



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΤΩΝ ΓΟΜΦΩΝ
ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ**

υπό

ΑΝΔΡΟΝΙΚΗ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους
των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2019



© 2019 Ανδρονίκη Χριστοδούλου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Ολυμπία Παναγούλη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Ευριπίδης Μυστακίδης
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Κωνσταντίνος Τζάρος
Λέκτορας ΠΔ. 407/80, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της.

Καταρχάς, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην Καθηγήτρια και επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας Κυρία Ολυμπία Παναγούλη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την άριστη συνεργασία μας όλο αυτό το διάστημα.

Στη συνέχεια, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον Δρ. Κωνσταντίνο Τζάρο, για τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε, καθώς και για την άμεση ανταπόκριση του σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα από την αρχή έως το τέλος της προσπάθειάς μου.

Τις ευχαριστίες μου εκφράζω και στον Κύριο Αλέξανδρο Γούναρη, διδάσκοντα του Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την παροχή της απαραίτητης βιβλιογραφίας, σχετικά με τις τεχνολογίες σύνδεσης δομικών μελών που εφαρμόζονται στην Αρχαία Ελλάδα. Επιπλέον, ευχαριστώ την φίλη και συνάδελφο Παναγιώτα Μαυρογενίδου, για την επιμέλεια του εξωφύλλου της εργασίας μου.

Δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον Γιάννη και τις αγαπημένες μου φίλες Άσπα, Καλλίνα και Κωνσταντίνα για το ειλικρινές ενδιαφέρον και την διαρκή στήριξη που μου έχουν προσφέρει.

Κλείνοντας, είμαι ευγνώμων σε όλα τα μέλη της οικογένειάς μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου, που πάντα στέκονται δίπλα μου, τόσο στις επιτυχίες όσο και στις αποτυχίες, δίνοντάς μου τη δύναμη να προσπαθώ για το καλύτερο.

Ανδρονίκη Ε. Χριστοδούλου

Βόλος, Ιούλιος 2019

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΤΩΝ ΓΟΜΦΩΝ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Ανδρονίκη Χριστοδούλου

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2019

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Ολυμπία Παναγούλη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Περίληψη

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, συγκρίθηκε η δυναμική συμπεριφορά σπονδυλωτών κίωνων με και χωρίς την ύπαρξη συστήματος κατακόρυφης σύνδεσης μεταξύ των σπονδύλων. Συγκεκριμένα, η σύνδεση των σπονδύλων υλοποιήθηκε μέσω δύο αντιδιαμετρικά τοποθετημένων χαλύβδινων συνδέσμων ορθογωνικού σχήματος, που καλούνται γόμφοι. Οι κίονες υποβλήθηκαν σε αρμονικές εδαφικές διεγέρσεις με μεταβλητή επιτάχυνση και συχνότητα, ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές τους ιδιότητες αντλήθηκαν από πραγματικούς κίονες που έχουν διασωθεί στον αρχαιολογικό χώρο του Γυμνασίου της Αρχαίας Μεσσήνης. Ειδικότερα, μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις σπονδυλωτών κίωνων: α) ένας κίονας που δεν διαθέτει γόμφους μεταξύ των σπονδύλων του, β) ένας κίονας με γόμφους στον οποίο η εδαφική διέγερση επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα που συνδέει τους γόμφους και γ) ένας κίονας με γόμφους όπου η εδαφική διέγερση επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα που συνδέει τους γόμφους.

Για την κατασκευή των αριθμητικών προσομοιωμάτων των κίωνων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Marc Mentat της MSC Software. Λαμβάνοντας υπόψη τον έντονα μη γραμμικό χαρακτήρα των φαινομένων του λικνισμού και της ολίσθησης στα οποία υπόκεινται οι σπόνδυλοι, εφαρμόστηκε μη γραμμική δυναμική ανάλυση (nonlinear dynamic analysis) με εν χρόνω ολοκλήρωση (transient analysis).

Τα αριθμητικά μοντέλα κατασκευάστηκαν από τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, και η δυναμική απόκρισή τους εξετάστηκε στο χώρο.

Από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τους σπονδυλωτούς κίονες, παρατηρήθηκε ότι οι σπόνδυλοι δύνανται να αναπτύξουν έντονο λικνισμό και σημαντικές ολισθήσεις και εκτός του επιπέδου επιβολής της σεισμικής διέγερσης. Τέλος, η σύγκριση των τριών διαφορετικών μοντέλων που μελετήθηκαν, οδήγησε στην εξαγωγή ποικίλων συμπερασμάτων σχετικά με τον ρόλο των γόμφων στην δυναμική απόκριση σπονδυλωτών κίωνων, σημαντικότερο εκ των οποίων είναι η μείωση των σχετικών μετατοπίσεων μεταξύ των σπονδύλων.

Λέξεις Κλειδιά: Σπονδυλωτοί κίονες, Γόμφοι, Λικνισμός, Ολίσθηση, Μη γραμμική δυναμική ανάλυση

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΛΙΚΝΙΣΜΟΥ.....	4
1.1. Εισαγωγή.....	4
1.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση της λικνιστικής απόκρισης άκαμπτου στύλου (rigid body).....	6
1.3. Αναλυτική περιγραφή της λικνιστικής απόκρισης άκαμπτου ορθογώνιου σώματος.....	7
1.3.1. Μορφές δυναμικής απόκρισης άκαμπτου ορθογωνικού σώματος.....	7
1.3.2. Μαθηματική περιγραφή της ελεύθερης λικνιστικής απόκρισης άκαμπτου σώματος υπό αρχική γωνία.....	9
1.3.3. Αριθμητική προσομοίωση της λικνιστικής απόκρισης άκαμπτου ορθογωνικού σώματος.....	13
1.3.4. Γενικές αρχές αριθμητικής προσομοίωσης.....	13
1.3.4.1. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	13
1.3.4.2. Κατασκευή του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων.....	13
1.3.4.3. Καταστατικοί νόμοι υλικών.....	14
1.3.4.4. Προσομοίωση του φαινομένου επαφής – τριβής.....	15
1.3.4.5. Συνοριακές συνθήκες.....	16
1.3.4.6. Μη γραμμική δυναμική ανάλυση.....	16
1.3.5. Αριθμητικό προσομοίωμα άκαμπτου σώματος σε ελεύθερο λικνισμό υπό αρχική γωνία.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	22
2.1. Εισαγωγή.....	22
2.2. Σημαντικά ιστορικά – αρχαιολογικά στοιχεία.....	22
2.2.1. Το Γυμνάσιο της Αρχαίας Μεσσήνης.....	22
2.2.2. Τα συστήματα κατακόρυφων συνδέσεων στην Αρχαία Ελλάδα.....	23
2.2.2.1. Κατακόρυφη σύνδεση σπονδύλων με χρήση γόμφων.....	23
2.2.2.2. Κατακόρυφη σύνδεση σπονδύλων με χρήση συστήματος πόλου – εμπολίου.....	24

2.3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μηχανικές ιδιότητες των υπό εξέταση κίωνων.....	25
2.4. Οι αρμονικές διεγέρσεις στη βάση των υπό εξέταση κίωνων.....	27
2.5. Βιβλιογραφική ανασκόπηση της λικνιστικής απόκρισης σπονδυλωτών κίωνων(multidrum columns).....	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ.....31

3.1. Κατασκευή του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.....	31
3.1.1. Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων σπονδυλωτού κίονα με γόμφους.....	31
3.1.2. Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους.....	33
3.2. Καταστατικοί νόμοι υλικών.....	34
3.3. Νόμοι τριβής – επαφής.....	34
3.4. Συνοριακές συνθήκες.....	35
3.5. Μη γραμμική δυναμική ανάλυση.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ ΓΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΩΝ ΓΟΜΦΩΝ.....37

4.1. Εισαγωγή.....	37
4.2. Σπονδυλωτός κίονας δίχως γόμφους.....	37
4.2.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης – συχνότητας διέγερσης.....	37
4.2.2. Στιγμιότυπα κατάρρευσης	38
4.2.3. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου	42
4.2.4. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου.....	46
4.2.5. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού.....	52
4.2.6. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων.....	53
4.3. Σπονδυλωτός κίονας με γόμφους	55
4.3.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης – συχνότητας διέγερσης.....	55
4.3.2. Στιγμιότυπα κατάρρευσης.....	56
4.3.3. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου.....	62
4.3.4. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου.....	67
4.3.5. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών στροφής.....	72
4.3.6. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ ΓΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΥΠΟ 30 ΜΟΙΡΕΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΩΝ ΓΟΜΦΩΝ.....	77
5.1.Διάγραμμα ανηγμένης επιτάχυνσης διέγερσης – συχνότητας διέγερσης.....	77
5.2.Στιγμιότυπα κατάρρευσης.....	78
5.3.Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου.....	83
5.4.Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου.....	88
5.5.Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών στροφής.....	93
5.6.Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ.....	98
6.1.Διάγραμμα ανηγμένης επιτάχυνσης διέγερσης – συχνότητας διέγερσης.....	98
6.2. Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης σπονδυλωτων κίωνων	100
6.3.Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου ανά σπόνδυλο.....	111
6.4.Διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων – χρόνου ανά διεπιφάνεια.....	118
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	124
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΩΝ.....	127
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	130
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΛΙΚΝΙΣΜΟΥ

1.1. Εισαγωγή

Πολλά αρχιτεκτονικά μνημεία της αρχαιότητας, όπως οι κίονες (classical columns) και οι κινοστοιχίες (colonnades) ναών, έχουν επιβιώσει μέχρι σήμερα (Σχήμα 1.1) παρόλο που βρίσκονται σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ικανότητά τους, να εκτελούν ένα είδος περιοδικής παλινδρομικής κίνησης ως προς διάφορα σημεία της βάσης τους, η οποία υπόκειται σε μερική ανύψωση σε σχέση με την επιφάνεια θεμελίωσής τους. Το συγκεκριμένο δυναμικό φαινόμενο, που καλείται λικνισμός (**rocking motion**), αποτέλεσε πόλο ενδιαφέροντος για πολλούς ερευνητές. Η κατανόηση των μηχανισμών που αναπτύσσονται κατά την λικνιστική απόκριση των σωμάτων, είναι εξέχουσας σημασίας τόσο για την συντήρηση και την προστασία των μνημείων, όσο και για την μελέτη της σεισμικής ιστορίας της εκάστοτε περιοχής.



Σχήμα 1.1. Κίονες κορινθιακού ρυθμού στον αρχαιολογικό χώρο της Σαλαμίνας στην Κύπρο (αριστερά), κινοστοιχία του ναού του Ποσειδώνα στο Σούνιο (δεξιά).

Υπάρχουν δύο είδη κίωνων, οι μονολιθικοί (monolithic columns) που αποτελούν ενιαία σώματα και οι σπονδυλωτοί (**multi-drum columns**). Οι σπονδυλωτοί κίονες απαρτίζονται από μεγάλους όγκους μαρμάρου ή ασβεστόλιθου, τους σπονδύλους (drums), οι οποίοι εδράζονται ο ένας πάνω στον άλλο με ή χωρίς την ύπαρξη κάποιου συστήματος κατακόρυφης σύνδεσης (**connection system**). Κατά τη διάρκεια μιας ισχυρής σεισμικής δόνησης, οι σπόνδυλοι των κίωνων μπορούν να λικνισθούν ή/και να ολισθήσουν, είτε ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο,

είτε σε ομάδες. Κατά αυτόν τον τρόπο, η δυναμική απόκριση του συστήματος είναι διαφορετική όχι μόνο σε καθεμία σεισμική δόνηση, αλλά και σε κάθε χρονική στιγμή της ίδιας δόνησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι, η συνεχής αλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των συνοριακών συνθηκών του δυναμικού συστήματος καθιστούν το φαινόμενο του λικνισμού έντονα μη- γραμμικό και εξαιρετικά πολύπλοκο στην κατανόηση και την μελέτη του.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις μνημειακές κατασκευές, το φαινόμενο του λικνισμού συναντάται και στις σύγχρονες κατασκευές, μέσω της μεθόδου της «λικνιστικής μόνωσης» (rocking isolation). Η εν λόγω μέθοδος εφαρμόζεται σε κτίρια και γέφυρες, επιτρέποντας τον λικνισμό και το ανασήκωμα (uplifting) της θεμελίωσης, σε αντίθεση με την συμβατική μέθοδο σχεδιασμού όπου η θεμελίωση σταθεροποιείται στο υπέδαφος. Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στον τρόπο απόσβεσης της ενέργειας που εισάγεται στη κατασκευή, από την σεισμική δραστηριότητα του εδάφους. Στην μεν πρώτη μέθοδο, η απόσβεση γίνεται λόγω της ταλάντωσης (λικνισμός) στη στάθμη της θεμελίωσης, ενώ στην δε δεύτερη η απόσβεση επιτυγχάνεται επιστρατεύοντας την πλαστιμότητα του συστήματος και την ανάπτυξη ανελαστικών παραμορφώσεων. Επομένως, η «λικνιστική μόνωση» εξασφαλίζει μεγαλύτερη ασφάλεια έναντι ανατροπής των κατασκευών, λόγω της πρόσθετης απόσβεσης και της μείωσης των παραμενουσών μετατοπίσεων που επιφέρει.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η μελέτη της επίδρασης του ρόλου των γόμφων (σύστημα κατακόρυφης σύνδεσης των σπονδύλων ενός κίονα) στην δυναμική απόκριση πραγματικών σπονδυλωτών κίωνων. Ωστόσο για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου του λικνισμού, θεωρείται ότι πριν από την σύνθετη μελέτη των σπονδυλωτών κίωνων, είναι σκόπιμη η μελέτη του φαινομένου στην απλούστερη δυνατή περίπτωση. Κατά συνέπεια, το εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο αφορά στην αναλυτική παρουσίαση της λικνιστικής συμπεριφοράς ενός άκαμπτου σώματος, που εδράζεται σε μια άκαμπτη βάση (rigid base).

1.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση της λικνιστικής απόκρισης άκαμπτου στύλου (rigid body)

Ο George W. Housner παρατήρησε ότι κατά τη διάρκεια του ισχυρού σεισμού που έπληξε την Χιλή το 1960, ορισμένες επιφανειακά θεμελιωμένες, λυγηρές και υψίκορμες κατασκευές, επέδειξαν εξαιρετική συμπεριφορά σε σχέση με κάποιες άλλες (γέφυρες και κτήρια), που ενώ έμοιαζαν περισσότερο ευσταθείς, κατέρρευσαν. Η παρατήρηση αυτή ώθησε τον Housner στην δημοσίευση της καινοτόμου για την εποχή του μελέτης [1], στην οποία αναπτύσσει ένα απλό αναλυτικό προσομοίωμα, προκειμένου να περιγράψει την δυναμική απόκριση άκαμπτων μονολιθικών σωμάτων (rigid blocks) που υπόκεινται σε λικνισμό. Έκτοτε, πολλοί ακόμα ερευνητές εξέτασαν την λικνιστική συμπεριφορά των άκαμπτων μονολιθικών σωμάτων, τόσο αναλυτικά [2],[3], [4], [5], [6], [7], όσο και πειραματικά [8],[9].

Συγκεκριμένα, οι Yim et al. [2], υπολόγισαν τις εξισώσεις κίνησης άκαμπτου στύλου τυχαίων διαστάσεων υπό οριζόντιες και κατακόρυφες σεισμικές διεγέρσεις, ενώ ταυτόχρονα παρατήρησαν ότι μικρές αλλαγές στη γεωμετρία, τη λυγηρότητα και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης της βάσης, έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην απόκριση του στύλου.

Ο Ishiyama [3] κατέγραψε τις εξισώσεις κίνησης για καθεμία από τις πιθανές δυναμικές καταστάσεις που μπορεί να αναπτύξει ένα άκαμπτο σώμα, υπό σεισμική δόνηση της άκαμπτης βάσης του. Οι Psycharis et al. [4] περιέγραψαν μαθηματικά την κίνηση ενός άκαμπτου σώματος που εδράζεται επί εύκαμπτης βάσης, ενώ στις μελέτες [6],[7] διατυπώθηκαν οι διαφορικές εξισώσεις κίνησης ορθογώνιου άκαμπτου σώματος για τριγωνομετρικές διεγέρσεις και δονήσεις εγγύς πεδίου.

Τέλος, στην εργασία [8] συγκρίνονται τα αποτελέσματα μιας απλής πειραματικής διάταξης με τις αναλυτικές εξισώσεις του Housner για διάφορες συνθήκες εδαφικής διέγερσης, ενώ στην [9] πειραματικά μοντέλα κατασκευάζονται και υποβάλλονται σε αρμονικές διεγέρσεις με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αντίστοιχες αναλυτικές λύσεις που εξήχθησαν σε προηγούμενη εργασία [10] των ίδιων μελετητών.

1.3. Αναλυτική περιγραφή της λικνιστικής απόκρισης άκαμπτου ορθογώνιου σώματος

1.3.1. Μορφές δυναμικής απόκρισης άκαμπτου ορθογωνικού σώματος

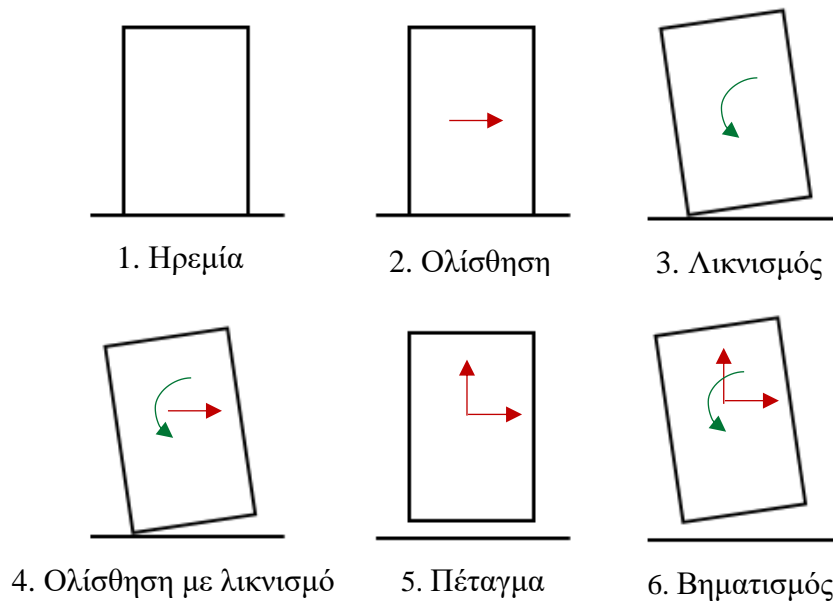
Ένα σώμα χαρακτηρίζεται ως άκαμπτο ή απολύτως στερεό, όταν διέπεται από μικρή παραμορφωσιμότητα, ενώ μια έδραση λογίζεται ως απλή όταν το βάθος εγκιβωτισμού του σώματος που εδράζεται σε αυτή, είναι πρακτικά αμελητέο. Για ένα σώμα που εδράζεται επί διεγχειρόμενης βάσης, η λικνιστική απόκριση δεν αποτελεί την μοναδική πιθανή δυναμική συμπεριφορά. Για τον λόγο αυτό, αντικείμενο της παρούσας ενότητας είναι η παρουσίαση όλων των πιθανών μορφών επίπεδης δυναμικής απόκρισης ενός άκαμπτου σώματος, που εδράζεται επί άκαμπτης, οριζόντιας βάσης. Σύμφωνα με την [3], οι μορφές αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Ηρεμία (Rest)
- Ολίσθηση (Slide)
- Λικνισμός (Rock)
- Ολίσθηση με λικνισμό (Slide –rock)
- Πέταγμα (jump) /Μεταφορική αναπήδηση (Translation jump)
- Βηματισμός (stepping) /Λικνισμός με αναπήδηση (Rocking jump)

Σημειώνεται ότι η δυναμική μορφή που θα αναπτύξει ένα σώμα, εξαρτάται τόσο από τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, όσο και από τα χαρακτηριστικά της διέγερσης. Στο Σχήμα 1.2, παρουσιάζονται σχηματικά οι παραπάνω έξι δυναμικές καταστάσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά μιας σεισμικής δόνησης ενδέχεται να διαφοροποιηθούν με τον χρόνο, και έτσι το σώμα μπορεί να μεταβαίνει από μια δυναμική μορφή σε μία άλλη.

Ο Ishiyama [3] κατέγραψε τις συνθήκες που πρέπει να λάβουν χώρα, προκειμένου ένα άκαμπτο σώμα τυχαίων διαστάσεων, να μεταβεί από την μορφή της ολίσθησης με λικνισμό σε κάποια από τις υπόλοιπες πιθανές καταστάσεις. Οι συνθήκες αυτές συνοψίζονται στον Πίνακα 1.1, όπου με R_y συμβολίζεται η κατακόρυφη αντίδραση του σώματος στη βάση του.



Σχήμα 1.2. Πιθανές μορφές επίπεδης δυναμικής απόκρισης άκαμπτου σώματος, υπό σεισμική διέγερση της βάσης του.

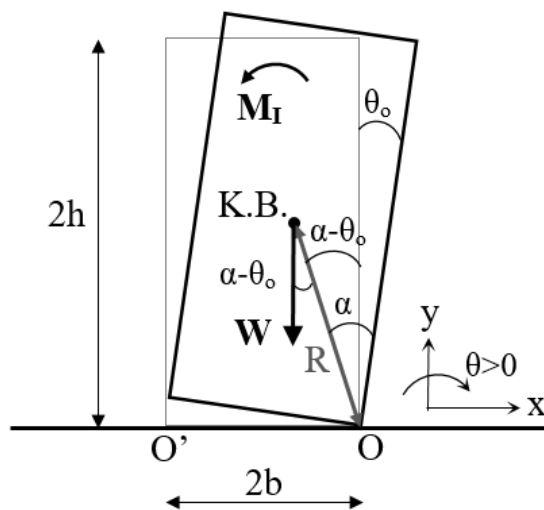
Απαραίτητες συνθήκες για την εμφάνιση της επόμενης μορφής δυναμικής απόκρισης				Επόμενη μορφή δυναμικής απόκρισης
$\dot{x}_o = 0$	$\theta = 0$	$\dot{\theta} = 0$	$R_y \geq 0$	Ηρεμία
$\dot{x}_o \neq 0$				Ολίσθηση
$\dot{x}_o = 0$	$ \theta < \frac{\pi}{2}$			Λικνισμός
$\dot{x}_o \neq 0$				Ολίσθηση με λικνισμό
	$\theta = 0$	$\dot{\theta} = 0$	$R_y < 0$	Μεταφορική αναπήδηση/ Πέταγμα
	$ \theta < \frac{\pi}{2}$			Λικνισμός με αναπήδηση/Βηματισμός
	$ \theta \geq \frac{\pi}{2}$			Ανατροπή

Πίνακας 1.1. Μετάβαση από την απόκριση ολίσθησης με λικνισμό, σε άλλη μορφή απόκρισης.

1.3.2. Μαθηματική περιγραφή της ελεύθερης λικνιστικής απόκρισης άκαμπτου σώματος υπό αρχική γωνία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο George W. Housner ήταν ένας από τους πρώτους ερευνητές που ασχολήθηκαν συστηματικά με τη μελέτη του φαινομένου του λικνισμού. Ο Housner για την μελέτη του [1] χρησιμοποίησε έναν άκαμπτο στύλο τυχαίων διαστάσεων $2b \times 2h$ (Σχήμα 1.3), ο οποίος αφήνεται ελεύθερος να λικνιστεί υπό αρχική γωνία θ_0 . Προκειμένου να απλοποιήσει το πολυδιάστατο και μη γραμμικό χαρακτήρα του δυναμικού προβλήματος που μελετούσε, ο Housner στηρίχθηκε στις παρακάτω παραδοχές:

- Τόσο ο λικνιζόμενος στύλος, όσο και η βάση έδρασης, θεωρούνται άκαμπτα στοιχεία και κατά συνέπεια δεν δύνανται να υποστούν παραμορφώσεις.
- Η βάση έδρασης θεωρείται οριζόντια.
- Η εξέταση του στύλου πραγματοποιείται μόνο εντός του επιπέδου x-y.
- Ο συντελεστής τριβής (coefficient of friction) μεταξύ του στύλου και της βάσης έδρασης θεωρείται αρκετά μεγάλος, έτσι ώστε να μην λαμβάνουν χώρα φαινόμενα ολίσθησης στο δυναμικό πρόβλημα.
- Η μόνη μορφή δυναμικής απόκρισης που ενεργοποιείται κατά την εξέταση της κίνησης του στύλου, είναι ο λικνισμός.



Σχήμα 1.3. Άκαμπτος στύλος σε ελεύθερο λικνισμό υπό αρχική γωνία θ_0 .

Από τη γεωμετρία του στύλου προκύπτει ότι η ακτινική απόσταση R είναι:

$$R = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (1)$$

Η γωνία α που σχηματίζει η ακτινική απόσταση R με την κατακόρυφη πλευρά του στύλου, αποτελεί την κρίσιμη γωνία ανατροπής του. Παρατηρώντας το Σχήμα 1.3, προκύπτει ότι:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{b}{h} \right) \quad (2)$$

Καθώς ο στύλος είναι ορθογωνικός, η μαζική ροπή αδρανείας του υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_o = \frac{m[(2h)^2 + (2b)^2]}{12} + mR^2 \stackrel{(1)}{\Rightarrow} I_o = \frac{4mR^2}{12} + mR^2 \Rightarrow$$

$$I_o = \frac{4mR^2}{3} \quad (3)$$

Η αδρανειακή ροπή του συστήματος δίνεται από την σχέση (4).

$$M_I = I_o \ddot{\theta} \quad (4)$$

Η εξίσωση κίνησης του στύλου στο επίπεδο x-y προκύπτει λαμβάνοντας την ισορροπία ροπών ως προς το σημείο O:

$$\Sigma M_o = 0 \Rightarrow M_I + WR \sin(a - \theta_o) = 0 \stackrel{(4)}{\Rightarrow} I_o \ddot{\theta} = -WR \sin(a - \theta_o) \quad (5)$$

Στην περίπτωση ψηλών και λιγυρών στύλων η γωνία α παίρνει τιμές μικρότερες των 20° και άρα ισχύει ότι:

$$\sin(a - \theta_o) \approx a - \theta_o \quad (6)$$

Επομένως:

$$(5) \stackrel{(6)}{\Rightarrow} I_o \ddot{\theta} - WR \theta_o = -WR \alpha \quad (7)$$

Εισάγοντας την συχνοτική παράμετρο p , προκύπτουν τα εξής:

$$p = \sqrt{\frac{WR}{I_o}} \quad (8)$$

$$(7) \stackrel{(8)}{\Rightarrow} \ddot{\theta} - p^2 \theta = -p^2 \alpha \quad (9)$$

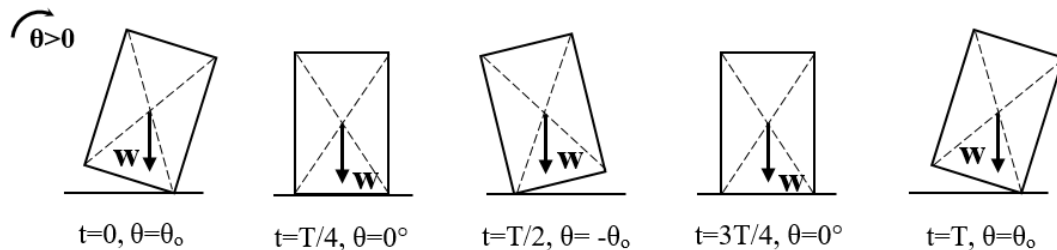
Λαμβάνοντας υπόψιν τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος, $\theta(t=0) = \theta_o$ και $\dot{\theta}(t=0) = 0$, η λύση της διαφορικής εξίσωσης (9) δίνεται από την εξίσωση (10).

$$\theta = \alpha - (\alpha - \theta_o) \cosh(pt) \quad (10)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι από την σχέση (10) προκύπτει ότι, η γωνία στροφής εξαρτάται από τα σταθερά μεγέθη της γωνίας ανατροπής α , της αρχικής γωνίας θ_0 και της συχνοτικής παραμέτρου p . Επομένως, γίνεται άμεσα αντιληπτός ο καθοριστικός ρόλος της γεωμετρίας του στύλου στην λικνιστική του απόκριση.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να διευκρινισθεί ότι η εξίσωση (10) περιγράφει την απόκριση του στύλου από την χρονική στιγμή $t = 0$ όπου αφήνεται ελεύθερος να λικνιστεί υπό αρχική γωνία $\theta = \theta_0$, έως τη στιγμή όπου για πρώτη φορά θα φτάσει στην οριζόντια θέση και θα ισχύει ότι $\theta = 0^\circ$. Θεωρώντας ότι κατά την κρούση του στύλου στη βάση δεν σημειώνονται απώλειες ενέργειας, ο στύλος στη συνέχεια θα εκτελέσει στροφή γωνίας $\theta = -\theta_0$ με πόλο στροφής το σημείο O' (Σχήμα 1.3), έπειτα θα φθάσει και πάλι στην οριζόντια θέση και μετά θα αναπτύξει γωνία $\theta = \theta_0$ με πόλο το σημείο O . Στο σημείο αυτό το σώμα έχει φθάσει στην αρχική του θέση, ολοκληρώνοντας έναν πλήρη κύκλο ταλάντωσης.

Η κίνηση του στύλου στη διάρκεια μιας περιόδου ταλάντωσης περιγράφεται στο Σχήμα 1.4, και μπορεί να επαναληφθεί άπειρες φορές εφόσον δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας.



Σχήμα 1.4. Λικνιστική απόκριση άκαμπτου στύλου στη διάρκεια μίας περιόδου T , αμελώντας τις απώλειες ενέργειας κατά την κρούση.

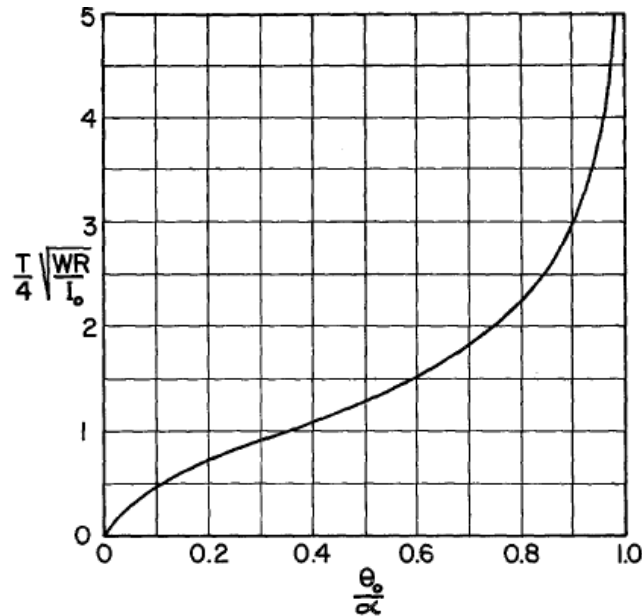
Λαμβάνοντας υπόψιν όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω, ο υπολογισμός της περιόδου κίνησης γίνεται μέσω της παρακάτω απλής διαδικασίας:

$$(10) \xrightarrow{t=\frac{T}{4}} 0 = \alpha - (\alpha - \theta_0) \cosh\left(p \frac{T}{4}\right) \Rightarrow \cosh\left(p \frac{T}{4}\right) = \frac{1}{1 - \theta_0/\alpha} \Rightarrow$$

$$T = \frac{4}{p} \cosh^{-1}\left(\frac{1}{1 - \frac{\theta_0}{\alpha}}\right) \quad (11)$$

Από τη σχέση (11) παρατηρείται ότι η περίοδος εξαρτάται άμεσα από τον σταθερό λόγο θ_0/α και κατά συνέπεια από την γεωμετρία και τις αρχικές συνθήκες του στύλου.

Στο Σχήμα 1.5 που ακολουθεί, δίνεται η γραφική παράσταση της εξίσωσης (11).



Σχήμα 1.5. Περίοδος T του λικνιζόμενου στύλου, υπό αρχική γωνία θ_0 (Housner, 1963).

Η μη ύπαρξη απωλειών ενέργειας αποτελεί μια ιδεατή κατάσταση και φυσικά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική απόκριση του στύλου. Όπως είναι λογικό, μετά από κάθε κρούση του στύλου επί της άκαμπτης βάσης συντελούνται απώλειες κινητικής ενέργειας, που ο Housner υπολόγισε μέσω του συντελεστή r:

$$r = \frac{\left(\frac{1}{2} I_0 \dot{\theta}_2^2\right)}{\left(\frac{1}{2} I_0 \dot{\theta}_1^2\right)} \Rightarrow r = \left(\frac{\dot{\theta}_2}{\dot{\theta}_1}\right)^2 \quad (12)$$

Εφαρμόζοντας την Αρχή Διατήρησης της Στροφορμής, ακριβώς πριν και μετά την πρώτη κρούση του στύλου (κρούση στο σημείο O'), προκύπτει ότι:

$$I_0 \dot{\theta}_1 - 2mRb\dot{\theta}_1 \sin\alpha = I_0 \dot{\theta}_2 \quad (13)$$

Στις σχέσεις (12) και (13) ως $\dot{\theta}_1$ και $\dot{\theta}_2$ λογίζονται οι γωνιακές ταχύτητες του στύλου πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας την σχέση (12) στην εξίσωση (13), προκύπτει η παρακάτω σχέση υπολογισμού για τον συντελεστή r, που εκφράζει τις απώλειες κινητικής ενέργειας μετά από κάθε κρούση.

$$r = \left[1 - \frac{mR^2}{I_0} (1 - \cos 2\alpha) \right]^2 \quad (14)$$

1.4. Αριθμητική προσομοίωση της λικνιστικής απόκρισης άκαμπτου ορθογώνιου σώματος

1.4.1. Γενικές αρχές αριθμητικής προσομοίωσης

1.4.1.1. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

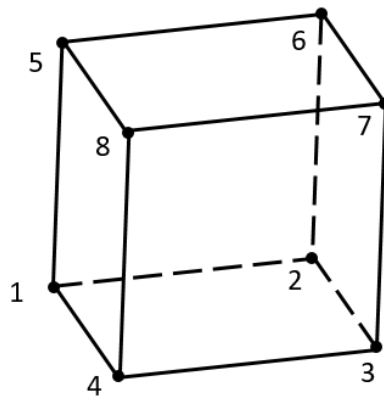
Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method-FEM) είναι μια αριθμητική μέθοδος ανάλυσης, που εφαρμόζεται σε ένα ευρύ πεδίο προβλημάτων μηχανικής για την εξαγωγή αριθμητικής λύσης. Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Η μεγάλη προσαρμοστικότητα σε κάθε είδους πρόβλημα (υλοποίηση οποιασδήποτε γεωμετρίας, ποικίλων τύπων συνοριακών συνθηκών, φορτίσεων και νόμων υλικών).
- Ο ενιαίος τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζονται τα διάφορα προβλήματα, γεγονός που δημιουργεί σχεδόν απεριόριστο πεδίο εφαρμογών.

Εκτός από τα πολυάριθμα πλεονεκτήματά της, η μέθοδος υπόκειται και σε ορισμένους περιορισμούς, ένας από τους οποίους είναι ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου, ενδέχεται να επηρεαστούν από την αναλογία των μεγαλύτερων προς τις μικρότερες διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων (Aspect Ratio.) Στις μέρες μας, όπου η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι ραγδαία, υπάρχουν διάφορες εφαρμογές που βασίζονται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Marc Mentat της MSC Software [11]. Το εν λόγω λογισμικό ενδείκνυται για την περίπτωση μη γραμμικών αναλύσεων, που απαιτούνται για την προσομοίωση σύνθετων φορέων υπό την ανάπτυξη έντονων παραμορφώσεων και τάσεων.

1.4.1.2. Κατασκευή του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων

Για την προσομοίωση του άκαμπτου μπλοκ, κατασκευάστηκε ένα τρισδιάστατο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το στοιχείο 7 της βιβλιοθήκης του Marc [12]. Πρόκειται για ένα οκτακομβικό, ισοπαραμετρικό εξάεδρο που δύναται να έχει τυχαίο σχήμα, ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των κόμβων του. Η αρίθμηση των κόμβων ακολουθεί τον τρόπο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6. Αρίθμηση των κόμβων του ισοπαραμετρικού στοιχείου 7 της βιβλιοθήκης του Marc.

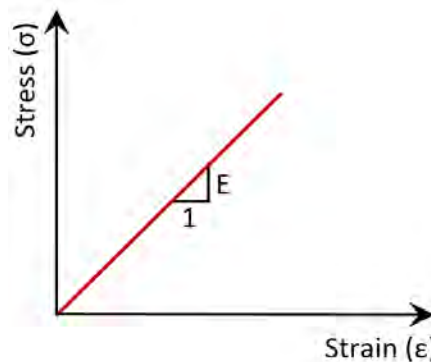
Συγκεκριμένα, οι κόμβοι 1, 2, 3 και 4 αποτελούν τις γωνίες μιας πλευράς του εξαέδρου και η αρίθμησή τους ακολουθεί φορά αντίθετη από αυτή των δεικτών του ρολογιού. Οι κόμβοι 5, 6, 7 και 8 βρίσκονται στην ίδια ακμή με τους 1, 2, 3 και 4 αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι το στοιχείο 7, είναι κατάλληλο για προβλήματα επαφής (contact analysis) και ότι κάθε κόμβος του, διαθέτει τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας και κανέναν στρωφικό.

Επιπλέον η άκαμπτη βάση, πάνω στην οποία εδράζεται ο στύλος, προσομοιώνεται ως ένα γεωμετρικό επιφανειακό στοιχείο με ορθογωνικό σχήμα (quad 4).

1.4.1.3. Καταστατικοί νόμοι υλικών

Καθώς το αριθμητικό μοντέλο που κατασκευάζεται στην παρούσα ενότητα, αφορά ένα σώμα που δεν αναπτύσσει μόνιμες παραμορφώσεις, υιοθετείται ελαστικός νόμος υλικού (Σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.7. Διάγραμμα τάσεων (stress) – παραμορφώσεων (strain) ελαστικού υλικού.

1.4.1.4. Προσομοίωση του Φαινομένου Επαφής-Τριβής

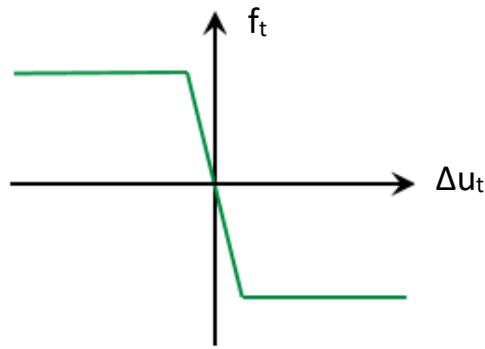
Κατά την λικνιστική απόκριση ενός άκαμπτου σώματος πάνω σε μία άκαμπτη βάση, λαμβάνουν χώρα φαινόμενα επαφής και τριβής. Προκειμένου τα φαινόμενα επαφής (contact phenomena) να είναι καλά ορισμένα, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά πρέπει να καθορισθούν τα σώματα που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους (contact bodies). Υπάρχουν δύο είδη σωμάτων που δύνανται να έρθουν σε επαφή στο λογισμικό Marc, τα παραμορφώσιμα (deformable) και τα άκαμπτα (rigid). Στην ανάλυση των κατασκευών τα μεν παραμορφώσιμα σώματα καλούνται meshed bodies και αποτελούνται από μία ομάδα πεπερασμένων στοιχείων, ενώ τα δε άκαμπτα σώματα καλούνται geometric bodies και αποτελούνται από γεωμετρικές καμπύλες (curves) ή επιφάνειες (surfaces). Στο Marc αναγνωρίζεται η επαφή μεταξύ δύο παραμορφώσιμων σωμάτων και η επαφή μεταξύ ενός άκαμπτου και ενός παραμορφώσιμου σώματος. Επαφή μεταξύ δύο άκαμπτων σωμάτων δεν υποστηρίζεται. Για τον λόγο αυτό, στο πρόβλημα προσομοίωσης του άκαμπτου στύλου, η βάση έδρασης που προσομοιώθηκε ως επιφανειακό γεωμετρικό στοιχείο, λαμβάνεται ως geometric contact body, και το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων του στύλου λαμβάνεται ως ένα meshed contact body. Ωστόσο ο στύλος συμπεριφέρεται ως άκαμπτο σώμα, λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που διαθέτει.

Στη συνέχεια, ορίζονται οι αλληλεπιδράσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των σωμάτων που ενδεχομένως βρεθούν σε επαφή (contact interactions) κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Επιπλέον, σχηματίζεται ένας συνολικός πίνακας (contact table) στον οποίο καθορίζονται όλα τα πιθανά ζεύγη σωμάτων σε επαφή, καθώς και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Η επαφή μεταξύ του στύλου και της βάσης ορίσθηκε ως touching, ενώ ο αλγόριθμος επαφής που επιλέχθηκε ήταν ο node-to-segment.

Το φαινόμενο της τριβής που λαμβάνει χώρα μεταξύ του στύλου και της βάσης, προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο Coulomb Bilinear (Σχήμα 1.8).

Προς επίτευξη συνθηκών καθαρού λικνισμού (χωρίς την ανάπτυξη φαινομένων ολίσθησης), επιλέχθηκε συντελεστής τριβής μεγάλης τιμής για την αποφυγή της ολίσθησης μεταξύ του στύλου και της βάσης έδρασης.



Σχήμα 1.8. Μοντέλο τριβής Coulomb Bilinear.

1.4.1.5. Συνοριακές συνθήκες

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση το ίδιο βάρος του άκαμπτου στύλου, επιβλήθηκε σε κάθε κόμβο του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων, κατακόρυφη επιτάχυνση ίση με την επιτάχυνση της βαρύτητας, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Επιπλέον, δεσμεύθηκαν οι εκτός επιπέδου μετατοπίσεις, καθώς αντικείμενο μελέτης αποτελεί μόνο η εντός επιπέδου απόκριση του στύλου.

1.4.1.6. Μη γραμμική δυναμική ανάλυση

Ένα πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως μη γραμμικό, όταν η σχέση μεταξύ των επιβαλλόμενων εξωτερικών φορτίσεων και των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων είναι μη γραμμική. Η ύπαρξη μη γραμμικότητας σε ένα φαινόμενο, οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

- *Μη γραμμικότητα υλικού (material nonlinearity)*
Η περίπτωση αυτή εμφανίζεται όταν οι σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων ενός υλικού είναι μη γραμμικές.
- *Γεωμετρική μη γραμμικότητα (geometric nonlinearity)*
Χαρακτηριστικές περιπτώσεις γεωμετρικής μη γραμμικότητας είναι η ταυτόχρονη ανάπτυξη μεγάλων μετατοπίσεων και μεγάλων παραμορφώσεων (large displacement, large strain problem) και η ανάπτυξη μεγάλων μετατοπίσεων χωρίς την ύπαρξη μεγάλων παραμορφώσεων (large displacement, small strain problem).

- *Μη γραμμικότητα συνοριακών συνθηκών (boundary conditions nonlinearity)*
Εμφανίζεται συνήθως σε προβλήματα επαφής, που χαρακτηρίζονται από το φαινόμενο της τριβής (friction phenomena) και της αποκόλλησης – ένωσης μεταξύ επιφανειών και κόμβων (gap opening and closing phenomena).

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι, το φαινόμενο του λικνισμού άκαμπτου στύλου εμφανίζει γεωμετρική μη γραμμικότητα (ανάπτυξη μικρών παραμορφώσεων και μεγάλων γωνιών στροφής-μετατοπίσεων), αλλά και μη γραμμικότητα λόγω συνοριακών συνθηκών (ύπαρξη φαινομένων τριβής-επαφής). Μη γραμμικότητα υλικού δεν αναπτύσσεται, καθώς έχει ληφθεί υπόψιν ελαστικός καταστατικός νόμος. Επομένως, η μελέτη της λικνιστικής απόκρισης του άκαμπτου στύλου απαιτεί εφαρμογή μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (nonlinear dynamic analysis).

Οι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις κίνησης που διέπουν το δυναμικό φαινόμενο του λικνισμού, επιλύονται με την αριθμητική μέθοδο της εν χρόνω ολοκλήρωσης (transient analysis). Συγκεκριμένα, επιλέγεται η εφαρμογή του επιλύτη Single Step Houbolt Operator, που αποτελεί μια μέθοδο απευθείας ολοκλήρωσης (direct integration). Η ισχυρή αριθμητική απόσβεση που προσφέρει η συγκεκριμένη μέθοδος, την καθιστά εξαιρετικά σταθερή στην επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων. Ωστόσο, πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγάλη προσοχή, καθώς ενδέχεται η πρόσθετη απόσβεση που εισάγει στο πρόβλημα, να αλλοιώσει τη φύση των αποτελεσμάτων.

Αποτέλεσμα της εν χρόνω ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων κίνησης, είναι ένα σύστημα μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο επιλύεται μέσω της επαναληπτικής αριθμητικής μεθόδου Newton – Raphson. Η μέθοδος Newton – Raphson είναι εξαιρετικά αποτελεσματική στα περισσότερα μη γραμμικά προβλήματα. Ωστόσο οδηγεί σε μεγάλο υπολογιστικό κόστος, όταν το πρόβλημα εξετάζεται στις τρεις διαστάσεις.

Σημειώνεται ότι το μέγεθος του χρονικού βήματος της δυναμικής ανάλυσης πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά, καθώς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων που εξάγονται. Για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε χρονικό βήμα ίσο με 0.001.

1.4.2. Αριθμητικό προσομοίωμα άκαμπτου σώματος σε ελεύθερο λικνισμό υπό αρχική γωνία

Στόχος της συγκεκριμένης ενότητας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή των αναλυτικών εξισώσεων του Housner, με τα αποτελέσματα που προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Marc Mentat.

Για την επίτευξη του προαναφερθέντος σκοπού επιλέγεται ένα ορθογώνιο μεταλλικό μπλοκ, το οποίο αφήνεται ελεύθερο να λικνιστεί με αρχική γωνία $\theta_0 = 5^\circ$. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες του μπλοκ παρουσιάζονται στους Πίνακες 1.2 και 1.3 αντίστοιχα.

Ύψος	2h	6 m
Πλάτος	2b	1 m
Πάχος	2t	0.1 m
Αρχική Γωνία	θ_0	$5^\circ / 0.0873 \text{ rads}$

Πίνακας 1.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά άκαμπτου στύλου.

Πυκνότητα	ρ	7850 kg/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	E	210 GPa
Λόγος Poisson	ν	0.3
Συντελεστής Τριβής	μ	10

Πίνακας 1.3. Μηχανικές ιδιότητες άκαμπτου στύλου.

Σημειώνεται ότι έχει επιλεγθεί ένας αρκετά μεγάλος συντελεστής τριβής, προκειμένου να μην αναπτυχθούν φαινόμενα ολίσθησης.

Υπολογισμός Αναλυτικών Εξισώσεων

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.3.2, για το παρόν πρόβλημα προκύπτει ότι:

$$(1) \xrightarrow{\text{Πίνακας 1.2}} R = \sqrt{h^2 + b^2} = \sqrt{3^2 + 0.5^2} \Rightarrow R = 3.0414m \quad (15)$$

$$(2) \xrightarrow{\text{Πίνακας 1.2}} \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b}{h}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.5}{3}\right) \Rightarrow \alpha = 0.1651 \text{ rads} \quad (16)$$

Για την μάζα του μπλοκ ισχύει ότι:

$$m = \rho(2h)(2b)(2t) = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (6\text{m}) * (1\text{m}) * (0.1\text{m}) \Rightarrow m = 4710 \text{ kg} \quad (17)$$

Επομένως:

$$(3) \xrightarrow{(15),(17)} I_o = \frac{4mR^2}{3} = \frac{4 * 4710 * 3.0414^2}{3} \Rightarrow I_o = 58090.7157 \text{ kgm}^2 \quad (18)$$

$$(8) \xrightarrow{(15),(17),(18)} p = \sqrt{\frac{WR}{I_o}} = \sqrt{\frac{mgR}{I_o}} = \sqrt{\frac{4710 * 9.81 * 3.0414}{58090.7157}} \Rightarrow p = 1.5554 \quad (19)$$

$$(10) \xrightarrow{\text{Πίνακας 1.2,(16),(19)}} \theta = 0.1651 - (0.1651 - 0.0873) \cosh(1.5554t) \Rightarrow$$

$$\theta = 0.1651 - 0.0778 \cosh(1.5554t) \quad (20)$$

Η εξίσωση (20) περιγράφει την λικνιστική απόκριση του μεταλλικού μπλοκ, από την αρχή της κίνησής του ($t = 0$) έως την πρώτη κρούση του στη βάση έδρασης ($t = T/4$).

Επιπλέον, για την περίοδο ισχύει ότι:

$$(13) \xrightarrow{\text{Πίνακας 1.2,(16),(19)}} T = \frac{4}{p} \cosh^{-1} \left(\frac{1}{1 - \frac{\theta_o}{\alpha}} \right) = \frac{4}{1.5554} \cosh^{-1} \left(\frac{1}{1 - \frac{0.0873}{0.1651}} \right) \Rightarrow$$

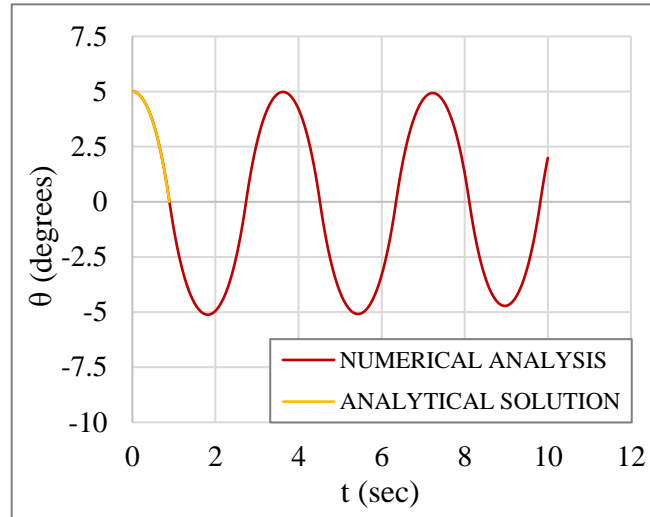
$$T_{analytical} = 3.56s \quad (21)$$

Κατασκευή Αριθμητικού Προσομοιώματος

Το άκαμπτο μπλοκ προσομοιώθηκε στο λογισμικό Marc Mentat, ακολουθώντας τις βασικές αρχές που αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.4.1. Αναφέρεται ότι το μπλοκ διαιρέθηκε σε 60 στοιχεία καθ' ύψος και 10 στοιχεία κατά πλάτος, με αποτέλεσμα να αποτελείται από 600 οκτακομβικά ισοπαραμετρικά στοιχεία (element type 7) καθένα από τα οποία έχει διαστάσεις (0.1m)x(0.1m)x(0.1m).

Σύγκριση Αποτελεσμάτων Αναλυτικής – Αριθμητικής Επίλυσης

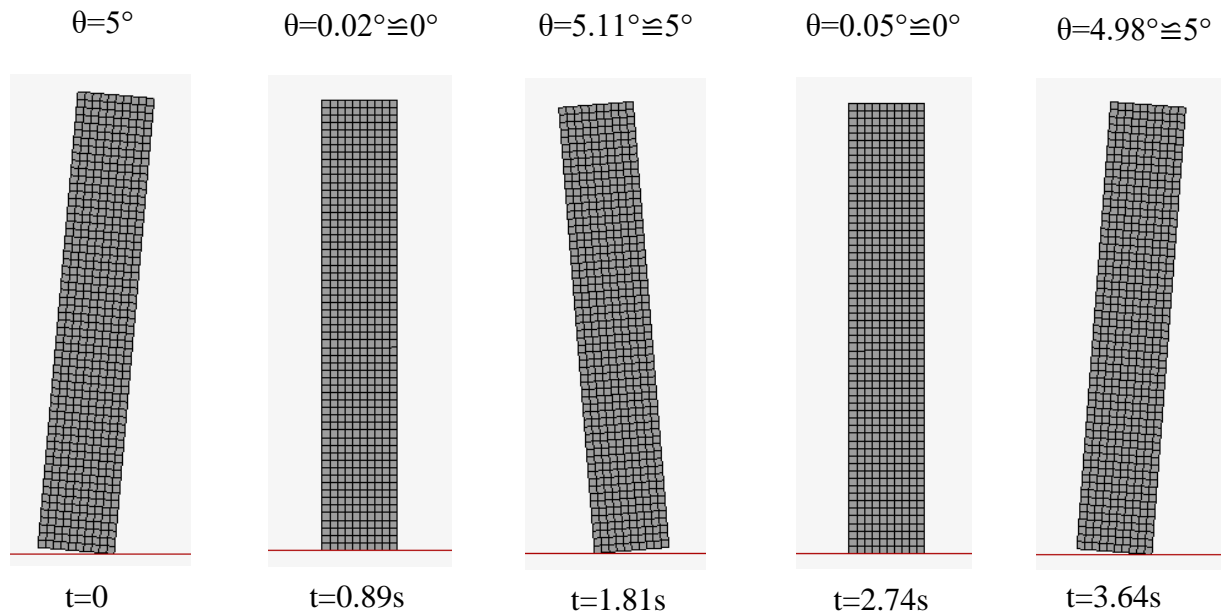
Στο Σχήμα 1.9 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα διαγράμματα γωνιών λικνισμού θ – χρόνου t , που προέκυψαν τόσο από την εφαρμογή της εξίσωσης (20) (analytical solution) όσο και από την αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος (numerical analysis).



Σχήμα 1.9. Διαγράμματα γωνίας λίκνισμού θ – Χρόνου t , αναλυτικής και αριθμητικής επίλυσης.

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, είναι εμφανές ότι το αριθμητικό προσομοίωμα που κατασκευάστηκε, προσεγγίζει άψογα την μαθηματική εξίσωση του Housner από την αρχή της λίκνισης έως και την πρώτη κρούση στη βάση.

Στο Σχήμα 1.10 παρουσιάζεται σε στιγμιότυπα, η απόκριση του μεταλλικού μπλοκ κατά τη διάρκεια μιας ολόκληρης περιόδου κίνησης.



Σχήμα 1.10. Χρονικά στιγμιότυπα απόκρισης αριθμητικού προσομοιώματος άκαμπτου στύλου υπό αρχική γωνία 5° , στη διάρκεια μιας περιόδου T .

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.10, η περίοδος που προκύπτει από την αριθμητική επίλυση είναι :

$$T_{numerical} = 3.64 \text{ s} \quad (22)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (21) και (22) παρατηρείται ότι η περίοδος που προέκυψε από την αριθμητική επίλυση, προσεγγίζει ικανοποιητικά την περίοδο που υπολογίσθηκε αναλυτικά.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το αριθμητικό μοντέλο και κατά συνέπεια οι βασικές αρχές προσομοίωσης που υιοθετήθηκαν, είναι ικανοποιητικά ακριβείς και αξιόπιστες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1. Εισαγωγή

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι γόμφοι επηρεάζουν την δυναμική συμπεριφορά σπονδυλωτών κίωνων. Προς επίτευξη αυτού του σκοπού, κατασκευάστηκαν δύο τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα σπονδυλωτών κίωνων, όπου το ένα διαθέτει γόμφους, ενώ το άλλο δεν διαθέτει. Τα φυσικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των αριθμητικών προσομοιωμάτων που μελετήθηκαν, αντλήθηκαν από διασωθέντες κίονες της δυτικής στοάς του Γυμνασίου στην Αρχαία Μεσσήνη. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, οι δύο κίονες υποβλήθηκαν σε αρμονικές ημιτονικές διεγέρσεις, για διάφορες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης και συχνότητας. Επιπλέον επιχειρήθηκε η σύγκριση της απόκρισης των δύο κίωνων, όταν η διεύθυνση επιβολής της εδαφικής διέγερσης είναι παράλληλη στη διεύθυνση των γόμφων και όταν σχηματίζει γωνία 30° με αυτή.

Στην αρχή του κεφαλαίου αυτού, αναφέρονται ορισμένα ιστορικά στοιχεία σχετικά με την Αρχαία Μεσσήνη και τα συστήματα κατακόρυφης σύνδεσης σπονδυλωτών κίωνων που εφαρμόζονταν στην Αρχαία Ελλάδα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες των κίωνων που προσομοιώθηκαν, καθώς επίσης και οι αρμονικές διεγέρσεις στις οποίες υποβλήθηκαν. Τέλος, παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για την λικνιστική απόκριση σπονδυλωτών κίωνων.

2.2. Σημαντικά ιστορικά – αρχαιολογικά στοιχεία

2.2.1. Το Γυμνάσιο της Αρχαίας Μεσσήνης

Η Αρχαία Μεσσήνη αποτέλεσε την πρωτεύουσα της Μεσσηνίας, όταν η περιοχή απέκτησε την αυτονομία της. Κτίστηκε στους πρόποδες της Ιθώμης το 369 π.Χ. [13], από τον Θηβαίο Επαμεινώνδα και τους συμμάχους του από το Άργος. Πήρε το όνομά της από τη μυθική βασίλισσα της χώρας, Μεσσήνη, η οποία ήταν κόρη του βασιλιά του Άργους Τρίοπα και σύζυγος του Λάκωνα Πολυκάοντος.

Το Γυμνάσιο της Αρχαίας Μεσσήνης περιβαλλόταν από τρεις στοές δωρικού ρυθμού. Οι κίονες της δυτικής (Σχήμα 2.1) και της βόρειας στοάς έχουν διατηρηθεί στη θέση τους, σε αντίθεση με αυτούς της ανατολικής στοάς που έχουν ανατραπεί. Η πτώση οφειλόταν στην πρόχειρη επισκευή τους, χωρίς τη χρήση σιδηρών γόμφων και συνδέσμων.



Σχήμα 2.1. Η δυτική στοά του Γυμνασίου στην Αρχαία Μεσσήνη.

Σημειώνεται ότι το Γυμνάσιο αποτελούσε τον βασικό χώρο σωματικής και πνευματικής άσκησης των εφήβων. Ήταν χώρος όπου διδάσκονταν γραφή, ανάγνωση, αριθμητική, γεωμετρία, λογοτεχνία και άλλα θέματα, προκειμένου οι νεαροί πολίτες να είναι έτοιμοι να ενταχθούν στην τάξη των ανδρών.

2.2.2. Τα συστήματα κατακόρυφων συνδέσεων στην Αρχαία Ελλάδα

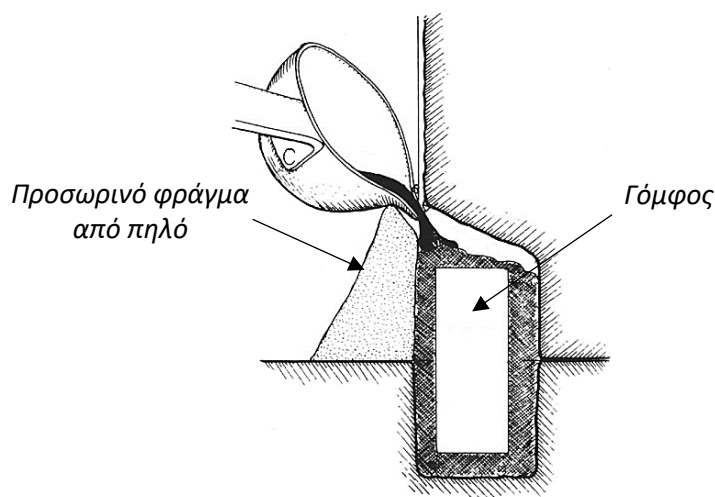
Σύμφωνα με τον ερευνητή Αναστάσιο Ορλάνδο [14], κατά την αρχαιότητα υπήρχαν δύο βασικά συστήματα κατακόρυφης σύνδεσης των δομικών λίθων ενός σπονδυλωτού κίονα, οι γόμφοι και το σύστημα πόλου – εμπολίου. Σημειώνεται ότι η κατακόρυφη σύνδεση εφαρμοζόταν μόνο στους δομικούς λίθους της ανωδομής και όχι επί των θεμελίων.

2.2.2.1. Κατακόρυφη σύνδεση σπονδύλων με χρήση γόμφων

Οι γόμφοι είναι μικροί σύνδεσμοι ορθογωνικού σχήματος, οι οποίοι κατασκευάζονταν από ξύλο, χαλκό ή σίδηρο. Για την τοποθέτησή τους, πραγματοποιούνταν λάξευση τόσο της άνω επιφάνειας του κάτω σπονδύλου, όσο και της κάτω επιφάνειας του άνω σπονδύλου. Κατά αυτόν τον τρόπο διανοιγόταν μια οπή (**εντορμία**), η οποία είχε το σχήμα του γόμφου. Ειδικά

στην περίπτωση των σιδηρών γόμφων, οι διαστάσεις της εντορμίας ήταν σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές του γόμφου, προκειμένου να υπάρχει χώρος για την χύτευση τηγμένου μολυβδου.

Η διαδικασία χύτευσης του μολυβδου ονομαζόταν **μολυβδοχόηση** και εφαρμοζόταν για την προστασία του σιδήρου από τις επιζήμιες συνέπειες της οξείδωσής του. Σημειώνεται ότι ο μολυβδος εξασφάλιζε άριστη μηχανική συνέχεια μεταξύ γόμφου και λίθου, καθώς όντας μαλακό και παραμορφώσιμο υλικό, απορροφούσε μέρος της ενέργειας ενός ενδεχόμενου σεισμού. Η μολυβδοχόηση στην ειδική περίπτωση όπου ο γόμφος ήταν γωνιακά τοποθετημένος (Σχήμα 2.2), πραγματοποιούταν με τη βοήθεια πήλινου φράγματος, το οποίο καταστρεφόταν μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας.



Σχήμα 2.2. Διαδικασία μολυβδοχόησης στη περίπτωση γωνιακού γόμφου.

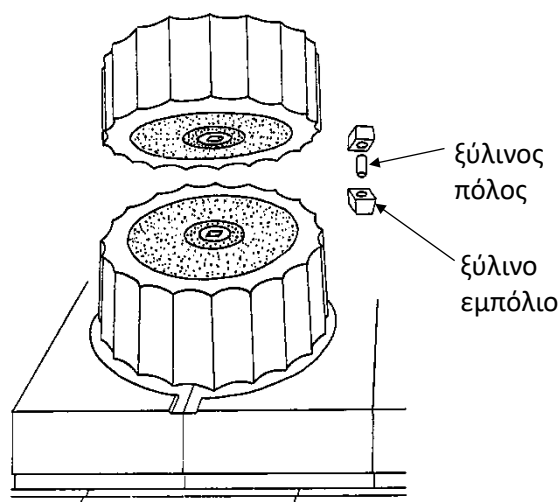
Στη γενική περίπτωση κεντρικά τοποθετημένου γόμφου, η μολυβδοχόηση συνήθως λάμβανε χώρα μόνο στην εντορμία του κάτω σπονδύλου. Για το σκοπό αυτό, η χύτευση του μολυβδου γινόταν μέσω τριγωνικών ή ορθογωνικών αυλάκων που λαξεύονταν επί της άνω επιφάνειας του κάτω σπονδύλου.

2.2.2.2. Κατακόρυφη σύνδεση σπονδύλων με χρήση συστήματος πόλου-εμπολίου

Το σύστημα πόλου – εμπολίου (Σχήμα 2.3) αποτελείται από δύο ξύλινους συμμετρικούς κύβους με σταδιακά μειούμενο πλάτος (εμπολία), στο κέντρο των οποίων υπάρχει κυλινδρική οπή για την τοποθέτηση ενός συμπαγούς κυλινδρικού ξύλινου πασσάλου (πόλος). Σημειώνεται

ότι ο πόλος κατασκευαζόταν από σκληρότερο ξύλο σε σχέση με τα εμπόλια, καθώς επίσης ότι μεταξύ του πόλου και των εμπολίων δεν υπήρχε κενός χώρος.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η συναρμογή των εμπολίων στους σπονδύλους γινόταν με έγχυση μικρής ποσότητας μόλυβδου. Επιπλέον, ο πόλος ήταν συχνά προσκολλημένος στο άνω εμπόλιο, μέσω ειδικής κολλητικής ύλης που αναφέρεται ως ερυθρά.



Σχήμα 2.3. Σύστημα πόλου-εμπολίου.

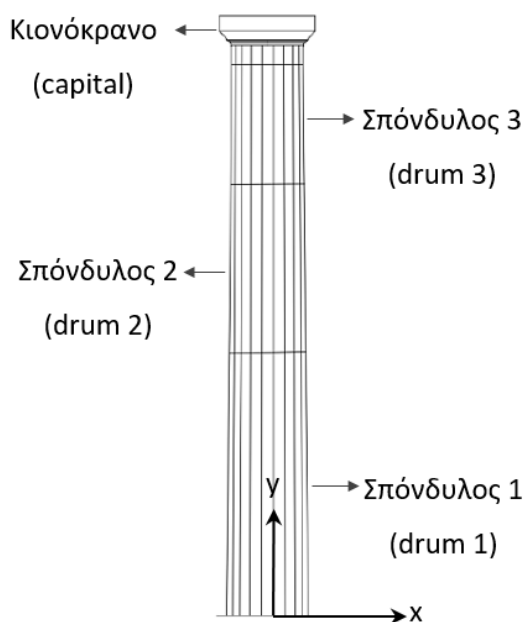
Αξίζει να αναφερθεί ότι με το σύστημα πόλου -εμπολίου, επιτυγχανόταν ορθά η κέντρωση των σπονδύλων κατά την τοποθέτησή τους, ενώ παράλληλα επιτρεπόταν η σχετική περιστροφή μεταξύ αυτών για την εξασφάλιση καλύτερων συνθηκών επαφής.

2.3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μηχανικές ιδιότητες των υπό εξέταση κίωνων

Σύμφωνα με την μελέτη [15], οι περισσότεροι από τους κίονες της δυτικής στοάς του Γυμνασίου στην Αρχαία Μεσσήνη αποτελούνται από 2 (51%) ή 3 σπονδύλους (38%), ενώ ορισμένοι είναι μονολιθικοί (11%). Κάθε ένας από τους σπονδύλους των διασωθέντων κίωνων έχει κολουροκωνικό σχήμα, δηλαδή χαρακτηρίζεται από σταδιακά μειούμενη καθ' ύψος διάμετρο. Σημειώνεται ότι το συνολικό ύψος των κίωνων κυμαίνεται από 3.89m έως 4.24m, καθώς επίσης ότι το ύψος του κιονόκρανου μειώνεται με την αύξηση του ύψους στο οποίο τοποθετείται. Σχετικά με τους γόμφους υπογραμμίζεται ότι ο αριθμός και η θέση τους ποικίλουν από κίονα σε κίονα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι υπάρχουν περιπτώσεις κίωνων με

έναν, δύο, τέσσερις ή και κανέναν γόμφο. Επιπλέον, στους γόμφους που έχουν διασωθεί, βρέθηκαν ίχνη μόλυβδου, γεγονός που υποδεικνύει ότι κατά της κατασκευής τους είχαν υποβληθεί σε διαδικασία μολυβδοχόησης.

Οι δύο κίονες που προσομοιώνονται στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, διαθέτουν τρεις σπονδύλους και ένα κιονόκρανο (Σχήμα 2.4).



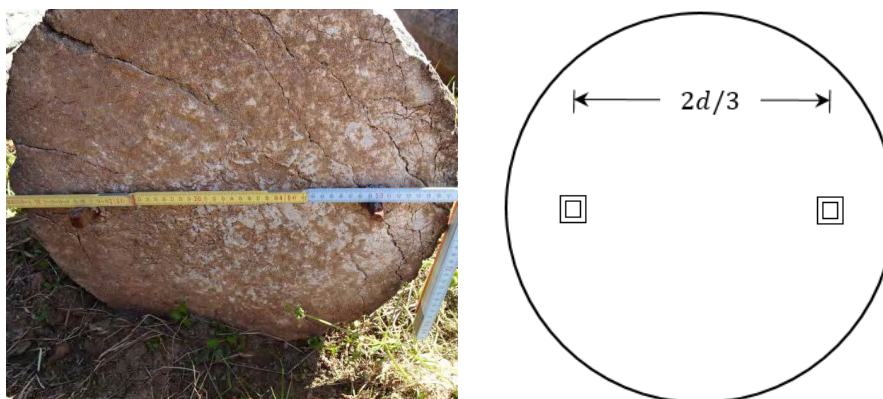
Σχήμα 2.4. Τυπική όψη των υπό εξέταση σπονδυλωτών κίωνων.

Οι διαστάσεις των δύο αριθμητικών μοντέλων δίνονται στον Πίνακα 2.1 και είναι πανομοιότυπες και για τα δύο μοντέλα.

Σπόνδυλοι	Σπόνδυλος 1	Σπόνδυλος 2	Σπόνδυλος 3	Κιονόκρανο
h	1.90m	1.15m	0.75m	0.40m
d _{min}	0.49m	0.47m	0.45m	-
d _{max}	0.52m	0.49m	0.47m	0.45m

Πίνακας 2.1. Διαστάσεις των υπό εξέταση σπονδυλωτών κίωνων.

Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων είναι η ύπαρξη γόμφων στο ένα από αυτά. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο σιδηροί γόμφοι ορθογωνικής διατομής (2cm)x(2cm) και ύψους 6cm, η διάταξη των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Υπογραμμίζεται ότι οι διαστάσεις των εντορμιών σε κάθε σπόνδυλο είναι (3cm)x(3cm) x(3cm).



Σχήμα 2.5. Διάταξη χαλύβδινων γόμφων.

Το δομικό υλικό από το οποίο κατασκευάστηκαν οι κίονες είναι ένας τοπικός ασβεστόλιθος [16]. Για την προσομοίωση των σπονδύλων και των γόμφων, επιλέχθηκαν ασβεστόλιθος και χάλυβας, με μηχανικές ιδιότητες που δίνονται στον Πίνακα 2.2. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ των ασβεστολιθικών σπονδύλων έχει τιμή 0.7.

Μηχανική ιδιότητα	Μέτρο Ελαστικότητας	Τάση Διαρροής	Παραμόρφωση Διαρροής	Λόγος Poisson	Πυκνότητα
	E	σ_y	ϵ_y	ν	ρ
Ασβεστόλιθος	40 GPa	40 MPa	0.001	0.20	2.7 t/m ³
Χάλυβας	210 GPa	240 MPa	0.001143	0.30	7.85 t/m ³

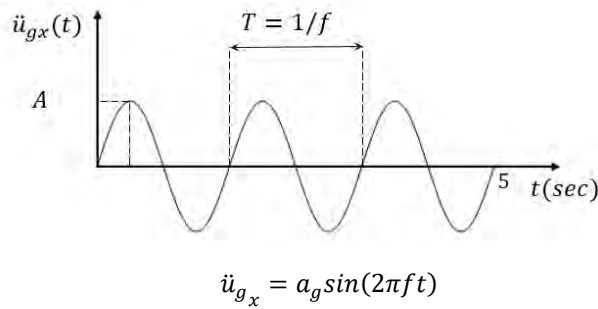
Πίνακας 2.2. Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου και χάλυβα.

2.4. Οι αρμονικές διεγέρσεις στη βάση των υπό εξέταση κίωνων

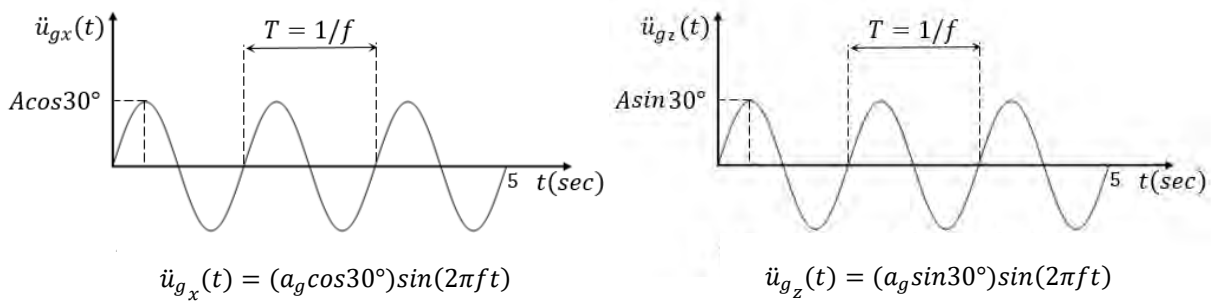
Τα αριθμητικά μοντέλα των δύο υπό εξέταση κίωνων, υποβλήθηκαν σε διάφορες ημιτονικές αρμονικές διεγέρσεις της μορφής:

$$\ddot{u}_g = a_g \sin(2\pi ft) \quad (23)$$

Οι διεγέρσεις αυτές ασκήθηκαν τόσο παράλληλα στη διεύθυνση των γόμφων (Σχήμα 2.6) όσο και υπό γωνία 30° σε σχέση με αυτή (Σχήμα 2.7). Σημειώνεται ότι η διεύθυνση των γόμφων συμπίπτει με την διεύθυνση x των αριθμητικών μοντέλων και ότι η διάρκεια της κάθε διέγερσης ήταν 5 δευτερόλεπτα. Στον Πίνακα 2.3, όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, παρουσιάζονται όλοι οι συνδυασμοί μεταξύ συχνότητας f και επιτάχυνσης a_g για τις αρμονικές διεγέρσεις στις οποίες υποβλήθηκαν τα δύο αριθμητικά μοντέλα. Ο πίνακας αυτός ισχύει και για τις δύο διευθύνσεις επιβολής της εδαφικής διέγερσης.



Σχήμα 2.6. Γενική μορφή αρμονικής ημιτονικής διέγερσης, με διεύθυνση επιβολής παράλληλα στον άξονα των γόμφων.



Σχήμα 2.7. Γενική μορφή αρμονικής ημιτονικής διέγερσης, με διεύθυνση επιβολής 30° ως προς τον άξονα των γόμφων.

	# Μοντέλο χωρίς γόμφους * Μοντέλο με γόμφους	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση a_g (m/s ²)			
		0.20g	0.30g	0.40g	0.50g
Συχνότητα διέγερσης f (Hz)	0.5	# *	# *	# *	# *
	0.8	# *	# *	# *	# *
	1	# *	# *	# *	# *
	1.25	# *	# *		
	1.50	# *	# *	*	
	2	# *	# *	# *	# *
	2.25			#	*
	2.50			# *	# *
	3			# *	# *
	4	# *	# *	# *	# *
	6	# *	# *	# *	# *
	8	# *	# *	# *	# *

Πίνακας 2.3. Ζεύγη συχνότητας f – εδαφικής επιτάχυνσης a_g των υπό μελέτη αρμονικών διεγέρσεων.

2.5. Βιβλιογραφική ανασκόπηση της λικνιστικής απόκρισης σπονδυλωτών κίωνων (multidrum column)

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1, η λικνιστική απόκριση των σπονδυλωτών κατασκευών αποτελεί ένα πολυσύνθετο και ισχυρά μη γραμμικό πρόβλημα και επομένως η εύρεση αναλυτικών εξισώσεων κίνησης για αυτές τις κατασκευές είναι πρακτικά αδύνατη.

Αναλυτικές λύσεις για την μη γραμμική λικνιστική απόκριση δύο άκαμπτων σωμάτων, που είναι τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο, έχουν δοθεί στις μελέτες [17] και [18]. Συγκεκριμένα, στην μελέτη του Έλληνα καθηγητή Ιωάννη Ψυχάρη [17], υπό την παραδοχή ανάπτυξης του λικνισμού με απουσία φαινομένων ολίσθησης (pure rocking) μεταξύ των δύο άκαμπτων σωμάτων, εξάγονται αναλυτικές εξισώσεις κίνησης για κάθε πιθανή μορφή απόκρισης, ενώ οι Winkler et al. [18] διεξήγαγαν μελέτη σχετικά με την απόκριση μεμονωμένων και συνδεδεμένων μεταξύ τους ξύλινων μπλοκ.

Επιπλέον, έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικές έρευνες [19],[20] που οδήγησαν σε εξαιρετικά ενδιαφέροντα ευρήματα. Οι Mouzakis et al. [19] κατασκεύασαν ομοίωμα μαρμάρινου κίονα από τον Παρθενώνα της Ακρόπολης της Αθήνας, σε κλίμακα 1:3 και το υπέβαλλαν σε διάφορες διεγέρσεις. Παρατήρησαν ότι οι παραμένουσες μετακινήσεις των σπονδύλων δεν είναι απαραίτητως ενδεικτικές των μετακινήσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της διέγερσης, καθώς επίσης ότι οι σπόνδυλοι δύνανται να εμφανίσουν μετατοπίσεις εκτός του επιπέδου της επιβαλλόμενης στη βάση του κίονα διέγερσης. Την τελευταία παρατήρηση αναφέρουν στην έρευνά τους οι Βασίλειος Δρόσος και Ιωάννης Αναστασόπουλος [20].

Στην προσπάθεια να αντιμετωπισθεί αποτελεσματικά το πρόβλημα της μη γραμμικότητας που χαρακτηρίζει το φαινόμενο του λικνισμού, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες που στηρίζονται στην ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων για τους σπονδυλωτούς κίονες. Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες στηρίζονται στην κατασκευή δισδιάστατων αριθμητικών μοντέλων [22],[24],[25],[26]. Υπάρχουν όμως και ορισμένες που αναφέρονται σε τρισδιάστατη θεώρηση του προβλήματος [21], [23] οι οποίες όπως είναι λογικό, αποτελούν περισσότερο ακριβείς προσεγγίσεις της πραγματικής συμπεριφοράς των σπονδυλωτών κατασκευών.

Στις μελέτες [22], [23] παρατηρήθηκε ότι η δυναμική απόκριση των σπονδυλωτών κίωνων επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την συχνότητα της διέγερσης στην οποία αυτοί υποβάλλονται. Συγκεκριμένα, οι διεγέρσεις χαμηλών συχνοτήτων είναι περισσότερο επικίνδυνες ως προς την κατάρρευση, σε σχέση με τις διεγέρσεις υψηλών συχνοτήτων.

Επιπλέον, στην έρευνα [24] γίνεται αναφορά στην ωφέλιμη επίδραση που προκαλεί στην συνολική ευστάθεια του κίονα, η ανάπτυξη σχετικών ολισθήσεων μεταξύ των σπονδύλων.

Τέλος, στις μελέτες [25], [26] καταγράφονται διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν την λικνιστική απόκριση των σπονδυλωτών κίωνων, όπως είναι η συχνότητα και η επιτάχυνση της εδαφικής διέγερσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ίδιου του κίονα. Παρατηρείται επίσης, ότι σε χαμηλής συχνότητας αρμονικές διεγέρσεις της βάσης δεσπόζον φαινόμενο στην απόκριση του κίονα είναι ο λικνισμός, ενώ σε αρμονικές διεγέρσεις υψηλής συχνότητας κυριαρχεί το φαινόμενο των ολισθήσεων. Τέλος, σε συχνότητες ενδιάμεσου μεγέθους η απόκριση του κίονα χαρακτηρίζεται τόσο από φαινόμενα λικνισμού όσο και από φαινόμενα ολισθήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ

3.1. Κατασκευή του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

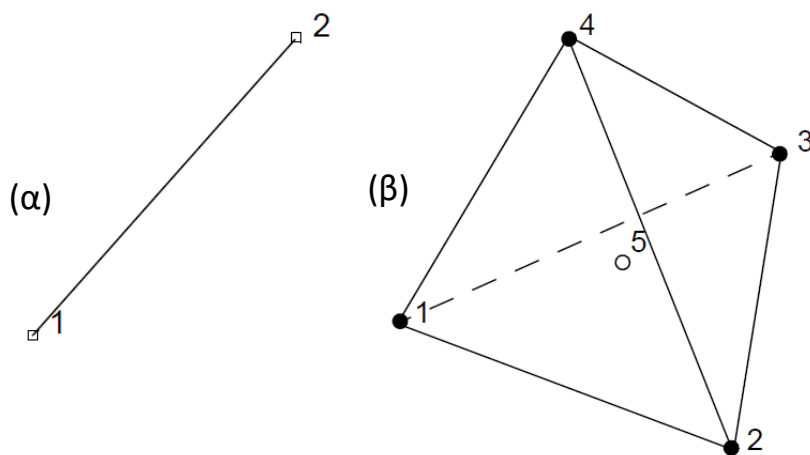
3.1.1. Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων σπονδυλωτού κίονα με γόμφους

Για την αριθμητική προσομοίωση του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, κατασκευάστηκε ένα δίκτυο 4466 πεπερασμένων στοιχείων. Από τα στοιχεία αυτά τα 24 έχουν τις ιδιότητες του στοιχείου 98 της βιβλιοθήκης του Marc, τα 744 έχουν τις ιδιότητες του στοιχείου 7 και τα υπόλοιπα 3698 φέρουν τις ιδιότητες του στοιχείου 241.

Το στοιχείο 98 (Σχήμα 3.1α) είναι ένα στοιχείο δοκού στο χώρο, που διαθέτει δύο κόμβους και δύναται να χρησιμοποιηθεί τόσο για υλικά με ελαστικό όσο και με ανελαστικό νόμο υλικού. Κάθε κόμβος του στοιχείου αυτού, διαθέτει τρεις μεταφορικούς και τρεις στρωφικούς βαθμούς ελευθερίας.

Το στοιχείο 241 (Σχήμα 3.1β) είναι ένα τρισδιάστατο τετράεδρο τυχαίου σχήματος, που διαθέτει πέντε κόμβους. Κάθε κόμβος του στοιχείου 241, διαθέτει τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας και κανέναν στρωφικό. Σημειώνεται ότι ο κόμβος 5 βρίσκεται στο κέντρο βάρους του στοιχείου.

Για το στοιχείο 7, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.4.1.2.



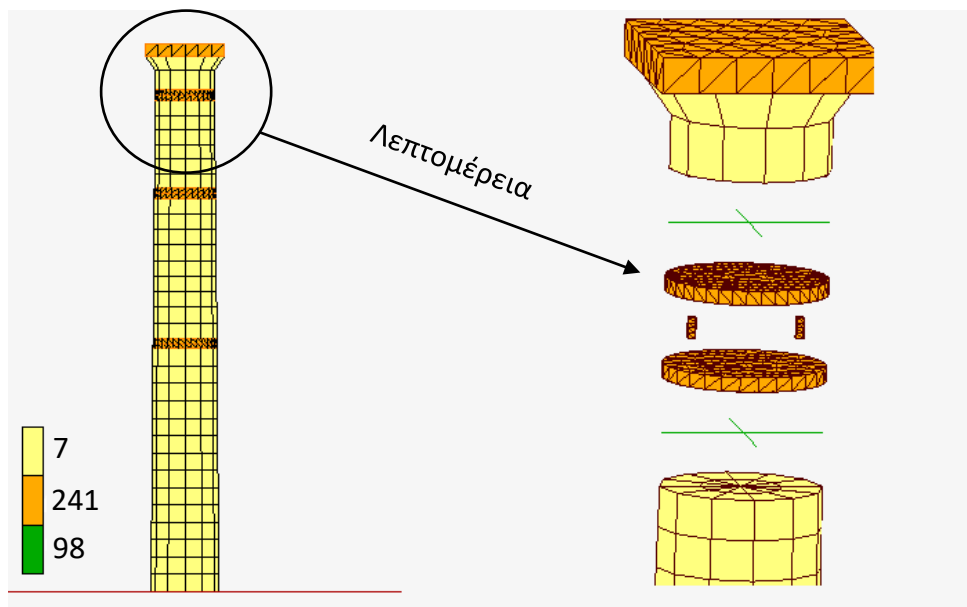
Σχήμα 3.1. Τα στοιχεία 98 (α) και 241 (β) της βιβλιοθήκης του Marc.

Κάθε σπόνδυλος του κίονα ορίζεται από δύο ζώνες πυκνού και μία ζώνη αραιού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων. Οι ζώνες πύκνωσης του δικτύου, που βρίσκονται στην άνω και κάτω ακραία περιοχή κάθε σπονδύλου, αποτελούνται από τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία τύπου 241 (element type 241), ενώ η ζώνη αραιώσεως καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ των δύο πυκνών ζωνών και απαρτίζεται από ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου 7 (element type 7).

Ο σχηματισμός του δικτύου των πυκνών ζωνών, πραγματοποιήθηκε με την κατασκευή κυλινδρικών στερεών μειούμενης διατομής, τα οποία διακριτοποιήθηκαν αυτόματα από το λογισμικό σε πεπερασμένα στοιχεία (automesh). Προκειμένου να διανοιχθούν οι εντορμίες (οπές) για την τοποθέτηση των γόμφων, πριν την αυτόματη διακριτοποίηση αφαιρέθηκαν από το κάθε κυλινδρικό στερεό τα κατάλληλα ορθογωνικά πρίσματα μέσω της οδηγίας *subtract solids*.

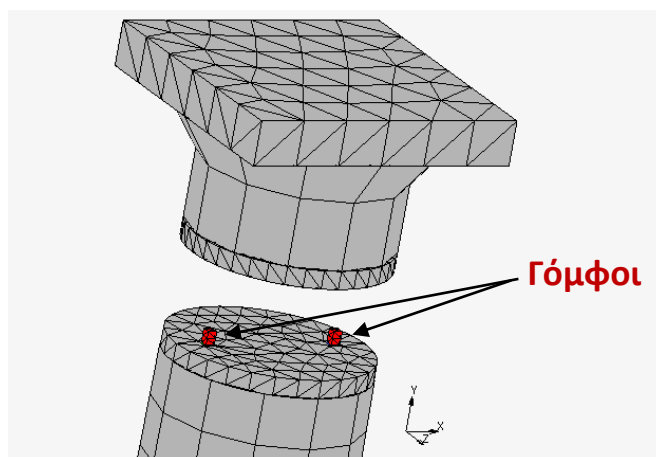
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα στοιχεία 7 και 241 δεν διαθέτουν στρωφικούς βαθμούς ελευθερίας. Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκαν τέσσερα στοιχεία δοκού (element type 98) σε κάθε διεπιφάνεια μεταξύ των ζωνών πύκνωσης και αραιώσεως του δικτύου, προκειμένου να είναι δυνατή η εξαγωγή των αποτελεσμάτων για τις γωνίες στρώφης του κάθε σπονδύλου.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους.



Σχήμα 3.2. Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους.

Για την προσομοίωση των γόμφων κατασκευάστηκαν ορθογωνικά πρίσματα, τα οποία υποβλήθηκαν επίσης σε αυτόματη διακριτοποίηση. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2, τα πεπερασμένα στοιχεία των γόμφων έχουν τις ιδιότητες του στοιχείου 241 της βιβλιοθήκης του Marc. Υπενθυμίζεται ότι σε κάθε διεπιφάνεια μεταξύ των σπονδύλων, τοποθετήθηκαν δύο γόμφοι παράλληλα στον άξονα x. Κατά συνέπεια ο σπονδυλωτός κίονας διαθέτει συνολικά έξι γόμφους. Στο Σχήμα 3.3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το σύστημα των γόμφων στην άνω παρειά του σπονδύλου 3 (διεπιφάνεια σπονδύλου 3 – κιονόκρανου).



Σχήμα 3.3. Σύστημα γόμφων στη διεπιφάνεια του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι, η επιλογή του βάθους των ακραίων ζωνών πυκνώσης δεν ήταν τυχαία. Έπειτα από αρκετές δοκιμές διαπιστώθηκε ότι, όταν το βάθος των ζωνών πυκνώσης ήταν ίσο με το βάθος των εντορμιών, εμφανίζονταν φαινόμενα διείσδυσης (penetration) των γόμφων μέσα στους σπονδύλους. Το φαινόμενο αυτό προκλήθηκε διότι, η κάτω πλευρά των γόμφων (element type 241) βρισκόταν σε επαφή με τα διαφορετικού τύπου πεπερασμένα στοιχεία του αραιού δικτύου (element type 7). Κατά συνέπεια, για τις ακραίες ζώνες του πυκνού δικτύου επιλέχθηκε μεγαλύτερο βάθος (4cm) από αυτό των εντορμιών (3cm).

3.1.2. Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους

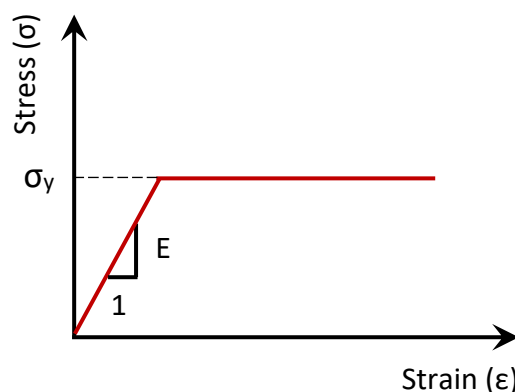
Για την αριθμητική προσομοίωση του σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, κατασκευάστηκε ένα δίκτυο 2188 πεπερασμένων στοιχείων. Από τα στοιχεία αυτά τα 24 έχουν τις ιδιότητες του στοιχείου 98 της βιβλιοθήκης του Marc, τα 744 έχουν τις ιδιότητες του στοιχείου 7 και τα υπόλοιπα 1346 φέρουν τις ιδιότητες του στοιχείου 241.

Ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκε το μοντέλο του κίονα δίχως γόμφους είναι πανομοιότυπος με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 4.1.2, με τη διαφορά ότι παραλήφθηκαν οι διαδικασίες σχηματισμού των εντορμιών και των γόμφων.

Υπογραμμίζεται ότι η αριθμητική προσομοίωση του κίονα που δεν διαθέτει γόμφους, δύναται να πραγματοποιηθεί χωρίς την δημιουργία των ζωνών πυκνού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων. Ο σχηματισμός των ζωνών αυτών οφείλεται στην ανάγκη ύπαρξης ομοιότητας μεταξύ των δύο μοντέλων (κίονας με γόμφους και κίονας χωρίς γόμφους), με σκοπό την καλύτερη σύγκριση της δυναμικής τους απόκρισης.

3.2. Καταστατικοί νόμοι υλικών

Στην ενότητα 2.3 αναφέρθηκε ότι το υλικό προσομοίωσης των γόμφων και των σπονδύλων είναι αντίστοιχα χάλυβας και ασβεστόλιθος, οι μηχανικές ιδιότητες των οποίων παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.2. Για τα δύο αυτά υλικά επιλέχθηκε ελαστοπλαστικός καταστατικός νόμος, χωρίς κράτυνση (Σχήμα 3.4). Για τον χάλυβα και τον ασβεστόλιθο, λήφθηκε υπόψιν το κριτήριο διαρροής Von - Mises.



Σχήμα 3.4. Ελαστοπλαστικός νόμος υλικών χωρίς κράτυνση.

3.3. Νόμοι τριβής – επαφής

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.4.1.4, η βάση έδρασης των δύο κιόνων λαμβάνεται ως geometric contact body, ενώ το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων των κιόνων επιμερίζεται σε διάφορα σώματα που λαμβάνονται ως meshed contact bodies.

Προκειμένου κάθε σπόνδυλος να αποτελεί ένα ενιαίο σώμα, η επαφή μεταξύ των ακραίων ζωνών πυκνού δικτύου με το ενδιάμεσο αραιό δίκτυο ορίζεται με την επιλογή **glued contact interaction**. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για την σύνδεση σωμάτων με διαφορετικό τύπο πεπερασμένων στοιχείων, μέσω επιβολής κινηματικών περιορισμών στη διεπιφάνειά τους. Κατά συνέπεια δύο σώματα που έρχονται σε επαφή τύπου glued, δεν δύνανται να αναπτύξουν σχετικές μετατοπίσεις. Σημειώνεται ότι όλα τα στοιχεία δοκού (element type 98), συνδέονται μέσω της επιλογής glued τόσο με το αραιό, όσο και με το πυκνό δίκτυο στοιχείων, ανάμεσα στα οποία έχουν τοποθετηθεί.

Στις διεπιφάνειες μεταξύ των σπονδύλων, αλλά και στη διεπιφάνεια του κατώτερου σπονδύλου με την βάση έδρασης, η επαφή ορίστηκε ως **touching** και ως αλγόριθμος επαφής επιλέχθηκε ο node-to-segment. Με τον τρόπο αυτό, οι σπόνδυλοι έχουν την δυνατότητα να αναπτύσσουν μεταξύ τους κάθε είδος σχετικών μετατοπίσεων και στροφών.

Κάθε ένας από τους έξι γόμφους που κατασκευάζονται, χωρίζεται σε δύο meshed contact bodies, τα οποία συνδέονται και πάλι μέσω της επιλογής glued contact interaction. Η ίδια σύνδεση πραγματοποιείται και μεταξύ του κάτω μέρους κάθε γόμφου, με την άνω παρειά του κάτω σπονδύλου της διεπιφάνειας που τοποθετούνται οι γόμφοι. Με τον τρόπο αυτό, προσομοιώνεται η διαδικασία της μολυβδοχόησης, στην οποία είχαν υποβληθεί οι γόμφοι. Επιπλέον, η επαφή του άνω μέρους των γόμφων με την κάτω παρειά του άνω σπονδύλου της διεπιφάνειας όπου αυτοί τοποθετούνται, ορίζεται ως touching contact interaction.

Το φαινόμενο της τριβής που λαμβάνει χώρα τόσο μεταξύ των σπονδύλων, όσο και μεταξύ του κατώτερου σπονδύλου και της βάσης, προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο Coulomb Bilinear (Σχήμα 1.8).

3.4. Συνοριακές συνθήκες

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση το ίδιο βάρος των σπονδύλων και των γόμφων, επιβλήθηκε σε κάθε κόμβο του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων, κατακόρυφη επιτάχυνση ίση με την επιτάχυνση της βαρύτητας, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Επιπλέον, οι αρμονικές ημιτονοειδείς διεγέρσεις που μελετώνται στη παρούσα εργασία, εισάγονται στο σύστημα ως χρονικά μεταβαλλόμενες μετατοπίσεις της βάσης έδρασης των κιόνων.

3.5. Μη γραμμική δυναμική ανάλυση

Σχετικά με τους αλγόριθμους που επιλέγονται για την εφαρμογή της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, ισχύουν όσα περιεγράφηκαν στην ενότητα 1.4.1.6 για τον άκαμπτο στύλο. Η μόνη διαφορά είναι ότι, το πρόβλημα της δυναμικής απόκρισης των σπονδυλωτών κιόνων που εξετάζονται, διέπεται όχι μόνο από μη γραμμικότητα συνοριακών συνθηκών και γεωμετρική μη γραμμικότητα, αλλά και από μη γραμμικότητα υλικού. Η μη γραμμικότητα υλικού είναι αποτέλεσμα του ελαστοπλαστικού νόμου που επιλέχθηκε για τον χάλυβα των γόμφων και τον ασβεστόλιθο των σπονδύλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ ΓΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΩΝ ΓΟΜΦΩΝ

4.1. Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο διερευνάται η επίδραση των χαρακτηριστικών της διέγερσης στην δυναμική συμπεριφορά των δύο υπό εξέταση σπονδυλωτών κίωνων (με και χωρίς γόμφους), όταν η διέγερση επιβάλλεται κατά τον άξονα που ορίζουν οι γόμφοι (άξονας x). Για τον λόγο αυτό, μελετάται ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνονται οι σπόνδυλοι των δύο μοντέλων, σε όλες τις διεγέρσεις που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.3. Σημειώνεται ότι λόγω του μεγάλου όγκου των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται επιλεκτικά για ορισμένες μόνο εδαφικές διεγέρσεις.

4.2. Σπονδυλωτός κίονας δίχως γόμφους

4.2.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης – συχνότητας διέγερσης

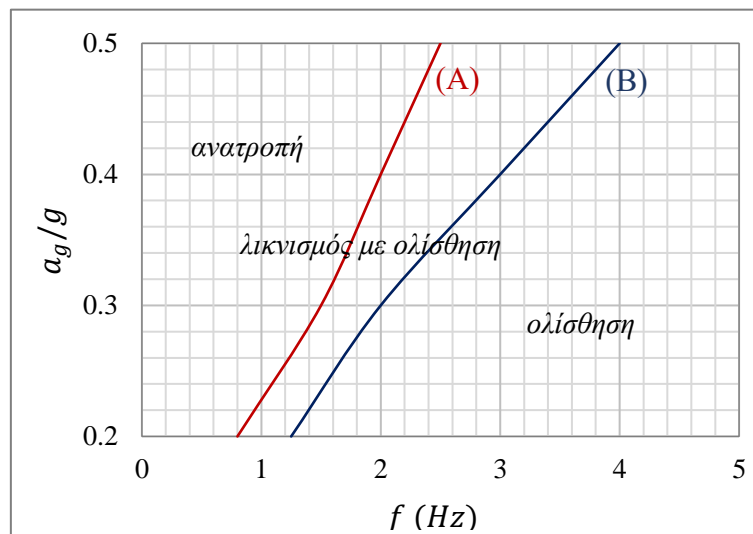
Στον Πίνακα 4.1 περιγράφεται η δυναμική απόκριση του κίονα για όλες τις εδαφικές διεγέρσεις που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, για κάθε τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης δίνονται οι τιμές των συχνοτήτων διέγερσης για τις οποίες οι σπόνδυλοι του κίονα ανατρέπονται, καθώς επίσης και οι συχνότητες στις οποίες κυρίαρχο φαινόμενο της δυναμικής απόκρισης του κίονα είναι η ολίσθηση (μικρές γωνίες λικνισμού) και η ολίσθηση με λικνισμό (σημαντικές γωνίες λικνισμού).

Από τον Πίνακα 4.1 προκύπτει το διάγραμμα της ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης σε συνάρτηση με την συχνότητα διέγερσης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Σημειώνεται ότι η Καμπύλη Α του σχήματος αυτού, καθορίζει για κάθε τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, τις οριακές τιμές της συχνότητας διέγερσης για τις οποίες ο κίονας καταρρέει, ενώ η Καμπύλη Β καθορίζει για κάθε τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, τις οριακές τιμές της συχνότητας διέγερσης για τις οποίες οι σπόνδυλοι του κίονα υποβάλλονται σε φαινόμενα ολίσθησης με λικνισμό. Επομένως όταν οι τιμές της συχνότητας και της επιτάχυνσης της εδαφικής διέγερσης λαμβάνουν τιμές μικρότερες ή ίσες από αυτές που καθορίζει η καμπύλη Α, τότε ο κίονας

ανατρέπεται, ενώ όταν λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες από αυτές που καθορίζει η καμπύλη Β, τότε μεταξύ των σπονδύλων του κίονα λαμβάνουν χώρα κυρίως φαινόμενα ολίσθησης. Τέλος, όταν οι τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης και της συχνότητας διέγερσης βρίσκονται μεταξύ των Καμπυλών Α και Β, τότε μεταξύ των σπονδύλων αναπτύσσονται τόσο φαινόμενα ολίσθησης, όσο και λικνισμός εντός και εκτός επιπέδου.

		Συχνότητα Διέγερσης f (Hz)		
		Ανατροπή	Ολίσθηση με Λικνισμό	Ολίσθηση
Εδαφική Επιτάχυνση a_g (m/s^2)	0.20g	0.50Hz, 0.80Hz	1Hz, 1.25Hz	1.50Hz, 2Hz 4Hz, 6Hz, 8Hz
	0.30g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 1.25Hz, 1.50Hz	2Hz	4Hz, 6Hz, 8Hz
	0.40g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 2Hz	2.25Hz, 2.50Hz, 3Hz	4Hz, 6Hz, 8Hz
	0.50g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 2Hz, 2.50Hz	3Hz, 4Hz	6Hz, 8Hz

Πίνακας 4.1. Περιγραφή της δυναμικής απόκρισης του σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, σε κάθε αρμονική διέγερση.

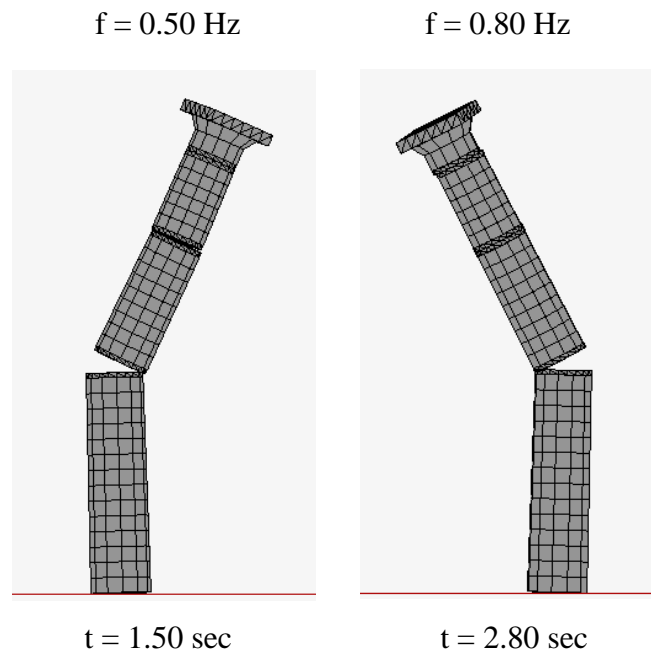


Σχήμα 4.1. Διάγραμμα της ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g , συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.

4.2.2. Στιγμιότυπα κατάρρευσης

Στα Σχήματα 4.2, 4.3, 4.4 και 4.5 που ακολουθούν, παρουσιάζονται στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση του κίονα δίχως γόμφους, για επιτάχυνση διέγερσης ίση με 0.20g, 0.30g, 0.40g και 0.50g αντίστοιχα.

Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g, ο κίονας καταρρέει για συχνότητες 0.50Hz και 0.80Hz. Και στις δύο περιπτώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, η κατάρρευση οφείλεται σε ταυτόχρονη αποκόλληση του κιονόκρανου και των σπονδύλων 2,3 από τον σπόνδυλο 1. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές γωνίες λικνισμού εκτός επιπέδου (στροφή περί τον άξονα x) καθώς και ότι οι ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων είναι αρκετά μικρές.

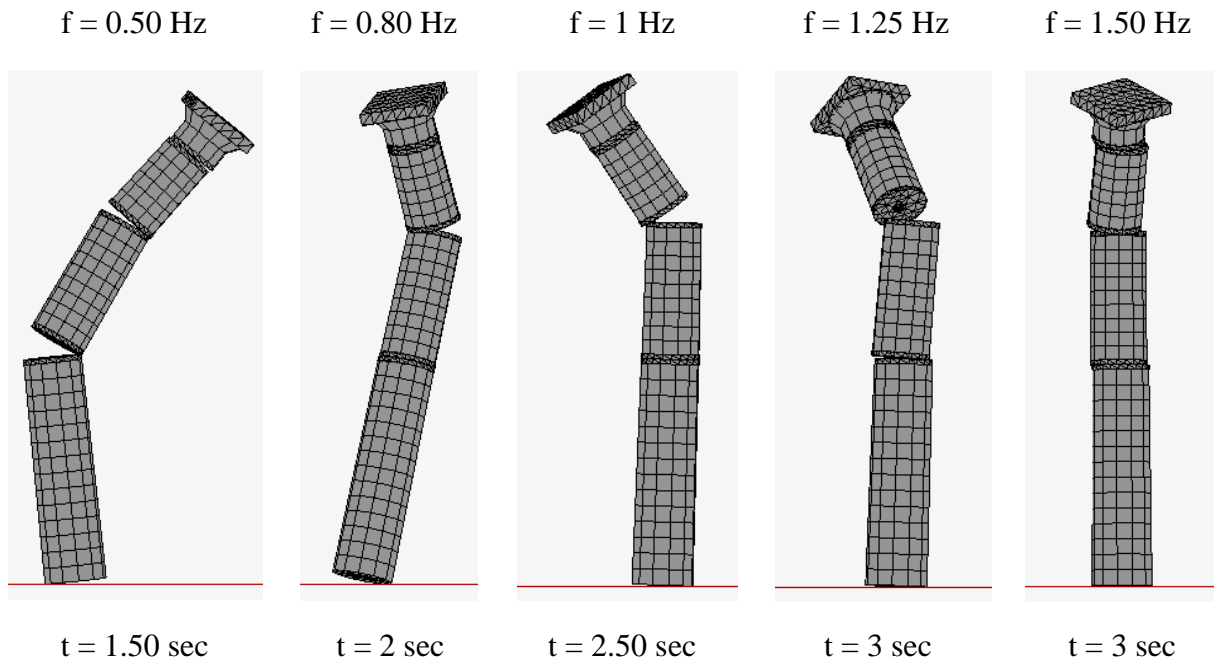


Σχήμα 4.2. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g.

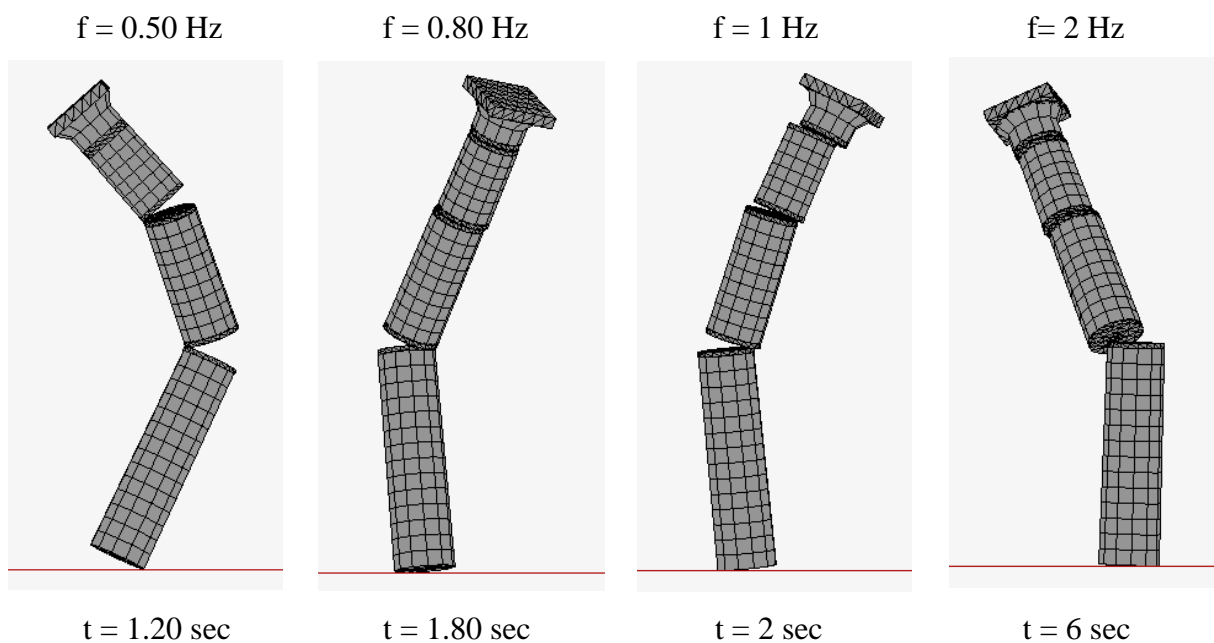
Όταν η επιτάχυνση της διέγερσης είναι ίση με 0.30g (Σχήμα 4.3), ο κίονας καταρρέει για συχνότητες διέγερσης ίσες με 0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 1.25Hz και 1.50Hz. Στην περίπτωση των συχνοτήτων των 0.50Hz και 1Hz δεν σημειώνεται ανάπτυξη σημαντικών γωνιών λικνισμού περί τον άξονα x. Στις υπόλοιπες συχνότητες η κατάρρευση προκύπτει με ταυτόχρονη ανάπτυξη φαινομένων εντός (λικνισμός περί τον άξονα z) και εκτός επιπέδου της διέγερσης (λικνισμός περί τον άξονα x). Επιπλέον, στις υψηλές συχνότητες (1.25Hz και 1.50Hz) σημειώνονται και σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 4.4 και 4.5, τα οποία αναφέρονται στις περιπτώσεις όπου η επιτάχυνση διέγερσης είναι ίση με 0.40g και 0.50g αντίστοιχα, γίνεται αντιληπτό ότι για συχνότητα ίση με 0.50Hz η κατάρρευση επέρχεται λόγω ανάπτυξης μεγάλων γωνιών λικνισμού

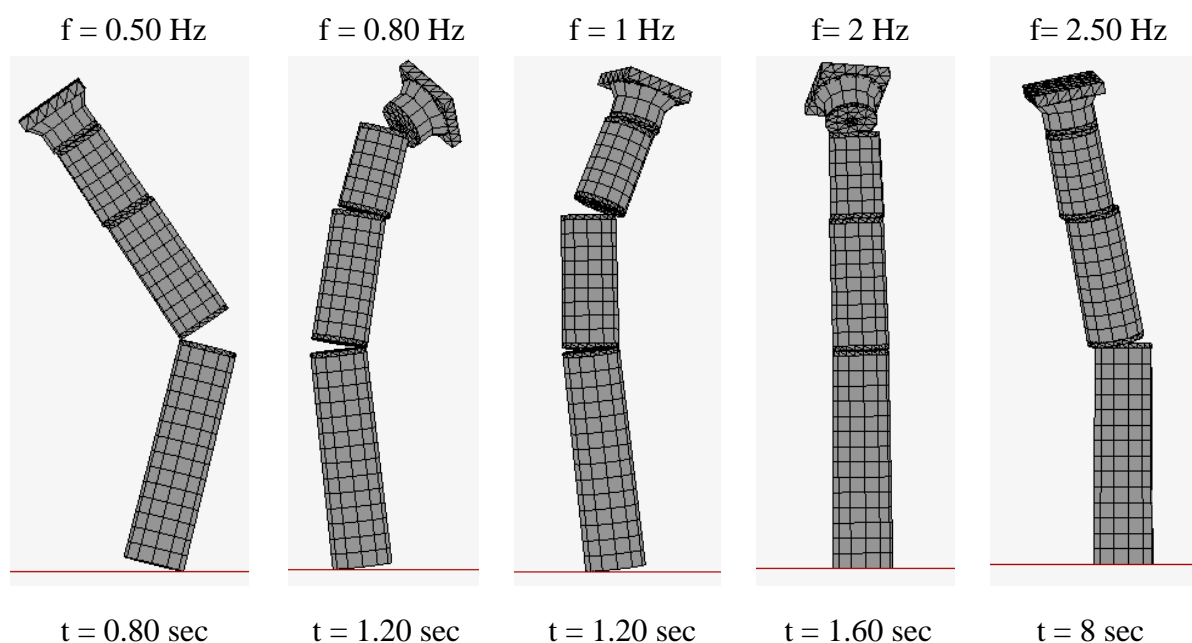
περί τον άξονα z, χωρίς την ύπαρξη μεγάλων σχετικών μετατοπίσεων μεταξύ των σπονδύλων. Στις υπόλοιπες συχνότητες ο κίονας ανατρέπεται λόγω συμβολής φαινομένων εντός και εκτός επιπέδου, καθώς επίσης και λόγω ανάπτυξης ολισθήσεων μεταξύ των σπονδύλων.



Σχήμα 4.3. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.30g$.



Σχήμα 4.4. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.40g$.



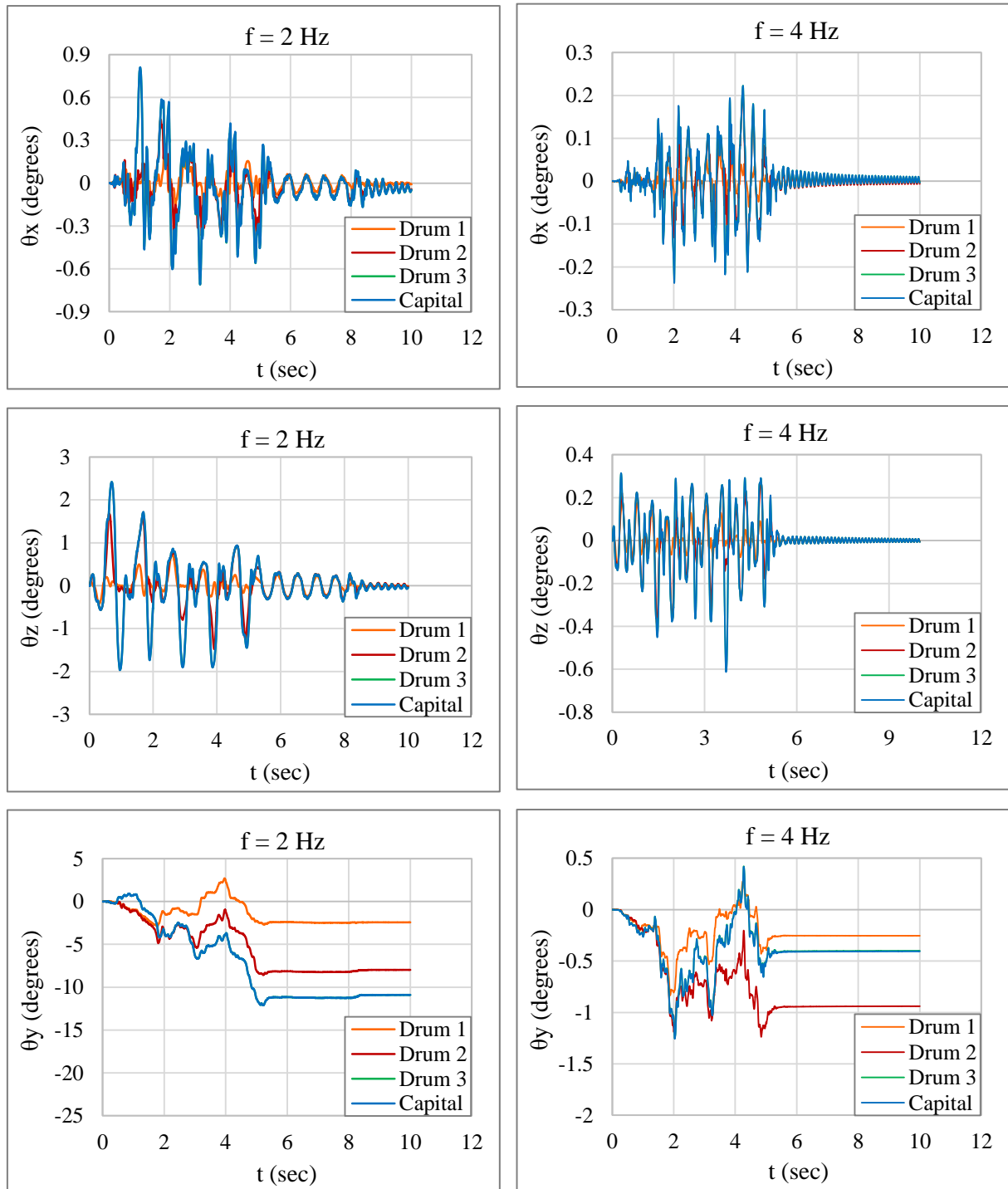
Σχήμα 4.5. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την κατάρρευση του σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους:

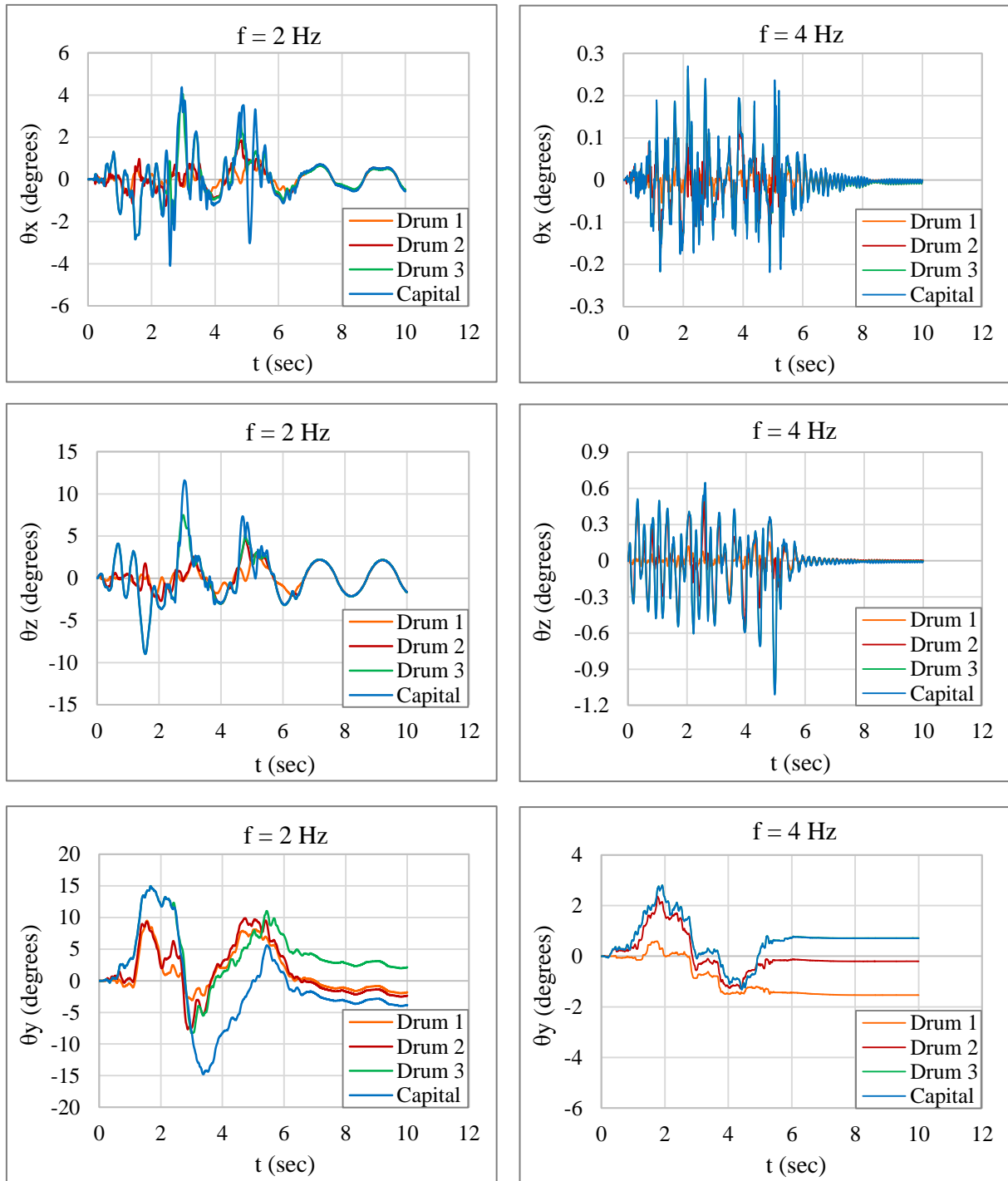
- Για όλες τις εδαφικές επιταχύνσεις, η ανατροπή του κίονα σε χαμηλές συχνότητες οφείλεται στις μεγάλες γωνίες λικνισμού περί τον άξονα z (λικνισμός εντός επιπέδου). Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι οι ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων και οι εκτός επιπέδου γωνίες λικνισμού είναι αμελητέες σε αυτές τις περιπτώσεις.
- Όσο η συχνότητα αυξάνεται, στη κατάρρευση συμβάλλουν τόσο ο εκτός επιπέδου λικνισμός όσο και οι σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων.
- Καθώς η εδαφική επιτάχυνση γίνεται μεγαλύτερη, το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες επέρχεται κατάρρευση διευρύνεται. Έτσι για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g, κατάρρευση επέρχεται για συχνότητα διέγερσης μικρότερη από την τιμή των 0.8Hz, ενώ για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g έχουμε κατάρρευση του σπονδυλωτού κίονα για συχνότητα διέγερσης μικρότερη από την τιμή των 2.50Hz.

4.2.3. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου

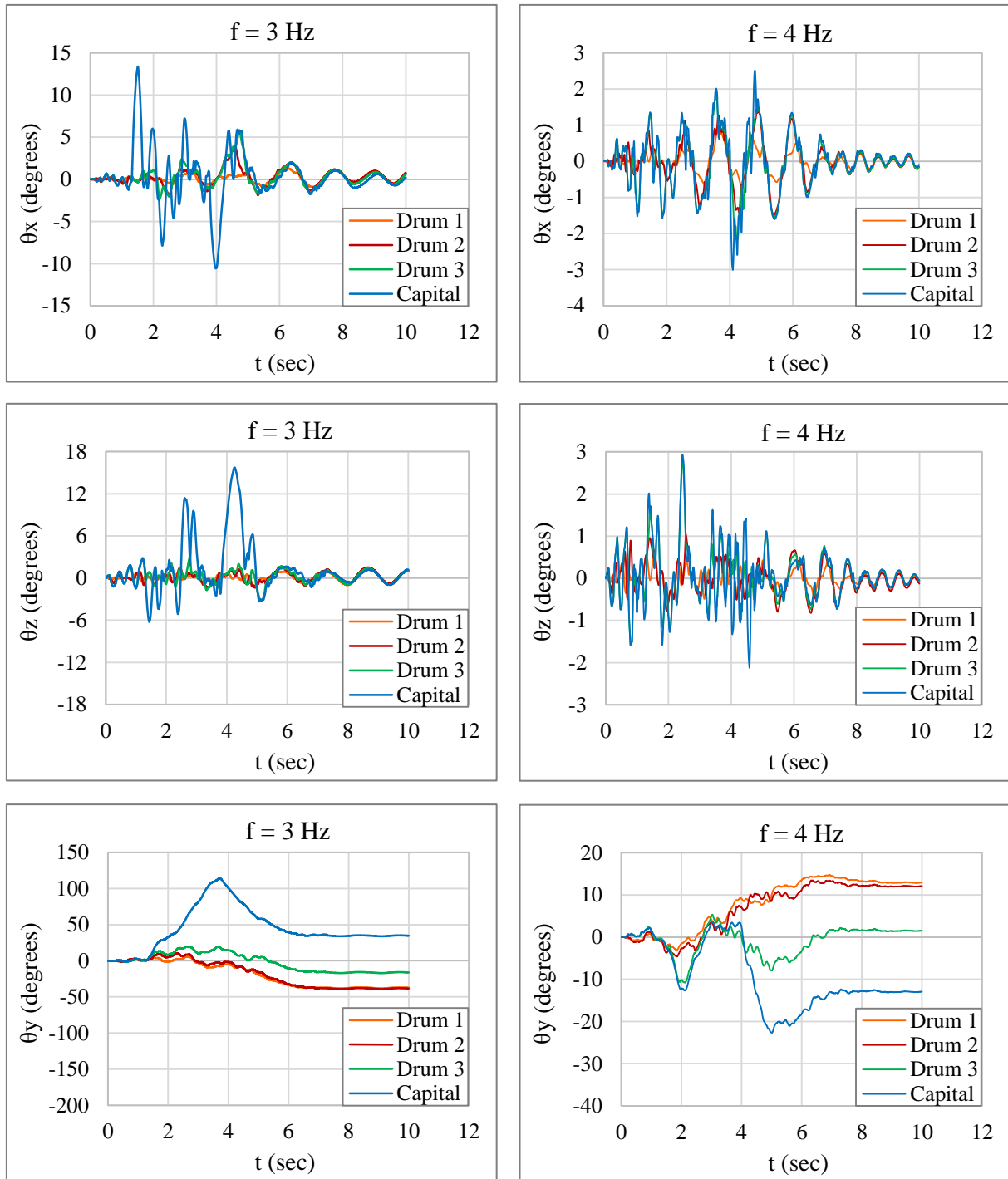
Στα Σχήματα 4.6 - 4.9, δίνονται τα διαγράμματα ολικών γωνιών στροφής περί τους άξονες x, y και z σε συνάρτηση με το χρόνο, για διάφορες συχνότητες διέγερσης και εδαφικές επιταχύνσεις ίσες με 0.20g, 0.30g, 0.40g και 0.50g αντίστοιχα.



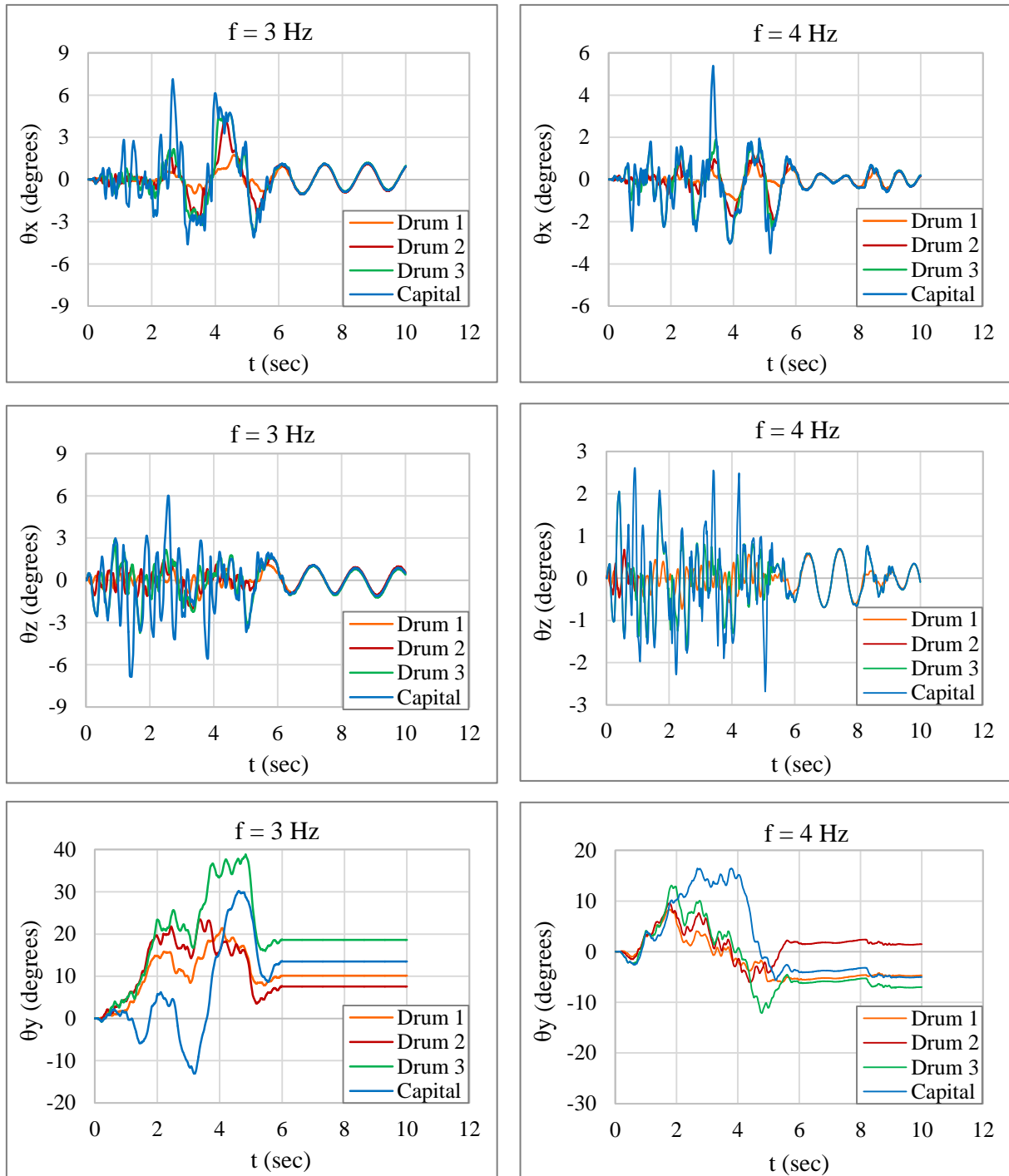
Σχήμα 4.6. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα χωρίς γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g.



Σχήμα 4.7. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g.



Σχήμα 4.8. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g.



Σχήμα 4.9. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g.

Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.6, 4.7, 4.8 και 4.9, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Διατηρώντας την επιτάχυνση της διέγερσης σταθερή, η αύξηση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση των γωνιών λικνισμού περί τους άξονες x και z (γωνίες θ_x , θ_z).
- Διατηρώντας την επιτάχυνση της διέγερσης σταθερή και αυξάνοντας την συχνότητα, η στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα y (γωνία θ_y) έχει ακανόνιστη συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, η αύξηση της συχνότητας για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g και 0.40g επιφέρει μείωση των γωνιών θ_y , ενώ για επιτάχυνση ίση με 0.30g και 0.50g προκαλεί αύξηση των γωνιών θ_y .
- Για την ίδια συχνότητα διέγερσης, η αύξηση της τιμής της εδαφικής επιτάχυνσης επιφέρει αύξηση των γωνιών θ_x , θ_z και θ_y .
- Στις διεγέρσεις μικρής επιτάχυνσης (0.20g και 0.30g) οι γωνίες λικνισμού θ_z έχουν μεγαλύτερες τιμές από τις γωνίες θ_x .
- Στις διεγέρσεις όπου η εδαφική επιτάχυνση παίρνει μεγαλύτερες τιμές (0.40g και 0.50g) οι γωνίες λικνισμού θ_z έχουν ανάλογες τιμές με τις γωνίες θ_x . Δηλαδή, όσο η εδαφική επιτάχυνση γίνεται μεγαλύτερη, ο λικνισμός εκτός επιπέδου γίνεται εντονότερος.

4.2.4. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου

Στα Σχήματα 4.10 - 4.13, παρουσιάζονται διαγράμματα των σχετικών γωνιών λικνισμού μεταξύ των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για διάφορες συχνότητες διέγερσης και εδαφικές επιταχύνσεις ίσες με 0.20g, 0.30g, 0.40g, 0.50g αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.10, όταν η τιμή της επιτάχυνσης είναι 0.20g τότε για κάθε συχνότητα οι μέγιστες σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$, $d\theta_z$ αναπτύσσονται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3, ενώ οι ελάχιστες μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου. Σημειώνεται ότι οι τελευταίες γωνίες είναι τόσο μικρές, που μπορεί να θεωρηθεί ότι ο σπόνδυλος 3 και το κιονόκρανο λικνίζονται περί τους άξονες x και z σχεδόν με τον ίδιο τρόπο σε κάθε χρονική στιγμή.

Όταν η επιτάχυνση της διέγερσης είναι ίση με 0.30g (Σχήμα 4.11) τότε στις συχνότητες των 2Hz και 4Hz οι μέγιστες σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$, $d\theta_z$ παρουσιάζονται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3, σε αντίθεση με την συχνότητα των 6Hz όπου η μέγιστες σχετικές γωνίες $d\theta_x$, $d\theta_z$ εμφανίζονται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου.

Στην περίπτωση όπου η επιτάχυνση είναι ίση με 0.40g (Σχήμα 4.12), οι γωνίες $d\theta_x$, $d\theta_z$ λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου για συχνότητα 3Hz, ενώ για συχνότητα ίση με 6Hz η μέγιστη τιμή εντοπίζεται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3. Σημειώνεται ότι για τη συχνότητα των 4Hz η μεγαλύτερη γωνία $d\theta_x$ παρουσιάζεται μεταξύ σπονδύλου 3 και κιονόκρανου σε αντίθεση με την γωνία $d\theta_z$ που λαμβάνει μέγιστη τιμή μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3.

Για επιτάχυνση ίση με 0.50g (Σχήμα 4.13) και συχνότητες 3Hz και 4Hz, οι μέγιστες γωνίες $d\theta_x$, $d\theta_z$ σημειώνονται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου, ενώ στη συχνότητα των 6Hz η κρίσιμες σχετικές γωνίες λικνισμού αναπτύσσονται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3.

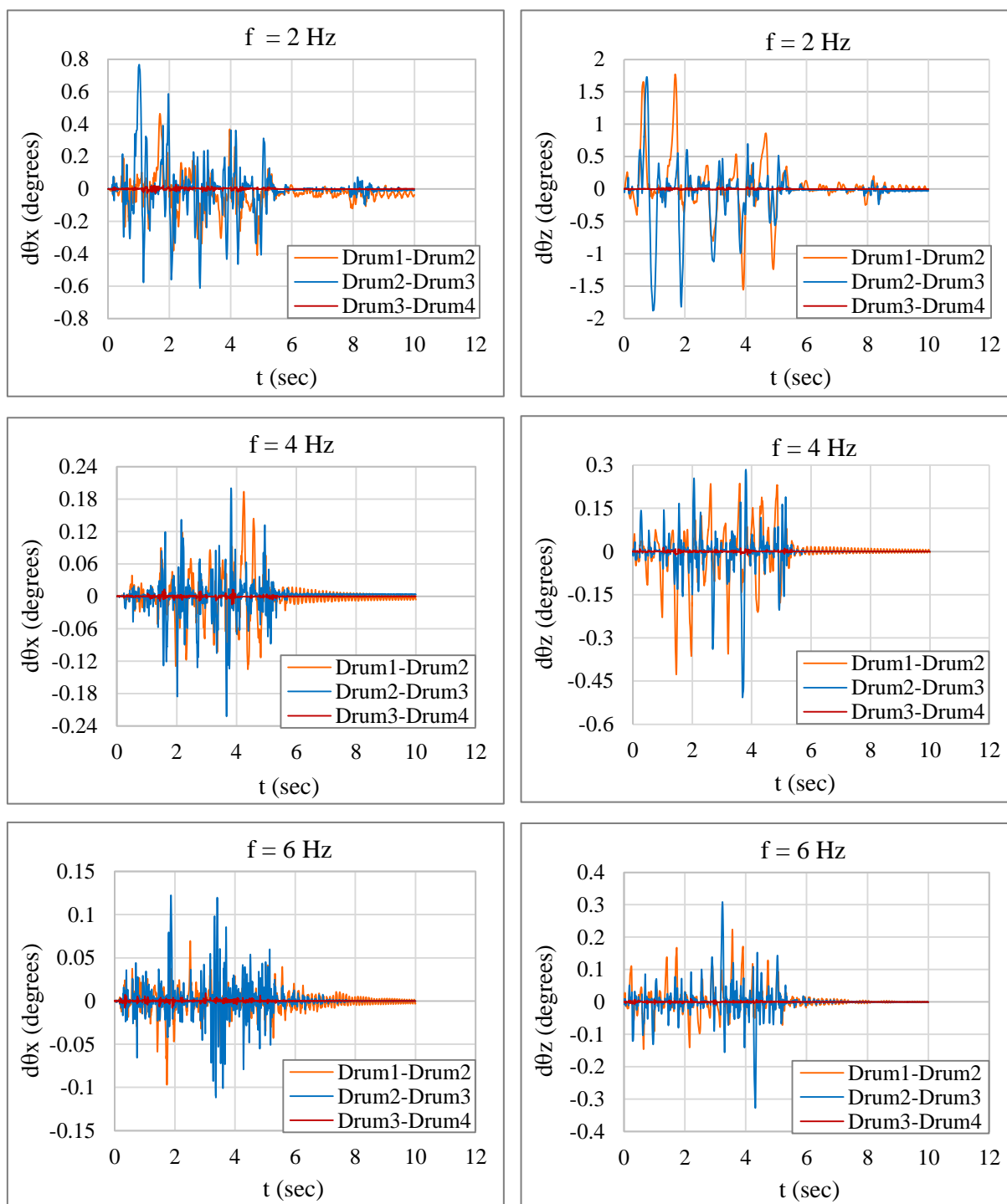
Επιπλέον από τα Σχήματα 4.10 – 4.13 παρατηρείται ότι για σταθερή εδαφική επιτάχυνση, όσο η συχνότητα της διέγερσης αυξάνεται τόσο οι σχετικές γωνίες λικνισμού μειώνονται.

Υπογραμμίζεται ότι για όλες τις συχνότητες των διεγέρσεων 0.20g, 0.30g, 0.40g και για την συχνότητα 2.50Hz της διέγερσης των 0.50g οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_z$ είναι κατά κανόνα μεγαλύτερες από τις γωνίες $d\theta_x$. Αντίθετα για επιτάχυνση ίση με 0.50g, οι συχνότητες 4Hz, 6Hz δίνουν γωνίες $d\theta_x$ μεγαλύτερες από τις $d\theta_z$.

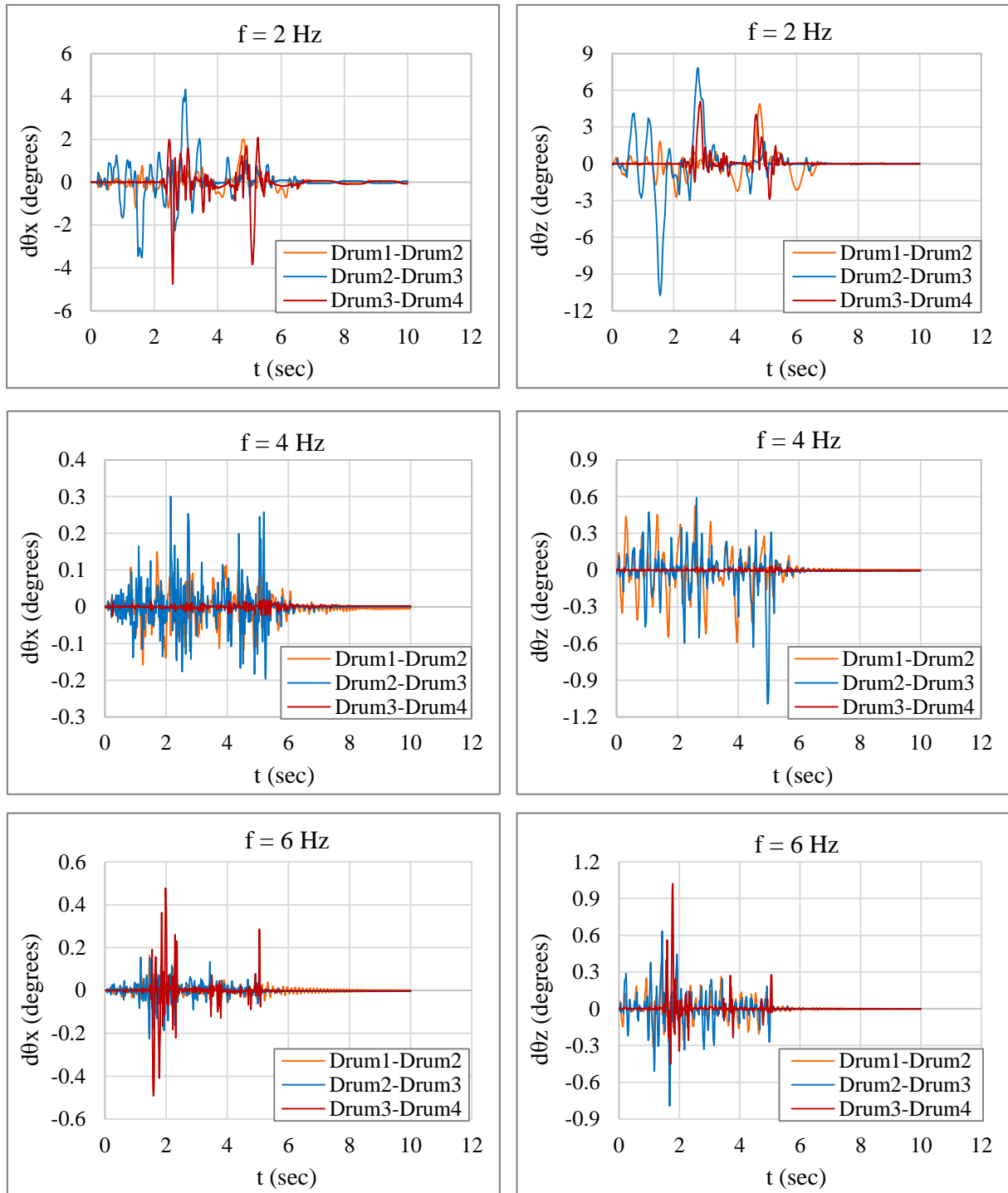
Συνοψίζοντας τις παραπάνω παρατηρήσεις, προκύπτει ότι:

- Διατηρώντας την επιτάχυνση της διέγερσης σταθερή και αυξάνοντας την συχνότητα, οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$, $d\theta_z$, μειώνονται. Ευαισθησία εντοπίζεται στις σχετικές γωνίες λικνισμού μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου, οι οποίες δύνανται να σημειώσουν αύξηση με την αύξηση της συχνότητας.
- Σε γενικό πλαίσιο οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_z$ περί τον άξονα z έχουν μεγαλύτερη τιμή από τις σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ περί τον άξονα x. Σε διεγέρσεις υψηλών επιταχύνσεων και συχνοτήτων, οι γωνίες $d\theta_x$ τείνουν να είναι μεγαλύτερες από τις γωνίες $d\theta_z$.
- Στις διεγέρσεις χαμηλών επιταχύνσεων, στις χαμηλές συχνότητες οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ και $d\theta_z$ των σπονδύλων είναι κρίσιμες μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3, ενώ στις υψηλές συχνότητες οι μέγιστες σχετικές γωνίες λικνισμού εμφανίζονται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου. Σημειώνεται ότι σε αρκετά χαμηλές επιταχύνσεις, οι σχετικές γωνίες λικνισμού μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου είναι αμελητέες.

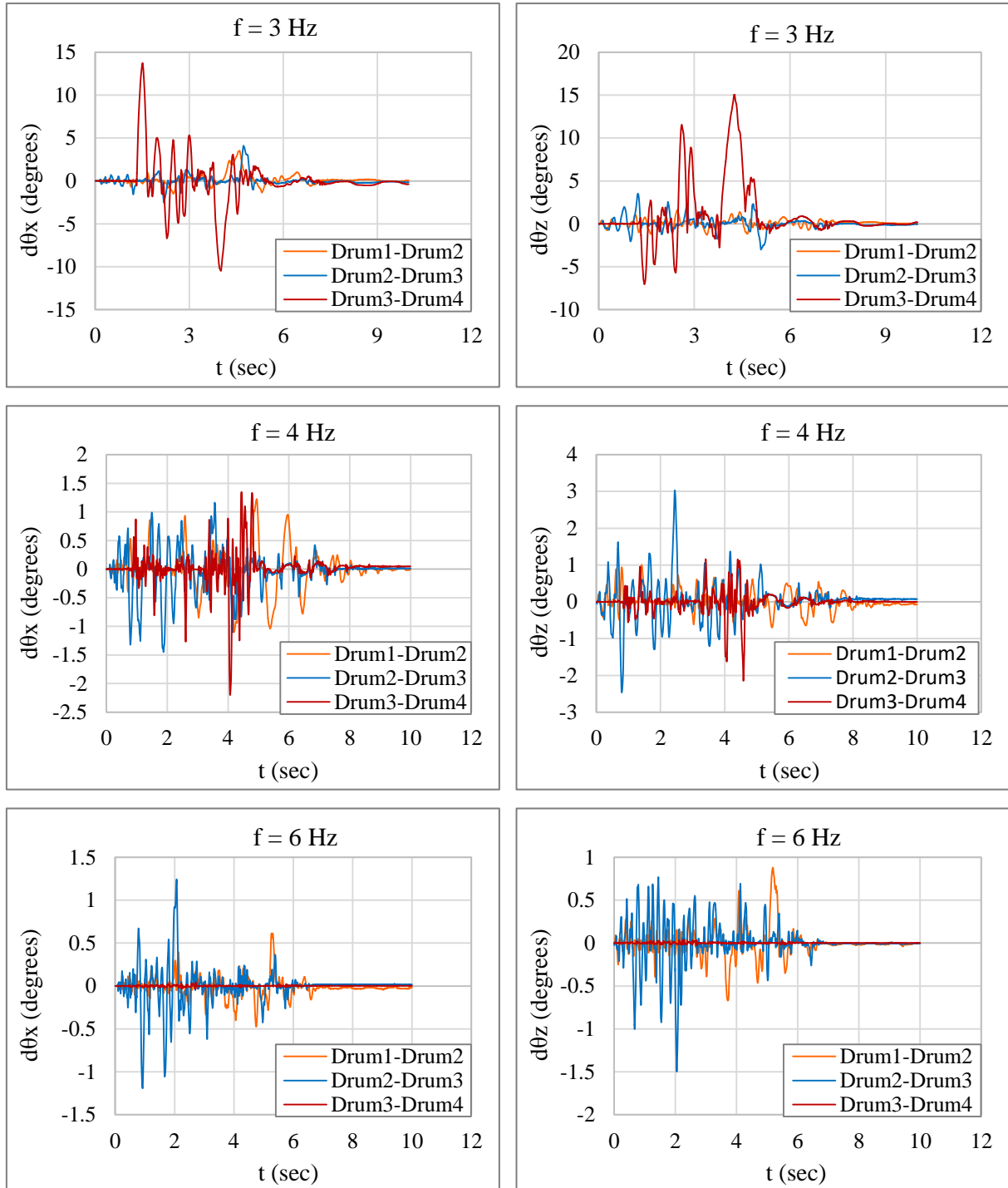
- Στις διεγέρσεις υψηλών επιταχύνσεων, στις περιπτώσεις χαμηλών συχνοτήτων οι μέγιστες σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$, $d\theta_z$ εμφανίζονται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου, ενώ στις υψηλότερες συχνότητες οι μέγιστες γωνίες $d\theta_x$, $d\theta_z$ σημειώνονται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3.



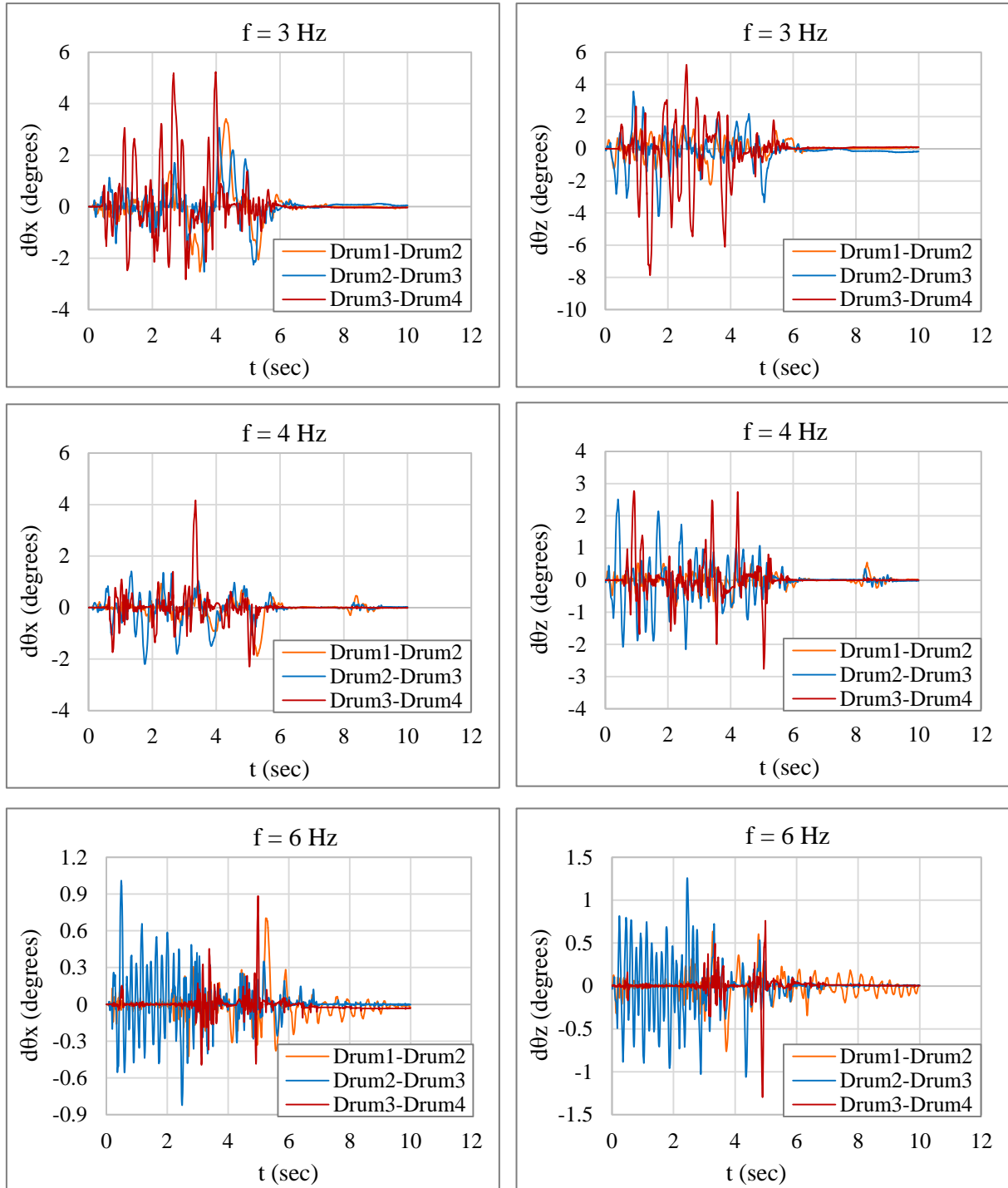
Σχήμα 4.10. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g.



Σχήμα 4.11. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g.



Σχήμα 4.12. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g.

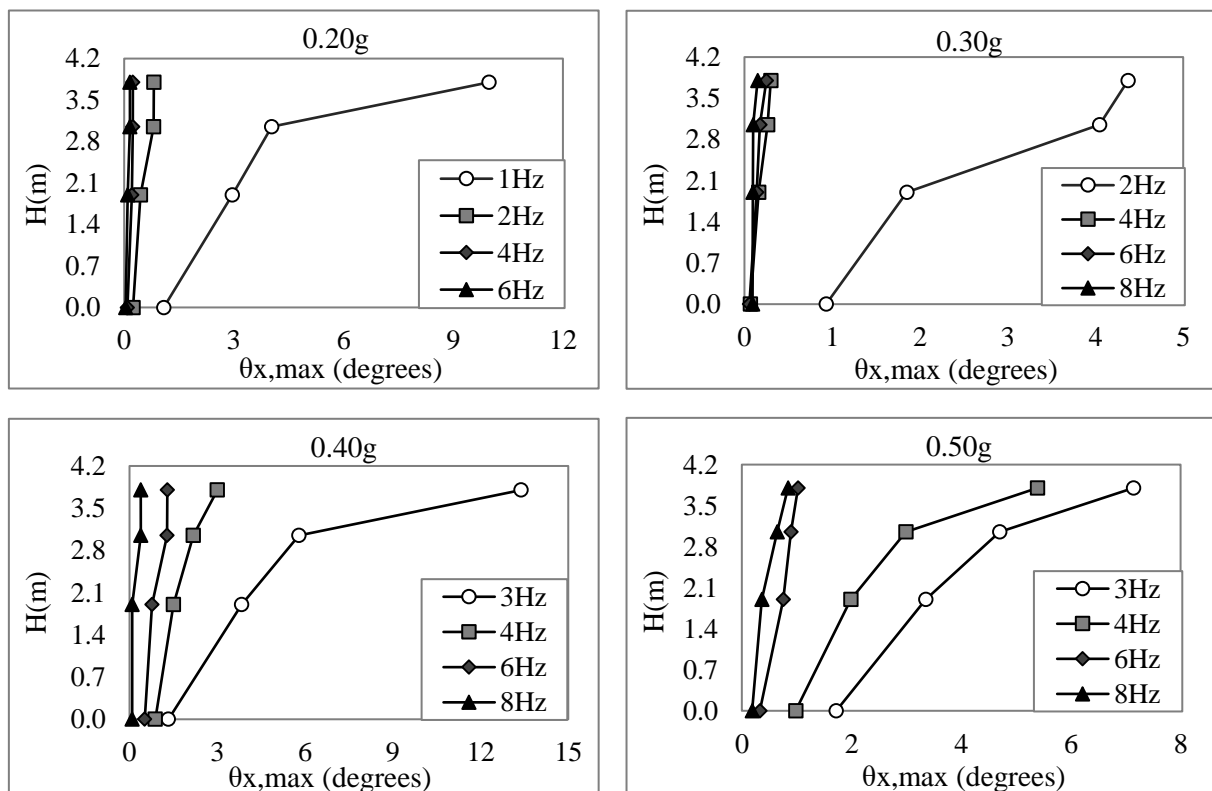


Σχήμα 4.13. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.50g$.

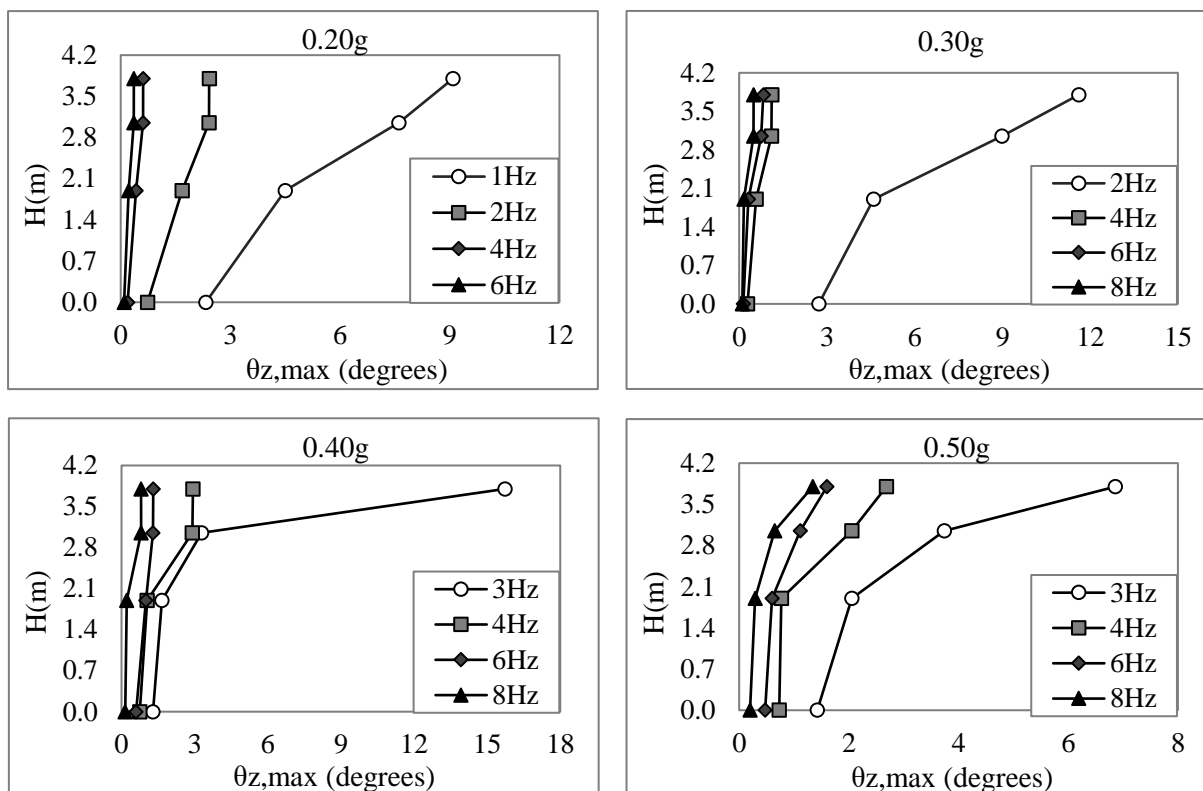
4.2.5. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού

Στα Σχήματα 4.14 και 4.15 παρουσιάζονται οι καθ' ύψος μέγιστες τιμές των γωνιών λικνισμού των σπονδύλων για διάφορες συχνότητες και επιταχύνσεις της εδαφικής διέγερσης, τέτοιες ώστε ο συνδυασμός τους να μην οδηγεί τον κίονα σε ανατροπή. Στα διαγράμματα αυτά, οι γωνίες μετρούνται στη βάση του κάθε σπονδύλου. Από τα παρακάτω σχήματα προκύπτει ότι:

- Σε κάθε περίπτωση οι μέγιστες γωνίες λικνισμού αναπτύσσονται στην βάση του κιονόκρανου.
- Για μια δεδομένη τιμή της επιτάχυνσης διέγερσης, αύξηση της συχνότητας συνεπάγεται μείωση των μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού των σπονδύλων. Η μείωση αυτή είναι απότομη όταν κινούμαστε σε χαμηλές τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης.
- Οι μέγιστες γωνίες λικνισμού παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές για τον σπόνδυλο 3 και το κιονόκρανο στις υψηλές συχνότητες διέγερσης, για όλες τις τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης που εξετάζονται.
- Διατηρώντας σταθερή την επιτάχυνση, η αύξηση της συχνότητας επιφέρει μικρότερη διαφορά στις τιμές των μέγιστων γωνιών λικνισμού μεταξύ των διαδοχικών σπονδύλων.



Σχήμα 4.14. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_x , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.



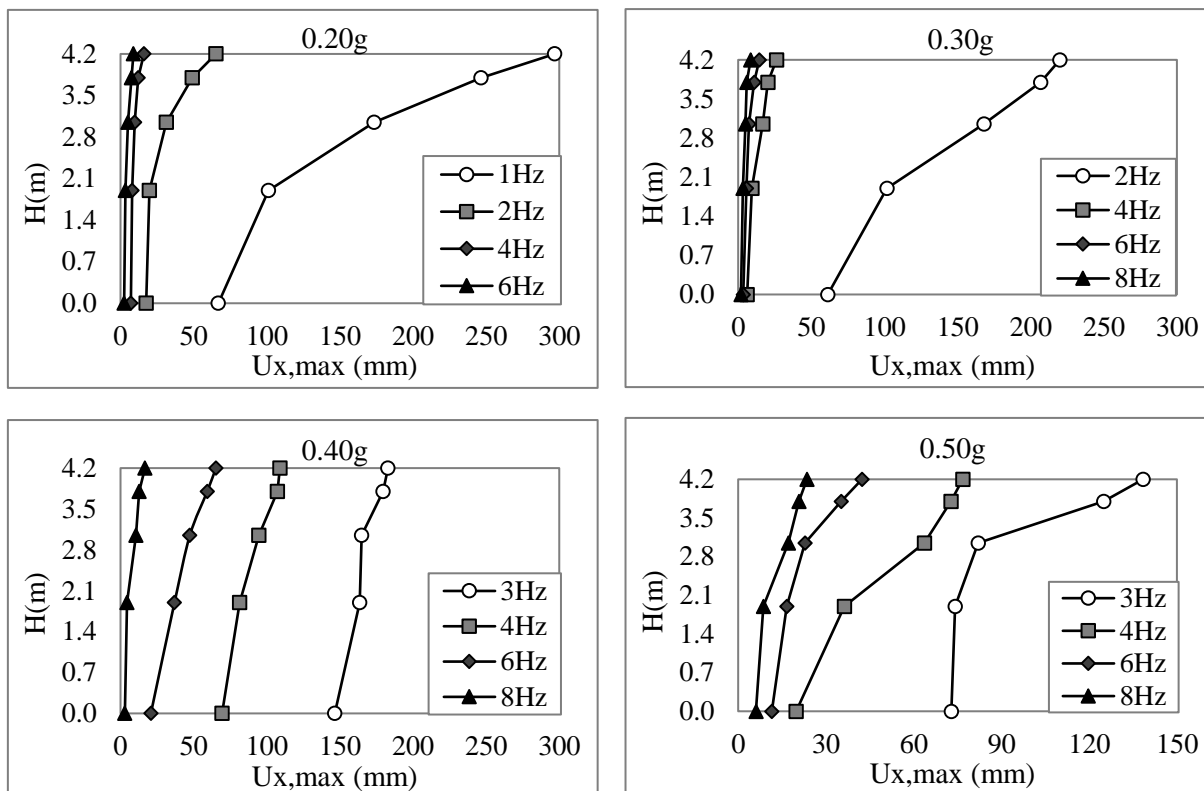
Σχήμα 4.15. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_z , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.

4.2.6. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων

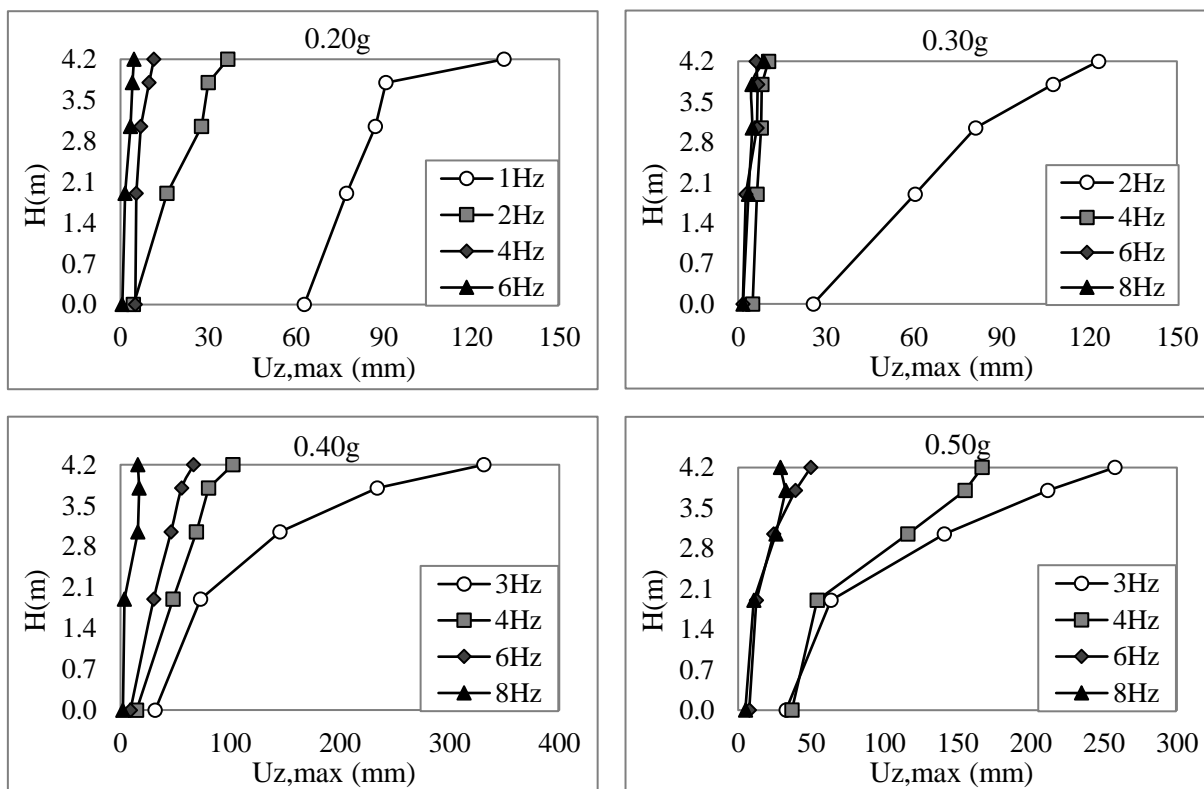
Στα Σχήματα 4.16 και 4.17, δίνονται τα διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x και U_z αντίστοιχα, για διάφορες συχνότητες και επιταχύνσεις ο συνδυασμός των οποίων δεν οδηγεί τον κίονα σε ανατροπή.

Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι:

- Σε κάθε περίπτωση, η μεγαλύτερη τιμή μέγιστης μετατόπισης εντοπίζεται στην στέψη του κιονόκρανου.
- Για μια δεδομένη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης προκαλεί μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων των σπονδύλων. Υπογραμμίζεται ότι η μείωση αυτή είναι έντονη στις χαμηλές συχνότητες.
- Διατηρώντας σταθερή την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης οδηγεί σε μικρότερη διαφορά των τιμών των μέγιστων μετατοπίσεων μεταξύ της βάσης του στύλου και της στέψης του κιονόκρανου.



Σχήμα 4.16. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.



Σχήμα 4.17. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών μετατοπίσεων των U_z , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.

4.3. Σπονδυλωτός κίονας με γόμφους

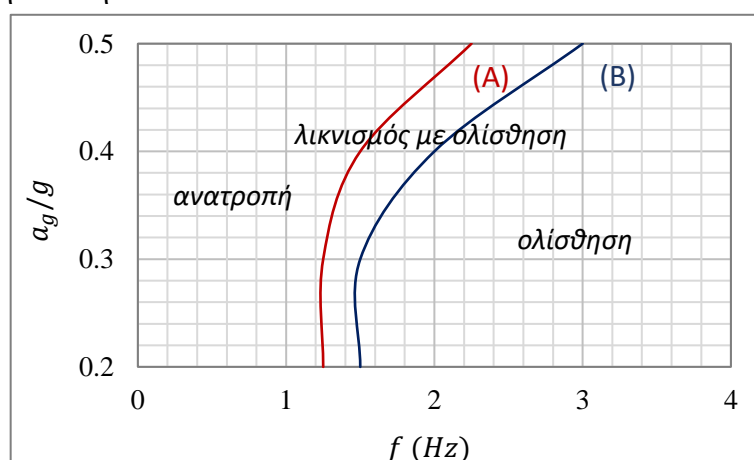
4.3.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης – συχνότητας διέγερσης

Στον Πίνακα 4.2 περιγράφεται η δυναμική απόκριση του κίονα για όλες τις εδαφικές διεγέρσεις που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, για κάθε τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης δίνονται οι τιμές των συχνοτήτων διέγερσης για τις οποίες οι σπόνδυλοι ανατρέπονται, καθώς επίσης και οι συχνότητες στις οποίες κυρίαρχο φαινόμενο της δυναμικής απόκρισης του κίονα είναι τόσο η ολίσθηση (μικρές γωνίες λικνισμού) όσο και η ολίσθηση με λικνισμό (σημαντικές γωνίες λικνισμού).

		Συχνότητα Διέγερσης f (Hz)		
		Ανατροπή	Ολίσθηση με Λικνισμό	Ολίσθηση
Εδαφική Επιτάχυνση a_g (m/s^2)	0.20g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 1.25Hz	1.50Hz	2Hz, 4Hz, 6Hz, 8Hz
	0.30g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 1.25Hz	1.50Hz	2Hz, 4Hz, 6Hz, 8Hz
	0.40g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 1.50 Hz	2Hz	2.50Hz, 3Hz, 4Hz 6Hz, 8Hz
	0.50g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 2Hz, 2.25Hz	2.50H, 3Hz	4Hz, 6Hz, 8Hz

Πίνακας 4.2. Περιγραφή της δυναμικής απόκρισης του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για αρμονικές διεγέρσεις που επιβάλλονται παράλληλα στον άξονα των γόμφων.

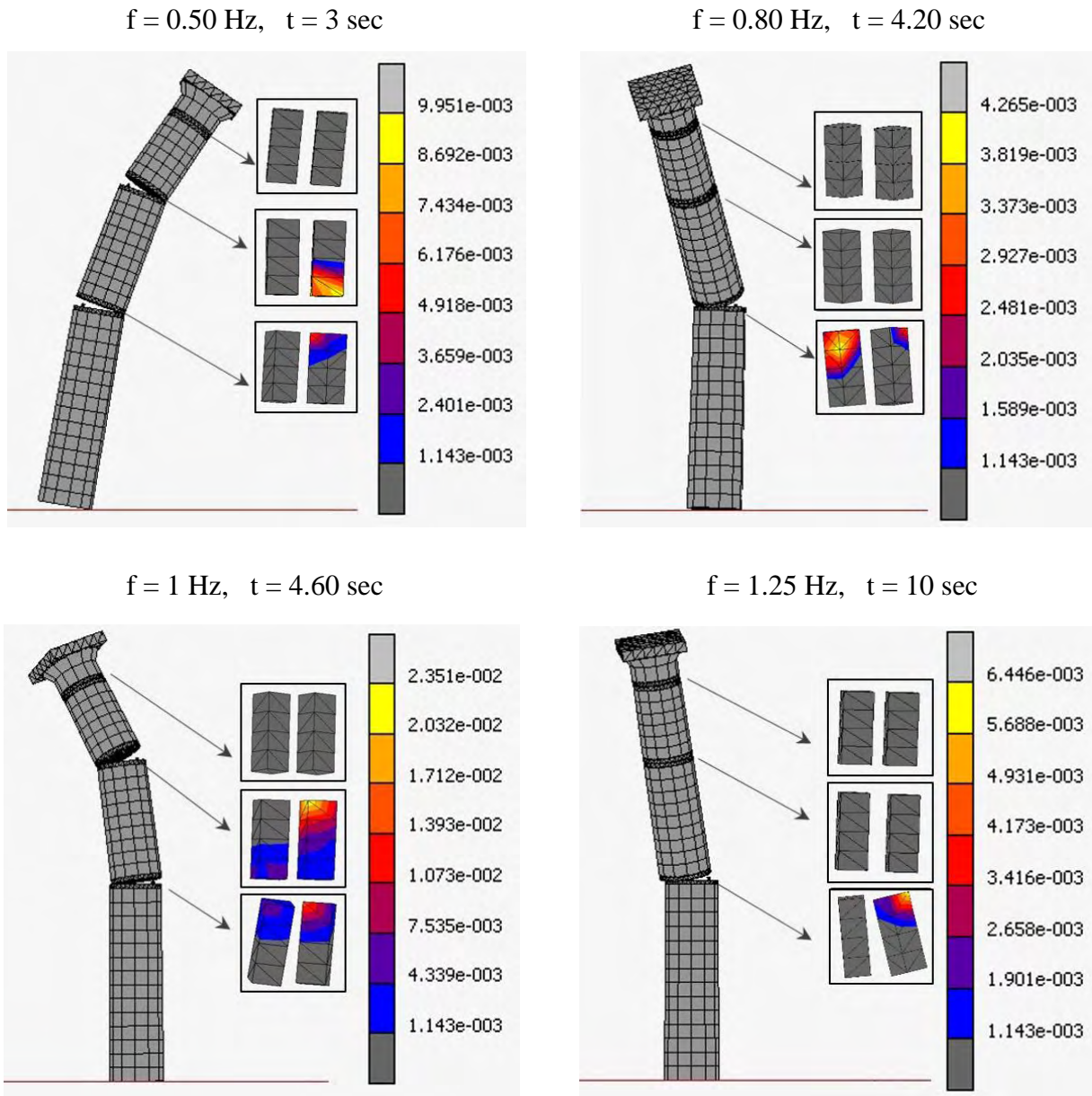
Από τον Πίνακα 4.2 προκύπτει το διάγραμμα της εδαφικής επιτάχυνσης σε συνάρτηση με την συχνότητα διέγερσης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18. Για το σχήμα αυτό, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2.1.



Σχήμα 4.18. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f , για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους, όταν η εδαφική διέγερση επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων.

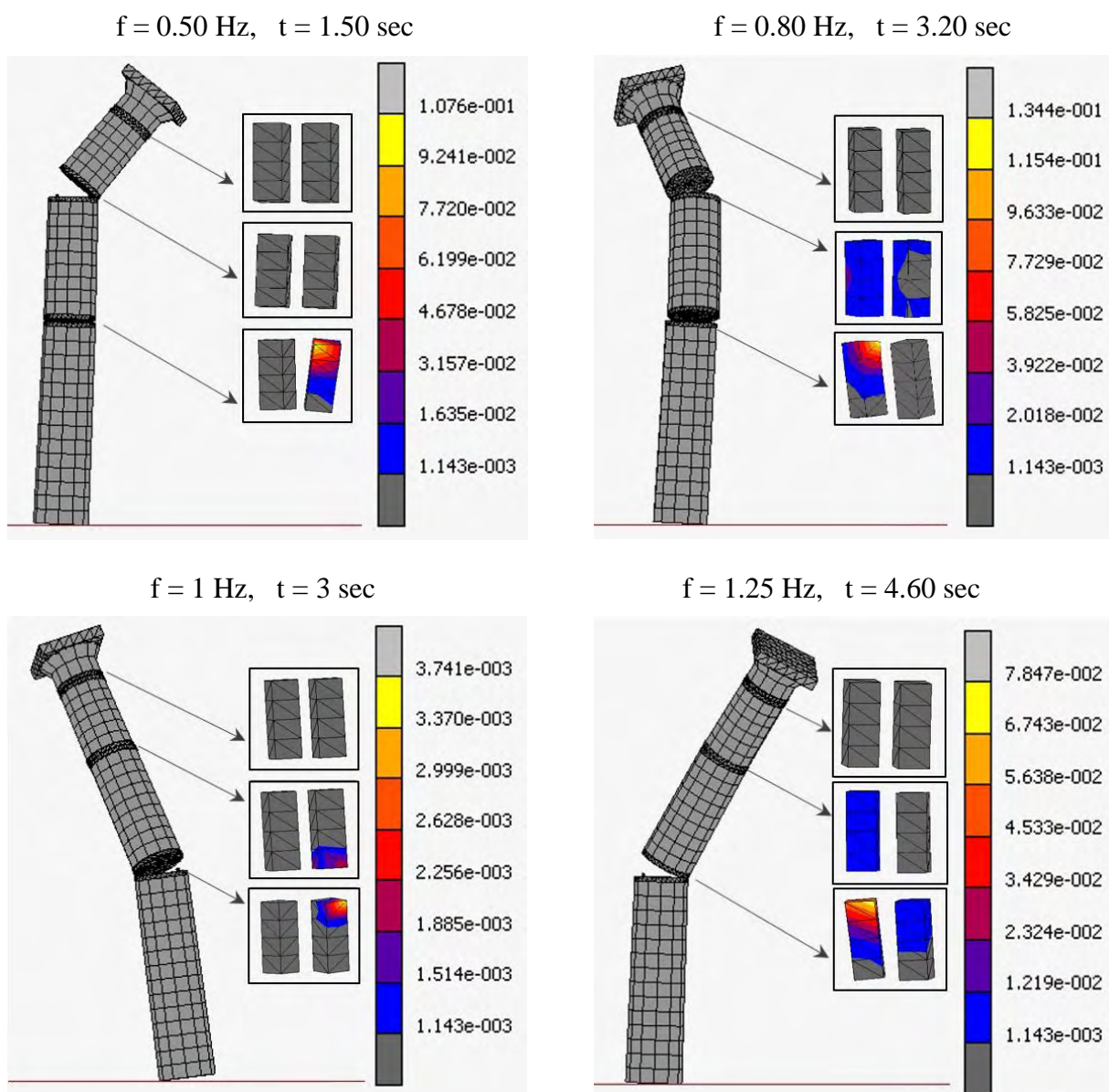
4.3.2. Στιγμιότυπα κατάρρευσης

Στα Σχήματα 4.19 – 4.22 που ακολουθούν, παρουσιάζονται στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους (επίπεδο x-y), για επιτάχυνση διέγερσης ίση με 0.20g, 0.30g, 0.40g και 0.50g αντίστοιχα.



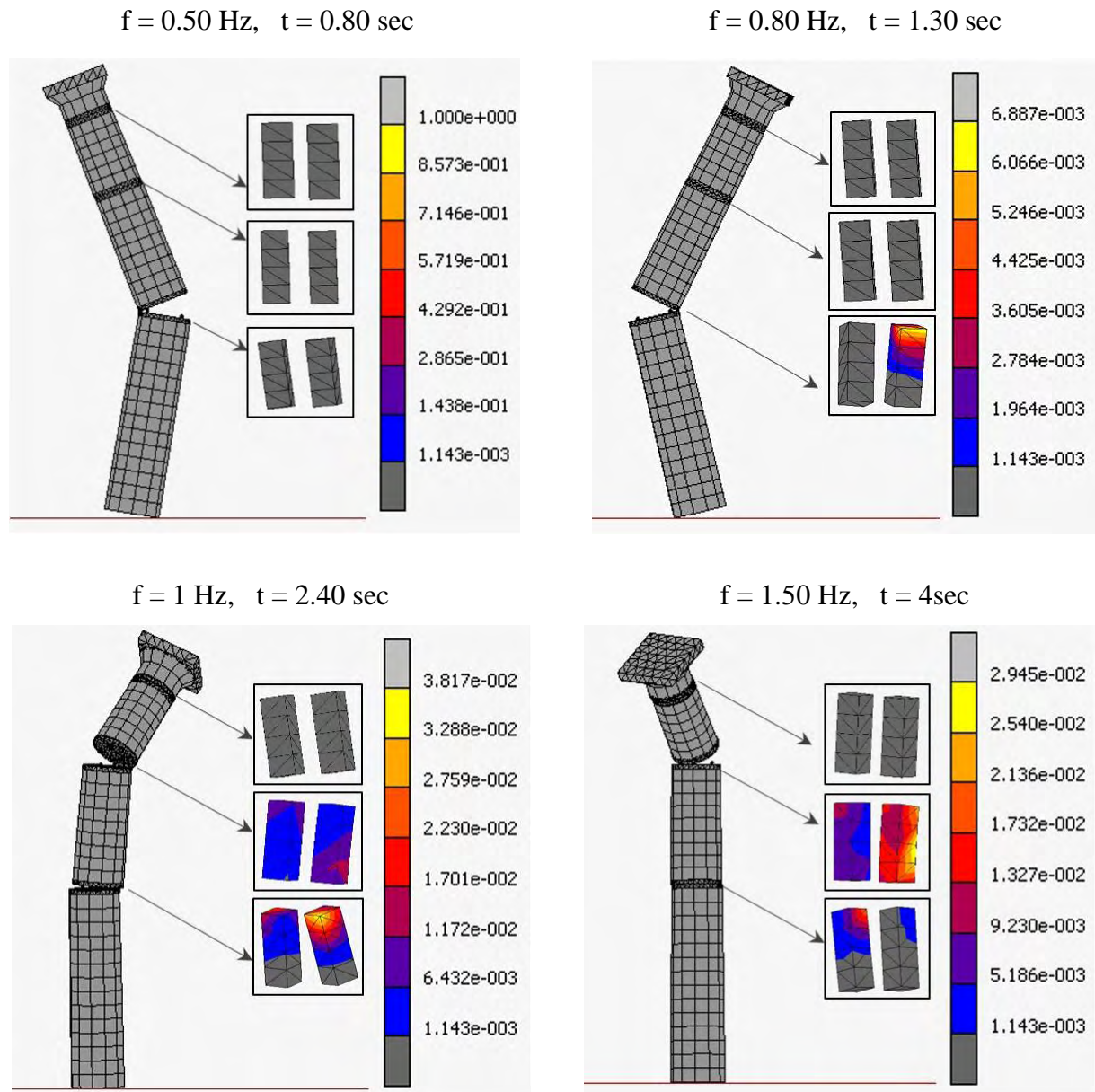
Σχήμα 4.19. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.19, το οποίο αναφέρεται σε επιτάχυνση διέγερσης ίση με 0.20g, ο κίονας καταρρέει όταν οι συχνότητες διέγερσης είναι μικρότερες ή ίσες από 1.25Hz. Στην περίπτωση της συχνότητας των 0.50Hz, η κατάρρευση οφείλεται σε έντονο λικνισμό εντός επιπέδου (στροφή περί τον άξονα z), χωρίς την ανάπτυξη σημαντικών γωνιών λικνισμού περί τον άξονα x (λικνισμός εκτός επιπέδου) και την εμφάνιση ολισθήσεων. Αντίθετα, στις εδαφικές συχνότητες των 0.80Hz, 1Hz και 1.25Hz η ανατροπή των σπονδύλων του κίονα οφείλεται τόσο σε εντός, όσο και εκτός επιπέδου λικνισμό, ενώ παράλληλα λαμβάνουν χώρα φαινόμενα ολίσθησης μεταξύ των σπονδύλων.

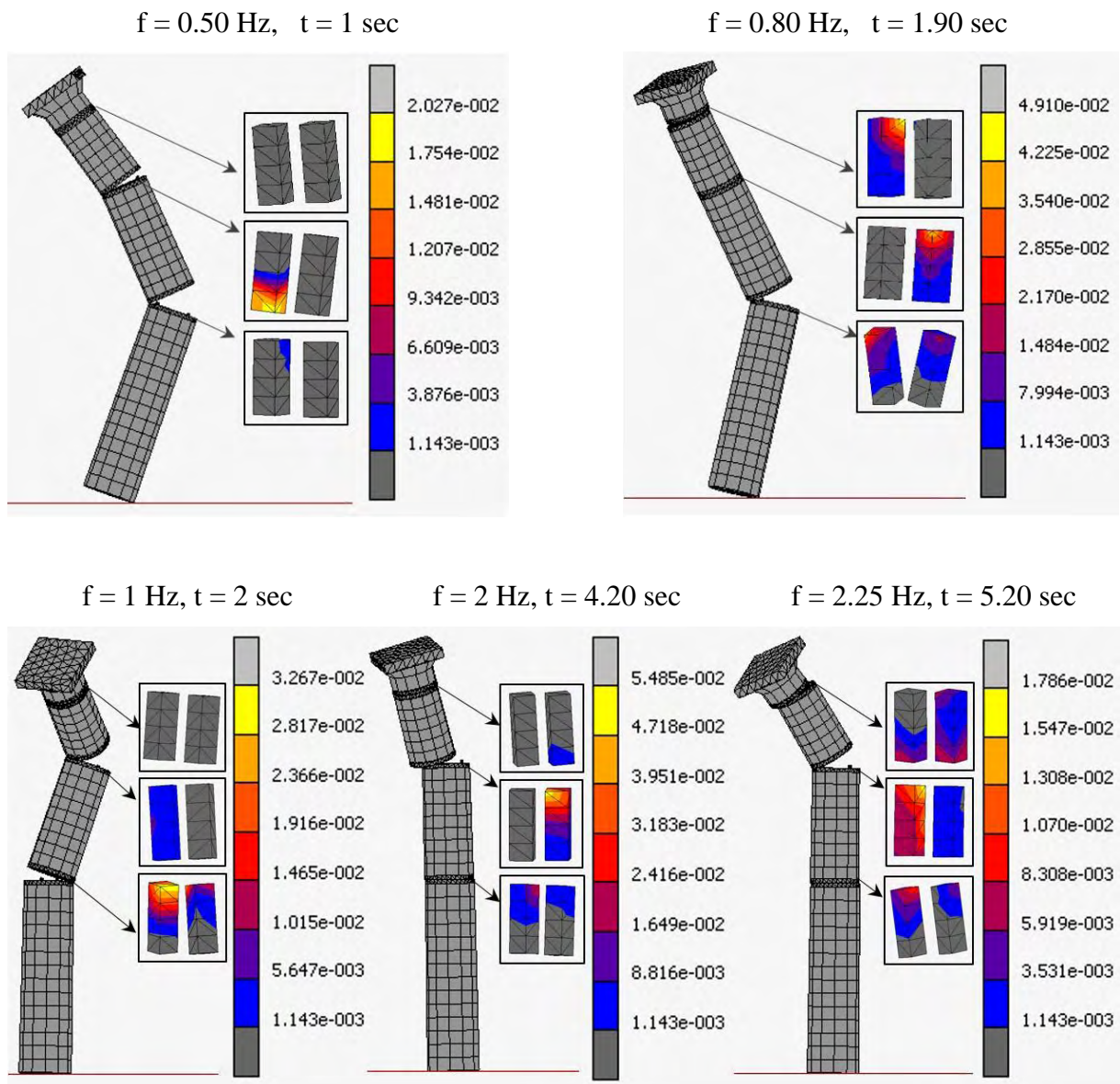


Σχήμα 4.20. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g. (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).

Όταν η επιτάχυνση της διέγερσης είναι ίση με 0.30g (Σχήμα 4.20), ο κίονας ανατρέπεται και σε αυτήν την περίπτωση για συχνότητες διέγερσης μικρότερες ή ίσες από την τιμή των 1.25Hz. Συγκεκριμένα όταν η εδαφική συχνότητα είναι ίση με 0.50Hz, ο κίονας ανατρέπεται επειδή το κιονόκρανο και ο σπόνδυλος 3 αναπτύσσουν έντονες γωνίες λικνισμού περί τον άξονα z, ενώ για τις συχνότητες των 0.80Hz, 1Hz και 1.25Hz η κατάρρευση είναι αποτέλεσμα της συμβολής λικνισμού εντός και εκτός επιπέδου, με ταυτόχρονη ανάπτυξη ολισθήσεων.



Σχήμα 4.21. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 4.22. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).

Για επιτάχυνση της διέγερσης ίση με 0.40g (Σχήμα 4.21), ο κίονας καταρρέει λόγω ανάπτυξης μεγάλων γωνιών λικνισμού θ_z (λικνισμός εντός επιπέδου) για συχνότητες διέγερσης μικρότερες ή ίσες από 0.80Hz. Στις περιπτώσεις αυτές, οι σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων είναι αμελητέες. Όταν η εδαφική συχνότητα γίνεται ίση με 1Hz και 1.50Hz, ο κίονας οδηγείται σε απώλεια στατικής ισορροπίας λόγω λικνισμού τόσο εντός όσο και εκτός επιπέδου.

Σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις αυτών των συχνοτήτων λαμβάνουν χώρα και φαινόμενα ολίσθησης μεταξύ των σπονδύλων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.22, το οποίο αναφέρεται σε επιτάχυνση διέγερσης ίση με 0.50g, προκύπτει ότι όταν η εδαφική συχνότητα είναι ίση με 0.50Hz η ανατροπή του κίονα οφείλεται σε έντονο λικνισμό εντός επιπέδου, ενώ για τις συχνότητες των 0.8Hz, 1Hz, 2Hz, 2.25Hz η ανατροπή των σπονδύλων του κίονα είναι αποτέλεσμα ταυτόχρονης ανάπτυξης φαινομένων εντός και εκτός του επιπέδου της διέγερσης (στροφές και ολισθήσεις).

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν (Σχήματα 4.19 – 4.22), γίνεται φανερό ότι οι γόμφοι που συνδέουν το κιονόκρανο με τον σπόνδυλο 3, δεν αναπτύσσουν σημαντικές παραμορφώσεις για όλες τις συχνότητες που μελετήθηκαν όταν η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης είναι μικρότερη ή ίση από 0.40g, καθώς επίσης και για μικρές συχνότητες όταν η εδαφική επιτάχυνση είναι ίση με 0.50g. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτές τις περιπτώσεις το κιονόκρανο και ο σπόνδυλος 3 έχουν ενιαία συμπεριφορά σε κάθε χρονική στιγμή. Υπογραμμίζεται ότι, η εμφάνιση πλαστικών παραμορφώσεων στους γόμφους του σπονδυλωτού κίονα, οφείλεται στους εξής λόγους:

- Κατά την κατάρρευσή τους, οι σπόνδυλοι συμπαρασύρουν τους γόμφους που τους συνδέουν με τον υποκείμενο σπόνδυλο, με αποτέλεσμα αυτοί να αναπτύσσουν έντονες παραμορφώσεις.
- Οι πιθανές ολισθήσεις που λαμβάνουν χώρα στη διεπιφάνειά των σπονδύλων, καταπονούν σημαντικά τους γόμφους που τους συνδέουν.
- Οι γόμφοι αναπτύσσουν πλαστικές παραμορφώσεις και λόγω της στρεπτικής καταπόνησης που τους προκαλεί η σχετική στροφή των σπονδύλων περί τον κατακόρυφο άξονα y .
- Κατά την εξέλιξη του φαινομένου του λικνισμού ενδέχεται κάποιος γόμφος να μην μπορεί να εισχωρήσει στην άνω εντορμία του, λόγω σχετικών ολισθήσεων των σπονδύλων με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων λόγω του βάρους του υπερκείμενου σπονδύλου.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Για κάθε εδαφική επιτάχυνση, η κατάρρευση του κίονα σε χαμηλές συχνότητες είναι αποτέλεσμα έντονου λικνισμού εντός επιπέδου, χωρίς να εμφανίζονται σημαντικές σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων.

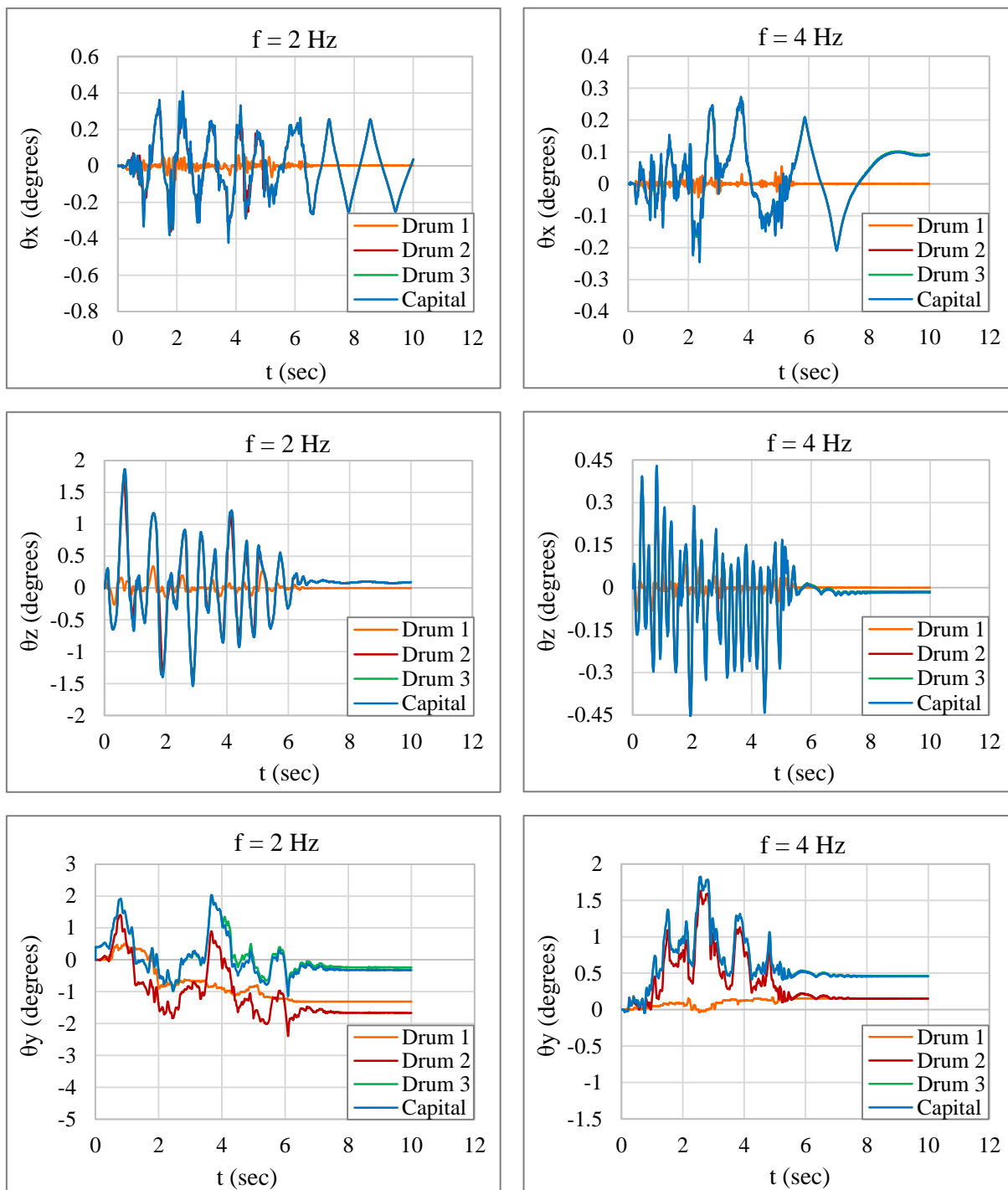
- Για κάθε εδαφική επιτάχυνση, όσο η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται, συμβάλλουν στην κατάρρευση και φαινόμενα εκτός επιπέδου.
- Σε κάθε περίπτωση, ο εκτός επιπέδου λικνισμός συνοδεύεται από φαινόμενα ολίσθησης μεταξύ των σπονδύλων.
- Για μια δεδομένη συχνότητα διέγερσης, όσο αυξάνεται η τιμή της επιτάχυνση της διέγερσης, η δυναμική απόκριση του κίονα μέχρι την κατάρρευση έχει μικρότερη διάρκεια. Αντίθετα, για μια δεδομένη επιτάχυνση διέγερσης, όσο αυξάνεται η τιμή της συχνότητας διέγερσης, η δυναμική απόκριση του κίονα μέχρι την κατάρρευση έχει μεγαλύτερη διάρκεια.
- Αποκόλληση του κιονόκρανου από τον σπόνδυλο 3, σημειώνεται μόνο σε εδαφικές επιταχύνσεις μεγάλης τιμής.
- Όταν η κατάρρευση του σπονδυλωτού κίονα πραγματοποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα από την έναρξη της λικνιστικής απόκρισης, οι γόμφοι δεν αναπτύσσουν σημαντικές παραμορφώσεις.
- Όσο η εδαφική επιτάχυνση αυξάνεται, η καταπόνηση των γόμφων του σπονδυλωτού κίονα γίνεται πιο έντονη.
- Οι γόμφοι που συνδέουν τον σπόνδυλο 3 με το κιονόκρανο, διαρρέουν και αναπτύσσουν πλαστικές παραμορφώσεις μόνο στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις.
- Η ύπαρξη των γόμφων βελτιώνει την ευστάθεια του σπονδυλωτού κίονα, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις μεγάλων τιμών της εδαφικής επιτάχυνσης όπου η ανατροπή επέρχεται για μικρότερες τιμές της συχνότητας σε σχέση με την περίπτωση του κίονα χωρίς γόμφους. Παράλληλα, σε αυτές τις περιπτώσεις συρρικνώνεται η περιοχή των συχνοτήτων στις οποίες έχουμε ταυτόχρονα φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης. Τέλος, οι ολισθήσεις των σπονδύλων είναι μικρές λόγω της παρουσίας των γόμφων.
- Καθώς η εδαφική επιτάχυνση γίνεται μεγαλύτερη, το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες επέρχεται κατάρρευση διευρύνεται. Έτσι για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g, κατάρρευση επέρχεται για συχνότητα διέγερσης μικρότερη από την τιμή των 1.25Hz, ενώ για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g έχουμε κατάρρευση του σπονδυλωτού κίονα για συχνότητα διέγερσης μικρότερη από την τιμή των 2.25Hz.

4.3.3. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου

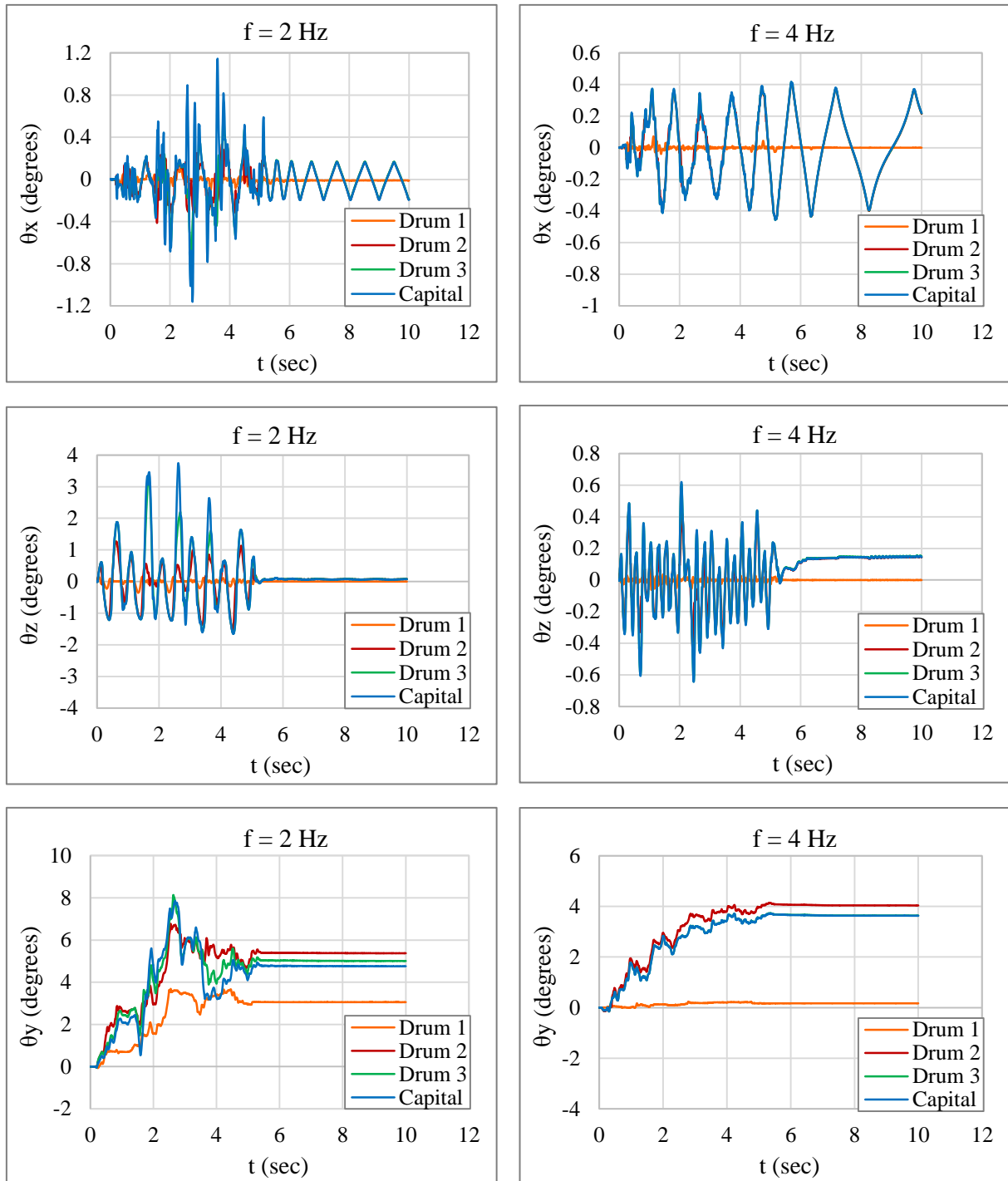
Στα Σχήματα 4.23 – 4.26, δίνονται τα διαγράμματα ολικών γωνιών στροφής περί τους άξονες x, y και z σε συνάρτηση με το χρόνο, για διάφορες συχνότητες διέγερσης και εδαφικές επιταχύνσεις ίσες με 0.20g, 0.30g, 0.40g και 0.50g αντίστοιχα.

Από την μελέτη των σχημάτων εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

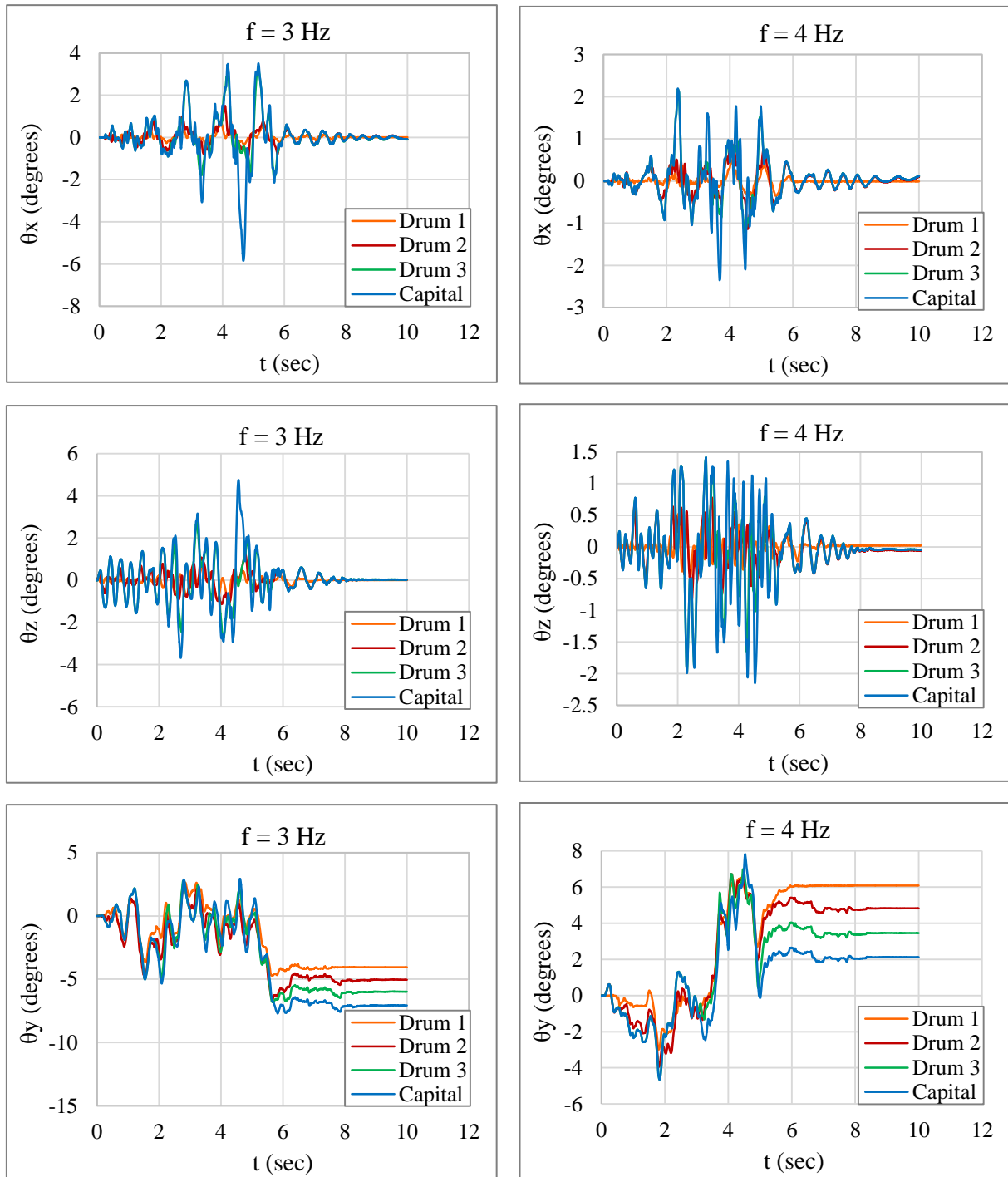
- Για την ίδια συχνότητα διέγερσης, η αύξηση στη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης επιφέρει αύξηση των γωνιών στροφής θ_x , θ_y και θ_z των σπονδύλων του κίονα. Σημειώνεται ότι η αύξηση των γωνιών θ_x είναι εντονότερη στις διεγέρσεις όπου η εδαφική επιτάχυνση παίρνει μεγαλύτερες τιμές (0.40g και 0.50g), σε σχέση με τις διεγέρσεις όπου η εδαφική επιτάχυνση παίρνει μικρότερες τιμές (0.20g και 0.30g).
- Για την ίδια εδαφική επιτάχυνση, η αύξηση στη τιμή της συχνότητας διέγερσης προκαλεί μείωση των γωνιών στροφής θ_x , θ_y και θ_z για όλους τους σπονδύλους του κίονα. Παρατηρείται ότι στις εδαφικές συχνότητες μικρότερης τιμής (0.20g και 0.30g), η μείωση των γωνιών στροφής περί τους άξονες x, y και z είναι μεγαλύτερη από ότι στις εδαφικές συχνότητες με μεγαλύτερη τιμή (0.40g και 0.50g).
- Στις περιπτώσεις χαμηλότερων τιμών της επιτάχυνσης διέγερσης (0.20g και 0.30g), οι γωνίες λικνισμού θ_z είναι εμφανώς μεγαλύτερες σε σχέση με τις γωνίες λικνισμού θ_x . Αντίθετα, όταν η επιτάχυνση της διέγερσης παίρνει μεγαλύτερες τιμές (0.40g και 0.50g), οι τιμές των γωνιών θ_x είναι ανάλογες των τιμών των γωνιών θ_z . Επομένως, όσο η εδαφική επιτάχυνση γίνεται μεγαλύτερη, ο λικνισμός εκτός επιπέδου γίνεται εντονότερος.
- Όταν η εδαφική επιτάχυνση είναι ίση με 0.20g και 0.30g, τότε η γωνία του σπονδύλου 1 περί τον κατακόρυφο άξονα y είναι εμφανώς μικρότερη από τις αντίστοιχες γωνίες στροφής των υπόλοιπων σπονδύλων. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο όταν η επιτάχυνση διέγερσης παίρνει μεγαλύτερες τιμές. Στην περίπτωση αυτή όλοι οι σπόνδυλοι του κίονα στρέφονται με τον ίδιο τρόπο. Τονίζεται ότι για επιτάχυνση διέγερσης ίση με 0.50g, όλοι οι σπόνδυλοι του κίονα διαγράφουν σχεδόν ίσες γωνίες θ_y , σε κάθε χρονική στιγμή, τόσο για διεγείρουσα συχνότητα ίση με 3Hz όσο και διεγείρουσα συχνότητα ίση με 4Hz.



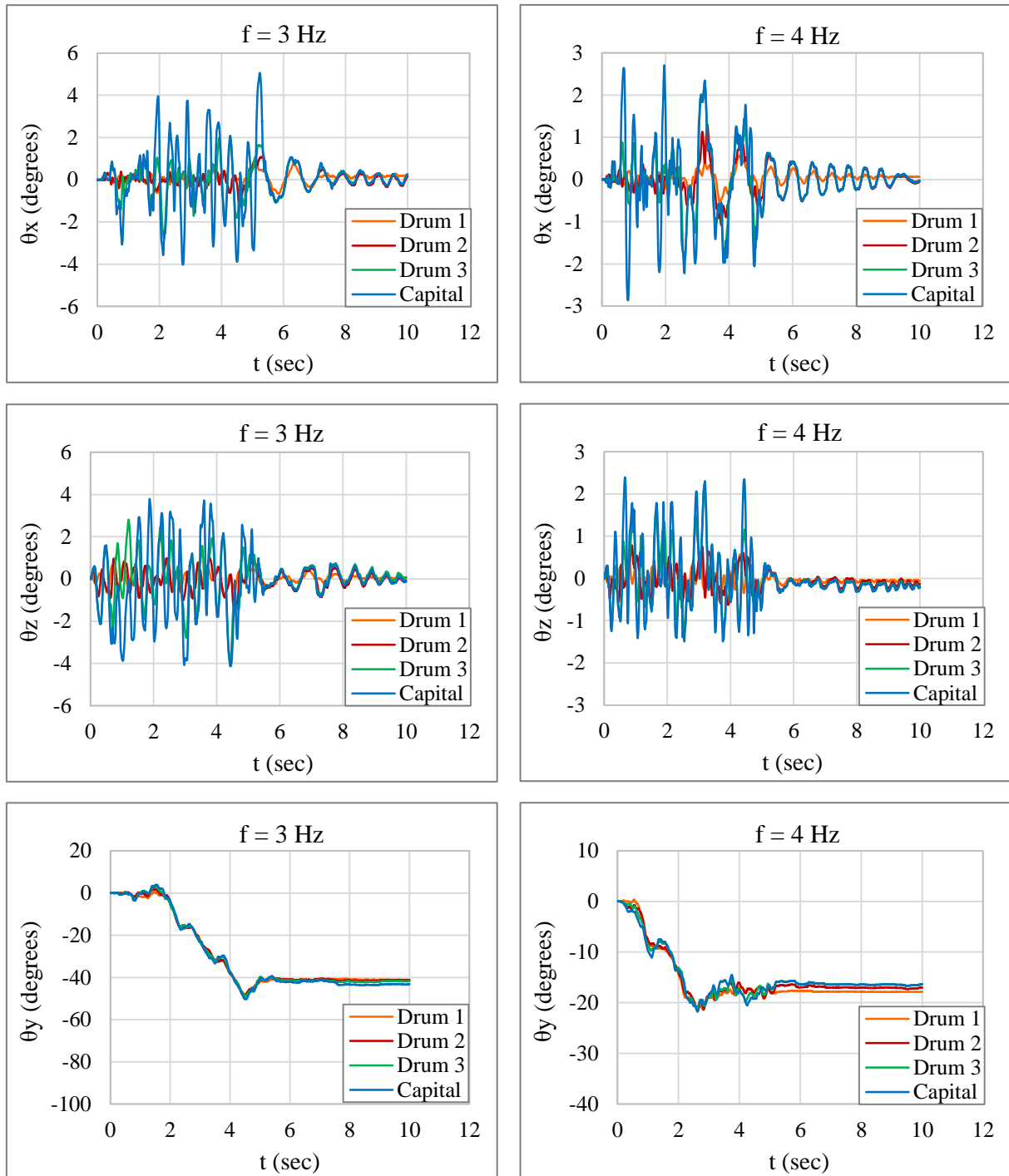
Σχήμα 4.23. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 4.24. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.30g$ (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).



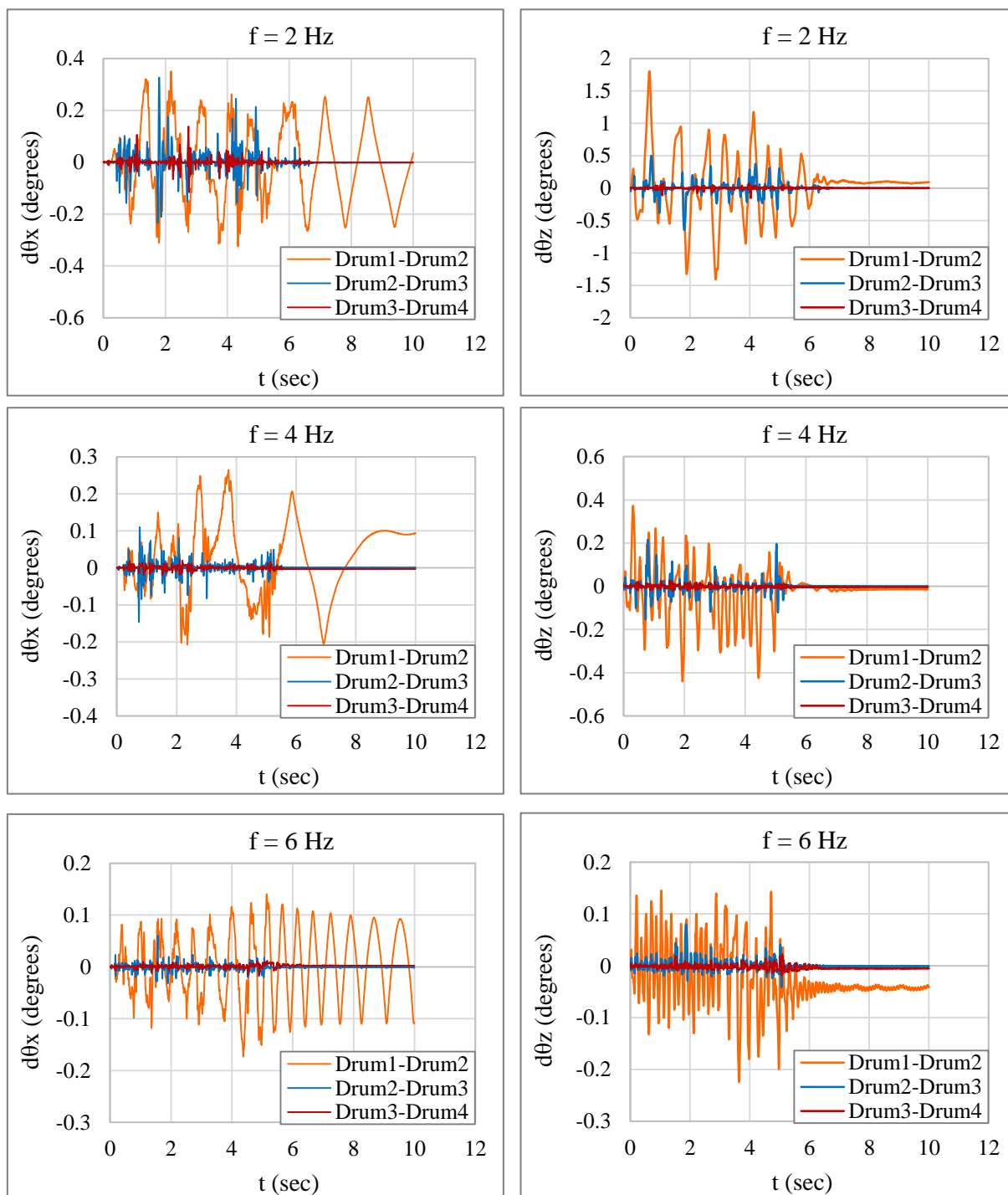
Σχήμα 4.25. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).



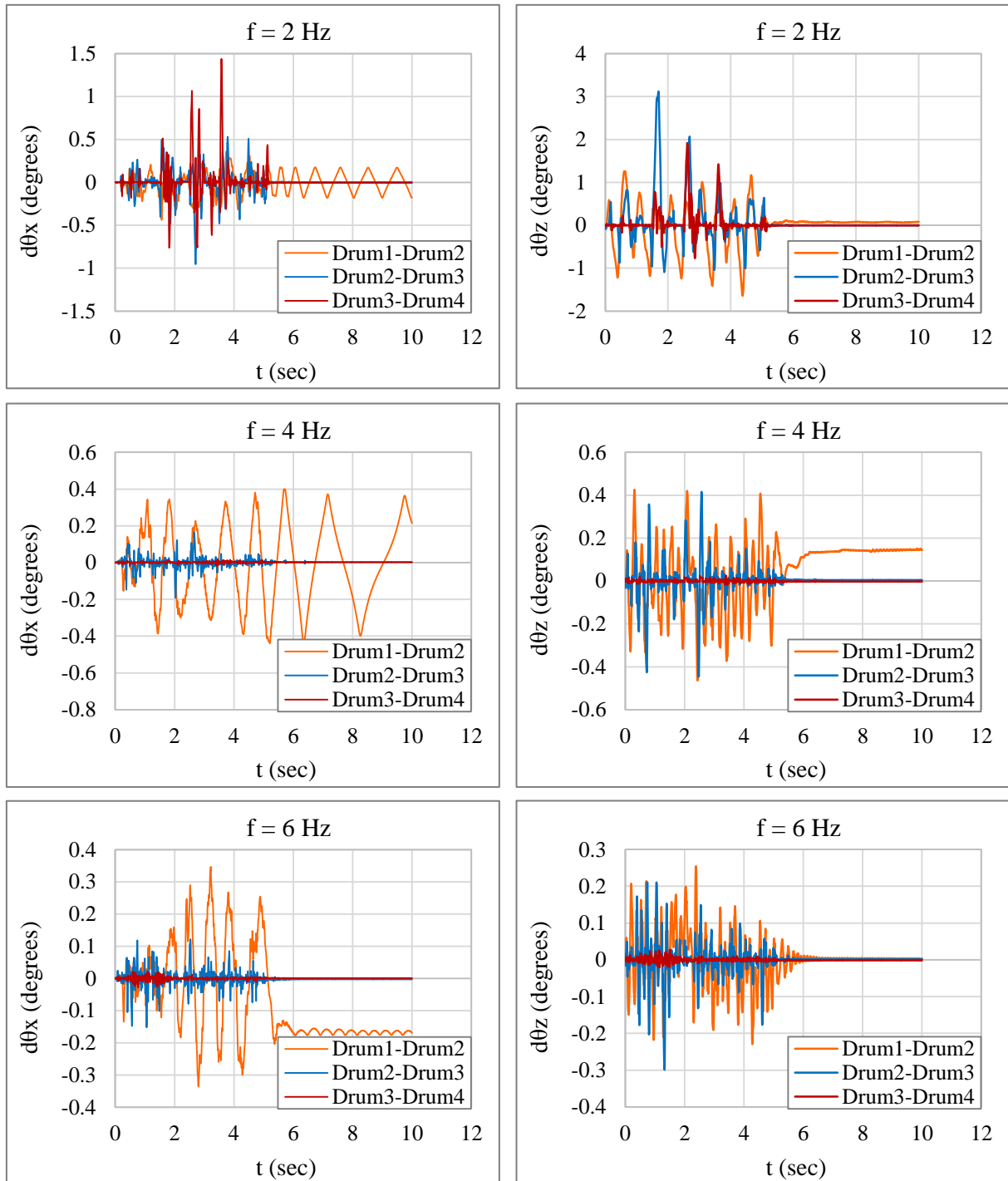
Σχήμα 4.26. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.50g$ (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).

4.3.4. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου

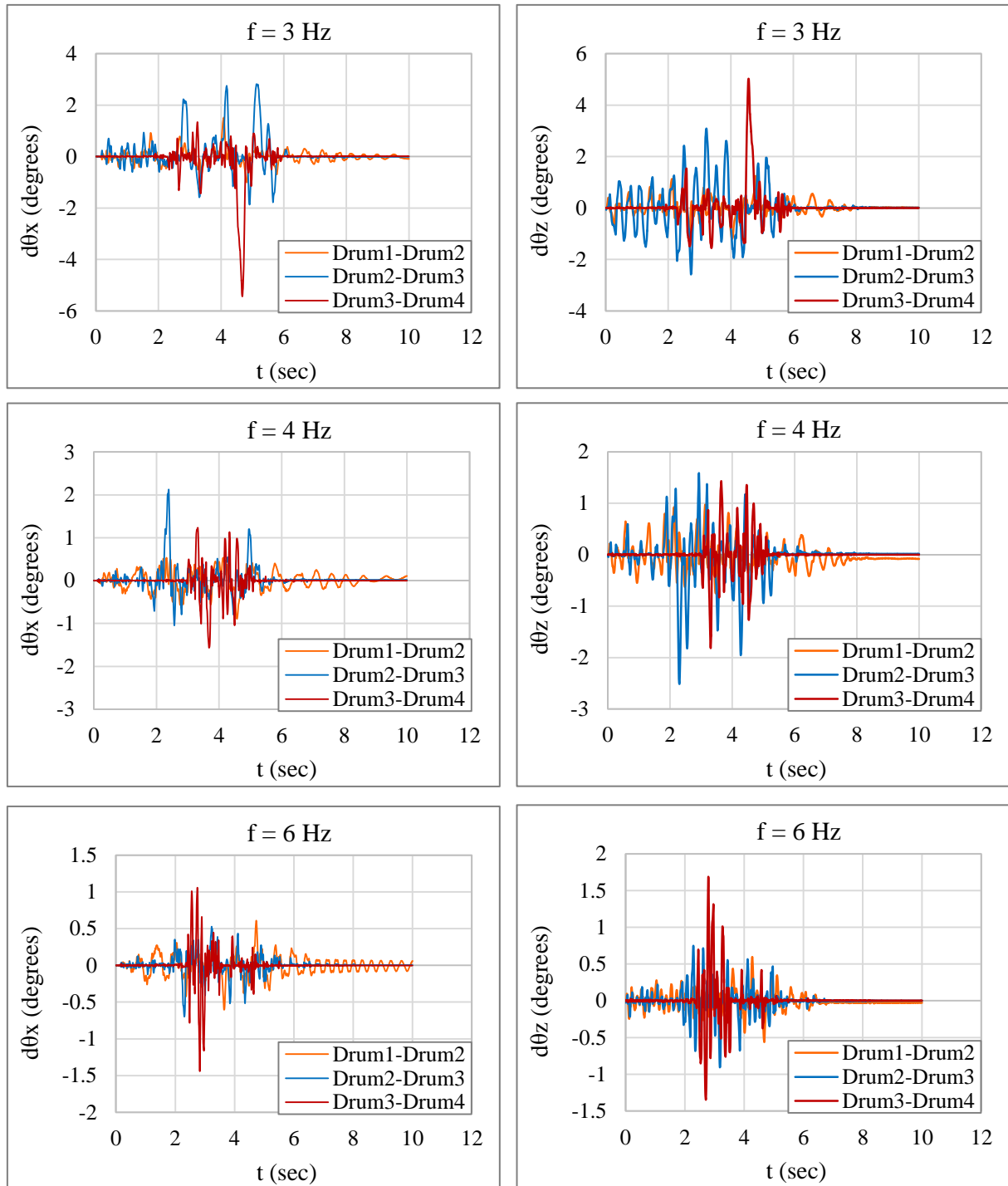
Στα σχήματα 4.27 – 4.30, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των σχετικών γωνιών λικνισμού μεταξύ των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για διάφορες συχνότητες διέγερσης και εδαφικές επιταχύνσεις ίσες με 0.20g, 0.30g, 0.40g, 0.50g αντίστοιχα.



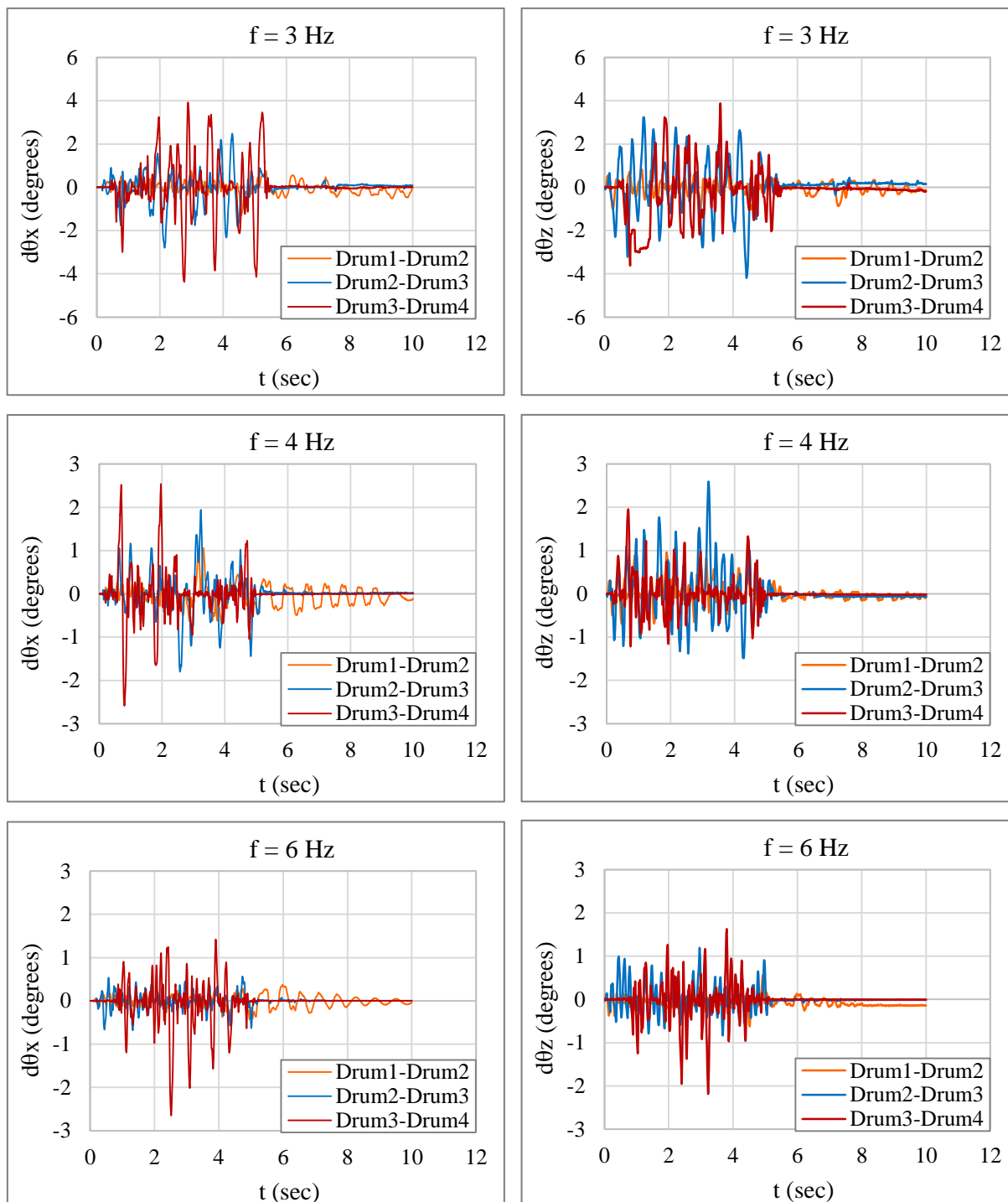
Σχήμα 4.27. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 4.28. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 4.29. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 4.30. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.27, όταν η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης είναι ίση με 0.20g, τότε για κάθε συχνότητα διέγερσης, οι σχετικές γωνίες λικνισμού περί το άξονα x ($d\theta_x$) και περί τον άξονα z ($d\theta_z$) λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους μεταξύ των σπονδύλων 1 και 2, ενώ η ελάχιστη τιμή τους εντοπίζεται μεταξύ του κιονόκρανου και του σπονδύλου 3. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, το κιονόκρανο και ο σπόνδυλος 3 παρουσιάζουν όμοια λικνιστική συμπεριφορά εντός και εκτός του επιπέδου της διέγερσης, με αποτέλεσμα οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ και $d\theta_z$ που αναπτύσσονται μεταξύ τους, να έχουν πολύ μικρή τιμή. Επιπλέον, στις χαμηλότερες συχνότητες διέγερσης οι σχετικές γωνίες $d\theta_z$ έχουν μεγαλύτερη τιμή από τις σχετικές γωνίες $d\theta_x$, ενώ για συχνότητα διέγερσης ίση με 6Hz οι σχετικές γωνίες $d\theta_x$ και $d\theta_z$ έχουν ανάλογες τιμές.

Στην περίπτωση όπου η εδαφική επιτάχυνση έχει τιμή ίση με 0.30g (Σχήμα 4.28), η σχετική γωνία λικνισμού περί τον άξονα z ($d\theta_z$) εμφανίζει μέγιστη τιμή μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3. Αντίστοιχα, η σχετική γωνία λικνισμού περί τον άξονα x ($d\theta_x$) εμφανίζει τη μέγιστη τιμή μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου στις χαμηλές συχνότητες, ενώ στις μεγαλύτερες συχνότητες μεταξύ των σπονδύλων 1 και 2. Για συχνότητες διέγερσης ίσες με 4Hz και 6Hz, η μέγιστη γωνία λικνισμού $d\theta_x$ αναπτύσσεται μεταξύ των σπονδύλων 1 και 2. Αξίζει να αναφερθεί εδώ, ότι για συχνότητες διέγερσης με τιμή 2Hz, 4Hz και 6Hz, οι σχετικές γωνίες $d\theta_z$, εμφανίζουν μεγαλύτερη, ανάλογη και μικρότερη τιμή από τις γωνίες $d\theta_x$, αντίστοιχα.

Για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (Σχήμα 4.29), όταν η συχνότητα της διέγερσης είναι ίση με 3Hz και 6Hz, η μέγιστη σχετική γωνία λικνισμού τόσο περί τον άξονα x, όσο και περί τον άξονα z, αναπτύσσεται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου. Στην περίπτωση όπου η συχνότητα της διέγερσης έχει τιμή ίση με 4Hz, οι μέγιστες σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ και $d\theta_z$ σημειώνονται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3, με τις αντίστοιχες γωνίες μεταξύ του κιονόκρανου και του σπονδύλου 3 να έχουν αρκετά σημαντική τιμή. Επιπρόσθετα, για όλες τις προαναφερθείσες συχνότητες διέγερσης οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ και $d\theta_z$ έχουν ανάλογες τιμές.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.30, το οποίο αναφέρεται στις σχετικές γωνίες λικνισμού για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g, προκύπτει ότι για κάθε τιμή εδαφικής συχνότητας οι μέγιστες γωνίες λικνισμού περί τον άξονα x σημειώνονται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου. Όταν η συχνότητα διέγερσης λαμβάνει την τιμή των 3Hz και 6Hz, η κρίσιμη σχετική γωνία λικνισμού $d\theta_z$ εντοπίζεται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου. Στην

περίπτωση όπου η συχνότητα της διέγερσης έχει τιμή ίση με 4Hz, οι μέγιστες σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_z$ σημειώνονται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3, με τις αντίστοιχες γωνίες μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου να έχουν αρκετά σημαντική τιμή. Σημειώνεται ότι, όταν η συχνότητα της διέγερσης έχει τιμή ίση με 3Hz οι σχετικές γωνίες $d\theta_x$ και $d\theta_z$ έχουν ανάλογες τιμές, ενώ στις συχνότητες των 4Hz και 6Hz οι σχετικές γωνίες $d\theta_x$ είναι μεγαλύτερες από τις $d\theta_z$.

Συνοψίζοντας όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει ότι:

- Διατηρώντας την επιτάχυνση της διέγερσης σταθερή και αυξάνοντας την συχνότητα, οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ και $d\theta_z$ μεταξύ των σπονδύλων, μειώνονται.
- Οι σχετικές γωνίες λικνισμού εντός και εκτός επιπέδου γίνονται μέγιστες μεταξύ των σπονδύλων 1 και 2 για μικρές τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου. Υπογραμμίζεται ότι, οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_z$ και $d\theta_x$ μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3 είναι σημαντικές στις διεγέρσεις υψηλών επιταχύνσεων.
- Για αρκετά χαμηλές τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης, οι σχετικές γωνίες λικνισμού μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου είναι αμελητέες.
- Στις διεγέρσεις με μικρή εδαφική επιτάχυνση, στις χαμηλές συχνότητες οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_z$ των σπονδύλων είναι μεγαλύτερες από τις σχετικές γωνίες $d\theta_x$, ενώ στις υψηλές συχνότητες οι σχετικές γωνίες $d\theta_z$ και $d\theta_x$ έχουν ανάλογες τιμές. Στις διεγέρσεις με μεγαλύτερες τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης, στις χαμηλές συχνότητες οι σχετικές γωνίες $d\theta_z$ και $d\theta_x$ έχουν ανάλογες τιμές, ενώ στις υψηλές συχνότητες οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ των σπονδύλων είναι μεγαλύτερες από τις σχετικές γωνίες $d\theta_z$. Δηλαδή, όσο η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης αυξάνεται, ενισχύεται η εκτός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά των σπονδύλων.

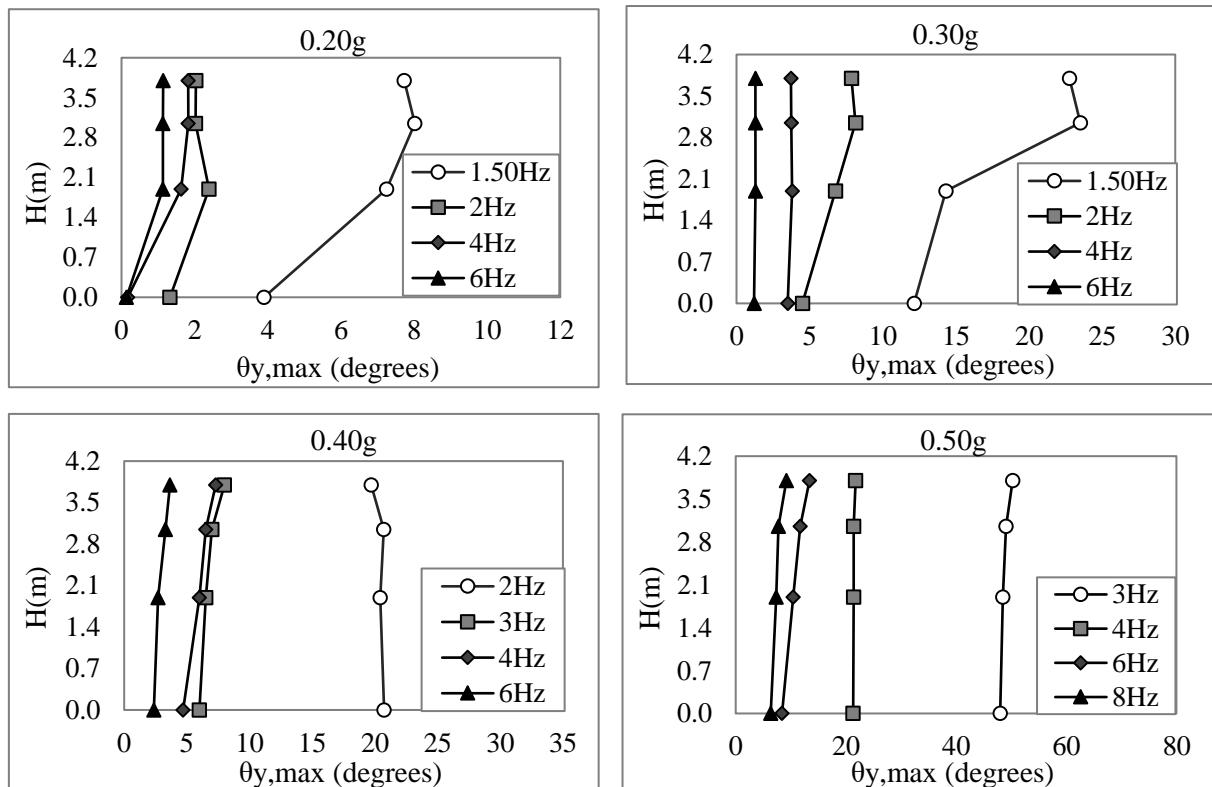
4.3.5. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών γωνιών στροφής

Στα Σχήματα 4.31 και 4.32, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών στροφής θ_y και των γωνιών λικνισμού θ_x και θ_z των σπονδύλων αντίστοιχα, για διάφορες συχνότητες διέγερσης και εδαφικές επιταχύνσεις, ο συνδυασμός των οποίων εξασφαλίζει την ευστάθεια του κίονα. Από τα σχήματα αυτά προκύπτουν τα συμπεράσματα:

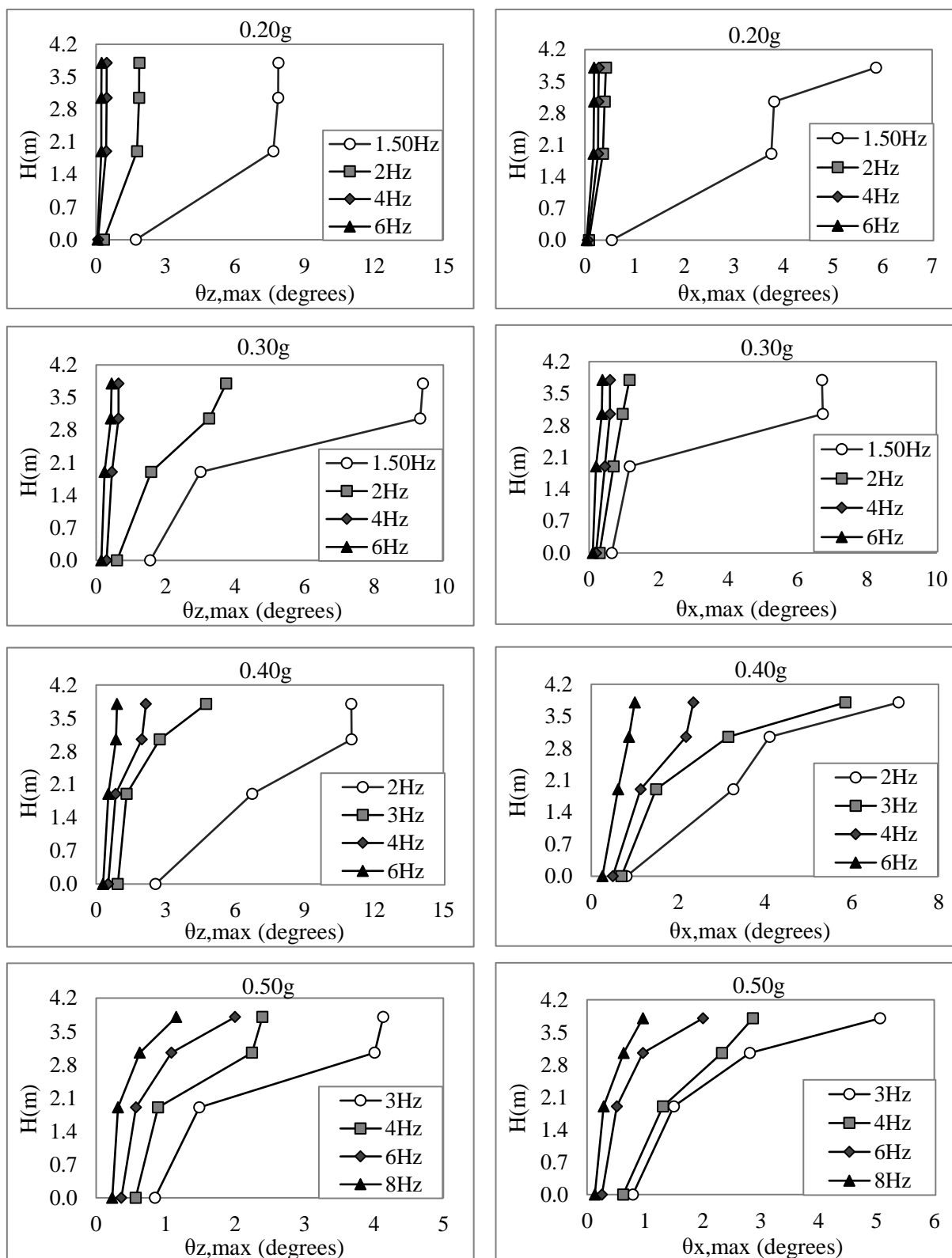
- Για μια δεδομένη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης επιφέρει μείωση στις μέγιστες τιμές των γωνιών στροφής των σπονδύλων. Η μείωση

αυτή είναι μεγάλη στις χαμηλές συχνότητες, ενώ είναι ομαλή στις υψηλότερες συχνότητες.

- Για μικρές τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης, στις υψηλές συχνότητες διέγερσης, οι μέγιστες γωνίες στροφής του κιονόκρανου είναι ανάλογες με τις μέγιστες γωνίες στροφής του σπονδύλου 3.
- Διατηρώντας σταθερή την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη διαφορά στις τιμές των μέγιστων γωνιών στροφής μεταξύ διαδοχικών σπονδύλων.
- Για τις υψηλές συχνότητες των εδαφικών επιταχύνσεων μικρής έντασης και για κάθε συχνότητα των εδαφικών επιταχύνσεων μεγαλύτερης έντασης, οι μέγιστες γωνίες στροφής περί τον άξονα y έχουν ανάλογες τιμές σε όλους τους σπονδύλους.



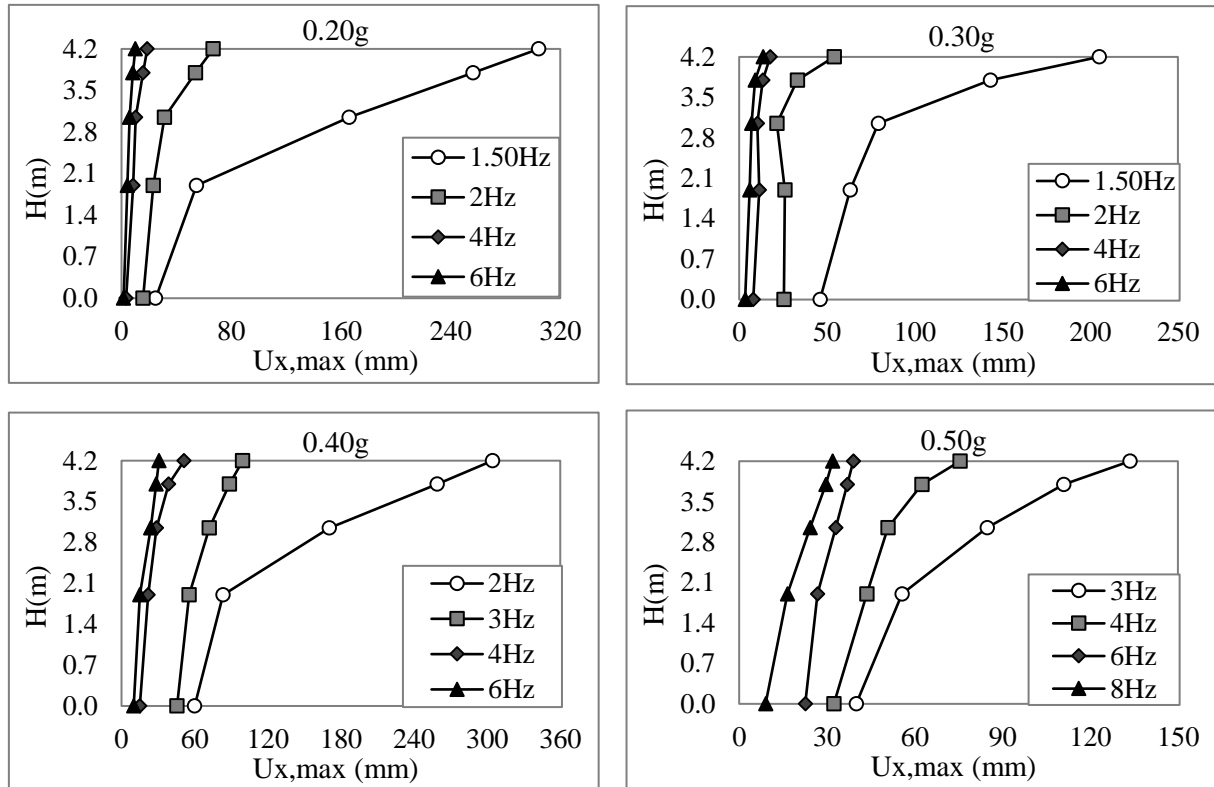
Σχήμα 4.31. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών στροφής θ_y , για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 4.32. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_x και θ_z για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).

4.3.6. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων

Στα Σχήματα 4.33 και 4.34, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ύψους των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x και U_z αντίστοιχα, για διάφορες συχνότητες διέγερσης και εδαφικές επιταχύνσεις, ο συνδυασμός των οποίων εξασφαλίζει την ευστάθεια του κίονα.

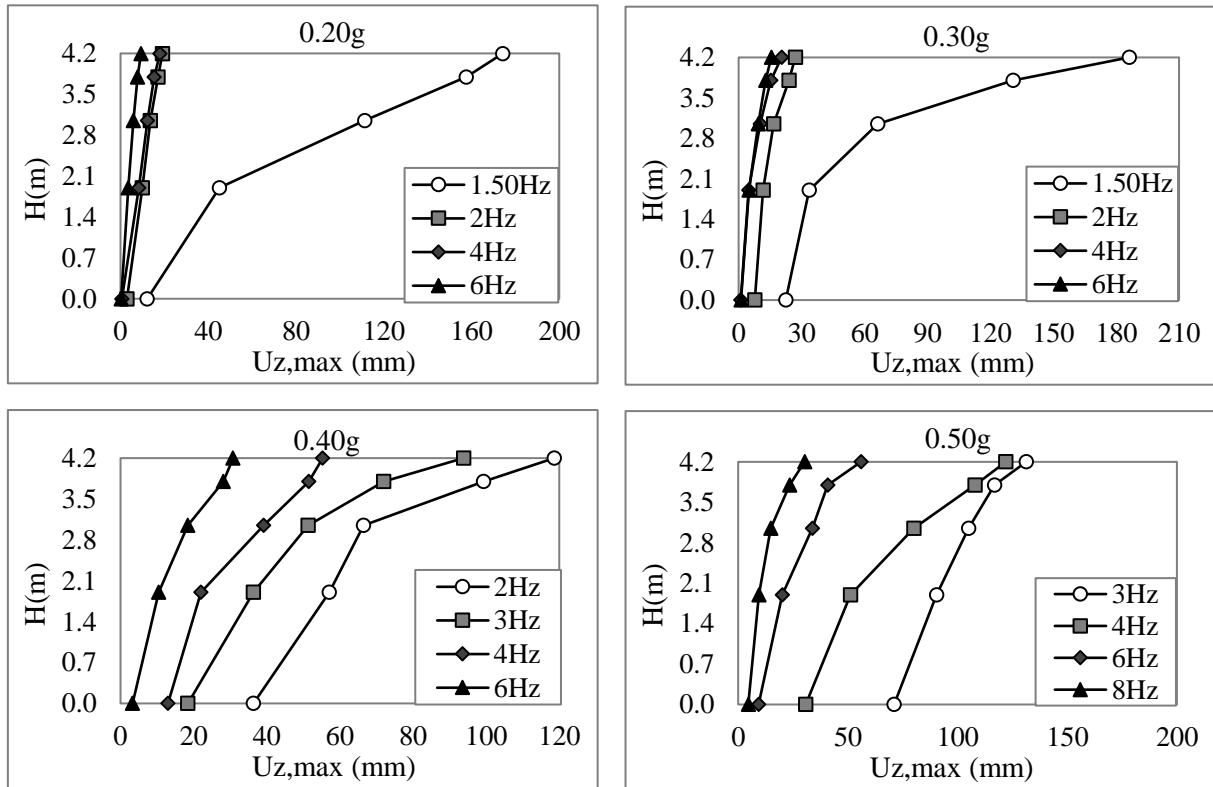


Σχήμα 4.33. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων συμπεραίνουμε ότι:

- Σε όλες τις περιπτώσεις η μεγαλύτερη τιμή μέγιστης μετατόπισης εντοπίζεται στη στέψη του κιονόκρανου.
- Διατηρώντας σταθερή την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης οδηγεί σε μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων όλων των σπονδύλων. Σημειώνεται ότι η μείωση αυτή είναι απότομη στις χαμηλές συχνότητες, ενώ είναι ομαλή στις υψηλές συχνότητες.

- Για μια συγκεκριμένη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης προκαλεί μικρότερη διαφορά στις τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων μεταξύ της βάσης του κίονα και της στέγης του κιονόκρανου.



Σχήμα 4.34. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_z για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ ΓΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ 30° ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΩΝ ΓΟΜΦΩΝ

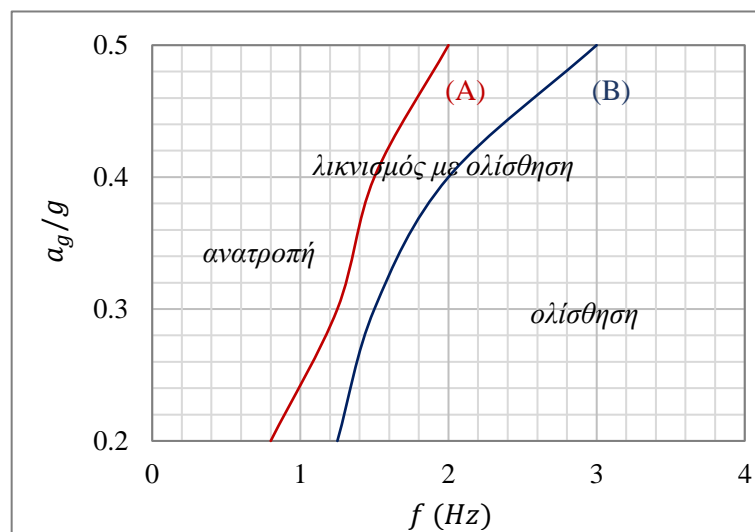
5.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης – συχνότητας διέγερσης

Στον Πίνακα 5 περιγράφεται η δυναμική απόκριση του κίονα για όλες τις εδαφικές διεγέρσεις που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, για κάθε τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης δίνονται οι τιμές των συχνοτήτων διέγερσης για τις οποίες οι σπόνδυλοι του κίονα ανατρέπονται, καθώς επίσης και οι συχνότητες στις οποίες κυρίαρχο φαινόμενο της δυναμικής απόκρισης του κίονα είναι η ολίσθηση (μικρές γωνίες λικνισμού) και η ολίσθηση με λικνισμό (σημαντικές γωνίες λικνισμού).

		Συχνότητα Διέγερσης f (Hz)		
		Ανατροπή	Ολίσθηση με Λικνισμό	Ολίσθηση
Εδαφική Επιτάχυνση a_g (m/s^2)	0.20g	0.50Hz, 0.80Hz	1Hz, 1.25Hz	1.50Hz, 2Hz, 4Hz, 6Hz, 8Hz
	0.30g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 1.25Hz	1.50Hz	2Hz, 4Hz, 6Hz, 8Hz
	0.40g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 1.50Hz	2Hz	2.50Hz, 3Hz, 4Hz, 6Hz, 8Hz
	0.50g	0.50Hz, 0.80Hz, 1Hz, 2Hz	2.25Hz, 2.50Hz, 3Hz	4Hz, 6Hz, 8Hz

Πίνακας 5. Περιγραφή της δυναμικής απόκρισης του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, σε κάθε αρμονική διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων.

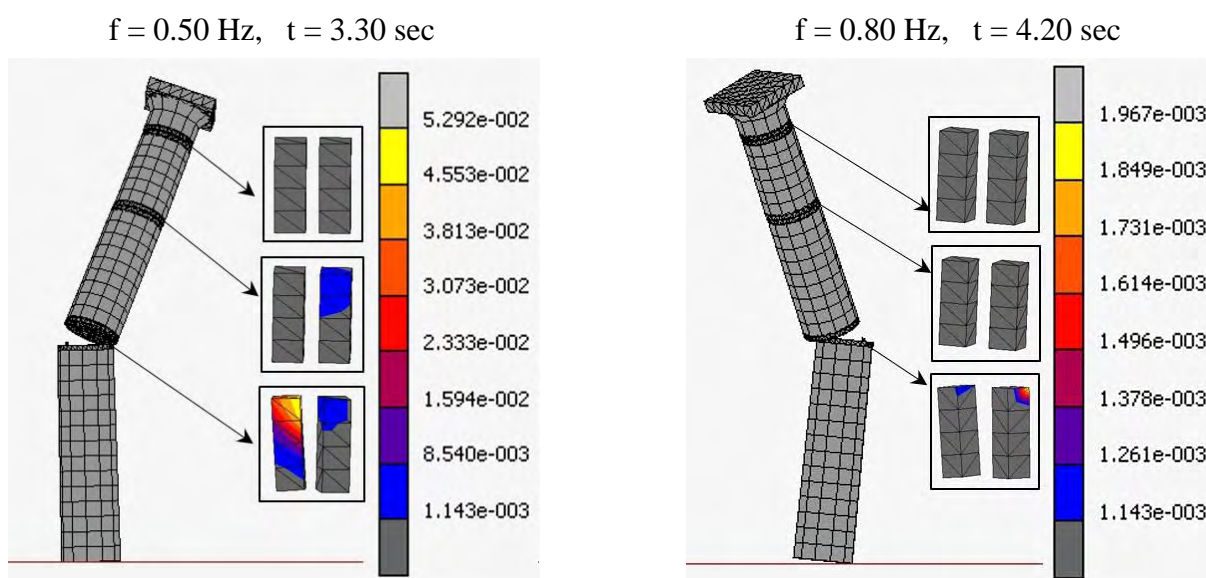
Από τον Πίνακα 5 προκύπτει το διάγραμμα της εδαφικής επιτάχυνσης σε συνάρτηση με την συχνότητα διέγερσης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1, για το οποίο ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2.1.



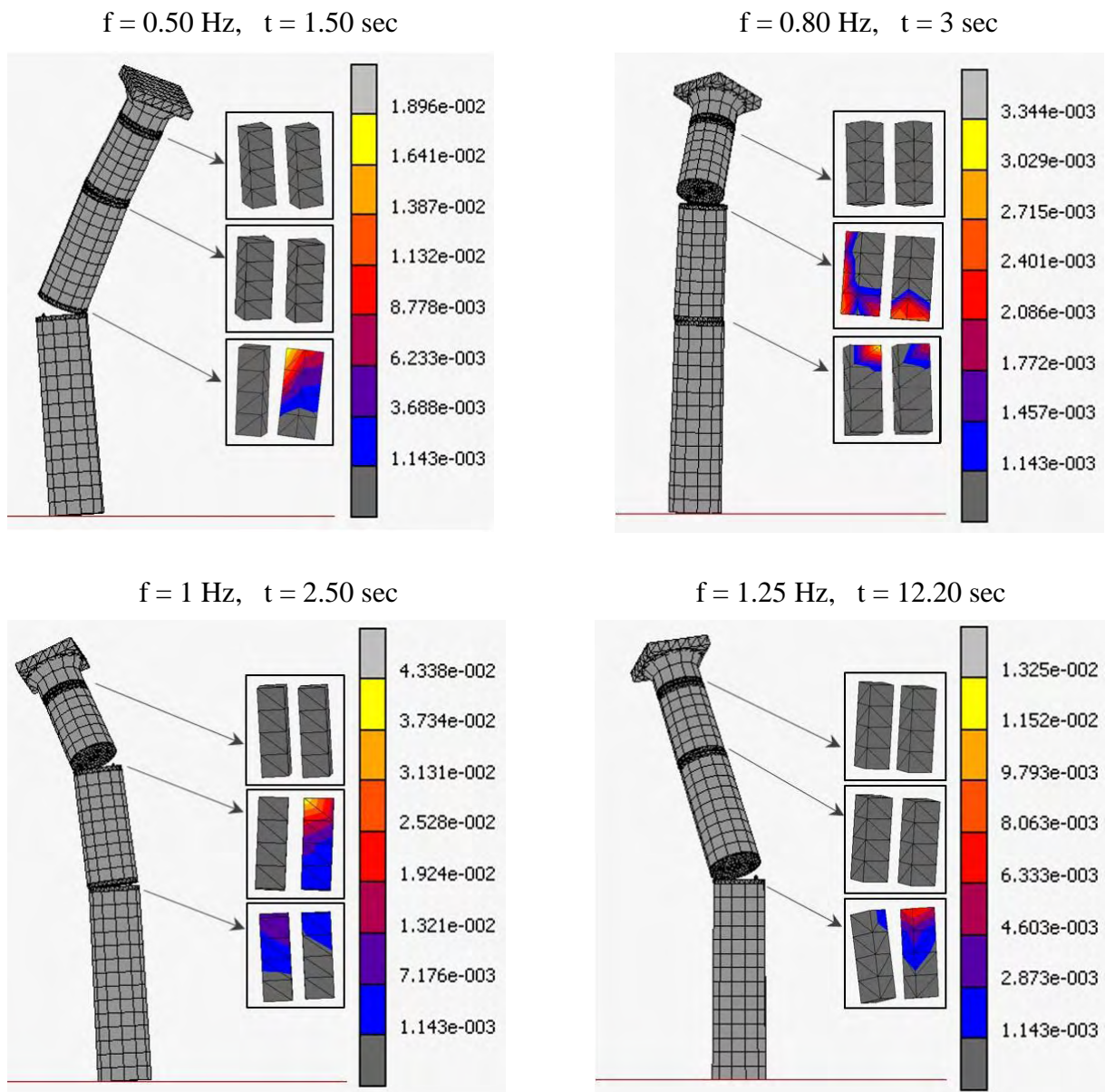
Σχήμα 5.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g – συχνότητας διέγερσης f , για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους, όταν η εδαφική διέγερση επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων.

5.2. Στιγμιότυπα κατάρρευσης

Στα Σχήματα 5.2 - 5.5, παρουσιάζονται στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους (επίπεδο x-y), για επιτάχυνση διέγερσης ίση με 0.20g, 0.30g, 0.40g και 0.50g αντίστοιχα.



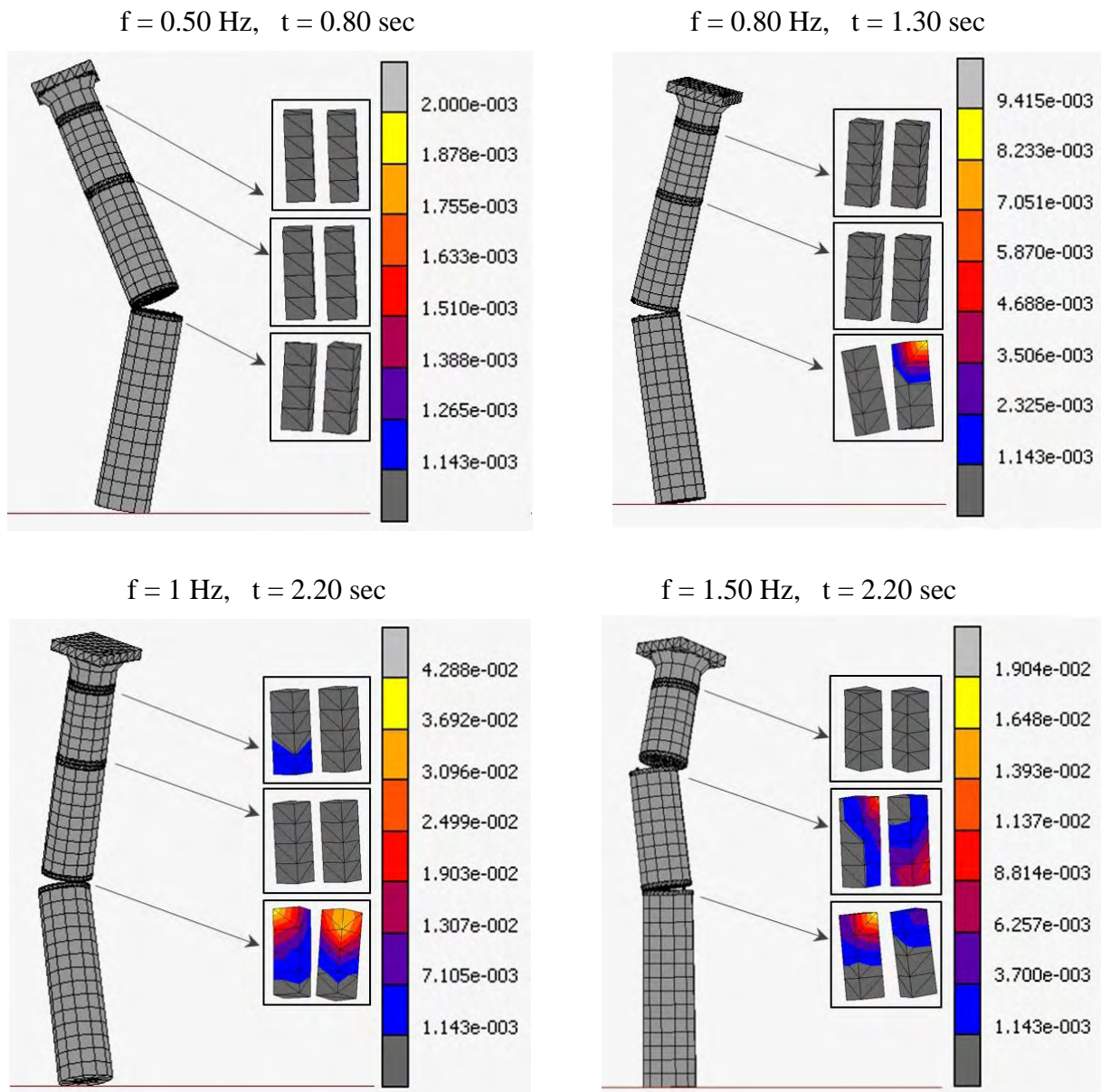
Σχήμα 5.2. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



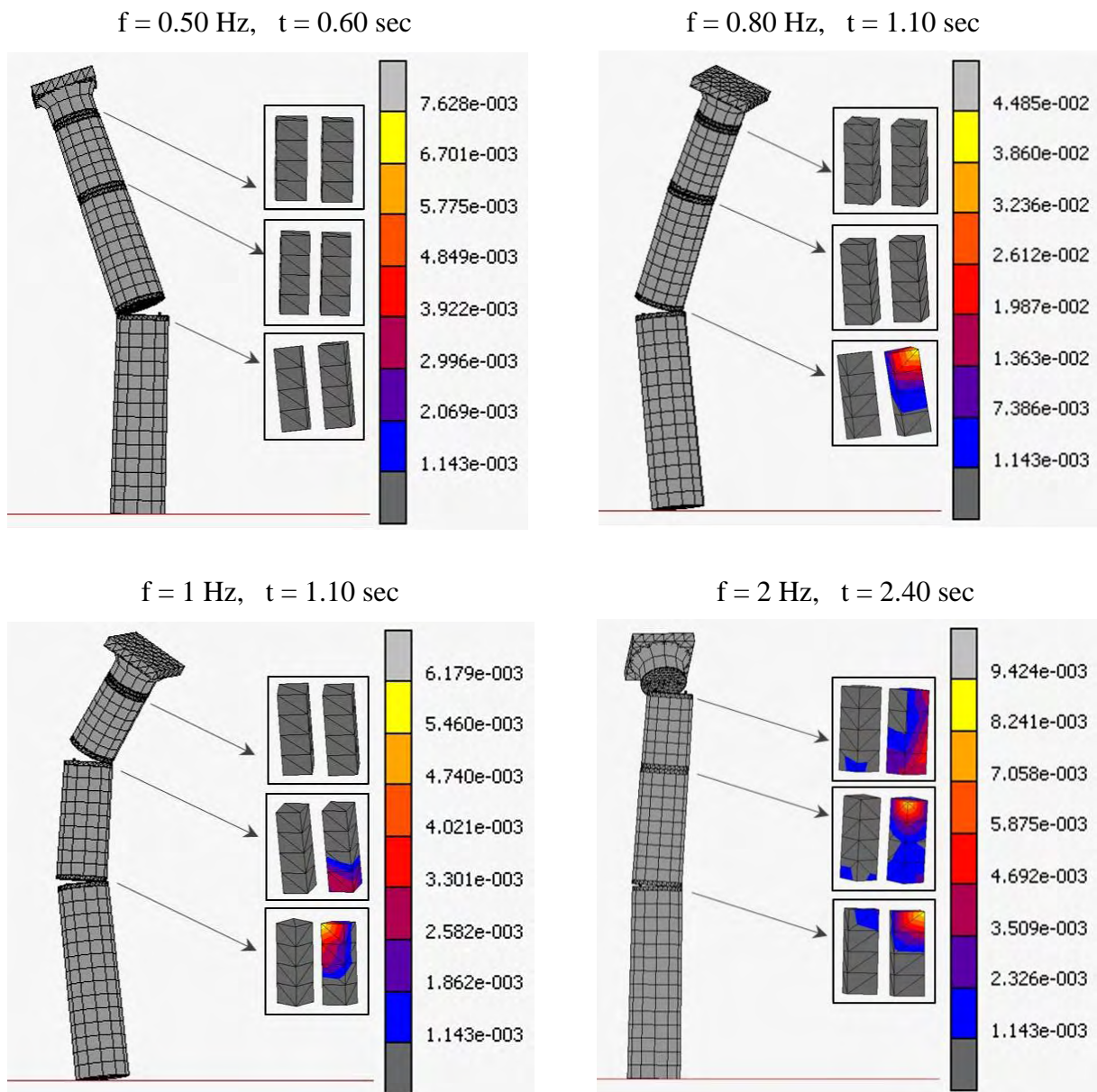
Σχήμα 5.3. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για
εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g
(διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).

Από τα Σχήματα 5.4 και 5.5 προκύπτει ότι οι γόμφοι που συνδέουν τους σπονδύλους του κίονα, δεν προλαβαίνουν να αναπτύξουν σημαντικές παραμορφώσεις στις περιπτώσεις όπου η εδαφική επιτάχυνση ισούται με 0.40g και 0.50g και η συχνότητα διέγερσης λαμβάνει την τιμή των 0.5Hz, επειδή η κατάρρευση του κίονα είναι ακαριαία.

Σημειώνεται ότι, ο χάλυβας των γόμφων που συνδέουν τον σπόνδυλο 3 και το κιονόκρανο, διαρρέει και πλαστικοποιείται μόνο στις περιπτώσεις όπου η εδαφική επιτάχυνση και η συχνότητα διέγερσης έχουν τιμή ίση με 0.40g και 1Hz αντίστοιχα (Σχήμα 5.4), καθώς και όταν η εδαφική επιτάχυνση είναι ίση με 0.50g και η συχνότητα διέγερσης λαμβάνει την τιμή των 2Hz (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.4. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 5.5. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για
εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g
(διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).

Παρατηρώντας τα Σχήματα 5.2 – 5.5 γίνεται φανερό ότι για κάθε τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η κατάρρευση του κίονα οφείλεται σε ανάπτυξη μεγάλων γωνιών λικνισμού τόσο ως προς τον άξονα x όσο και ως προς τον άξονα z. Επιπλέον, σε όλες τις περιπτώσεις μεταξύ των σπονδύλων λαμβάνουν χώρα φαινόμενα ολισθήσεων κατά την διεύθυνση των αξόνων x και z.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει ότι οι παραμορφώσεις των γόμφων που συνδέουν τον σπόνδυλο 3 με το κιονόκρανο, είναι ελαστικές για όλες τις συχνότητες που μελετήθηκαν όταν η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης είναι ίση με 0.20g και 0.30g καθώς επίσης και για συχνότητες $f \leq 1.50$ Hz στις περιπτώσεις όπου η εδαφική επιτάχυνση είναι 0.40g και 0.50g. Η μικρή καταπόνηση των γόμφων στις περιπτώσεις αυτές, οφείλεται στις όμοιες μετατοπίσεις και τις όμοιες γωνίες στροφής που αναπτύσσουν σε κάθε χρονική στιγμή το κιονόκρανο και ο σπόνδυλος 3.

Οι πλαστικές παραμορφώσεις των γόμφων οφείλονται και εδώ στους λόγους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, και συγκεκριμένα στην ανάπτυξη σημαντικής σχετικής γωνίας λικνισμού $d\theta_x$ και σχετικών μετατοπίσεων U_x και U_z μεταξύ των σπονδύλων.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Για όλες τις εδαφικές διεγέρσεις, η κατάρρευση του κίονα είναι αποτέλεσμα έντονου λικνισμού τόσο ως προς τον άξονα x, όσο και ως προς τον άξονα z. Επιπλέον, σε κάθε περίπτωση εμφανίζονται σημαντικές σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων του κίονα.
- Για μια δεδομένη συχνότητα διέγερσης, όσο αυξάνεται η τιμή της επιτάχυνσης της διέγερσης, η δυναμική απόκριση του κίονα μέχρι την κατάρρευση έχει μικρότερη διάρκεια. Αντίθετα, για μια δεδομένη επιτάχυνση διέγερσης, όσο αυξάνεται η τιμή της συχνότητας διέγερσης, η δυναμική απόκριση του κίονα μέχρι την κατάρρευση έχει μεγαλύτερη διάρκεια.
- Αποκόλληση του κιονόκρανου από τον σπόνδυλο 3, σημειώνεται μόνο σε υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις.
- Όταν η κατάρρευση του σπονδυλωτού κίονα πραγματοποιείται σε μικρό χρονικό διάστημα από την έναρξη της λικνιστικής απόκρισης, οι γόμφοι δεν προλαβαίνουν να αναπτύξουν σημαντικές παραμορφώσεις.
- Για εδαφικές διεγέρσεις που οδηγούν τον κίονα σε κατάρρευση, οι γόμφοι που βρίσκονται στη διεπιφάνεια του σπονδύλου 3 με το κιονόκρανο, υφίστανται διαρροή και πλαστικές παραμορφώσεις μόνο στις υψηλές συχνότητες των υψηλών εδαφικών επιταχύνσεων.
- Καθώς η εδαφική επιτάχυνση γίνεται μεγαλύτερη, το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες επέρχεται κατάρρευση διευρύνεται. Έτσι για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g,

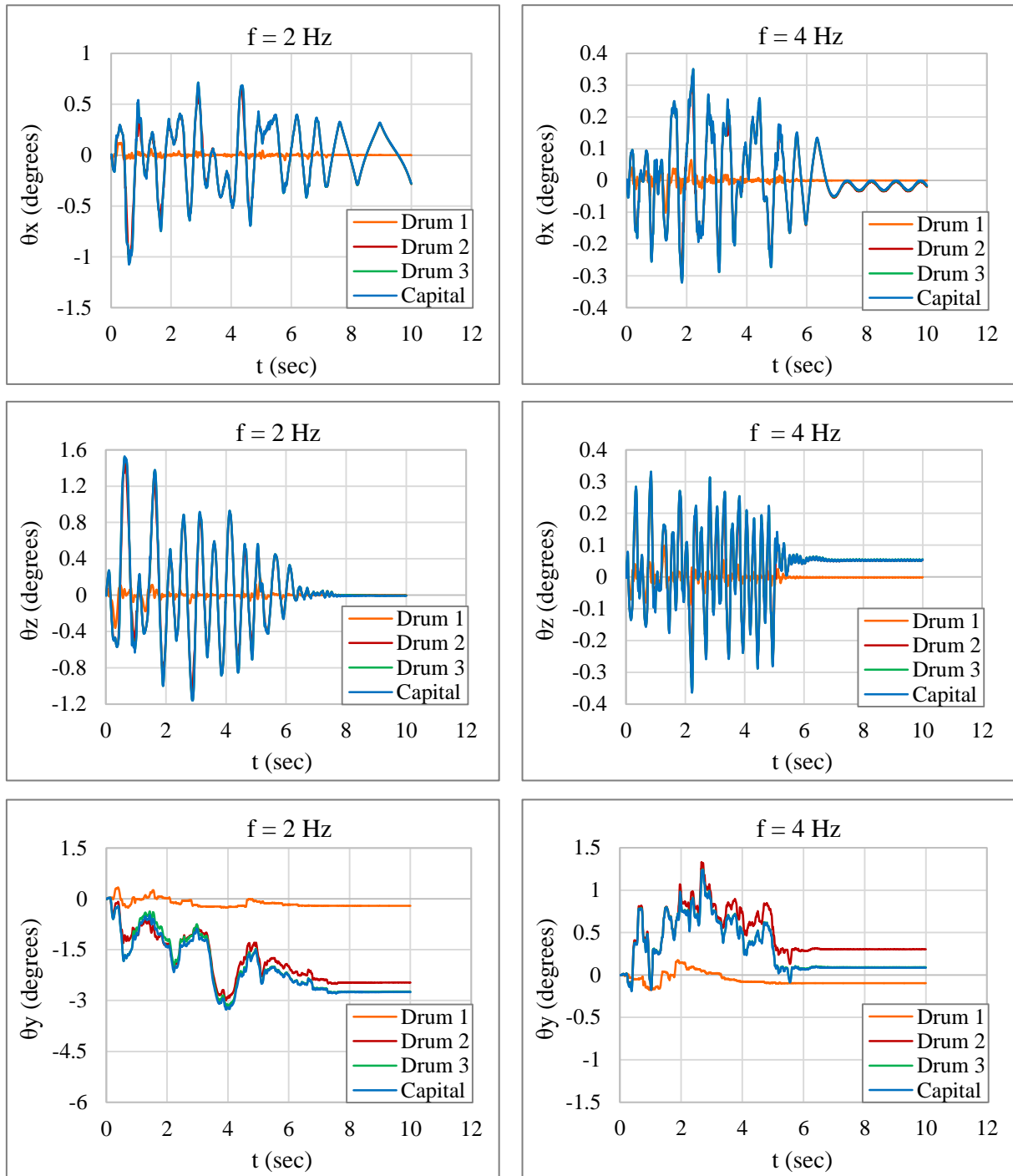
κατάρρευση επέρχεται για συχνότητα διέγερσης μικρότερη από την τιμή των 0.80Hz, ενώ για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g έχουμε κατάρρευση του σπονδυλωτού κίονα για συχνότητα διέγερσης μικρότερη από την τιμή των 2Hz.

5.3. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου

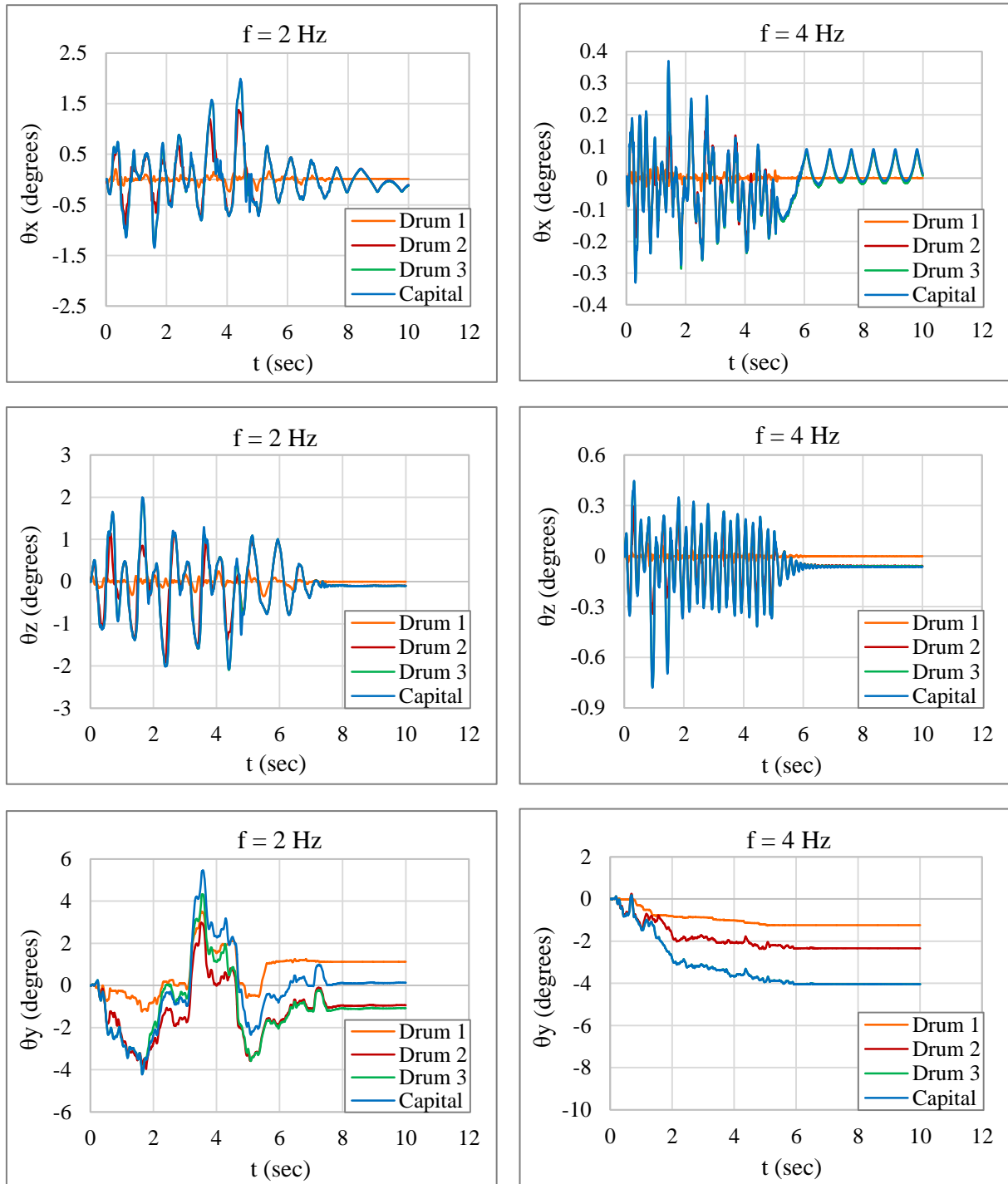
Στα Σχήματα 5.6 – 5.9, δίνονται τα διαγράμματα των ολικών γωνιών στροφής περί τους άξονες x, y και z σε συνάρτηση με το χρόνο, για τις συχνότητες διέγερσης και τις εδαφικές επιταχύνσεις που μελετώνται στην παρούσα εργασία.

Από τα σχήματα αυτά εξάγονται τα συμπεράσματα:

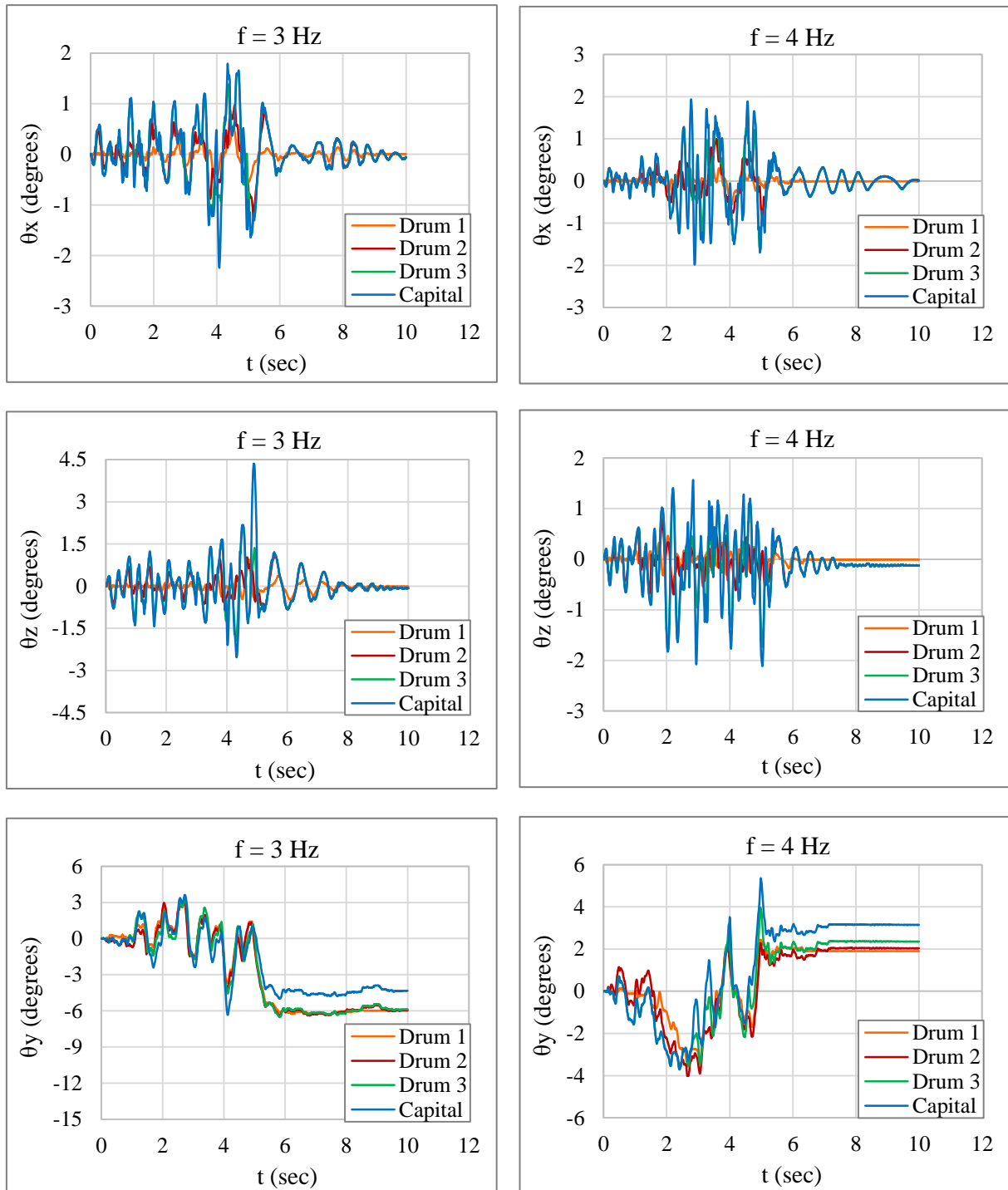
- Για μια δεδομένη τιμή της συχνότητας διέγερσης, η αύξηση στη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης προκαλεί την αύξηση των γωνιών στροφής σε κάθε σπόνδυλο του κίονα. Σημειώνεται ότι η αύξηση των γωνιών λικνισμού (θ_x, θ_z) είναι εντονότερη κατά την μετάβαση από τις διεγέρσεις όπου η εδαφική επιτάχυνση παίρνει μικρές τιμές (0.20g και 0.30g), στις διεγέρσεις όπου η εδαφική επιτάχυνση παίρνει μεγάλες τιμές (0.40g και 0.50g).
- Διατηρώντας σταθερή την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση στη τιμή της συχνότητας διέγερσης επιφέρει μείωση των γωνιών στροφής θ_x , θ_y και θ_z για όλους τους σπονδύλους του κίονα. Παρατηρείται ότι στις εδαφικές επιταχύνσεις μικρότερης τιμής (0.20g και 0.30g), η μείωση των γωνιών στροφής περί τους άξονες x, y και z είναι μεγαλύτερη από ότι στις εδαφικές επιταχύνσεις με μεγαλύτερη τιμή (0.40g και 0.50g).
- Σε κάθε περίπτωση, οι σπόνδυλοι του κίονα αναπτύσσουν γωνίες λικνισμού περί τον άξονα z που τείνουν να είναι μεγαλύτερες από τις γωνίες λικνισμού περί τον άξονα x.
- Όταν η εδαφική επιτάχυνση είναι μικρή (0.20g), τότε η γωνία στροφής θ_y (στροφή περί τον άξονα y) του σπονδύλου 1 είναι εμφανώς μικρότερη από τις αντίστοιχες γωνίες στροφής των υπόλοιπων σπονδύλων.
- Όταν η εδαφική επιτάχυνση παίρνει μεγάλες τιμές (0.40g και 0.50g), τότε οι καμπύλες των γωνιών θ_y έχουν όμοια μορφή για όλους τους σπονδύλους του κίονα, επομένως όλοι οι σπόνδυλοι στρέφονται με τον ίδιο περίπου τρόπο.



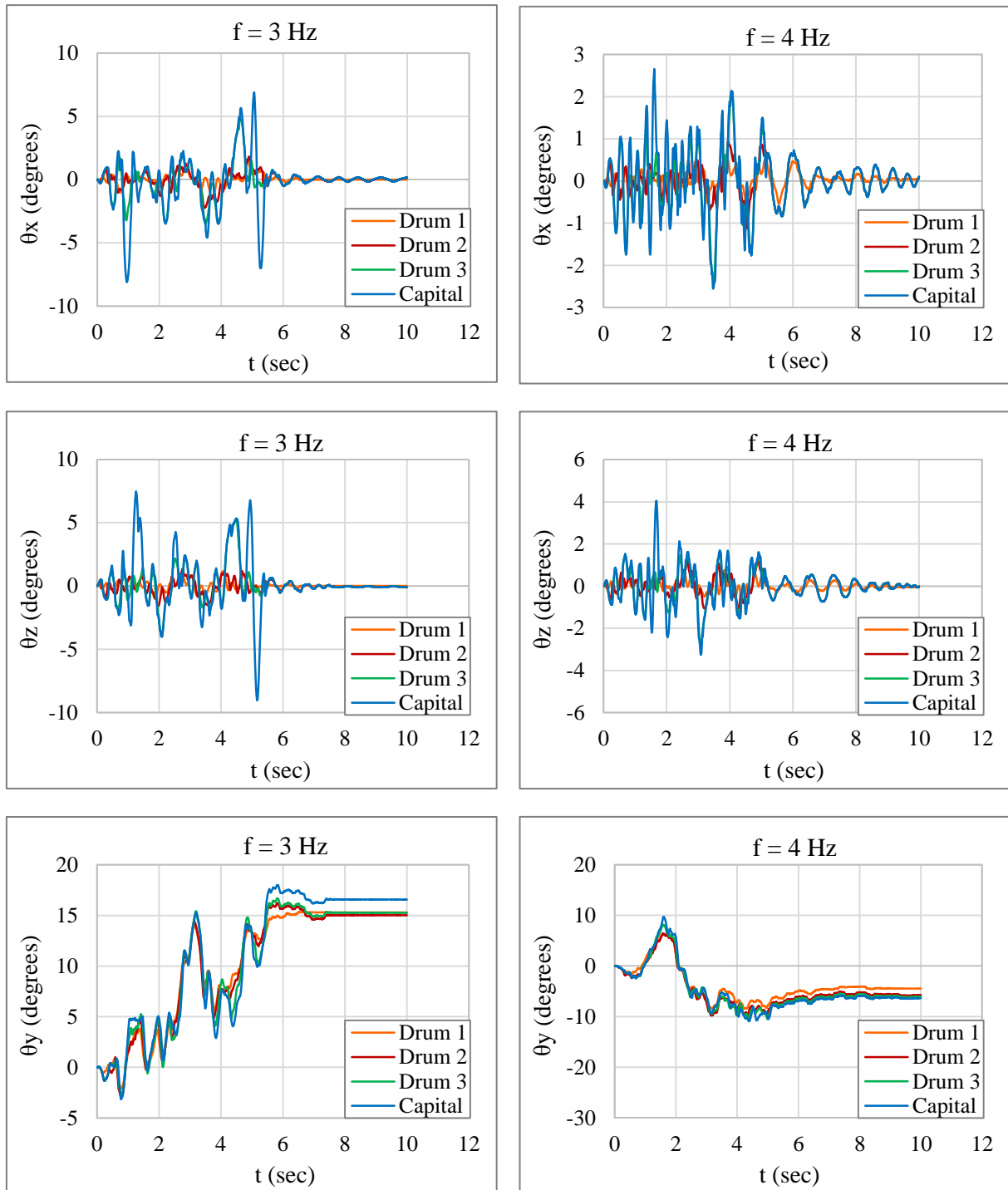
Σχήμα 5.6. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 5.7. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε
εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g
(διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



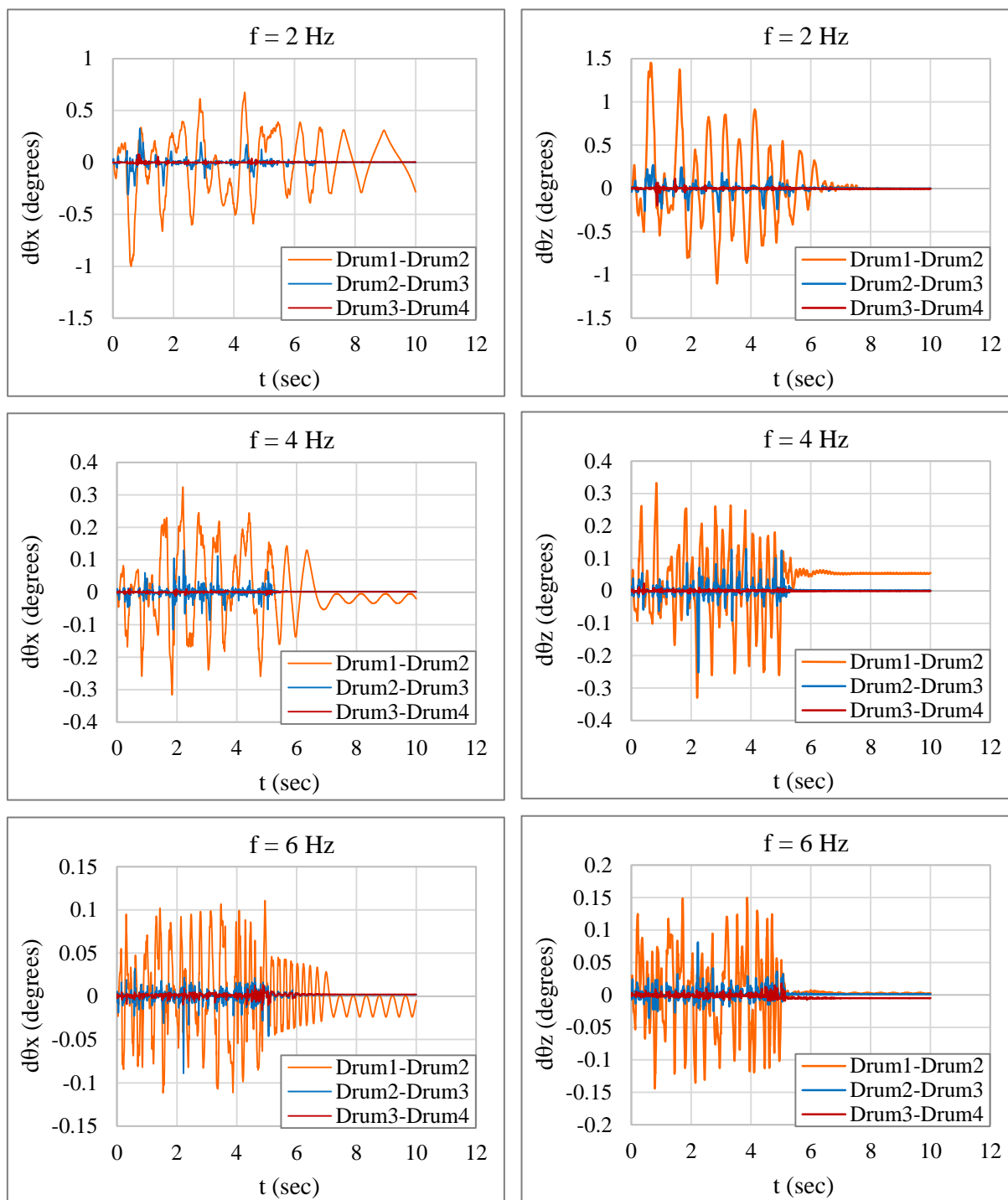
Σχήμα 5.8. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



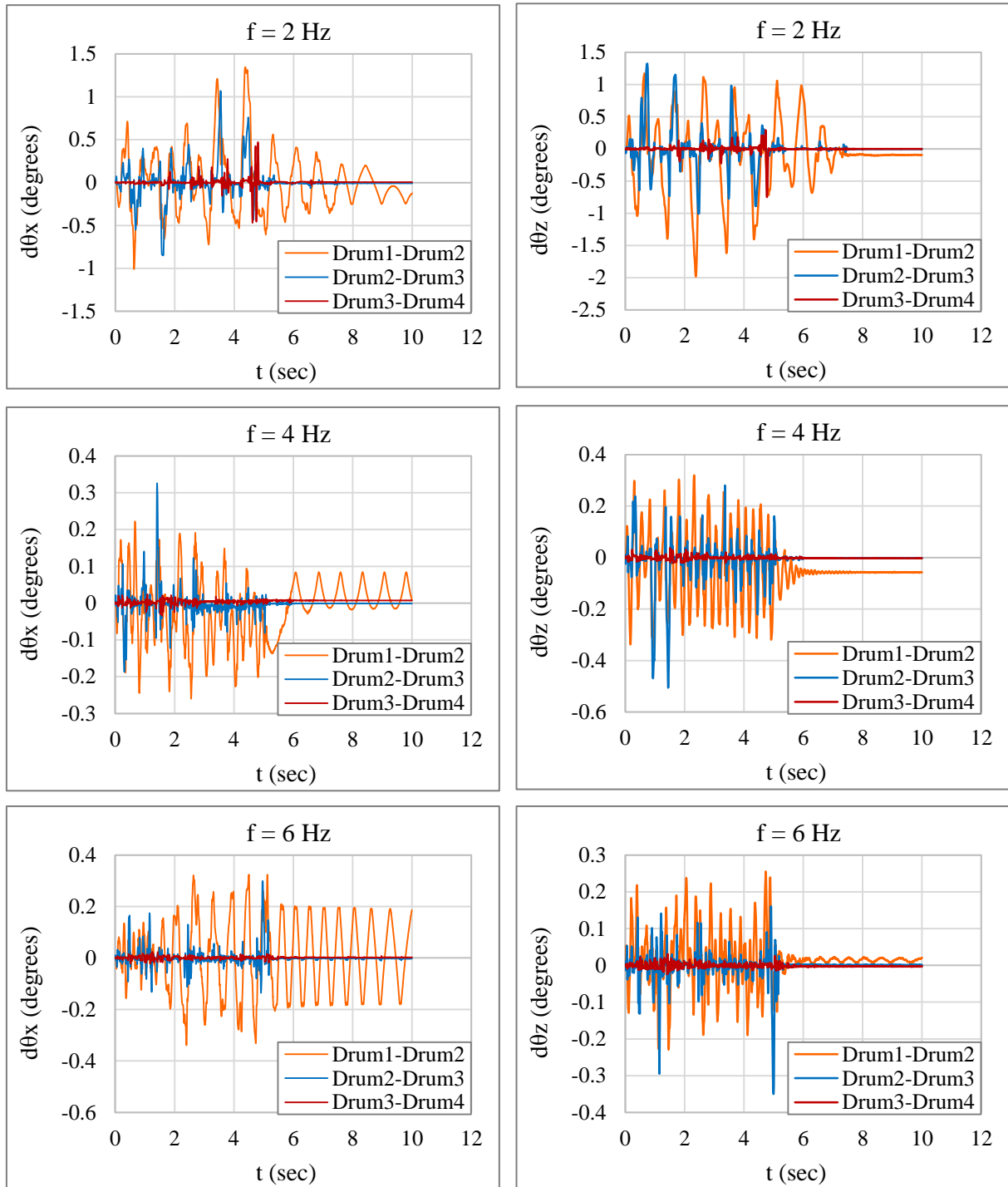
Σχήμα 5.9. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).

5.4. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου

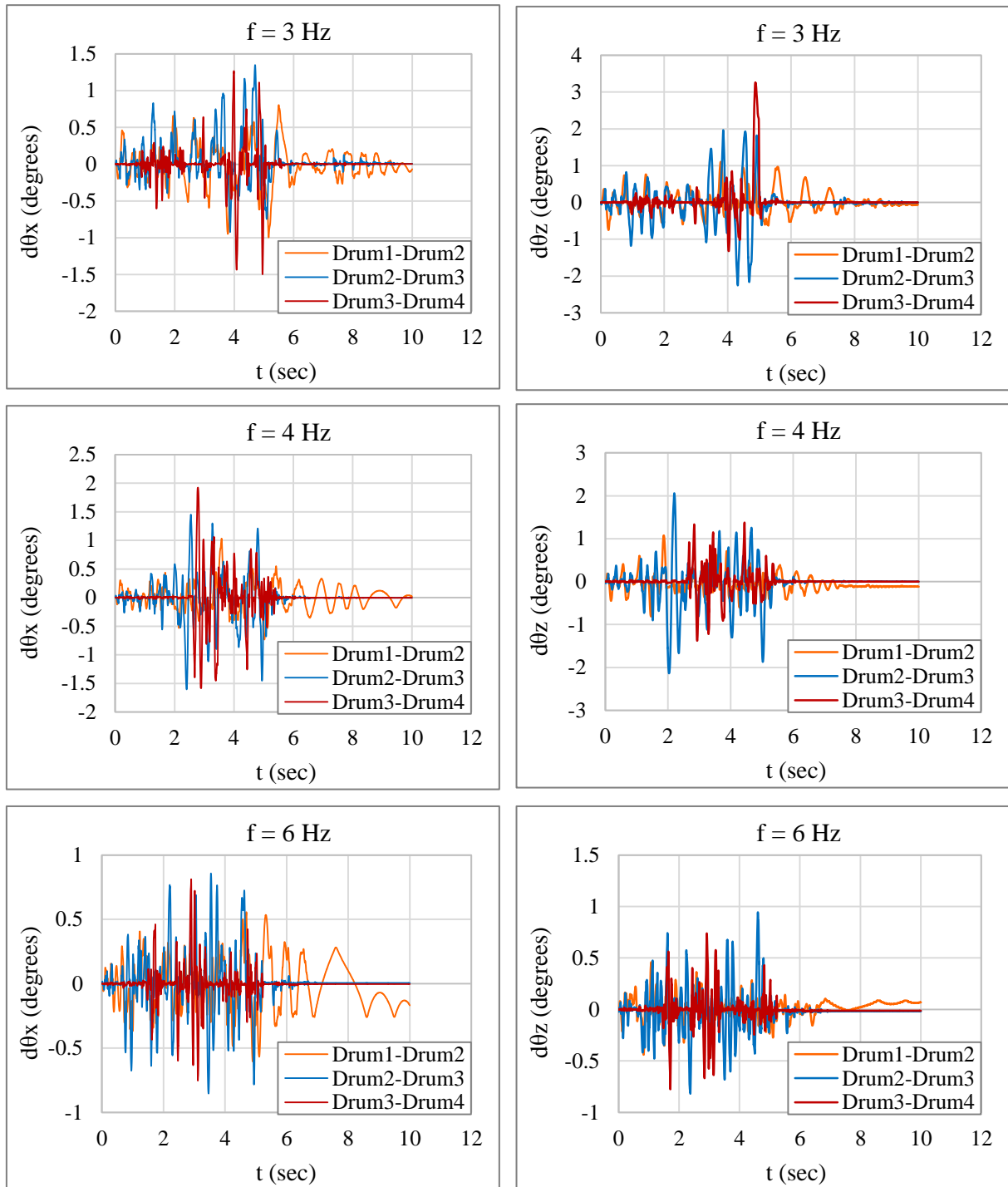
Στα σχήματα 5.10 – 4.13, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των σχετικών γωνιών λικνισμού μεταξύ των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για διάφορες συχνότητες διέγερσης και εδαφικές επιταχύνσεις ίσες με 0.20g, 0.30g, 0.40g, 0.50g αντίστοιχα



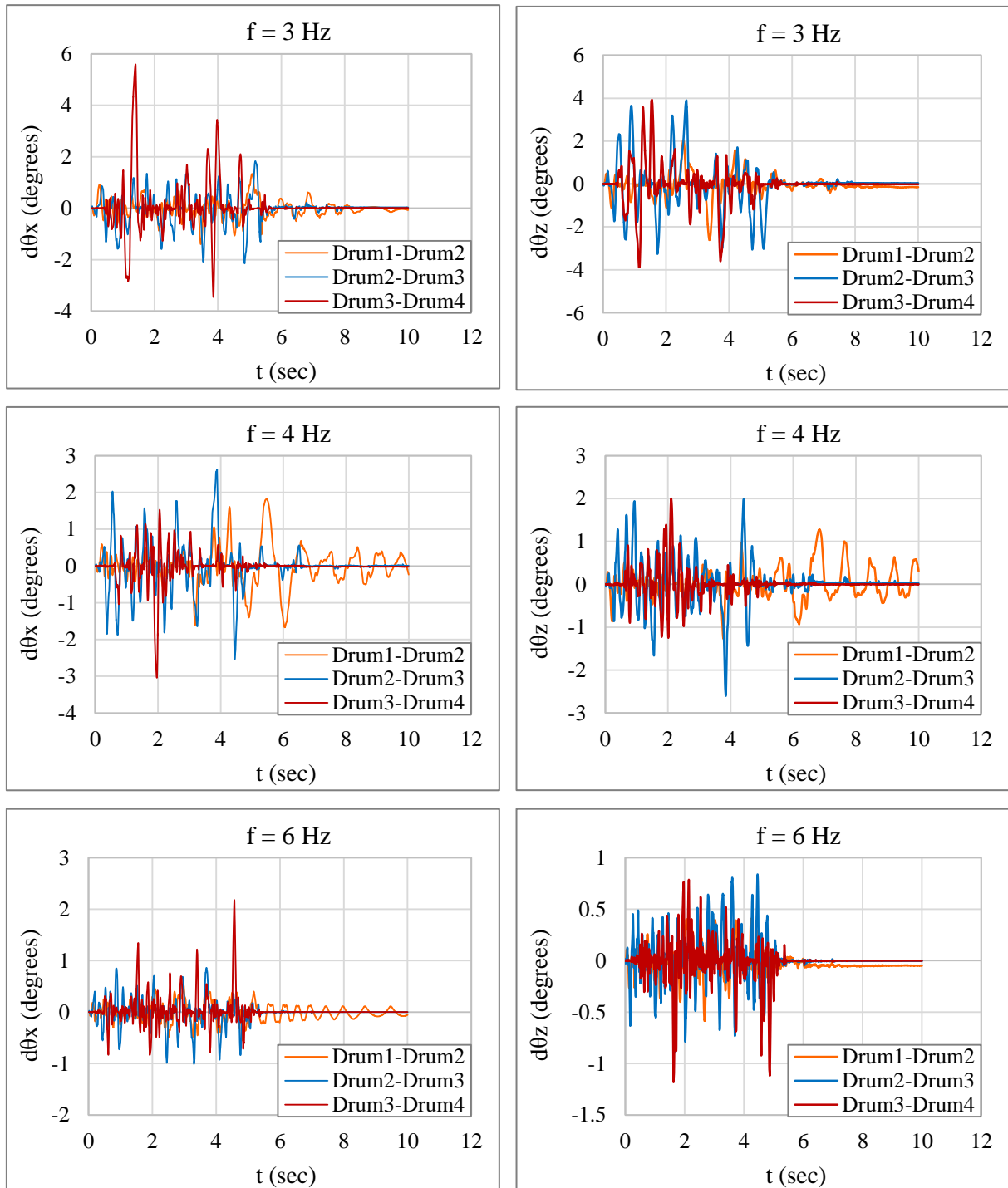
Σχήμα 5.10. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 5.11. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 5.12. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 5.13. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).

Παρατηρώντας το Σχήμα 5.10, προκύπτει ότι για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g οι μέγιστες σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ και $d\theta_z$ αναπτύσσονται μεταξύ των σπονδύλων 1 και 2 και οι και οι ελάχιστες μεταξύ του κιονόκρανου και του σπονδύλου 3. Σημειώνεται ότι, το κιονόκρανο και ο σπόνδυλος 3 παρουσιάζουν ανάλογη λικνιστική συμπεριφορά, καθώς οι σχετικές γωνίες $d\theta_x$ και $d\theta_z$ που αναπτύσσουν μεταξύ τους, έχουν αρκετά μικρή τιμή. Επιπλέον, όταν η συχνότητα διέγερσης γίνεται ίση με 2Hz, τότε οι σχετικές γωνίες λικνισμού περί τον άξονα z είναι μεγαλύτερες από τις σχετικές γωνίες λικνισμού περί τον άξονα x, ενώ για συχνότητες διέγερσης ίσες με 4Hz και 6Hz οι σχετικές γωνίες λικνισμού περί τους άξονες z και x έχουν ανάλογες τιμές.

Στην περίπτωση που η εδαφική επιτάχυνση είναι ίση με 0.30g (Σχήμα 5.11) στις χαμηλές συχνότητες ($f = 2\text{Hz}$), η μέγιστη τιμή των σχετικών γωνιών λικνισμού περί τους άξονες x και z εντοπίζεται μεταξύ των σπονδύλων 1 και 2, ενώ στις υψηλότερες συχνότητες ($f = 4\text{Hz}$, $f = 6\text{Hz}$) οι μέγιστες γωνίες λικνισμού $d\theta_x$, και $d\theta_z$ αναπτύσσονται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3. Αξίζει να αναφερθεί εδώ, ότι για συχνότητες διέγερσης με τιμή 2Hz και 4Hz οι σχετικές γωνίες $d\theta_z$ εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή από τις σχετικές γωνίες $d\theta_x$, ενώ όταν η συχνότητα διέγερσης ισούται με 6Hz οι σχετικές γωνίες λικνισμού περί τους άξονες x και z λαμβάνουν παρόμοιες τιμές.

Για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (Σχήμα 5.12), στις χαμηλές συχνότητες ($f = 3\text{Hz}$) η μέγιστη σχετική γωνία λικνισμού τόσο περί τον άξονα x, όσο και περί τον άξονα z, αναπτύσσεται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου, ενώ στις υψηλές συχνότητες ($f = 6\text{Hz}$) οι μέγιστες σχετικές γωνίες $d\theta_x$ και $d\theta_z$ εντοπίζονται μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3. Στις ενδιάμεσες τιμές συχνοτήτων ($f = 4\text{Hz}$), οι μέγιστες σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ και $d\theta_z$ σημειώνονται τόσο μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου, όσο και μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3. Επιπρόσθετα, όταν η συχνότητα διέγερσης ισούται με 2Hz οι σχετικές γωνίες $d\theta_z$ εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή από τις γωνίες $d\theta_x$, ενώ όταν η συχνότητα διέγερσης ισούται με 4Hz και 6Hz οι σχετικές γωνίες λικνισμού περί τους άξονες x και z λαμβάνουν ανάλογες τιμές.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.13, το οποίο αναφέρεται στις σχετικές γωνίες λικνισμού για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g, προκύπτει ότι τόσο στις χαμηλές όσο και τις υψηλές συχνότητες οι μέγιστες γωνίες λικνισμού περί τους άξονες x και z σημειώνονται μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου, ενώ στις ενδιάμεσες τιμές των συχνοτήτων ($f = 4\text{Hz}$), οι σχετικές γωνίες

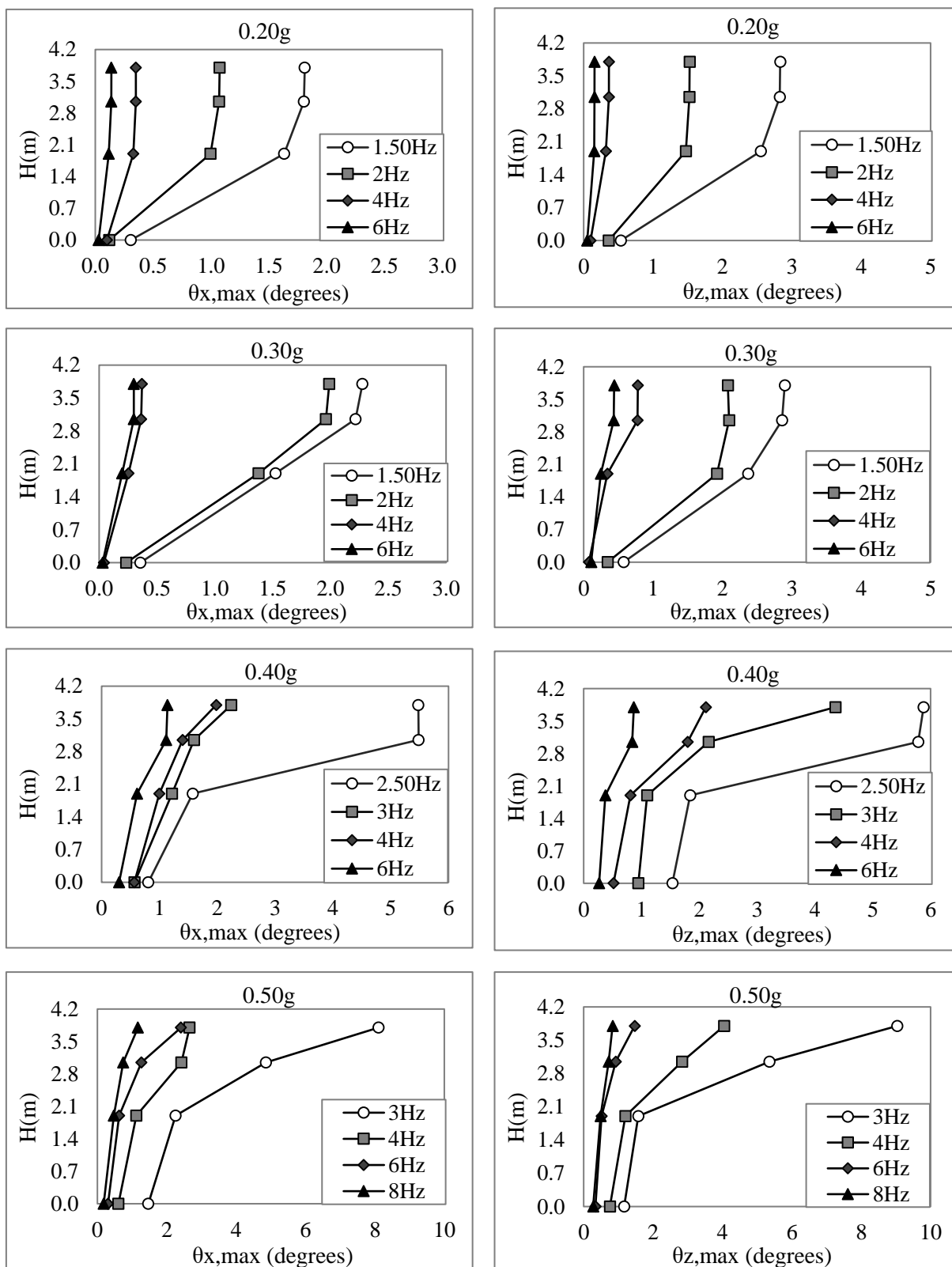
λικνισμού είναι μεγάλες και μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3 και μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή, για κάθε τιμή της συχνότητας διέγερσης οι σχετικές γωνίες $d\theta_x$ και $d\theta_z$ έχουν ανάλογες τιμές.

Συνοψίζοντας όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει ότι:

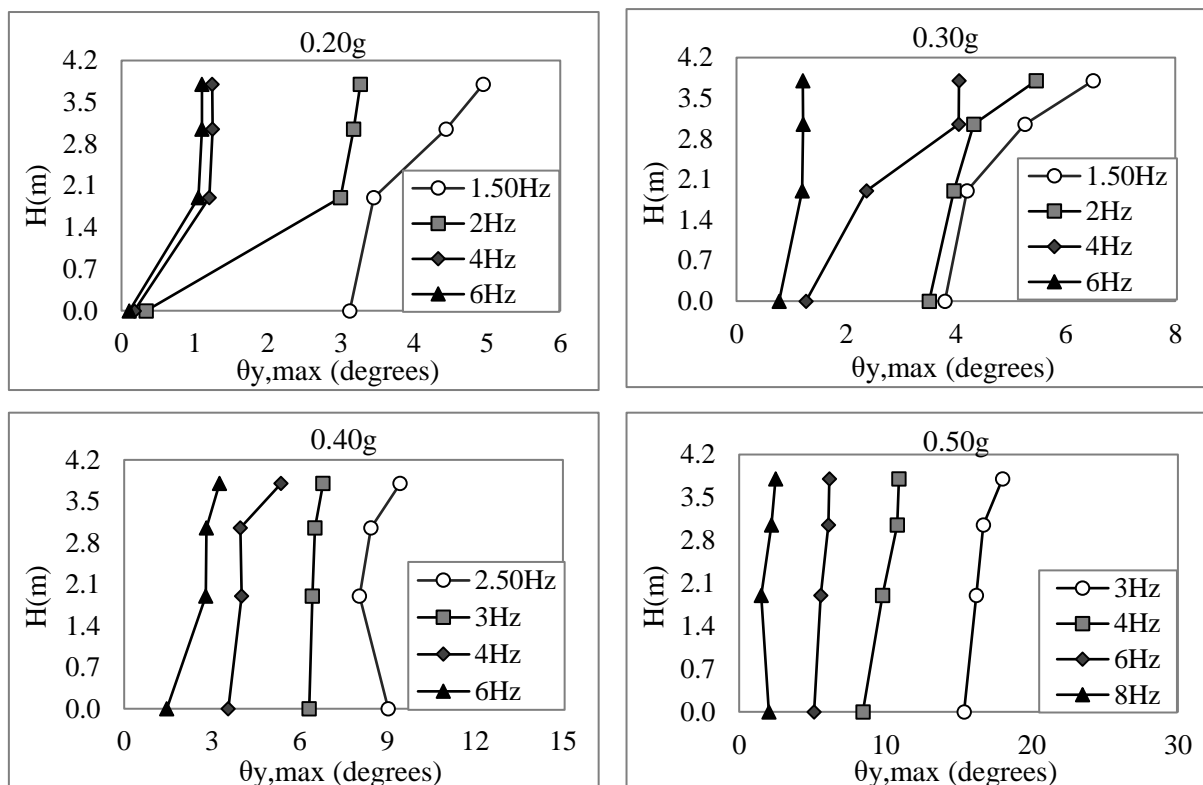
- Σε γενικό πλαίσιο, διατηρώντας την επιτάχυνση της διέγερσης σταθερή και αυξάνοντας την συχνότητα, οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ και $d\theta_z$ μεταξύ των σπονδύλων, μειώνονται.
- Οι σχετικές γωνίες λικνισμού περί τους άξονες x και z, γίνονται μέγιστες μεταξύ των σπονδύλων 1 και 2 για εδαφικές επιταχύνσεις μικρής τιμής, ενώ στις εδαφικές επιταχύνσεις μεγάλης τιμής λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου. Υπογραμμίζεται ότι, οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_z$ και $d\theta_x$ μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3 είναι σημαντικές στις διεγέρσεις υψηλών επιταχύνσεων.
- Σε αρκετά χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις, οι σχετικές γωνίες λικνισμού μεταξύ του κιονόκρανου και του σπονδύλου 3 είναι αμελητέες.
- Στις διεγέρσεις χαμηλών επιταχύνσεων, στις χαμηλές συχνότητες οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_z$ των σπονδύλων είναι μεγαλύτερες από τις σχετικές γωνίες $d\theta_x$, ενώ στις υψηλές συχνότητες οι σχετικές γωνίες $d\theta_z$ και $d\theta_x$ έχουν ανάλογες τιμές. Επιπλέον, στις διεγέρσεις υψηλών επιταχύνσεων, για κάθε τιμή της συχνότητας διέγερσης οι σχετικές γωνίες λικνισμού $d\theta_x$ των σπονδύλων είναι μεγαλύτερες από τις σχετικές γωνίες $d\theta_z$. Δηλαδή, όσο η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης αυξάνεται, οι σχετικές γωνίες λικνισμού περί τον άξονα x γίνονται μεγαλύτερες.

5.5. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών γωνιών στροφής

Στα Σχήματα 5.14 και 5.15, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_x και θ_z και των γωνιών στροφής θ_y των σπονδύλων αντίστοιχα, για τιμές των συχνοτήτων διέγερσης και των εδαφικών επιταχύνσεων που δεν οδηγούν τον κίονα σε ανατροπή.



Σχήμα 5.14. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_x και θ_z για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30 μοιρών ως προς τον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 5.15. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών στροφής θ_y για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).

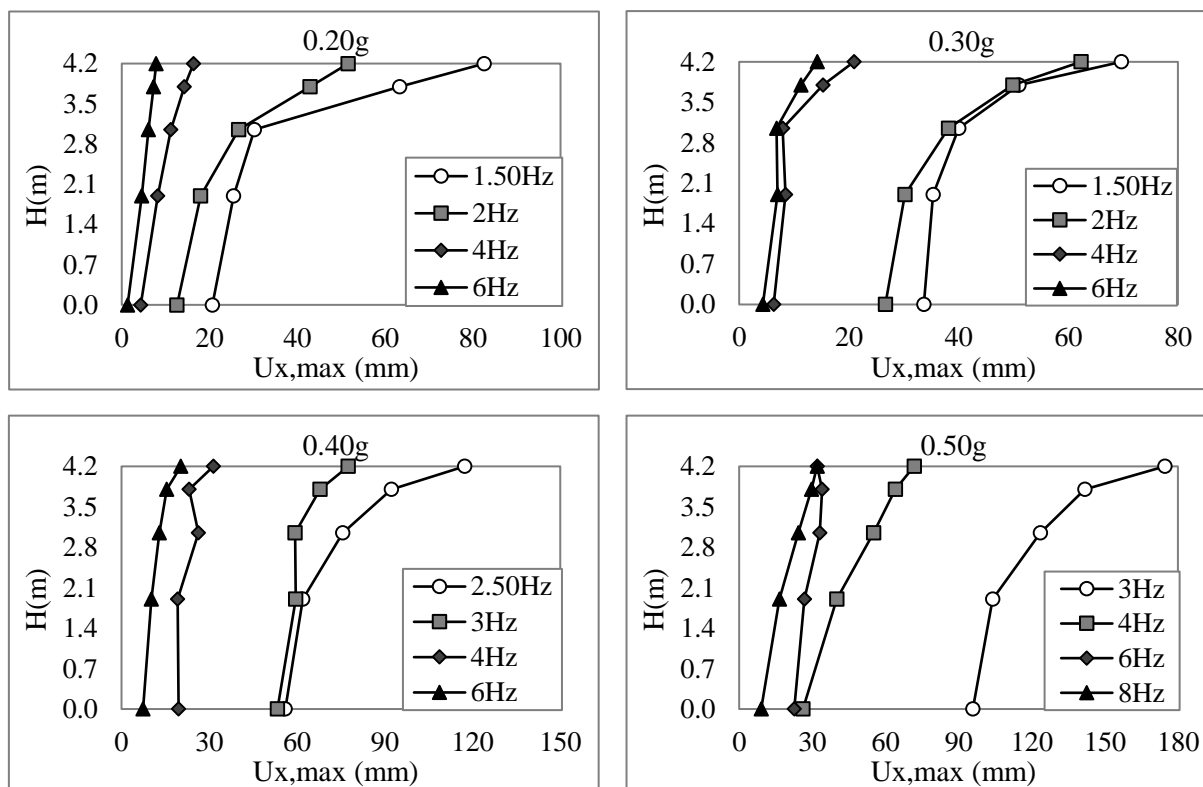
Από την μελέτη των παραπάνω σχημάτων εξάγονται τα συμπεράσματα:

- Σε κάθε περίπτωση οι μέγιστες γωνίες στροφής αναπτύσσονται στη βάση του κιονόκρανου.
- Για μια δεδομένη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης επιφέρει μείωση στις μέγιστες τιμές των γωνιών στροφής των σπονδύλων. Η μείωση αυτή είναι απότομη στις χαμηλές συχνότητες και γίνεται πιο ομαλή καθώς οι τιμές της συχνότητας διέγερσης αυξάνονται.
- Στις διεγέρσεις μικρής επιτάχυνσης, καθώς οι τιμές της συχνότητας διέγερσης αυξάνονται, οι μέγιστες γωνίες στροφής στη βάση του κιονόκρανου είναι ανάλογες με τις μέγιστες γωνίες λικνισμού (θ_x , θ_z) στη βάση του σπονδύλου 3, σε όλες τις συχνότητες.

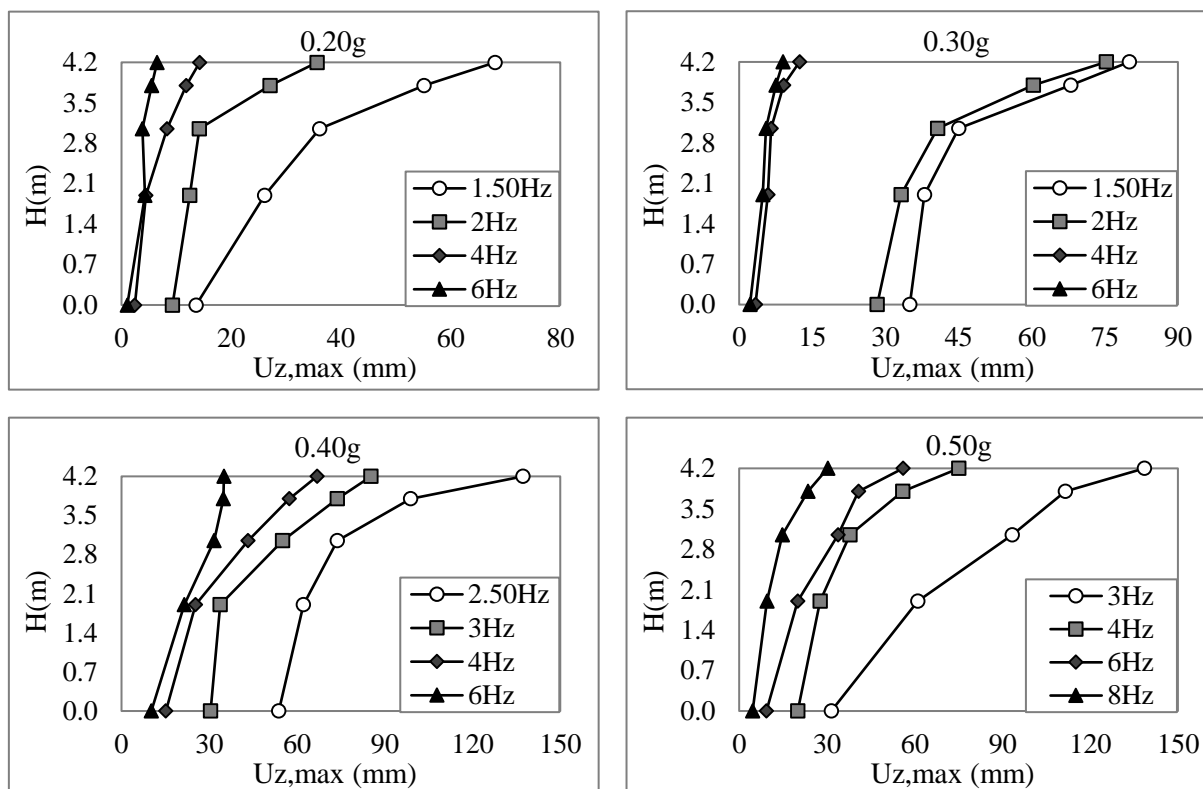
- Διατηρώντας σταθερή την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη διαφορά στις τιμές των μέγιστων γωνιών λικνισμού θ_x και θ_z μεταξύ διαδοχικών σπονδύλων.
- Στις διεγέρσεις μεγάλης έντασης ($\alpha_g = 0.40g$, $\alpha_g = 0.50g$) οι μέγιστες γωνίες στροφής περί τον άξονα y είναι σχεδόν ίδιες σε όλους τους σπονδύλους, για όλες τις επιταχύνσεις που μελετήθηκαν.

5.6. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων

Στα Σχήματα 5.16 και 5.17, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x και U_z αντίστοιχα, για τιμές των συχνοτήτων διέγερσης και των εδαφικών επιταχύνσεων που δεν οδηγούν τον κίονα σε ανατροπή.



Σχήμα 5.16. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).



Σχήμα 5.17. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_z για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).

Από την μελέτη των σχημάτων αυτών προκύπτουν τα συμπεράσματα:

- Σε όλες τις διεγέρσεις η μεγαλύτερη τιμή μέγιστης μετατόπισης εντοπίζεται στη στέψη του κιονόκρανου.
- Διατηρώντας σταθερή την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης οδηγεί σε μείωση των μέγιστων μετατοπίσεων όλων των σπονδύλων.
- Για μια συγκεκριμένη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης προκαλεί μικρότερη διαφορά στις τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων μεταξύ των διαδοχικών σπονδύλων.

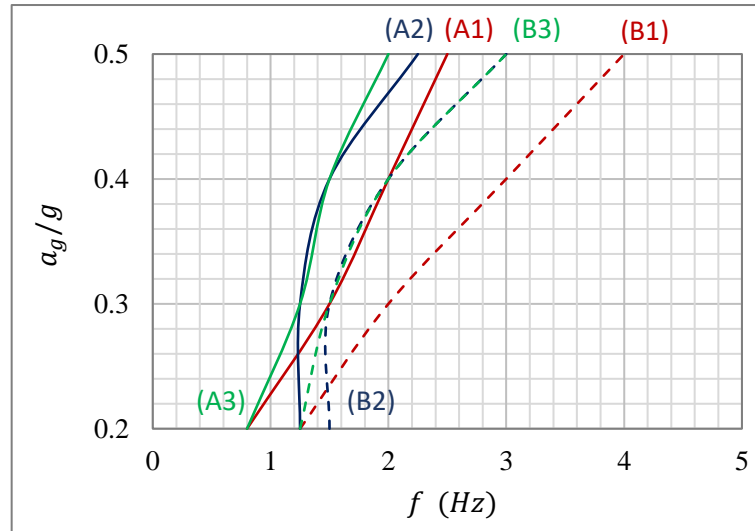
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

6.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης – συχνότητας διέγερσης

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα της ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g σε συνάρτηση με την συχνότητα διέγερσης f , για το αριθμητικό μοντέλο του σπονδυλωτού κίονα που δεν διαθέτει γόμφους (μοντέλο 1), καθώς και για τα αριθμητικά μοντέλα του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους όταν η εδαφική διέγερση επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων (μοντέλο 2) και όταν η εδαφική διέγερση επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς αυτόν (μοντέλο 3). Στο διάγραμμα αυτό, αριστερά των καμπυλών A_i ($i = 1,2,3$) ορίζεται η περιοχή όπου οι συνδυασμοί συχνοτήτων και εδαφικών επιταχύνσεων οδηγούν σε ανατροπή του κίονα, ενώ δεξιά των καμπυλών B_i ($i = 1,2,3$) ορίζεται η περιοχή των συχνοτήτων και των εδαφικών επιταχύνσεων στην οποία κυρίαρχο φαινόμενο της απόκρισης του κίονα είναι η ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων. Τέλος, για τιμές εδαφικής επιτάχυνσης και συχνότητας διέγερσης μεταξύ των καμπυλών A_i και B_i , η απόκριση του κίονα χαρακτηρίζεται από φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης.

Από τη μελέτη του σχήματος 6.1 προκύπτει ότι η ύπαρξη των γόμφων μειώνει το εύρος της περιοχής στην οποία ο συνδυασμός επιταχύνσεων – συχνοτήτων οδηγεί σε ανατροπή του κίονα, με μόνη εξαίρεση την περίπτωση $a_g = 0.20g$, όπου εκεί φαίνεται ότι ο κίονας χωρίς γόμφους έχει καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το μοντέλο 2, στο οποίο η διέγερση είναι παράλληλη στον άξονα των γόμφων. Η ύπαρξη των γόμφων μειώνει επίσης το εύρος της περιοχής όπου η απόκριση του κίονα χαρακτηρίζεται από φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης και τέλος αυξάνει το εύρος της περιοχής όπου ο συνδυασμός εδαφικών επιταχύνσεων – συχνοτήτων διέγερσης οδηγεί σε ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων. Συνεπώς, η ύπαρξη των γόμφων αυξάνει την ευστάθεια του κίονα με εξαίρεση την περίπτωση χαμηλών επιταχύνσεων διέγερσης ($a_g = 0.20g$), η οποία επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γομφων.



Σχήμα 6.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g σε συνάρτηση με την συχνότητα διέγερσης f , για τα αριθμητικά μοντέλα 1,2 και 3 του σπονδυλωτού κίονα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, εξάγονται τα συμπεράσματα:

- Το αριθμητικό μοντέλο του κίονα με γόμφους, στο οποίο η εδαφική διέγερση επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα που ορίζουν οι γόμφοι (μοντέλο 3), ανατρέπεται για μικρότερες τιμές των συχνοτήτων διέγερσης σε σχέση με το αριθμητικό μοντέλο του κίονα που δεν διαθέτει γόμφους (μοντέλο 1). Παράλληλα, το εύρος των συχνοτήτων διέγερσης που προκαλούν φαινόμενα ολίσθησης με λικνισμό είναι μικρότερο στο μοντέλο 3 από ότι στο μοντέλο 1 για κάθε τιμή εδαφικής επιτάχυνσης.
- Το αριθμητικό μοντέλο του κίονα με γόμφους, στο οποίο η εδαφική διέγερση επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα που ορίζουν οι γόμφοι (μοντέλο 2), όταν η εδαφική επιτάχυνση έχει μεγάλη τιμή, ανατρέπεται και υπόκειται σε φαινόμενα ολίσθησης με λικνισμό για μικρότερες τιμές των συχνοτήτων διέγερσης, σε σχέση με το αριθμητικό μοντέλο του κίονα που δεν διαθέτει γόμφους (μοντέλο 1). Αντίθετα, στις περιπτώσεις που η εδαφική επιτάχυνση έχει μικρή τιμή ($a_g = 0.20g$), η ανατροπή και η ανάπτυξη φαινομένων ολίσθησης με λικνισμό επέρχεται για μεγαλύτερες τιμές συχνότητας διέγερσης στο μοντέλο 2 από ότι στο μοντέλο 1.

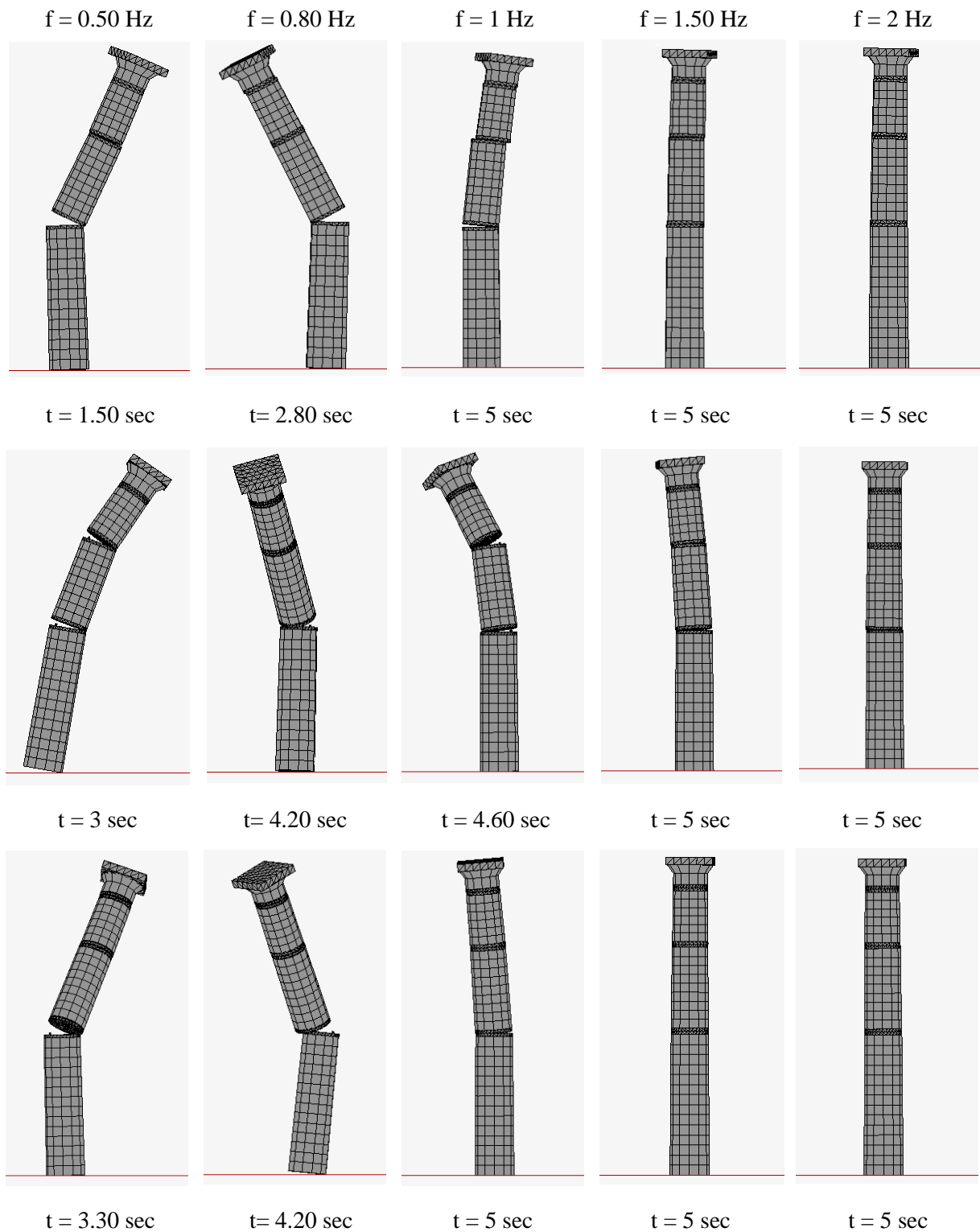
6.2. Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης σπονδυλωτών κιόνων

Στην παρούσα ενότητα δίνονται τα στιγμιότυπα της δυναμικής απόκρισης των τριών αριθμητικών μοντέλων κιόνων, για εδαφικές επιταχύνσεις με τιμές 0.20g, 0.30g, 0.40g και 0.50g. Υπενθυμίζεται ότι το αριθμητικό μοντέλο 1 αφορά στην περίπτωση του σπονδυλωτού κίονα που δεν διαθέτει γόμφους, το μοντέλο 2 στην περίπτωση του κίονα με γόμφους όπου η διέγερση επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων, ενώ το αριθμητικό μοντέλο 3 αναφέρεται στον σπονδυλωτό κίονα με γόμφους όπου η εδαφική διέγερση επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα αυτών. Τα στιγμιότυπα που αναφέρονται στη χρονική στιγμή των 5sec, αντιστοιχούν σε περιπτώσεις που οι σπόνδυλοι των κιόνων δεν ανατρέπονται, ενώ όταν η χρονική στιγμή είναι διαφορετική, οι κίονες ανατρέπονται. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις των γόμφων στις περιπτώσεις όπου τα τρία αριθμητικά μοντέλα κιόνων δεν υπόκεινται σε κατάρρευση ταυτόχρονα.

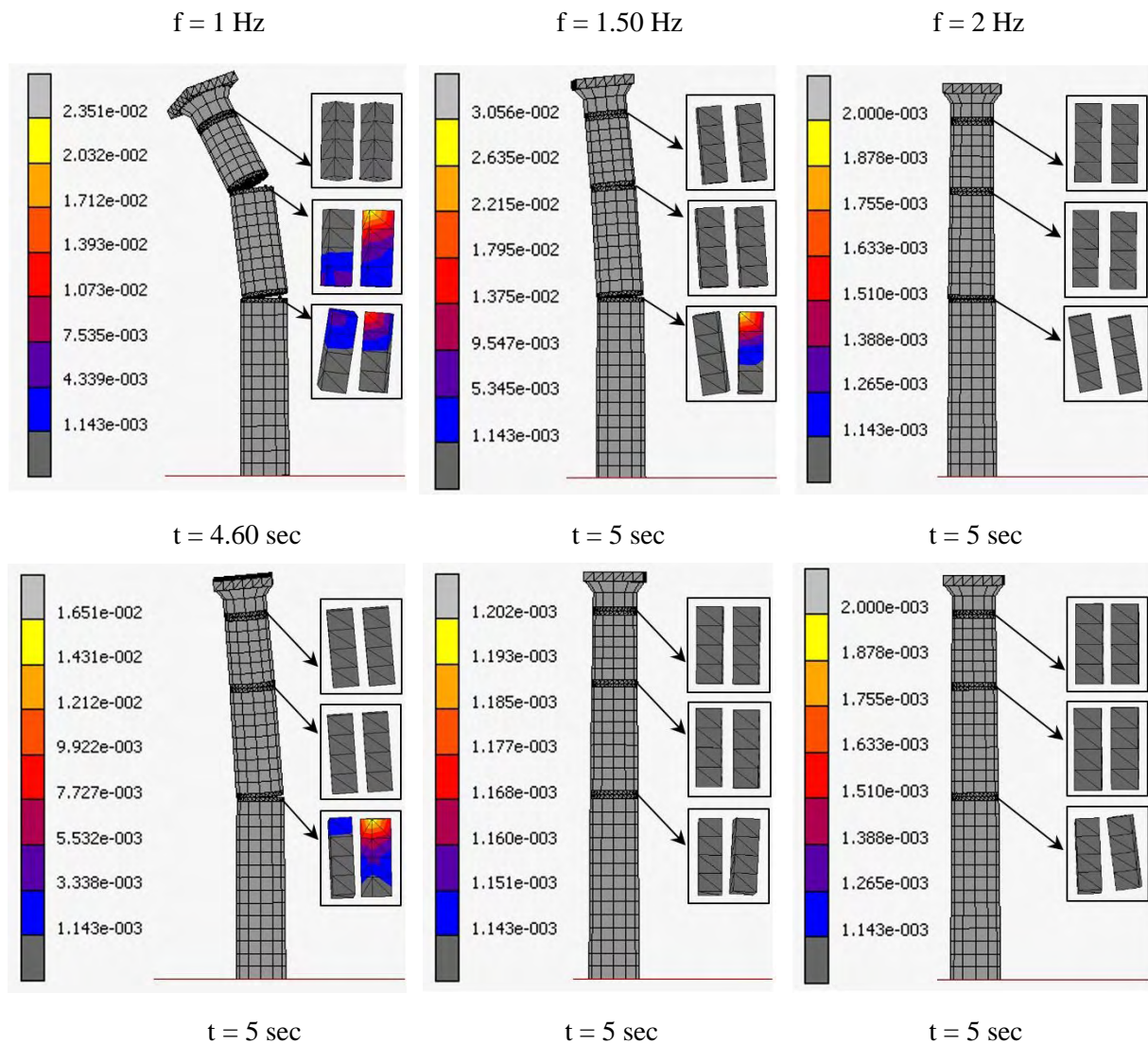
Σύμφωνα με το σχήμα 6.2, όταν η εδαφική επιτάχυνση παίρνει την τιμή 0.20g και η συχνότητα διέγερσης είναι 0.50Hz, οι κίονες των μοντέλων 1 και 2 καταρρέουν λόγω ανάπτυξης σημαντικών γωνιών λικνισμού περί τον άξονα z, ενώ ο κίονας του μοντέλου 3 καταρρέει καθώς αναπτύσσει έντονο λικνισμό τόσο περί τον άξονα x όσο και περί τον άξονα z. Για συχνότητα διέγερσης ίση με 0.80Hz, το αριθμητικό μοντέλο του κίονα χωρίς γόμφους (μοντέλο 1) υπόκειται σε ανατροπή λόγω έντονου λικνισμού περί τον άξονα z, ενώ τα μοντέλα του κίονα με γόμφους (μοντέλα 2 και 3) ανατρέπονται λόγω ταυτόχρονης ανάπτυξης μεγάλων γωνιών λικνισμού θ_x και θ_z . Αναφέρεται ότι ο έντονος λικνισμός περί τον άξονα x, συνοδεύεται και από φαινόμενα ολισθήσεων μεταξύ των σπονδύλων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση στην οποία η εδαφική συχνότητα ισούται με 1Hz, διότι ανατρέπεται μόνον ο κίονας με γόμφους με διεύθυνση διέγερσης παράλληλη στον άξονα των γόμφων (μοντέλο 2). Επιπλέον, όταν $f = 1.50\text{Hz}$ σε κανένα μοντέλο δεν επέρχεται κατάρρευση και οι ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων του κίονα χωρίς γόμφους είναι φανερά μεγαλύτερες από αυτές των κιόνων με γόμφους. Τέλος, παρατηρείται ότι για συχνότητα διέγερσης $f > 2\text{Hz}$, οι ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων είναι σημαντικά μικρές και στα τρία αριθμητικά μοντέλα.

Στο σχήμα 6.3, παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις των γόμφων για συχνότητα διέγερσης με τιμές 1Hz, 1.50Hz και 2Hz και εδαφική επιτάχυνση 0.20g.



Σχήμα 6.2. Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή 0.20g, για το αριθμητικό μοντέλο 1 (1^η σειρά), το αριθμητικό μοντέλο 2 (2^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (3^η σειρά).



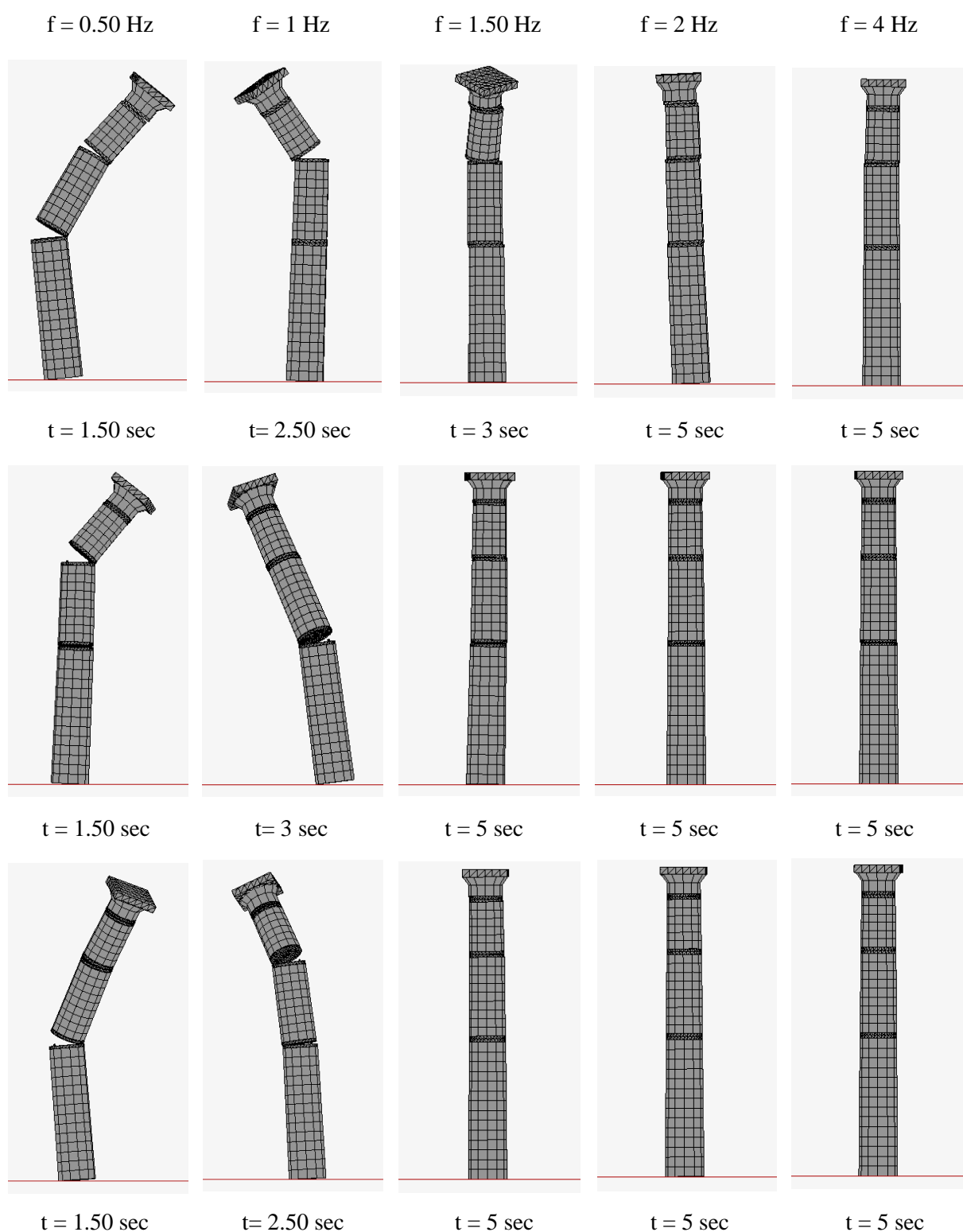
Σχήμα 6.3. Παραμορφώσεις γόμφων στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή 0.20g, για το αριθμητικό μοντέλο 2 (1^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (2^η σειρά).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3, για εδαφική επιτάχυνση με τιμή 0.20g ο χάλυβας των γόμφων διαρρέει και αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις όταν $f \leq 1.50$ Hz για το μοντέλο 2 και όταν $f \leq 1$ Hz για το μοντέλο 3. Μάλιστα, παρατηρείται ότι οι παραμορφώσεις αυτές σημειώνονται μόνο στους γόμφους μεταξύ των σπονδύλων 1 – 2 και 2 – 3. Για συχνότητες διέγερσης με μεγαλύτερες τιμές από τις προαναφερόμενες, οι παραμορφώσεις των γόμφων είναι ελαστικές. Υπογραμμίζεται ότι για δεδομένη τιμή της εδαφικής συχνότητας, οι γόμφοι του μοντέλου 2 αναπτύσσουν εντονότερες παραμορφώσεις σε σχέση με τους γόμφοι του μοντέλου 3.

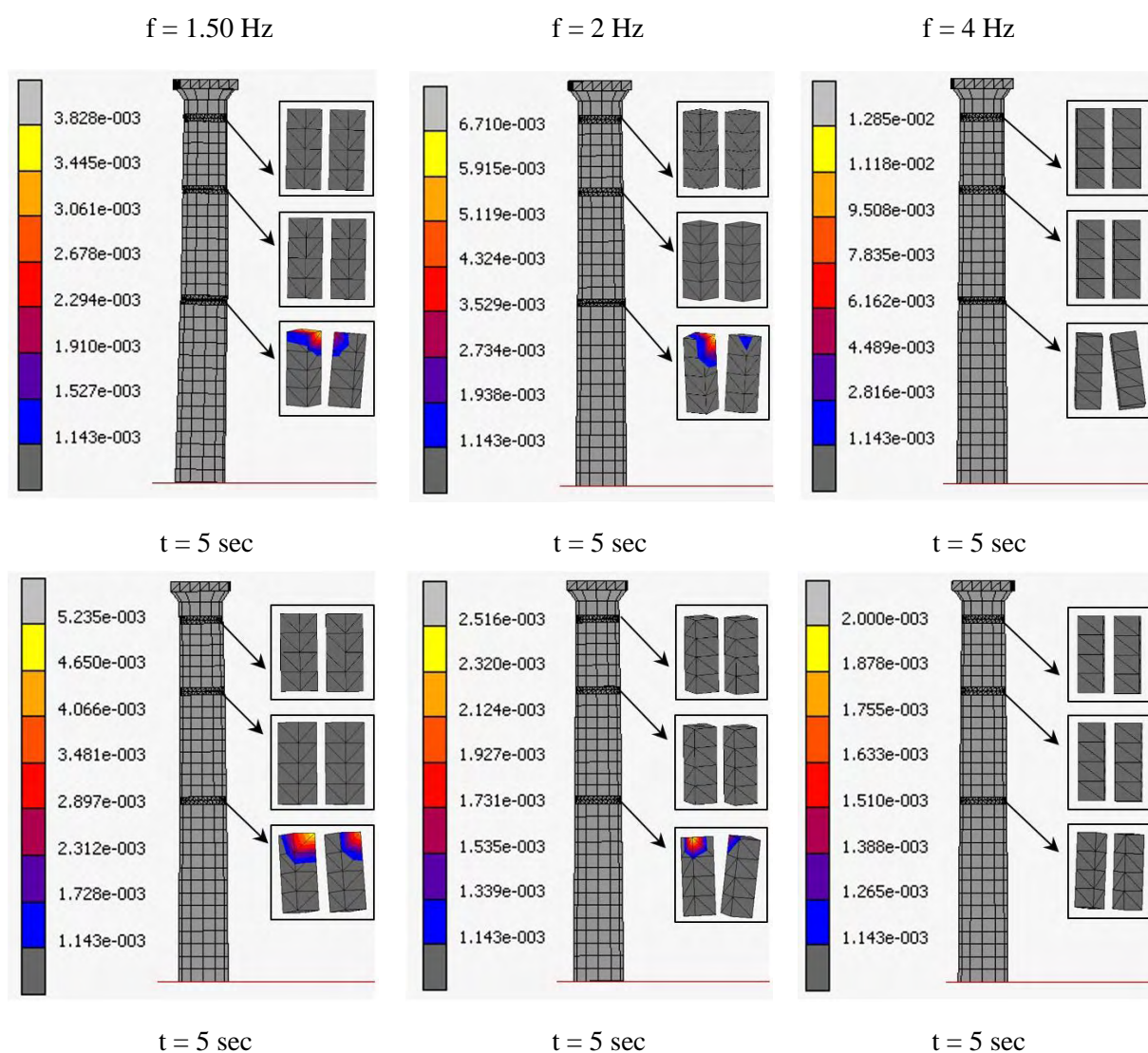
Από τη μελέτη του Σχήματος 6.4, το οποίο αναφέρεται στην περίπτωση όπου $\alpha_g = 0.30g$, προκύπτει ότι όταν η συχνότητα διέγερσης είναι $f = 0.50 \text{ Hz}$, οι σπόνδυλοι των κιόνων στα μοντέλα 1 και 2 ανατρέπονται λόγω έντονου λικνισμού ως προς τον άξονα z , ενώ το μοντέλο 3 καταρρέει λόγω έντονου λικνισμού περί τους άξονες x και z . Επιπλέον, όταν $f = 1 \text{ Hz}$ ο κίονας του μοντέλου 1 ανατρέπεται επειδή αναπτύσσει μεγάλες γωνίες λικνισμού θ_z , σε αντίθεση με τους κίονες των μοντέλων 2 και 3 η κατάρρευση των οποίων οφείλεται σε ταυτόχρονη ανάπτυξη σημαντικών γωνιών θ_x και θ_z . Σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις όπου αναπτύσσονται μεγάλες γωνίες θ_x , μεταξύ των σπονδύλων λαμβάνουν χώρα φαινόμενα ολισθήσεων. Η ευεργετική επίδραση των γόμφων στην απόκριση του σπονδυλωτού κίονα γίνεται έντονα αισθητή όταν $f = 1.50 \text{ Hz}$, διότι τα μοντέλα των κιόνων με γόμφους δεν οδηγούνται σε απώλεια ευστάθειας, σε αντίθεση με τον κίονα που δεν διαθέτει γόμφους, ο οποίος καταρρέει. Τέλος, για συχνότητες διέγερσης ίσες με 2 Hz και 4 Hz , παρατηρείται ότι στα μοντέλα σπονδυλωτού κίονα με γόμφους περιορίζονται οι ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων σε σχέση με τις ολισθήσεις που εμφανίζονται στον κίονα χωρίς γόμφους.

Από τα Σχήματα 6.6 και 6.8, τα οποία αφορούν στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης για εδαφικές επιταχύνσεις με τιμή $0.40g$ και $0.50g$ αντίστοιχα, προκύπτει ότι όταν $f = 0.50 \text{ Hz}$ η ανατροπή των μοντέλων 1 και 2 οφείλεται στην ανάπτυξη έντονων γωνιών λικνισμού περί τον άξονα z , ενώ η ανατροπή του μοντέλου 3 είναι αποτέλεσμα της ταυτόχρονης δράσης έντονου λικνισμού ως προς τους άξονες x και z . Για συχνότητα διέγερσης ίση με 1 Hz και τα τρία αριθμητικά μοντέλα οδηγούνται σε κατάρρευση που οφείλεται στις μεγάλες γωνίες λικνισμού θ_x και θ_z των σπονδύλων τους. Επιπλέον όταν $f = 3 \text{ Hz}$ και $f = 4 \text{ Hz}$, όπου δεν καταρρέει κανένα από τα τρία μοντέλα του σπονδυλωτού κίονα, οι ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων των κιόνων που διαθέτουν γόμφους είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται μεταξύ των σπονδύλων του κίονα χωρίς γόμφους. Υπογραμμίζεται ότι για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.40g$ και συχνότητα διέγερσης ίση με 2 Hz , οι σπόνδυλοι του αριθμητικού μοντέλου 1 ανατρέπονται, σε αντίθεση με τα αριθμητικά μοντέλα 2 και 3 όπου οι γόμφοι αποτρέπουν την κατάρρευση των κιόνων. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην περίπτωση όπου η εδαφική επιτάχυνση λαμβάνει την τιμή $0.50g$ και η συχνότητα διέγερσης ισούται με 2.50 Hz (Σχήμα 6.8).

Στα σχήματα 6.5, 6.7 και 6.9 που δίνονται στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις των γόμφων για τιμή εδαφικής επιτάχυνσης $0.30g$, $0.40g$ και $0.50g$ αντίστοιχα.

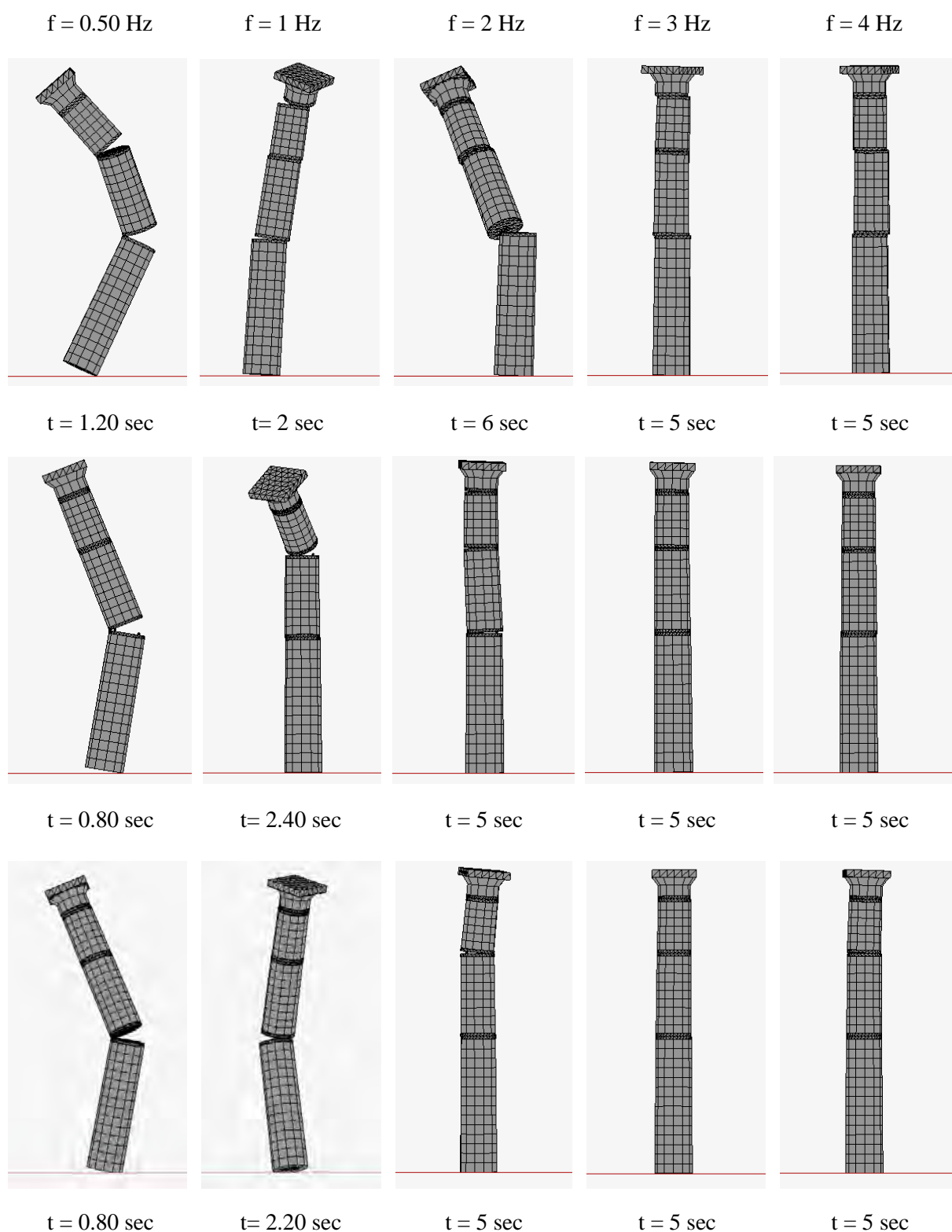


Σχήμα 6.4. Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή 0.30g, για το αριθμητικό μοντέλο 1 (1^η σειρά), το αριθμητικό μοντέλο 2 (2^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (3^η σειρά).

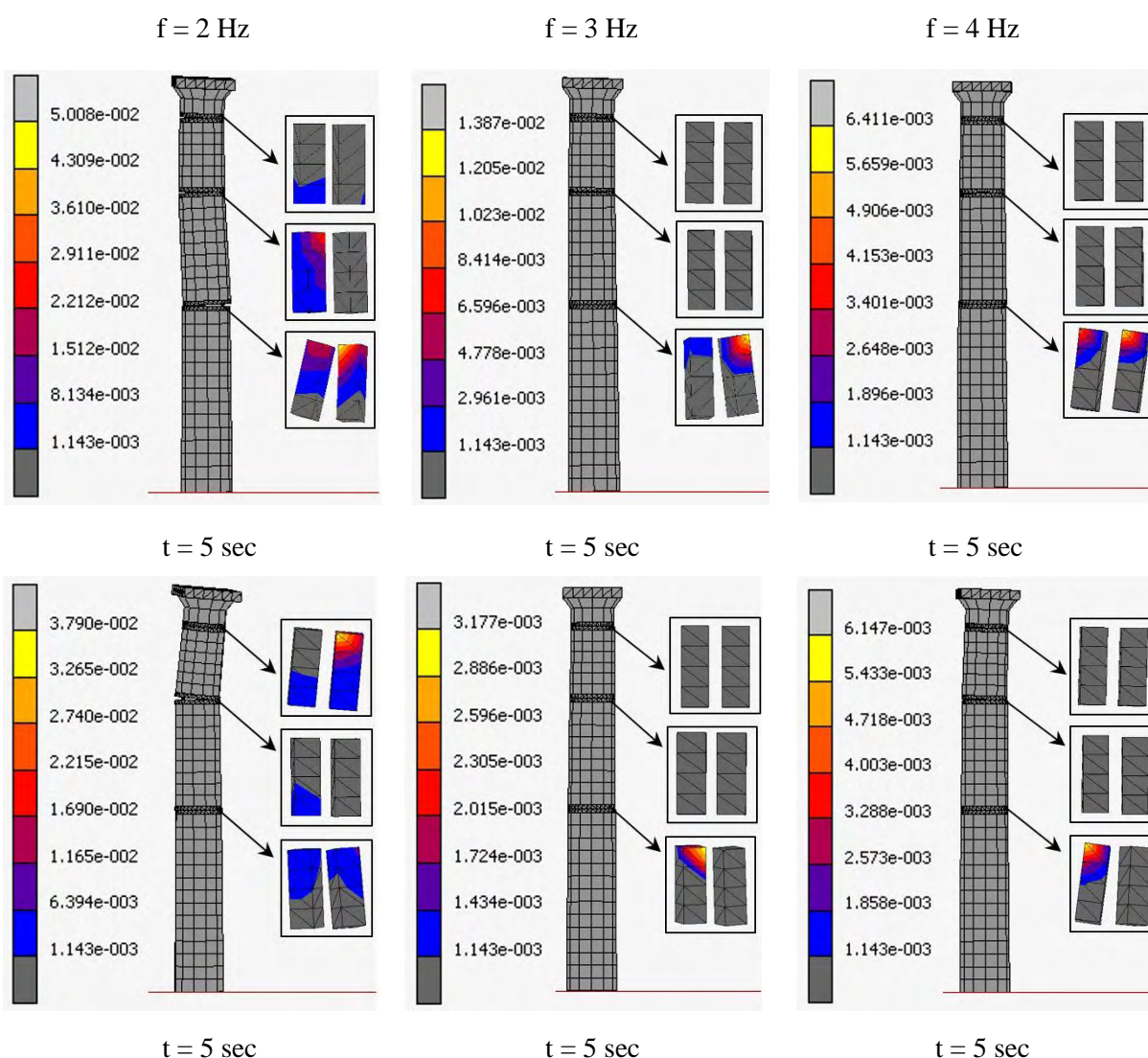


Σχήμα 6.5. Παραμορφώσεις γόμφων στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή 0.30g, για το αριθμητικό μοντέλο 2 (1^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (2^η σειρά).

Όταν η εδαφική επιτάχυνση ισούται με 0.30g (Σχήμα 6.5), το υλικό των γόμφων στα μοντέλα 2 και 3 διαρρέει και αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις για τιμές εδαφικής συχνότητας $f < 4$ Hz. Αξίζει να αναφερθεί ότι μόνο οι γόμφοι που συνδέουν τους σπονδύλους 1 και 2 παραμορφώνονται πλαστικά, καθώς επίσης ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται σε μικρή περιοχή αυτών.

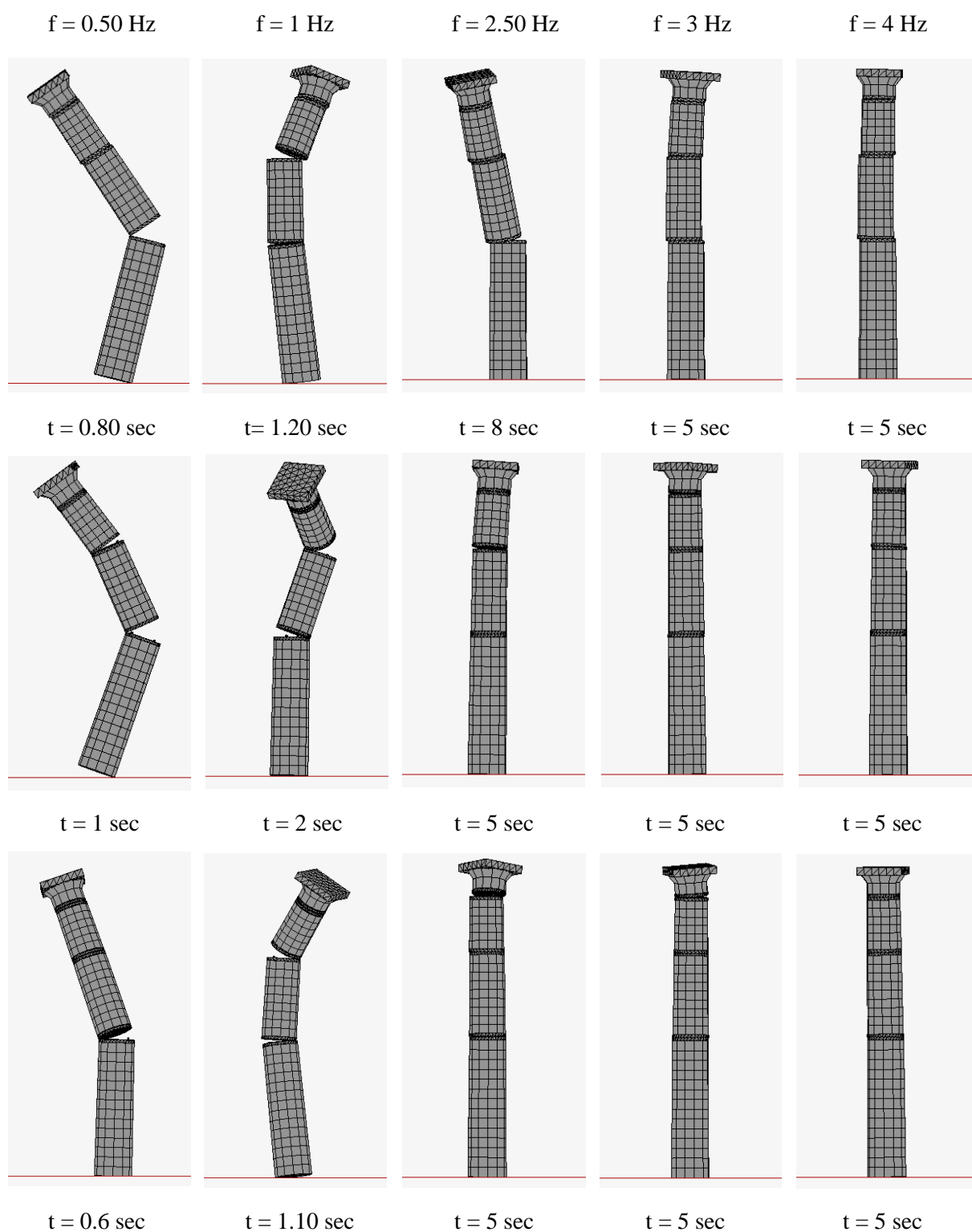


Σχήμα 6.6. Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή 0.40g, για το αριθμητικό μοντέλο 1 (1^η σειρά), το αριθμητικό μοντέλο 2 (2^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (3^η σειρά).

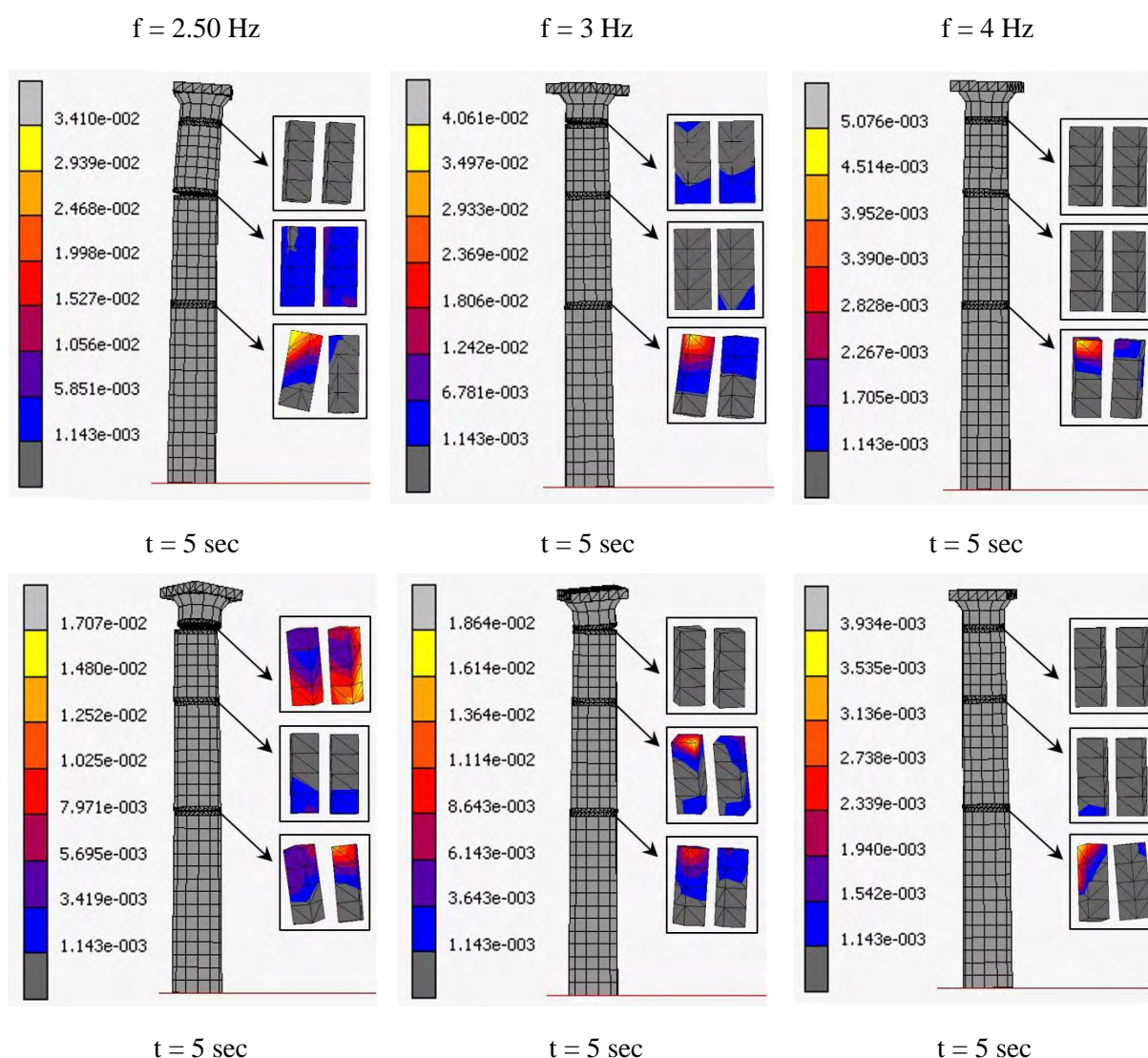


Σχήμα 6.7. Παραμορφώσεις γόμφων στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή 0.40g, για το αριθμητικό μοντέλο 2 (1^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (2^η σειρά).

Στο Σχήμα 6.7, παρατηρείται ότι για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g και $f = 2$ Hz, ο χάλυβας των γόμφων διαρρέει και αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις όχι μόνο στη διεπιφάνεια των σπονδύλων 1 και 2, αλλά και μεταξύ των σπονδύλων 2 – 3 και του σπονδύλου 3 με το κιονόκρανο. Αντίθετα, στις υψηλότερες συχνότητες διαρροή και πλαστικές παραμορφώσεις σημειώνονται μόνο στους γόμφους που συνδέουν τον σπόνδυλο 1 με τον σπόνδυλο 2. Επιπλέον, για κάθε τιμή εδαφικής συχνότητας οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσουν οι γόμφοι του μοντέλου 2 είναι μεγαλύτερες από αυτές των γόμφων του μοντέλου 3.



Σχήμα 6.8. Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή $0.50g$, για το αριθμητικό μοντέλο 1 (1^η σειρά), το αριθμητικό μοντέλο 2 (2^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (3^η σειρά).



Σχήμα 6.9. Παραμορφώσεις γόμφων στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή 0.50g, για το αριθμητικό μοντέλο 2 (1^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (2^η σειρά).

Ο χάλυβας των γόμφων που συνδέουν τους σπονδύλους 1 και 2, διαρρέει και αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις για όλες τις συχνότητες διέγερσης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.9, όταν η εδαφική επιτάχυνση είναι ίση με 0.50g. Οι γόμφοι μεταξύ των σπονδύλων 2 – 3 και μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου διαρρέουν για συχνότητες διέγερσης με τιμή 2.50 Hz και 3 Hz. Σημειώνεται ότι όταν $f = 2.50$ Hz σχεδόν ολόκληρη η επιφάνεια των γόμφων μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου υφίσταται πλαστικοποίηση στο μοντέλο 3, καθώς επίσης και ότι για όλες τις συχνότητες διέγερσης οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις

των γόμφων του μοντέλου 2 είναι μεγαλύτερες από τις μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις των γόμφων του μοντέλου 3.

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, εξάγονται τα συμπεράσματα:

- Η κατάρρευση του αριθμητικού μοντέλου 1 για μικρές τιμές της συχνότητας διέγερσης οφείλεται σε έντονο λικνισμό περί τον άξονα z, ενώ για τις μεγαλύτερες τιμές της συχνότητας διέγερσης οφείλεται σε έντονο λικνισμό περί τους άξονες x και z, τόσο για υψηλές όσο και για χαμηλές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης.
- Οι σπόνδυλοι του αριθμητικού μοντέλου 2 για χαμηλές συχνότητες διέγερσης και χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις, ανατρέπονται λόγω ανάπτυξης έντονων γωνιών λικνισμού περί τον άξονα z. Αντίθετα, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η ανατροπή είναι αποτέλεσμα λικνισμού περί τον άξονα x και του άξονα z ταυτόχρονα.
- Για όλες τις συχνότητες που προκαλούν ανατροπή των σπονδύλων του μοντέλου 3, αίτιο κατάρρευσης αποτελεί η ταυτόχρονη ύπαρξη έντονου λικνισμού περί τους άξονες x και z, για κάθε τιμή εδαφικής επιτάχυνσης.
- Για εδαφική επιτάχυνση μικρής τιμής ($a_g = 0.20g$) το μοντέλο 2 ανατρέπεται για υψηλότερες συχνότητες από ότι τα μοντέλα 1 και 3, ενώ στις επιταχύνσεις μεγαλύτερης τιμής τα μοντέλα 2 και 3 καταρρέουν για τιμές εδαφικής συχνότητας μικρότερες από αυτές του μοντέλου 1.
- Σε κάθε περίπτωση στα μοντέλα 2 και 3 εμφανίζονται μειωμένες ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων σε σχέση με τις ολισθήσεις του μοντέλου 1.
- Στις ασθενείς εδαφικές επιταχύνσεις, πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται μόνο στους γόμφους μεταξύ των σπονδύλων 1 και 2, σε αντίθεση με τις ισχυρές εδαφικές επιταχύνσεις όπου έντονες πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται και μεταξύ των σπονδύλων 2 και 3, καθώς και μεταξύ του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου.
- Στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις, για μια δεδομένη τιμή συχνότητας διέγερσης, οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις των γόμφων του μοντέλου 2 είναι μεγαλύτερες από αυτές των γόμφων του μοντέλου 3.
- Οι μέγιστες τιμές των συχνοτήτων στις οποίες σημειώνεται πλαστικοποίηση των γόμφων στα μοντέλα 2 και 3, αυξάνονται με την αύξηση στην τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης.

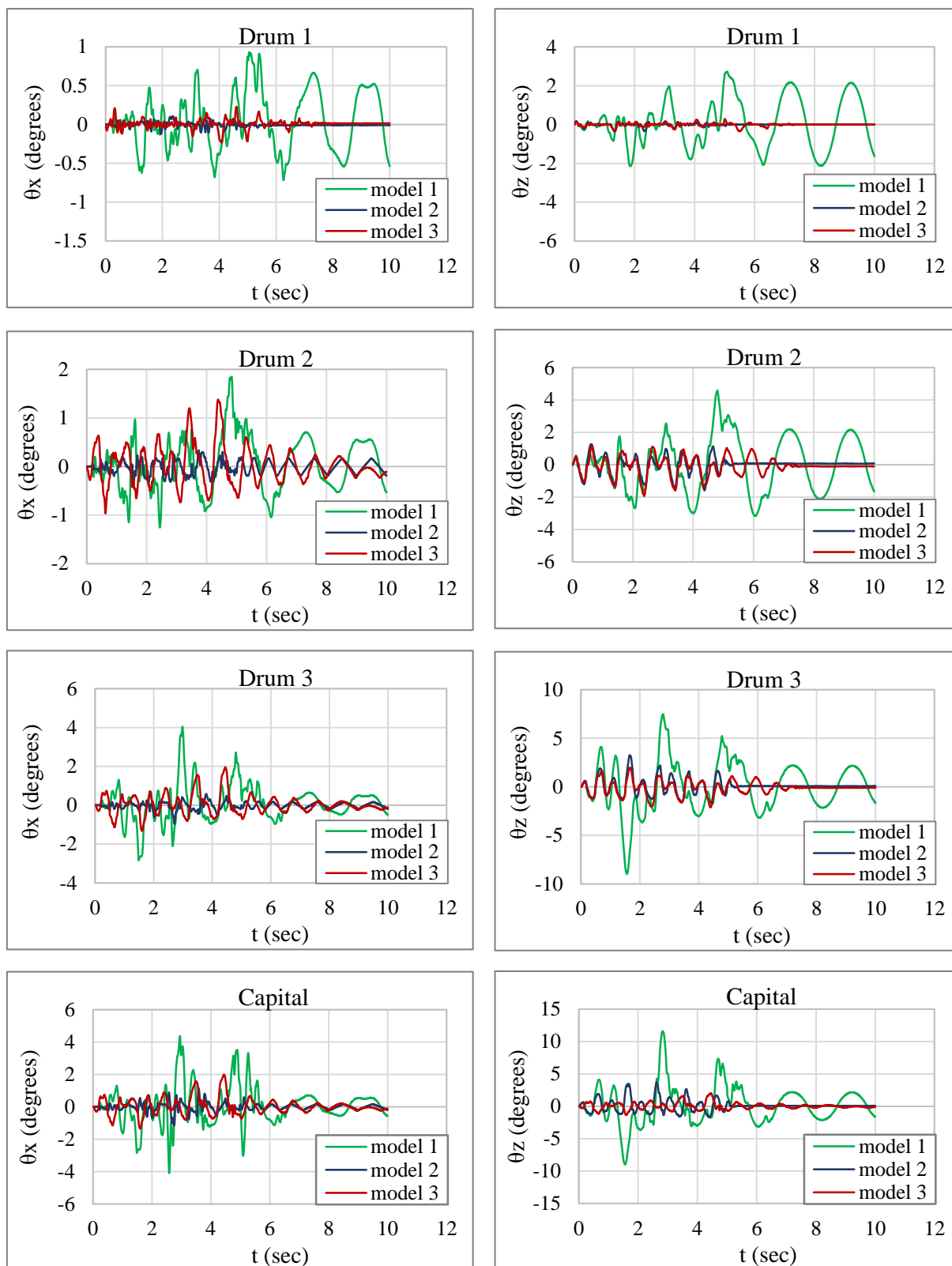
6.3. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου ανά σπόνδυλο

Στα Σχήματα 6.10 – 6.12 παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των γωνιών στροφής ανά σπόνδυλο των τριών αριθμητικών μοντέλων, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g και συχνότητες διέγερσης 2Hz και 4Hz, ενώ στα Σχήματα 6.13 – 6.15 δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g και συχνότητες διέγερσης 3Hz και 4Hz αντίστοιχα.

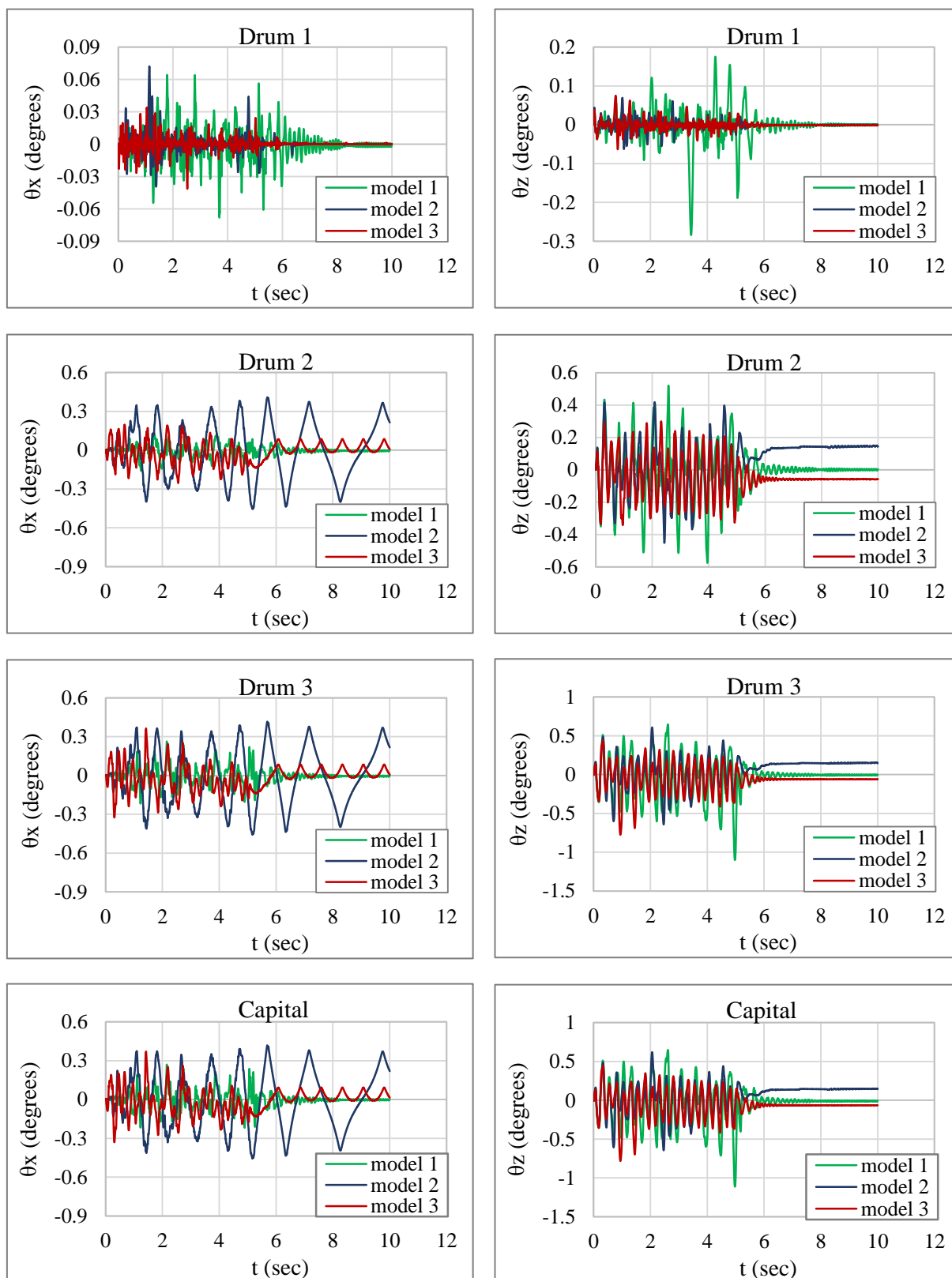
Για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g, όταν $f = 2 \text{ Hz}$ οι γωνίες λικνισμού θ_x και θ_z (Σχήμα 6.10), είναι μικρότερες σε όλους τους σπονδύλους στις περιπτώσεις των κιόνων με γόμφους σε σχέση με τον κίονα χωρίς γόμφους (μοντέλο 1). Αντίθετα, στις υψηλότερες συχνότητες ($f = 4 \text{ Hz}$) οι γωνίες λικνισμού θ_x και θ_z (Σχήμα 6.11) των σπονδύλων του μοντέλου 2 είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες γωνίες λικνισμού του μοντέλου 1, ενώ οι γωνίες λικνισμού του μοντέλου 3 είναι μικρότερες των αντίστοιχων γωνιών του μοντέλου 1. Όσον αφορά τις γωνίες στροφής περί τον άξονα y , αυτές είναι μικρότερες στα μοντέλα 2 και 3 από ότι στο μοντέλο 1 στις χαμηλές συχνότητες ($f = 2 \text{ Hz}$), ενώ οι παραμένουσες τιμές είναι μεγαλύτερες.

Στην περίπτωση όπου η εδαφική επιτάχυνση είναι 0.40g, οι γωνίες λικνισμού περί τους άξονες x και z (Σχήματα 6.13 και 6.14) καθώς και τόσο οι μέγιστες όσο και οι παραμένουσες γωνίες στροφής περί τον άξονα y (Σχήμα 6.15), είναι μεγαλύτερες σε όλους τους σπονδύλους του κίονα που δεν έχει γόμφους. Υπογραμμίζεται ότι η παρατήρηση αυτή ισχύει τόσο για συχνότητα διέγερσης ίση με 3Hz όσο και για συχνότητα ίση με 4 Hz.

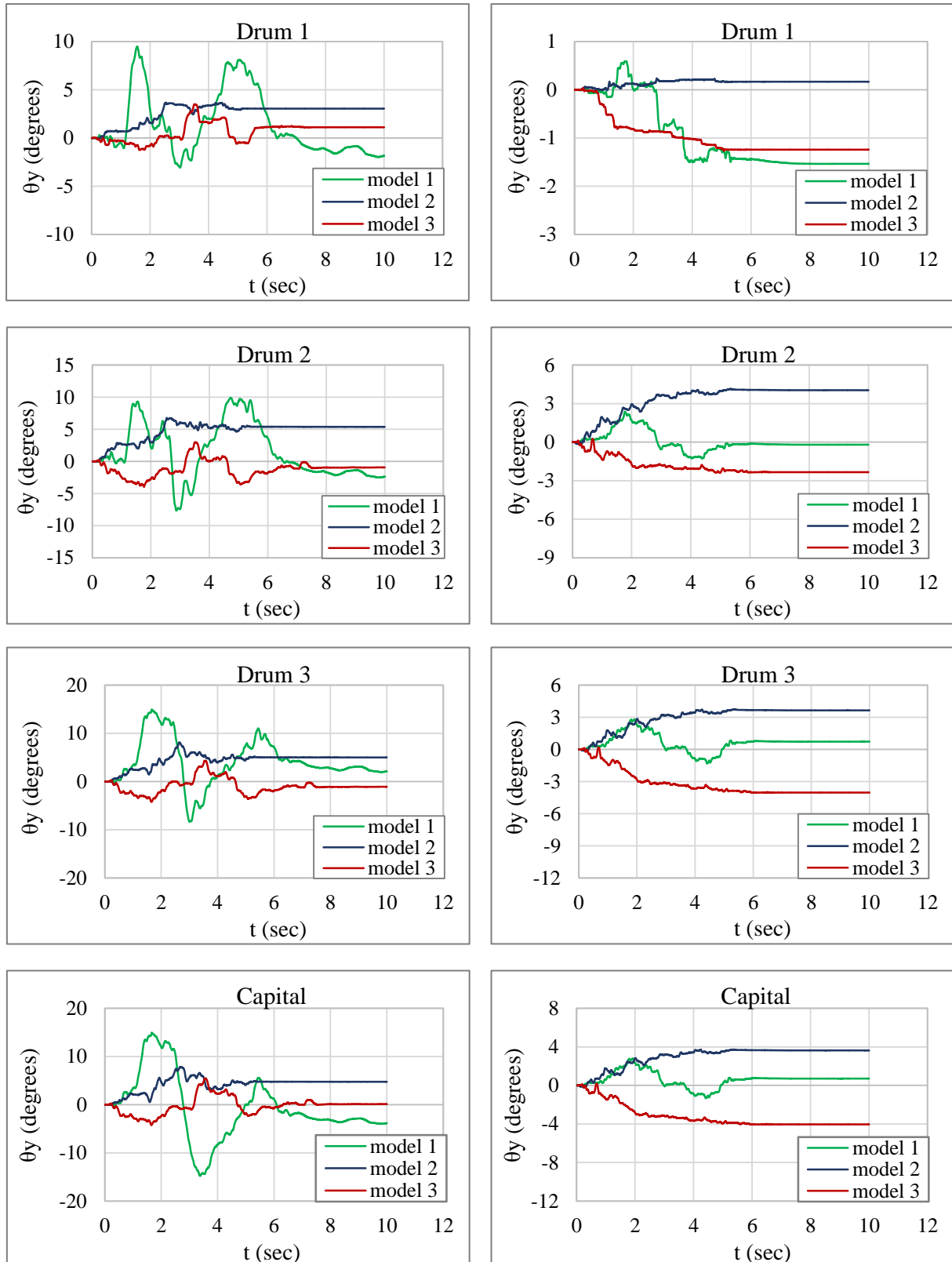
Συνοψίζοντας, με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις τα μοντέλα των κιόνων που διαθέτουν γόμφους, έχουν καθολικά καλύτερη συμπεριφορά από το μοντέλο του κίονα χωρίς γόμφους. Επιπλέον, στις εδαφικές διεγέρσεις με χαμηλές τιμές επιτάχυνσης, όταν οι τιμές της συχνότητας είναι υψηλές, τα μοντέλα των κιόνων με γόμφους παρουσιάζουν μεγαλύτερες γωνίες στροφής σε σχέση με το μοντέλο που δεν διαθέτει γόμφους, ενώ στις χαμηλές συχνότητες οι γωνίες των μοντέλων με γόμφους είναι μικρότερες.



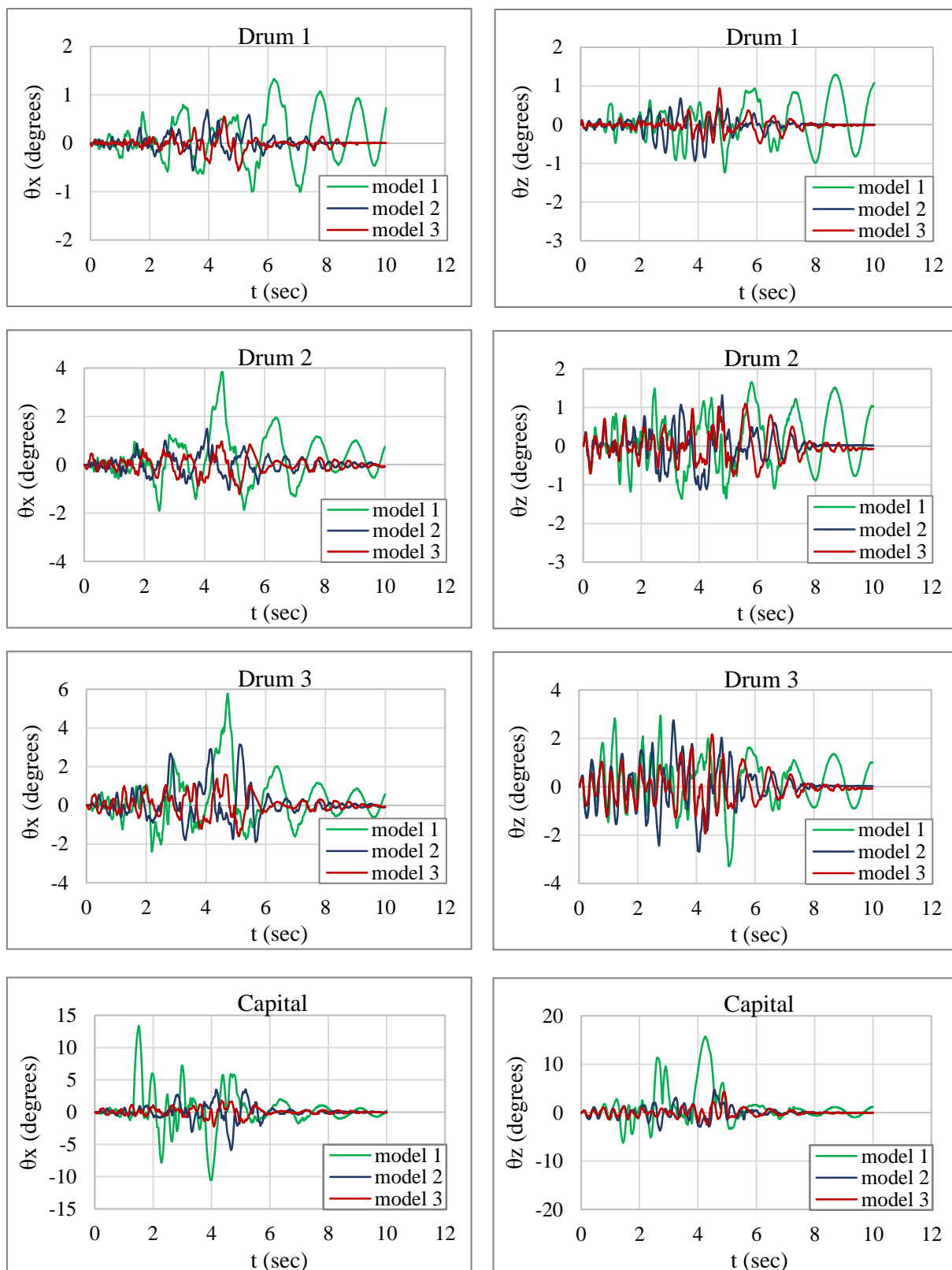
Σχήμα 6.10. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών λικνισμού ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητα διέγερσης 2Hz.



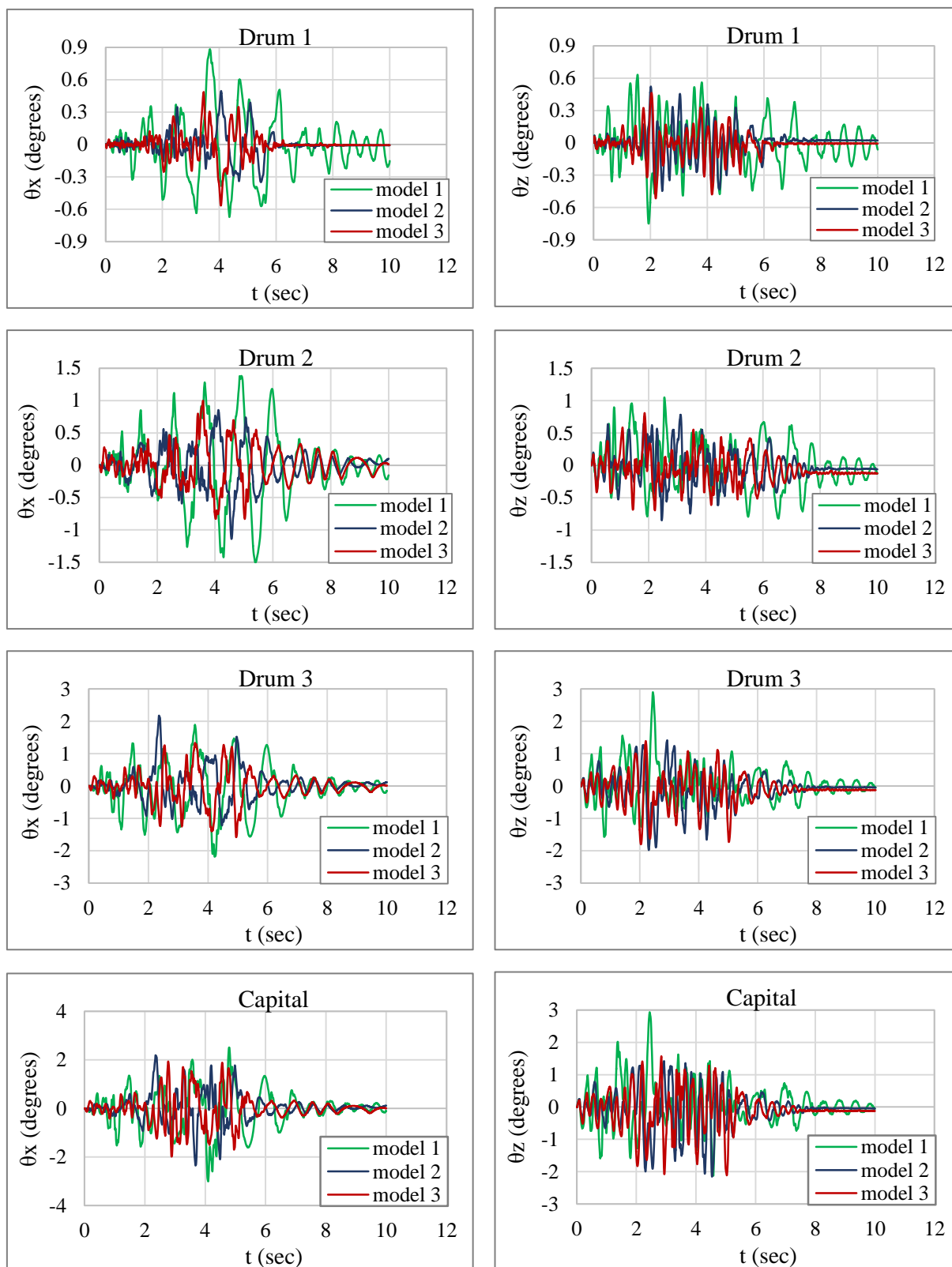
Σχήμα 6.11. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών λικνισμού ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητα διέγερσης 4Hz.



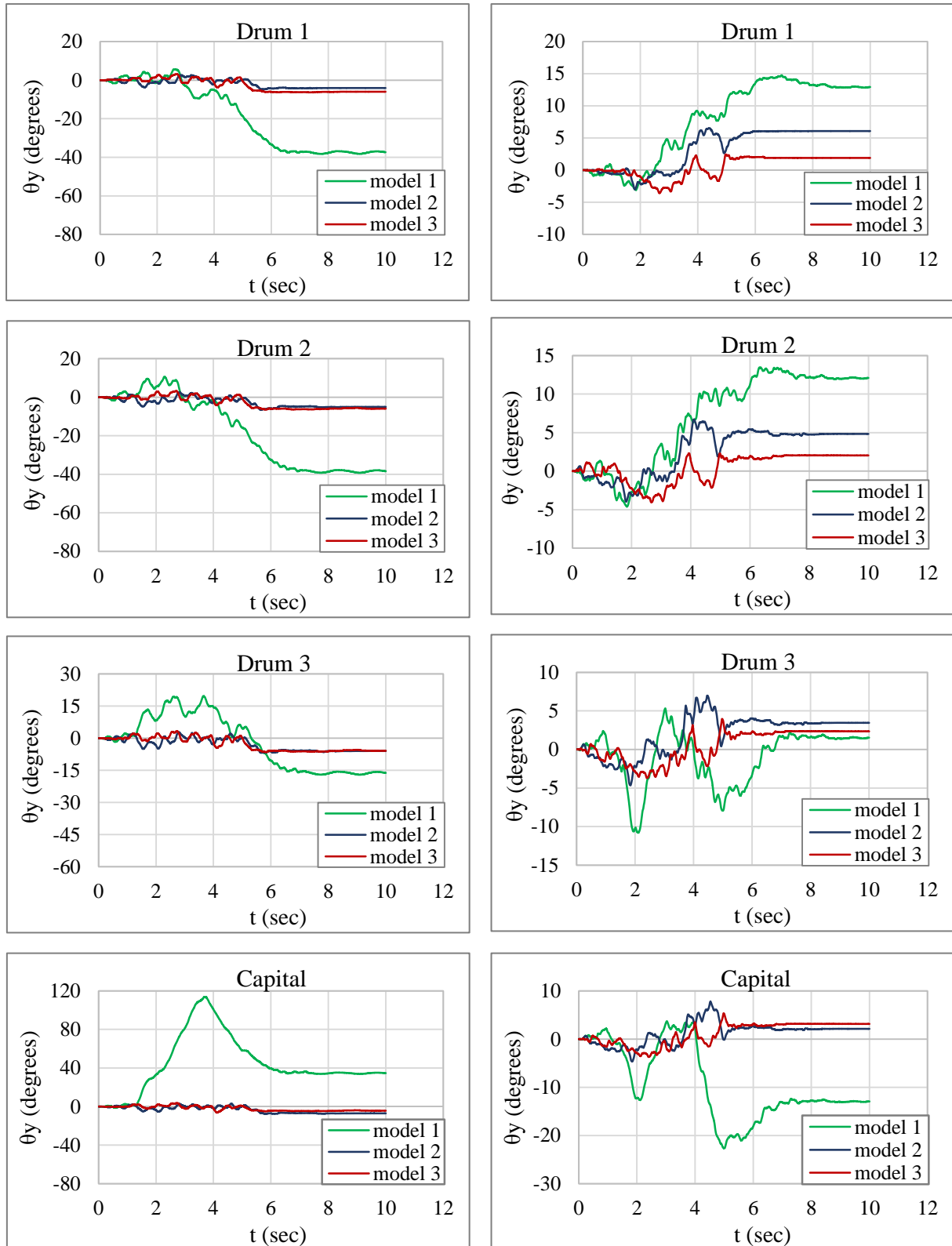
Σχήμα 6.12. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών στροφής περί τον άξονα y ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητες διέγερσης 2Hz (αριστερά) και 4Hz (δεξιά).



Σχήμα 6.13. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών λικνισμού ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητα διέγερσης 3Hz.



Σχήμα 6.14. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών λικνισμού ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητα διέγερσης 4Hz.



Σχήμα 6.15. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών στροφής περί τον άξονα y ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση $0.40g$ και συχνότητες διέγερσης 3Hz (αριστερά) και 4Hz (δεξιά).

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι παραμένουσες γωνίες λικνισμού που εμφανίζονται στα μοντέλα 2 και 3, είναι σε αρκετές περιπτώσεις αποτέλεσμα της παραμόρφωσης των γόμφων, καθώς επίσης και ότι οι τιμές των γωνιών στροφής των σπονδύλων στα μοντέλα 2 και 3 είναι ανάλογες στις περισσότερες περιπτώσεις.

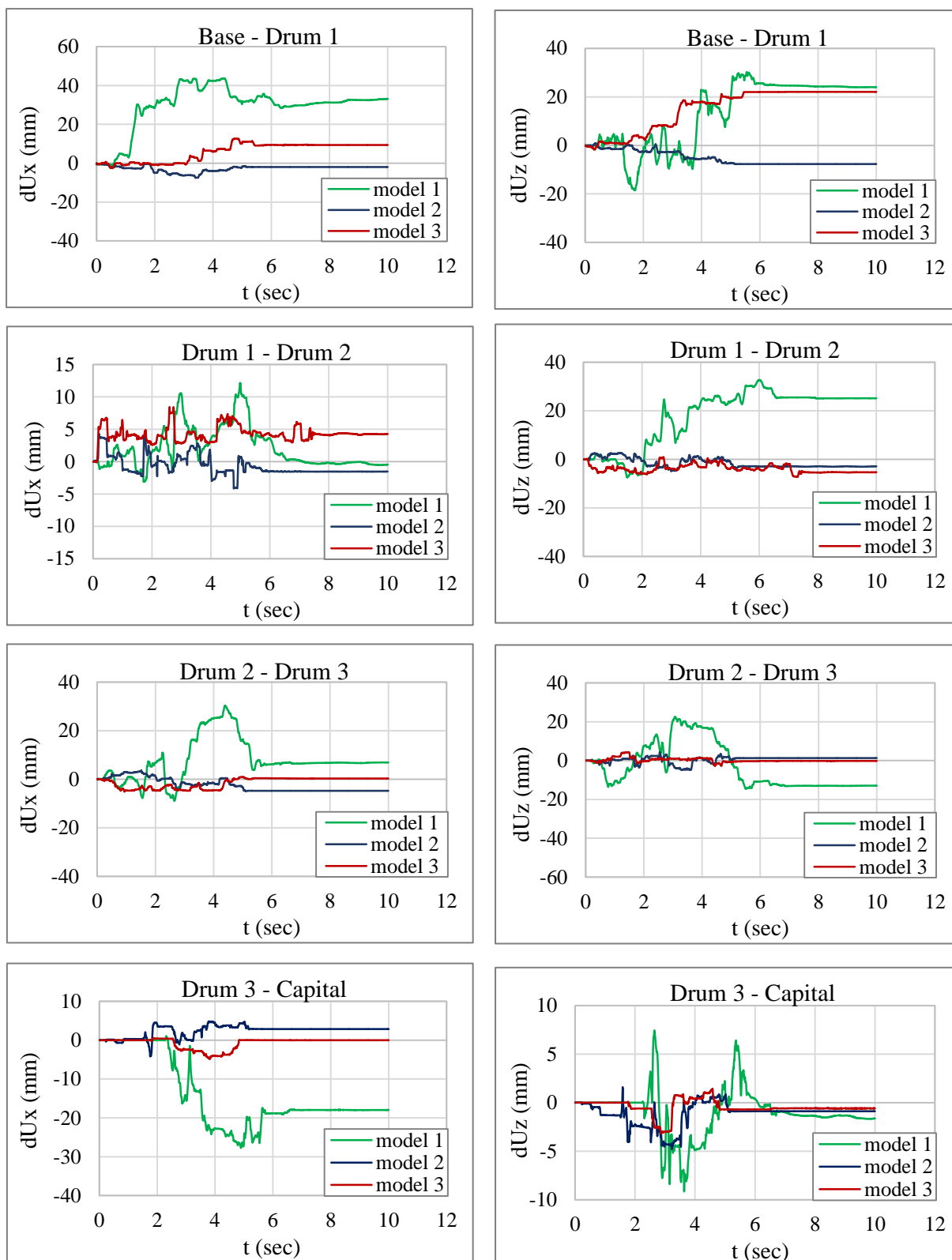
6.4. Διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων – χρόνου ανά διεπιφάνεια

Στα Σχήματα 6.16 και 6.17 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των σχετικών μετατοπίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, σε κάθε διεπιφάνεια μεταξύ των σπονδύλων στα τρία μοντέλα που μελετήθηκαν για $a_g = 0.30g$, $f = 2$ Hz και $f = 4$ Hz αντίστοιχα. Επιπλέον, στα Σχήματα 6.18 και 6.19 δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων για $a_g = 0.40g$, $f = 3$ Hz και $f = 4$ Hz.

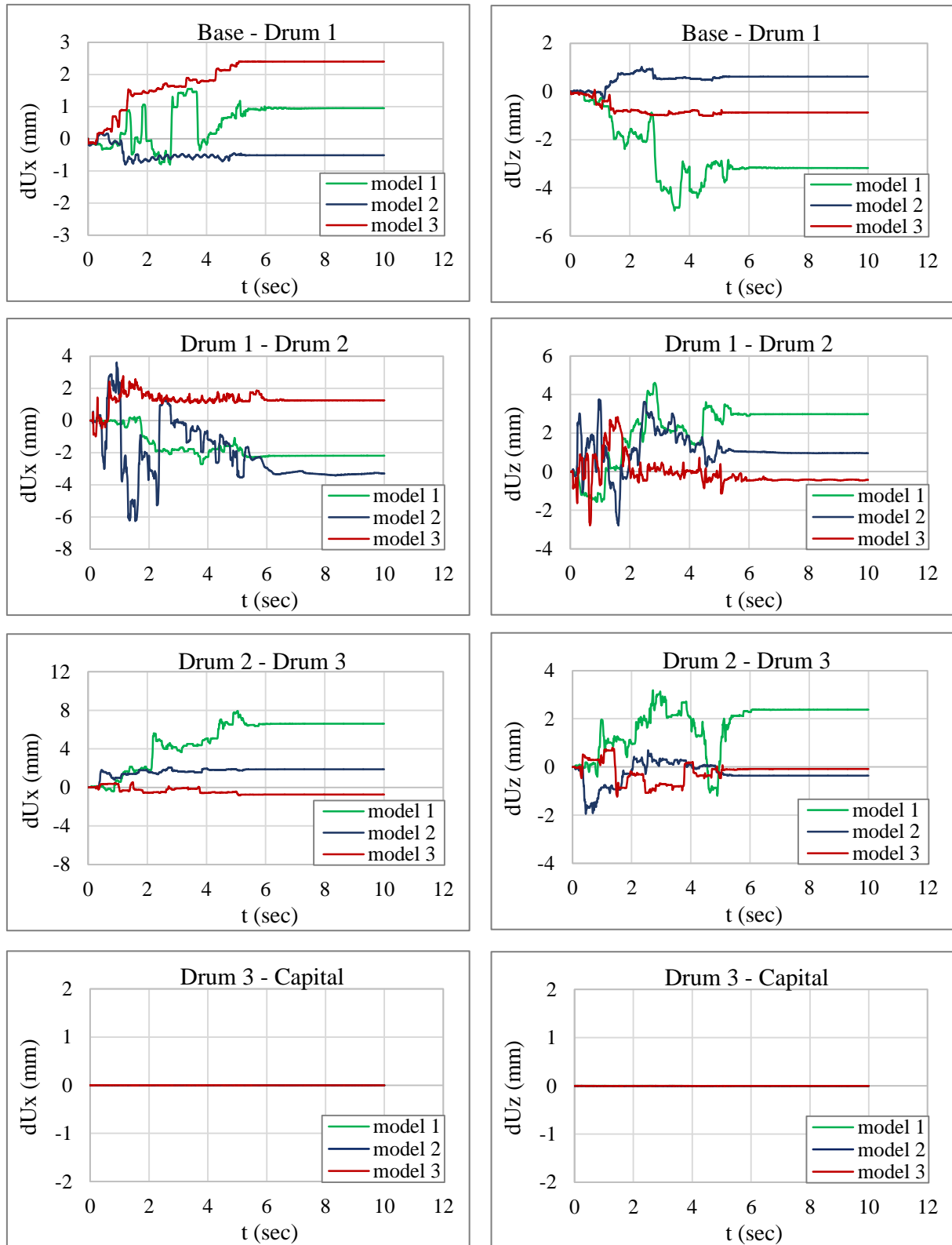
Σύμφωνα με τα Σχήματα 6.16 και 6.17, όταν η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης ισούται με $0.30g$, οι σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων στους κίονες που διαθέτουν γόμφους (μοντέλα 2 και 3), είναι σαφώς μικρότερες συγκρινόμενες με τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων του κίονα χωρίς γόμφους (μοντέλο 1).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση των σχετικών μετατοπίσεων dU_z και η ταυτόχρονη αύξηση των σχετικών μετατοπίσεων dU_x , οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση του μοντέλου 2 οι γόμφοι εξαναγκάζουν τους σπονδύλους σε μεταφορική κίνηση κατά τη διεύθυνση της διέγερσης (άξονας x).

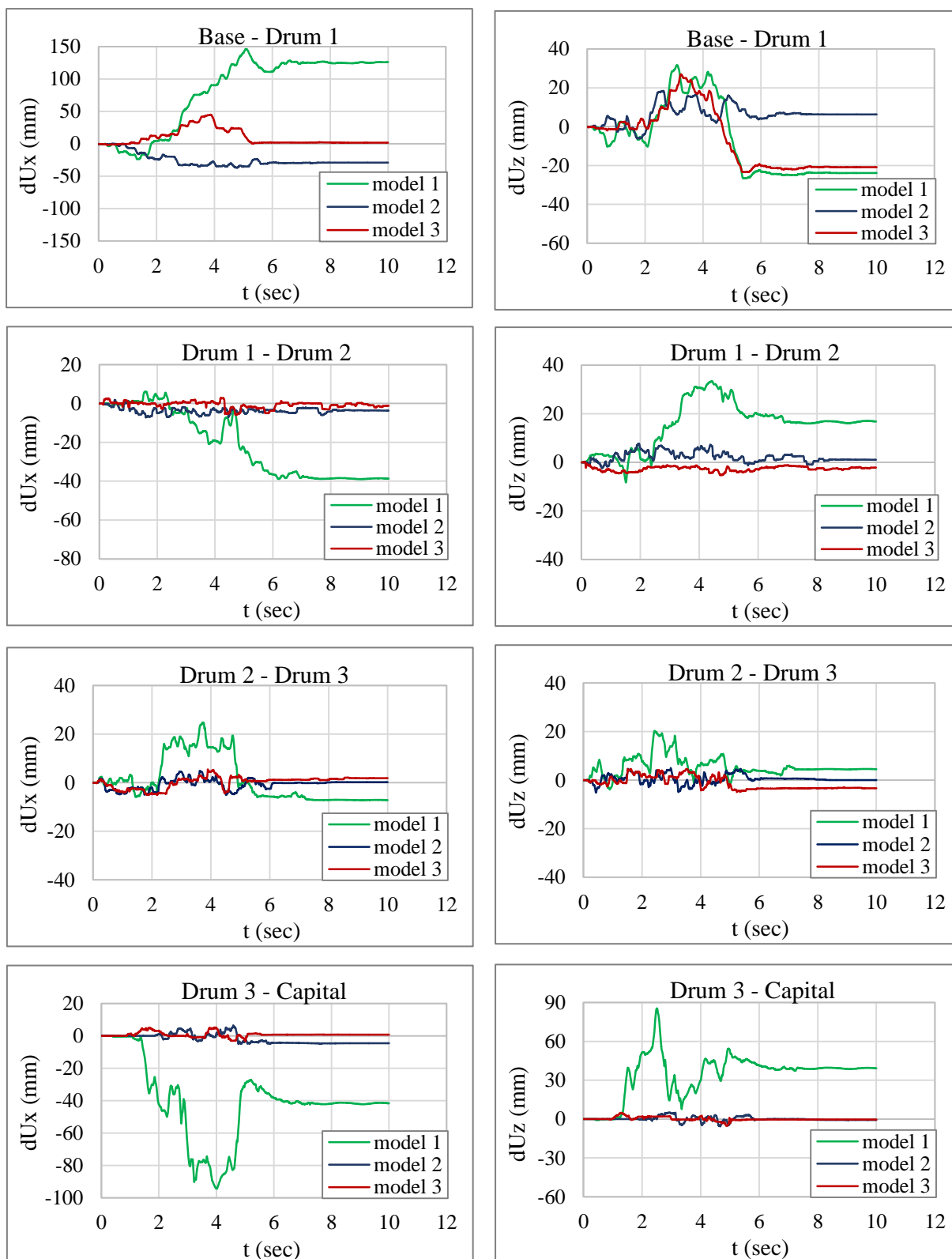
Πρέπει να τονισθεί στο σημείο αυτό ότι παρόλο που η συνιστώσα dU_x ενδέχεται να σημειώσει αύξηση στα μοντέλα 2 και 3 σε σχέση με το μοντέλο 1, η συνολική μετατόπιση μεταξύ δύο διαδοχικών σπονδύλων είναι μικρότερη στους κίονες με γόμφους, σε κάθε περίπτωση όταν $a_g = 0.30g$.



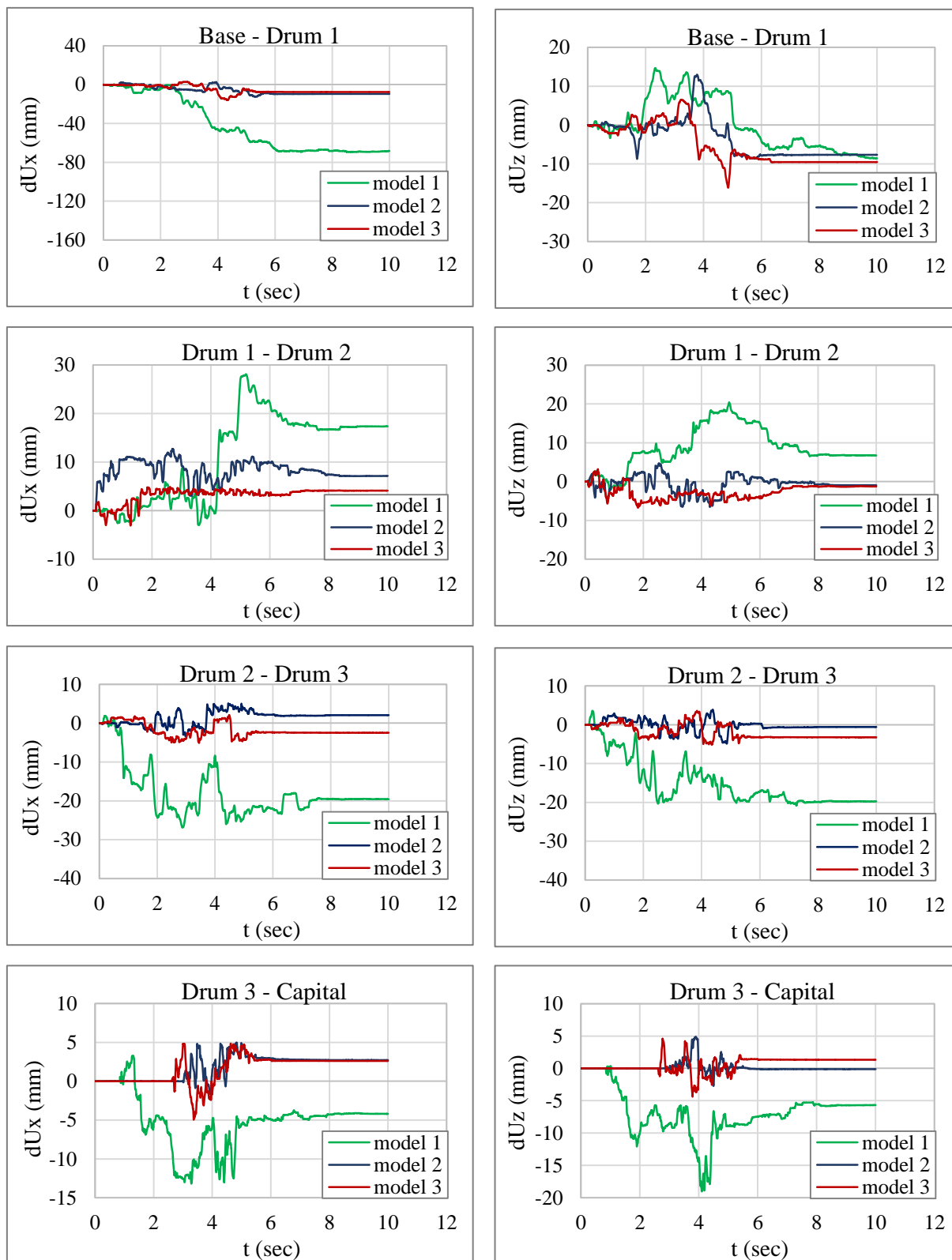
Σχήμα 6.16. Συγκριτικά διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων ανά διεπιφάνεια διαδοχικών σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητα διέγερσης 2Hz.



Σχήμα 6.17. Συγκριτικά διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων ανά διεπιφάνεια διαδοχικών σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητα διέγερσης 4Hz.



Σχήμα 6.18. Συγκριτικά διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων ανά διεπιφάνεια διαδοχικών σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητα διέγερσης 3Hz.



Σχήμα 6.19. Συγκριτικά διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων ανά διεπιφάνεια διαδοχικών σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητα διέγερσης 4Hz.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 6.18 και 6.19 είναι φανερό και εδώ ότι οι σχετικές μετατοπίσεις σε όλες τις διεπιφάνειες μεταξύ των σπονδύλων αλλά και στη διεπιφάνεια της βάσης και του σπονδύλου 1 είναι σημαντικά μικρότερες στα μοντέλα 2 και 3 από ότι στο μοντέλο 1. Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις οι τιμές των παραμενουσών ολισθήσεων στις διεπιφάνειες των σπονδύλων αποκλίνουν σημαντικά από τις τιμές των ολισθήσεων που αναπτύσσονται κατά την επιβολή της εδαφικής διέγερσης.

Λαμβάνοντας υπόψη όσα παρουσιάσθηκαν στην παρούσα ενότητα, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Για κάθε εδαφική επιτάχυνση οι γόμφοι μειώνουν τις σχετικές μετατοπίσεις των διαδοχικών σπονδύλων.
- Στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις οι γόμφοι περιορίζουν σημαντικά τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων, τόσο ως προς την διεύθυνση του άξονα x όσο και ως προς την διεύθυνση του άξονα z.
- Στις χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις οι γόμφοι αναγκάζουν τους σπονδύλους να μετακινηθούν κατά τη διεύθυνση της διέγερσης.
- Τα μοντέλα του κίονα με γόμφους εμφανίζουν ανάλογη συμπεριφορά σε σχέση με τις ολισθήσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των σπονδύλων τους, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση της διέγερσης.
- Οι παραμένουσες ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων δεν είναι πάντα ενδεικτικές των ολισθήσεων που αναπτύσσονται κατά το χρονικό διάστημα επιβολής της σεισμικής διέγερσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι γόμφοι επιδρούν στην δυναμική απόκριση σπονδυλωτών κίωνων, όταν αυτοί υποβάλλονται σε αρμονικές διεγέρσεις της βάσης τους. Για τον σκοπό αυτό, μελετήθηκαν τόσο μεμονωμένα όσο και συγκριτικά, τρία διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα, όπου το πρώτο αφορά σε σπονδυλωτό κίονα που δεν διαθέτει γόμφους, ενώ το δεύτερο και το τρίτο αφορούν σε κίονες οι σπόνδυλοι των οποίων συνδέονται με δύο χαλύβδινους γόμφους, διατεταγμένους αντιδιαμετρικά στη διεπιφάνειά τους. Η διαφοροποίηση των μοντέλων των κίωνων με γόμφους, έγκειται στην διαφορετική διεύθυνση επιβολής της εδαφικής διέγερσης, καθώς στο ένα αριθμητικό προσομοίωμα αυτή επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα που συνδέει τους γόμφους, ενώ στο άλλο υπό γωνία 30° ως προς αυτόν.

Από τις μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι τα τρία αριθμητικά μοντέλα παρουσιάζουν κοινή συμπεριφορά ως προς τις γωνίες λικνισμού και τις μετατοπίσεις των σπονδύλων τους. Συγκεκριμένα:

- 1) Διατηρώντας σταθερή της τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, η αύξηση της συχνότητας διέγερσης προκαλεί μείωση των γωνιών λικνισμού και των μέγιστων μετατοπίσεων των σπονδύλων.
- 2) Για μια δεδομένη τιμή της συχνότητας διέγερσης, η αύξηση στην τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης οδηγεί σε αύξηση των γωνιών λικνισμού των σπονδύλων.
- 3) Οι σπόνδυλοι δύνανται να αναπτύξουν σημαντικές μετακινήσεις και γωνίες λικνισμού τόσο εντός όσο και εκτός του επιπέδου της διέγερσης.
- 4) Οι παραμένουσες ολισθήσεις που αναπτύσσουν οι σπόνδυλοι των κίωνων, δεν είναι πάντα ενδεικτικές των ολισθήσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια επιβολής της εδαφικής διέγερσης.
- 5) Για οποιαδήποτε τιμή εδαφικής επιτάχυνσης, στις χαμηλές συχνότητες διέγερσης κυρίαρχο φαινόμενο είναι ο λικνισμός, ενώ στις υψηλές συχνότητες κυρίαρχο φαινόμενο είναι η ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων. Επιπρόσθετα, στις ενδιάμεσες τιμές συχνότητας, οι σπόνδυλοι υπόκεινται ταυτόχρονα σε φαινόμενα ολίσθησης και λικνισμού.

- 6) Όσο η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης μεγαλώνει, η εκτός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά των σπονδύλων, γίνεται εντονότερη και στις τρεις περιπτώσεις κίονων που μελετώνται.
- 7) Η αύξηση της τιμής της εδαφικής επιτάχυνσης, μεγαλώνει το εύρος των συχνοτήτων διέγερσης στις οποίες οι σπόνδυλοι των κίονων ανατρέπονται.

Σημειώνεται ότι αρκετές από τις παραπάνω παρατηρήσεις επαληθεύουν τα ευρήματα άλλων ερευνητών, σχετικά με την δυναμική απόκριση σπονδυλωτών κίονων χωρίς γόμφους. Ειδικότερα, οι παρατηρήσεις 1 και 2 αναφέρονται στην μελέτη [20], η παρατήρηση 3 στις [19] και [20], η παρατήρηση 4 αποτελεί ένα από τα συμπεράσματα της πειραματικής έρευνας [19] και τέλος η παρατήρηση 5 συμπεριλαμβάνεται στις εργασίες [25] και [26]. Επιπλέον, σύμφωνα με όσα καταγράφηκαν παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι οι παράμετροι της εδαφικής διέγερσης (συχνότητα, επιτάχυνση) επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την δυναμική απόκριση των σπονδυλωτών κίονων είτε αυτοί διαθέτουν γόμφους, είτε όχι. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι [22], [23] για την περίπτωση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σημαντικότερα ευρήματα αυτής της διπλωματικής εργασίας, σχετίζονται με τον ρόλο των γόμφων στην δυναμική απόκριση των σπονδυλωτών κίονων. Από την σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των υπό μελέτη αριθμητικών προσομοιωμάτων, προέκυψαν τα εξής:

- 1) Στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις, οι γόμφοι βελτιώνουν την δυναμική απόκριση των σπονδυλωτών κίονων, διότι περιορίζουν τις γωνίες λικνισμού και τις γωνίες στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα, ενώ παράλληλα μειώνουν το εύρος των συχνοτήτων διέγερσης που οδηγούν τον κίονα σε κατάρρευση.
- 2) Στις χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις οι γόμφοι ενδέχεται να μην έχουν ευεργετική δράση στην δυναμική απόκριση των σπονδυλωτών κίονων. Ιδιαίτερα στις συχνότητες διέγερσης μεγάλης τιμής, οι γόμφοι αδυνατούν να περιορίσουν τόσο τις γωνίες λικνισμού των σπονδύλων, όσο και τις γωνίες στροφής τους περί τον κατακόρυφο άξονα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση όπου η αρμονική διέγερση της βάσης επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα που ορίζουν οι γόμφοι, αυξάνεται το εύρος των συχνοτήτων που προκαλούν ανατροπή του κίονα.
- 3) Για κάθε εδαφική διέγερση που δεν οδηγεί σε κατάρρευση του κίονα, οι γόμφοι περιορίζουν τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σπονδύλων. Σημειώνεται ότι στις

χαμηλές επιταχύνσεις οι γόμφοι εμποδίζουν την εκτός του επιπέδου τους ολίσθηση, εξαναγκάζοντάς τους σπονδύλους σε μετατοπίσεις παράλληλα προς τον άξονα των γόμφων.

- 4) Στις περιπτώσεις όπου η εδαφική διέγερση επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων και υπό γωνία 30° ως προς αυτόν, οι σπόνδυλοι αναπτύσσουν ανάλογες γωνίες στροφής και ανάλογες σχετικές μετατοπίσεις.

Στο σημείο αυτό, παρατίθενται οι παρακάτω προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Επιβολή εδαφικών διεγέρσεων ως προς διαφορετικές γωνίες σε σχέση με τον άξονα που συνδέει τους γόμφους.
- Μελέτη δυναμικής απόκρισης σπονδυλωτών κιόνων, λαμβάνοντας υπόψη κάποιο κριτήριο θραύσης για το υλικό των σπονδύλων.
- Εξέταση της επίδρασης του αριθμού και της θέσης των γόμφων στην δυναμική απόκριση σπονδυλωτών κιόνων.
- Μελέτη της επιρροής της αύξησης των διαστάσεων των οπών των υπερκείμενων σπονδύλων (ακριβέστερη προσομοίωση των αρχαιολογικών δεδομένων) στη δυναμική απόκριση σπονδυλωτών κιόνων με γόμφους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΩΝ

- [1] Housner GW (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 53(2), 403-417.
- [2] Yim CS, Chopra AK, Penzien J (1980). Rocking response of rigid blocks to earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 8(6), 565-587.
- [3] Ishiyama Y (1982). Motion of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 10(5), 635-650.
- [4] Psycharis IN, Jennings PC (1983). Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 11(1), 57-76.
- [5] Spanos PD, Koh AS (1984). Rocking of rigid bodies due to harmonic shaking. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 110(11), 1627-1642.
- [6] Makris M, Roussos Y (2000). Rocking response of rigid blocks under near-source ground motions. *Geotechnique* 50(3), 243-262.
- [7] Γερόλυμος Ν, Αποστόλου Μ, Γκαζέτας Γ (2008). Λικνισμός και Ανατροπή Στερεού Σώματος υπό Σεισμική Διέγερση: Ιστορικά Περιστατικά. 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Άρθρο 1777.
- [8] Priestley MJN, Evison RJ, Carr AJ (1978). Seismic response of structures free to rock on their foundation. *Bulletin of New Zealand Natural Society for Earthquake Engineering* 11(3), 151-150.
- [9] Wong CM, Tso WK (1989). Steady state rocking response of rigid blocks part2: Experiment. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 18(1), 107-120.
- [10] Wong CM, Tso WK (1989). Steady state rocking response of rigid blocks part1: Analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 18(1), 89-206.
- [11] MSC. Marc (2018). User's Guide, Volume A: Theory and User Information. MSC. Software Corporation.
- [12] MSC. Marc (2018). User's Guide, Volume B: Element Library. MSC. Software Corporation.

- [13] Θέμελης ΠΓ (2014). Αρχαία Μεσσήνη. Υπουργείο πολιτισμού.
- [14] Ορλάνδος ΑΚ. (1958). Τα υλικά δομής των Αρχαίων Ελλήνων και οι τρόποι εφαρμογής τους. Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας 2.
- [15] Μπίλης Θ. (2015). Αποκατάσταση της δυτικής στοάς του Γυμνασίου της Αρχαίας Μεσσήνης. Εταιρεία Μεσσηνιακών Αρχαιολογικών Σπουδών.
- [16] Σφέικος Α, Στιμάρατζης Θ, Κίλιας Α, Χρηστάρας Β (2004). Η συμπεριφορά ασβεστόλιθων της ζώνης Πίνδου, κατά την εκσκαφή για διαμόρφωση υψηλού πρανούς οδοποιίας στην ορεινή Αργιθέα. Προσεγγιστική ερμηνεία και προσομοίωση της συμπεριφοράς του σχηματισμού με χρήση μεθόδων ευστάθειας πρανών. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. 36, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004.
- [17] Psycharis IN (1990). Dynamic behavior of rocking two-block assemblies. *Earthquake engineering and structural dynamics* 19(4), 555-575.
- [18] Winkler T, Meguro K, Yamazaki F (1995). Response of rigid body assemblies to dynamic excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 24(10), 1389-1408.
- [19] Mousakis HP, Psycharis IN, Papastamatiou DY (2002). Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31(9), 1681-1698.
- [20] Drosos VI, Anastasopoulos I (2014). Shaking table testing of multi-drum columns and portals. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 43(11), 1703-1723.
- [21] Papantonopoulos C, Psycharis IN, Papastamatiou DY, Lemos JV, Mousakis HP (2002). Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the district element method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31(9), 1699-1717.
- [22] Psycharis IN, Papastamatiou DY, Alexandris AP (2000). Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 29(8), 1093-1109.

- [23] Psycharis IN, Lemos JV, Papastamatiou DY, Zambas C, Papantonopoulos C (2003). Numerical study of the seismic behavior of a part of the Parthenon Pronaos. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 32(13), 2063-2084.
- [24] Konstantinidis D, Makris N (2005). Seismic response analysis of multi-drum classical columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 34(10), 1243-1270.
- [25] Papaloizou L, Komodromos P, Polycarpou P (2008). Simulation of the response of ancient columns under harmonic and earthquake excitations. *Engineering Structures* 30(8), 2154-2164.
- [26] Papaloizou L, Komodromos P (2009). Planar investigation of the seismic response of ancient columns and colonnades with epistyles using a custom-made software. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29(11-12), 1437-1454.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1.	Μετάβαση από την απόκριση ολίσθησης με λικνισμό, σε άλλη μορφή απόκρισης.....	8
Πίνακας 1.2.	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά άκαμπτου στύλου.....	18
Πίνακας 1.3.	Μηχανικές ιδιότητες άκαμπτου στύλου.....	18
Πίνακας 2.1.	Διαστάσεις των υπό εξέταση σπονδυλωτών κίονων.....	26
Πίνακας 2.2.	Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου και χάλυβα.....	27
Πίνακας 2.3.	Ζεύγη συχνότητας f – εδαφικής επιτάχυνσης a_g των υπό μελέτη αρμονικών διεγέρσεων.....	28
Πίνακας 4.1.	Περιγραφή της δυναμικής απόκρισης του σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, σε κάθε αρμονική διέγερση.....	38
Πίνακας 4.2.	Περιγραφή της δυναμικής απόκρισης του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για αρμονικές διεγέρσεις που επιβάλλονται παράλληλα στον άξονα των γόμφων.....	55
Πίνακας 5.	Περιγραφή της δυναμικής απόκρισης του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, σε κάθε αρμονική διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30 μοιρών ως προς τον άξονα των γόμφων.....	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 1.1.	Κίονες κορινθιακού ρυθμού στον αρχαιολογικό χώρο της Σαλαμίνας στην Κύπρο (αριστερά), κιονοστοιχία του ναού του Ποσειδώνα στο Σούνιο (δεξιά).....	4
Σχήμα 1.2.	Πιθανές μορφές επίπεδης δυναμικής απόκρισης άκαμπτου σώματος, υπό σεισμική διέγερση της βάσης του.....	8
Σχήμα 1.3.	Άκαμπτος στύλος σε ελεύθερο λικνισμό υπό αρχική γωνία θ_0	9
Σχήμα 1.4.	Λικνιστική απόκριση άκαμπτου στύλου στη διάρκεια μίας περιόδου T , αμελώντας τις απώλειες ενέργειας κατά την κρούση.....	11
Σχήμα 1.5.	Περίοδος T του λικνιζόμενου στύλου, υπό αρχική γωνία θ_0 (Housner, 1963).....	12
Σχήμα 1.6.	Αρίθμηση των κόμβων του ισοπαραμετρικού στοιχείου 7 της βιβλιοθήκης του Marc.....	14
Σχήμα 1.7.	Διάγραμμα τάσεων (stress) – παραμορφώσεων (strain) ελαστικού υλικού.....	14
Σχήμα 1.8.	Μοντέλο τριβής Coulomb Bilinear.....	16
Σχήμα 1.9.	Διαγράμματα γωνίας λικνισμού θ – Χρόνου t , αναλυτικής και αριθμητικής επίλυσης.....	20
Σχήμα 1.10.	Χρονικά στιγμιότυπα απόκρισης αριθμητικού προσομοιώματος άκαμπτου στύλου υπό αρχική γωνία 5° , στη διάρκεια μίας περιόδου T	20
Σχήμα 2.1.	Η δυτική στοά του Γυμνασίου στην Αρχαία Μεσσήνη.....	23
Σχήμα 2.2.	Διαδικασία μολυβδοχόησης στη περίπτωση γωνιακού γόμφου.....	24
Σχήμα 2.3.	Σύστημα πόλου – εμπολίου	25
Σχήμα 2.4.	Τυπική όψη των υπό εξέταση σπονδυλωτών κίωνων.....	26
Σχήμα 2.5.	Διάταξη χαλύβδινων γόμφων.....	27
Σχήμα 2.6.	Γενική μορφή αρμονικής ημιτονικής διέγερσης, με διεύθυνση επιβολής παράλληλα στον άξονα των γόμφων.....	28

Σχήμα 2.7.	Γενική μορφή αρμονικής ημιτονικής διέγερσης, με διεύθυνση επιβολής 30° ως προς τον άξονα των γόμφων.....	28
Σχήμα 3.1.	Τα στοιχεία 98 (α) και 241 (β) της βιβλιοθήκης του Marc.....	31
Σχήμα 3.2.	Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων του σπονδυλωτού κίονα με γόμφους.....	32
Σχήμα 3.3.	Σύστημα γόμφων στη διεπιφάνεια του σπονδύλου 3 και του κιονόκρανου.....	33
Σχήμα 3.4.	Ελαστοπλαστικός νόμος υλικών χωρίς κράτυνση.....	34
Σχήμα 4.1.	Διάγραμμα της ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g , συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.....	38
Σχήμα 4.2.	Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g.....	39
Σχήμα 4.3.	Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g.....	40
Σχήμα 4.4.	Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g.....	40
Σχήμα 4.5.	Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα χωρίς γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g.....	41
Σχήμα 4.6.	Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα χωρίς γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g.....	42
Σχήμα 4.7.	Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g.	43
Σχήμα 4.8.	Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g.....	44
Σχήμα 4.9.	Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g.....	45
Σχήμα 4.10.	Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g.....	48
Σχήμα 4.11.	Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g.....	49

Σχήμα 4.12.	Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g.....	50
Σχήμα 4.13.	Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g.....	51
Σχήμα 4.14.	Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_x , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.....	52
Σχήμα 4.15.	Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_z , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.....	53
Σχήμα 4.16.	Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.....	54
Σχήμα 4.17.	Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών μετατοπίσεων των U_z , για σπονδυλωτό κίονα δίχως γόμφους.....	54
Σχήμα 4.18.	Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g , συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f , για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους, όταν η εδαφική διέγερση επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων.....	55
Σχήμα 4.19.	Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....	56
Σχήμα 4.20.	Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....	57
Σχήμα 4.21.	Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....	58
Σχήμα 4.22.	Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....	59

- Σχήμα 4.23. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....63
- Σχήμα 4.24. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....64
- Σχήμα 4.25. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....65
- Σχήμα 4.26. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....66
- Σχήμα 4.27. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....67
- Σχήμα 4.28. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....68
- Σχήμα 4.29. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....69
- Σχήμα 4.30. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....70
- Σχήμα 4.31. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών στροφής θ_y , για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....73
- Σχήμα 4.32. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_x και θ_z για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....74

- Σχήμα 4.33. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....75
- Σχήμα 4.34. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_z για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται παράλληλα στον άξονα των γόμφων).....76
- Σχήμα 5.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g – συχνότητας διέγερσης f , για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους, όταν η εδαφική διέγερση επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων.....78
- Σχήμα 5.2. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.20g$ (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....78
- Σχήμα 5.3. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.30g$ (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....79
- Σχήμα 5.4. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.40g$ (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....80
- Σχήμα 5.5. Στιγμιότυπα πριν από την κατάρρευση σπονδυλωτού κίονα με γόμφους, για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.50g$ (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....81
- Σχήμα 5.6. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.20g$ (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....84
- Σχήμα 5.7. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.30g$ (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....85
- Σχήμα 5.8. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.40g$ (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....86

- Σχήμα 5.9. Διαγράμματα γωνιών στροφής – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....87
- Σχήμα 5.10. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....88
- Σχήμα 5.11. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.30g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....89
- Σχήμα 5.12. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....90
- Σχήμα 5.13. Διαγράμματα σχετικών γωνιών λικνισμού – χρόνου, για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους σε εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.50g (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....91
- Σχήμα 5.14. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών λικνισμού θ_x και θ_z για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....94
- Σχήμα 5.15. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των γωνιών στροφής θ_y για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....95
- Σχήμα 5.16. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_x για σπονδυλωτό κίονα με γόμφους (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....96
- Σχήμα 5.17. Διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων U_z για σπονδυλωτό κίονα με (διέγερση που επιβάλλεται υπό γωνία 30° ως προς τον άξονα των γόμφων).....97
- Σχήμα 6.1. Διάγραμμα ανηγμένης εδαφικής επιτάχυνσης a_g/g σε συνάρτηση με την συχνότητα διέγερσης f , για τα αριθμητικά μοντέλα 1,2 και 3 του σπονδυλωτού κίονα.....99

Σχήμα 6.2.	Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης 0.20g, για το αριθμητικό μοντέλο 1 (1 ^η σειρά), το αριθμητικό μοντέλο 2 (2 ^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (3 ^η σειρά).....	101
Σχήμα 6.3.	Παραμορφώσεις γόμφων στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης 0.20g, για το αριθμητικό μοντέλο 2 (1 ^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (2 ^η σειρά).....	102
Σχήμα 6.4.	Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης 0.30g, για το αριθμητικό μοντέλο 1 (1 ^η σειρά), το αριθμητικό μοντέλο 2 (2 ^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (3 ^η σειρά).....	104
Σχήμα 6.5.	Παραμορφώσεις γόμφων στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης 0.30g, για το αριθμητικό μοντέλο 2 (1 ^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (2 ^η σειρά).....	105
Σχήμα 6.6.	Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης 0.40g, για το αριθμητικό μοντέλο 1 (1 ^η σειρά), το αριθμητικό μοντέλο 2 (2 ^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (3 ^η σειρά).....	106
Σχήμα 6.7.	Παραμορφώσεις γόμφων στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης 0.40g, για το αριθμητικό μοντέλο 2 (1 ^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (2 ^η σειρά).....	107
Σχήμα 6.8.	Στιγμιότυπα δυναμικής απόκρισης στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης 0.50g, για το αριθμητικό μοντέλο 1 (1 ^η σειρά), το αριθμητικό μοντέλο 2 (2 ^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (3 ^η σειρά).....	108
Σχήμα 6.9.	Παραμορφώσεις γόμφων στην περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης 0.50g, για το αριθμητικό μοντέλο 2 (1 ^η σειρά) και το αριθμητικό μοντέλο 3 (2 ^η σειρά).....	109
Σχήμα 6.10.	Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών λικνισμού ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητα διέγερσης Hz.....	112
Σχήμα 6.11.	Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών λικνισμού ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητα διέγερσης 4Hz.....	113

- Σχήμα 6.12. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών στροφής περί τον άξονα y ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητες διέγερσης 2Hz (αριστερά) και 4Hz (δεξιά).....114
- Σχήμα 6.13. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών λικνισμού ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητα διέγερσης 3Hz.....115
- Σχήμα 6.14. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών λικνισμού ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητα διέγερσης 4Hz.....116
- Σχήμα 6.15. Συγκριτικά διαγράμματα γωνιών στροφής περί τον άξονα y ανά σπόνδυλο σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητες διέγερσης 3Hz (αριστερά) και 4Hz (δεξιά).....117
- Σχήμα 6.16. Συγκριτικά διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων ανά διεπιφάνεια διαδοχικών σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητα διέγερσης 2Hz.....119
- Σχήμα 6.17. Συγκριτικά διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων ανά διεπιφάνεια διαδοχικών σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.30g και συχνότητα διέγερσης 4Hz.....120
- Σχήμα 6.18. Συγκριτικά διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων ανά διεπιφάνεια διαδοχικών σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητα διέγερσης 3Hz.....121
- Σχήμα 6.19. Συγκριτικά διαγράμματα σχετικών μετατοπίσεων ανά διεπιφάνεια διαδοχικών σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο, για εδαφική επιτάχυνση 0.40g και συχνότητα διέγερσης 4Hz.....122