1), ενώ το κάτω συνοψίζει τα αποτελέσματα για διάφορους συντελεστές ασφαλείας  $F_S$  [Gazetas et al., 2012].

$$K_R(0, F_S) / K_{R, elastic}$$



**Σχήμα Π.31** Συσχέτιση της απομείωσης της αρχικής περιστροφικής δυσκαμψίας  $K_R(0, F_S)$  ως προς την ελαστική  $K_{R, elastic}$  συναρτήσει του αντιστρόφου συντελεστή ασφαλείας  $\chi = 1/F_S$  [Gazetas et al., 2012].

# Βιβλιογραφία

---

Allotey N., El Naggar M.H. [2003] *“Analytical moment - rotation curves for rigid foundations based on a Winkler model.”* Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23(5), 367-381

Allotey N., El Naggar M.H. [2008] *“An investigation into the Winkler modeling of the cyclic response of rigid footings.”* Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28(1), 44-57

Anastasopoulos I., Gazetas G., Loli M., Apostolou M., Gerolymos N. [2010] *“Soil failure can be used for seismic protection of structures.”* Bull. Earthquake Eng. 8, 309-326

Apostolou M., Gazetas G., Makris N., Anastasopoulos I. [2003] *“Rocking of foundations under strong seismic excitation.”* Proc. Of Fib International Symposium on Concrete Structures in Seismic Regions. Athens, May 2003

Apostolou M., Gazetas G. [2005] *“Rocking of foundations under strong shaking : Mobilization of bearing capacity and displacement demands.”* In. Proc. 1<sup>st</sup> Greece - Japan workshop : Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations, Athens, 11-12 October, 131-140

Apostolou M., Gazetas G., Garini E. [2006] *“Seismic response of slender rigid structures with foundation uplifting.”* Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27(7), 642-654

Apostolou M., Gazetas G. [2007] *“Analytical modelling of footings under large overturning moment.”* In. Proc. 2<sup>nd</sup> Greece - Japan workshop: Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations, Tokyo, 3-4 April, 165-184

Bransby M.F., Randolph M.F. [1998] *“Combined loading of skirted foundations.”* Géotechnique 48(5), 637-655

Butterfield R., Ticof J., [1979] *“Design parameters for granular soils (discussion contribution).”* Proc. 7<sup>th</sup> Eur. Conf. Soil Mech. Found. Engng., Brighton 4, 259-261

Butterfield R., Gottardi G.[1994] *“A complete three - dimensional failure envelope for shallow footings on sand.”* Géotechnique 44(1), 181-184

Chatzigogos CT., Pecker A., Salencon J. [2009] *“Macroelement modelling of shallow foundations.”* Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29(6), 765-781

Cremer C., Pecker A., Davenne L. [2002] *“Modelling of nonlinear dynamic behavior of a shallow strip foundation with macroelement .”* Journal of Earthquake Engineering 6(2), 175-211

Faccioli E., Paolucci R., Vivero G. [2001] *“Investigation of seismic soil - footing interaction by large scale cyclic tests and analytical models.”* In: Proc., 4<sup>th</sup> Int. Conf. Recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics.

FEMA 356 [2000] *“Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings.”* Federal Emergency Management Agency, Washington DC

Gajan S., Phalen JD., Kutter BL., Hutchinson TC., Martin G., [2005] *“Centrifuge modeling of load deformation behavior of rocking shallow foundations.”* Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25(7-10), 773-783

Gajan S., Kutter BL. [2008] *“Capacity, settlement and energy dissipation of shallow footings subjected to rocking.”* J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE 134(8), 1129-1141

Gazetas G. [1987]. *“Simple physical methods for foundation impedances.”* Dynamics of Foundations and Buried Structures, Benerjee PK and Butterfield R., editors, ElsevierApplied Science, Chapter 2, 44-90.

Gazetas G., Apostolou M., Anastasopoulos I., [2003] *“Seismic uplifting of foundations on soft soil, with examples from Adapazari (Izmit 1999, Earthquake). ”* In : BGA Int. Conf. on Found. Innov., Observations, design & practice, University of Dundee, Scotland, September 25, pp37-50

Gazetas G., Anastasopoulos I., Adamidis O., Kontoroupi T., [2012] *“Nonlinear Rocking Stiffness of Foundations.”* Submitted for possible publication.

Gelagoti F., Kourkoulis R., Anastasopoulos I., Gazetas G.[2010] *“Rocking isolation of frame structures founded on separate footings.”* Submitted for possible publication.

Gelagoti F., Kourkoulis R., Anastasopoulos I., Gazetas G.[2010] *“Simplified method for foundation design of rocking isolated frame-structures.”* Submitted for possible publication.

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. Earthquake Eng. 7(2), 547-573 Special Issue : Earthquake Protection of Bridges.

Gourvenec S., Randolph M.F. [2003] *“Effect of strength non - homogeneity on the shape and failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay.”* Géotechnique 53(6), 527-533



Gourvenec S. [2004] *“Bearing capacity under combined loading: a study of the effect of shear strength heterogeneity.”* Proc. 9<sup>th</sup> Australia New Zealand Conf. on Geomechanics, Auckland, 527-533

Gourvenec S. [2007] *“Shape effects on the capacity of rectangular footings under general loading.”* Géotechnique 57(8), 637-646

Harden C., Hutchinson T., [2006] *“Investigation into the effects of foundation uplift on simplified seismic design procedures.”* Earthq. Spectra 22(3), 663-692

Housner GW. [1963] *“The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes.”* Bull. Seismol. Soc. Am. 53(2), 404-417

Ishiyama Y. [1982] *“Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations.”* Earthquake Eng. Struct. Dyn.10, 635-650

Kawashima K., Nagai T., Sakellarakis D., [2007] *“Rocking seismic isolation of bridges supported by spread foundations.”* In: Proc. 2<sup>nd</sup> Greece - Japan workshop : Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations, Tokyo, 3-4 April, pp 254-265

Kirkparick P. [1927] *“Seismic measurements by the overthrow of columns.”* Bull. Seismol. Soc. Am. 17(2), 95-109

Kokkali P., Anastasopoulos I., Gazetas G. [2010] *“Metaplastic rocking behavior of 1-DoF systems: Dimensional Analysis.”* Diploma Thesis.

Koh AS., Spanos P., Roesset JM. [1986] *“Harmonic rocking of rigid block on flexible foundation.”* Journal of Engineering Mechanics ASCE 112(11), 1165-1180

Kutter BL., Martin G., Hutchinson TC., Harden C., Gajan S., Phalen JD., [2003] *“Status report on study of modeling of nonlinear cyclic load - deformation behavior of shallow foundations.”* In : PEER workshop, University of California, Davis, March 2003

Loli M., Anastasopoulos I., Gazetas G. [2008] *“Bridge – pier foundation: Beyond Seismic capacity design.”* Diploma Thesis.

Makris, N., Roussos, Y. (1998). *“Rocking response and overturning of equipment under horizontal pulse - type motions.”* Rep. No. PEER-98/05, Pacific Earthquake Engrg. Res. Ctr., University of California, Berkeley, Calif.

Makris N., Roussos Y. [2000] *“Rocking Response of rigid blocks under near source ground motions.”* Géotechnique 50(3), 243-262

Makris N., Konstantinidis D. [2003] *“The rocking spectrum and the limitations of practical design methodologies.”* Earthquake Eng. Struct. Dyn. 32(2), 265-289

Martin GR., Lam IP. [2000] *“Earthquake resistant design of foundations : retrofit of existing foundations.”* In : Proc. Geoeng. 2000 Conference, Melbourne

Martin C.M., Houlsby G.T. [2001] *“Combined loading of spudcan foundations on clay: numerical modeling.”* Géotechnique 51(8), 687-699

Meyerhof G.G. [1953] *“The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads.”* Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Zurich, 1, 440-445

Milne J. [1881] *“Experiments in observational seismology.”* Trans. Seismol. Soc. Jpn (3), 12-64

Nova R., Montrasio L. [1991] *“Settlements of shallow foundations on sand.”* Géotechnique 41(2), 243-256

Paolucci R. [1997] *“Simplified evaluation of earthquake induced permanent displacements of shallow foundations.”* Journal of Earthquake Engineering 1, 563-579

Paolucci R. [2007] *“Numerical simulations of shaking table experiments on a shallow foundation test model at PWRI, Japan. ”* In. Proc. 2<sup>nd</sup> Greece - Japan workshop: Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations, Tokyo, 3-4 April, pp 158-163

Paolucci R. Shirato M., Yilmaz MT. [2008] *“Seismic behavior of shallow foundations: shaking table experiments vs. numerical modeling.”* Earthquake Eng. Struct. Dyn. 37(4), 577-595

Paolucci R., Figini R., Di Prisco C., Petrini L., Vecchiotti M. [2011], *“Accounting for non-linear dynamic soil-structure interaction in the displacement-based seismic design”.* 5<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Chile, 10-13 January

Pecker A. [1998] *“ Capacity design principles for shallow foundations in seismic areas.”* In : Proc. 11<sup>th</sup> European conference on earthquake engineering, A.A. Balkema Publishing

Perry J. [1881] *“ Note on the rocking of a column.”* Trans. Seismol. Soc. Jpn 1881(3), 103-106

Poulos H.G., Carter J.P., Small J.C. [2002] *“Foundations and retaining structures – research and practice.”* Proc. 15<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics, Istanbul, 4: 2527-2606

---

Priestley M.J.N., Seible F., Calvi G.M.[1996] *“Seismic design and retrofit of bridges.”* John Wiley and sons, New York.

Psycharis I., Jennings P. [1983] *“Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift.”* Earthquake Eng. Struct. Dyn. 11, 57-76

Psycharis I. [1991] *“Effect of base uplift on Dynamic Response of SDOF structures.”* Journal of Structural Engineering, ASCE 117, 733-754

Raychowdhury P., Hutchinson T.C. [2009] *“Performance evaluation of a nonlinear Winkler - based shallow foundation model using centrifuge test results.”* Earthquake Engng Struct. Dyn. 38, 679–698

Raychowdhury P., Hutchinson T.C. [2010] *“Performance of seismically loaded shearwalls on nonlinear shallow foundations.”* Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., published online.

Terzaghi K. [1943] *“Theoretical soil mechanics.”* Wiley, New York.

Vucetic M., Dobry R. [1991] *“Effect of soil plasticity on cyclic response.”* Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117 (1), 89 –107.