



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΗΛΙΟΥ ΣΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΕΠΙΣΤΗΛΙΟ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΠΕΙΡΟΥΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΙΟΝΩΝ ΤΟΥ ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΑΣ ΜΕΣΣΗΝΗΣ.

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΦΡΑΝΤΖΕΖΟΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2024

© 2024 Κωνσταντίνος Φραντζέζος

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. Παναγούλη Ολυμπία

(Επιβλέπουσα) Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Τσινίδης Γρηγόριος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Παντούσα Δάφνη

Συμβασιούχος Διδάσκουσα, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών και ανοίγουν οι πόρτες για νέες προκλήσεις. Φυσικά ήταν ένα μακρύ ταξίδι που μόνο εύκολο δεν μπορεί να το χαρακτηρίσει κανείς. Όσο πλησίαζαν προς το τέλος τους οι σπουδές μου τόσο περισσότερο αναπολούσα όλες τις στιγμές που πέρασα εντός και εκτός του πανεπιστημιακού χώρου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου χάρη στους οποίους όλα αυτά τα χρόνια είναι πλέον ανεξίτηλα χαραγμένα στο μυαλό μου και σίγουρα θα τα θυμάμαι για όλη μου την ζωή. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω όλους μου τους καθηγητές έναν προς έναν, γιατί ο καθένας τους έβαλε το δικό του λιθαράκι και με βοήθησαν να φτάσω μέχρι εδώ.

Ιδιαίτερα βέβαια, οφείλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια Κυρία Ολυμπία Παναγούλη για την συνεργασία, την βοήθεια, την υπομονή και την επιμονή της που με συνόδευσαν από την αρχή μέχρι και το τέλος της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο και πολύ καλό μου φίλο Ηλία Κυροχρήστο με τον οποίο δουλέψαμε μαζί άπειρες ώρες και περάσαμε πολλές δύσκολες στιγμές καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης των διπλωματικών μας εργασιών οι οποίες συσχετίζονταν. Επίσης, θα ήθελα να δώσω πολλές ευχαριστίες στον απόφοιτο της σχολής μας Αθανάσιο Κοζανίτη ο οποίος ήταν πάντοτε παρών όποτε τον χρειαζόμουν και μου παρείχε πολύτιμη βοήθεια οποιαδήποτε στιγμή μου ήταν αναγκαία για την περάτωση της διπλωματικής.

Τελευταίους θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον αδερφό μου, όλη μου την οικογένεια αλλά και την κοπέλα μου για τους οποίους ό,τι και να πω είναι λίγο μπροστά σε αυτά που έχουν κάνει για εμένα και δεν μπορώ να εκφράσω με κανέναν τρόπο επάξια την ευγνωμοσύνη μου στο πρόσωπό τους. Από την πρώτη ως την τελευταία στιγμή ήταν, είναι και θα είναι εκεί για να με στηρίζουν τόσο στις εύκολες όσο κυρίως στις δύσκολες στιγμές της ζωής μου.

*Κωνσταντίνος Φραντζέζος
Βόλος, Απρίλιος 2024*

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΗΛΙΟΥ ΣΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΕΠΙΣΤΗΛΙΟ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΠΕΙΡΟΥΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΙΟΝΩΝ ΤΟΥ ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΑΣ ΜΕΣΣΗΝΗΣ.

Κωνσταντίνος Φραντζέζος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2024

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Ολυμπία Παναγούλη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της επιρροής του ύψους του επιστήλιου στη δυναμική απόκριση συστήματος σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο. Το πρόβλημα μελετάται στις τρεις διαστάσεις θεωρώντας ότι οι σπόνδυλοι των κίωνων συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικούς γόμφους. Για τη μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις με διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά και δύο διαφορετικά ύψη επιστήλιου. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα προγενέστερης διπλωματικής εργασίας (Κοζανίτης, 2022) που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην οποία μελετήθηκε η απόκριση του ιδίου συστήματος κίωνων με επιστήλιο διαφορετικού ύψους. Τα δεδομένα για τα μοντέλα που μελετήθηκαν πάρθηκαν από τους κίονες και το επιστήλιο που βρίσκονται στη Δυτική Στοά του Γυμνασίου της Αρχαίας Μεσσήνης. Επισημαίνεται ότι εξετάστηκαν αρμονικές διεγέρσεις στην βάση των κίωνων κατά την οριζόντια διεύθυνση χ η οποία ταυτίζεται με τον άξονα που ορίζουν οι γόμφοι.

Λέξεις Κλειδιά: Σύστημα σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο, Γόμφοι, Δικνισμός, Ολίσθηση, Τρισδιάστατη μη γραμμική δυναμική ανάλυση, Ύψος επιστήλιου

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE EPISTYLE HEIGHT ON THE DYNAMIC RESPONSE OF FRAMES CONSISTED OF MULTIDRUM CLASSICAL COLUMNS WITH IRON DOWELS BETWEEN THE DRUMS. THE CASE OF THE GYMNASIUM OF ANCIENT MESSENE.

Konstantinos Frantzezos

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2024

Supervisor: Dr. Olympia Panagouli, Associate Professor

Abstract

The aim of this thesis is to study the influence of the height of the epistyle on the dynamic response of a system of multi-drum columns with an epistyle. The problem is studied in three dimensions by assuming that the multi-drum columns are connected to each other by metal dowels. For this study, dynamic analyses with different dynamic characteristics and two different epistyle heights were performed. It should be noted that the results of a previous thesis (Kozanitis, 2022) carried out at the Laboratory of Analysis and Design of Structures of the University of Thessaly, in which the response of the same column system with different height of epistyle was studied, were also used in the study. The data for the models that were studied were taken from the columns and the epistyle located in the Western Gallery of the Gymnasium of Ancient Messina. Note that harmonic excitations at the base of the columns in the horizontal direction x which coincides with the axis defined by the dowels were considered.

Keywords: *System of multi-drum columns with an epistyle, Dowels, Rocking response, Sliding, Three-dimensional nonlinear dynamic analysis, Epistyle height*

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή στο φαινόμενο του λικνισμού.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση λικνιστικής απόκρισης ενός άκαμπτου σώματος.....	2
1.3 Περιγραφή δυναμικής απόκρισης άκαμπτου σώματος.....	4
1.3.1 Μορφές δυναμικής απόκρισης άκαμπτου σώματος.....	4
1.3.2 Μαθηματική περιγραφή δυναμικής απόκρισης άκαμπτου σώματος.....	5
1.3.3 Δυναμική απόκριση δύο άκαμπτων σωμάτων σε επαφή.....	9
1.3.4 Δυναμική απόκριση συστήματος κiónων με επιστήλιο.....	12
1.3.5 Μη γραμμικότητα της λικνιστικής απόκρισης.....	14
1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση σπονδυλωτών κiónων και πλαισίων.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Αναλυτική περιγραφή του αντικείμενου μελέτης.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Ιστορική αναδρομή και αρχαιολογικά στοιχεία.....	17
2.2.1 Γυμνάσιο Αρχαίας Μεσσήνης.....	17
2.2.2 Συστήματα σύνδεσης σπονδύλων.....	18
2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στοιχεία υλικών του υπό μελέτη συστήματος κiónων με επιστήλιο.....	21
2.4 Αρμονική διεγερση στη βάση των κiónων.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Αριθμητική προσομοίωση αντικείμενου μελέτης.....	24
3.1 Κατασκευή δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.....	24
3.1.1 Σπονδυλωτό πλαίσιο πεπερασμένων στοιχείων με επιστήλιο και γόμφους μεταξύ των σπονδύλων.....	24
3.1.2 Είδη πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν.....	25
3.2 Καταστατικοί νόμοι υλικών.....	27
3.3 Φαινόμενο Επαφής – Τριβής.....	28
3.4 Συνοριακές συνθήκες.....	29
3.5 Επιλογή μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Δυναμική απόκριση σπονδυλωτού πλαισίου με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.4m.....	30
4.1 Εισαγωγή.....	30
4.2 Περιγραφή δυναμικής απόκρισης του πλαισίου.....	30
4.2.1 Στιγμιότυπα κατάρρευσης του πλαισίου.....	30
4.2.2 Διαγράμματα γωνιών στροφής των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο.....	34

4.2.3	Διαγράμματα ολισθήσεων των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο.....	51
4.2.4	Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών στροφής.....	57
4.2.5	Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων.....	61
4.3	Περιγραφή δυναμικής απόκρισης του επιστηλίου.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Δυναμική απόκριση σπονδυλωτού πλαισίου με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.8m.....		66
5.1	Εισαγωγή.....	66
5.2	Περιγραφή δυναμικής απόκρισης του πλαισίου.....	66
5.2.1	Στιγμιότυπα κατάρρευσης του πλαισίου.....	66
5.2.2	Διαγράμματα γωνιών στροφής των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο..	69
5.2.3	Διαγράμματα ολισθήσεων των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο.....	91
5.2.4	Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών στροφής.....	102
5.2.5	Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων.....	106
5.3	Περιγραφή δυναμικής απόκρισης του επιστηλίου.....	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Σύγκριση της δυναμικής απόκρισης συστήματος σπονδυλωτών κiónων με επιστήλιο για διαφορετικές τιμές ύψους επιστηλίου.....		111
6.1	Περιγραφή της δυναμικής απόκρισης του συστήματος για διαφορετικές τιμές ύψους επιστηλίου.....	111
6.2	Μελέτη της απόκρισης του συστήματος για διαφορετικές τιμές ύψους επιστηλίου κατά την ανατροπή.....	112
6.3	Γωνίες λικνισμού των σπονδύλων για διαφορετικές τιμές ύψους επιστηλίου.....	115
6.4	Μετατοπίσεις των σπονδύλων για διαφορετικές τιμές ύψους επιστηλίου.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Συμπεράσματα.....		129
Βιβλιογραφικές αναφορές.....		131
Κατάλογος Σχημάτων.....		134
Κατάλογος Πινάκων.....		140

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή στο φαινόμενο του λικνισμού

1.1 Εισαγωγή

Η διατήρηση των αρχαίων μνημείων στην Ελλάδα, παρά τα έντονα σεισμικά φαινόμενα που την ταλανίζουν, οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι η προσπάθεια των αρχαιολόγων και των αρμοδίων αρχών για την συντήρηση και την αναστήλωση των μνημείων, μέσω της επιστημονικής έρευνας και της εφαρμογής σύγχρονων τεχνικών αποκατάστασης και σταθεροποίησης. Η προσπάθεια αυτή φανερώνει την έντονη σημασία της πολιτιστικής κληρονομιάς της Ελλάδας ανά τους αιώνες καθώς και το έντονο ενδιαφέρον που τρέφουν οι αρμόδιοι ερευνητές για αυτήν. Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψιν συντάχθηκε η παρούσα εργασία με αντικείμενο μελέτης την επιρροή του ύψους του επιστηλίου στην δυναμική απόκριση συστήματος σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο και μηχανισμό κατακόρυφης σύνδεσης μεταξύ των κίωνων. Η έρευνα πραγματοποιείται για σπονδυλωτούς κίονες από τον χώρο του Γυμνασίου της αρχαίας Μεσσήνης.

Οι κίονες είναι συνήθως το πρώτο πράγμα που παρατηρεί κάποιος σε ένα κλασσικό αρχαίο μνημείο. Όσον αφορά την αρχιτεκτονική τους, αυτοί κατατάσσονται σε τρεις ρυθμούς, τον Ιωνικό, τον Δωρικό και τον Κορινθιακό. Σχετικά με την κατασκευή τους χωρίζονται στους μονολιθικούς (monolithic columns) που είναι ενιαία, συμπαγή σώματα αλλά και στους σπονδυλωτούς (multi-drum columns) που αποτελούνται από σπονδύλους, από ογκώδη δηλαδή κυλινδρικά κομμάτια μαρμάρου ή ασβεστόλιθου που χρησιμοποιούνταν εκείνη την εποχή για τέτοιου είδους κατασκευές. Αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος συναρμολόγησης των σπονδυλωτών κίωνων. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με απλή έδραση των σπονδύλων, να επικάθονται δηλαδή ο ένας πάνω στον άλλον, είτε μέσω ενός εσωτερικού μηχανισμού κατακόρυφης σύνδεσης. Οι πιο γνωστοί μηχανισμοί σύνδεσης είναι ο πόλος-εμπόλιο και η χρήση δύο ή περισσότερων γόμφων.

Αποδεικνύεται ότι τα σώματα αυτά εκτελούν λικνιστική κίνηση, δηλαδή ταλάντωση γύρω από διαφορετικά σημεία της βάσης τους, γεγονός που οδήγησε πολλούς ερευνητές στην αναλυτική, πειραματική και αριθμητική μελέτη της λικνιστικής κίνησης.

Όσο αφορά τους σπονδυλωτούς κίονες, η κατανόηση της δυναμικής τους απόκρισης αποτελεί ένα εξαιρετικά σύνθετο πρόβλημα, επειδή οι σπονδυλωτοί κίονες προσεγγίζονται ως συστήματα πολλαπλών σωμάτων τα οποία κατά τη σεισμική τους διέγερση κινούνται ανεξάρτητα (λικνίζονται, ολισθαίνουν μεταξύ τους και περιστρέφονται γύρω από τον κατακόρυφο άξονά τους). Η σύνθετη αυτή απόκριση γίνεται εξαιρετικά πολύπλοκη με την παρουσία των γόμφων και του επιστηλίου. Επιπροσθέτως, η όλη συμπεριφορά και κίνηση των κίωνων επηρεάζεται εξίσου από την σεισμική διέγερση που τους επιβάλλεται και μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Όπως φαίνεται, η αντίδραση αυτή είναι απολύτως μη γραμμική και απαιτεί στρατηγική μελέτη, ανάλυση και περιγραφή. Αξιοσημείωτο είναι βέβαια και το ότι το φαινόμενο του λικνισμού παρατηρείται και σε σύγχρονες κατασκευές μέσω μιας παρεμφερής μεθόδου που ονομάζεται «λικνιστική μόνωση» (rocking isolation). Αυτού του είδους το φαινόμενο συναντάται σε κτήρια αλλά και σε γέφυρες. Μέσω αυτού επιτρέπεται ο λικνισμός και η ανασήκωση (uplifting) της θεμελίωσης, κάτι που η συμβατική μέθοδος σχεδιασμού δεν το επιτρέπει καθώς η θεμελίωση είναι σταθερή στο υπέδαφος.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση λικνιστικής απόκρισης ενός άκαμπτου σώματος

Οι επιστήμονες Milne (18850 και Perry (1881) ήταν οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με την μελέτη της λικνιστικής συμπεριφοράς ενός άκαμπτου, στερεού, ορθογωνικού σώματος εδραζόμενου σε άκαμπτη βάση. Παρά τις αντίξοες συνθήκες της εποχής τους και χωρίς να γνωρίζουν τα σειсмоγραφικά δεδομένα της περιοχής που μελετούσαν, κατάφεραν να εισάγουν ένα αξιόπαινο εύρος επιταχύνσεων και μετατοπίσεων τα οποία έχουν την δυνατότητα να επιφέρουν ανατροπή στα σώματα τα οποία μελετούσαν, όταν διεγείρεται η βάση πάνω στην οποία αυτά εδράζονται.

Ο Housner (1963) βέβαια, ήταν αυτός που μετά τον καταστροφικό σεισμό που έπληξε την Χιλή το 1963 οδηγήθηκε στην πρώτη συστηματική μελέτη της δυναμικής απόκρισης ενός άκαμπτου και λυγηρού σώματος που εδράζεται πάνω σε μια άκαμπτη βάση που υπόκειται σε σεισμική διέγερση. Εξέτασε διάφορες περιπτώσεις ταλάντωσης, όπως αυτή της ελεύθερης ταλάντωσης, της ταλάντωσης λόγω σεισμικής διέγερσης και της ταλάντωσης με σταθερή και ημιτονοειδή επιτάχυνση. Αυτό που τον ώθησε στην μελέτη αυτή ήταν το ότι μετά τον σεισμό κάποιες φαινομενικά αρκετά ευσταθείς κατασκευές κατέρρευσαν, ενώ κάποιες άλλες ψηλές, λυγηρές και φαινομενικά πιο ασταθείς κατασκευές παρέμειναν ανέπαφες. Ένα από τα σημαντικότερά συμπεράσματά του, μεταξύ άλλων, ήταν πως μεταξύ δύο πανομοιότυπων γεωμετρικά σωμάτων, πιο σταθερό είναι αυτό με τις μεγαλύτερες διαστάσεις.

Οι Yim et al (1980) μέσω μιας αριθμητικής διαδικασίας και με την χρήση ενός υπολογιστικού προγράμματος κατάφεραν να επιλύσουν το μη γραμμικό πρόβλημα που διέπει το φαινόμενο του λικνισμού και να οδηγηθούν στην διατύπωση των εξισώσεων κίνησης ενός άκαμπτου σώματος με τυχαίες διαστάσεις. Επιπροσθέτως, αντιλήφθηκαν ότι τυχόν αλλαγές στις διαστάσεις του σώματος, στην σεισμική διέγερση που επιβάλλεται στο σώμα αλλά και στην λυγηρότητα, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά του σώματος κατά τον λικνισμό.

Λίγο αργότερα ο Ishiyama (1982) θέλοντας να αναζητήσει τα κριτήρια έτσι ώστε να οδηγηθεί ένα σώμα στην κατάρρευση, άρχισε να πραγματοποιεί αναλυτικές επιλύσεις των εξισώσεων κίνησης για τις δυναμικές καταστάσεις που δύναται να αναπτύξει ένα άκαμπτο σώμα όταν διεγείρεται η βάση του. Κατέληξε συμπερασματικά στο ότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ της βάσης και του σώματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον λόγο πλάτους – ύψους του εκάστοτε σώματος έτσι ώστε το σώμα να λικνιστεί. Παρατήρησε πως για να οδηγηθεί ένα σώμα στην κατάρρευση, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν ως κριτήρια η οριζόντια επιτάχυνση και η ταχύτητα της βάσης. Τέλος, κατέληξε πως μπορούν να βρεθούν τα όρια της μέγιστης ταχύτητας και επιτάχυνσης της διέγερσης μέσω του τρόπου ανατροπής.

Ο Priestley (1978) χρησιμοποιώντας την αναλυτική λύση που στην οποία είχε καταλήξει ο Housner, την συνέκρινε με διάφορα δεδομένα που προέκυψαν από πειραματικές αναλύσεις για διάφορες διεγέρσεις. Η συσχέτιση και η σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών λύσεων προήλθε αργότερα από τους Tso et al (1989) αφού πρώτα οι ίδιοι εισήγαγαν μια αναλυτική έκφραση για τον λικνισμό και έπειτα κατασκεύασαν πειραματικά μοντέλα και τα υπέβαλαν σε αρμονικές σεισμικές διεγέρσεις.

Οι Psycharis και Jennings (1983) άρχισαν να εξετάζουν την λικνιστική απόκριση ενός άκαμπτου σώματος το οποίο βρίσκεται πάνω σε μια εύκαμπτη βάση έναντι άκαμπτης βάσης όπως είχε προηγηθεί. Συγκεκριμένα για αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν δύο ελατήρια απλού συστήματος αλλά και αυτό του Winkler. Σκοπός τους ήταν να γίνει η σύγκριση μεταξύ τους και

να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα πάνω σε αυτό. Αντίθετα, οι Acikgoz και Delong (2014) μελέτησαν την λικνιστική απόκριση ενός παραμορφώσιμου σώματος πάνω σε μια άκαμπτη βάση. Εδώ, το σύστημα που μελετήθηκε υποβλήθηκε σε σεισμικές διεγέρσεις διαφόρων ειδών έτσι ώστε να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα.

Κομβικής σημασίας ήταν η μελέτη που πραγματοποίησε ο Psycharis (1990), όπου σε ένα σύστημα δύο σωμάτων το ένα πάνω στο άλλο άφησε τα σώματα να λικνίζονται ελεύθερα, θεωρώντας δηλαδή ότι δεν αναπτύσσονται καθόλου ολισθήσεις μεταξύ τους και ανέλυσε τη δυναμική συμπεριφορά του. Καθώς το σύστημα αυτό διέπεται από έντονες μη γραμμικότητες εξαιτίας της μετάβασής του από πολλές καταστάσεις ταλάντωσης, καθίσταται η διατύπωσή του άκρως δύσκολη. Ο Psycharis εδώ κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το πάνω σώμα του συστήματος συνεισφέρει περισσότερο στην ενέργειά του σε σχέση με το κάτω σώμα, σημειώνοντας πιο έντονη απόκριση.

Στα επόμενα χρόνια πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες μελέτες σχετικά με τις γεωμετρικές παραμέτρους του συστήματος που αναφέρθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα, οι Makris και Vasilliou (2012) προσπάθησαν να βρουν ποια είναι η ελάχιστη λυγηρότητα που πρέπει να έχει ένα σώμα έτσι ώστε να μην καταρρεύσει σε περίπτωση που προκληθεί ένας ισχυρός σεισμός. Στη συνέχεια πάλι ο Makris με τη βοήθεια του Kampas (2016) μελέτησαν πώς επηρεάζει η αλλαγή των διαστάσεων ενός σώματος και συγκεκριμένα η αύξηση του ύψους του στην ευστάθειά του. Πάλι ο Makris (2014a) ανέφερε πως με την αύξηση των διαστάσεων ενός σώματος αυξάνεται η ροπή επαναφοράς αλλά και η ροπή ανατροπής, ενώ έδωσε και ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία των λυγηρών κατασκευών από τις σεισμικές διεγέρσεις μέσω της εφαρμογής της λικνιστικής μόνωσης (2014b).

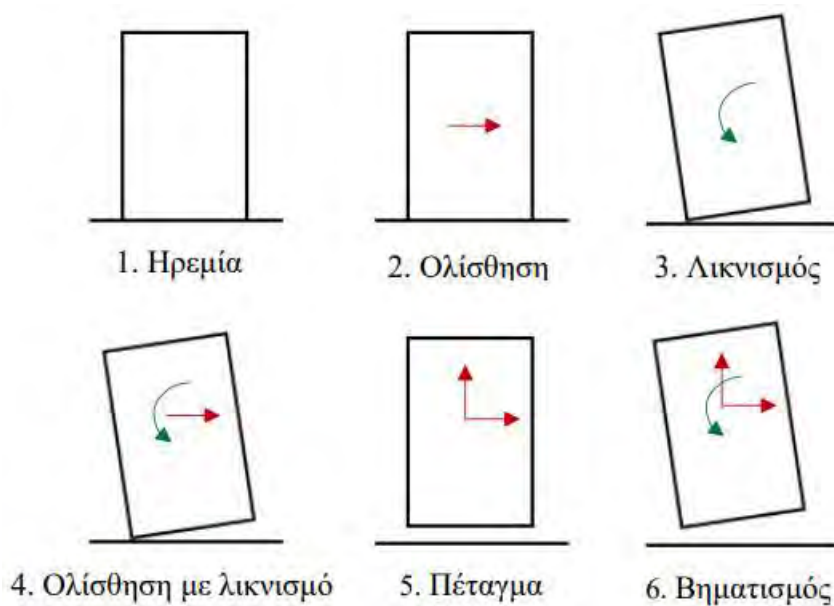
Κρίθηκε επίσης αναγκαία η αποτύπωση του φαινομένου αλλά και η μελέτη του στις τρεις διαστάσεις. Για αυτό το λόγο οι Konstantinidis και Makris (2005) με την έρευνά τους κατάφεραν να διατυπώσουν τις εξισώσεις κίνησης ενός σώματος τριών διαστάσεων το οποίο πραγματοποιούσε ελεύθερη ταλάντωση γύρω από διάφορες γωνίες της βάσης του, χωρίς όμως να θεωρείται ότι υπάρχει απώλεια ενέργειας.

1.3 Περιγραφή δυναμικής απόκρισης άκαμπτου σώματος

1.3.1 Μορφές δυναμικής απόκρισης άκαμπτου μονολιθικού σώματος

Δεν αποτελεί μόνο η λικνιστική απόκριση την μοναδική δυναμική συμπεριφορά που μπορεί να έχει ένα άκαμπτο, στερεό σώμα που εδράζεται πάνω σε μία άκαμπτη βάση που υπόκειται σε μία σεισμική διέγερση. Ο Ιάπωνας ερευνητής Ishiyama (1982) κατάφερε να κατηγοριοποιήσει τις κινήσεις αυτές οι οποίες που αποτυπώνονται παρακάτω (Σχήμα 1.1) και είναι οι ακόλουθες :

- Ηρεμία (Rest)
- Ολίσθηση (Slide)
- Λικνισμός (Rocking/Rotation)
- Ολίσθηση με λικνισμό (Slide Rocking/Rotation)
- Πέταγμα (Jump) ή μεταφορική αναπήδηση (Translation jump)
- Βηματισμός (Stepping) ή λικνισμός με αναπήδηση (Rocking/Rotation jump)

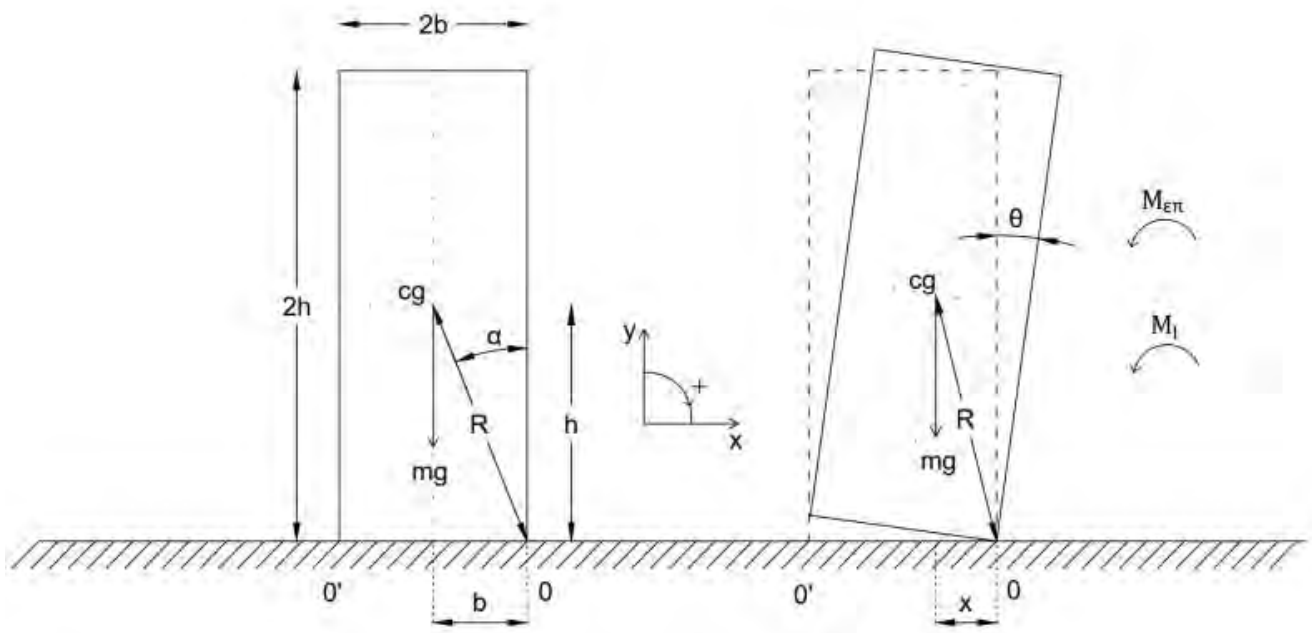


Σχήμα 1.1. Κατηγοριοποίηση κινήσεων άκαμπτου στερεού σώματος

1.3.2 Μαθηματική περιγραφή δυναμικής απόκρισης άκαμπτου σώματος

Ο Housner (1963) όντας από τους πρώτους ερευνητές που μελέτησαν σε βάθος το φαινόμενο του λικνισμού, χρησιμοποίησε έναν στύλο άκαμπτο για τον οποίο θεώρησε διαστάσεις $2b \times 2h$ (Σχήμα 1.2) αφήνοντάς τον να εκτελέσει λικνισμό ελεύθερα υπό αρχική γωνία θ_0 . Εξαιτίας του γεγονότος ότι το υπό μελέτη δυναμικό πρόβλημα ήταν πολυδιάστατο και μη γραμμικού χαρακτήρα θεώρησε τις παρακάτω παραδοχές για να καταφέρει να το απλουστεύσει όσο περισσότερο μπορούσε :

- Το σώμα αλλά και η οριζόντια βάση έδρασης θεωρήθηκαν άκαμπτα, με πολύ μικρές δηλαδή παραμορφωσιμότητες και αμετάβλητες διαστάσεις.
- Ο συντελεστής τριβής θεωρήθηκε πολύ ισχυρός για να μην παρατηρηθούν φαινόμενα ολίσθησης μεταξύ του στύλου και της βάσης.
- Κατά την διάρκεια της κίνησης του στύλου μόνο ο λικνισμός θεωρήθηκε ως φαινόμενο δυναμικής απόκρισης.



Σχήμα 1.2. Γεωμετρία άκαμπτου στύλου υπό ελεύθερο λικνισμό

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει γεωμετρικά για την απόσταση από το κέντρο βάρους cg μέχρι το σημείο περιστροφής 0 δηλαδή για την ακτινική απόσταση R ότι :

$$R = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (1.1)$$

Η μαζική ροπή αδράνειας του ορθογωνικού στύλου δίνεται από τον τύπο :

$$I_O = \frac{4m}{3} R^2 \quad (1.2)$$

Για την κρίσιμη γωνία α προκύπτει από το Σχήμα 1.2 η εξίσωση :

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b}{h}\right) \quad (1.3)$$

Λόγω τα εκτροπής του σώματος από αρχική γωνία με τιμή θ_0 ως προς το σημείο 0 ασκούνται στο σώμα η ροπή επαναφοράς $M_{\varepsilon\pi}$ αλλά και η ροπή αδράνειας M_I :

$$M_{\varepsilon\pi} = W \cdot x = mg \sin(\alpha - \theta) = mgR \sin(\alpha - \theta) \quad (1.4)$$

και

$$M_I = I_O \ddot{\theta} \quad (1.5)$$

Στην συνέχεια λαμβάνεται υπόψιν η περίπτωση ψηλών και λιγυρών σωμάτων όπου για την γωνία α ισχύει ότι $\alpha < 20^\circ$, άρα :

$$\sin(\alpha - \theta_0) \approx \alpha - \theta_0 \quad (1.6)$$

Επομένως για την ροπή επαναφοράς $M_{\varepsilon\pi}$ έχουμε :

$$(1.4) \xrightarrow{(1.6)} WR(\alpha - \theta) \quad (1.7)$$

Εύκολα εξάγεται και η εξίσωση κίνησης του σώματος η οποία προκύπτει από την ισορροπία των ροπών ως προς το σημείο 0, δηλαδή :

$$\begin{aligned} M_I + M_{\varepsilon\pi} &= 0 \\ I_O \ddot{\theta} + WR(\alpha - \theta) &= 0 \\ I_O \ddot{\theta} - WR\theta &= 0 - WR\alpha \end{aligned} \quad (1.8)$$

Συνεχίζοντας θα πρέπει να εισαχθεί και η συχνοτική παράμετρος p , όπου :

$$p = \sqrt{\frac{WR}{I_0}} \quad (1.9)$$

με την βοήθεια της οποίας επίσης ισχύει :

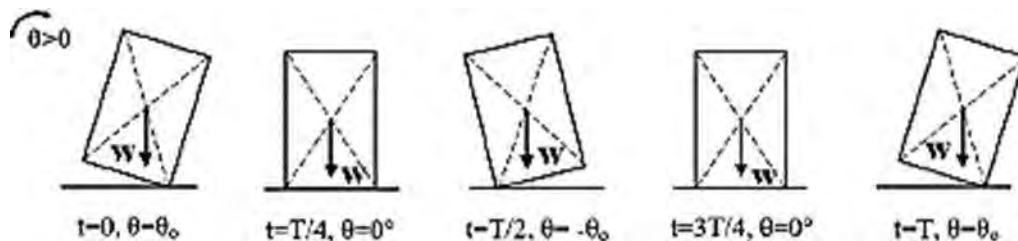
$$(1.8) \xRightarrow{(1.9)} \ddot{\theta} - p^2 \theta = -p^2 \alpha \quad (1.10)$$

Έχοντας ως δεδομένες αρχικές συνθήκες $\theta(t=0) = \theta_0$ και $\dot{\theta}(t=0) = \dot{\theta}_0$, τότε η διαφορική εξίσωση (1.10) έχει την παρακάτω λύση :

$$\theta = \alpha - (\alpha - \theta_0) \cosh(pt) \quad (1.11)$$

Από την παραπάνω εξίσωση (1.11) καταλαβαίνει κανείς ότι η λικνιστική απόκριση ενός σώματος επηρεάζεται αρκετά από την γεωμετρία του και την αρχική γωνία εκτροπής.

Επιπροσθέτως, η κίνηση που περιγράφει η εξίσωση (1.11) ξεκινάει από την χρονική στιγμή $t = 0$ όπου ο στύλος αφήνεται ελεύθερος για να εκτελέσει λικνισμό με αρχική γωνία θ_0 μέχρι να βρεθεί στην οριζόντια θέση. Από εκεί λαμβάνοντας υπόψιν ότι κατά την κρούση του στύλου με την οριζόντια βάση δεν παρατηρούνται απώλειες ενέργειας, ο στύλος συνεχίζει να λικνίζεται μέχρι η γωνία λικνισμού να γίνει $-\theta_0$. Αφού στο τέλος το σώμα ξαναεπιστρέψει στην αρχική του θέση από την οποία αφέρθηκε ελεύθερο να λικνιστεί, τότε έχει ολοκληρώσει μια πλήρη περίοδο ταλάντωσης. Η κίνηση που αναφέρθηκε γίνεται αντιληπτή στο Σχήμα 1.3.



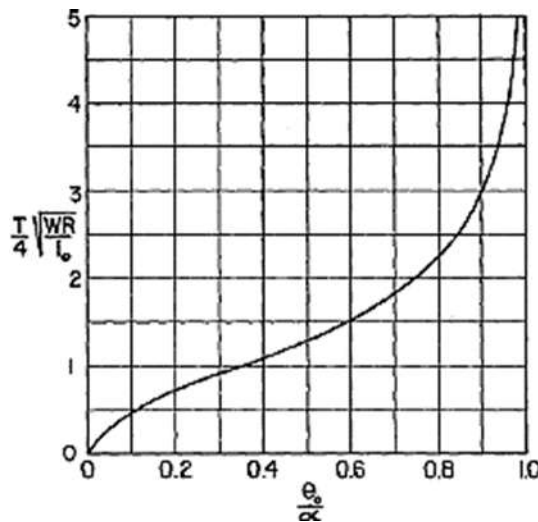
Σχήμα 1.3. Λικνιστική απόκριση άκαμπτου στύλου για μία χρονική περίοδο T αμελώντας τις απώλειες ενέργειας

Η χρονική περίοδος μιας πλήρους ταλάντωσης T υπολογίζεται εύκολα σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$(1.11) \xrightarrow{t=\frac{T}{4}} 0 = \alpha - (\alpha - \theta_0) \cosh\left(p \frac{t}{4}\right) \Rightarrow \cosh\left(p \frac{t}{4}\right) = \frac{1}{1 - \frac{\theta_0}{\alpha}} \Rightarrow$$

$$T = \frac{4}{p} \cosh^{-1}\left(\frac{1}{1 - \frac{\theta_0}{\alpha}}\right) \quad (1.12)$$

Από την παραπάνω σχέση (1.12) καταλαβαίνει κανείς την άμεση συσχέτιση της περιόδου ταλάντωσης T με τον λόγο $\frac{\theta_0}{\alpha}$ άρα και κατά συνέπεια τόσο με τις αρχικές συνθήκες που λήφθηκαν υπόψιν όσο και με την γεωμετρία του εκάστοτε σώματος. Επίσης, η σχέση (1.12) μπορεί να αναπαρασταθεί και γραφικά όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4. Περίοδος T του λικνιζόμενου σώματος υπό αρχική γωνία θ_0 (Housner, 1963)

Ωστόσο το γεγονός, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πως κατά την κρούση του στύλου με το έδαφος δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας αποτελεί μια ιδεατή κατάσταση. Για αυτό το λόγο ο Housner θέλοντας να υπολογίσει τις απώλειες της κινητικής ενέργειας εισήγαγε τον έναν συντελεστή επαναφοράς r , όπου θεωρώντας $\dot{\theta}_1$ την γωνιακή ταχύτητα του σώματος πριν την κρούση και $\dot{\theta}_2$ την γωνιακή ταχύτητα του σώματος μετά την κρούση κατέληξε στον παρακάτω τύπο:

$$r = \frac{\left(\frac{1}{2} I_0 \dot{\theta}_2^2\right)}{\left(\frac{1}{2} I_0 \dot{\theta}_1^2\right)} = \left(\frac{\dot{\theta}_2}{\dot{\theta}_1}\right)^2 \quad (1.13)$$

Επιπλέον, με την βοήθεια της Αρχής Διατήρησης της Στροφορμής πριν και μετά την πρόσκρουση του σώματος κατά την διάρκεια της περιστροφής γύρω από το σημείο Ο προκύπτει ότι :

$$I_0 \dot{\theta}_1 - 2mRb\dot{\theta}_1 \sin a = I_0 \dot{\theta}_2 \quad (1.14)$$

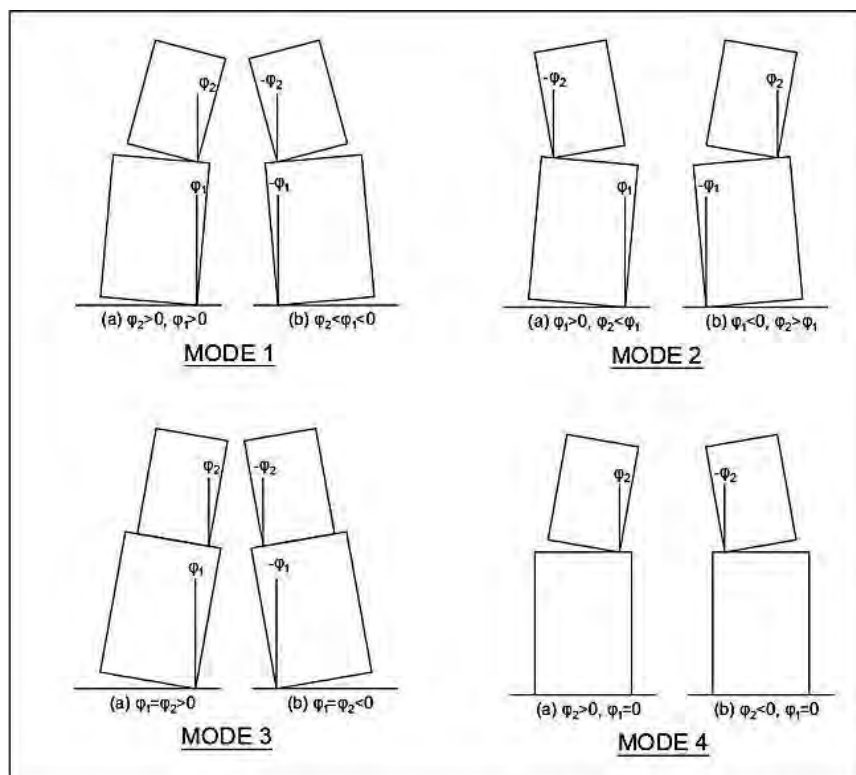
Τέλος, ο τελικός τύπος για τον καθορισμό των απωλειών της κινητικής ενέργειας του σώματος κατά την κρούση είναι :

$$(1.14) \xrightarrow{(1.13)} r = \left[1 - \frac{mR^2}{I_0} (1 - \cos 2a) \right]^2 \quad (1.15)$$

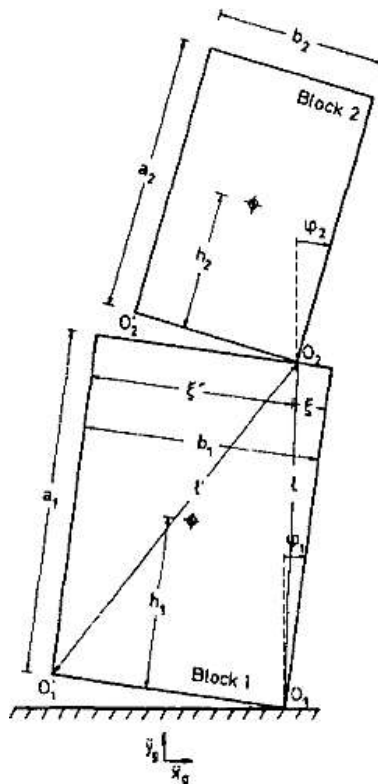
1.3.3 Δυναμική απόκριση δύο άκαμπτων σωμάτων σε επαφή

Σε πιο πρόσφατες μελέτες ο Psycharis (1990) μελέτησε με αντίστοιχο τρόπο όπως ο Housner (1963) και ο Ishiyama (1982) την δυναμική απόκριση δύο άκαμπτων στοιχείων τα οποία επικάθονται το ένα πάνω στο άλλο και αυτό το σύστημα με την σειρά του εδράζεται πάνω σε μια άκαμπτη βάση. Όπως γίνεται αντιληπτό, το σύστημα των δύο άκαμπτων σωμάτων μπορεί να λικνίζεται με τους τέσσερις διαφορετικούς τρόπους που φαίνονται στο Σχήμα 1.5.

Λόγω των πολύπλοκων εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα αυτό, ο Psycharis υιοθέτησε τις παραδοχές των Ishiyama και Housner. Συγκεκριμένα, θεώρησε μεγάλες τιμές του συντελεστή τριβής σε όλες τις διεπιφάνειες έτσι ώστε να μην παρατηρούνται φαινόμενα ολίσθησης. Και τα δύο σώματα θεωρήθηκαν ότι αποτελούνται από ομογενές υλικό για να βρίσκεται το κέντρο μάζας του σώματος στο μέσον του πλάτους του. Ακόμη, το σύστημα έχει δύο βαθμούς ελευθερίας, τις γωνίες λικνισμού των δύο σωμάτων. Η μελέτη για την εξαγωγή των εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα έγινε με τη βοήθεια του Σχήματος 1.6.



Σχήμα 1.5. Περιπτώσεις ταλάντωσης συστήματος δύο άκαμπτων σωμάτων (Psycharis, 1990)



Σχήμα 1.6. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συστήματος δύο άκαμπτων σωμάτων (Psycharis, 1990)

Μέσω της γεωμετρίας από το Σχήμα 1.6 αλλά και με εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις κίνησης ενός σώματος για κάθε περίπτωση λικνισμού. Εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι οι γωνίες λικνισμού θεωρούνται μικρές έτσι ώστε $\cos\varphi_i \cong 1$ και $\sin\varphi_i \cong \varphi_i$, με $i = 1, 2$.

MODE 1 :

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} I_{O1} + m_2 l^2 & m_2 \left(a_1 h_2 + \frac{b_2}{2} \xi \right) \\ m_2 \left(a_1 h_2 + \frac{b_2}{2} \xi \right) & I_{O2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(m_1 h_1 + m_2 a_1)g & 0 \\ 0 & m_2 h_2 g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} \mp \left(m_1 \frac{b_1}{2} + m_2 \xi \right) g \mp \left(m_1 \frac{b_1}{2} + m_2 \xi \right) \ddot{y}_g - (m_1 h_1 + m_2 a_1) \ddot{x}_g \\ \mp m_2 \frac{b_2}{2} g \mp m_2 \frac{b_2}{2} \ddot{y}_g - m_2 h_2 \ddot{x}_g \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.16)$$

MODE 2 :

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} I_{O1} + m_2 l'^2 & m_2 \left(a_1 h_2 - \frac{b_2}{2} \xi' \right) \\ m_2 \left(a_1 h_2 + \frac{b_2}{2} \xi' \right) & I_{O2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(m_1 h_1 + m_2 a_1)g & 0 \\ 0 & m_2 h_2 g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} \mp \left(m_1 \frac{b_1}{2} + m_2 \xi' \right) g \mp \left(m_1 \frac{b_1}{2} + m_2 \xi' \right) \ddot{y}_g - (m_1 h_1 + m_2 a_1) \ddot{x}_g \\ \mp m_2 \frac{b_2}{2} g \mp m_2 \frac{b_2}{2} \ddot{y}_g - m_2 h_2 \ddot{x}_g \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.17)$$

MODE 3 :

$$\begin{cases} I_0 \ddot{\varphi}_1 - m g \varphi_1 = \mp m_1 \frac{b_1}{2} g \mp m_1 \frac{b_1}{2} \ddot{y}_B - m h \ddot{x}_B \\ \varphi_1 = \varphi_2 \end{cases} \quad (1.18)$$

MODE 4 :

$$\begin{cases} I_{O2} \ddot{\varphi}_2 - m_2 g h_2 \varphi_2 = \mp m_2 \frac{b_2}{2} g \mp m_2 \frac{b_2}{2} \ddot{y}_B - m_2 h_2 \ddot{x}_B \\ \varphi_1 = 0 \end{cases} \quad (1.19)$$

Όπου :

- m_1 και m_2 , η μάζα του κάθε σώματος ξεχωριστά
- $m = m_1 + m_2$, η συνολική μάζα του συστήματος των δύο σωμάτων
- I_{O1} και I_{O2} , οι μαζικές ροπές αδράνειας των σωμάτων ως προς τα σημεία O_1', O_1 , και O_2', O_2
- h , το ύψος του κέντρου βάρους του συστήματος με τύπο :

$$h = \frac{m_1 h_1 + m_2 (a_1 + h_2)}{m}$$

- I_O , η συνολική μαζική ροπή αδράνειας ως προς τα σημεία O_1 και O_1'

1.3.4 Δυναμική απόκριση συστήματος κίωνων με επιστήλιο

Για να διατυπωθούν μαθηματικά οι εξισώσεις κίνησης μέσω των οποίων στην συνέχεια μελετήθηκε η δυναμική απόκριση μονολιθικών κίωνων με επιστήλιο, ο Makris (2014a, 2014b) θεωρώντας ακτινική απόσταση $R = \sqrt{h^2 + b_2}$, λυγηρότητα $a = a \tan(\frac{b}{h})$ και συχνοτική παράμετρο $p = \sqrt{\frac{3g}{2R}}$ κατέληξε στην παρακάτω εξίσωση :

$$\ddot{\theta}(t) = -\frac{1+2\gamma}{1+3\gamma} p^2 \left(\sin[a \operatorname{sgn}[(\theta(t)) - \theta(t)] + \frac{u_g(t)}{g} \cos[a \operatorname{sgn}[\theta(t)] - \theta(t)] \right) \quad (1.20)$$

Στην συνέχεια ο Makris στις ίδιες μελέτες αναφέρει ότι η εξίσωση κίνησης του ελεύθερου πλαισίου είναι ίδια με την εξίσωση του άκαμπτου στύλου ίδιας λυγηρότητας, εάν η συχνοτική παράμετρος πολλαπλασιαστεί με τον όρο $(1+2\gamma)/(1+3\gamma)$. Έτσι, η συχνοτική παράμετρος του πλαισίου είναι :

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1+2\gamma}{1+3\gamma}} p \quad (1.21)$$

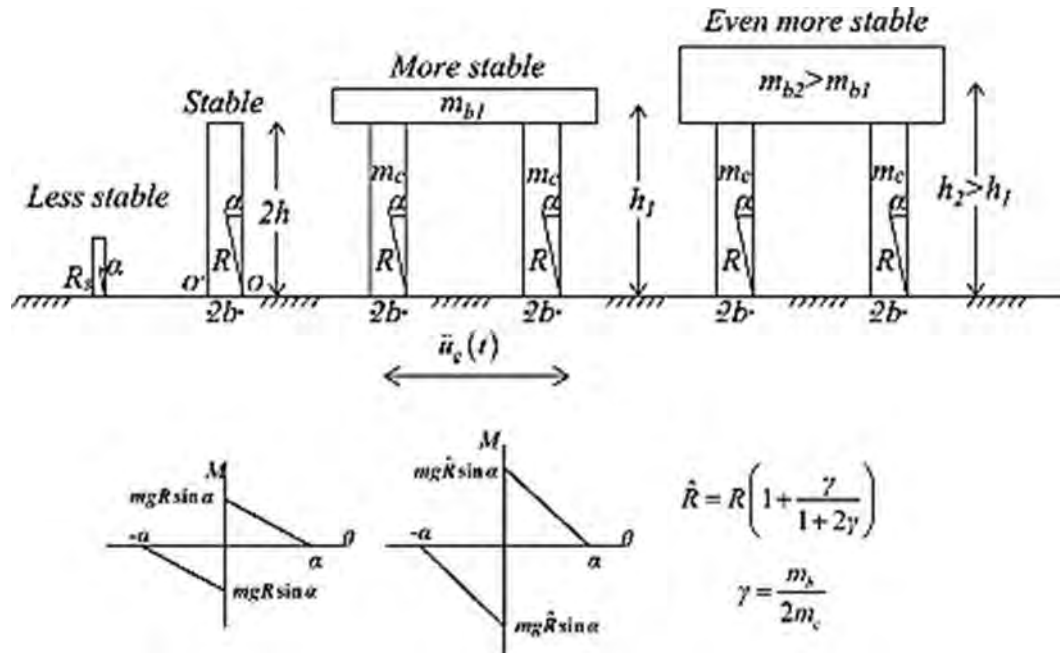
Όπου :

- $\gamma = \frac{m_b}{Nm_c}$
- m_b , η μάζα του επιστηλίου
- Nm_c , η συνολική μάζα όλων των κίωνων

Επομένως για την εξίσωση κίνησης συστήματος μονολιθικών κίωνων ισχύει ότι :

$$(1.20) \xrightarrow{(1.21)} \ddot{\theta}(t) = -\hat{p}^2 \left(\sin[a \operatorname{sgn}[(\theta(t)) - \theta(t)] + \frac{u_g''(t)}{g} \cos[a \operatorname{sgn}[\theta(t)] - \theta(t)] \right) \quad (1.22)$$

Από την εξίσωση (1.22) γίνεται σαφές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του επιστηλίου, τόσο ελαττώνεται η συχνοτική παράμετρος του πλαισίου $\hat{p}$ και κατά συνέπεια το εύρος ταλάντωσής του. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι με την αύξηση της μάζας του επιστηλίου αυξάνεται η ευστάθεια του πλαισίου μονολιθικών κίωνων, παρά την αύξηση του ύψους του και τη μετατόπιση του κέντρου βάρους. Επιπλέον, αρκετές αριθμητικές μελέτες από τους Papaloizou και Komodromos (2009) οδήγησαν στο ίδιο αποτέλεσμα. Τέλος, οι Mouzakis et al (2002) και οι Drosos και Anastasopoulos (2014) απέδειξαν και πειραματικά ότι τα πλαίσια μονολιθικών κίωνων με επιστήλιο είναι πιο σταθερά από ότι οι απλοί μονολιθικοί κίονες. Παρακάτω στο Σχήμα 1.7 συνοψίζεται η αύξηση της σεισμικής σταθερότητας από τον απλό ελεύθερο κίονα ως το πλαίσιο με επιστήλιο που υπόκειται σε λικνισμό.



Σχήμα 1.7. Σύγκριση ευστάθειας απλού κίονα και πλαισίου κίωνων (Makris, 2014)

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ακτινική απόσταση R του πλαισίου είναι :

$$\hat{R} = \left(1 + \frac{\gamma}{1+2\gamma} \right) R \quad (1.23)$$

και ότι οι απώλειες κινητικής ενέργειας του πλαισίου λόγω της κρούσης με την βάση δίνονται από τον τύπο :

$$r = \left(\frac{\dot{\theta}_1}{\dot{\theta}_2} \right)^2 = \left(\frac{1 - \frac{3}{2} \sin^2 a + 3\gamma \cos 2a}{1 + 3\gamma} \right)^2 \quad (1.24)$$

1.3.5 Μη γραμμικότητα της λικνιστικής απόκρισης

Για να χαρακτηριστεί ένα φαινόμενο ως μη γραμμικό θα πρέπει τόσο τα επιβαλλόμενα εξωτερικά φορτία όσο και οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται να είναι και αυτά με την σειρά τους μη γραμμικά. Η μη γραμμικότητα ενός φαινομένου δύναται να οφείλεται στα παρακάτω :

- Μη γραμμικότητα των υλικών (material nonlinearity)

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα υλικά των οποίων τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης δεν είναι γραμμικού χαρακτήρα.

- Γεωμετρική μη γραμμικότητα (geometric nonlinearity)

Εδώ συμπεριλαμβάνονται τα προβλήματα στα οποία εμφανίζονται μεγάλες μετατοπίσεις και μεγάλες παραμορφώσεις (large displacement, large strain problem) αλλά και προβλήματα με μεγάλες μετατοπίσεις και μικρές παραμορφώσεις (large displacement, small strain problem).

- Μη γραμμικότητα συνοριακών συνθηκών (boundary conditions nonlinearity)

Εμφανίζεται σε προβλήματα επαφής – τριβής (friction phenomena) και σε προβλήματα όπου επιφάνειες και κόμβοι ενώνονται ή αποκολλώνται (gap opening and closing phenomena).

Με βάση τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η λικνιστική απόκριση σπονδυλωτών κατασκευών χαρακτηρίζεται από έντονη μη γραμμικότητα λόγω συνοριακών συνθηκών, λόγω της μη γραμμικότητας του υλικού (στην περίπτωσή μας μη γραμμικότητα του υλικού των γόμφων) αλλά και λόγω των μεγάλων μετατοπίσεων και των μεγάλων στροφών που αναπτύσσονται ταυτόχρονα.

1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση σπονδυλωτών κίωνων και πλαισίων

Έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα ότι το φαινόμενο της λικνιστικής απόκρισης των σπονδυλωτών σωμάτων είναι κάθε άλλο παρά απλό. Για αυτό τα λόγιο, προσπαθούν οι μελετητές ανά τα χρόνια να καταφύγουν στην πειραματική διερεύνηση του φαινομένου αυτού.

Οι Papantonopoulos et al (2002) τονίζουν μεταξύ άλλων το πόσο ευαίσθητη είναι η απόκριση όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι, οι αρχικές συνθήκες αλλά και τα χαρακτηριστικά των κίωνων που μελετώνται. Επίσης, μέσω της έρευνάς τους, γίνεται αντιληπτή η σημαντικότητα της πρόληψης για μεγάλες τιμές μέγιστων μετατοπίσεων κατά την απόκριση και των παραμενουσών, καθότι υπάρχει κίνδυνος πρόκλησης ζημιών μεγάλου βεληνεκού. Ναι μεν είναι δυνατό να θεωρείται ως μηδενική η απόσβεση αλλά καλύτερα είναι η τιμή της να διαφοροποιείται κατά την πορεία της απόκρισης.

Σε ό,τι έχει να κάνει με τα συστήματα σύνδεσης των σπονδύλων, οι Konstantinidis et al (2005) κατέληξαν σε κάποια συμπεράσματα σχετικά με τους σπονδυλωτούς κίονες των οποίων οι επιμέρους σπόνδυλοι είτε συνδεόταν μεταξύ τους μέσω πόλου – εμπόλιου είτε με απλή έδραση ο ένας πάνω στον άλλον. Ωστόσο, παρά τη θετική συνεισφορά του συστήματος σύνδεσης, οι διαφορές στην απόκριση δεν ήταν μεγάλες. Θα μπορούσε να πει κανείς όμως, ότι οι σπονδυλωτοί κίονες εμφανίζουν καλύτερη απόκριση και γενικά εικόνα κατά την διάρκεια μιας διέγερσης σε σχέση με τους μονολιθικούς. Επίσης, ο περιορισμός ανάπτυξης ολισθήσεων λόγω των γόμφων δεν είναι πάντα ευεργετικός.

Στη συνέχεια, οι Psycharis et al (2003) με την βοήθεια προσομοιώσεων τμημάτων του Πρόναου του Παρθενώνα επαλήθευσαν την σημαντική επιρροή που έχει το επιστήλιο στην ευστάθεια ενός πλαισίου. Παρόλο που και εδώ η ύπαρξη ενός συστήματος σύνδεσης ανάμεσα στους σπονδύλους βοήθησε ως έναν βαθμό στην καλύτερη απόκριση, η ευστάθεια που επιτεύχθηκε βασίστηκε στην μείωση των μετατοπίσεων που παρέμειναν μετά το πέρας της διέγερσης. Οι Papaloizou και Komodromos (20009) μέσω μελέτης στις δύο διαστάσεις κατέληξαν στο ότι οι χαμηλότερες συχνότητες όπου εμφανίζεται έντονος λικνισμός, δεν βοηθούν καθόλου στην ευστάθεια του κίονα σε σχέση με τις υψηλότερες συχνότητες όπου εμφανίζονται ολισθήσεις. Ερευνήθηκε επίσης από τους ίδιους, πώς επηρεάζουν τα γεωμετρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους σπονδυλωτούς κίονες πέρα από τις εδαφικές διεγέρσεις.

Ιδιαίτερης σημασίας είναι και τα συμπεράσματα των πειραματικών μελετών όπως αυτά των Mouzakis et al (2002). Αναλυτικότερα, κατασκευάζοντας προσομοιώματα κίωνων του ναού του Παρθενώνα από μάρμαρο και σε κλίμακα 1:3 με δώδεκα σπόνδλους και ένα κιονόκρανο, οι ερευνητές οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι με χαμηλές συχνότητες διέγερσης, οι κίονες εμφανίζουν εντονότερη λικνιστική απόκριση, κατά κύριο λόγο στους υψηλότερους σπονδύλους που συνοδεύονται με μεγάλες μετατοπίσεις, ενώ αντίθετα με υψηλές συχνότητες εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές ολισθήσεων χωρίς ιδιαίτερα έντονη λικνιστική απόκριση. Επίσης, μεταξύ άλλων τονίστηκε ότι οποιεσδήποτε αλλαγές στη γεωμετρία και στις παραμέτρους της κίνησης των σπονδύλων, μπορούν να οδηγήσουν σε διαφοροποίηση όλων των αποτελεσμάτων.

Σημαντικό ρόλο παίζει και ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στις διεπιφάνειες. Οι Psycharis et al (2015) αναφέρουν ότι οι ανώτεροι σπόνδυλοι των κίωνων εμφανίζουν ευκολότερα φαινόμενα ολίσθησης, γιατί η αύξηση της ορθής τάσης οδηγεί στην αύξηση του συντελεστή τριβής. Προσομοιώνοντας έναν κίονα από το Ναό του Ολύμπιου Διός ο οποίος δεν είχε κανέναν σύστημα στήριξης ανάμεσα στους σπονδύλους, οι ερευνητές απέδειξαν το σημαντικό ρόλο που

παίζει ο συντελεστής τριβής κυρίως στις παραμένουσες μετατοπίσεις των ανώτερων σπονδύλων. Επιπροσθέτως, τονίστηκε η σημαντική επιρροή των γόμφων στην απόκριση του κίονα, αλλά και ενδεχόμενος κίνδυνος ανατροπής εξαιτίας των μεγάλων γωνιών λικνισμού που μπορούν να αναπτυχθούν, επειδή οι γόμφοι μπορεί να εμποδίσουν τη σωστή επαφή των σπονδύλων. Και σε αυτήν την περίπτωση, τα συμπεράσματα της μελέτης έρχονται σε συμφωνία με αυτά στα οποία κατέληξαν οι Mouzakis et al (2002), το πόσο επικίνδυνες είναι δηλαδή οι διεγέρσεις χαμηλών συχνοτήτων λόγω του έντονου λικνισμού σε σχέση με αυτές των υψηλών συχνοτήτων και των ολισθήσεων που προκαλούνται ανάμεσα στους σπονδύλους.

Ακόμη, μελετήθηκε πρόσφατα από τους Panagouli και Christodoulou (2022) ένας σπονδυλωτός κίονας με μεταλλικούς γόμφους ανάμεσα στους σπονδύλους και ένας ελεύθερος κίονας με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων στις τρεις διευθύνσεις. Στις χαμηλές συχνότητες, όπου η λικνιστική συμπεριφορά ήταν πιο έντονη, δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Αντίθετα, στις ενδιάμεσες συχνότητες όπου παρατηρούνται και φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης, φανερώνεται η ευεργετική προσφορά των μεταλλικών πείρων που ελαττώνουν κατά πολύ τα παραπάνω φαινόμενα στην εκτός επιπέδου διεύθυνση. Στις υψηλές συχνότητες όπου αναπτύσσονται κυρίως φαινόμενα ολίσθησης, παρατηρούνται σημαντικές μειώσεις των μεγεθών αυτών στους κίονες με τους μεταλλικούς γόμφους.

Τέλος, ο Makris (2014a, 2014b) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα πλαίσιο σπονδυλωτών κίωνων παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη ευστάθεια σε σχέση με έναν απλό στύλο ίδιων διαστάσεων και ιδιοτήτων. Επιπλέον, πρόσθεσε ότι το βάρος του επιστηλίου βοηθάει στο να είναι η κατασκευή πιο ευσταθής όπως απέδειξε και με την πιο πρόσφατη μελέτη του ο Κοζανίτης (2022). Επισημαίνεται ότι το προσομοίωμα του πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας έρευνας είναι ίδιο με αυτό του Κοζανίτη (2022).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Αναλυτική περιγραφή του αντικείμενου μελέτης

2.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επιρροής του ύψους του επιστηλίου στην δυναμική απόκριση ενός πλαισίου που αποτελείται από σπονδυλωτούς κίονες με μεταλλικούς πείρους μεταξύ των σπονδύλων και απλή έδραση του επιστηλίου στα δύο κιονόκρανα των σπονδυλωτών κίωνων. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε για τους σπονδυλωτούς κίονες το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε από τη Christodoulou (2019) και πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με το ίδιο σύστημα σπονδυλωτών κίωνων και διαφορετικά ύψη επιστηλίου. Για την παραμετρική μελέτη του προβλήματος έγινε χρήση και των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του Κοζανίτη (2022). Τα προσομοιώματα που μελετώνται αναπαριστούν σύστημα κίωνων και επιστηλίου από τη δυτική στοά του Γυμνασίου της Αρχαίας Μεσσήνης το οποίο υπόκειται σε αρμονικές διεγέρσεις διαφορετικών συχνοτήτων και εδαφικών επιταχύνσεων.

Αρχικά παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή της Αρχαίας Μεσσήνης μαζί με συνοπτικές πληροφορίες για τα συστήματα σύνδεσης σπονδύλων στην αρχαιότητα. Τέλος, δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες του συστήματος των σπονδυλωτών κίωνων με το επιστήλιο, καθώς και τα χαρακτηριστικά των αρμονικών διεγέρσεων στις οποίες υποβλήθηκε.

2.2 Ιστορική αναδρομή και αρχαιολογικά στοιχεία

2.2.1 Γυμνάσιο Αρχαίας Μεσσήνης

Η Αρχαία Μεσσήνη βρίσκεται στους πρόποδες του όρους Ιθώμης και αποτελούσε τα αρχαία χρόνια την πρωτεύουσα του Μεσσηνιακού κράτους. Ιδρύθηκε το 369 π.Χ. από τον Θηβαίο Επαμεινώνδα και πήρε το όνομά της από την ήδη θεοποιημένη για πολλούς αιώνες προδωρική βασίλισσα Μεσσήνη.

Οι στοές του Γυμνασίου σχηματίζουν ένα Π γύρω από το στάδιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 με την ανατολική και την δυτική να είναι απλές ενώ η βόρεια να είναι διπλή. Τα περισσότερα στοιχεία για την αρχιτεκτονική αυτού του χώρου εκείνης της εποχής αντλήθηκαν από τους κίονες της δυτικής και της βόρειας στοάς, γιατί αυτοί της ανατολικής λόγω της μη προσεγγμένης ανακατασκευής τους ανατράπηκαν με το πέρασμα των χρόνων.

Η περιοχή στην οποία βρέθηκαν οι κίονες κάλυπτε αρκετά μεγάλη έκταση όπου υπήρχαν δωμάτια, παλαίστρα κλπ, όπου βρέθηκαν αρκετές περιγραφές, κατάλογοι και πολλά άλλα από τα οποία οι ερευνητές κατάφεραν να αντλήσουν πολλά σημαντικά ιστορικά στοιχεία της τότε εποχής και να μάθουν αρκετές λεπτομέρειες για την καθημερινή ζωή των ανθρώπων πριν από αρκετούς αιώνες.



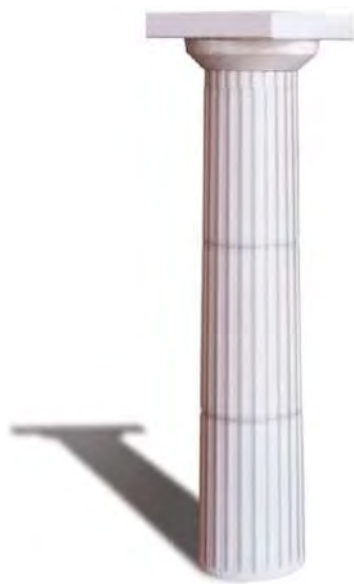
Σχήμα 2.1. Στοές του Γυμνασίου γύρω από το Στάδιο στην περιοχή της Αρχαίας Μεσσήνης

2.2.2 Συστήματα σύνδεσης σπονδύλων

Στην αρχαιότητα υπήρχαν δύο είδη κιόνων, οι μονολιθικοί και οι σπονδυλωτοί. Οι μονολιθικοί ήταν κίονες αποτελούμενοι από ενιαία σώματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, ενώ οι σπονδυλωτοί ήταν κίονες αποτελούμενοι από επιμέρους σώματα που βρίσκονταν το ένα πάνω στο άλλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.2. Μονολιθικός κίονας



Σχήμα 2.3. Σπονδυλωτός κίονας

Σύμφωνα με τον ιστορικό Αναστάσιο Ορλάνδο (1958), η κατακόρυφη σύνδεση των σπονδύλων ενός σπονδυλωτού κίονα κατά τα αρχαία χρόνια γινόταν με δύο τρόπους, μέσω μεταλλικών πείρων, τους λεγόμενους γόμφους, ή μέσω ενός συστήματος πόλου – εμπολίου [26].

Οι γόμφοι ήταν ορθογωνικά ορειχάλκινα, ξύλινα ή σιδερένια ελάσματα και τοποθετούνταν μεταξύ των διεπιφανειών των σπονδύλων εντός ειδικά λαξευμένων οπών, οι επονομαζόμενες εντορμίες, που φαίνονται στο Σχήμα 2.4. Για να αποφευχθεί η φθορά κυρίως των σιδερένιων γόμφων, χυνόταν μόλυβδος εντός των οπών έτσι ώστε να προστατευθούν οι γόμφοι από ενδεχόμενες οξειδώσεις τους. Επίσης, ο μόλυβδος εξαιτίας της φύσης του ως μαλακό και παραμορφώσιμο υλικό, βοηθούσε στην καλύτερη μηχανική συνάφεια μεταξύ των σπονδύλων και των γόμφων, απορροφώντας ενέργεια κατά τις σεισμικές κυρίως διεγέρσεις.

Εκτός από τους γόμφους, ευρέως διαδεδομένο ήταν και το σύστημα σύνδεσης πόλου – εμπολίου (Σχήμα 2.5). Τα εμπόλια κατασκευάζονταν από ξύλο κωνοφόρων δέντρων και οι πόλοι από ξύλο αγριελιάς ή κρυνιάς. Τα εμπόλια ήταν στοιχεία τετραγωνικής διατομής και τοποθετούνταν σε αντίστοιχες εγκοπές ίδιου σχήματος στο κέντρο των σπονδύλων. Μία κυλινδρική οπή βρισκόταν στο κέντρο των εμπολίων που χρησίμευε για να τοποθετηθεί ένας ξύλινος πάσσαλος κυλινδρικού σχήματος, ο επονομαζόμενος πόλος, ο οποίος έδινε την δυνατότητα μικρών ελεύθερων περιστροφών των σπονδύλων.



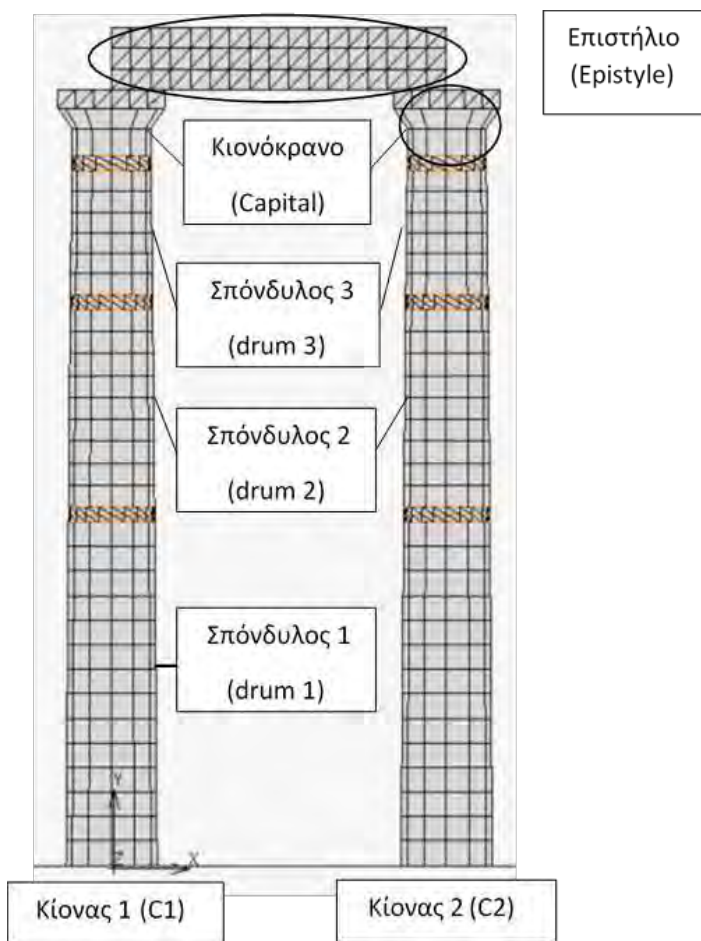
Σχήμα 2.4. Απεικόνιση γόμφων εντός των εντορμιών



Σχήμα 2.5. Σύστημα πόλου – εμπόλιου (Καρακίτσος, Κοντέας, 2013)

2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στοιχεία υλικών του υπό μελέτη συστήματος κίωνων με επιστήλιο

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ένα σύστημα δύο ίδιων σπονδυλωτών κίωνων, οι οποίοι αποτελούνται από τρεις σπονδύλους διαφορετικών διαστάσεων, με επιστήλιο που απλά εδράζεται στα κιονόκρανα των κίωνων (Σχήμα 2.6) Μελετώνται συστήματα με διαφορετικό ύψος επιστηλίου προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή του ύψους του στη δυναμική απόκριση του συστήματος. Το συνολικό ύψος των κίωνων μαζί με το κιονόκρανο είναι 4.20 m, ενώ η αξονική απόσταση των κίωνων είναι 1.91 m όπως παρατηρήθηκε και από του μελετητές στον αρχαιολογικό χώρο. Οι διαστάσεις τόσο του κάθε σπόνδυλου όσο και των κιονόκρανων αλλά και του επιστηλίου καταγράφονται στον Πίνακα 2.1.

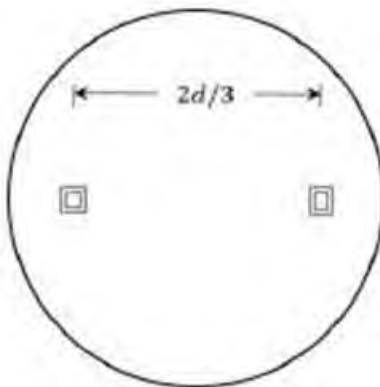


Σχήμα 2.6. Σπονδυλωτό πλαίσιο υπό μελέτη (Κοζανίτης, 2022)

Πίνακας 2.1. Διαστάσεις σπονδύλων και επιστηλίου

	h (m)	d _{min} (m)	d _{max} (m)
Σπόνδυλος 1 (Drum 1)	1.90	0.49	0.52
Σπόνδυλος 2 (Drum 2)	1.15	0.47	0.49
Σπόνδυλος 3 (Drum 3)	0.75	0.45	0.47
Κιονόκρανο (Capital)	0.40	-	0.61
Επιστήλιο (Epistyle)	0.40 και 0.80	-	0.45

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι σπόνδυλοι συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικούς γόμφους, ενώ το επιστήλιο απλά εδράζεται στα δύο κιονόκρανα των κίωνων. Οι γόμφοι αυτοί είναι διαστάσεων 2 x 2 cm και ύψους 6 cm, ενώ οι διαστάσεις των εντορμιών των γόμφων είναι 3 x 3 x 3cm και βρίσκονται στους σπονδύλους στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7. Διάταξη γόμφων

Τα υλικά που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση των σπονδύλων και του επιστηλίου είναι ο ασβεστόλιθος, ενώ για τους μεταλλικούς γόμφους ο χάλυβας. Οι μηχανικές τους ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. Σε όλες τις διεπιφάνειες ελήφθη υπόψη συντελεστής τριβής $\mu = 0.70$.

Πίνακας 2.2. Μηχανικές ιδιότητες (Χριστοδούλου, 2019)

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

2.4 Αρμονική διέγερση στην βάση των κiónων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το σύστημα των δύο σπονδυλωτών κiónων με επιστήλιο υποβλήθηκε σε απλή αρμονική διέγερση κατά την διεύθυνση X (διεύθυνση των δύο μεταλλικών πείρων). Η ημιτονοειδής διέγερση είναι δηλαδή της μορφής :

$$\ddot{u}_g = a_g \sin(2\pi f t) \quad (2.1)$$

Ο εξεταζόμενος χρόνος απόκρισης είναι 10 sec. Στα πρώτα 5 sec το προσομοίωμα εκτελεί εξαναγκασμένη ταλάντωση και στη συνέχεια στα επόμενα 5 sec αφήνεται να κινηθεί ελεύθερα. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι περιπτώσεις των εδαφικών διεγέρσεων στις οποίες υποβλήθηκε το σύστημα που μελετήθηκε.

# Μοντέλο με ύψος επιστηλίου 0.40 m * Μοντέλο με ύψος επιστηλίου 0.80 m	Εδαφική επιτάχυνση g (m ² /s)		
Συχνότητα διέγερσης f (Hz)	0.20 g	0.30 g	0.40 g
0.50 Hz	*	-	-
0.80 Hz	#*	*	*
1 Hz	#*	#*	#*
1.25 Hz	#*	#*	#*
1.50 Hz	#*	#*	#*
2 Hz	#*	#*	#*
3 Hz	-	-	#*
4 Hz	#*	#*	#*

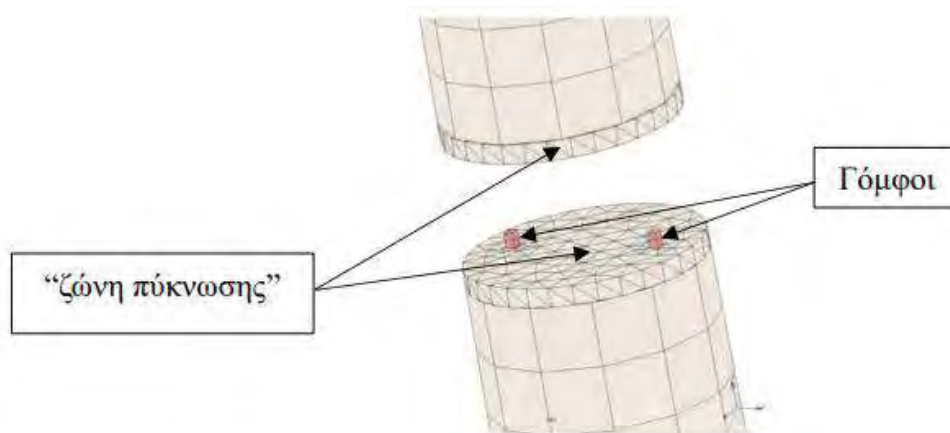
Πίνακας 2.3. Συνδυασμοί εδαφικών επιταχύνσεων και συχνοτήτων που μελετήθηκαν

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Αριθμητική προσομοίωση αντικείμενου μελέτης

3.1 Κατασκευή δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

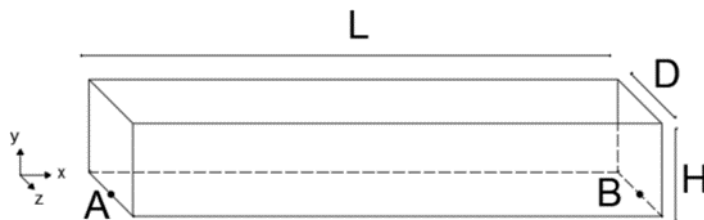
3.1.1 Σπονδυλωτό πλαίσιο πεπερασμένων στοιχείων με επιστήλιο και γόμφους μεταξύ των σπονδύλων

Επειδή μελετάμε δύο πλαίσια, ένα με ύψος επιστηλίου 0.4 m και ένα με ύψος επιστηλίου 0.8 m, έχουμε δύο διαφορετικά μοντέλα τα οποία αποτελούνται από 11.410 και 13.474 πεπερασμένα στοιχεία σαν αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω αντίστοιχα. Απαραίτητη κρίθηκε η δημιουργία δύο ζωνών διακριτοποίησης στους σπονδύλους κατά την μοντελοποίηση, η ζώνη πύκνωσης και η ζώνη αραιώσης. Για να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα, οι ζώνες πύκνωσης κατασκευάστηκαν κοντά στην βάση και στη κορυφή του κάθε σπόνδου, όπου δηλαδή βρίσκονται οι γόμφοι. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι εντορμίες έχουν βάθος 3 cm, επιλέχθηκε οι πυκνές ζώνες να έχουν πάχος 4 cm έτσι ώστε να μην προκύψουν φαινόμενα διείσδυσης των γόμφων στους σπονδύλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε κίονας έχει έξι γόμφους, που μοντελοποιήθηκαν ως ορθογωνικά πρίσματα, δηλαδή δύο ανά διεπιφάνεια οι οποίοι είναι τοποθετημένοι παράλληλα κατά την διεύθυνση x, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Η ζώνη αραιώσης από την άλλη πλευρά είναι όλο ο υπόλοιπος χώρος που απομένει ανάμεσα στις πυκνές ζώνες του κάθε σπόνδου. Μέσω της εντολής automesh του προγράμματος Marc Mentat διακριτοποιήθηκαν τα στερεά σώματα που χρησιμοποιήθηκαν για να κατασκευαστούν οι σπόνδυλοι, οι διαστάσεις των οποίων πάρθηκαν από τον Πίνακα 2.1.



Σχήμα 3.1. Απεικόνιση τοποθέτησης μεταλλικών πείρων

Όσο αφορά το επιστήλιο του πλαισίου, διακριτοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο με τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου. Δεν επιλέχθηκε να σχηματιστούν ζώνες αραίωσης και πύκνωσης όπως έγινε με τους σπονδύλους. Πρέπει να αναφερθεί ότι το επιστήλιο απλά εδράζεται πάνω στα κιονόκρανα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο κεντρικός κόμβος του κιονόκρανου να έρχεται σε επαφή με τον κεντρικό κόμβο του επιστηλίου στις δύο πλευρές του όπως φαίνεται παραπάνω στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Επιστήλιο

3.1.2 Είδη πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν

Για την αριθμητική διερεύνηση της τρισδιάστατης δυναμικής απόκρισης του συστήματος που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων MARC.

Με την βοήθεια της βιβλιοθήκης του προγράμματος Marc Mentat, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία για να επιτευχθεί η μοντελοποίηση του πλαισίου:

- Στοιχείο 98

Είναι στοιχείο δοκού με δύο κόμβους και έξι βαθμούς ελευθερίας, τρεις στρωφικούς και τρεις μεταφορικούς. Τοποθετήθηκαν τέσσερα στοιχεία τέτοιου τύπου ανάμεσα στις ζώνες πύκνωσης και αραίωσης των σπονδύλων προκειμένου να βρεθούν εύκολα και γρήγορα με την βοήθειά τους οι γωνίες στρώφης των σπονδύλων κατά την απόκρισή τους στις τρεις διαστάσεις. Να σημειωθεί ότι δεν τοποθετήθηκαν ανάμεσα στις διεπιφάνειες των σπονδύλων, επειδή ενδεχομένως έτσι υπήρχε περίπτωση να εμφανιστούν αστάθειες στον αλγόριθμο του προγράμματος. Αναπαρίσταται παρακάτω στο Σχήμα 3.3.α.

- Στοιχείο 241

Είναι σχήματος τρισδιάστατου ακανόνιστου τετραέδρου και αποτελείται από πέντε κόμβους, εκ των οποίων ο ένας βρίσκεται στο κέντρο του και οι υπόλοιποι τέσσερις στα άκρα του. Ο κάθε κόμβος αποτελείται από τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας. Παρά το μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος που επιφέρουν αυτά τα στοιχεία, βοηθάνε αρκετά στην καλύτερη συμπεριφορά για τα ασυμπίεστα υλικά εξαιτίας της διαδικασίας εξομάλυνσης των

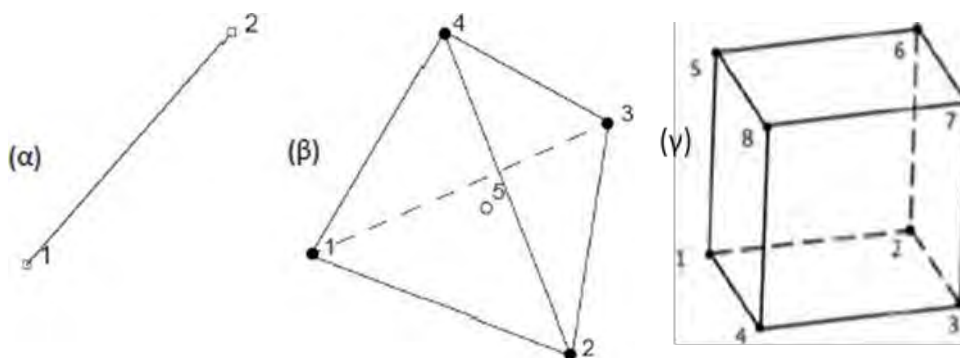
παραμορφώσεων (strain smoothing) που πραγματοποιείται από το λογισμικό. Χρησιμοποιήθηκαν στις λεπτές περιοχές των ζωνών πυκνής διακριτοποίησης (ζώνες πύκνωσης), στη μοντελοποίηση του επιστηλίου, αλλά και για την προσομοίωση των γόμφων. Αναπαρίσταται παρακάτω στο Σχήμα 3.3.β.

- Στοιχείο 7

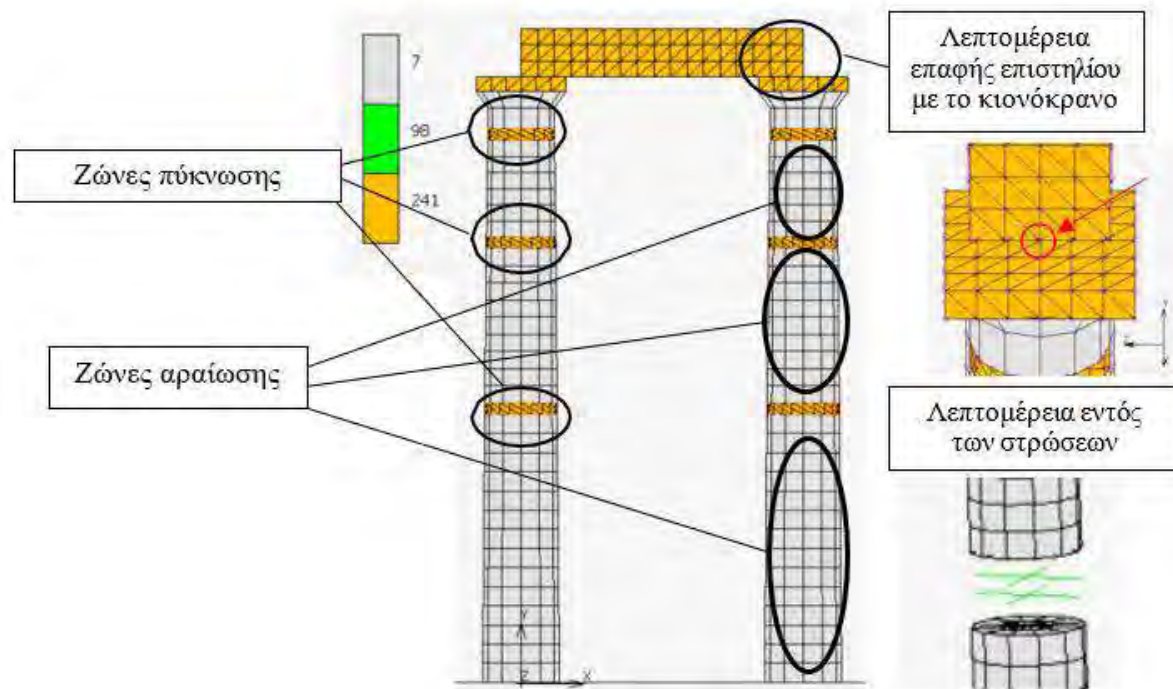
Είναι σχήματος τρισδιάστατου, ισοπαραμετρικού εξαέδρου και διαθέτει οκτώ κόμβους, καθένας από τους οποίους έχει τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας. Εξαιτίας του γεγονότος ότι έχει αρκετά μικρό υπολογιστικό κόστος, τα στοιχεία αυτά βοηθάνε κυρίως στα προβλήματα επαφής. Για αυτό, χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση των ζωνών αραιής διακριτοποίησης (ζώνες αραιώσης) του συστήματος που μελετάται. Αναπαρίσταται παρακάτω στο Σχήμα 3.3.γ.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε μια ορθογωνική επιφάνεια (quad 4) για να αναπαρασταθεί η άκαμπτη βάση πάνω στην οποία μοντελοποιήθηκε το πλαίσιο.

Η αναπαράσταση του συστήματος με τα στοιχεία της βιβλιοθήκης του λογισμικού Πεπερασμένων Στοιχείων MARC που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίησή του, αλλά και των ζωνών πύκνωσης και αραιώσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.3. Στοιχείο 98 (α), 241 (β), 7 (γ) της βιβλιοθήκης του Marc

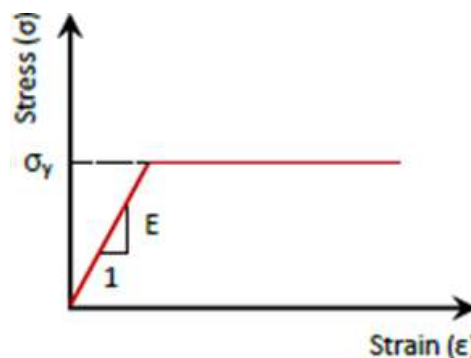


Σχήμα 3.4. Λεπτομερής απεικόνιση του συστήματος πεπερασμένων στοιχείων

3.2 Καταστατικοί νόμοι υλικών

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του πλαισίου, δηλαδή του χάλυβα, των γόμφων και του ασβεστόλιθου των κiónων και του επιστηλίου αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο στον Πίνακα 2.2.

Επιπλέον, για το χάλυβα θεωρήθηκε ο ελαστοπλαστικός καταστατικός νόμος χωρίς κράτυνση (Σχήμα 3.5) και λήφθηκε υπόψιν το κριτήριο διαρροής Von Mises, ενώ για τον ασβεστόλιθο θεωρήθηκε ελαστική συμπεριφορά.



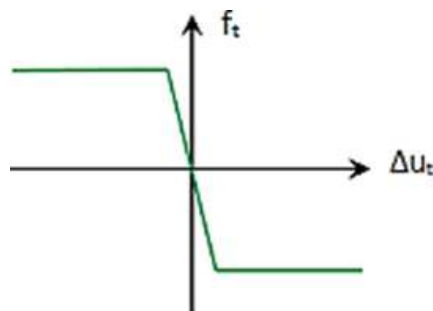
Σχήμα 3.5. Διάγραμμα $\sigma - \varepsilon$ ελαστοπλαστικού νόμου χωρίς κράτυνση

3.3 Φαινόμενο Επαφής – Τριβής

Καθοριστικό ρόλο για την σωστή διεκπεραίωση της αριθμητικής ανάλυσης παίζει ο τρόπος με τον οποίον τα διαφορετικά σώματα (contact bodies) έρχονται σε επαφή. Για το λόγο αυτόν κάθε σώμα ορίζεται μέσα στον κώδικα εάν είναι παραμορφώσιμο (meshed deformable body) ή εάν είναι άκαμπτο (geometric body). Ο κώδικας αναγνωρίζει επαφή μεταξύ δύο deformable ή μεταξύ ενός deformable και ενός geometric. Με βάση την παραδοχή αυτή του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε, ορίστηκε η βάση έδρασης ως geometric body (περιγράφεται με μία επιφάνεια) και οι σπόνδυλοι, τα κιονόκρανα και το επιστήλιο ως deformable bodies (αποτελούνται από πεπερασμένα στοιχεία).

Στη συνέχεια, ορίζονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωμάτων του προσομοιώματος. Για αυτό το λόγο ορίζεται ένας πίνακας (contact table) ο οποίος μας δίνει μια εικόνα για τα είδη επαφής ανάμεσα στα επιμέρους στοιχεία του συστήματος που μελετάται. Συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη αλληλεπίδρασης, η glued contact interaction και η touching. Συγκεκριμένα, ο τύπος glued contact interaction, ο οποίος δεν επιτρέπει μετακινήσεις των στοιχείων, ορίστηκε ανάμεσα στις πυκνές και αραιές ζώνες, για την σύνδεση ανάμεσα στα Στοιχεία 98 και τους σπόνδουλους, αλλά και για τη σύνδεση του κάτω μέρος κάθε γόμφου με τον εκάστοτε σπόνδυλο. Ως απλή επαφή touching ορίστηκε η επαφή του κατώτερου σπόνδυλου με την άκαμπτη βάση, η επαφή των διεπιφανειών των σπονδύλων μεταξύ τους αλλά και του κιονόκρανου με το επιστήλιο, καθώς και η επαφή του άνω μέρους των μεταλλικών γόμφων με τους υπερκείμενους σπονδύλους. Τέλος, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επαφή είναι ο node – to – segment.

Σε ό,τι έχει να κάνει με την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των διεπιφανειών, εφαρμόστηκε το μοντέλο Coulomb Bilinear, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6. Μοντέλο Coulomb Bilinear

3.4 Συνοριακές συνθήκες

Στις συνοριακές συνθήκες ελήφθη υπόψη το ίδιο βάρος της κατασκευής με την επιβολή κατακόρυφης επιτάχυνσης ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) σε όλους τους κόμβους του διακριτοποιημένου προσομοιώματος. Επίσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο Κεφάλαιο 2.4, εφαρμόστηκε μια ημιτονοειδής αρμονική ταλάντωση στην βάση έδρασης, η οποία εισήχθη με τη μορφή μεταβαλλόμενης με το χρόνο μετατόπισης κατά τη διεύθυνση x .

3.5 Επιλογή μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης

Καθώς όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από έντονη μη γραμμικότητα, για την επίλυση των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων κίνησης επελέγη η μέθοδος της εν τω χρόνω ολοκλήρωσης (transient analysis) και συγκεκριμένα ο επιλύτης Single Step Houbolt Operator. Επίσης, για τη λύση των διακριτοποιημένων εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε η Newton Raphson η οποία αν και χρησιμοποιείται πολύ συχνά αυξάνει πολύ το υπολογιστικό κόστος σε τρισδιάστατα προβλήματα όπως το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία. Τέλος, το χρονικό βήμα ορίστηκε ίσο με 10^{-3} το οποίο για τη διάρκεια των 10 sec που μελετήθηκε η απόκριση του προσομοιώματος, οδηγεί σε 10.000 βήματα για κάθε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Δυναμική απόκριση σπονδυλωτού πλαισίου με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.4 m

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η δυναμική απόκριση του συστήματος των δύο σπονδυλωτών κιόνων με επιστήλιο ύψους 0.4 m.

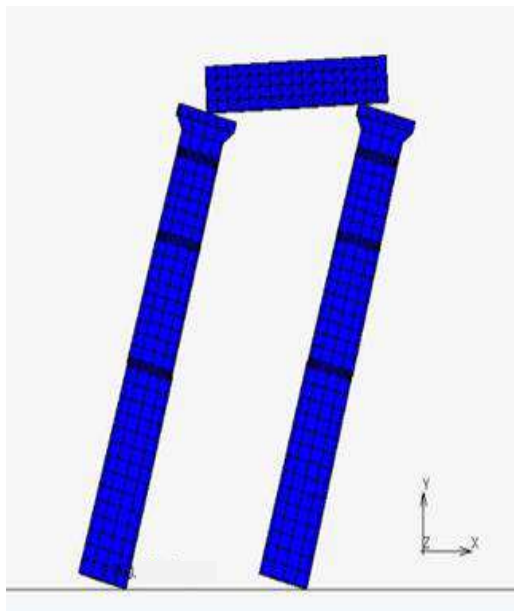
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 και συγκεκριμένα στον Πίνακα 2.3, το πλαίσιο υποβλήθηκε σε αρμονική διέγερση με εδαφικές επιταχύνσεις 0.20g, 0.30g και 0.4g. Για κάθε εδαφική επιτάχυνση μελετήθηκαν συχνότητες που κυμαίνονταν από 0.5 Hz ως και 4 Hz. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μεγέθη που αφορούν την δυναμική απόκριση του πλαισίου. Συγκεκριμένα, παραθέτονται στιγμιότυπα κατάρρευσης από περιπτώσεις εδαφικών διεγέρσεων στις οποίες παρατηρήθηκε κατάρρευση του πλαισίου. Επίσης, παρουσιάζονται διαγράμματα γωνιών λικνισμού αλλά και γωνιών στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y, συναρτήσει του χρόνου, τόσο εντός (θz) όσο και εκτός επιπέδου (θx) όλων των σπονδύλων. Ακόμα, δίνονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα των ολισθήσεων των σπονδύλων του πλαισίου σε όλες τις διεπιφάνειες. Πέρα από αυτά που αναφέρθηκαν, παρουσιάζονται και τα διαγράμματα των καθ' ύψος μέγιστων κατά απόλυτη τιμή γωνιών λικνισμού και μετατοπίσεων όλων των σπονδύλων και του κιονόκρανου. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι όλες οι μέγιστες καθ' ύψος τιμές πάρθηκαν από τον κόμβο που βρίσκεται στο κέντρο βάρους του κάθε σπόνδυλου. Τέλος, παρουσιάζονται και τα διαγράμματα των παραμενουσών γωνιών στροφής y, αλλά και των παραμενουσών ολισθήσεων του επιστηλίου.

4.2 Περιγραφή δυναμικής απόκρισης του πλαισίου

4.2.1 Στιγμιότυπα κατάρρευσης του πλαισίου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα κατάρρευσης του σπονδυλωτού πλαισίου με επιστήλιο ύψους 0.4 m για όλες τις εδαφικές επιταχύνσεις για τις οποίες έγινε μελέτη στην παρούσα εργασία.

Συγκεκριμένα, για εδαφική επιτάχυνση $a_g = 0.20g$ παρατηρήθηκε κατάρρευση του πλαισίου για $f \leq 0.8$ Hz. Στην περίπτωση όπου $f = 0.5$ Hz η κατάρρευση επέρχεται περίπου την χρονική στιγμή $t = 2.5$ sec και γίνεται φανερό στο Σχήμα 4.1 ότι το πλαίσιο εμφανίζει μια ενιαία μονολιθική συμπεριφορά σε όλο το ύψος του, με έντονη εντός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά η οποία φαίνεται ότι οδηγεί το πλαίσιο στην κατάρρευσή του. Στην δεύτερη περίπτωση για $f = 0.8$ Hz η κατάρρευση επέρχεται περίπου την χρονική στιγμή $t = 5.2$ sec. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ότι οι σπόνδυλοι 2, 3 και το κιονόκρανο έχουν ενιαία συμπεριφορά η οποία χαρακτηρίζεται από έντονη εκτός επιπέδου λικνιστική απόκριση. Να σημειωθεί, ότι κατά την κατάρρευση στις δύο παραπάνω περιπτώσεις δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες ολισθήσεις.

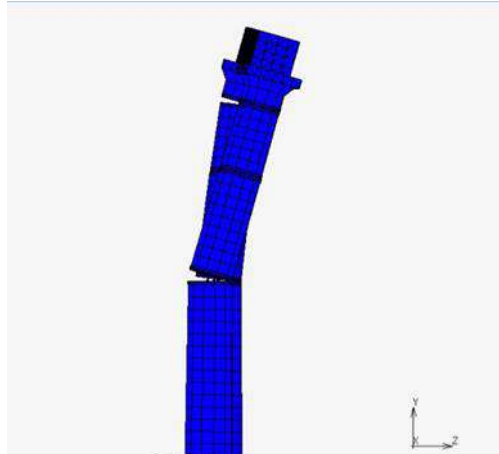
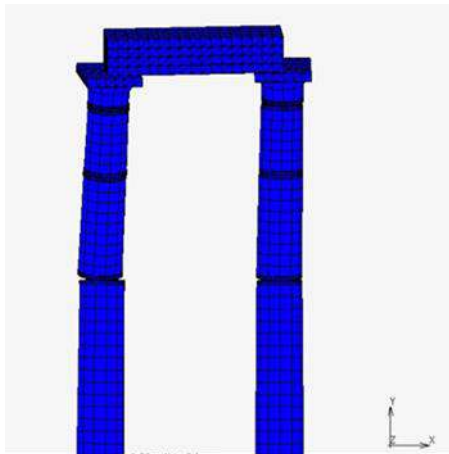


$$\alpha_g = 0.20g$$

$$f = 0.5 \text{ Hz}$$

$$t = 2.5 \text{ sec}$$

Σχήμα 4.1. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.4 m



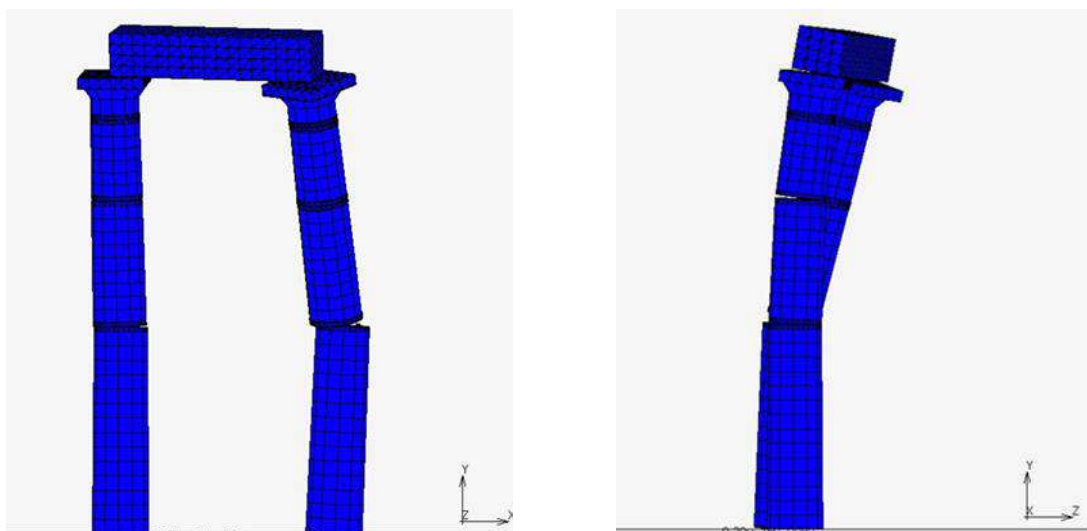
$$\alpha_g = 0.20g$$

$$f = 0.8 \text{ Hz}$$

$$t = 5.2 \text{ sec}$$

Σχήμα 4.2. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.4 m

Στην περίπτωση της εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή $\alpha_g = 0.30g$, το πλαίσιο καταρρέει σε συχνότητες $f \leq 1$ Hz. Παρακάτω στο Σχήμα 4.3 φαίνονται τα στιγμιότυπα κατάρρευσης για $f = 1$ Hz, η οποία επέρχεται την χρονική στιγμή $t = 4.5$ sec. Και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται έντονη λικνιστική απόκριση των ανώτερων σπονδύλων και του κιονόκρανου, καθώς και μεγάλες γωνίες στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η συμπεριφορά αυτή είναι πιο έντονη στον δεξιό κίονα.



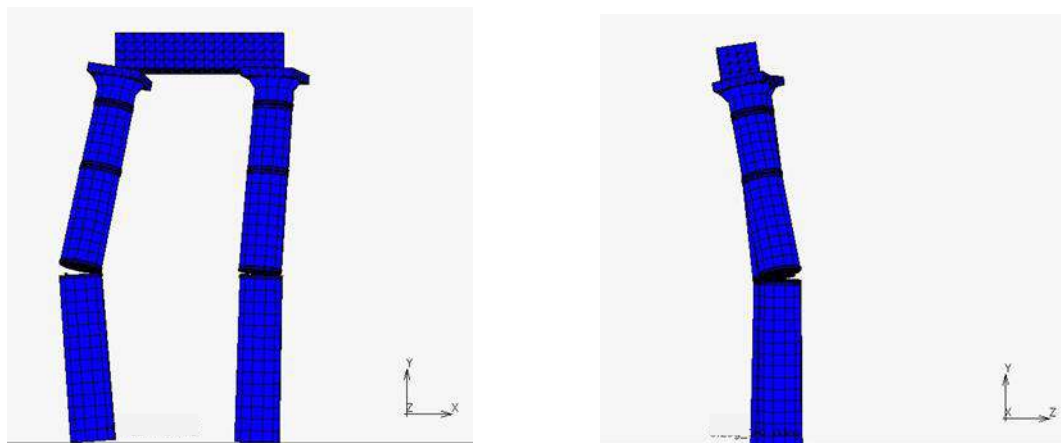
$$\alpha_g = 0.30g$$

$$f = 1 \text{ Hz}$$

$$t = 4.5 \text{ sec}$$

Σχήμα 4.3. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.4 m

Τέλος, για την περίπτωση της εδαφικής επιτάχυνσης $\alpha_g = 0.40g$, το πλαίσιο καταρρέει για συχνότητες $f \leq 1.5$ Hz. Παρακάτω στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα κατάρρευσης για συχνότητα $f = 1.5$ Hz την χρονική στιγμή $t = 3.5$ sec. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι η κατάρρευση επέρχεται από την έντονη, τόσο εντός όσο και εκτός επιπέδου, λικνιστική συμπεριφορά των ανωτέρων σπονδύλων του πλαισίου. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην κατάρρευση συμβάλλει και η ανάπτυξη μεγάλων γωνιών στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα των συγκεκριμένων σπονδύλων.



$$\alpha_g = 0.40g$$

$$f = 1.5 \text{ Hz}$$

$$t = 3.5 \text{ sec}$$

Σχήμα 4.4. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.4 m

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω παρατηρήσεις καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

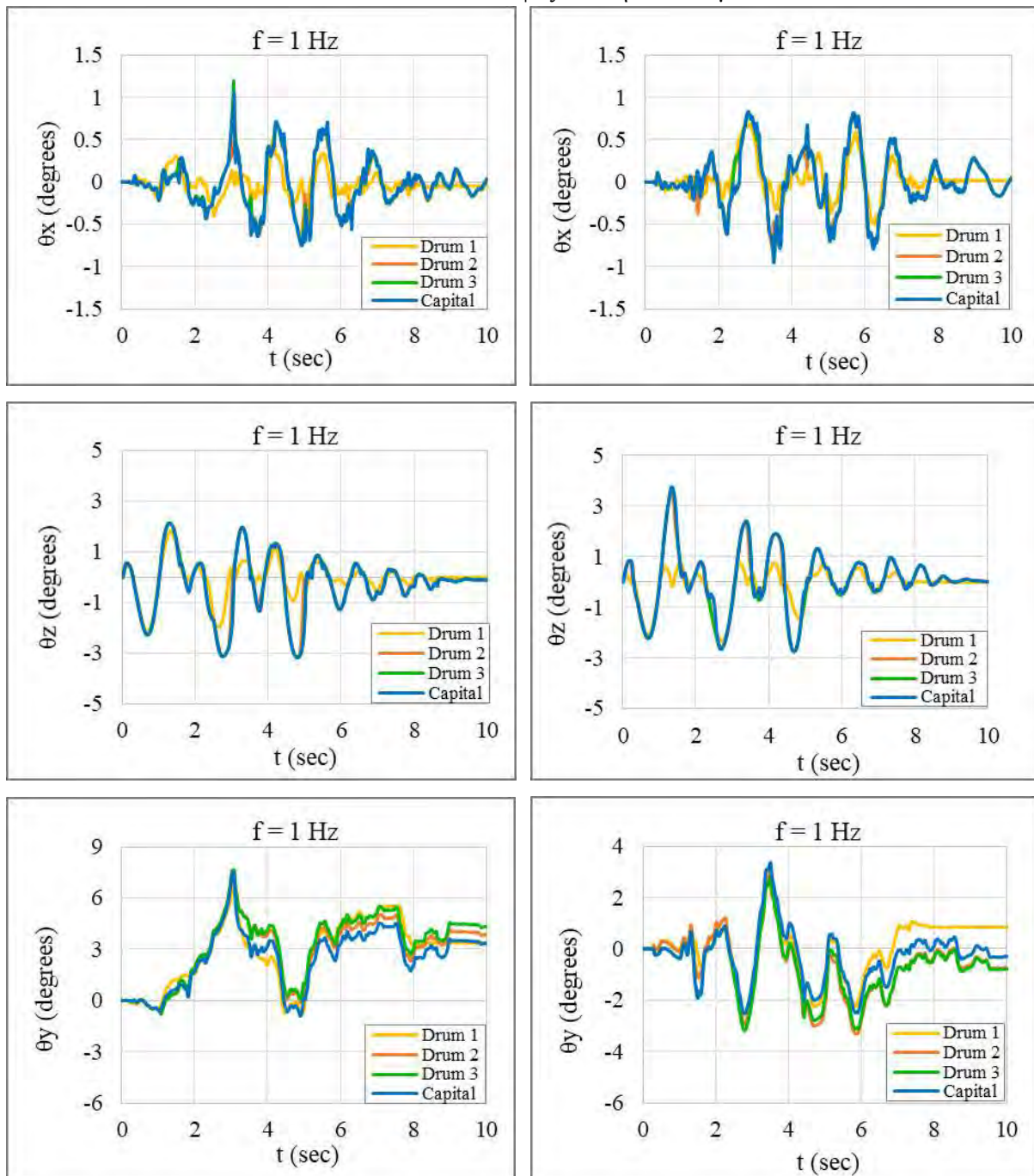
- Στις χαμηλές συχνότητες η κατάρρευση του πλαισίου είναι αποτέλεσμα της έντονης λικνιστικής συμπεριφοράς των σπονδύλων.
- Στις υψηλότερες συχνότητες η κατάρρευση είναι αποτέλεσμα τόσο της έντονης λικνιστικής συμπεριφοράς των σπονδύλων όσο και των έντονων γωνιών στροφής τους περί τον κατακόρυφο άξονα y. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στις συχνότητες αυτές έχουμε παράλληλα και την εμφάνιση σημαντικών ολισθήσεων μεταξύ των σπονδύλων αλλά και μεταξύ του κιονόκρανου και του επιστηλίου.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρείται εντονότερη καταπόνηση των ανώτερων σπονδύλων και του κιονόκρανου.
- Το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες επέρχεται κατάρρευση του σπονδυλωτού πλαισίου διευρύνεται καθώς αυξάνει η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης.

4.2.2 Διαγράμματα γωνιών στροφής των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο

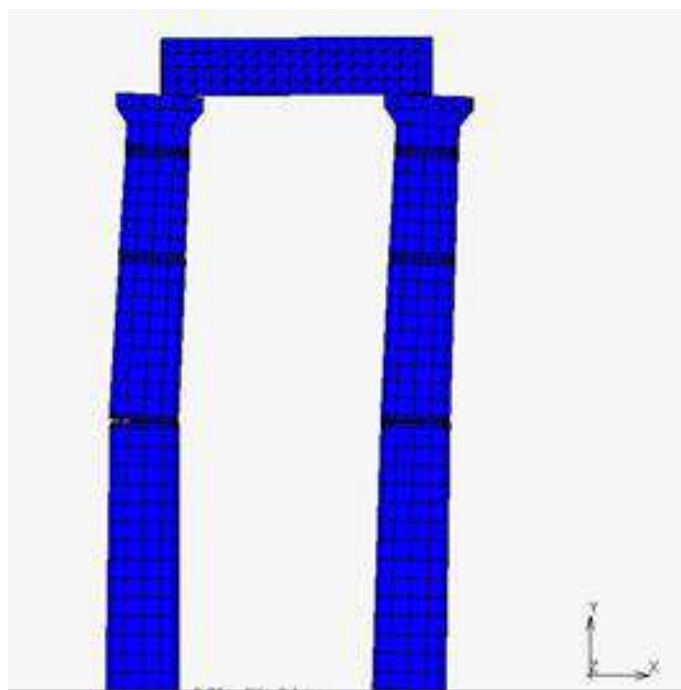
Παρακάτω στα Σχήματα 4.5 ως 4.20 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των εκτός (θ_x) και των εντός επιπέδου (θ_z) γωνιών λικνισμού όλων των σπονδύλων, καθώς και των γωνιών στροφής τους περί τον κατακόρυφο άξονα (θ_y) συναρτήσει του χρόνου για τις περιπτώσεις εδαφικών διεγέρσεων στις οποίες δεν επέρχεται κατάρρευση του πλαισίου και οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3. Δίνονται επίσης και στιγμιότυπα της απόκρισης του συστήματος των δύο κιόνων με επιστήλιο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Από τη μελέτη των προαναφερθέντων διαγραμμάτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα :

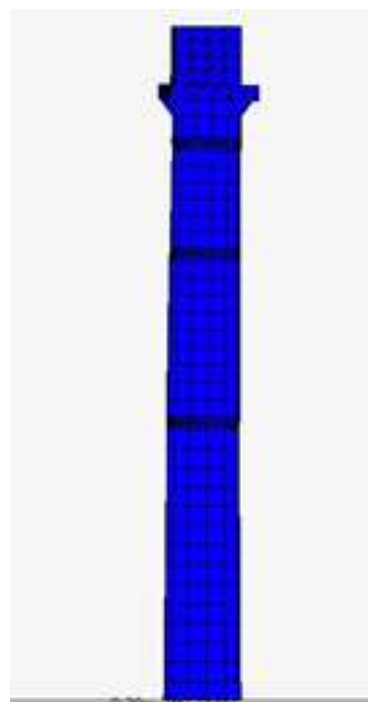
- Ανεξάρτητα από την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, όσο αυξάνεται η τιμή της συχνότητας διέγερσης τόσο μειώνονται οι γωνίες λικνισμού αλλά και οι γωνίες στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y όλων των σπονδύλων.
- Η εντός επιπέδου λικνιστική απόκριση των σπονδύλων είναι επικρατέστερη της εκτός επιπέδου λικνιστικής απόκρισης σε όλες τις περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στις υψηλές συχνότητες η λικνιστική απόκριση των σπονδύλων είναι αμελητέα ($\theta_x, \theta_z \rightarrow 0$).
- Καθώς αυξάνει η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης γίνεται πιο έντονη η λικνιστική συμπεριφορά των κιόνων για την ίδια συχνότητα διέγερσης. Το ίδιο ισχύει και για τη στροφή των κιόνων περί τον κατακόρυφο άξονα.
- Σε όλες τις διεγέρσεις παρατηρείται ενιαία λικνιστική συμπεριφορά των ανώτερων σπονδύλων (σπόνδυλοι 2, 3 και κιονόκρανο). Δεν παρατηρείται όμως ίδια συμπεριφορά σε ό,τι έχει να κάνει με τις γωνίες στροφής των σπονδύλων περί τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 4.5. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)

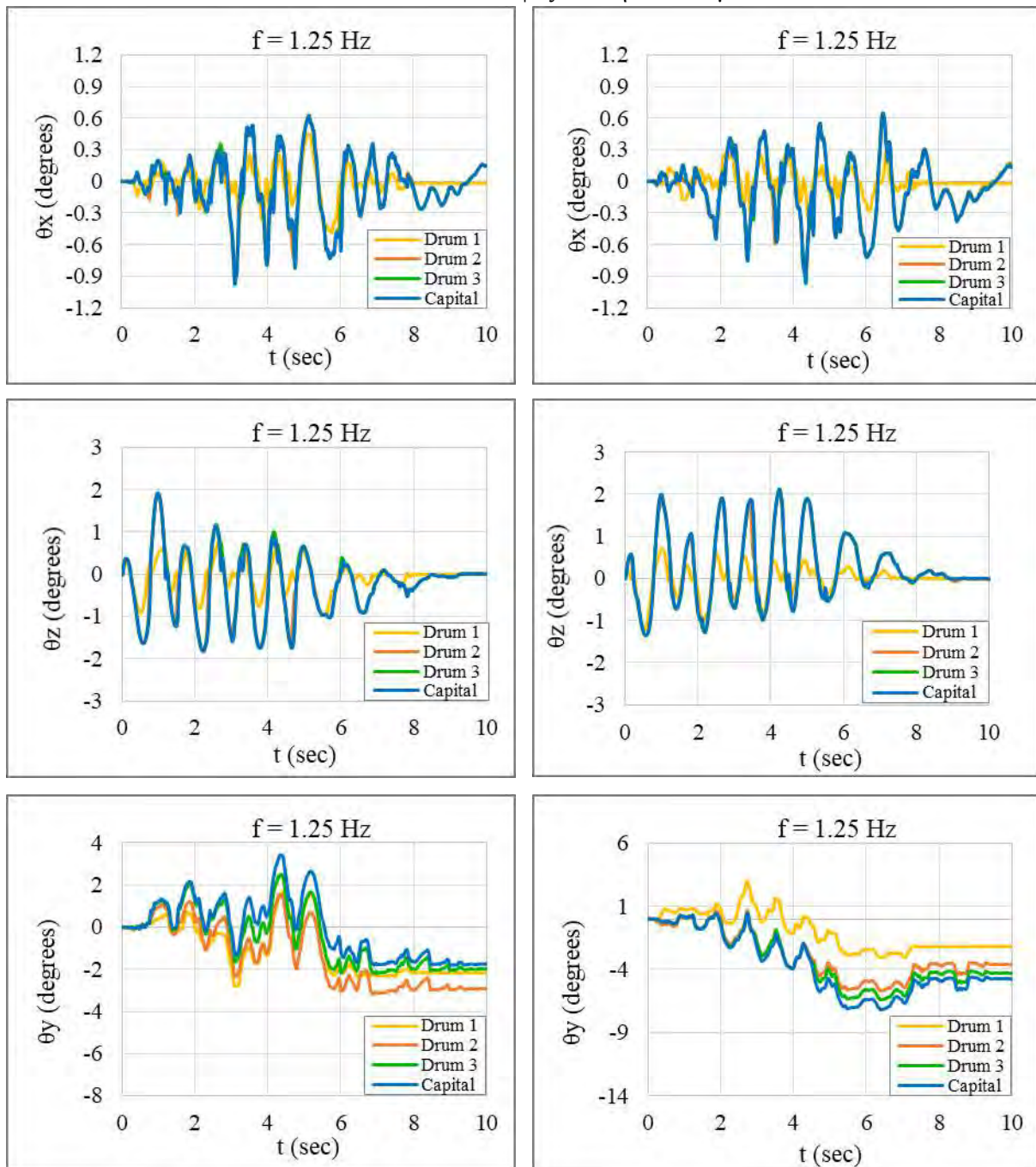


$\alpha_g = 0.20g$
 $f = 1 \text{ Hz}$
 $t = 4.8 \text{ sec}$

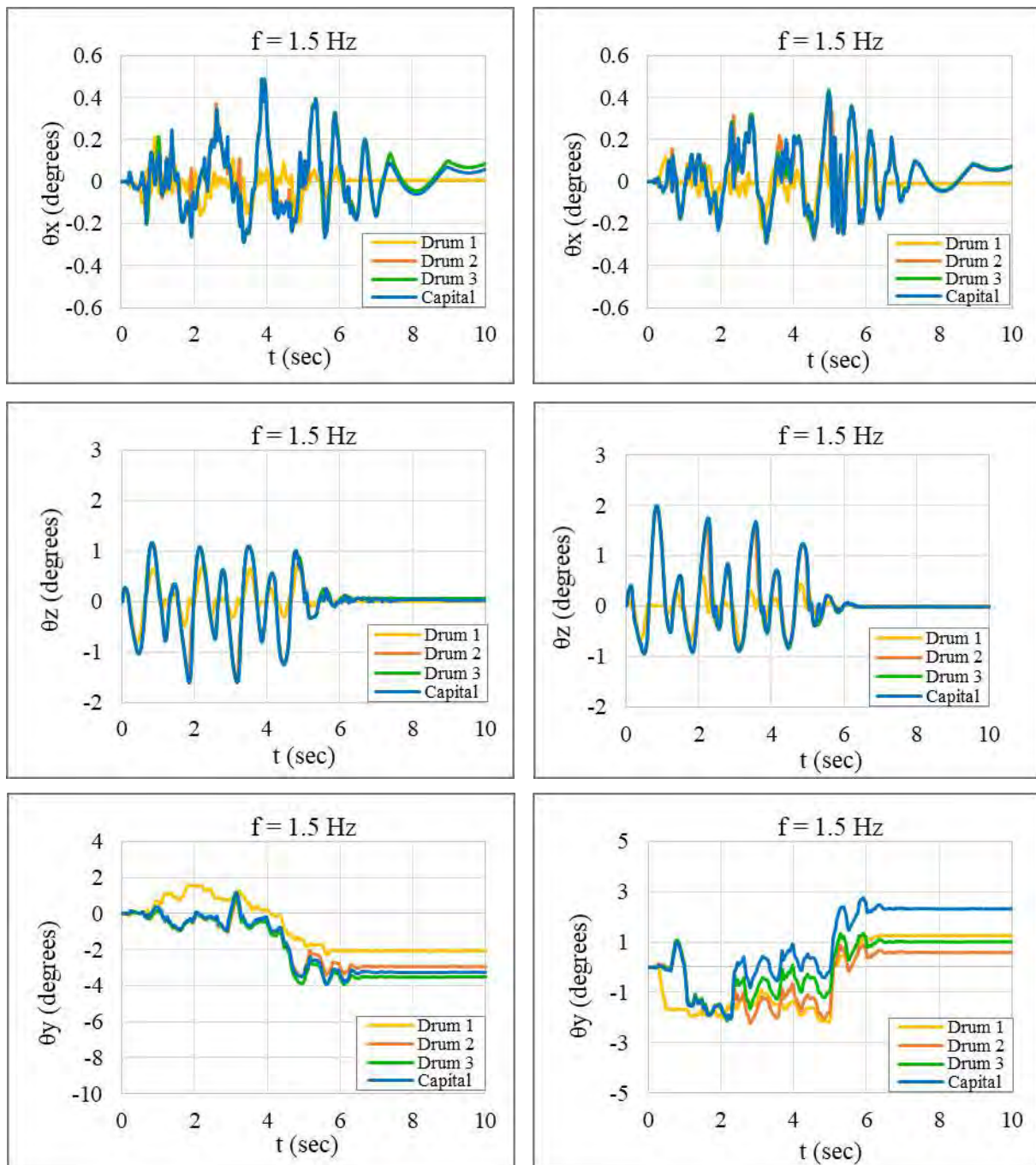


$\alpha_g = 0.20g$
 $f = 1 \text{ Hz}$
 $t = 3.1 \text{ sec}$

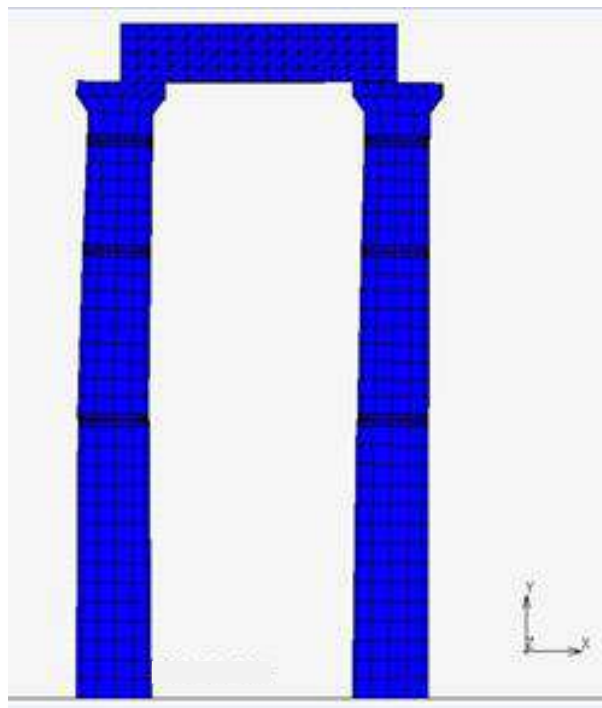
Σχήμα 4.6. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1 \text{ Hz}$ εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



Σχήμα 4.7. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



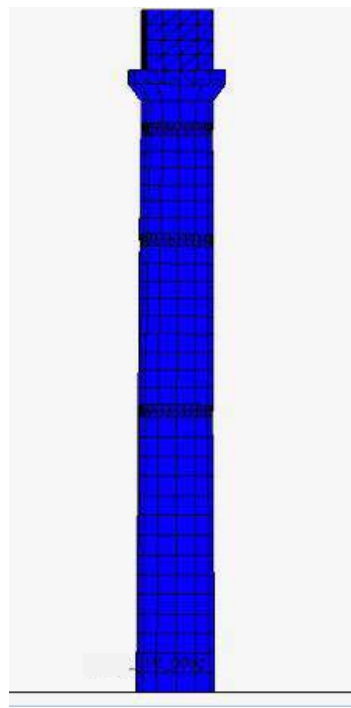
Σχήμα 4.8. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



$$\alpha_g = 0.20g$$

$$f = 1.5 \text{ Hz}$$

$$t = 1.87 \text{ sec}$$

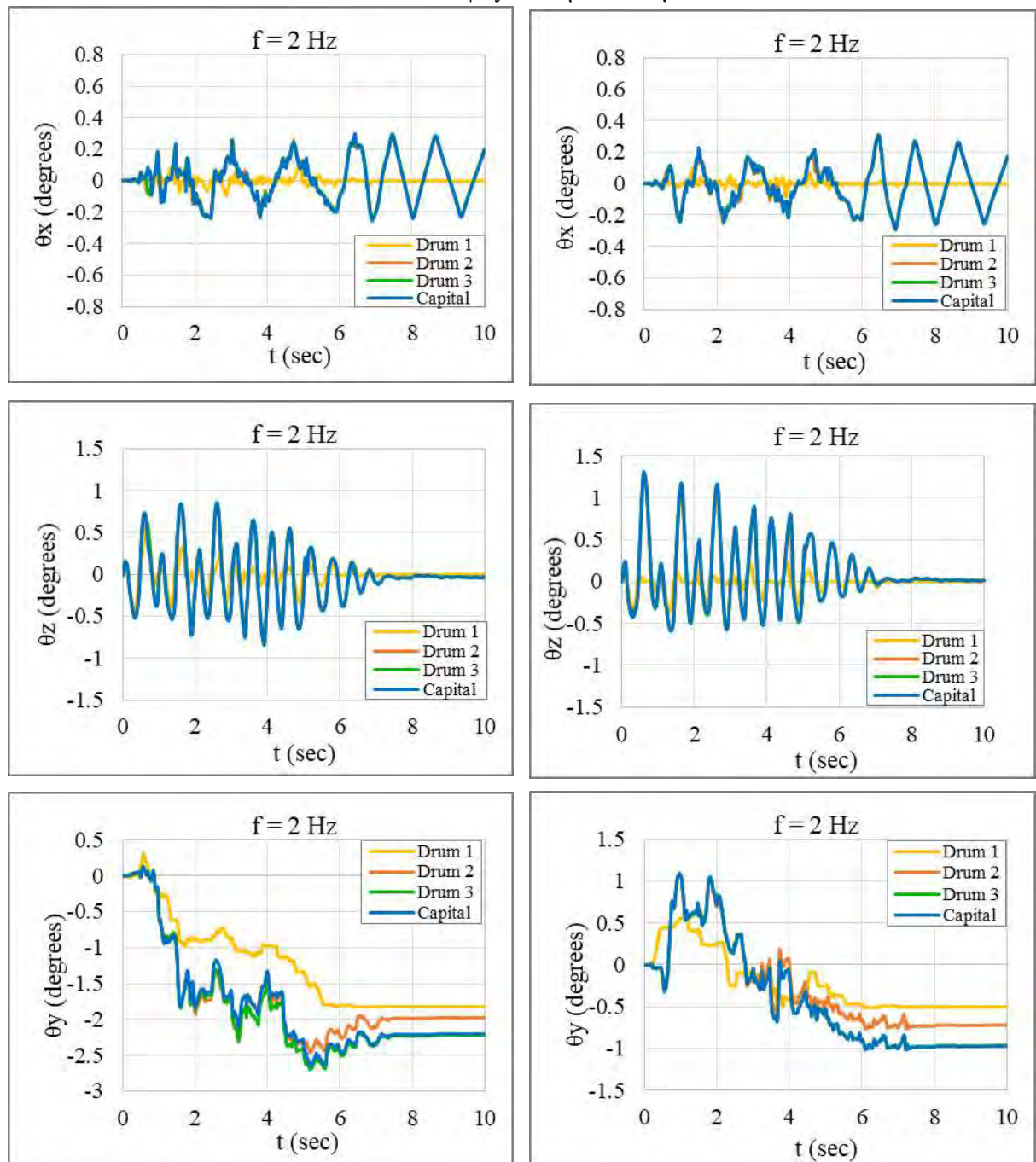


$$\alpha_g = 0.20g$$

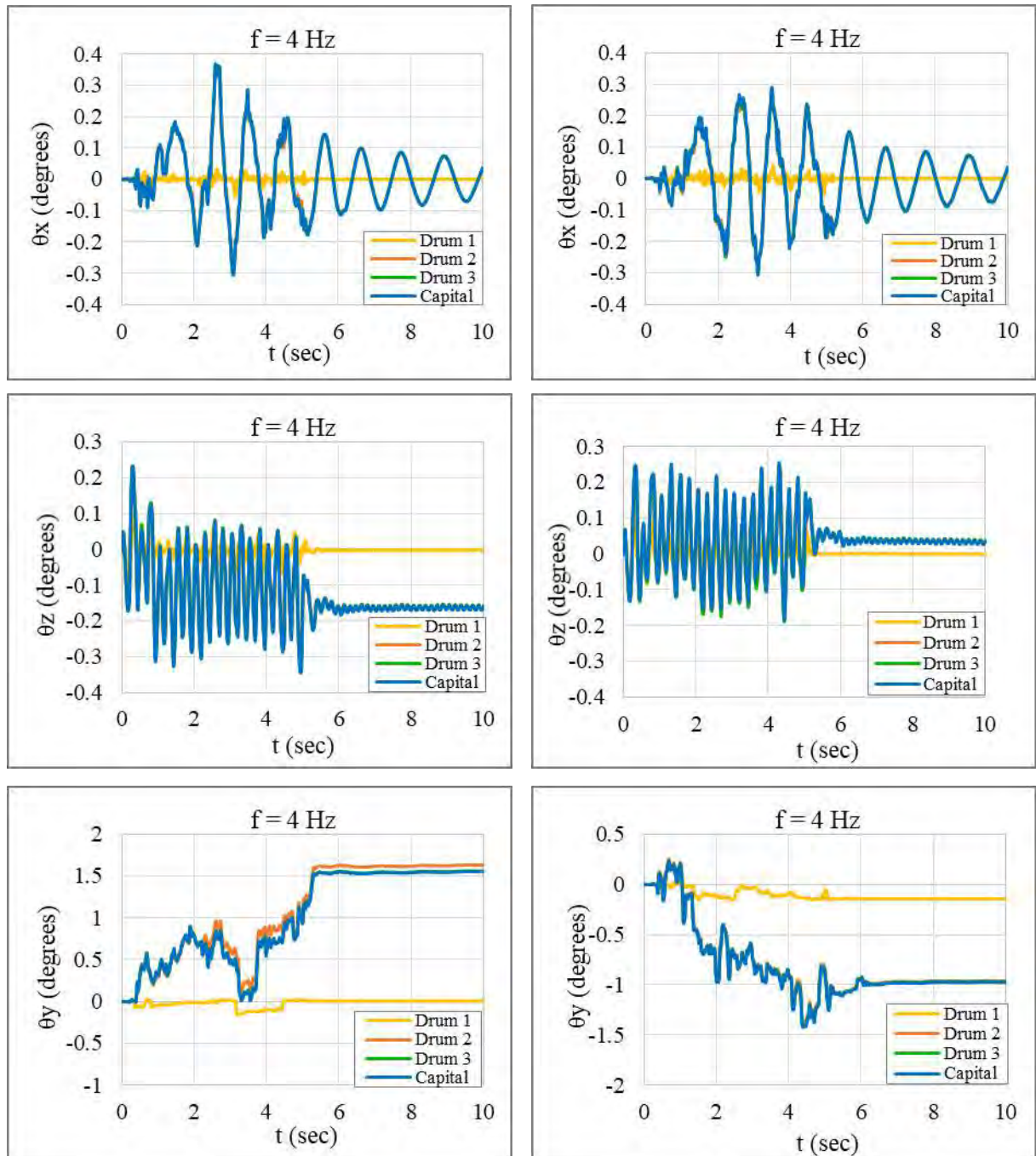
$$f = 1.5 \text{ Hz}$$

$$t = 3.95 \text{ sec}$$

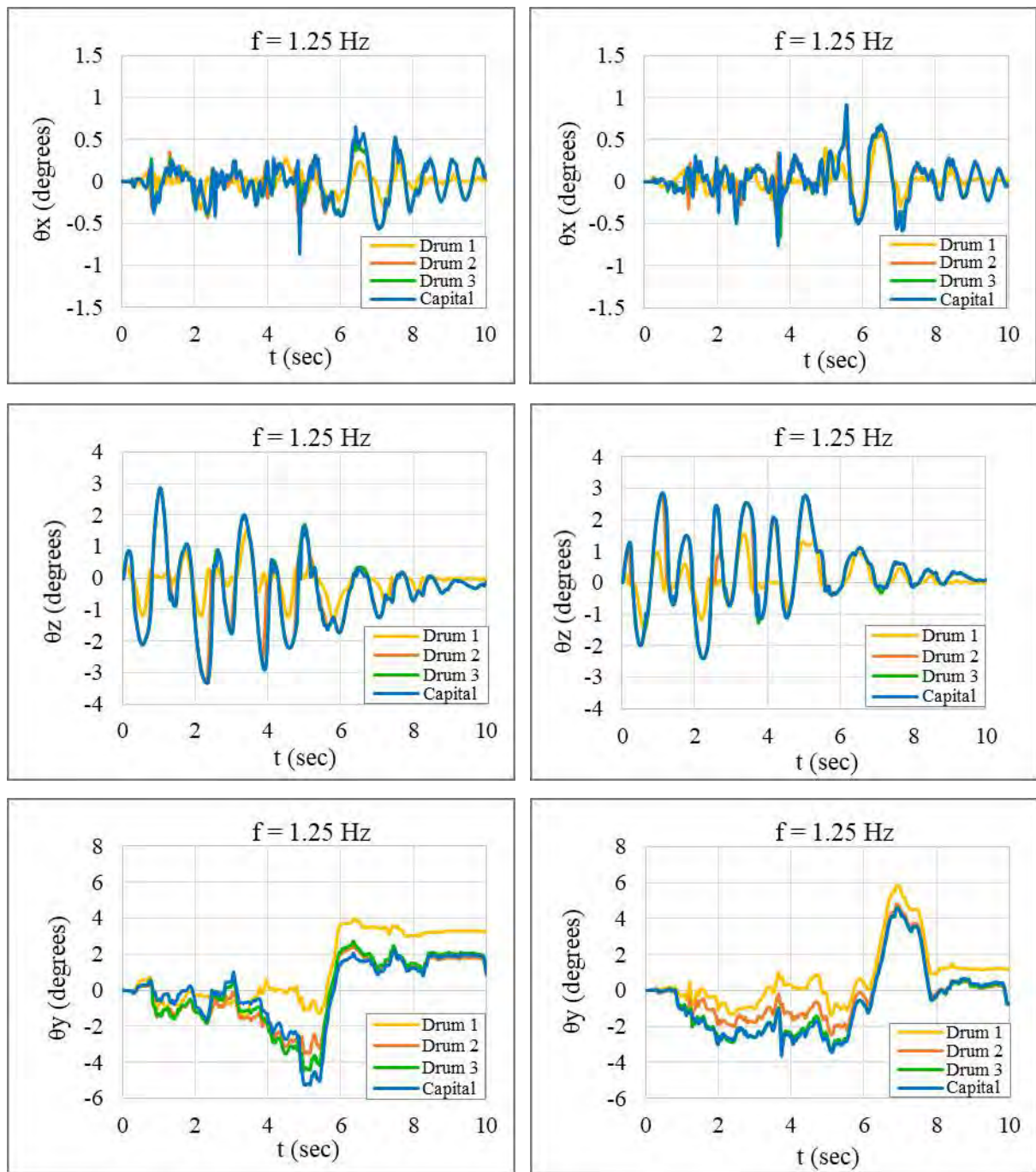
Σχήμα 4.9. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.5 \text{ Hz}$ εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



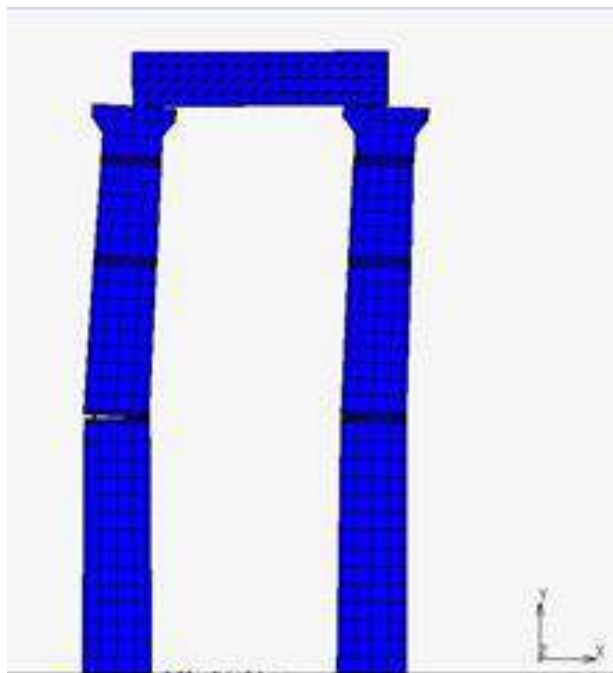
Σχήμα 4.10. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 4.11. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



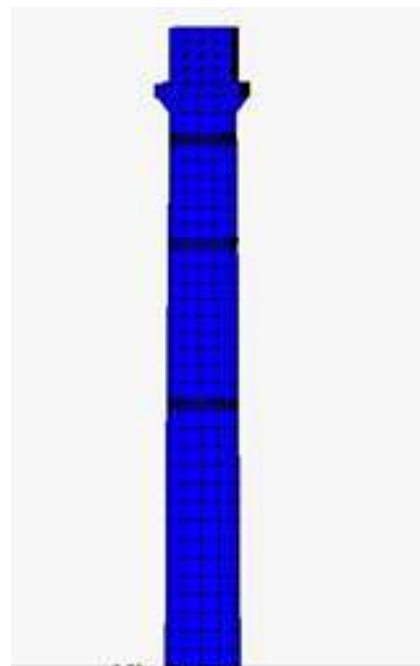
Σχήμα 4.12. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.25\text{Hz}$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



$$\alpha_g = 0.30g$$

$$f = 1.25 \text{ Hz}$$

$$t = 2.32 \text{ sec}$$

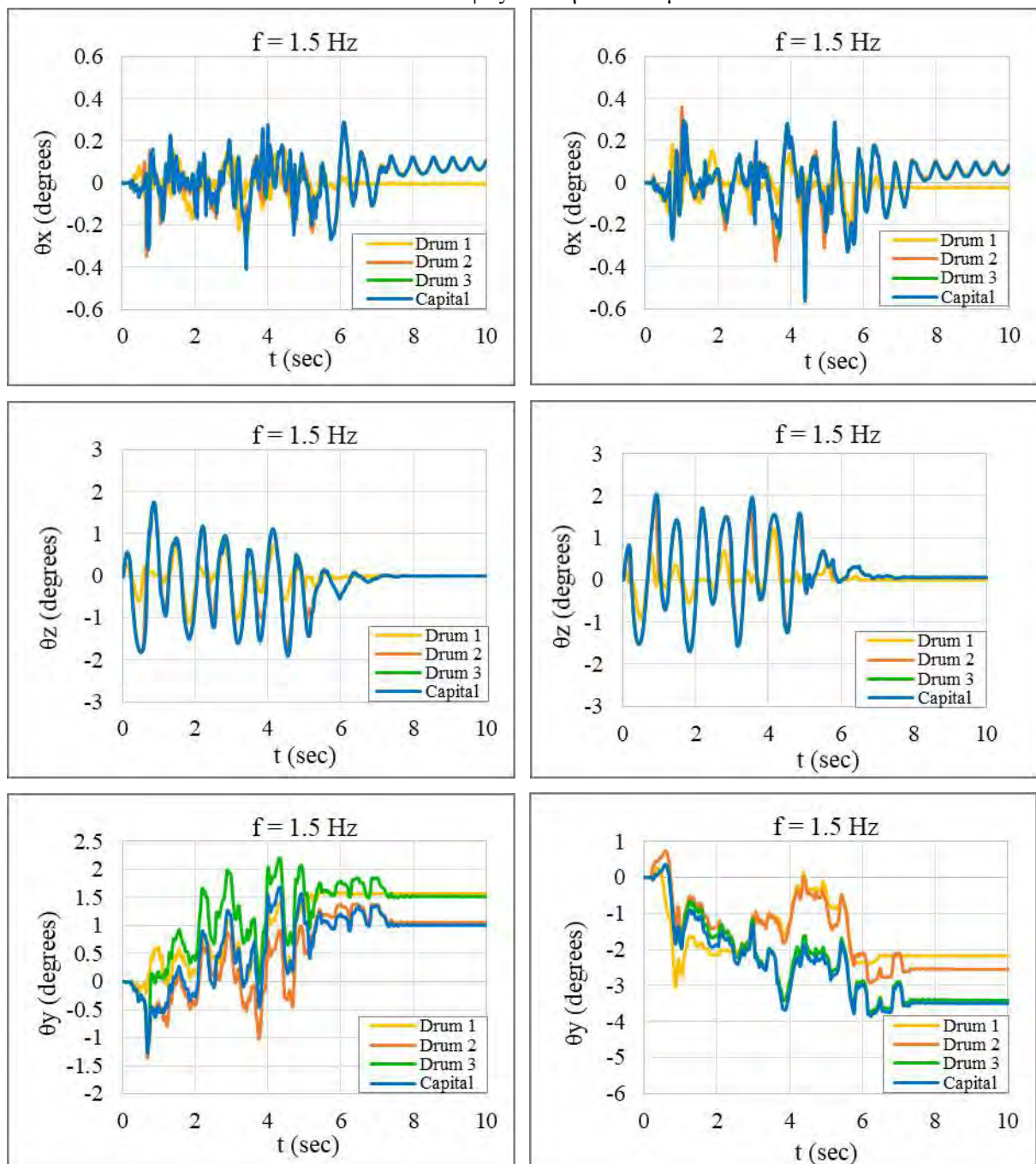


$$\alpha_g = 0.30g$$

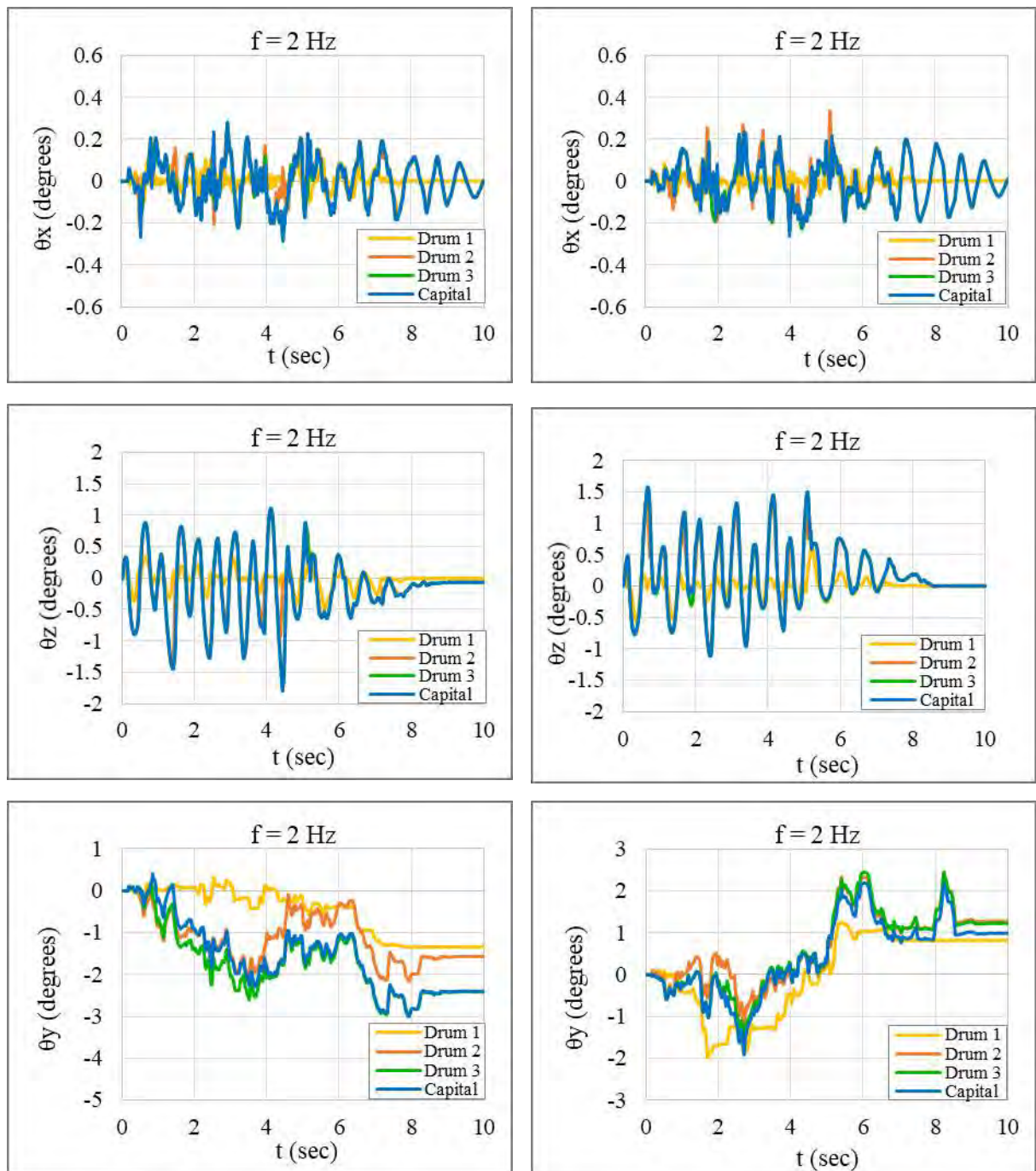
$$f = 1.25 \text{ Hz}$$

$$t = 4.1 \text{ sec}$$

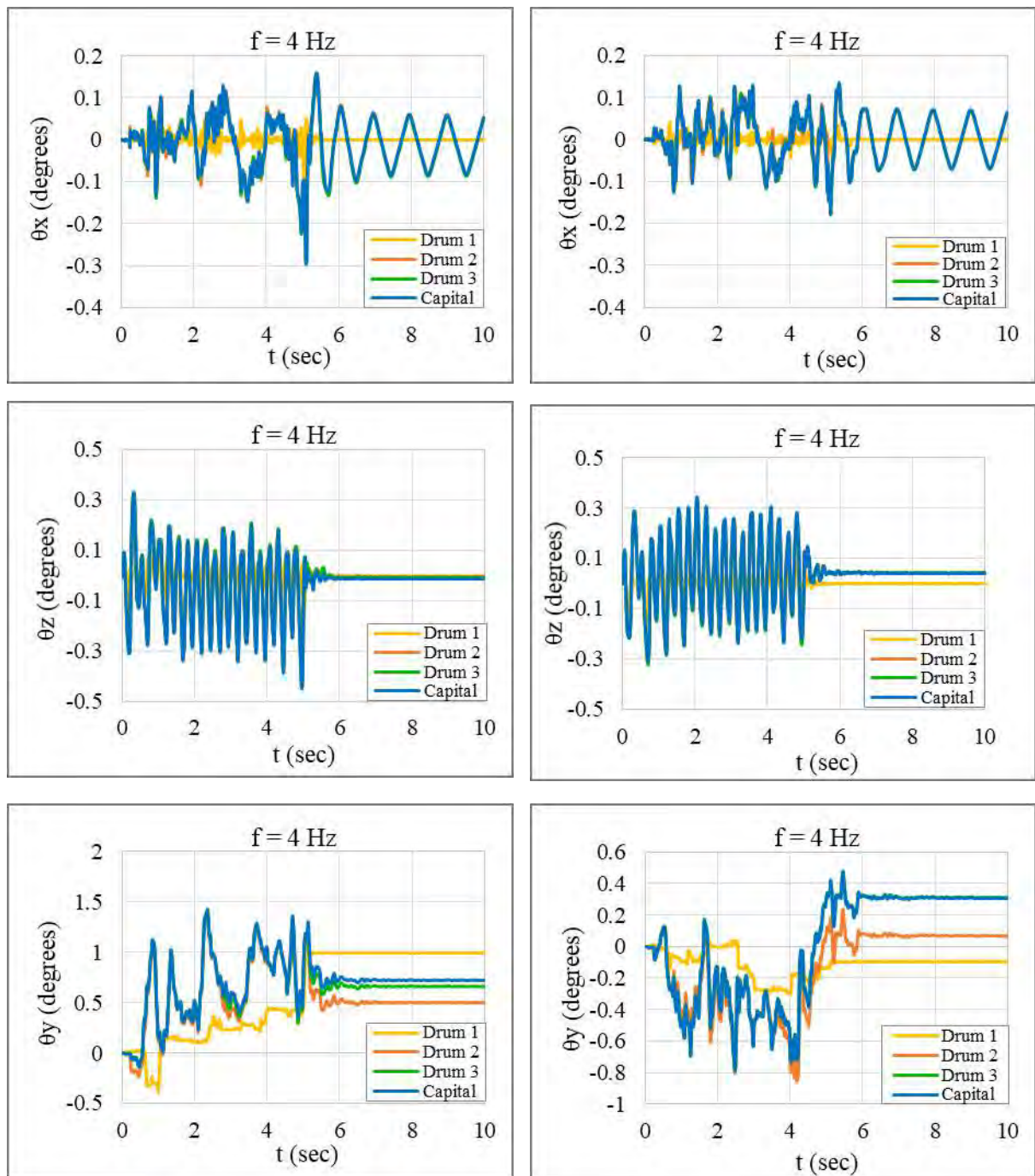
Σχήμα 4.13. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.25 \text{ Hz}$ εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



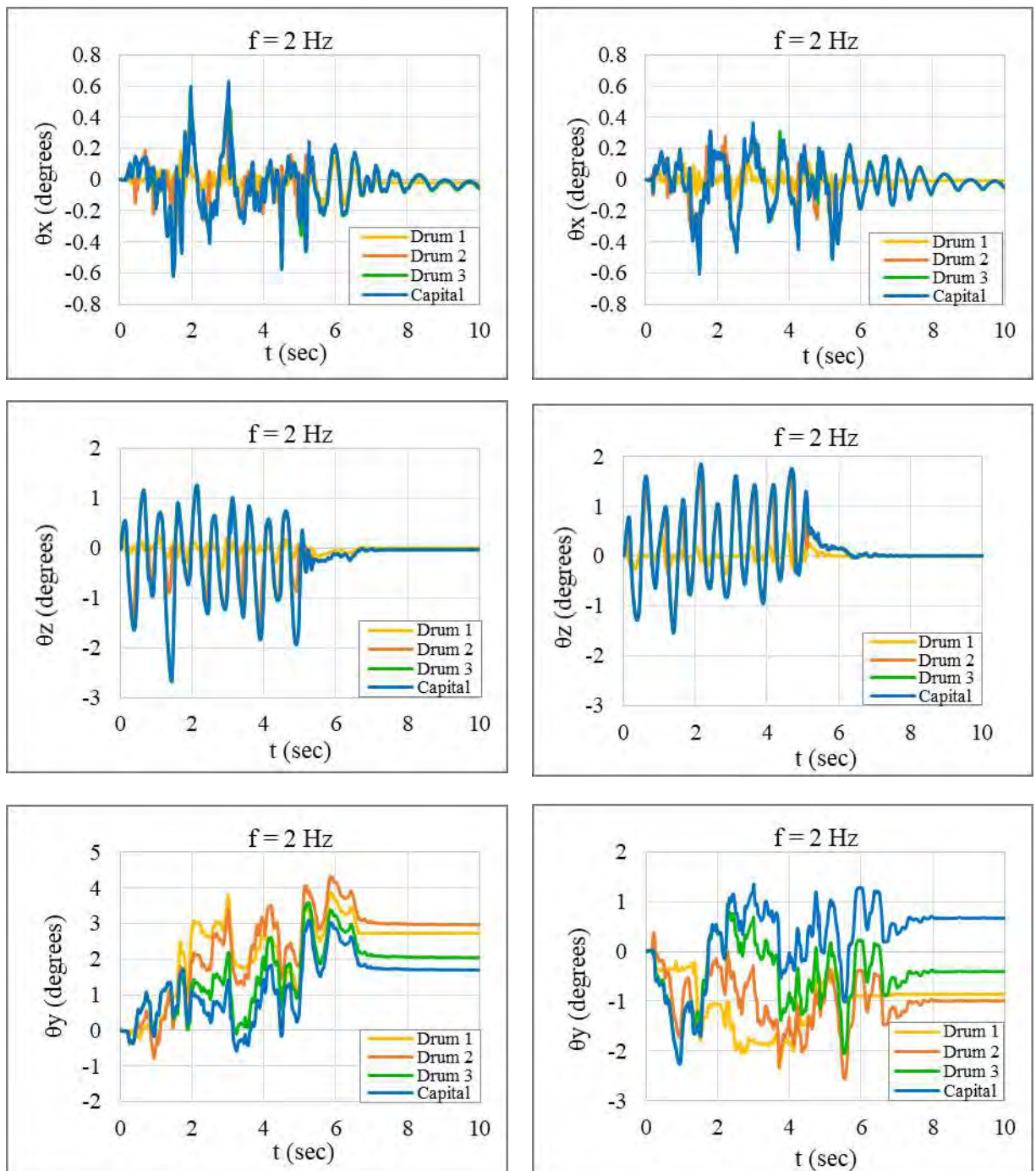
Σχήμα 4.14. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



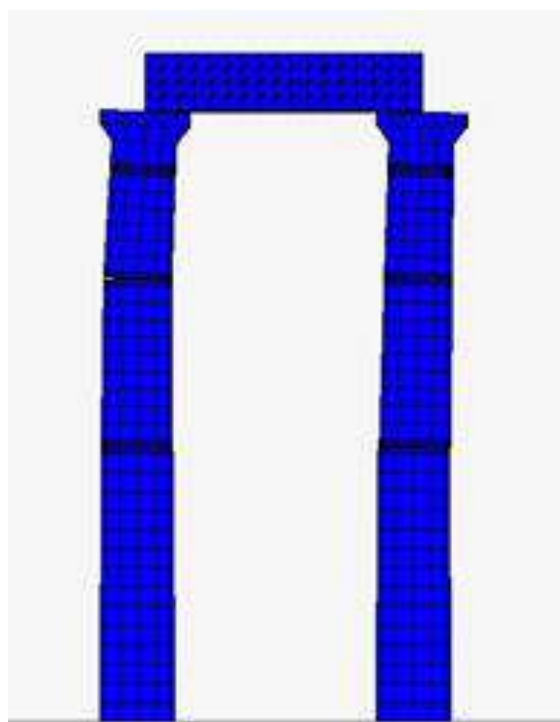
Σχήμα 4.15. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 4.16. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



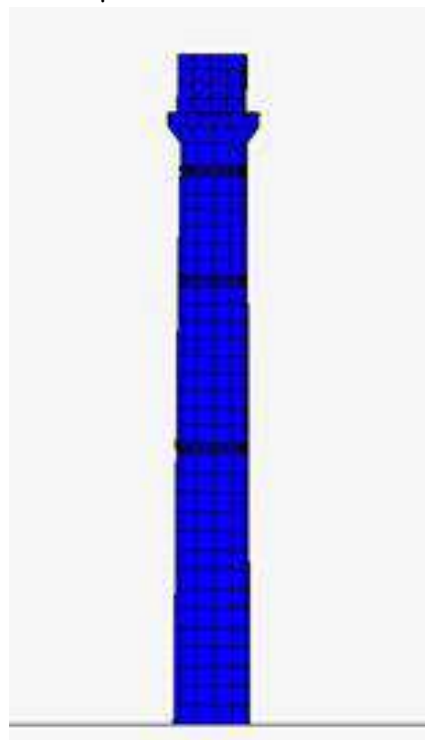
Σχήμα 4.17. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



$$\alpha_g = 0.40g$$

$$f = 2 \text{ Hz}$$

$$t = 1.43 \text{ sec}$$

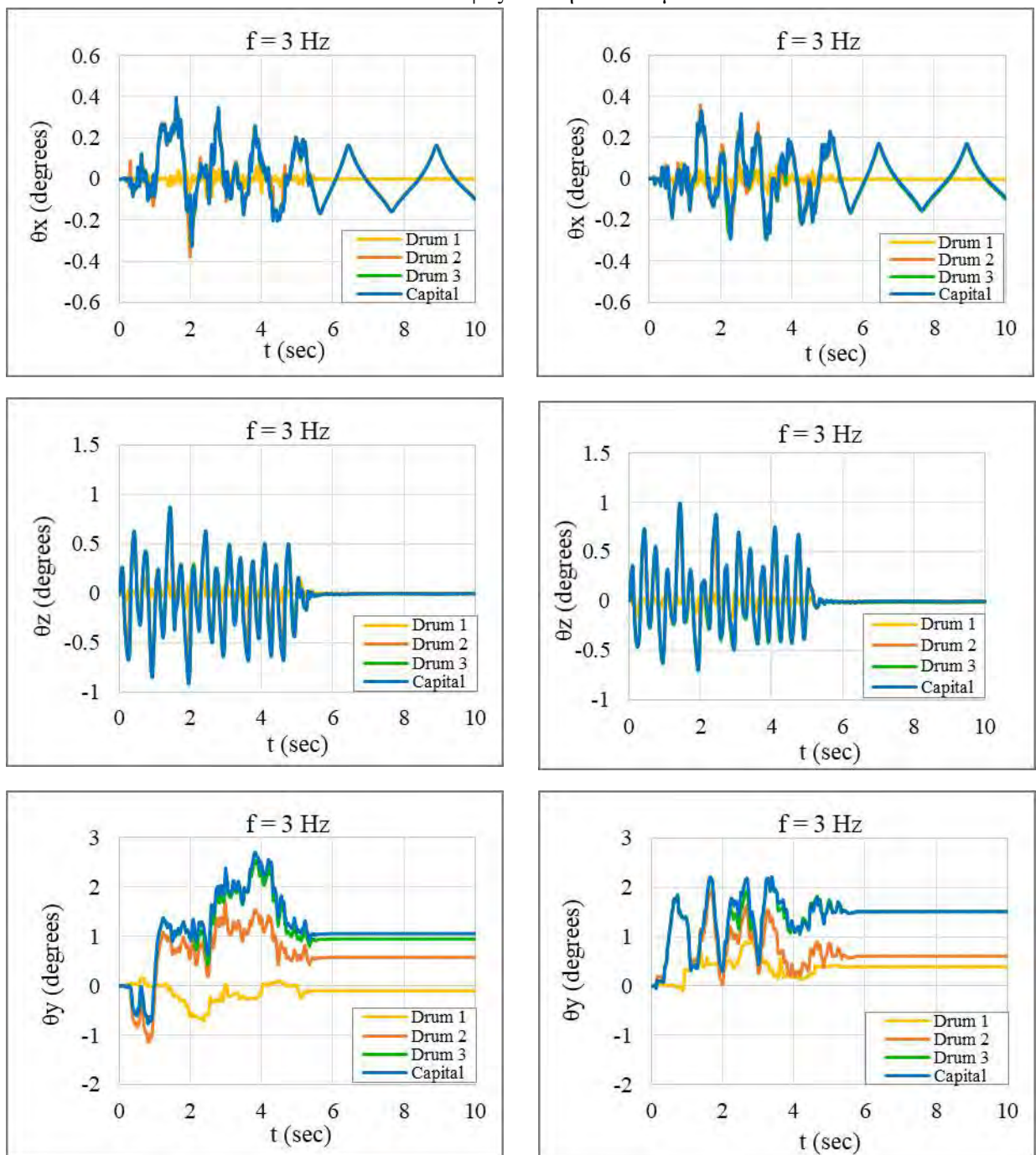


$$\alpha_g = 0.40g$$

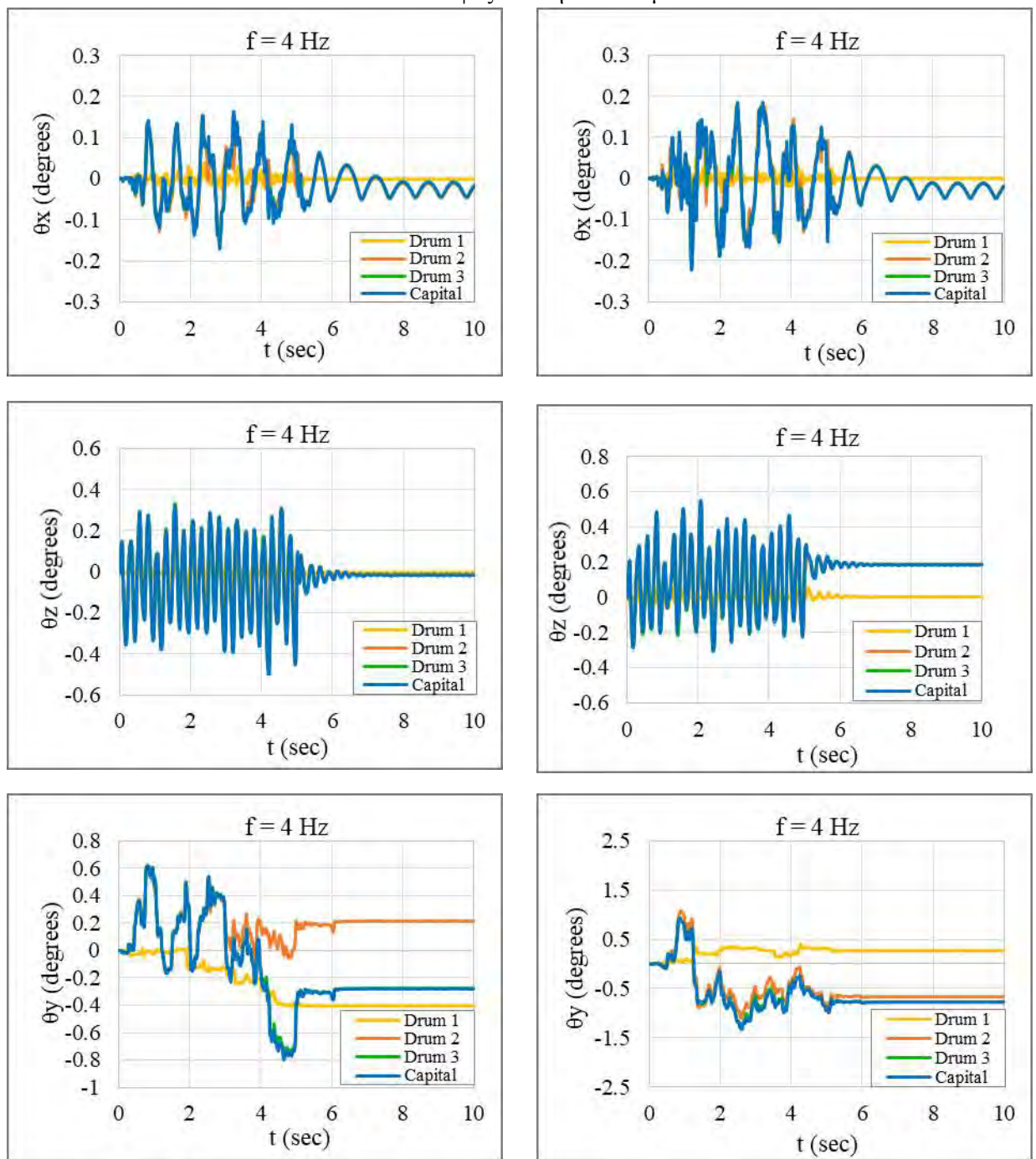
$$f = 2 \text{ Hz}$$

$$t = 3.04 \text{ sec}$$

Σχήμα 4.18. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2 \text{ Hz}$ εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



Σχήμα 4.19. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 3$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



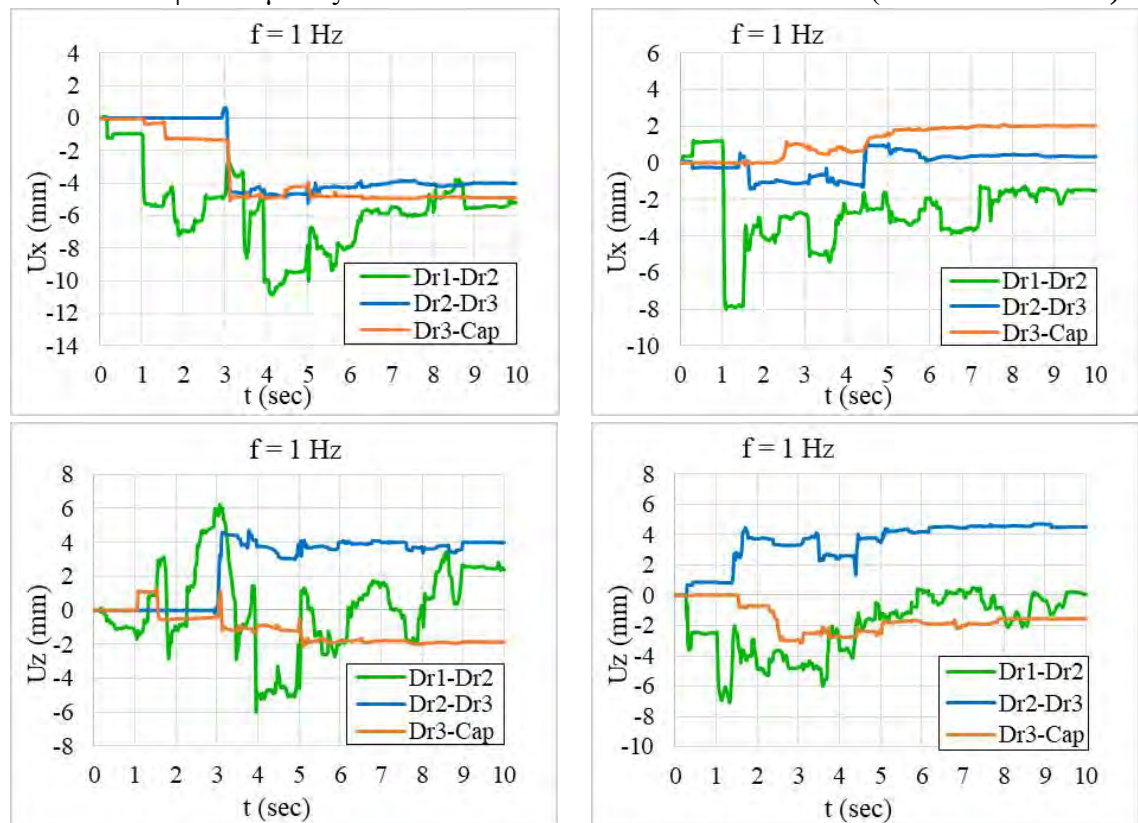
Σχήμα 4.20. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)

4.2.3 Διαγράμματα ολισθήσεων των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο

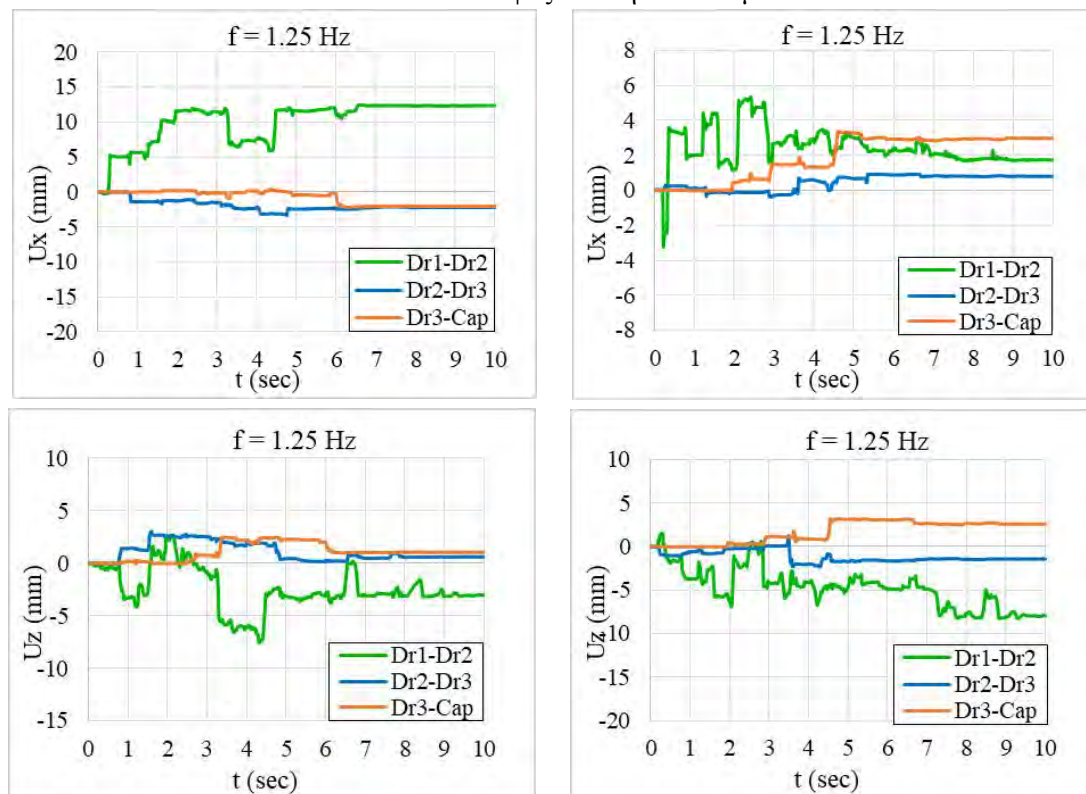
Στα Σχήματα 4.21 έως 4.31 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των εντός (U_x) και εκτός επιπέδου (U_z) ολισθήσεων των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο για τις διεγέρσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία και στις οποίες δεν επήλθε κατάρρευση του πλαισίου. Σε όλα τα διαγράμματα δίνονται οι ολισθήσεις του υπερκείμενου ως προς τον υποκείμενο σπόνδυλο.

Από την προσεκτική μελέτη των διαγραμμάτων καταλήγουμε στα συμπεράσματα :

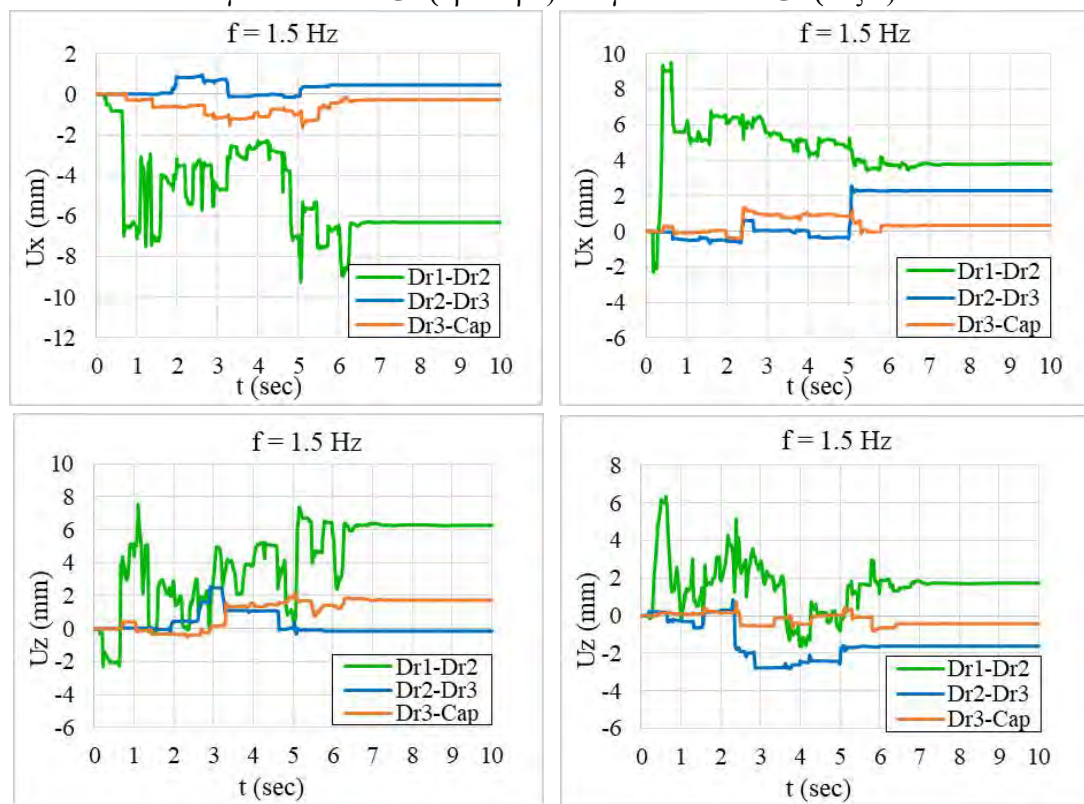
- Σε όλες τις εδαφικές επιταχύνσεις αύξηση στην τιμή της συχνότητας διέγερσης οδηγεί σε μείωση των ολισθήσεων U_x και U_z μεταξύ των σπονδύλων. Ωστόσο, στις υψηλές συχνότητες όπου δεν παρατηρείται λικνιστική απόκριση των σπονδύλων παρατηρούμε αύξηση των εντός επιπέδου ολισθήσεων.
- Για όλες τις τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων στις χαμηλές συχνότητες, οι εντός επιπέδου ολισθήσεις (U_x) είναι μεγαλύτερες των εκτός επιπέδου ολισθήσεων (U_z).
- Στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανίζονται οι μεγαλύτερες ολισθήσεις στη διεπιφάνεια μεταξύ του Σπονδύλου 1 και του Σπονδύλου 2 (Drum 1 – Drum 2).



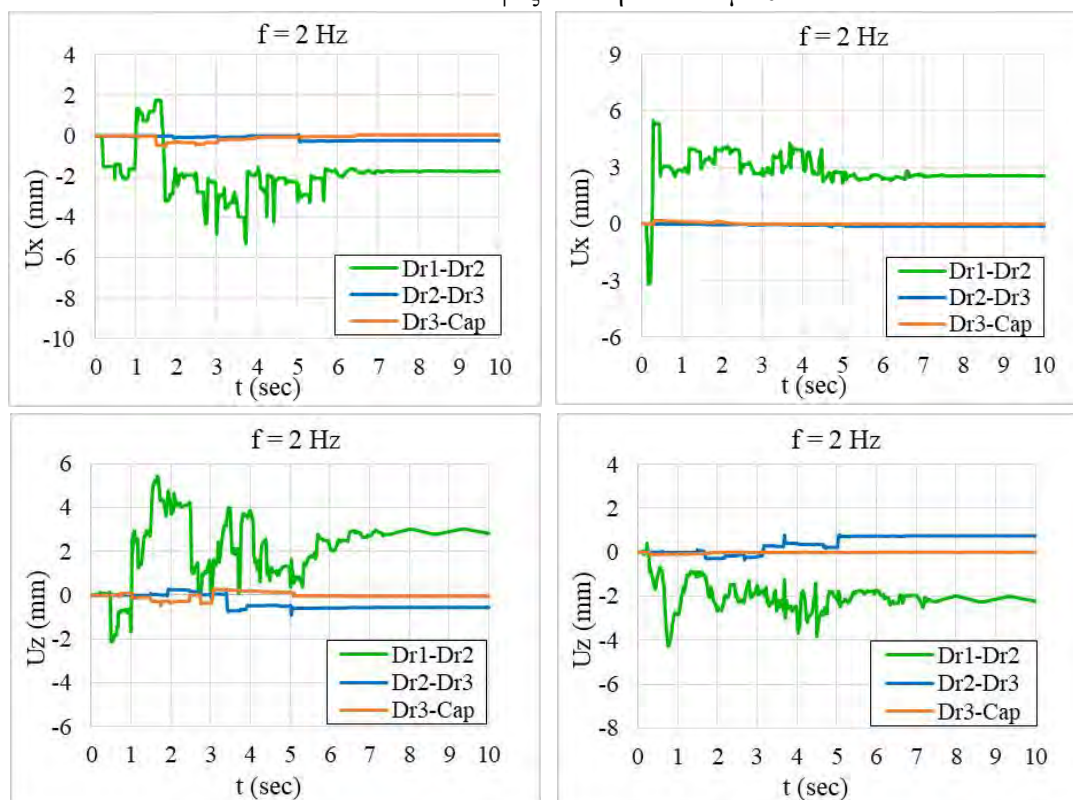
Σχήμα 4.21. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



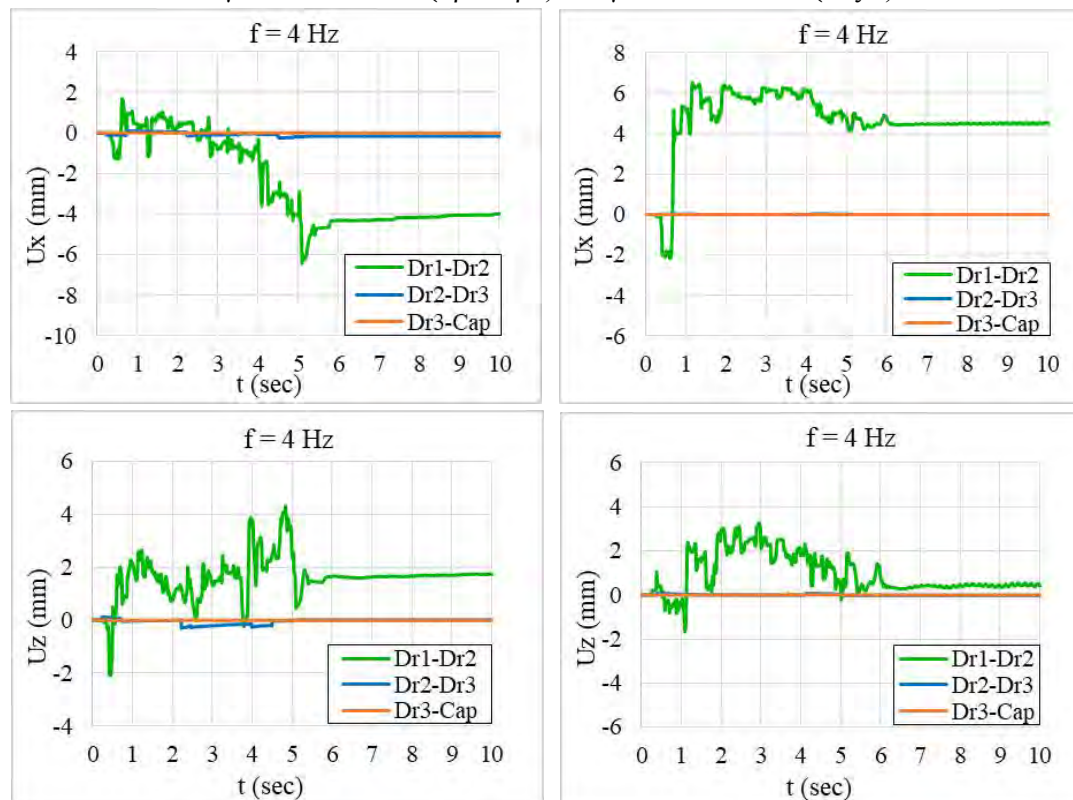
Σχήμα 4.22. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



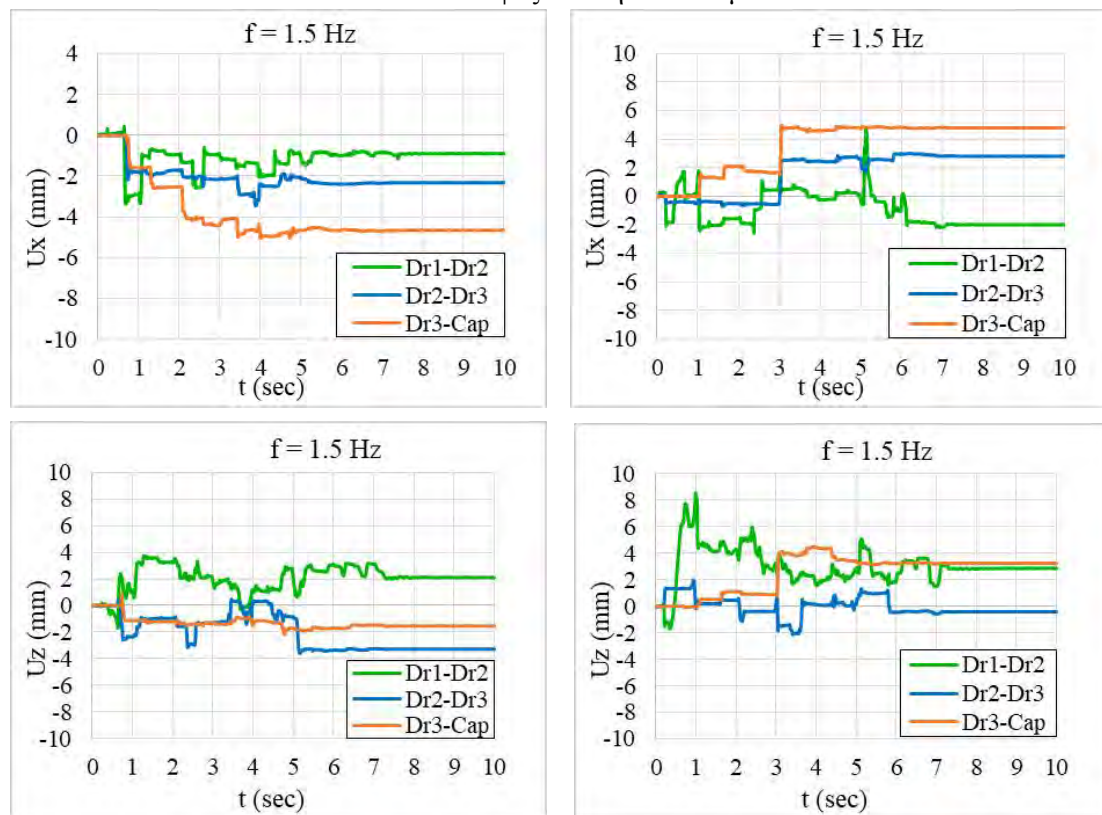
Σχήμα 4.23. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



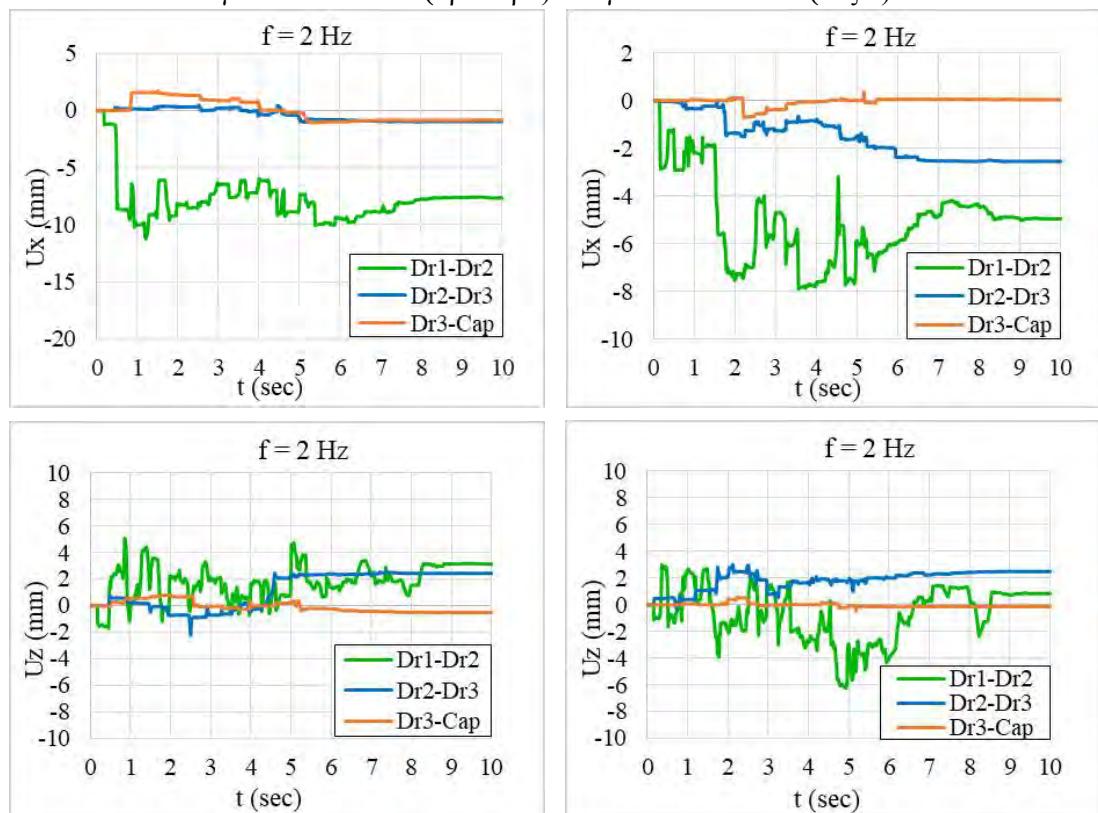
Σχήμα 4.24. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



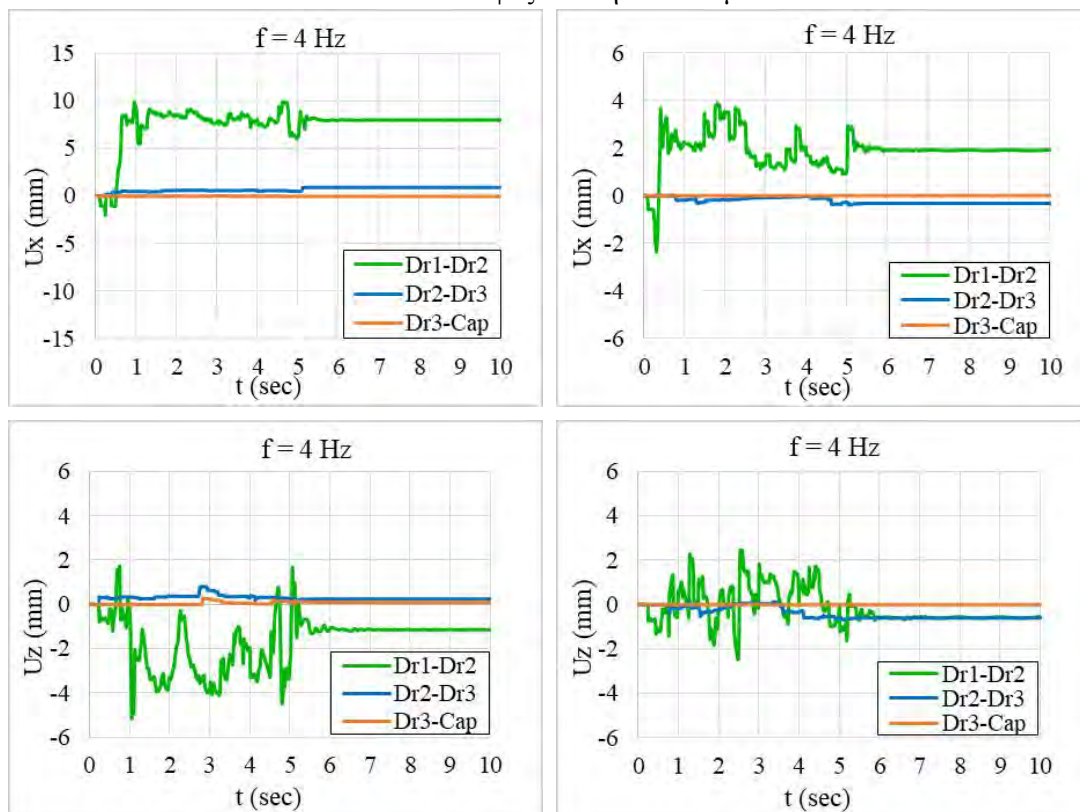
Σχήμα 4.25. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



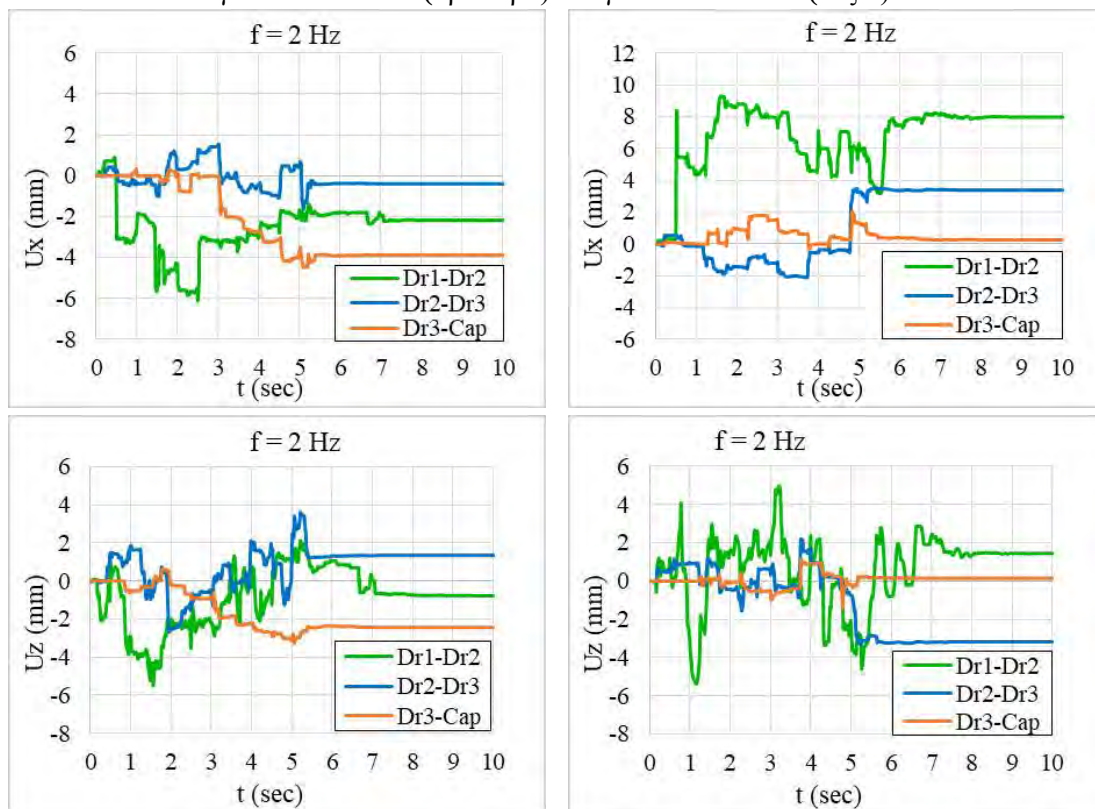
Σχήμα 4.26. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



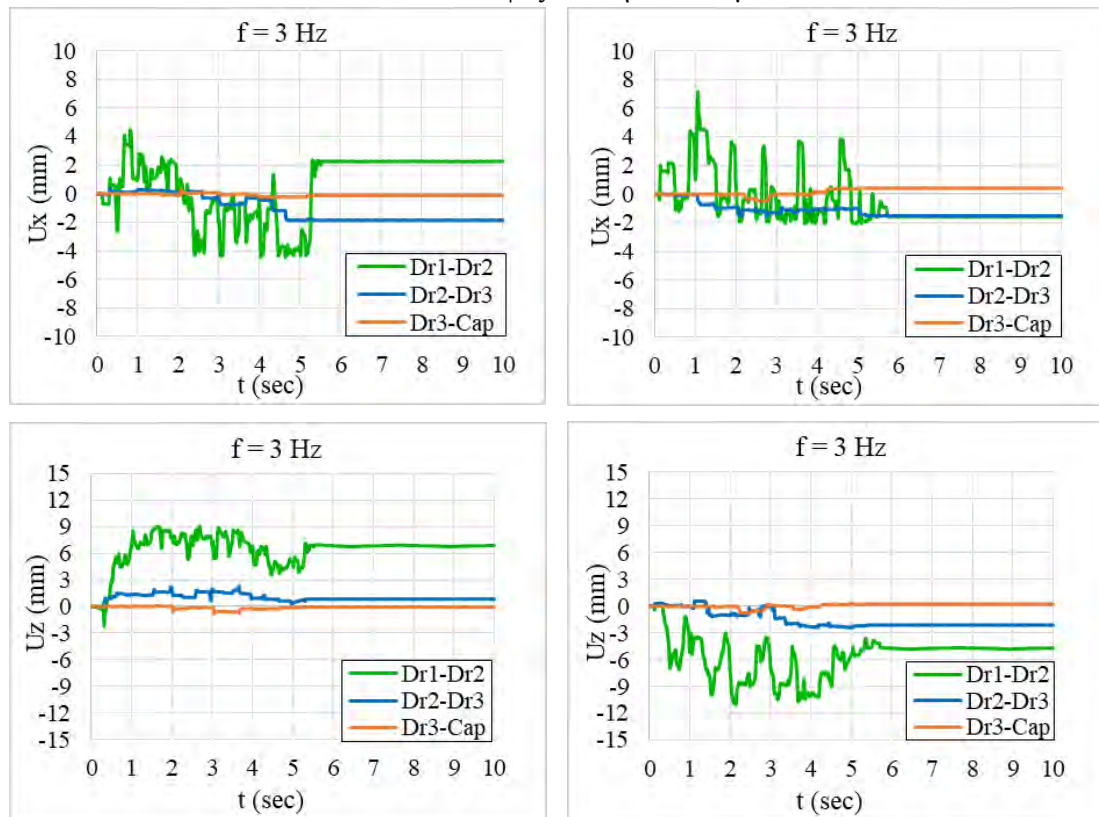
Σχήμα 4.27. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



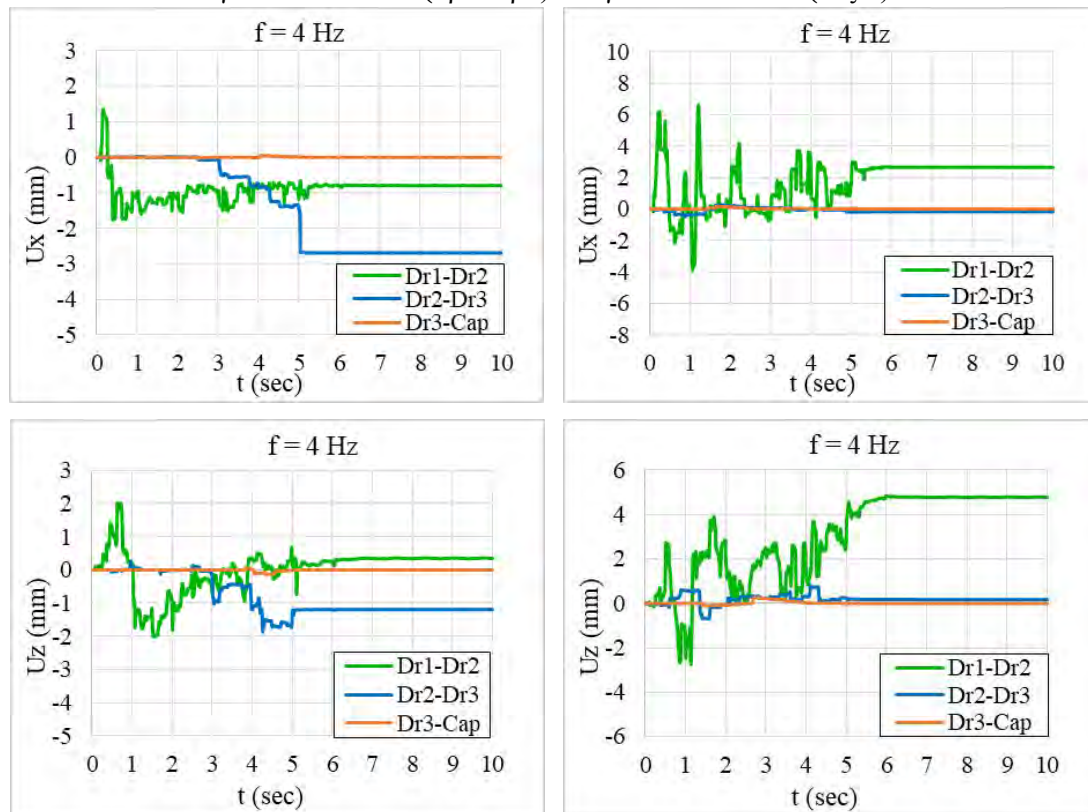
Σχήμα 4.28. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 4.29. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 4.30. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 3$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



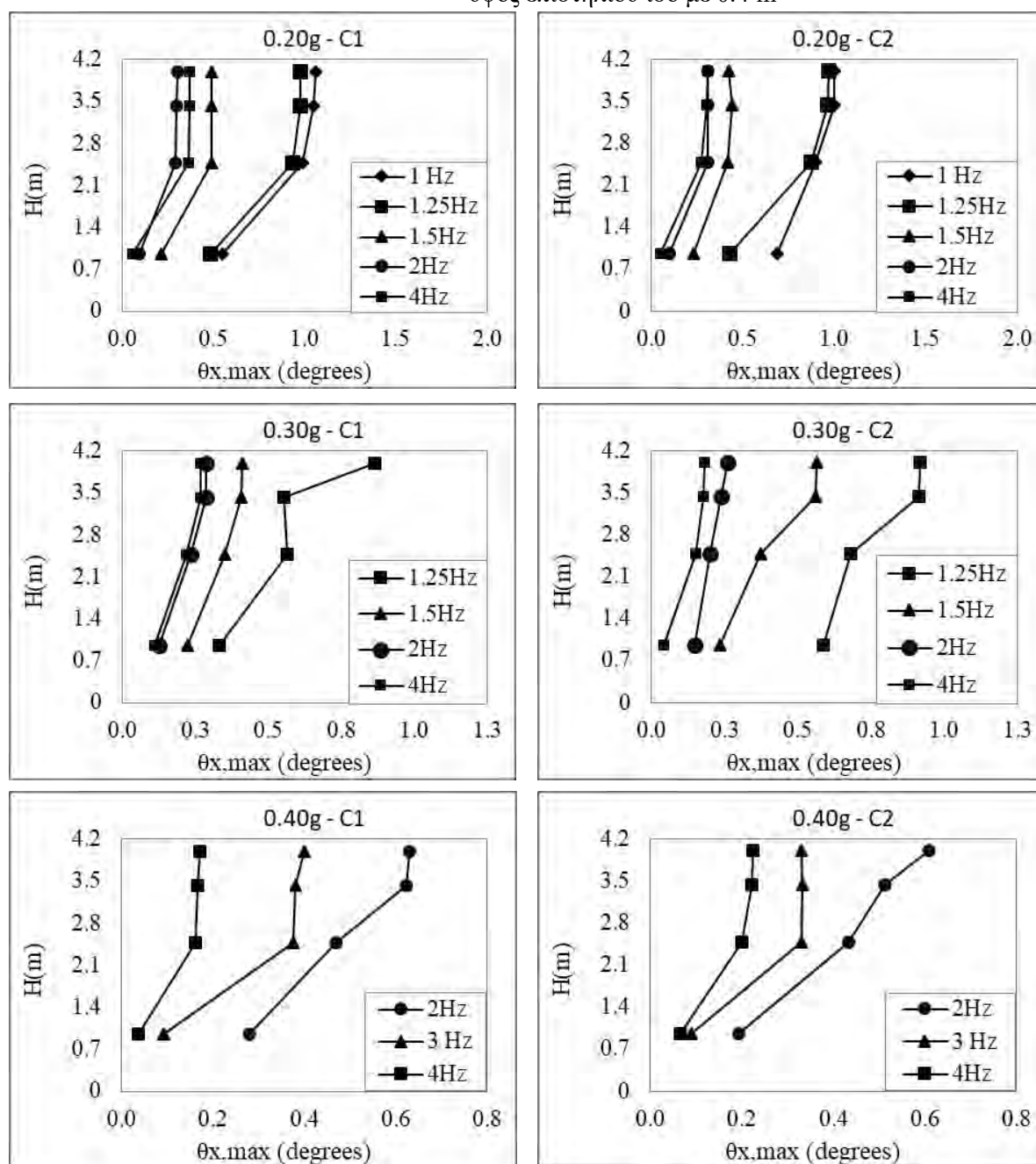
Σχήμα 4.31. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

4.2.4 Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών στροφής

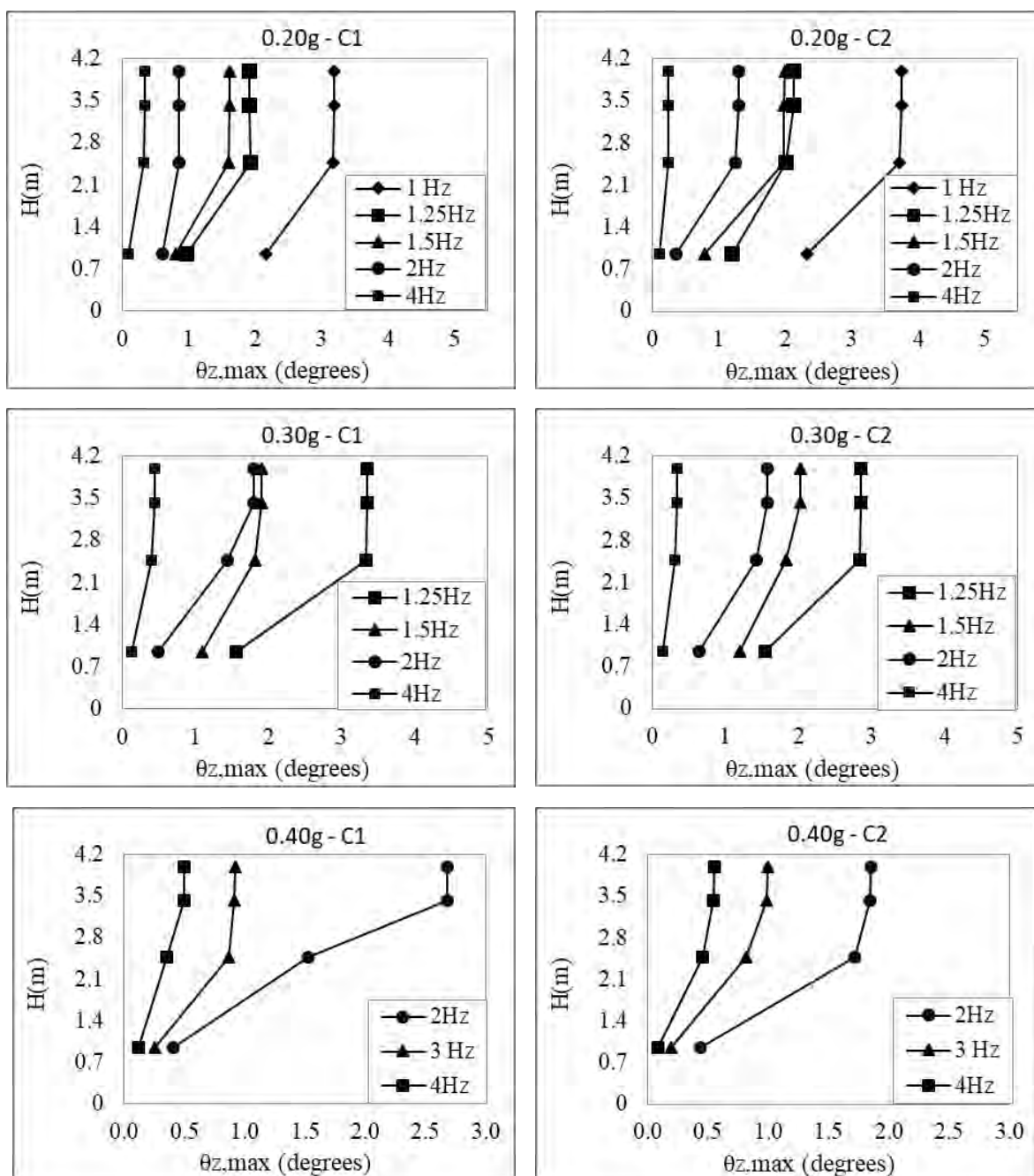
Παρακάτω στα Σχήματα 4.32 έως 4.34 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις μέγιστες καθ' ύψος γωνίες λικνισμού κατά την διεύθυνση x και κατά την διεύθυνση z, καθώς και τα διαγράμματα των παραμενουσών γωνιών στροφής των σπονδύλων περί τον κατακόρυφο άξονα y για τις διεγέρσεις που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων που δίνονται στα Σχήματα 4.32 και 4.33 για τις μέγιστες καθ' ύψος γωνίες λικνισμού των κiónων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Η εκτός επιπέδου λικνιστική απόκριση είναι εντονότερη στις χαμηλές συχνότητες σε όλες τις περιπτώσεις των εδαφικών επιταχύνσεων.
- Για την ίδια συχνότητα διέγερσης, αύξηση της εδαφικής επιτάχυνσης οδηγεί σε μικρή αύξηση της εκτός επιπέδου λικνιστικής απόκρισης των κiónων.
- Η εντός επιπέδου λικνιστική απόκριση των κiónων είναι σαφώς εντονότερη συγκρινόμενη με την εκτός επιπέδου λικνιστική απόκριση. Η απόκριση αυτή γίνεται αρκετά εντονότερη με την αύξηση της εδαφικής επιτάχυνσης.
- Καθώς αυξάνει η τιμή της συχνότητας διέγερσης, η εντός επιπέδου λικνιστική απόκριση των κiónων γίνεται πιο ήπια.
- Οι μέγιστες γωνίες λικνισμού των κιονόκρανων των δύο κiónων δεν παρουσιάζουν διαφορές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες γωνίες των τρίτων σπονδύλων τους. Σε αυτό συμβάλλει η ύπαρξη του επιστηλίου αλλά και των μεταλλικών πείρων.
- Οι ανώτεροι κυρίως σπόνδυλοι (Σπόνδυλος 2, Σπόνδυλος 3 και κιονόκρανο) εμφανίζουν σε γενικές γραμμές παρόμοιες γωνίες λικνισμού με την μεγάλη αύξηση να παρατηρείται από τον πρώτο στο δεύτερο σπόνδυλο. Επιβεβαιώνεται δηλαδή αυτό που παρατηρήθηκε παραπάνω (Σχήματα 4.9, 4.13 και 4.18) με μια μικρή διαφοροποίηση στην περίπτωση διέγερσης με $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 3 \text{ Hz}$.



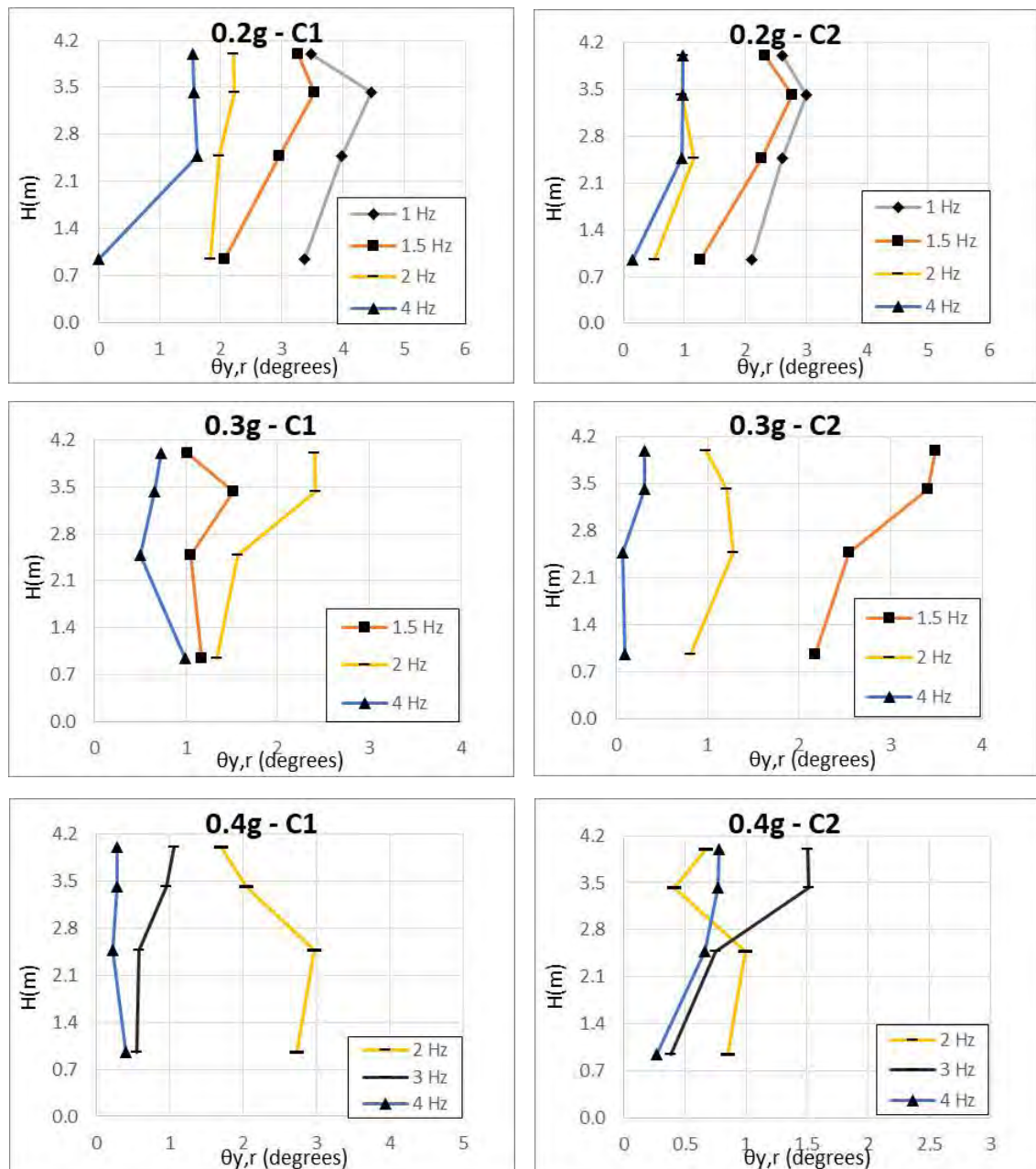
Σχήμα 4.32. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών λικνισμού εκτός επιπέδου θ_x για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 4.33. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών λικνισμού εντός επιπέδου θ_z για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

Στη συνέχεια, μελετώντας τα διαγράμματα των παραμενουσών γωνιών στροφής των σπονδύλων των δύο κίωνων περί τον κατακόρυφο άξονα y που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.34 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Με την αύξηση της τιμής της συχνότητας διέγερσης παρουσιάζεται μείωση των γωνιών στροφής των σπονδύλων περί τον κατακόρυφο άξονα και στους δύο κίονες.
- Στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση των τιμών των γωνιών στροφής περί τον άξονα y σε όλο το ύψος των κίωνων.
- Στις χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στις τιμές των γωνιών στροφής $\theta_{y,r}$ παρατηρείται μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} σπόνδυλου.



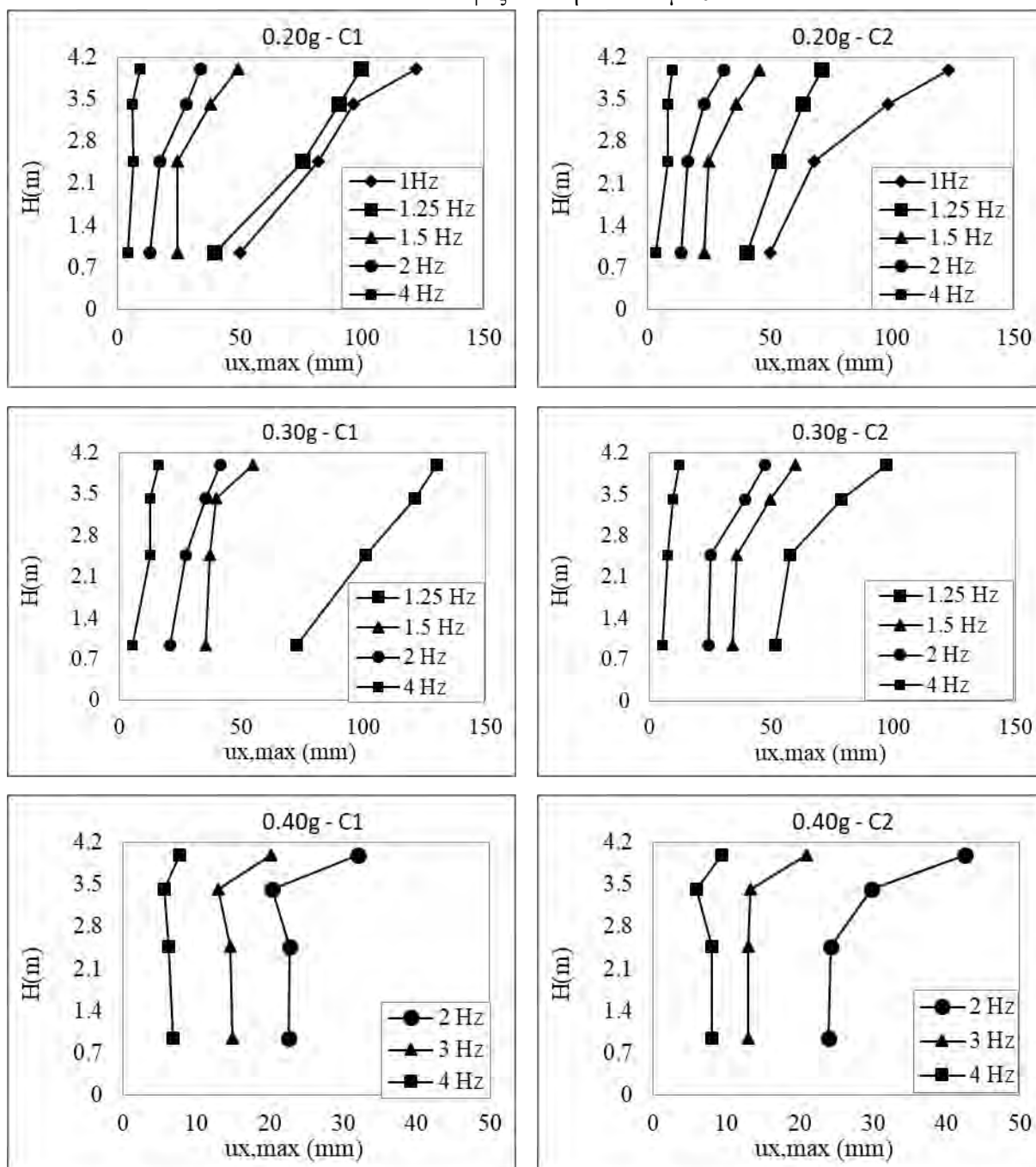
Σχήμα 4.34. Διαγράμματα καθ' ύψος παραμενουσών γωνιών στροφής θ_y για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

4.2.5 Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων

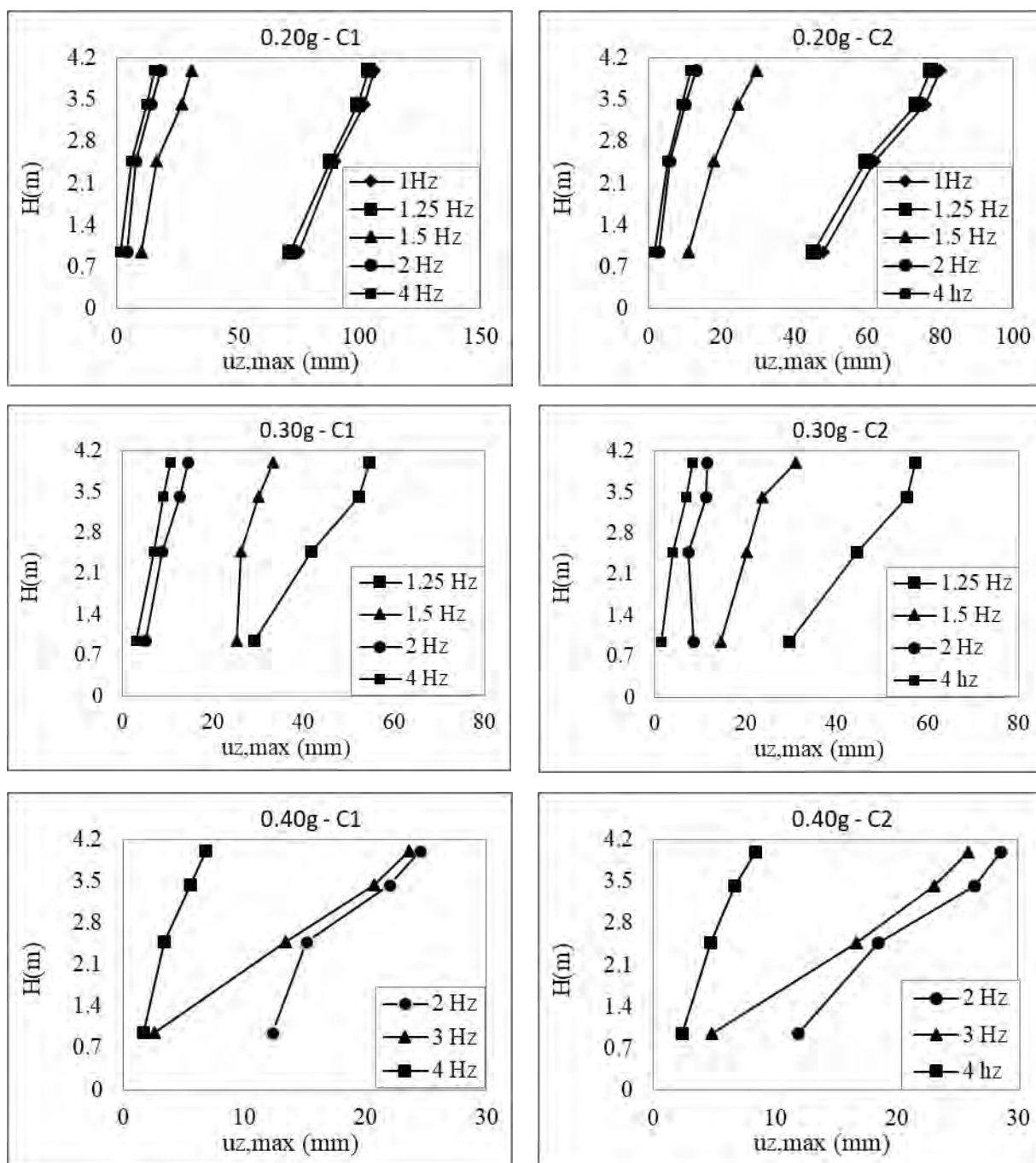
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις μέγιστες καθ' ύψος μετατοπίσεις των σπονδύλων στις διευθύνσεις x και z . Να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή της μετατόπισης αναφέρεται στον κόμβο που βρίσκεται στο κέντρο βάρους κάθε σπονδύλου. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις για όλους τους συνδυασμούς συχνοτήτων διέγερσης και εδαφικών επιταχύνσεων οι οποίοι μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και κατά τους οποίους δεν επήλθε κατάρρευση του πλαισίου. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.35 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις κατά την διεύθυνση x και στο Σχήμα 4.36 οι μέγιστες καθ' ύψος μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση z .

Μελετώντας τα διαγράμματα για τις μέγιστες καθ' ύψος μετατοπίσεις των σπονδύλων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Στις εδαφικές διεγέρσεις χαμηλών συχνοτήτων παρατηρούνται μεγάλες καθ' ύψος μετακινήσεις τόσο στην εντός όσο και στην εκτός διεύθυνση της διέγερσης, αποτέλεσμα της έντονης λικνιστικής συμπεριφοράς των σπονδύλων.
- Στις εδαφικές διεγέρσεις υψηλών συχνοτήτων παρατηρούνται μικρές μετατοπίσεις οι οποίες διαφοροποιούνται ελάχιστα καθ' ύψος των κιόνων. Η διαφοροποίηση αυτή στην ουσία είναι αποτέλεσμα της ολίσθησης των σπονδύλων.
- Σε όλες τις περιπτώσεις οι εκτός επιπέδου μετατοπίσεις είναι μικρότερες, αποτέλεσμα της παρουσίας του επιστηλίου και των γόμφων.
- Όσο αυξάνεται η εδαφική επιτάχυνση τόσο αυξάνονται και οι τιμές των μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων. Στις υψηλές συχνότητες οι διαφορές αυτές δεν είναι αξιοσημείωτες.



Σχήμα 4.35. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση x για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 4.36. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση y για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

4.3 Περιγραφή δυναμικής απόκρισης του επιστηλίου

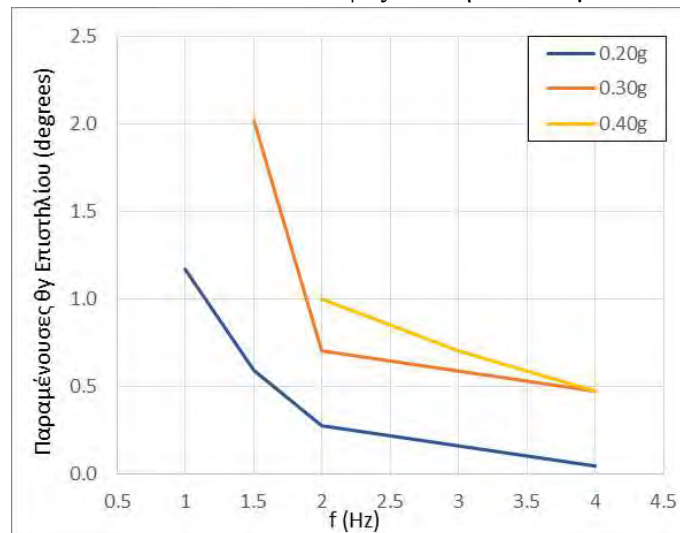
Προκειμένου να μελετηθεί η απόκριση του επιστηλίου στην παρούσα εργασία, έγινε εξαγωγή των αποτελεσμάτων των παραμενουσών γωνιών στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y, αλλά και των παραμενουσών ολισθήσεων του (κατά απόλυτη τιμή) κατά τις διευθύνσεις x και z. Συγκεκριμένα, στους Πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται τα μεγέθη αυτά για όλες τις εδαφικές διεγέρσεις που μελετήθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.37 το διάγραμμα των παραμενουσών γωνιών στροφής θ_y του επιστηλίου, ενώ στα Σχήματα 4.38 και 4.39 παρουσιάζονται οι παραμένουσες ολισθήσεις του επιστηλίου ως προς τα υποκείμενα κιονόκρανα των δύο σπονδυλωτών κίωνων.

Πίνακας 4.1. Τιμές παραμενουσών γωνιών στροφής και ολισθήσεων του επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g

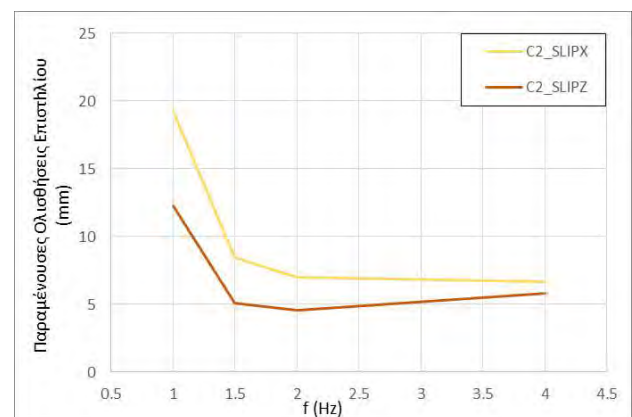
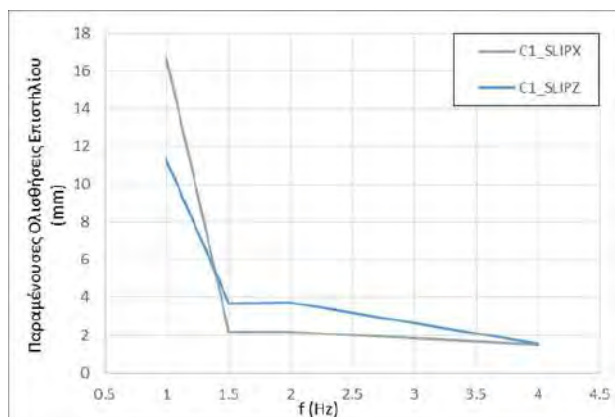
Παραμένουσες		0.20g			
f (Hz)		1	1.5	2	4
θ_y (degrees)		1.168	0.591	0.275	0.047
SLIP X (mm)	C1	16.646	2.153	2.163	1.5
	C2	19.259	8.428	7	6.695
SLIP Z (mm)	C1	11.275	3.677	3.751	1.572
	C2	12.237	5.123	4.571	5.846

Πίνακας 4.2. Τιμές παραμενουσών γωνιών στροφής και ολισθήσεων του επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g

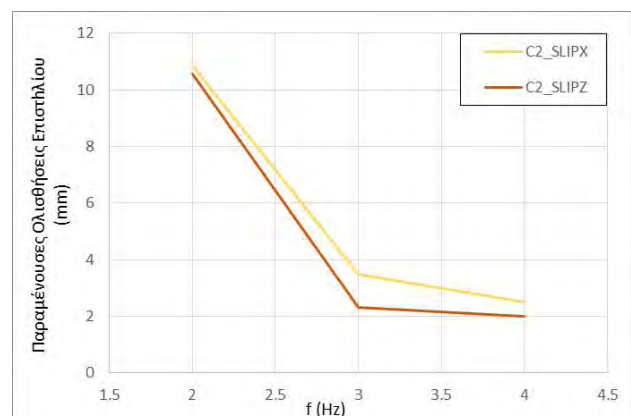
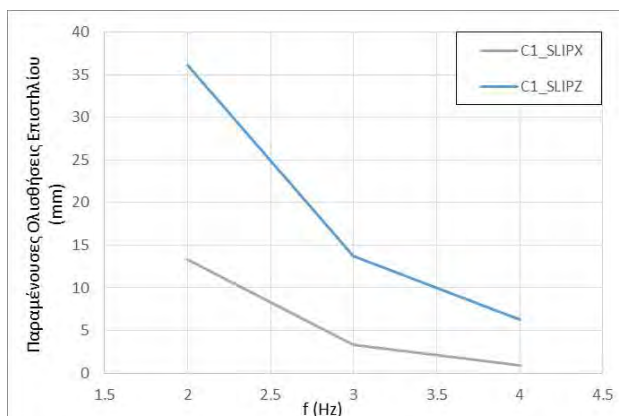
Παραμένουσες		0.40g		
f (Hz)		2	3	4
θ_y (degrees)		1	0.7	0.472
SLIP X (mm)	C1	13.285	3.337	0.869
	C2	10.831	3.483	2.5
SLIP Z (mm)	C1	36.146	13.778	6.264
	C2	10.557	2.3	2



Σχήμα 4.37. Διάγραμμα παραμενουσών γωνιών επιστηλίου θ για όλες τις εδαφικές διεγέρσεις που μελετήθηκαν



Σχήμα 4.38. Διαγράμματα παραμενουσών ολισθήσεων επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 4.39. Διαγράμματα παραμενουσών ολισθήσεων επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Δυναμική απόκριση σπονδυλωτού πλαισίου με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.8 m

5.1 Εισαγωγή

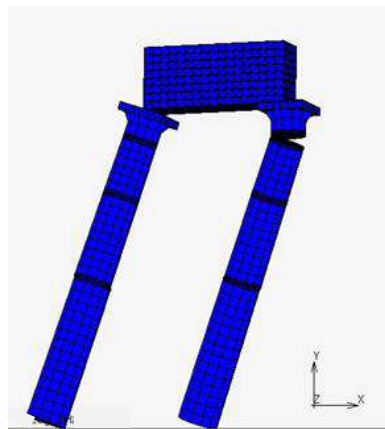
Σε αυτή την ενότητα μελετάται η δυναμική απόκριση του συστήματος των δύο σπονδυλωτών κiónων με επιστήλιο ύψους 0.8 m. Παρακάτω παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα των αναλύσεων όπως παρουσιάστηκαν και στο Κεφάλαιο 4 για την περίπτωση επιστηλίου ύψους 0.4 m.

5.2 Περιγραφή δυναμικής απόκρισης του πλαισίου

5.2.1 Στιγμιότυπα κατάρρευσης του πλαισίου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα κατάρρευσης του σπονδυλωτού πλαισίου με επιστήλιο ύψους 0.8 m για όλες τις εδαφικές επιταχύνσεις για τις οποίες έγινε μελέτη στην παρούσα εργασία.

Συγκεκριμένα, για εδαφική επιτάχυνση $\alpha_g = 0.20g$ παρατηρήθηκε κατάρρευση του πλαισίου για συχνότητες $f \leq 0.5$ Hz. Στην περίπτωση όπου $f = 0.5$ Hz η κατάρρευση επέρχεται περίπου τη χρονική στιγμή $t = 2.5$ sec και γίνεται φανερό στο Σχήμα 5.1 ότι το πλαίσιο εμφανίζει μια ενιαία μονολιθική συμπεριφορά σε όλο το ύψος του με το κιονόκρανο του δεξιού κίονα να αποκολλάται. Επίσης, είναι αρκετά έντονη η εντός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά η οποία φαίνεται ότι οδηγεί το πλαίσιο στην κατάρρευσή του. Να σημειωθεί ότι κατά την κατάρρευση δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες ολισθήσεις.



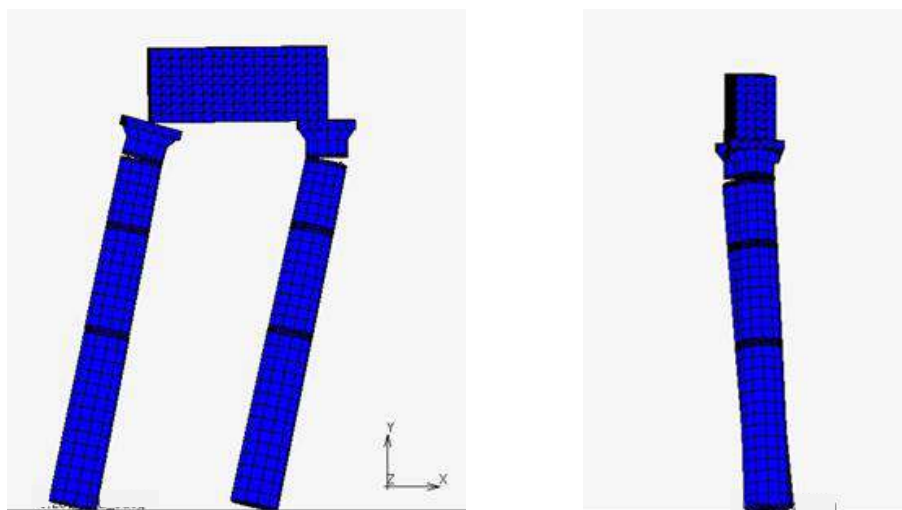
$$\alpha_g = 0.20g$$

$$f = 0.5 \text{ Hz}$$

$$t = 2.5 \text{ sec}$$

Σχήμα 5.1. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.8 m

Στην περίπτωση της εδαφικής επιτάχυνσης με τιμή $\alpha_g = 0.30g$, το πλαίσιο καταρρέει σε συχνότητες $f \leq 0.8$ Hz. Παρακάτω στο Σχήμα 5.2 φαίνονται τα στιγμιότυπα κατάρρευσης για $f = 0.8$ Hz, η οποία επέρχεται περίπου τη χρονική στιγμή $t = 6$ sec. Παρατηρείται κυρίως εντός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά αλλά και μικρές γωνίες εκτός επιπέδου των σπονδύλων οι οποίοι ακολουθούν μια ενιαία μονολιθική συμπεριφορά σε όλο το ύψος τους. Επίσης, το κιονόκρανο του δεξιού κίονα αποκολλάται από τον κατώτερο σπόνδυλο, γεγονός που οδηγεί στην κατάρρευση του πλαισίου. Και σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρούνται μεγάλες τιμές ολισθήσεων των σπονδύλων.



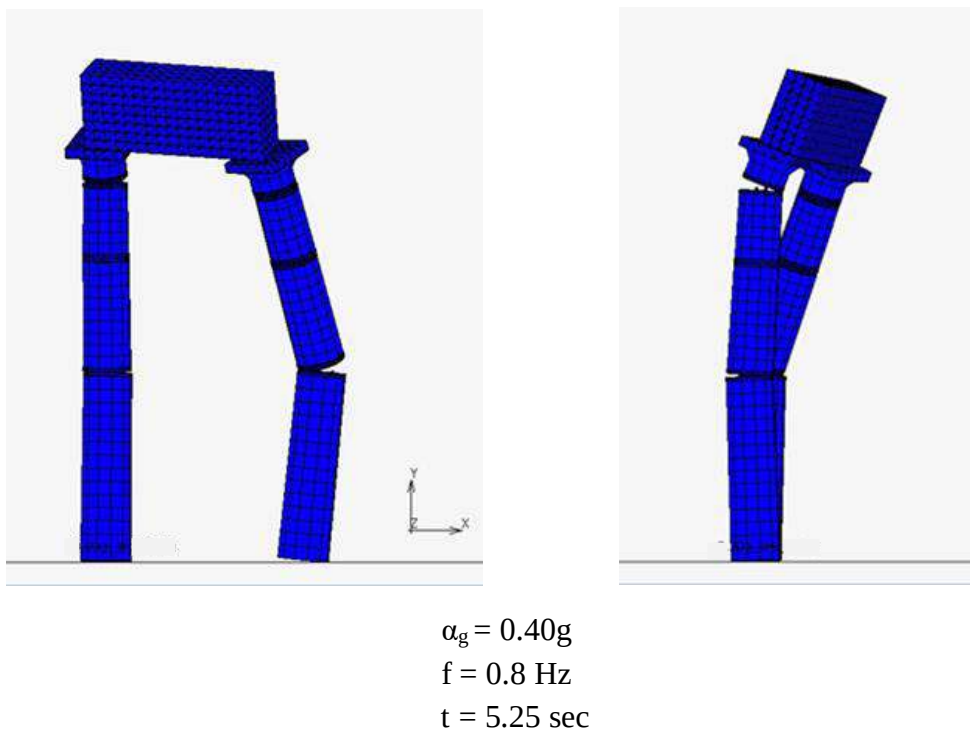
$$\alpha_g = 0.30g$$

$$f = 0.8 \text{ Hz}$$

$$t = 6 \text{ sec}$$

Σχήμα 5.2. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.8 m

Τέλος, για την περίπτωση της εδαφικής επιτάχυνσης $\alpha_g = 0.40g$, το πλαίσιο καταρρέει σε συχνότητες $f \leq 0.8$ Hz. Παρακάτω στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται το πλαίσιο όταν καταρρέει για συχνότητα $f = 0.8$ Hz τη χρονική στιγμή $t = 5.25$ sec. Αναλυτικότερα, στη διέγερση αυτή παρατηρείται και εντός και εκτός επιπέδου έντονη λικνιστική συμπεριφορά που οδηγεί στην κατάρρευση. Επίσης, στην κατάρρευση συμβάλλει και η ανάπτυξη μεγάλων γωνιών στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα των σπονδύλων και του κιονόκρανου, καθώς και οι ολισθήσεις στις διεπιφάνειες των σπονδύλων.



Σχήμα 5.3. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.8 m

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω παρατηρήσεις καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

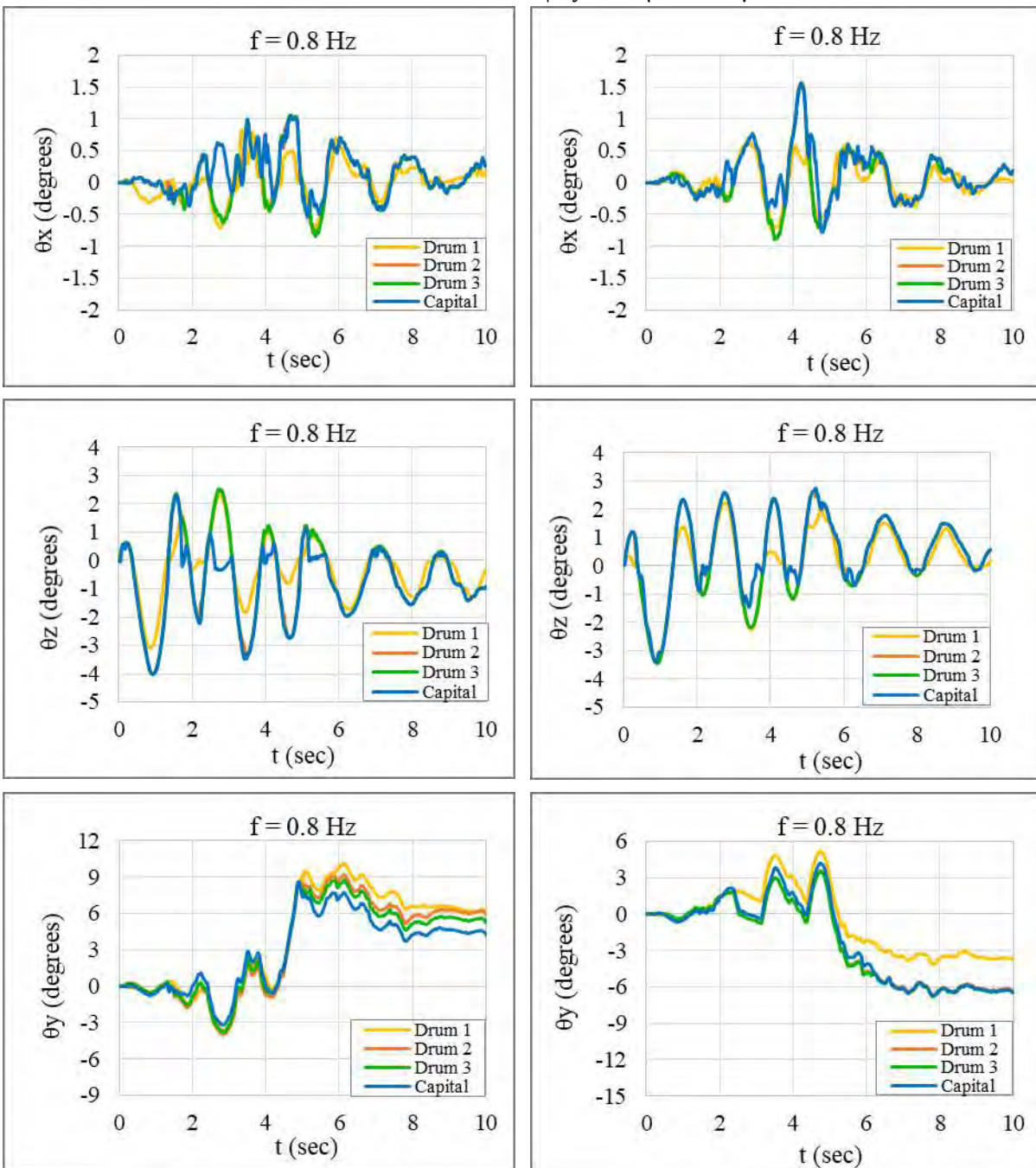
- Το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο επέρχεται κατάρρευση του πλαισίου είναι σημαντικά μικρότερο για ύψος επιστηλίου ίσο με 0.8 m. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα των σπονδυλωτών κιόνων και του επιστηλίου καταρρέει μόνο στις πολύ χαμηλές συχνότητες (0.5 Hz και 0.8 Hz).
- Κατάρρευση επέρχεται λόγω της έντονης λικνιστικής απόκρισης του κιονόκρανου και των ανώτερων σπονδύλων.
- Όσο αυξάνεται η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, τόσο παρατηρούνται πιο έντονες γωνίες στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y του κιονόκρανου και των σπονδύλων.
- Στις χαμηλές τιμές εδαφικών επιταχύνσεων παρατηρείται μονολιθική απόκριση των σπονδύλων 1 έως 3.

5.2.2 Διαγράμματα γωνιών στροφής των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο

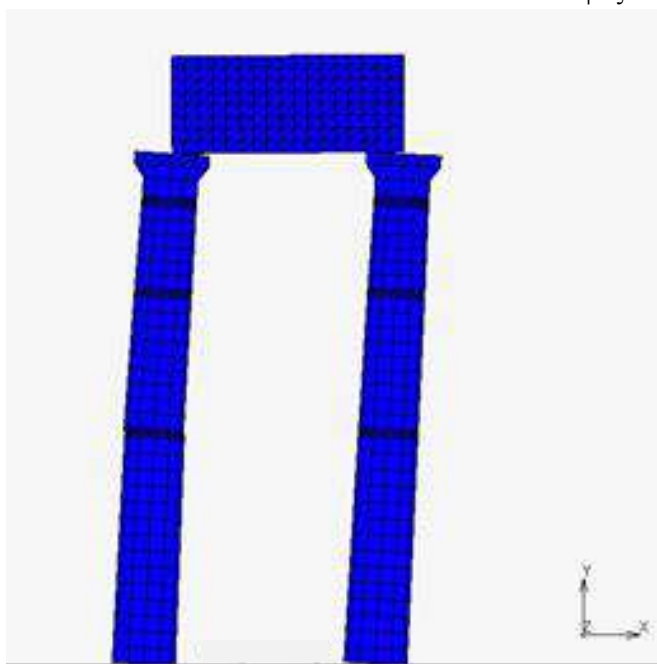
Παρακάτω στα Σχήματα 5.4 ως 5.25 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των εκτός (θ_x) και των εντός επιπέδου (θ_z) γωνιών λικνισμού όλων των σπονδύλων, καθώς και των γωνιών στροφής τους περί τον κατακόρυφο άξονα (θ_y) συναρτήσει του χρόνου για τις περιπτώσεις εδαφικών διεγέρσεων στις οποίες δεν επέρχεται κατάρρευση του πλαισίου και οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3. Δίνονται επίσης και στιγμιότυπα της απόκρισης του συστήματος των δύο κιόνων με επιστήλιο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Από τη μελέτη των προαναφερθέντων διαγραμμάτων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ανεξάρτητα από την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης, όσο αυξάνεται η τιμή της συχνότητας διέγερσης τόσο μειώνονται οι εντός επιπέδου (θ_z) και οι εκτός επιπέδου (θ_x) γωνίες λικνισμού, καθώς και οι γωνίες στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y . Να σημειωθεί ότι στις υψηλές κυρίως εδαφικές επιταχύνσεις, η μείωση των γωνιών είναι μεγαλύτερη.
- Ο εντός επιπέδου λικνισμός (θ_z) είναι επικρατέστερος ανεξάρτητα από την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης και της συχνότητας διέγερσης.
- Για σταθερή τιμή συχνότητας διέγερσης, όσο αυξάνεται η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης τόσο αυξάνονται οι εντός και εκτός γωνίες λικνισμού των σπονδύλων. Στις χαμηλότερες συχνότητες οι διαφορές στις τιμές των γωνιών είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις διαφορές στις υψηλότερες συχνότητες.
- Για σταθερή τιμή συχνότητας διέγερσης, όσο αυξάνεται η τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης τόσο αυξάνονται οι γωνίες στροφής των σπονδύλων περί τον κατακόρυφο άξονα y . Επίσης, οι παραμένουσες γωνίες στροφής είναι μεγαλύτερες στις χαμηλότερες συχνότητες από ότι στις υψηλότερες ανεξαρτήτως τιμής εδαφικής επιτάχυνσης.



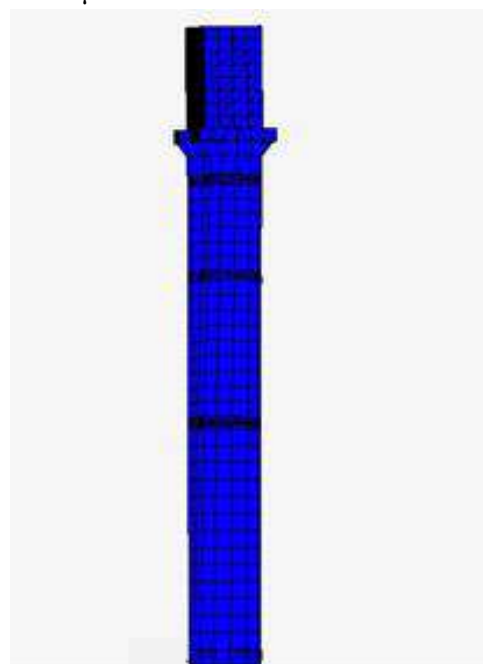
Σχήμα 5.4. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 0.8$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



$$\alpha_g = 0.20g$$

$$f = 0.8 \text{ Hz}$$

$$t = 1 \text{ sec}$$

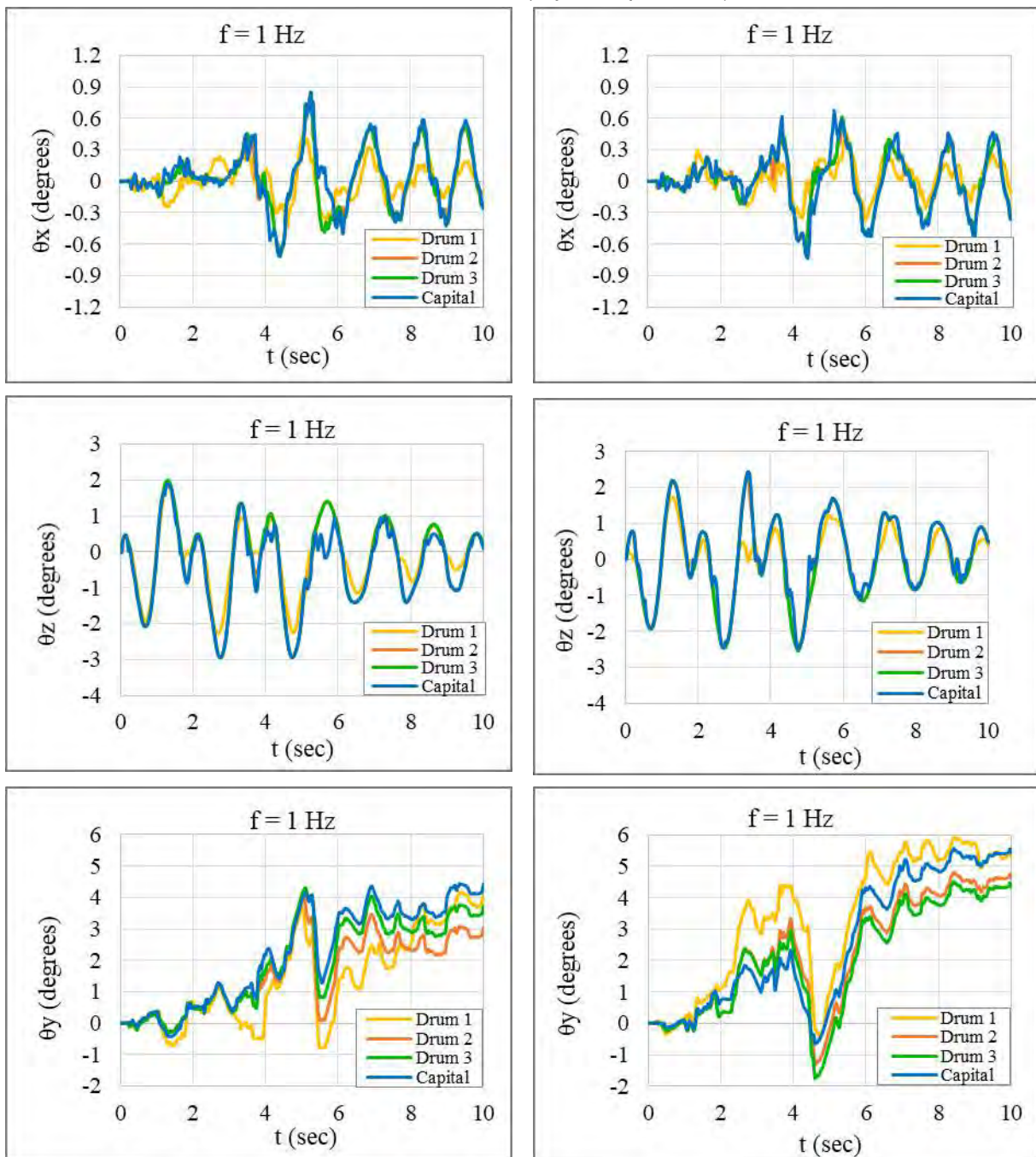


$$\alpha_g = 0.20g$$

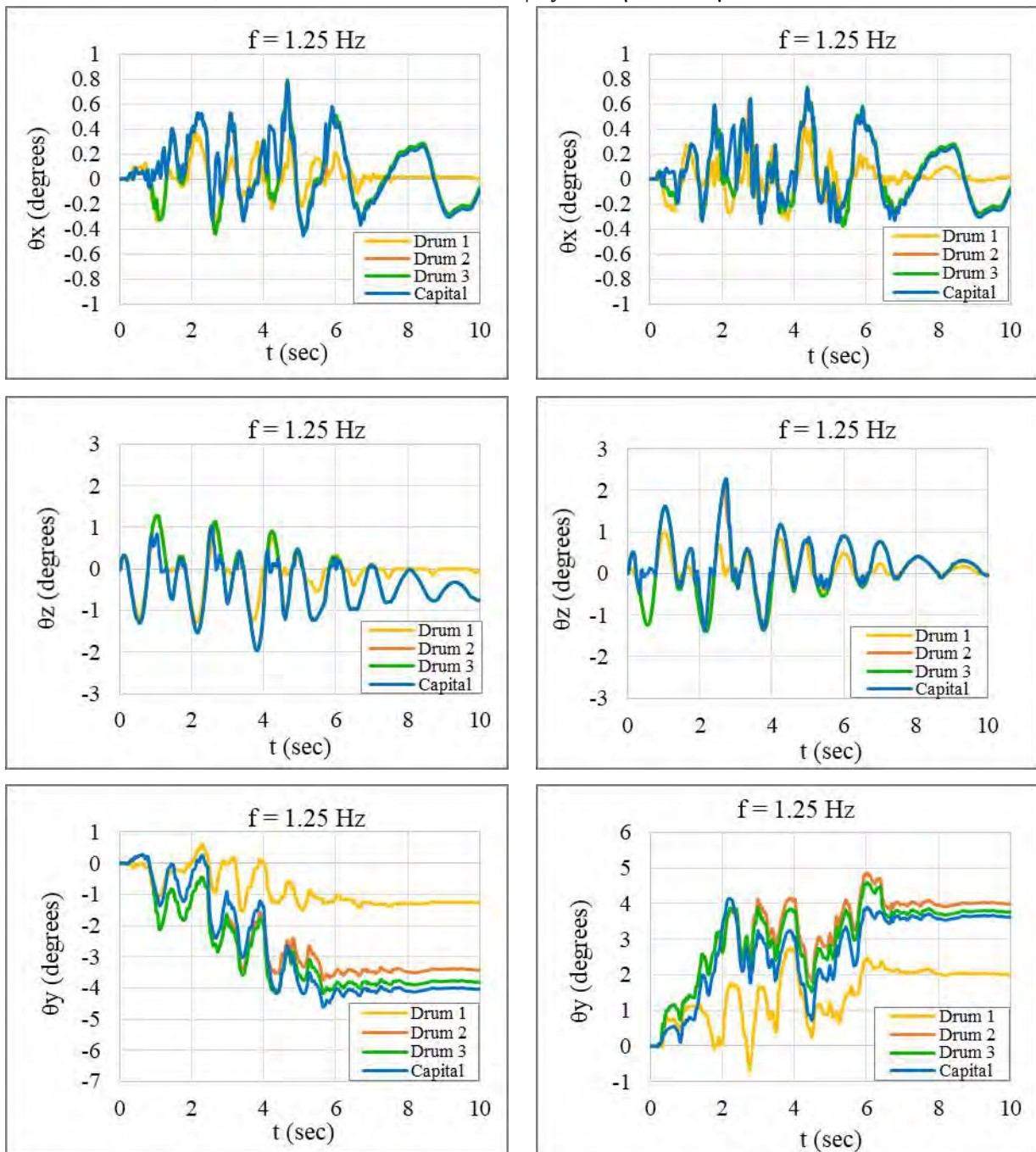
$$f = 0.8 \text{ Hz}$$

$$t = 4.77 \text{ sec}$$

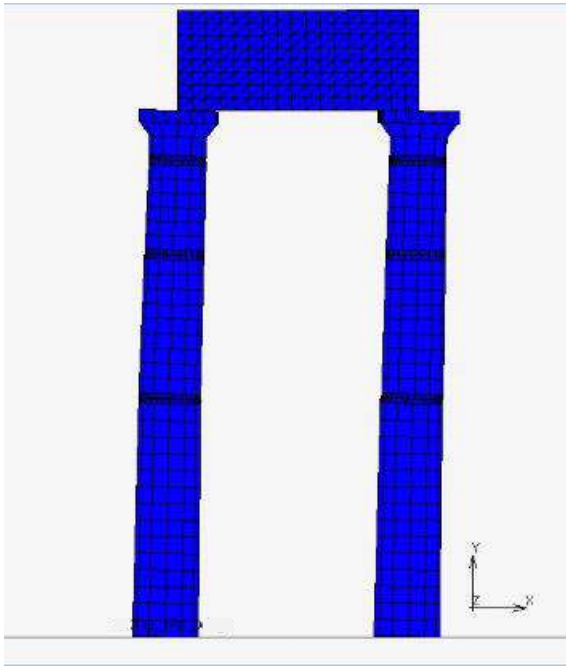
Σχήμα 5.5. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 0.8 \text{ Hz}$
εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



Σχήμα 5.6. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$
και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



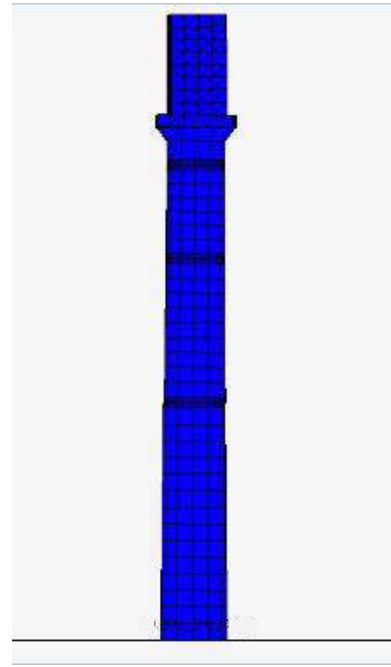
Σχήμα 5.7. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



$$\alpha_g = 0.20g$$

$$f = 1.25 \text{ Hz}$$

$$t = 3.81 \text{ sec}$$

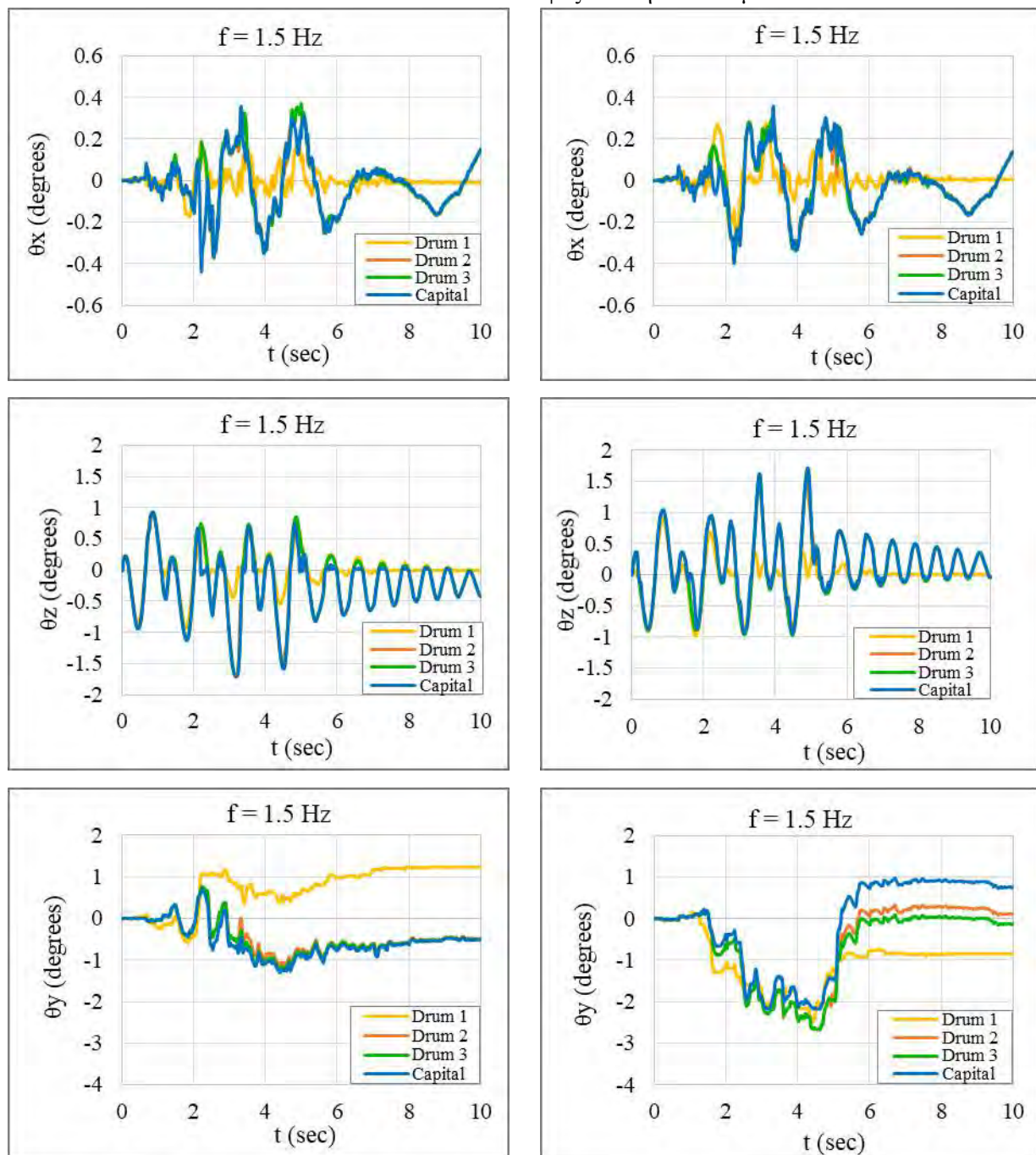


$$\alpha_g = 0.20g$$

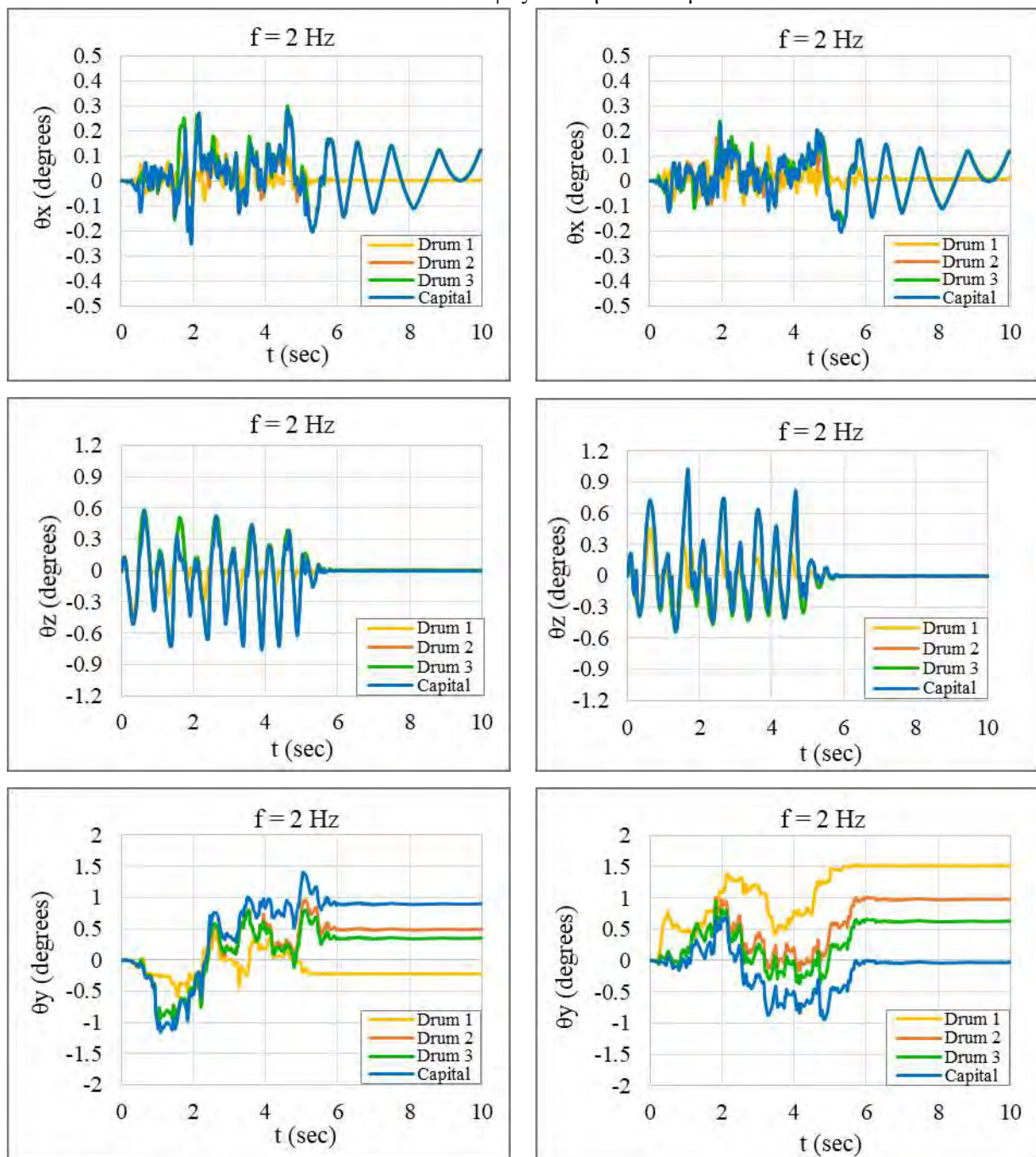
$$f = 1.25 \text{ Hz}$$

$$t = 4.7 \text{ sec}$$

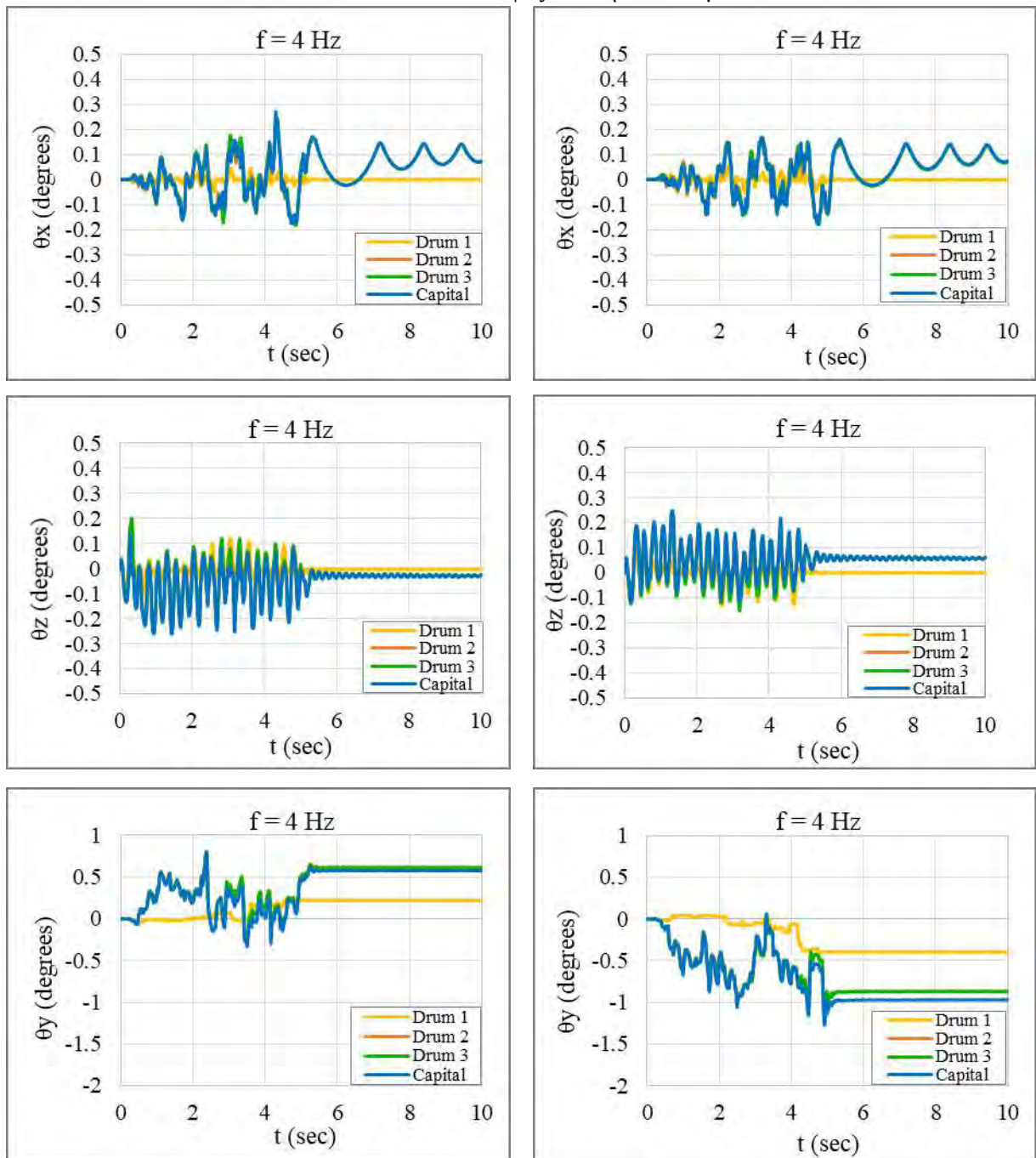
Σχήμα 5.8. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.25 \text{ Hz}$
εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



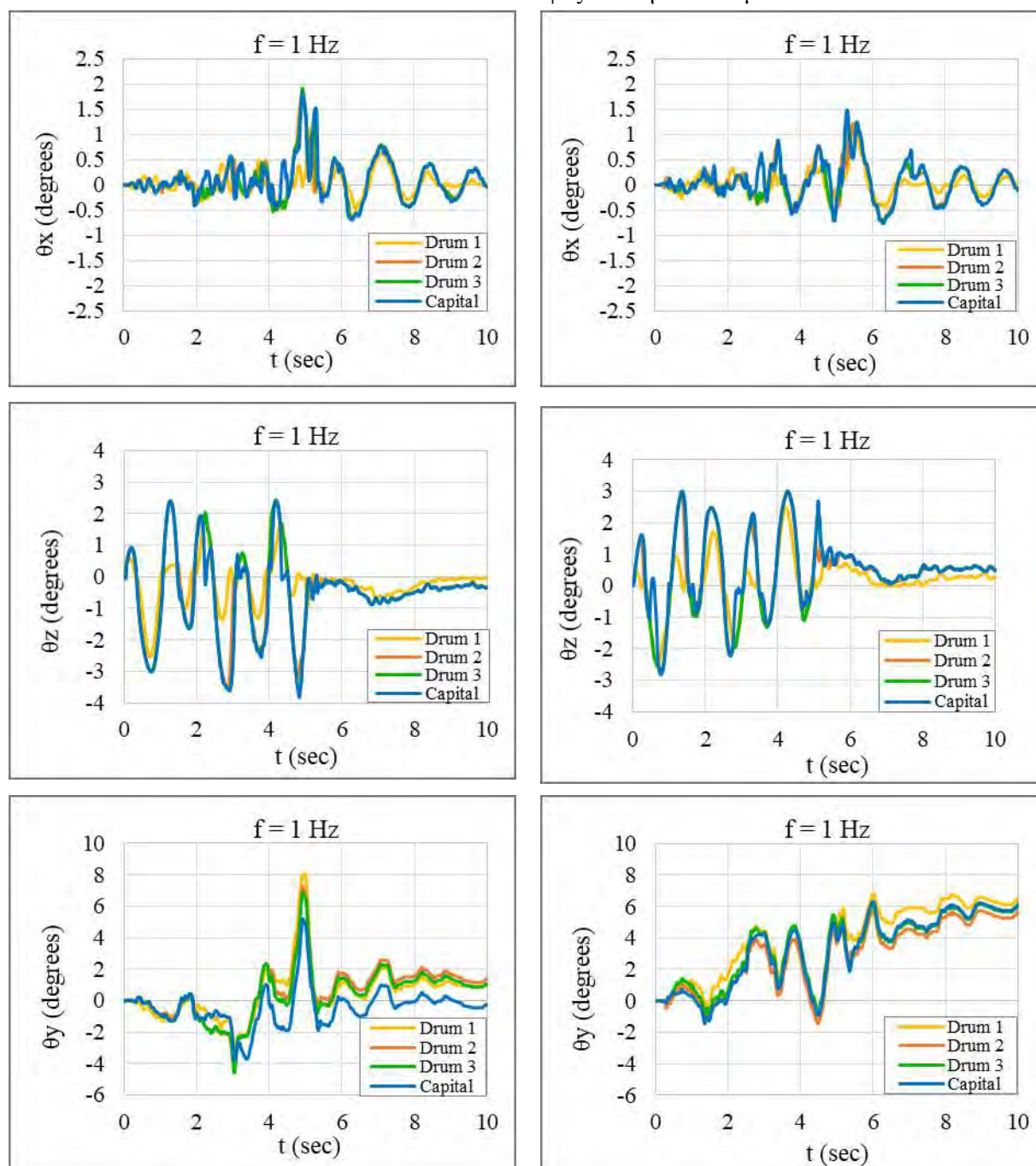
Σχήμα 5.9. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



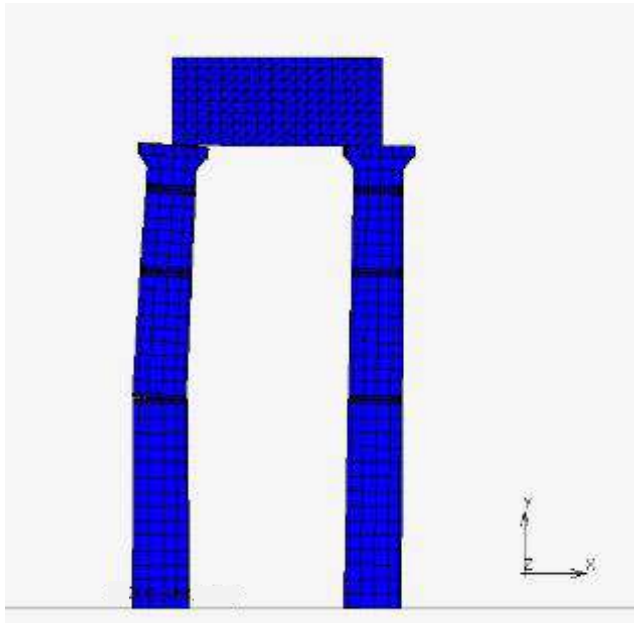
Σχήμα 5.10. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.11. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



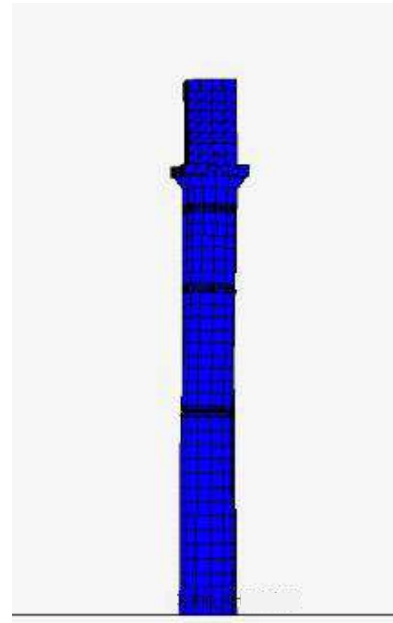
Σχήμα 5.12. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



$$\alpha_g = 0.30g$$

$$f = 1 \text{ Hz}$$

$$t = 4.82 \text{ sec}$$

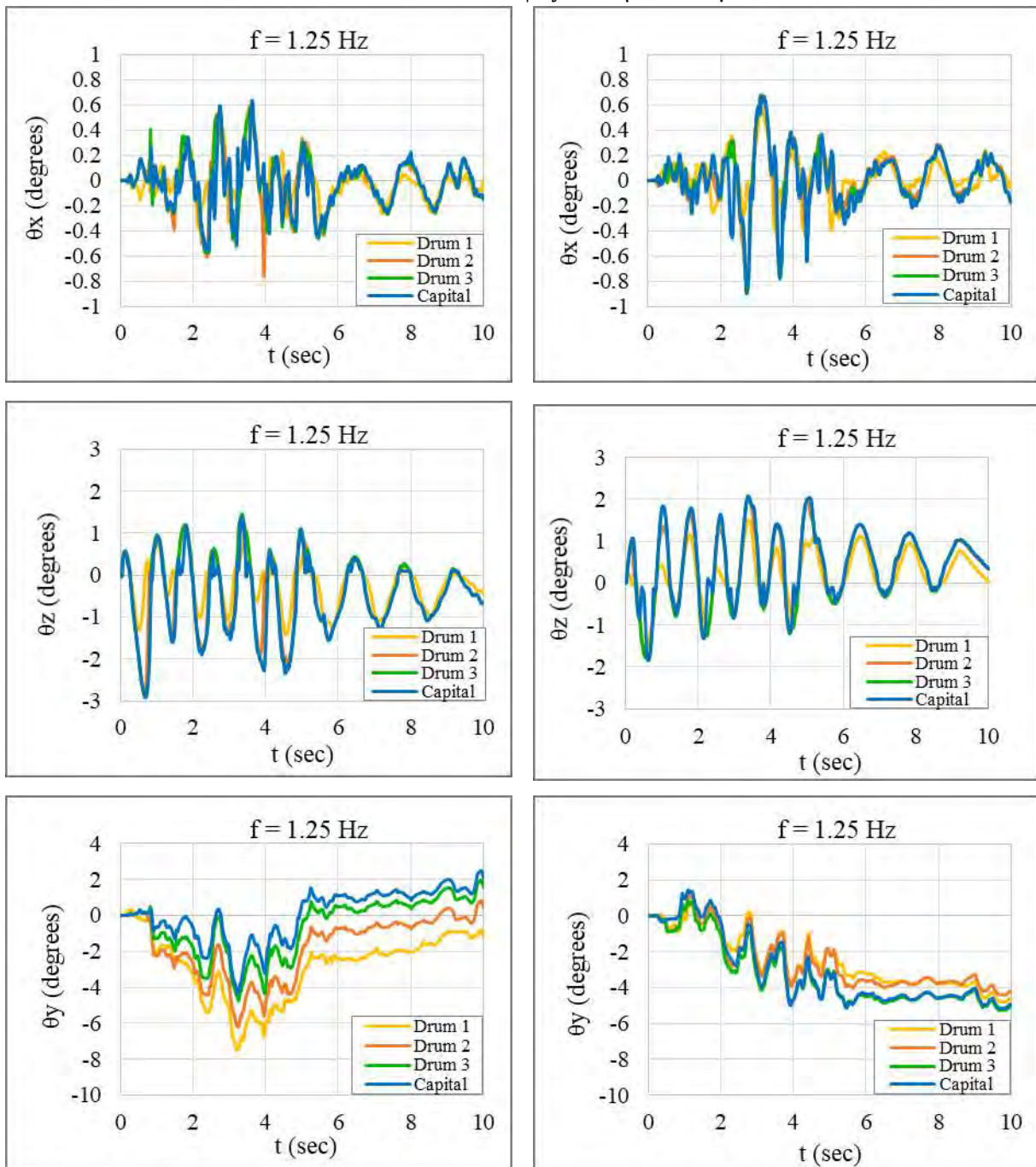


$$\alpha_g = 0.30g$$

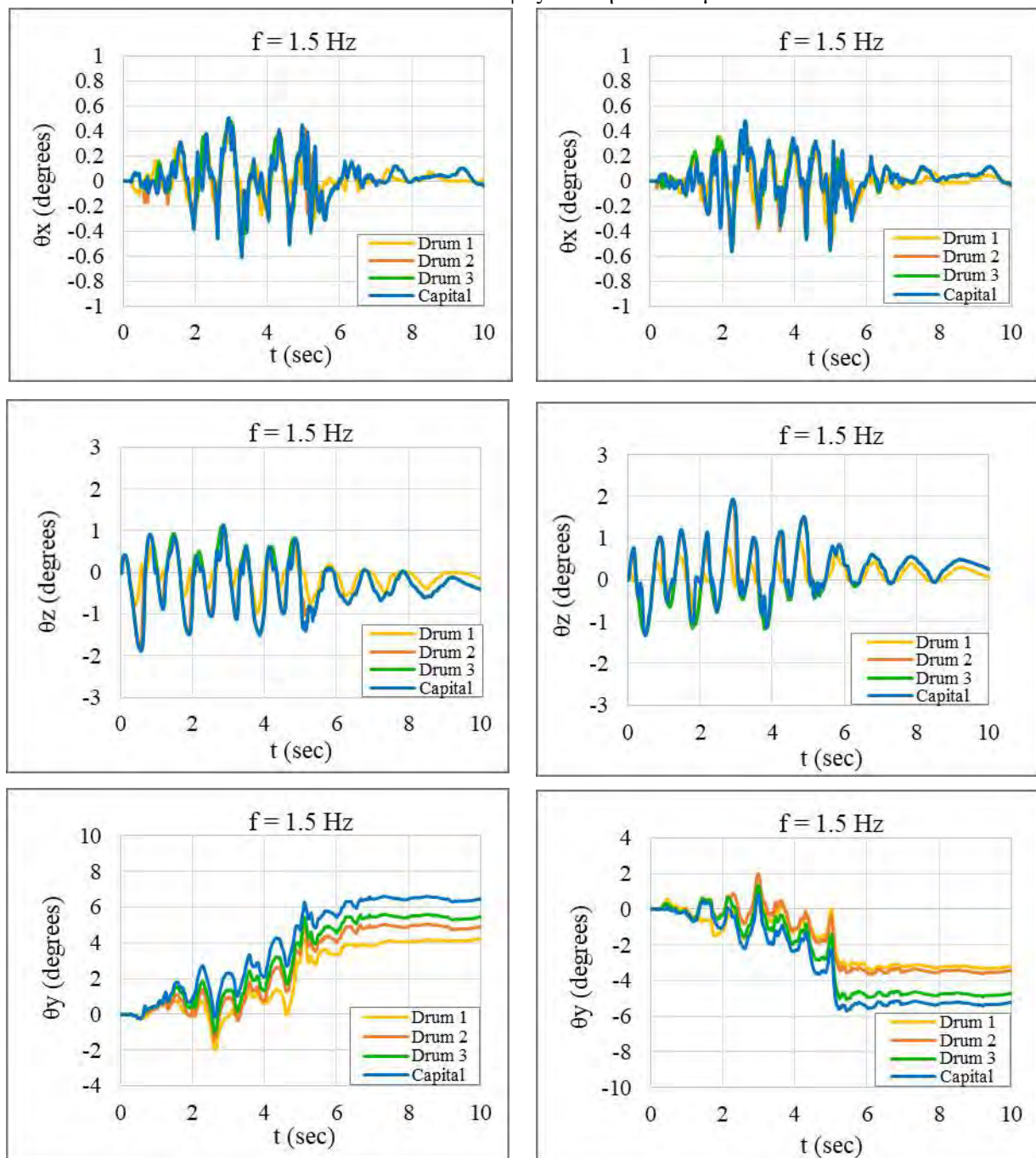
$$f = 1 \text{ Hz}$$

$$t = 4.91 \text{ sec}$$

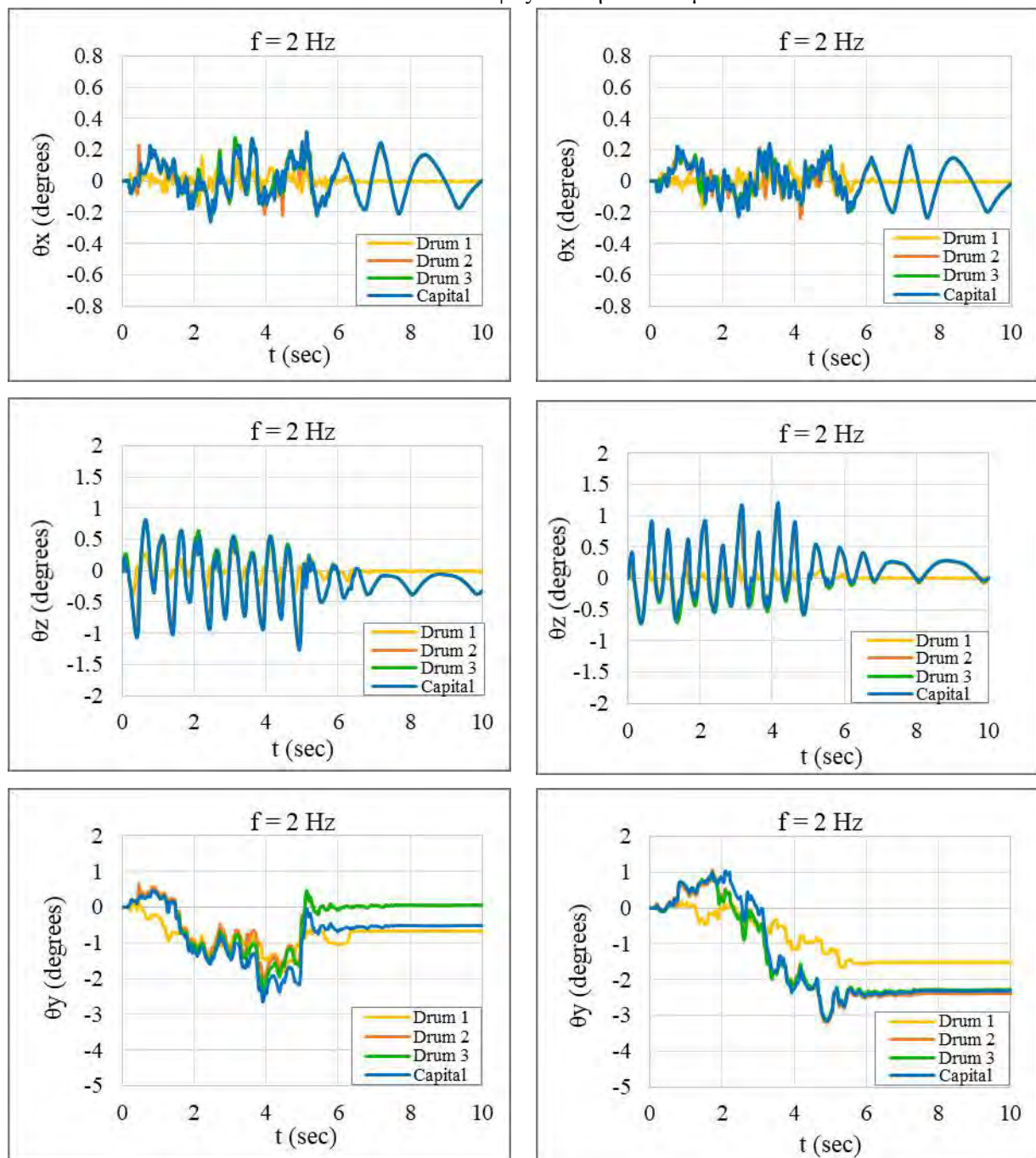
Σχήμα 5.13. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1 \text{ Hz}$
εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



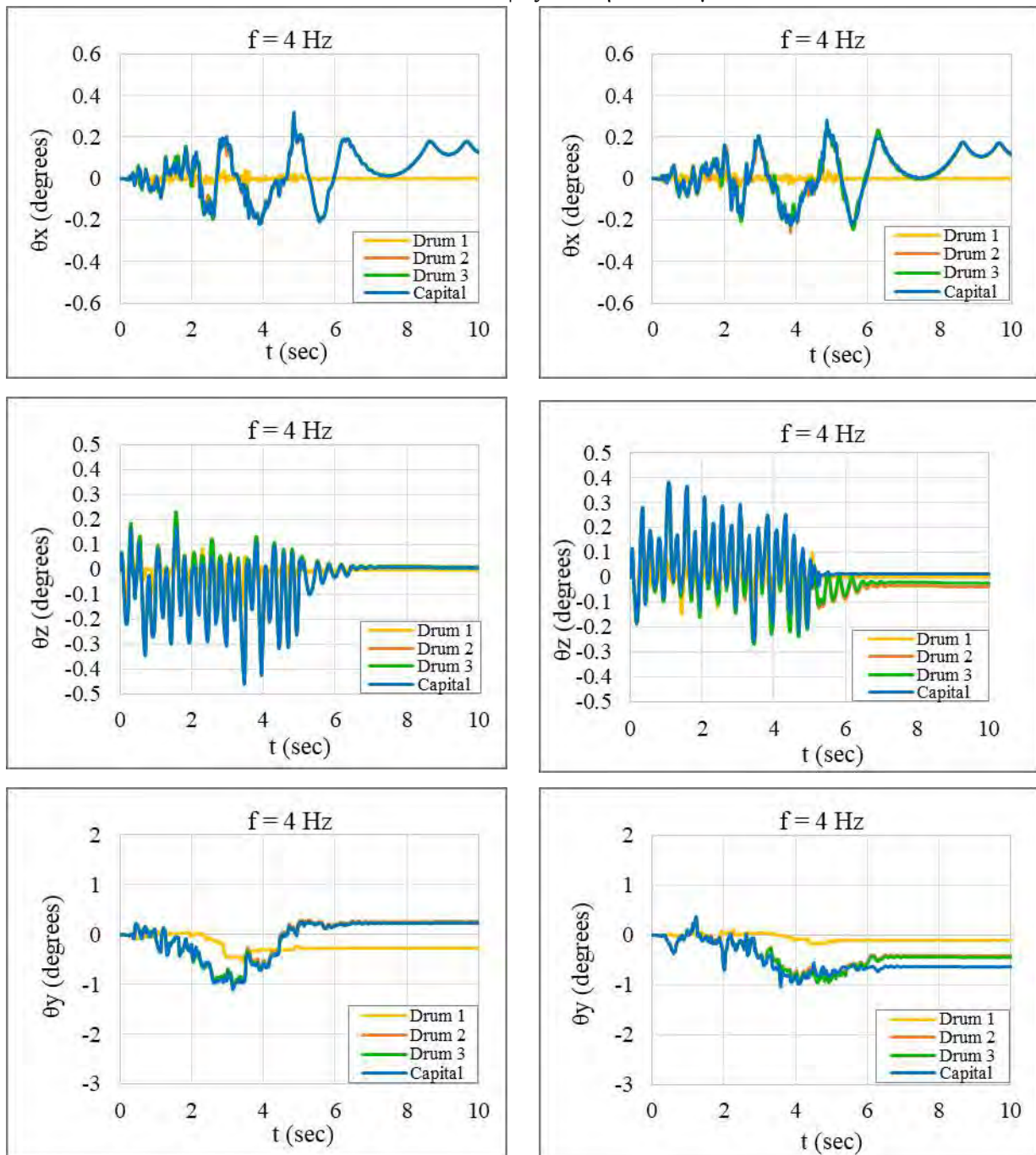
Σχήμα 5.14. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



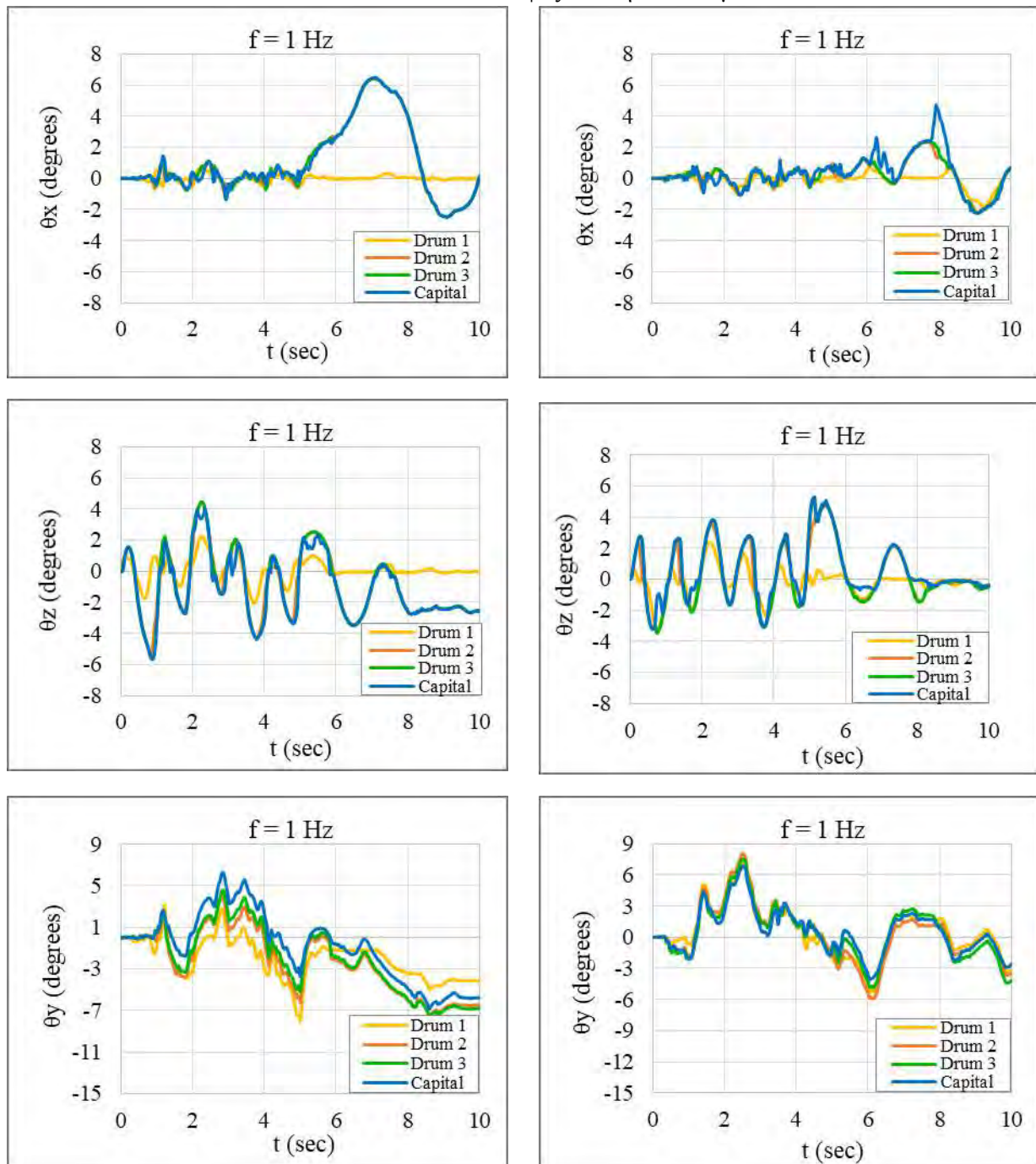
Σχήμα 5.15. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



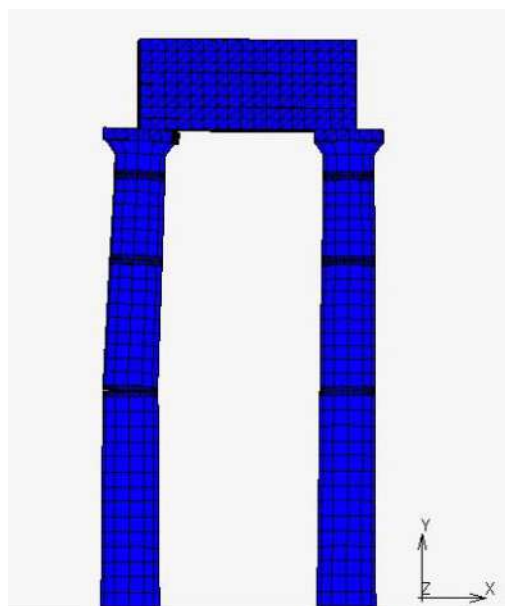
Σχήμα 5.16. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.17. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



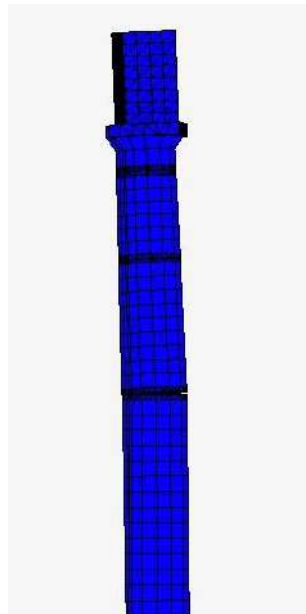
Σχήμα 5.18. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



$$\alpha_g = 0.40g$$

$$f = 1 \text{ Hz}$$

$$t = 9 \text{ sec}$$

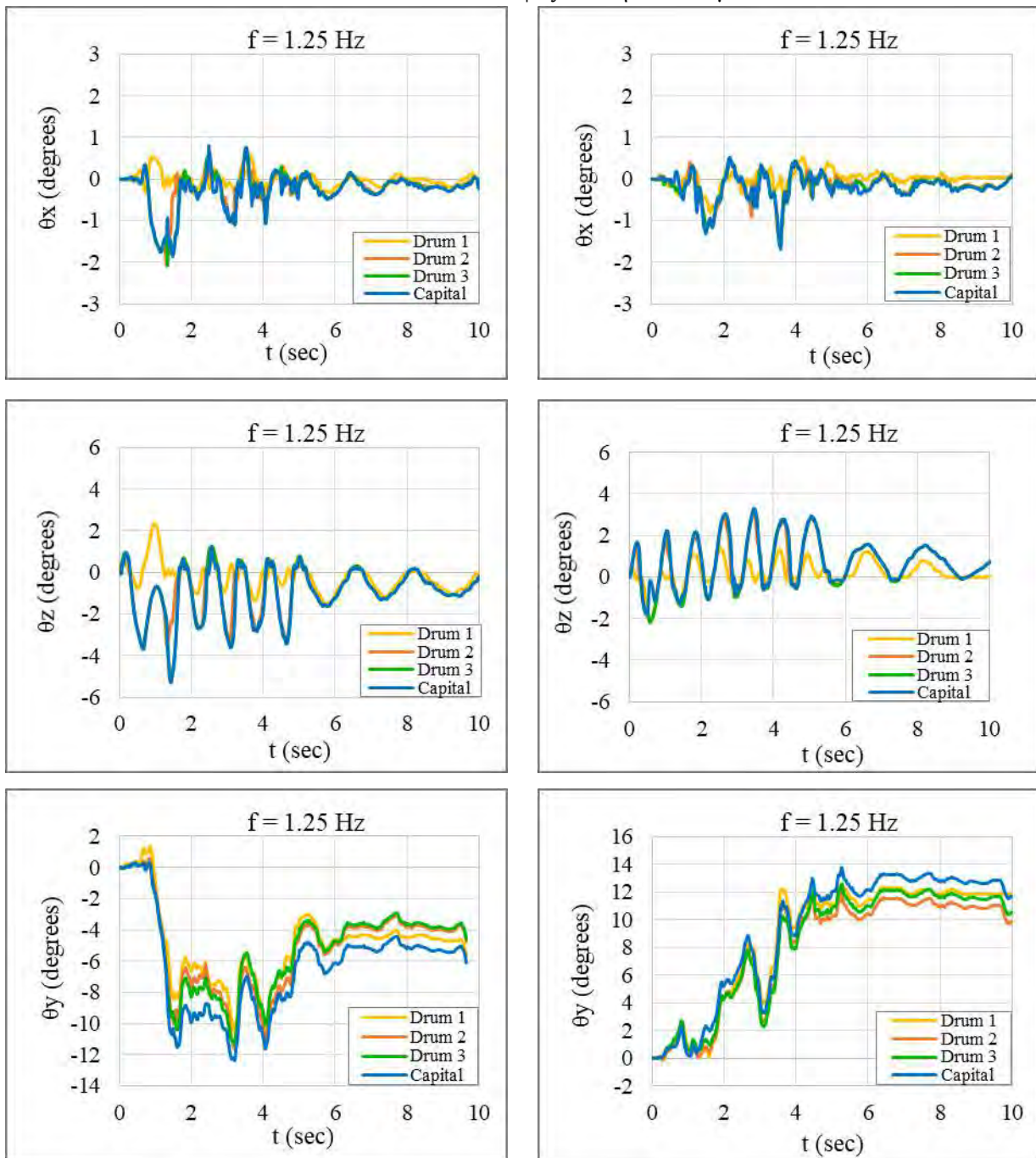


$$\alpha_g = 0.40g$$

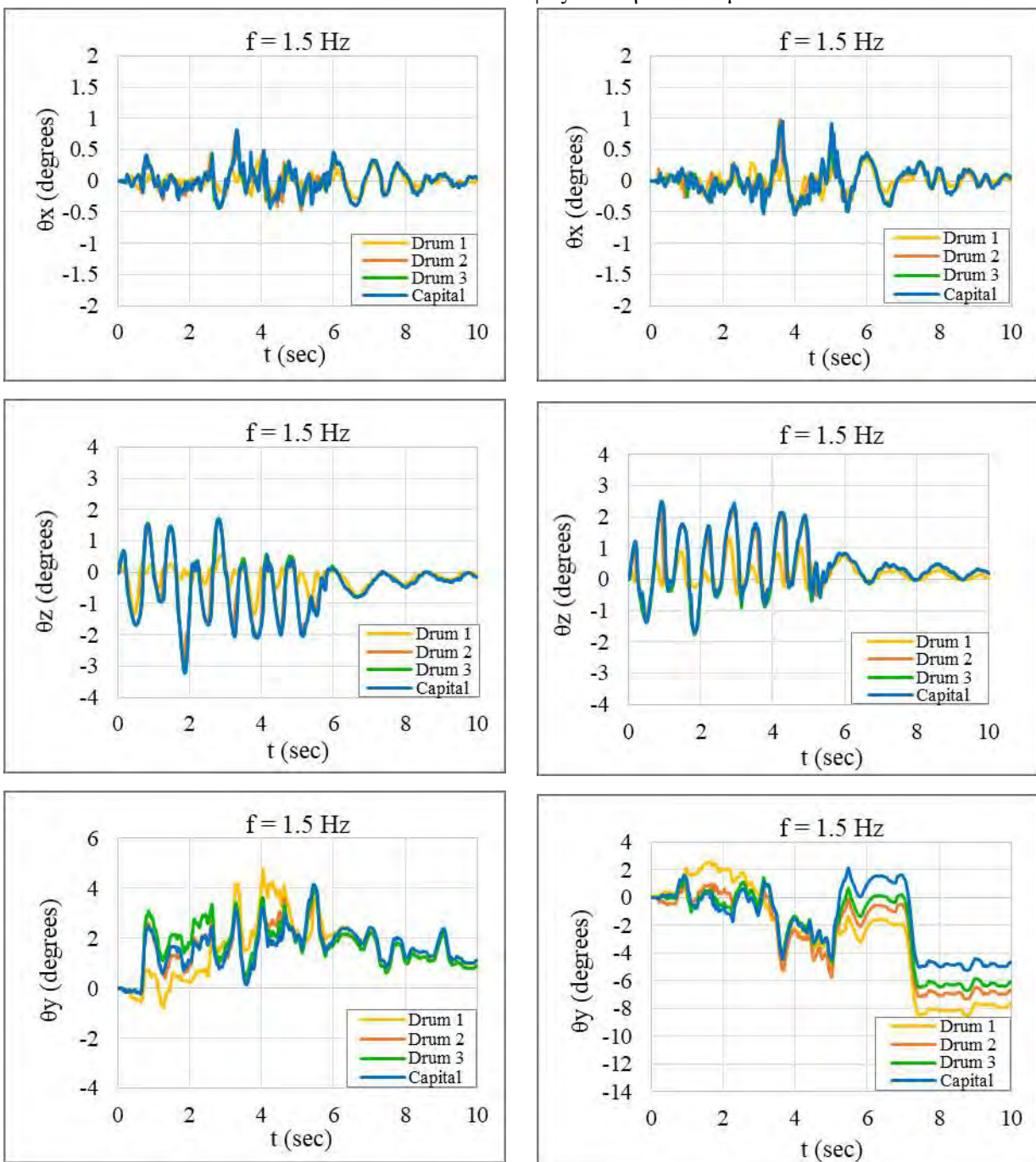
$$f = 1 \text{ Hz}$$

$$t = 9 \text{ sec}$$

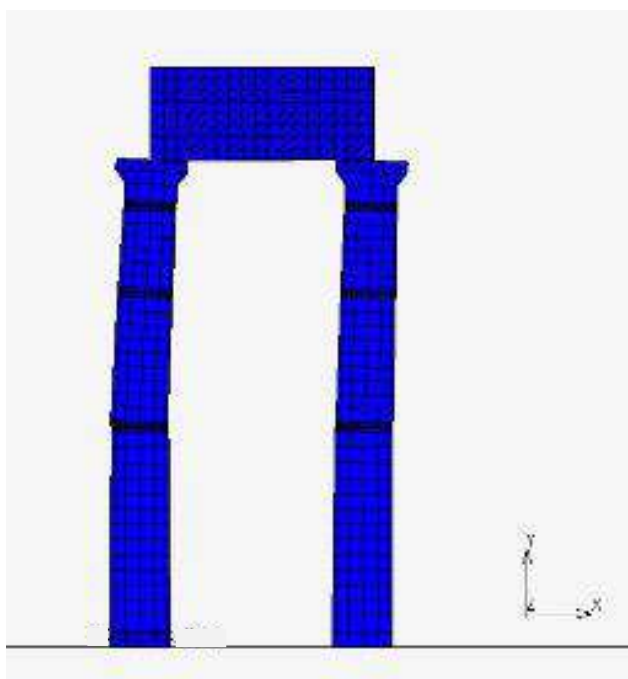
Σχήμα 5.19. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1 \text{ Hz}$
εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



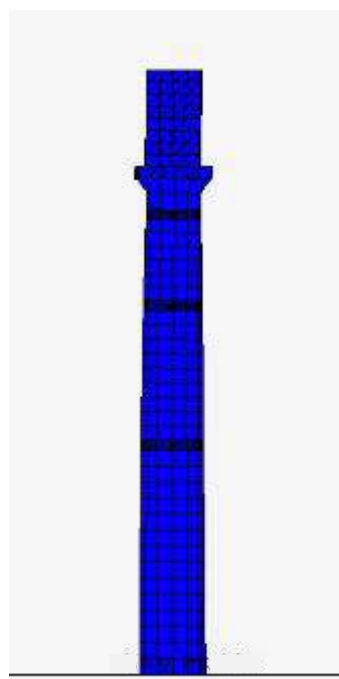
Σχήμα 5.20. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.21. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)

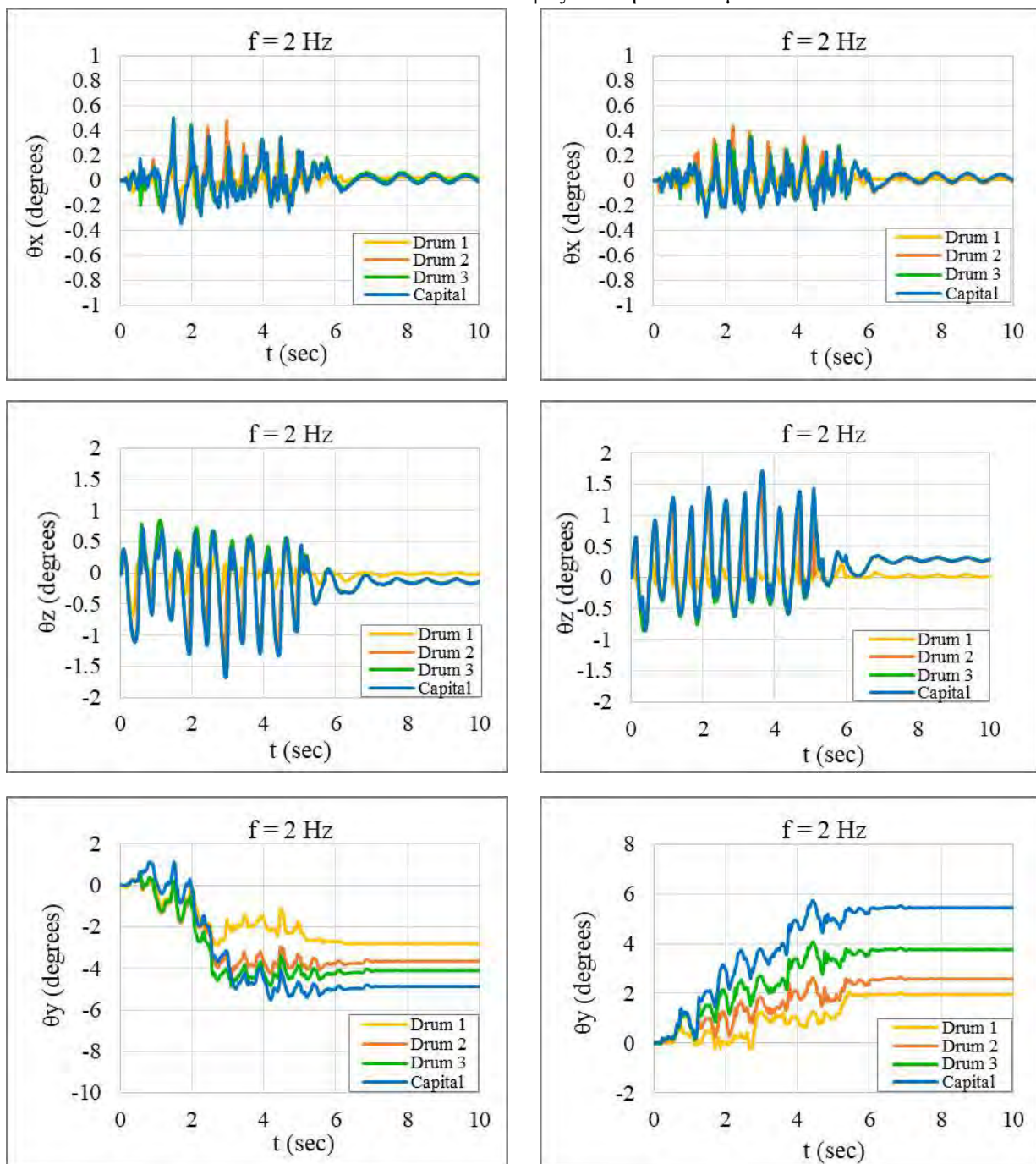


$\alpha_g = 0.40g$
 $f = 1.5 \text{ Hz}$
 $t = 1.87 \text{ sec}$

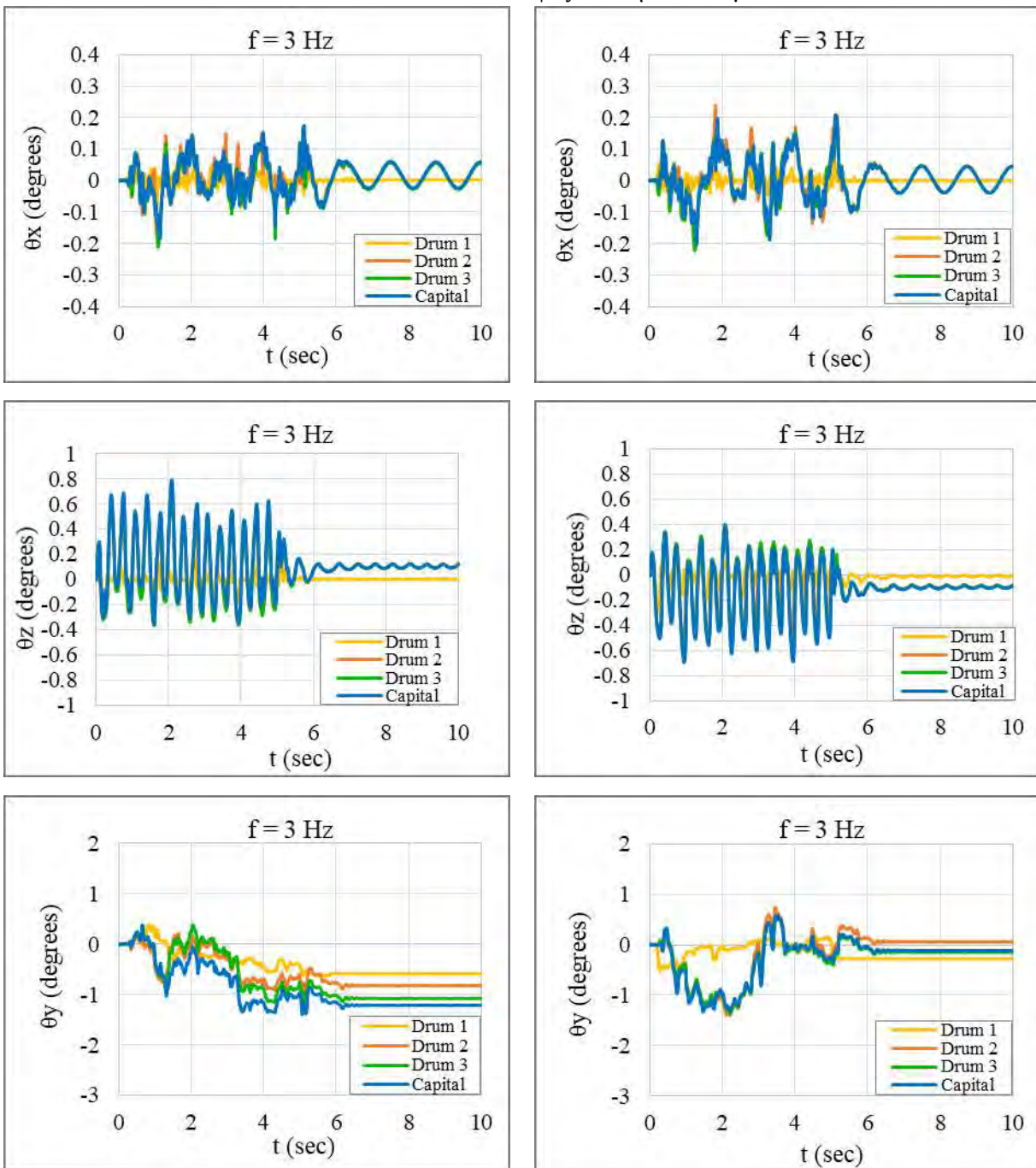


$\alpha_g = 0.40g$
 $f = 1.5 \text{ Hz}$
 $t = 3.33 \text{ sec}$

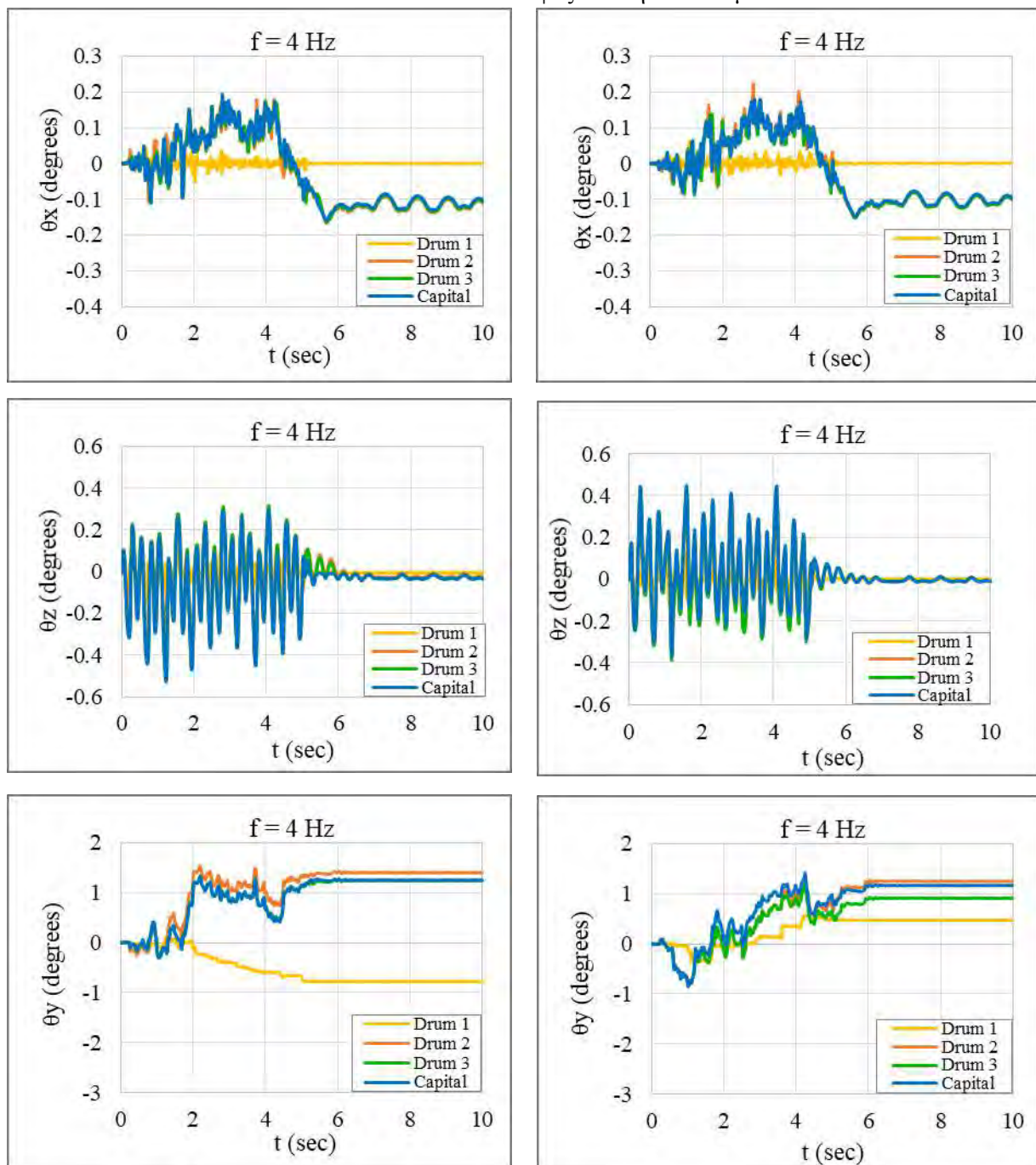
Σχήμα 5.22. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1.5 \text{ Hz}$
εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά)



Σχήμα 5.23. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.24. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$
και $f = 3$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



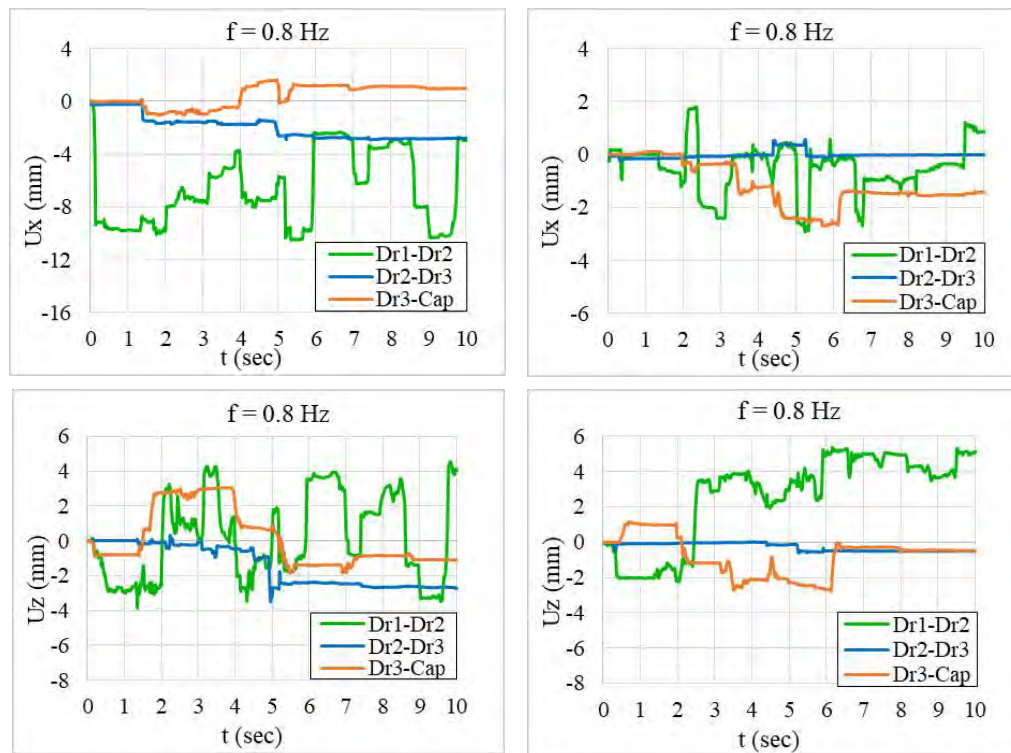
Σχήμα 5.25. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 4 \text{ Hz}$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)

5.2.3 Διαγράμματα ολισθήσεων των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο

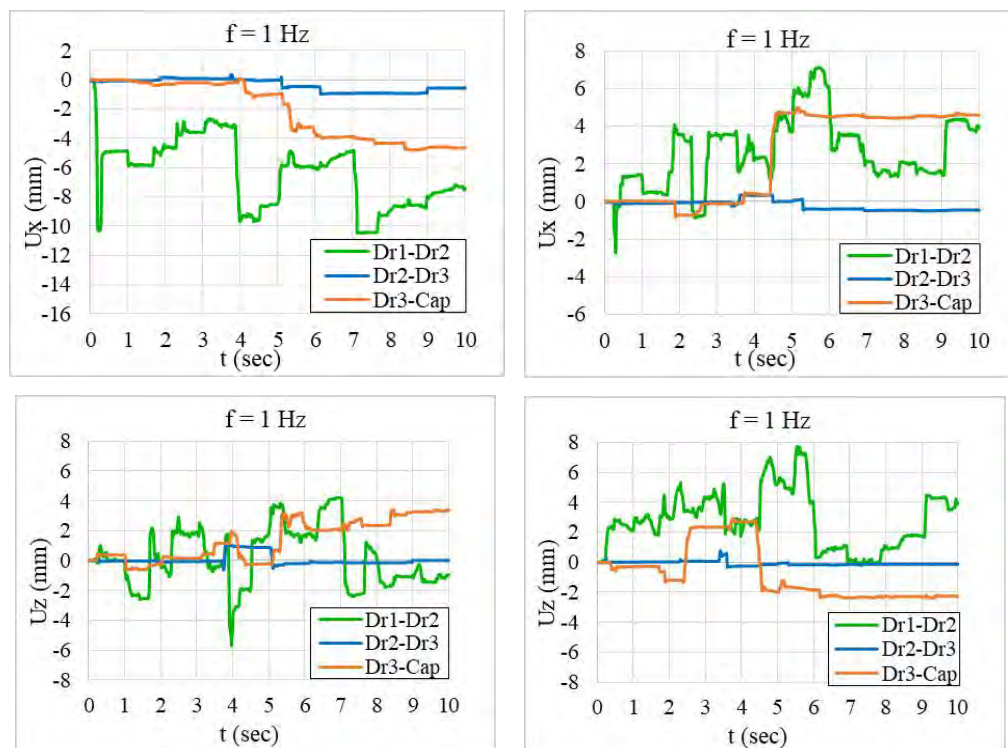
Στα Σχήματα 5.26 έως 5.42 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των εντός (Ux) και εκτός επιπέδου (Uz) ολισθήσεων στις διεπιφάνειες των σπονδύλων σε συνάρτηση με το χρόνο για τις διεγέρσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία και στις οποίες δεν επήλθε κατάρρευση του πλαισίου. Σε όλα τα διαγράμματα δίνονται οι ολισθήσεις του υπερκείμενου ως προς τον υποκείμενο σπόνδυλο.

Από την προσεκτική μελέτη των διαγραμμάτων καταλήγουμε στα συμπεράσματα :

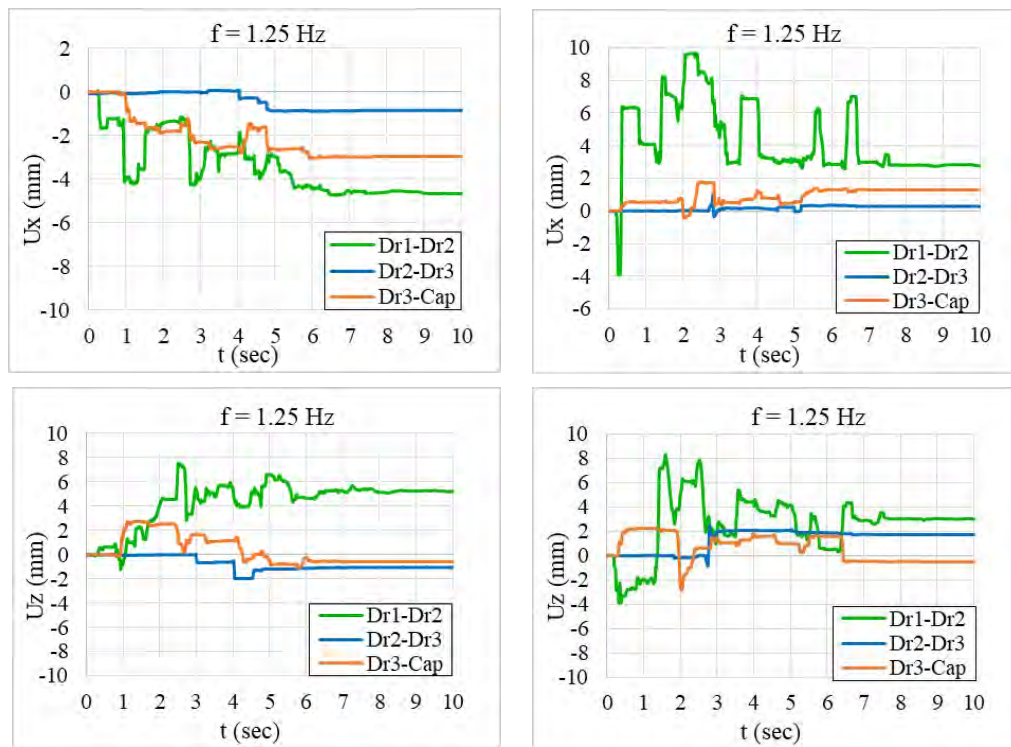
- Για σταθερή τιμή εδαφικής επιτάχυνσης όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο μειώνονται και οι ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων εντός και εκτός επιπέδου.
- Οι εντός επιπέδου ολισθήσεις (Ux) παίρνουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις εκτός επιπέδου (Uz) ανεξαρτήτως τιμής εδαφικής επιτάχυνσης και συχνότητας διέγερσης.
- Στις χαμηλές συχνότητες διέγερσης παρατηρούνται σχετικά μεγάλες παραμένουσες ολισθήσεις κυρίως εντός επιπέδου.
- Οι τιμές των ολισθήσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου σπονδύλου (Drum 1 – Drum 2) είναι μεγαλύτερες από τις τιμές των ολισθήσεων στις υπόλοιπες διεπιφάνειες.
- Για σταθερές τιμές συχνότητας διέγερσης και για τις τιμές εδαφικών επιταχύνσεων $a_g = 0.20g$ και $a_g = 0.30g$, οι ολισθήσεις αυξάνονται με την αύξηση των εδαφικών επιταχύνσεων. Όμως, για εδαφική επιτάχυνση $a_g = 0.40g$, δεν παρατηρείται αύξηση των ολισθήσεων σε σχέση με τις προηγούμενες τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων.
- Οι τιμές των ολισθήσεων στις διεπιφάνειες του αριστερού κίονα C1 είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις ολισθήσεις του δεξιού κίονα C2.
- Οι μεγαλύτερες παραμένουσες ολισθήσεις παρατηρούνται κυρίως στις συχνότητες 1.5 Hz και 2 Hz σε όλες τις εδαφικές επιταχύνσεις.



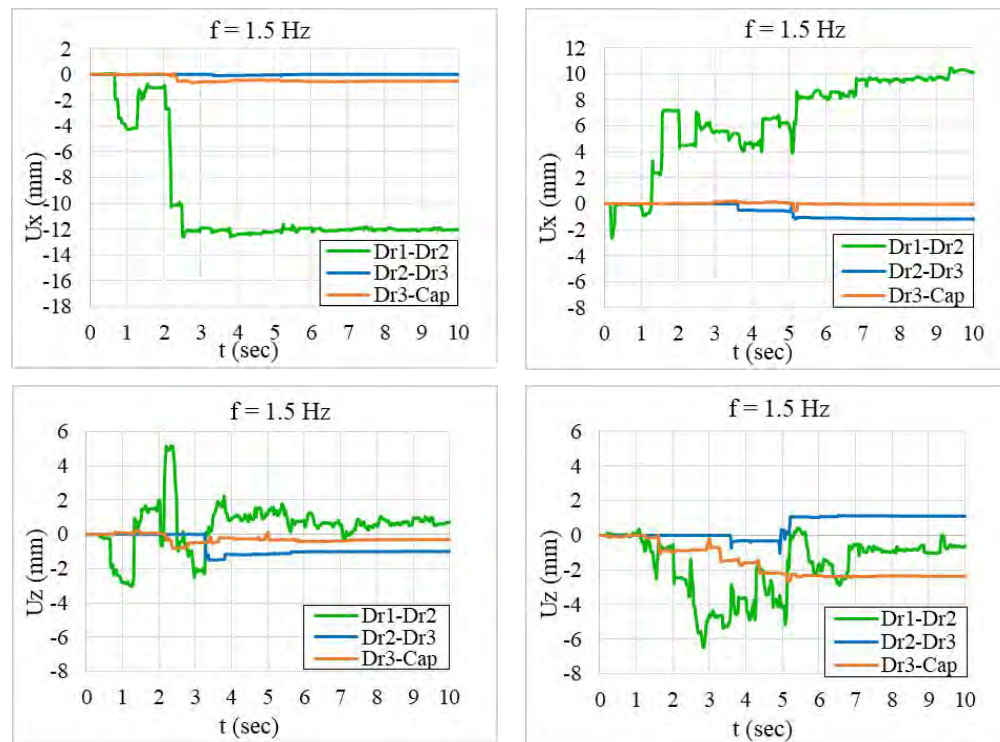
Σχήμα 5.26. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 0.8$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



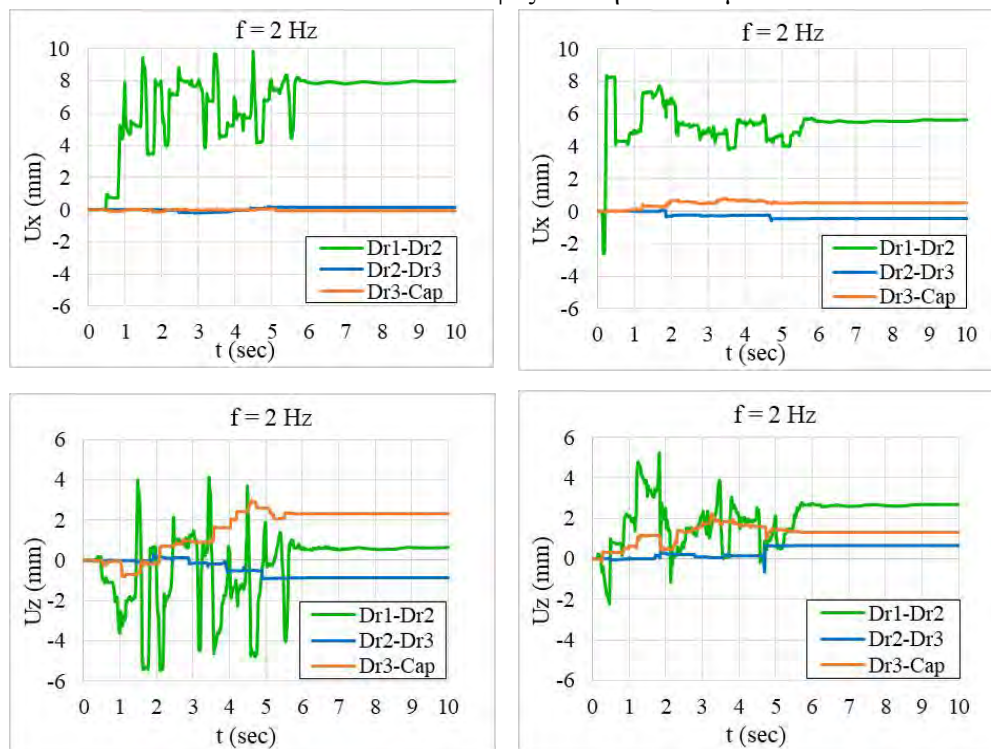
Σχήμα 5.27. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



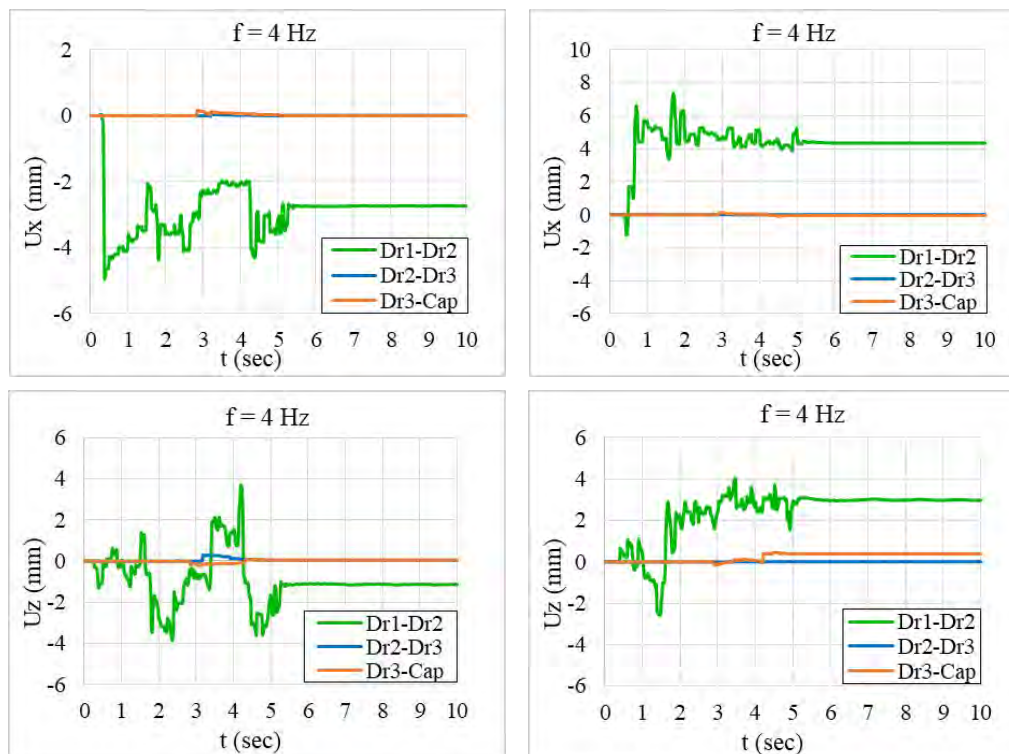
Σχήμα 5.28. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



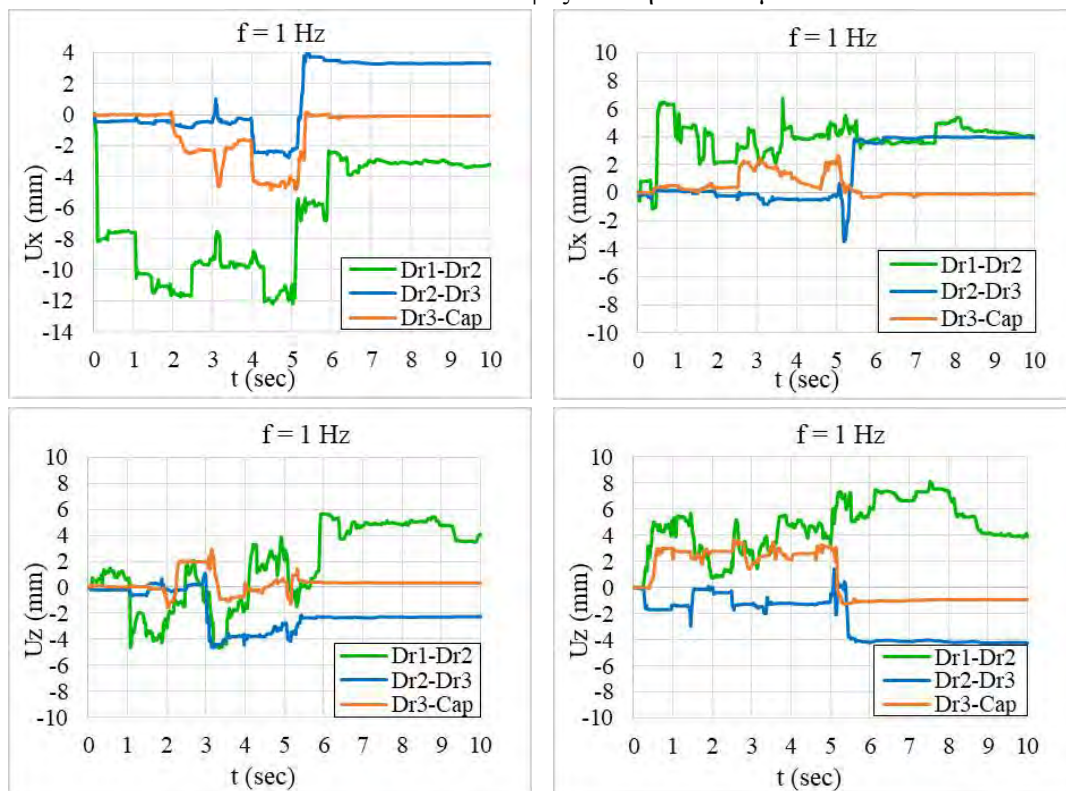
Σχήμα 5.29. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



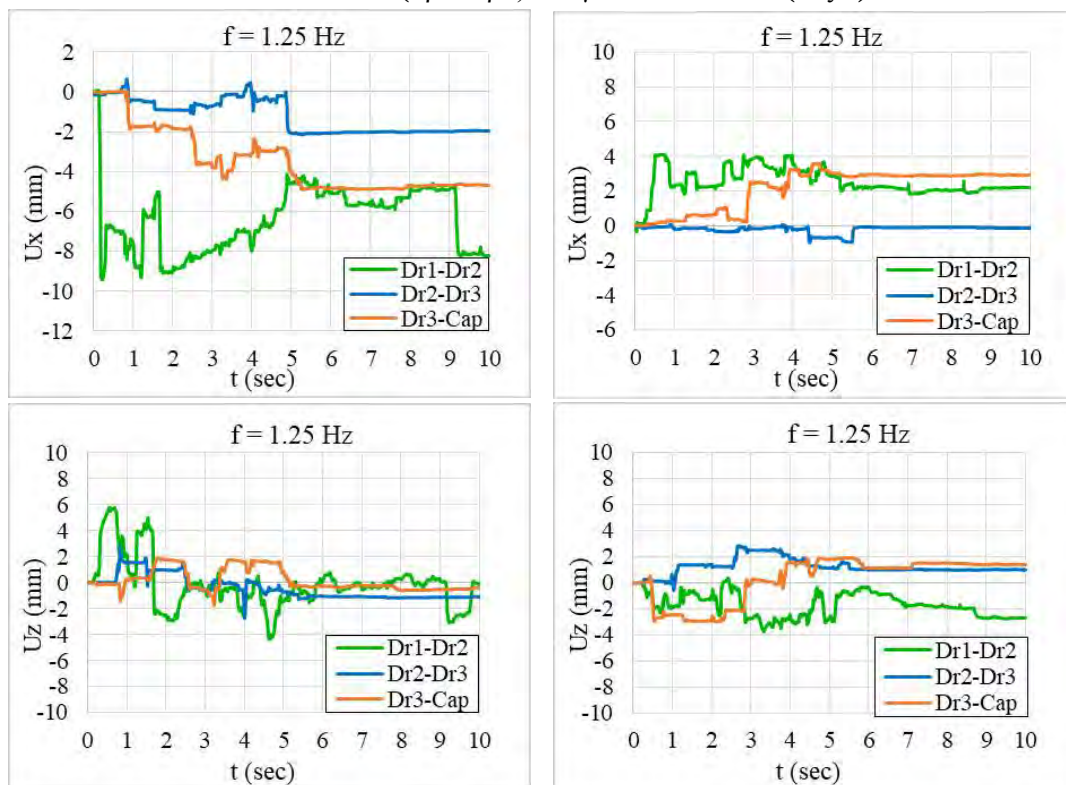
Σχήμα 5.30. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



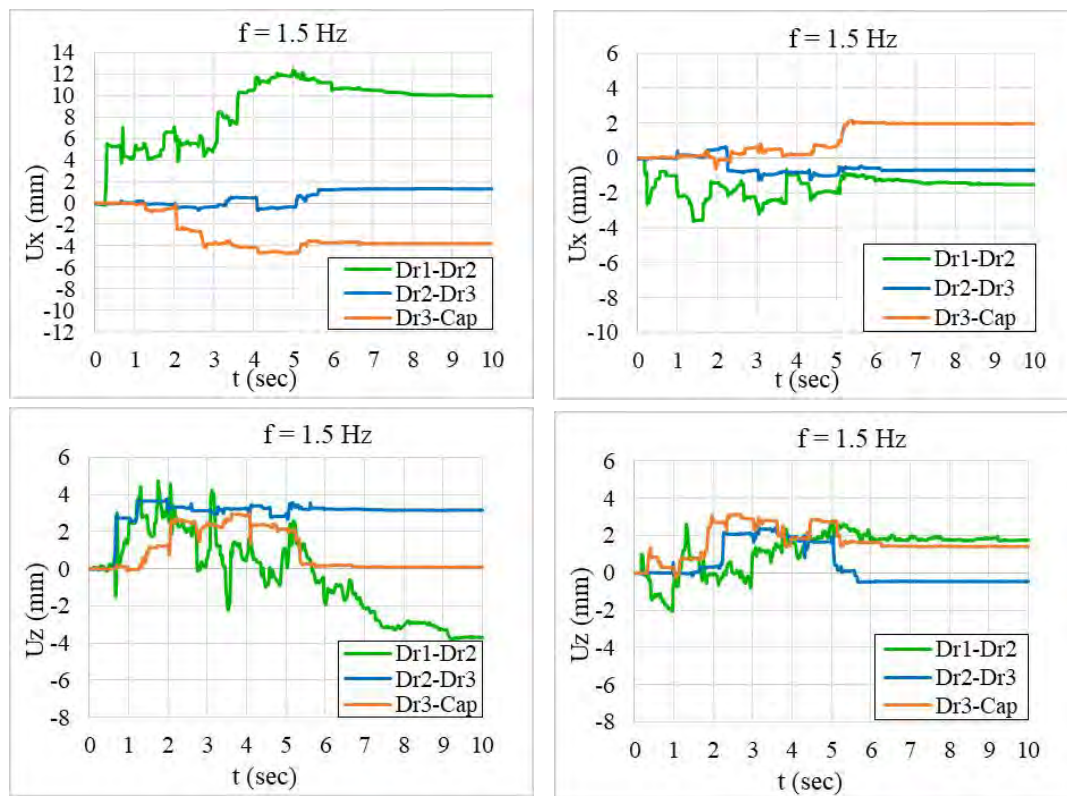
Σχήμα 5.31. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



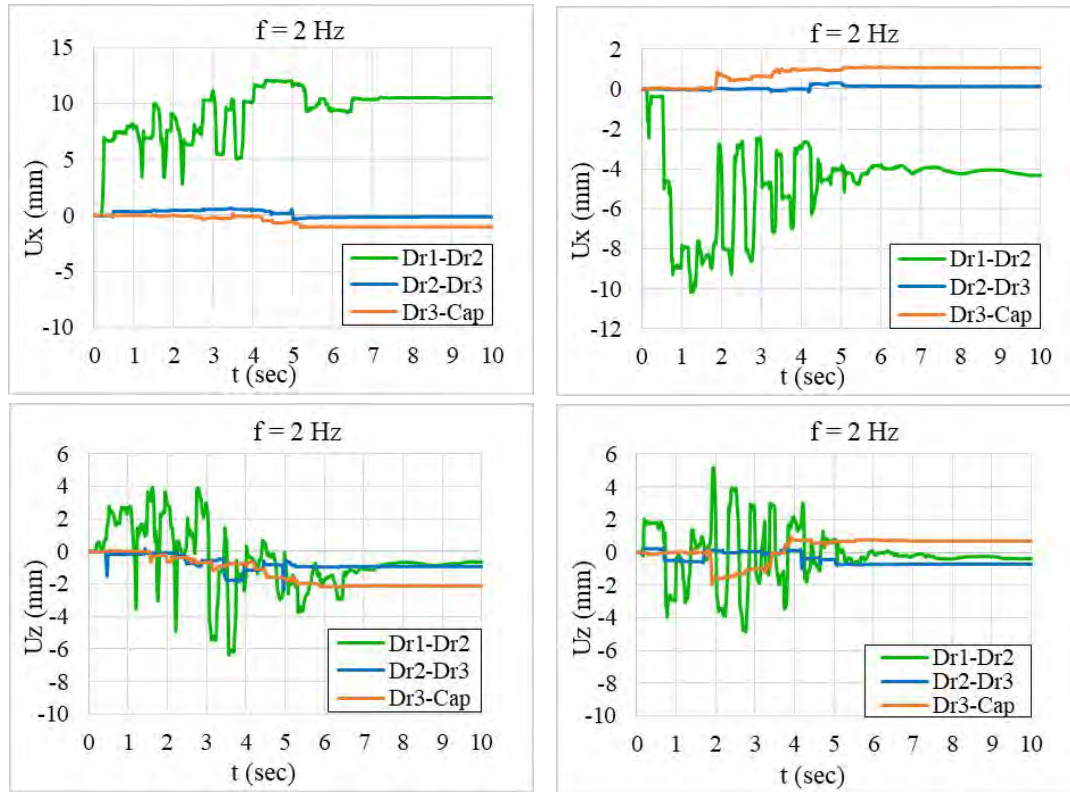
Σχήμα 5.32. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



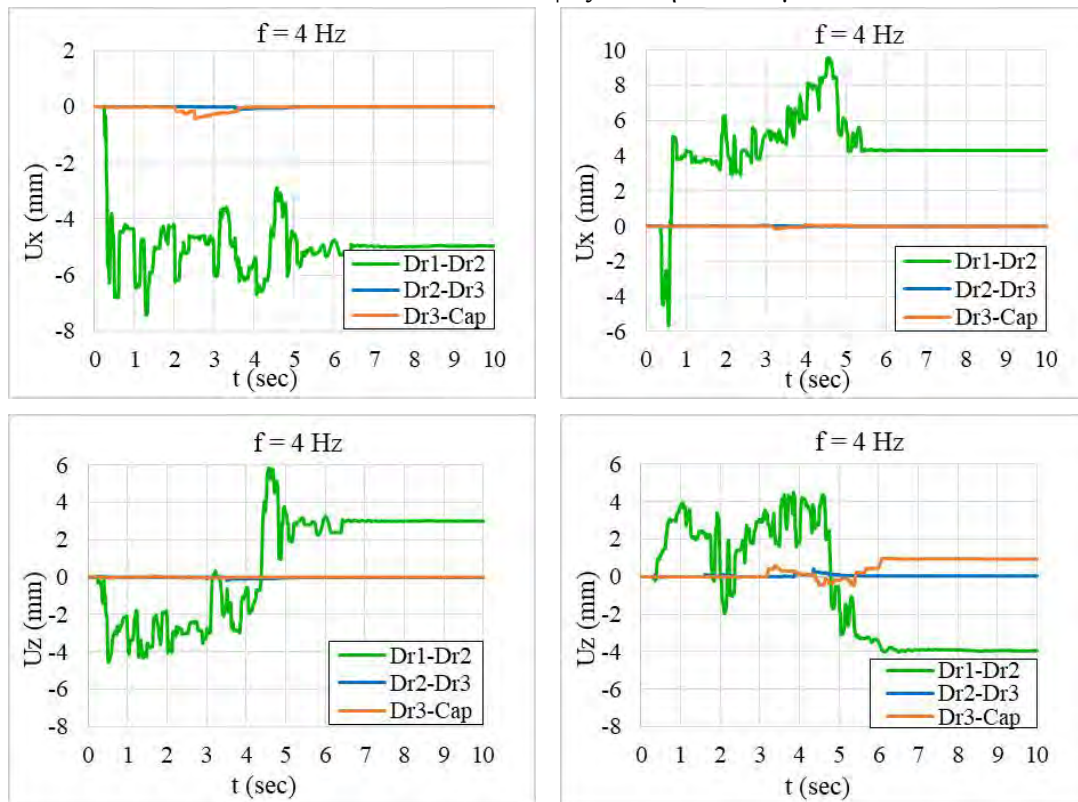
Σχήμα 5.33. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



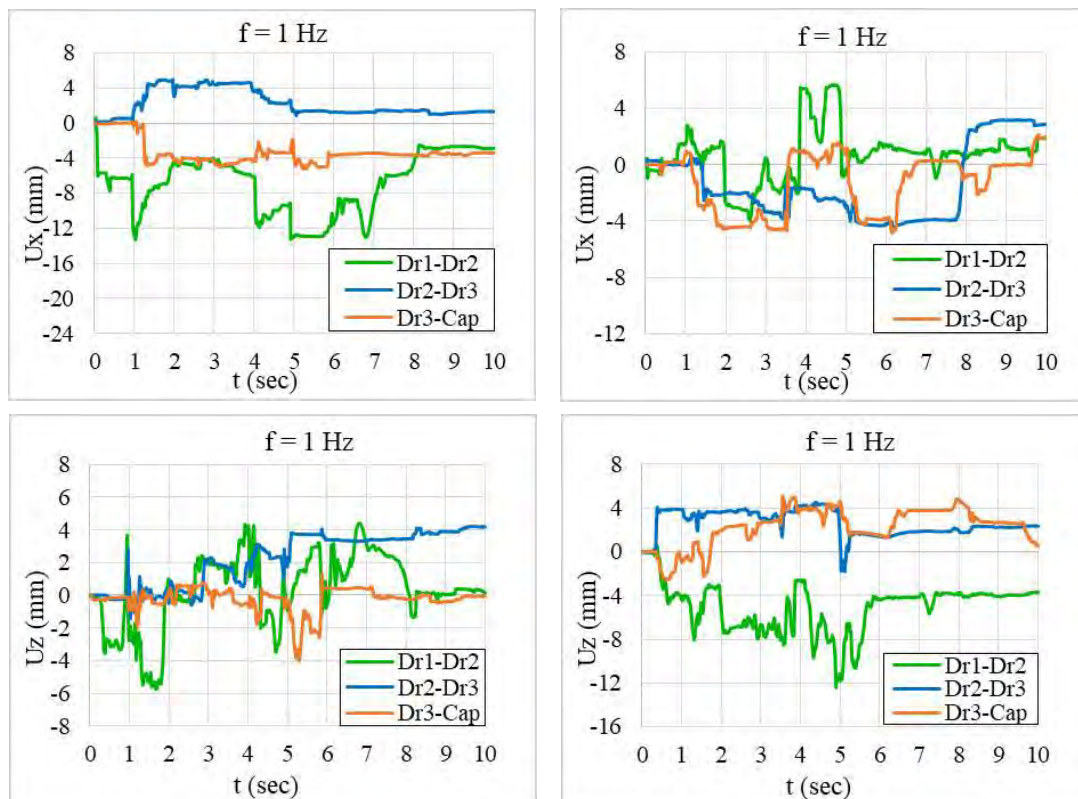
Σχήμα 5.34. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



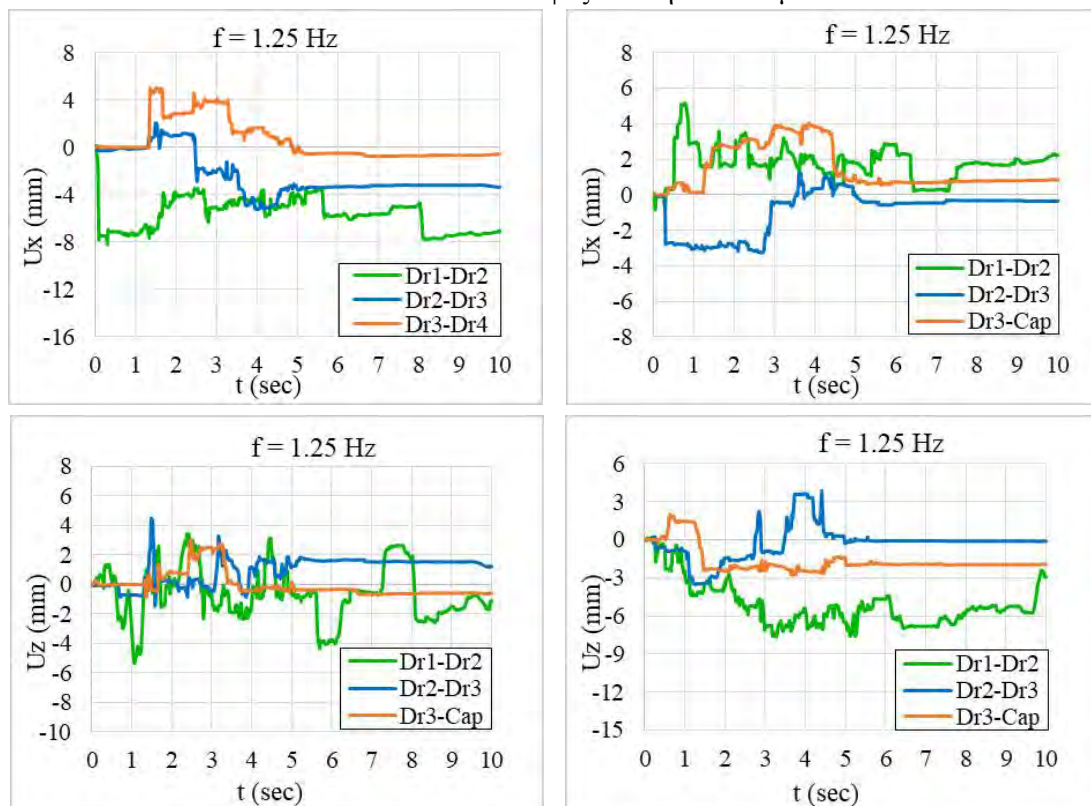
Σχήμα 5.35. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



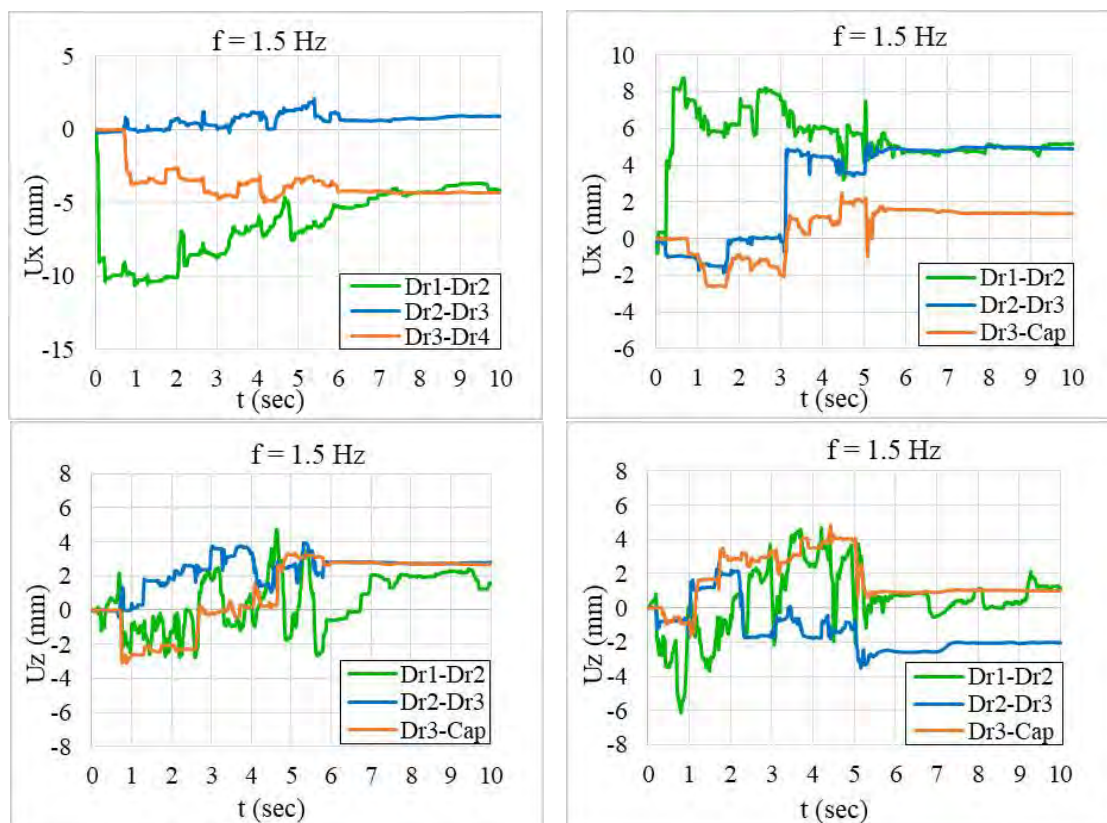
Σχήμα 5.36. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



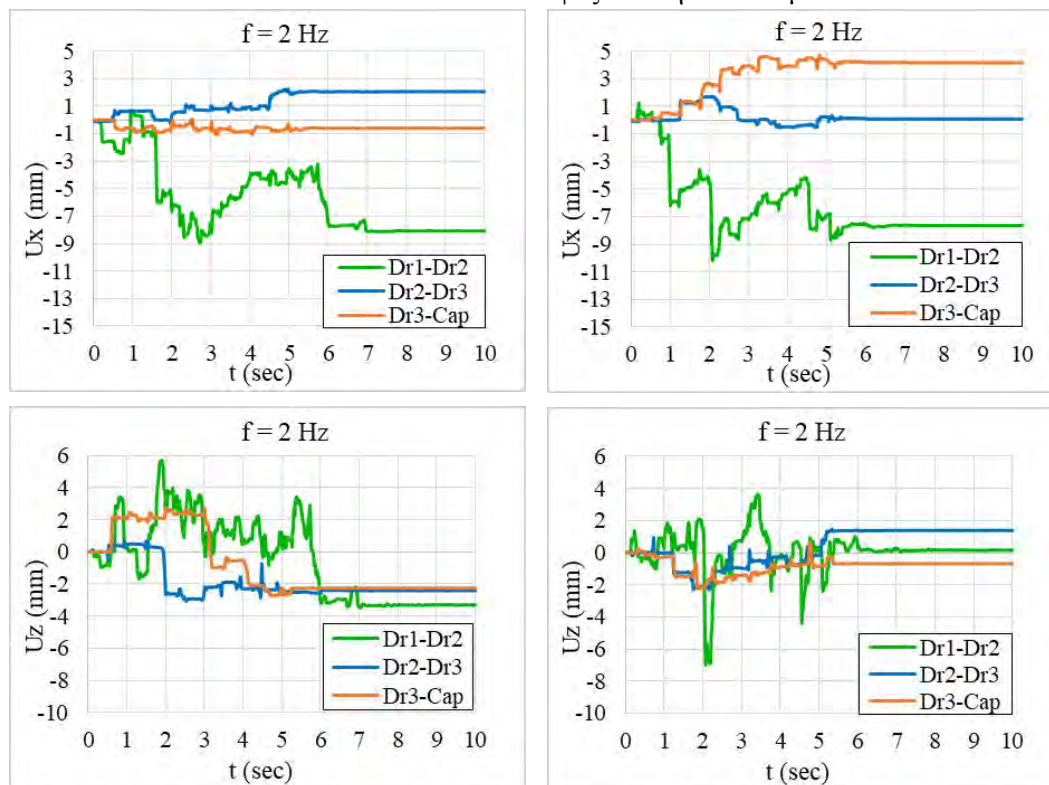
Σχήμα 5.37. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



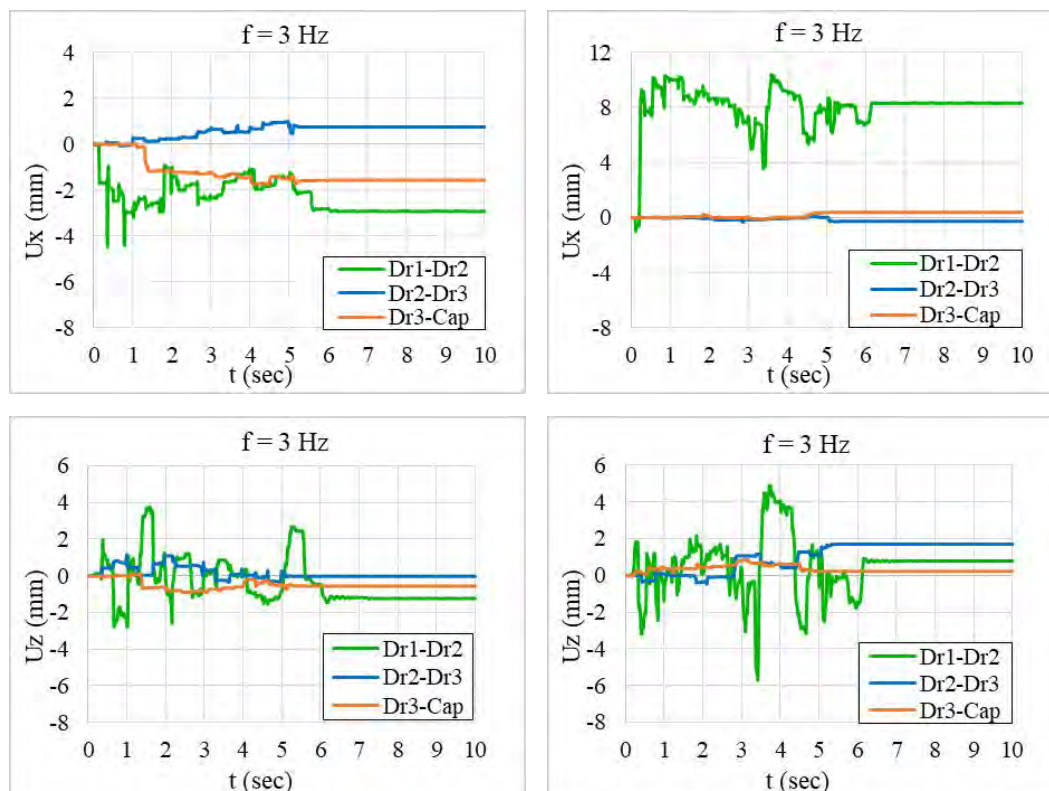
Σχήμα 5.38. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



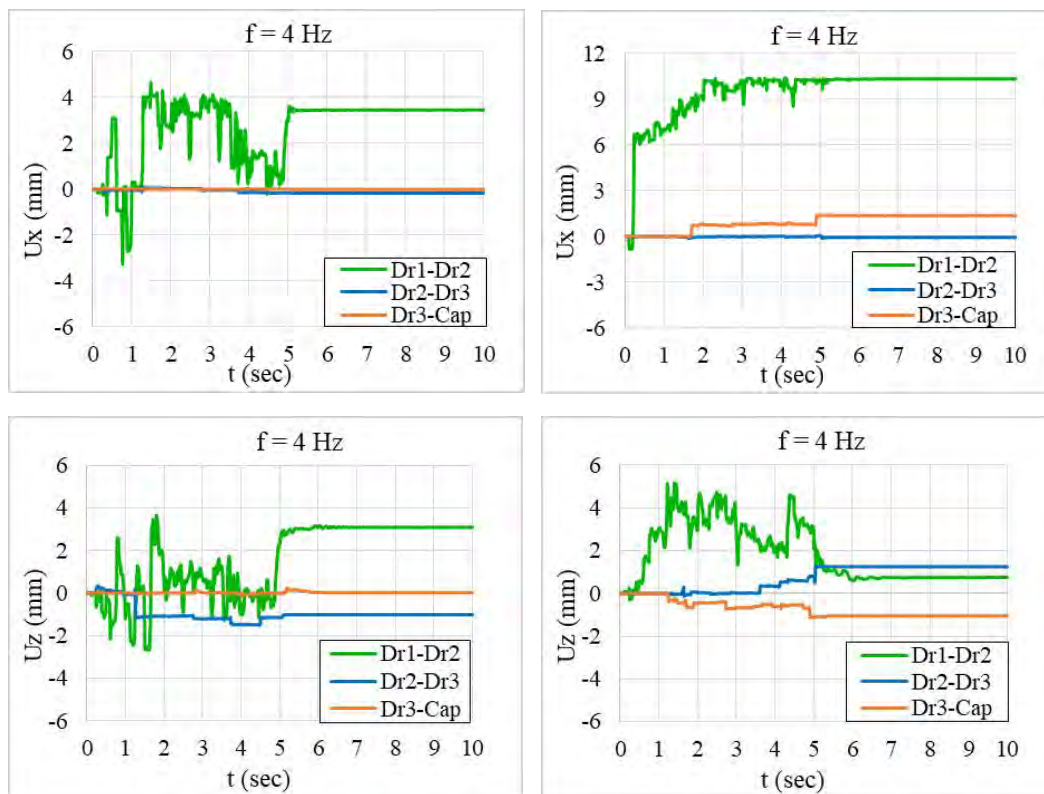
Σχήμα 5.39. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.40. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.41. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 3$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



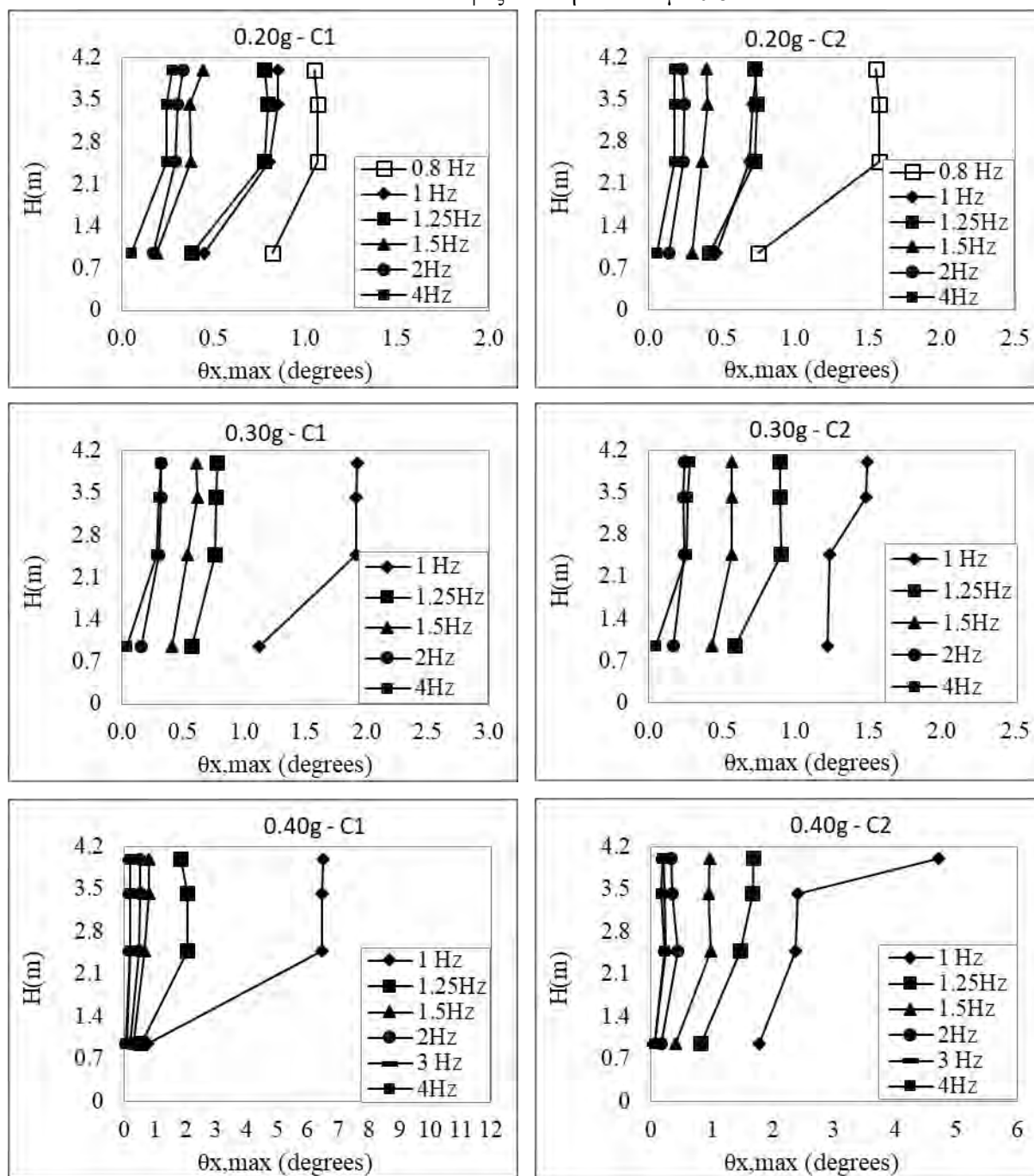
Σχήμα 5.42. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.40g$ και $f = 4 \text{ Hz}$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

5.2.4 Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών στροφής

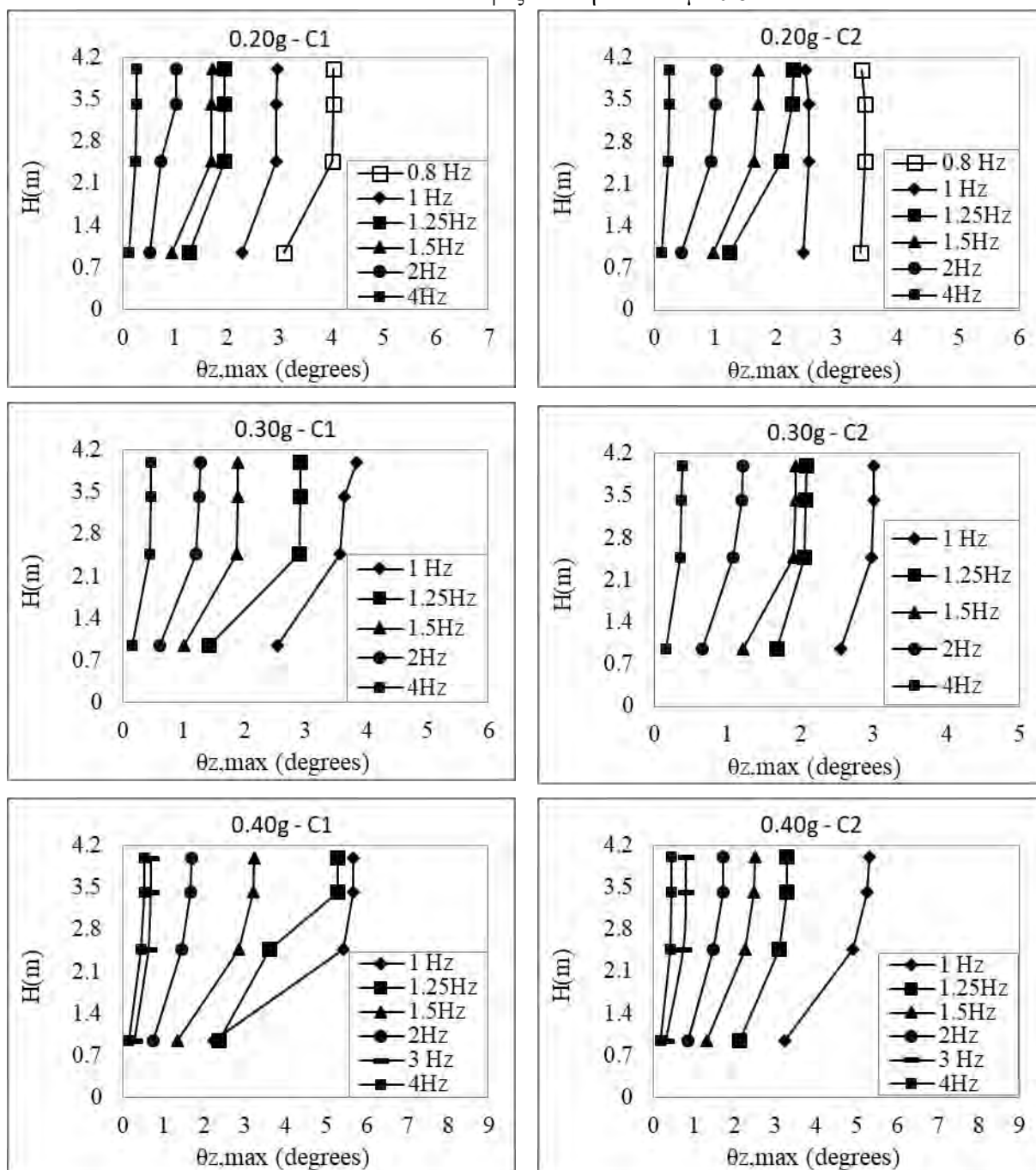
Παρακάτω στα Σχήματα 5.43 έως 5.45 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις μέγιστες καθ' ύψος γωνίες λικνισμού κατά την διεύθυνση x και κατά την διεύθυνση z, καθώς και τα διαγράμματα των παραμενουσών γωνιών στροφής των σπονδύλων περί τον κατακόρυφο άξονα y για τις διεγέρσεις που μελετήθηκαν.

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων που δίνονται στα Σχήματα 5.43 και 5.44 για τις μέγιστες καθ' ύψος γωνίες λικνισμού των κiónων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Για σταθερή τιμή εδαφικής επιτάχυνσης, οι χαμηλότερες συχνότητες παρουσιάζουν πιο έντονη λικνιστική απόκριση και μεγαλύτερες γωνίες λικνισμού από ότι οι υψηλότερες.
- Η εντός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά (θ_z) είναι επικρατέστερη.
- Σε όλα σχεδόν τα διαγράμματα παρατηρείται διαφορά μεταξύ της γωνίας λικνισμού του σπονδύλου 1 (Drum 1) με τους υπόλοιπους σπονδύλους, οι οποίοι παρουσιάζουν ανάλογη λικνιστική απόκριση, με την μεγάλη αύξηση να παρατηρείται από τον πρώτο στο δεύτερο σπόνδυλο, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.13, 5.19 και 5.22.
- Ο αριστερός κίονας C1 παρουσιάζει παρόμοια λικνιστική συμπεριφορά με τον δεξιό κίονα C2.
- Για τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.40g και συχνότητα διέγερσης 1 Hz, παρατηρείται έντονη εκτός επιπέδου λικνιστική απόκριση του κονόκρανου.
- Στον εντός επιπέδου λικνισμό (θ_z) παρατηρούνται μεγαλύτερες γωνίες λικνισμού σε όλες τις συχνότητες όσο αυξάνονται οι εδαφικές επιταχύνσεις.



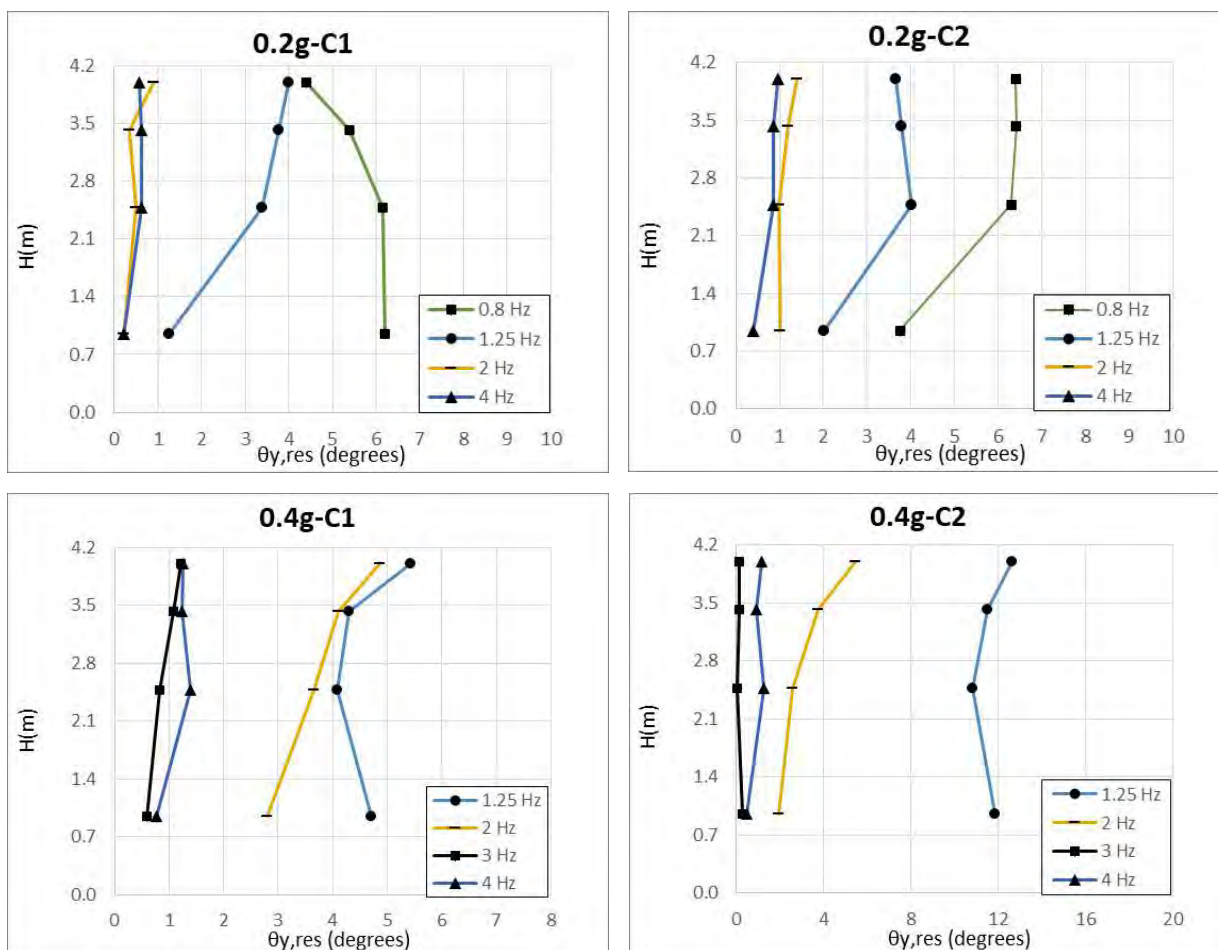
Σχήμα 5.43. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών λικνισμού εντός επιπέδου θ_x για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.44. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών λικνισμού εκτός επιπέδου θ_z για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

Στη συνέχεια, μελετώντας τα διαγράμματα των απόλυτων τιμών των παραμενουσών γωνιών στροφής των σπονδύλων των δύο κίωνων περί τον κατακόρυφο άξονα y που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.45 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Για σταθερή τιμή εδαφικής επιτάχυνσης, όσο αυξάνεται η τιμή της συχνότητας διέγερσης τόσο μειώνονται οι παραμένουσες γωνίες στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y .
- Με την αύξηση της τιμής της εδαφικής επιτάχυνσης, αυξάνονται σε μικρό βαθμό οι παραμένουσες γωνίες στροφής, κυρίως στις χαμηλές συχνότητες.
- Στις χαμηλές συχνότητες οι ανώτεροι σπόνδυλοι παίρνουν πολλαπλάσιες τιμές από ότι οι κατώτεροι.
- Ο δεξιός κίονας C2 καταγράφει μεγαλύτερες παραμένουσες γωνίες στροφής από ότι ο αριστερός κίονας C1.
- Στις υψηλότερες συχνότητες παρατηρείται πιο ενιαία συμπεριφορά των σπονδύλων των κίωνων σε σχέση με τις χαμηλότερες όπου παρατηρούνται πιο έντονες συμπεριφορές ανεξαρτήτως τιμής εδαφικής επιτάχυνσης.



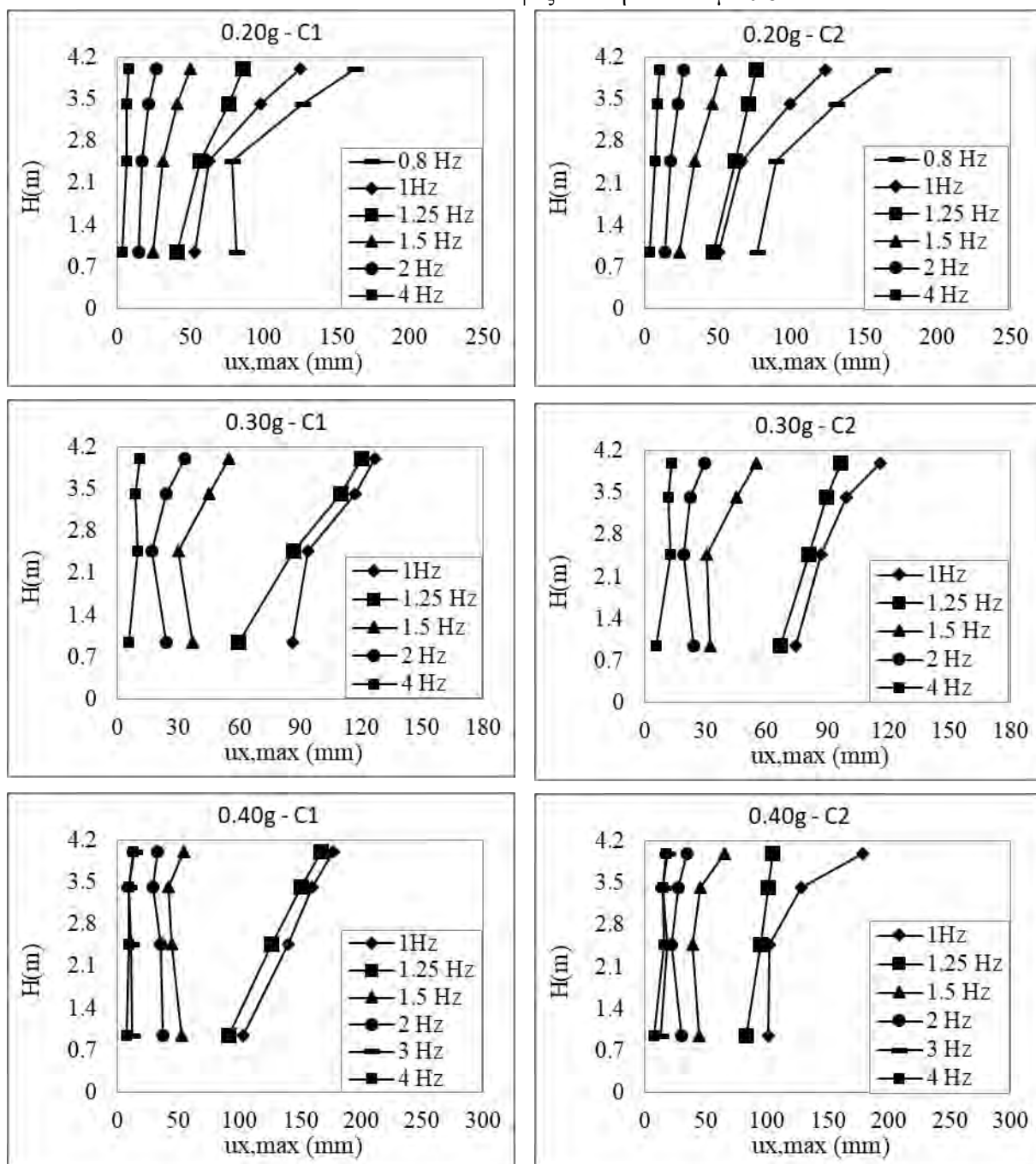
Σχήμα 5.45. Διαγράμματα καθ' ύψος παραμενουσών γωνιών στροφής θ_y για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

5.2.5 Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων

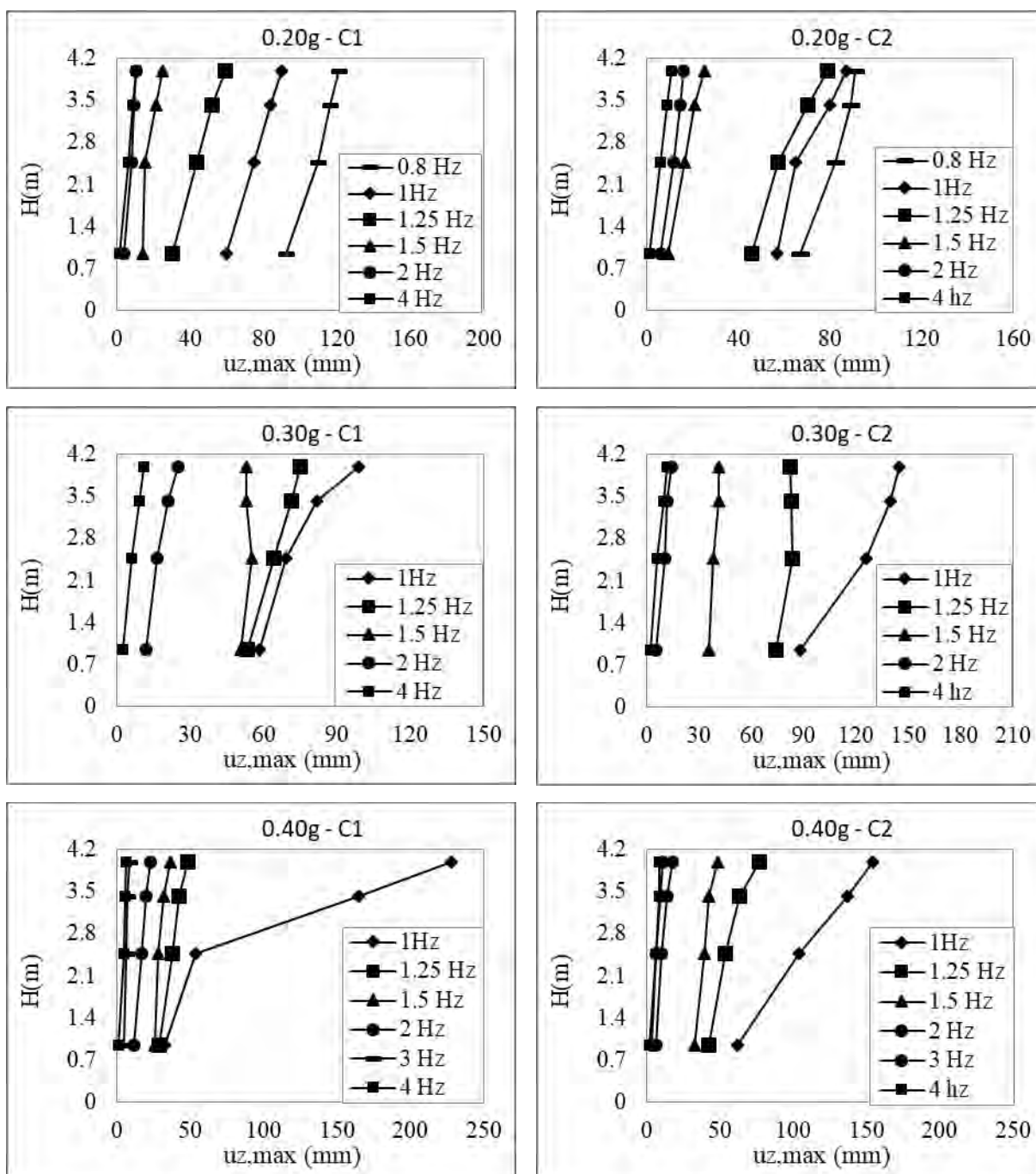
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις μέγιστες καθ' ύψος μετατοπίσεις των σπονδύλων στις διευθύνσεις x και z . Να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή της μετατόπισης αναφέρεται στον κόμβο που βρίσκεται στο κέντρο βάρους κάθε σπονδύλου. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις για όλους τους συνδυασμούς συχνότητων διέγερσης και εδαφικών επιταχύνσεων οι οποίοι μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και κατά τους οποίους δεν επήλθε κατάρρευση του πλαισίου. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.46 παρουσιάζονται οι απόλυτες μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων κατά την διεύθυνση x και στο Σχήμα 5.47 οι αντίστοιχες μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση z .

Μελετώντας τα διαγράμματα για τις μέγιστες καθ' ύψος μετατοπίσεις των σπονδύλων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Όσο αυξάνεται η τιμή της συχνότητας διέγερσης τόσο μειώνονται οι τιμές των μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων για όλες τις τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων.
- Κατά την κατεύθυνση x παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές μέγιστων μετατοπίσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές κατά την κατεύθυνση z .
- Στους ανώτερους σπονδύλους παρατηρείται αύξηση των μετατοπίσεων και στις δύο διευθύνσεις σε σχέση με τους κατώτερους σε όλες τις εδαφικές διεγέρσεις.
- Για υψηλότερες τιμές εδαφικών επιταχύνσεων οι τιμές των μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις χαμηλότερες σε όλες τις συχνότητες κατά την κατεύθυνση x .
- Στην κατεύθυνση z στις πολύ χαμηλές συχνότητες οι τιμές των μετατοπίσεων αυξάνονται αρκετά με την αύξηση της εδαφικής επιτάχυνσης.



Σχήμα 5.46. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση x για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.47. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση z για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

5.3 Περιγραφή δυναμικής απόκρισης του επιστηλίου

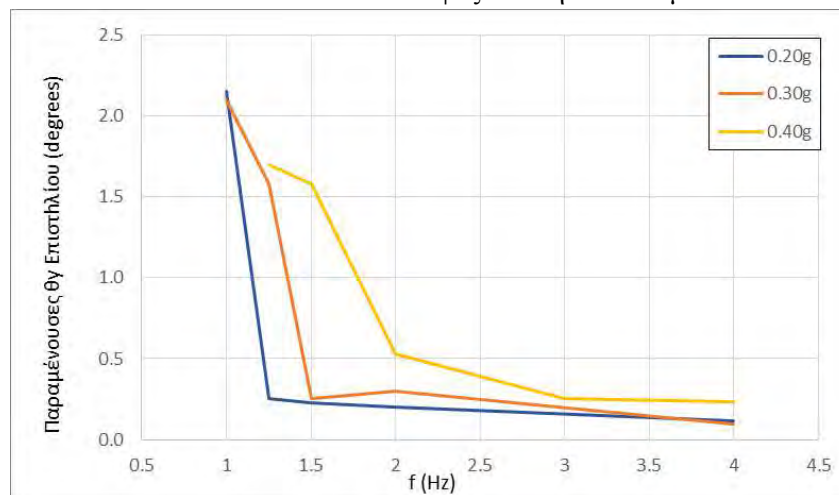
Προκειμένου να μελετηθεί η απόκριση του επιστηλίου στην παρούσα εργασία, έγινε εξαγωγή των αποτελεσμάτων των παραμενουσών γωνιών στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y , αλλά και των παραμενουσών ολισθήσεων του (κατά απόλυτη τιμή) κατά τις διευθύνσεις x και z , σε σχέση με τα κιονόκρανα. Συγκεκριμένα, στους Πίνακες 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται τα μεγέθη αυτά για όλες τις εδαφικές διεγέρσεις που μελετήθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.48 το διάγραμμα των παραμενουσών γωνιών στροφής θ_y του επιστηλίου, ενώ στα Σχήματα 5.49 και 5.50 παρουσιάζονται οι παραμένουσες ολισθήσεις του επιστηλίου ως προς τα υποκείμενα κιονόκρανα των δύο σπονδυλωτών κίωνων.

Πίνακας 5.1. Παραμένουσες τιμές ολισθήσεων και γωνιών στροφής θ_y του επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g

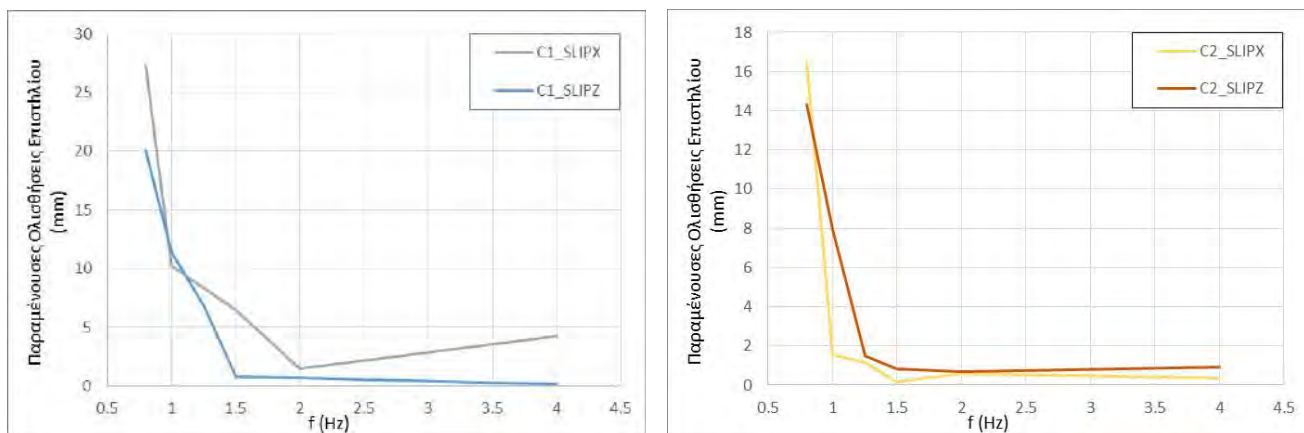
Παραμένουσες		0.20g					
f (Hz)		0.8	1	1.25	1.5	2	4
θ_y (degrees)		0.012	2.153	0.255	0.2265	0.198	0.117
SLIP X (mm)	C1	27.39	10.216	8.336	6.436	1.507	4.241
	C2	16.498	1.562	1.142	0.167	0.585	0.341
SLIP Z (mm)	C1	20.124	11.39	6.833	0.778	0.707	0.144
	C2	14.325	7.936	1.515	0.809	0.698	0.944

Πίνακας 5.2. Παραμένουσες τιμές ολισθήσεων και γωνιών στροφής θ_y του επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g

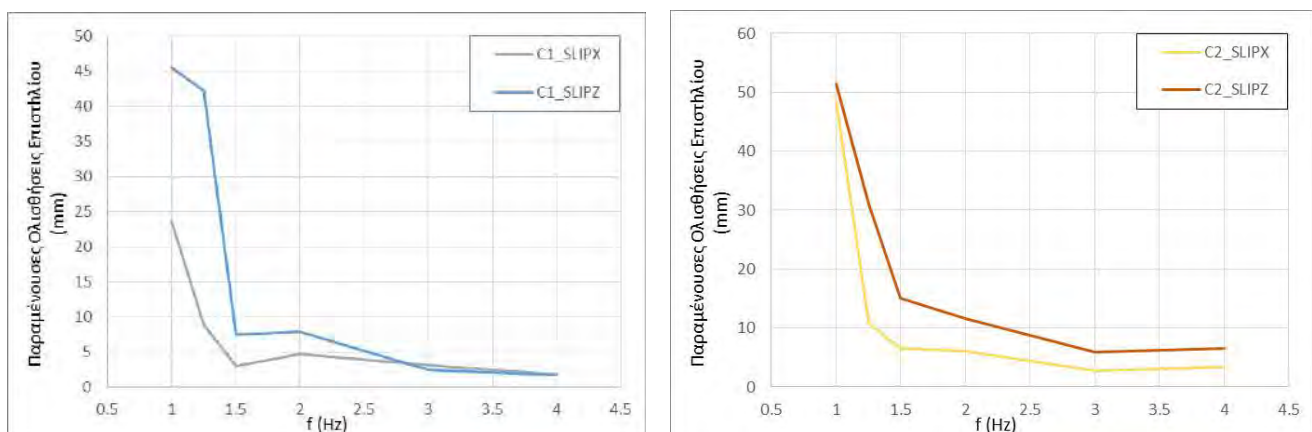
Παραμένουσες		0.40g					
f (Hz)		1	1.25	1.5	2	3	4
θ_y (degrees)		1.101	1.7	1.581	0.531	0.25	0.231
SLIP X (mm)	C1	23.679	8.957	3.027	4.663	3.181	1.863
	C2	48.4	10.87	6.579	6.012	2.703	3.368
SLIP Z (mm)	C1	45.451	42.229	7.511	7.833	2.539	1.734
	C2	51.321	31.006	15.025	11.638	5.847	6.551



Σχήμα 5.48. Διάγραμμα παραμενουσών γωνιών επιστηλίου θγ για όλες τις εδαφικές επιταχύνσεις



Σχήμα 5.49. Διαγράμματα παραμενουσών ολισθήσεων επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 5.50. Διαγράμματα παραμενουσών ολισθήσεων επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Σύγκριση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος
σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο για διαφορετικές τιμές ύψους
επιστηλίου6.1 Περιγραφή της δυναμικής απόκρισης του συστήματος για διαφορετικές τιμές
ύψους επιστηλίου

Παρακάτω στους Πίνακες 6.1 έως 6.3 παρουσιάζονται τα είδη της δυναμικής απόκρισης για όλους τους συνδυασμούς εδαφικών επιταχύνσεων και συχνοτήτων που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας καθώς και για όλα τα ύψη επιστηλίου. Αναλυτικότερα οι Πίνακες 6.1 και 6.2 αναφέρονται στις εδαφικές διεγέρσεις για ύψος επιστηλίου 0.4 m και 0.8 m αντίστοιχα, ενώ ο Πίνακας 6.3 αναφέρεται στις εδαφικές διεγέρσεις για ύψος επιστηλίου 0.335 m, που είχε ήδη μελετηθεί (Κοζανίτης, 2022).

Πίνακας 6.1. Περιγραφή αναλύσεων συστήματος σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο ύψους 0.4 m

		Συχνότητες διέγερσης (Hz)		
		Ανατροπή	Ολίσθηση με λικνισμό	Ολίσθηση
Εδαφική επιτάχυνση $a_g(m/s^2)$	0.20g	0.5 Hz, 0.8 Hz	1 Hz, 1.25 Hz, 1.5 Hz	2 Hz, 4 Hz
	0.30g	0.5 Hz, 0.8 Hz, 1 Hz	1.25 Hz, 1.5 Hz	2 Hz, 4 Hz
	0.40g	0.5 Hz, 0.8 Hz, 1 Hz, 1.25 Hz, 1.5 Hz	2 Hz, 3 Hz	4 Hz

Πίνακας 6.2. Περιγραφή αναλύσεων συστήματος σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο ύψους 0.8 m

		Συχνότητες διέγερσης (Hz)		
		Ανατροπή	Ολίσθηση με λικνισμό	Ολίσθηση
Εδαφική επιτάχυνση $a_g(m/s^2)$	0.20g	0.5 Hz	0,8 Hz, 1 Hz, 1.25 Hz, 1.5 Hz, 2 Hz	4 Hz
	0.30g	0.5 Hz, 0.8 Hz	1 Hz, 1.25 Hz, 1.5 Hz, 2 Hz	4 Hz
	0.40g	0.5 Hz, 0.8 Hz	1 Hz, 1.25 Hz, 1.5 Hz, 2 Hz	3 Hz, 4 Hz

Πίνακας 6.3. Περιγραφή αναλύσεων συστήματος σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο ύψους 0.335m (Kozanitis, 2022)

Ύψος επιστηλίου = 0.335 m				
		Συχνότητες διέγερσης (Hz)		
		Ανατροπή	Ολίσθηση με λικνισμό	Ολίσθηση
Εδαφική επιτάχυνση $a_g(m/s^2)$	0.20g	0.5 Hz	0.8 Hz, 1 Hz	1.5 Hz, 2 Hz, 4 Hz
	0.40g	0.5 Hz, 0.8 Hz, 1 Hz, 1.25 Hz	1.5 Hz	2 Hz, 4 Hz

6.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος για διαφορετικές τιμές ύψους επιστηλίου κατά την ανατροπή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα ανατροπής του συστήματος των σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο για όλες τις τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων που μελετήθηκαν και για τιμές ύψους του επιστηλίου 0.335 m, 0.4 m και 0.8 m. Από τους Πίνακες 6.1 έως 6.3 γίνεται φανερό ότι αύξηση του ύψους του επιστηλίου οδηγεί σε σημαντική μείωση του εύρους των συχνοτήτων στις οποίες επέρχεται κατάρρευση του συστήματος των δύο κίωνων με επιστήλιο.

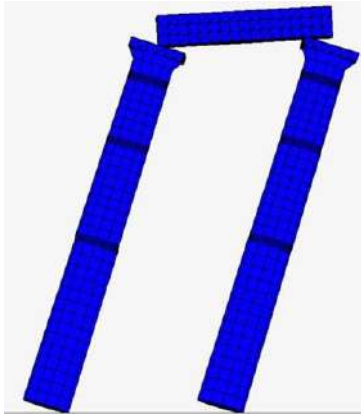
Παρακάτω στο Σχήμα 6.1 δίνονται τα στιγμιότυπα του συστήματος για τρία διαφορετικά ύψη επιστηλίου λίγο πριν την κατάρρευση για εδαφική επιτάχυνση $a_g = 0.20g$. Για ύψος επιστηλίου ίσο με 0.335 m, η κατάρρευση επέρχεται για συχνότητες $f \leq 0.5$ Hz, για ύψος επιστηλίου ίσο με 0.4 m, η κατάρρευση επέρχεται για συχνότητες $f \leq 0.8$ Hz εξαιτίας της ανάπτυξης μεγάλων εντός και εκτός επιπέδου γωνιών λικνισμού των σπονδύλων, ενώ για το σύστημα με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.8 m, κατάρρευση επέρχεται για $f \leq 0.5$ Hz εξαιτίας της έντονης λικνιστικής απόκρισης των σπονδύλων και σε αυτή την περίπτωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις τρεις περιπτώσεις, καταγράφεται έντονη στροφή του κιονόκρανου περί τον κατακόρυφο άξονα.

Στη συνέχεια στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα του συστήματος για ύψος επιστηλίου 0.4 m και 0.8 m. Αξιοσημείωτο είναι ότι στην περίπτωση επιστηλίου με ύψος 0.8 m, το σύστημα κατέρρευσε για συχνότητες $f \leq 0.8$ Hz, ενώ για ύψος επιστηλίου ίσο με 0.4 m, το σύστημα κατέρρευσε σε συχνότητες $f \leq 1$ Hz. Η κατάρρευση του συστήματος με επιστήλιο ύψους 0.4 m είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης έντονων εκτός επιπέδου γωνιών λικνισμού των σπονδύλων και της ταυτόχρονης στροφής τους περί τον κατακόρυφο άξονα (κυρίως στο δεξιό κίονα C2), ενώ η κατάρρευση του συστήματος με επιστήλιο ύψους 0.8 m είναι αποτέλεσμα της έντονης εντός επιπέδου λικνιστικής απόκρισής του κατά την οποία οι κίονες ακολουθούν μία μονολιθική συμπεριφορά.

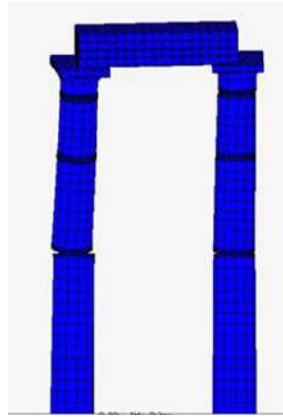
Ακόμη, στο Σχήμα 6.3 δίνονται τα ίδια στιγμιότυπα για εδαφική επιτάχυνση $a_g = 0.40g$. Και σε αυτή την περίπτωση κατάρρευση επέρχεται λόγω έντονης λικνιστικής συμπεριφοράς των σπονδύλων με ταυτόχρονη στροφή τους περί τον κατακόρυφο άξονα. Όπως ήταν αναμενόμενο δεν παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις στο εύρος των εδαφικών συχνοτήτων στις οποίες επέρχεται κατάρρευση του συστήματος όταν το ύψος του επιστηλίου μεταβάλλεται λίγο (0.335 m και 0.4 m). Αντίθετα, στην περίπτωση του συστήματος με ύψος επιστηλίου 0.8 m το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες επέρχεται κατάρρευση περιορίζεται αρκετά ($f \leq 0.8$ Hz) επιβεβαιώνοντας

και σε αυτήν την περίπτωση την ευεργετική επίδραση του ύψους του επιστηλίου στην ευστάθεια του συστήματος.

Τέλος, μπορεί να γίνει κατανοητό από το Σχήμα 6.4 και το Σχήμα 6.5, ποιοι συνδυασμοί εδαφικών επιταχύνσεων και συχνοτήτων είναι κρίσιμοι και οδηγούν στην κατάρρευση του συστήματος για ύψος επιστηλίου ίσο με 0.4 m και 0.8 m αντίστοιχα.



$H = 0.335 \text{ m}$
 $f = 0.5 \text{ Hz}$
 $t = 2.5 \text{ sec}$

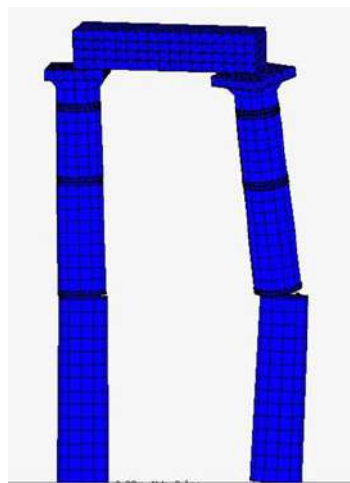


$H = 0.4 \text{ m}$
 $f = 0.8 \text{ Hz}$
 $t = 5.2 \text{ sec}$

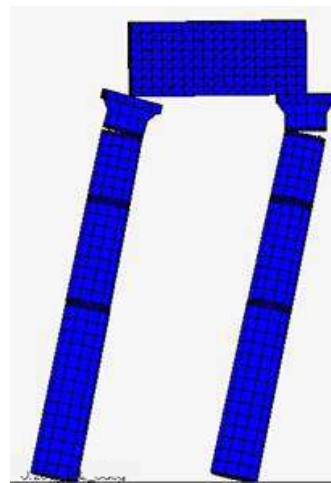


$H = 0.8 \text{ m}$
 $f = 0.5 \text{ Hz}$
 $t = 6 \text{ sec}$

Σχήμα 6.1. Στιγμιότυπα κατάρρευσης του συστήματος για διαφορετικά ύψη επιστηλίου και εδαφική επιτάχυνση $a_g = 0.20g$

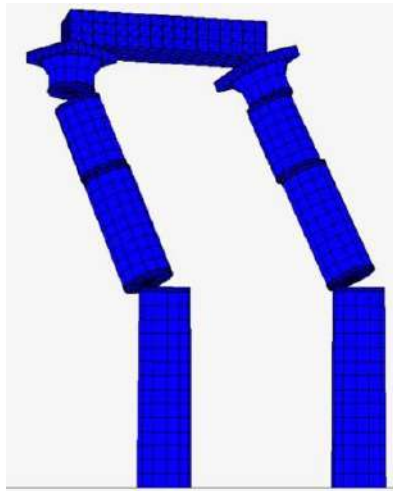


$H = 0.4 \text{ m}$
 $f = 1 \text{ Hz}$
 $t = 4.5 \text{ sec}$



$H = 0.8 \text{ m}$
 $f = 0.8 \text{ Hz}$
 $t = 6 \text{ sec}$

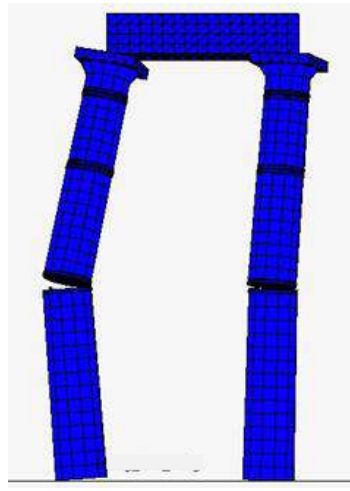
Σχήμα 6.2. Στιγμιότυπα κατάρρευσης του συστήματος για διαφορετικά ύψη επιστηλίου και εδαφική επιτάχυνση $a_g = 0.30g$



H = 0.335 m

f = 1.5 Hz

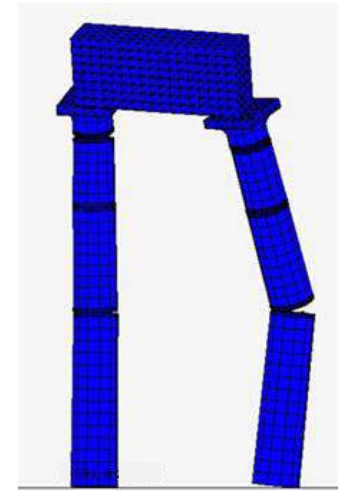
t = 7 sec



H = 0.4 m

f = 1.5 Hz

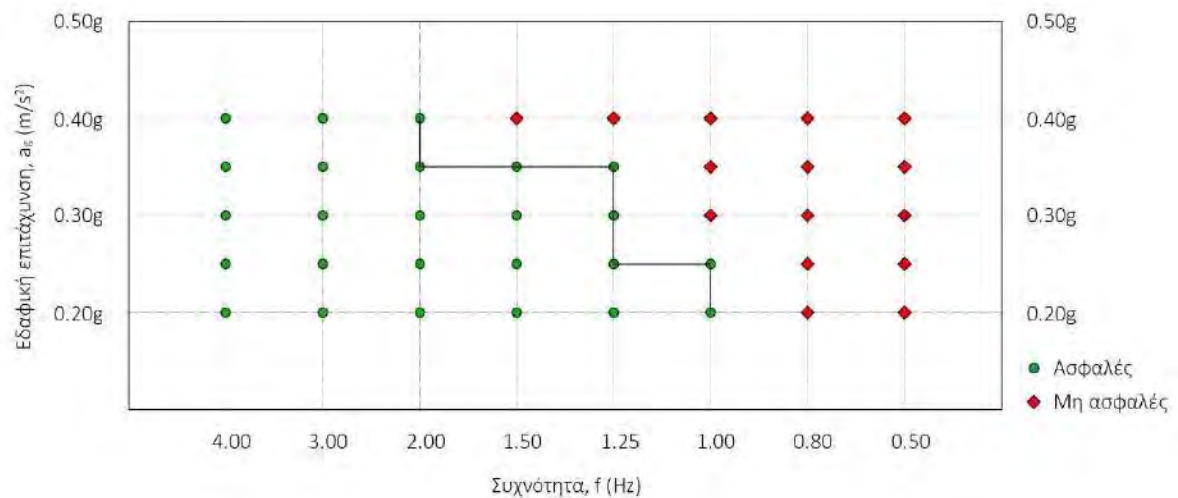
t = 3.5 sec



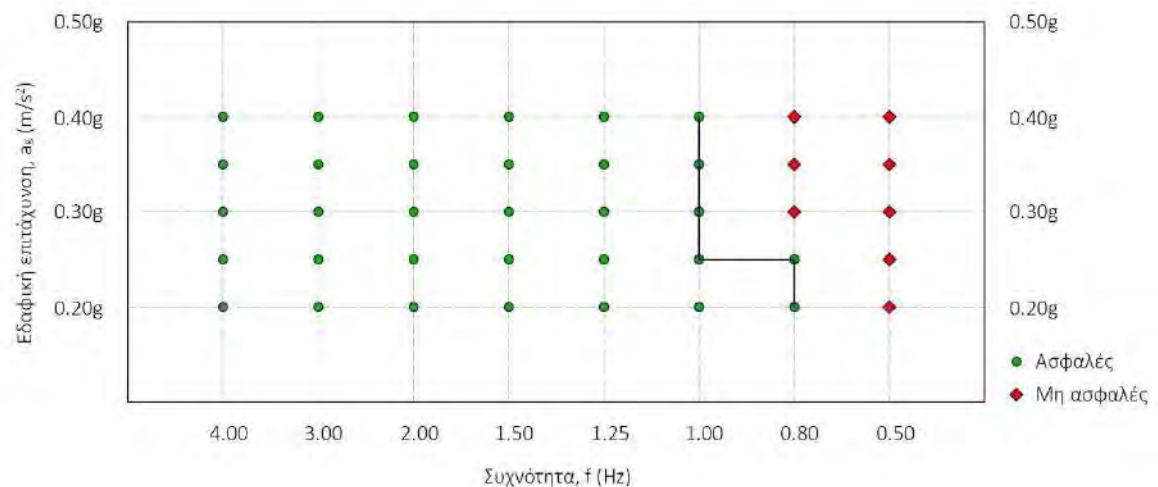
H = 0.8 m

f = 0.8 Hz

t = 5.25 sec

Σχήμα 6.3. Στιγμιότυπα κατάρρευσης του συστήματος για διαφορετικά ύψη επιστηλίου και εδαφική επιτάχυνση $a_g = 0.40g$ 

Σχήμα 6.4. Απεικόνιση ασφαλών και μη συνδυασμών εδαφικών διεγέρσεων συστήματος με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.4 m



Σχήμα 6.5. Απεικόνιση ασφαλών και μη συνδυασμών εδαφικών διεγέρσεων συστήματος με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.8 m

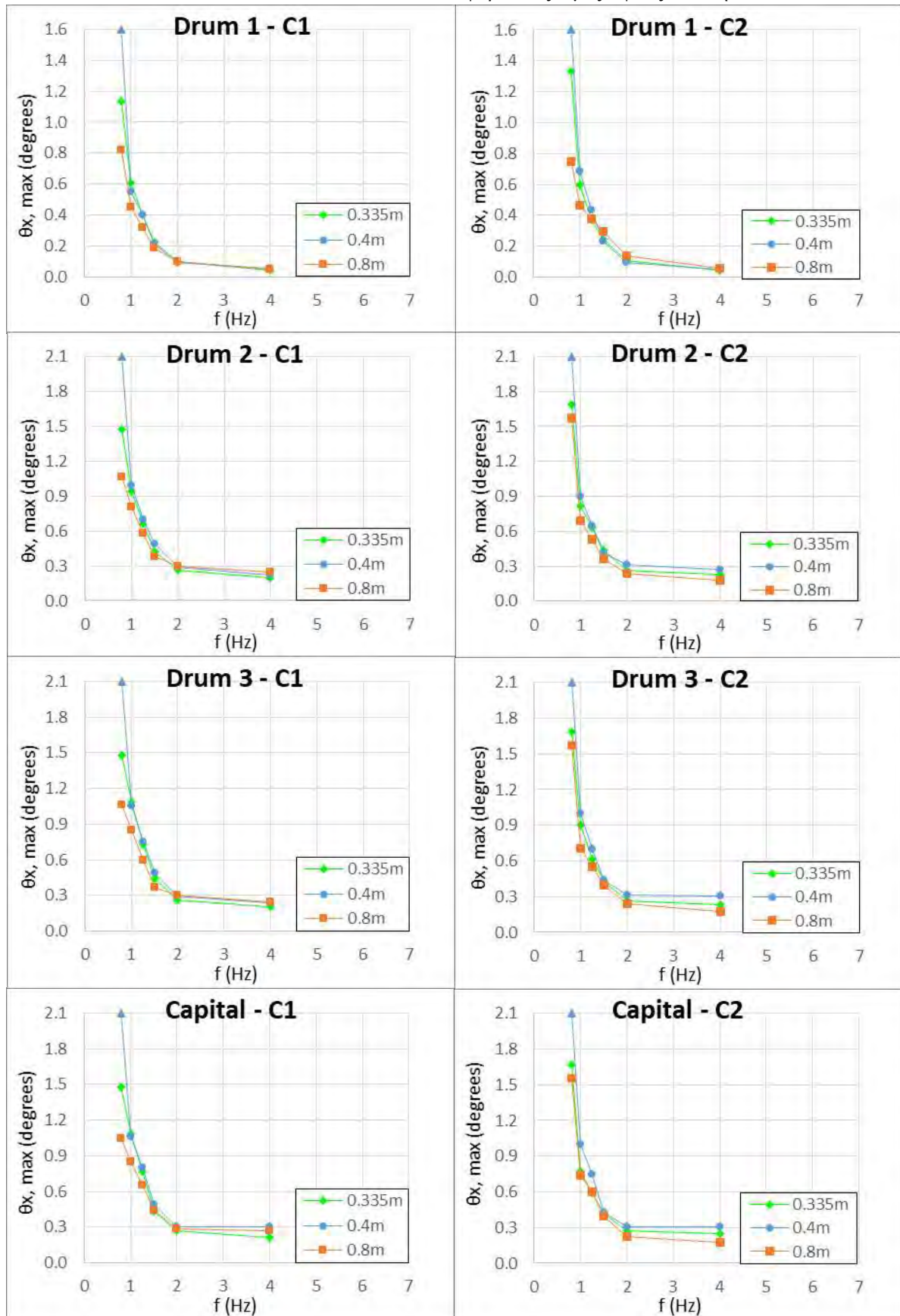
6.3 Γωνίες λικνισμού των σπονδύλων για διαφορετικές τιμές ύψους επιστηλίου

Στα Σχήματα 6.6 έως 6.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των απόλυτων τιμών των μέγιστων τιμών των εντός και εκτός επιπέδου γωνιών λικνισμού των σπονδύλων των κίωνων του πλαισίου με επιστήλιο για τις διεγέρσεις που μελετήθηκαν και κατά τις οποίες δεν κατέρρευσε το σύστημα. Συγκεκριμένα, γίνεται σύγκριση των μεγεθών που αναφέρθηκαν για τις διαφορετικές περιπτώσεις ύψους επιστηλίου που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική ($H = 0.4 \text{ m}$, $H = 0.8 \text{ m}$) και του ύψους επιστηλίου ($H = 0.335 \text{ m}$) που είχε μελετηθεί (Κοζανίτης, 2022).

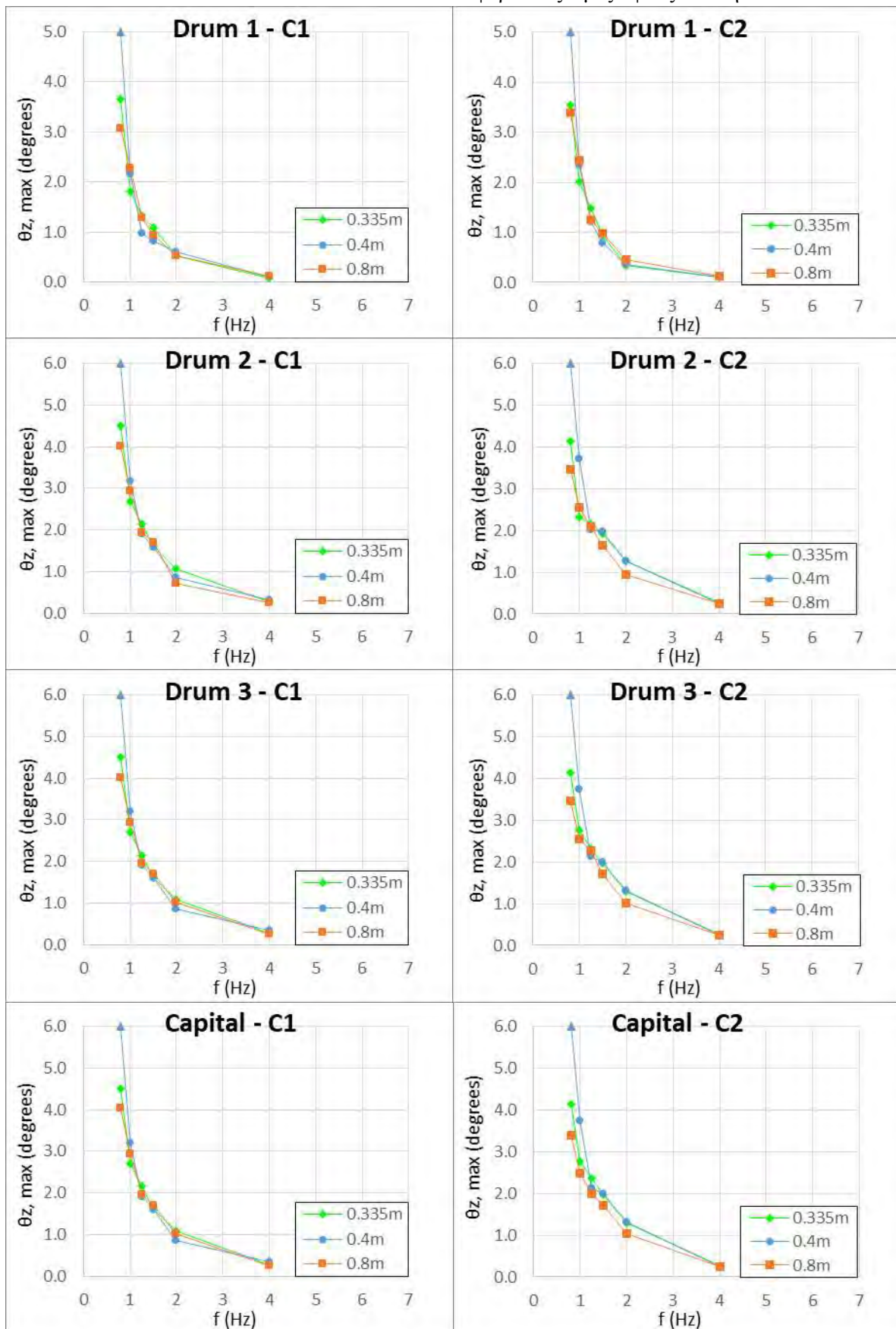
Από τα διαγράμματα αυτά προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα :

- Η εντός επιπέδου λικνιστική απόκριση των σπονδύλων είναι επικρατέστερη και στους δύο κίονες για όλα τα διαφορετικά ύψη επιστηλίου.
- Στις χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις ($0.20g$), η εντός και εκτός επιπέδου λικνιστική απόκριση του συστήματος των δύο σπονδυλωτών κίωνων με επιστήλιο διαφορετικού ύψους δεν παρουσιάζει διαφοροποιήσεις. Μόνο στις πολύ χαμηλές συχνότητες (0.8 Hz) παρατηρούνται μεγαλύτερες γωνίες λικνισμού των σπονδύλων στην περίπτωση που το επιστήλιο έχει μικρό ύψος (0.335 m).
- Σε υψηλότερες εδαφικές επιταχύνσεις ($0.30g$) φαίνεται ότι η εκτός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά των κίωνων δεν επηρεάζεται από το ύψος του επιστηλίου. Αντίθετα, η εντός επιπέδου λικνιστική τους συμπεριφορά επηρεάζεται σημαντικά με τις γωνίες λικνισμού να εμφανίζονται σημαντικά μικρότερες στην περίπτωση που το επιστήλιο έχει ύψος 0.8 m . Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαφορές αυτές στην εντός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά των κίωνων μεγεθύνονται στους ανώτερους σπονδύλους.
- Στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις ($0.40g$), όπου το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες επέρχεται κατάρρευση του συστήματος αυξάνει σημαντικά με τη μείωση του ύψους του επιστηλίου, η εκτός επιπέδου λικνιστική συμπεριφορά των κίωνων στις περιπτώσεις που δεν επέρχεται κατάρρευση εξακολουθεί να μην επηρεάζεται από το ύψος του επιστηλίου. Αντίθετα, και σε αυτήν την περίπτωση διεγέρσεων η εντός επιπέδου λικνιστική απόκριση των κίωνων εμφανίζεται σημαντικά μικρότερη, ιδιαίτερα στους ανώτερους σπονδύλους, στην περίπτωση του συστήματος με μεγάλο ύψος επιστηλίου.

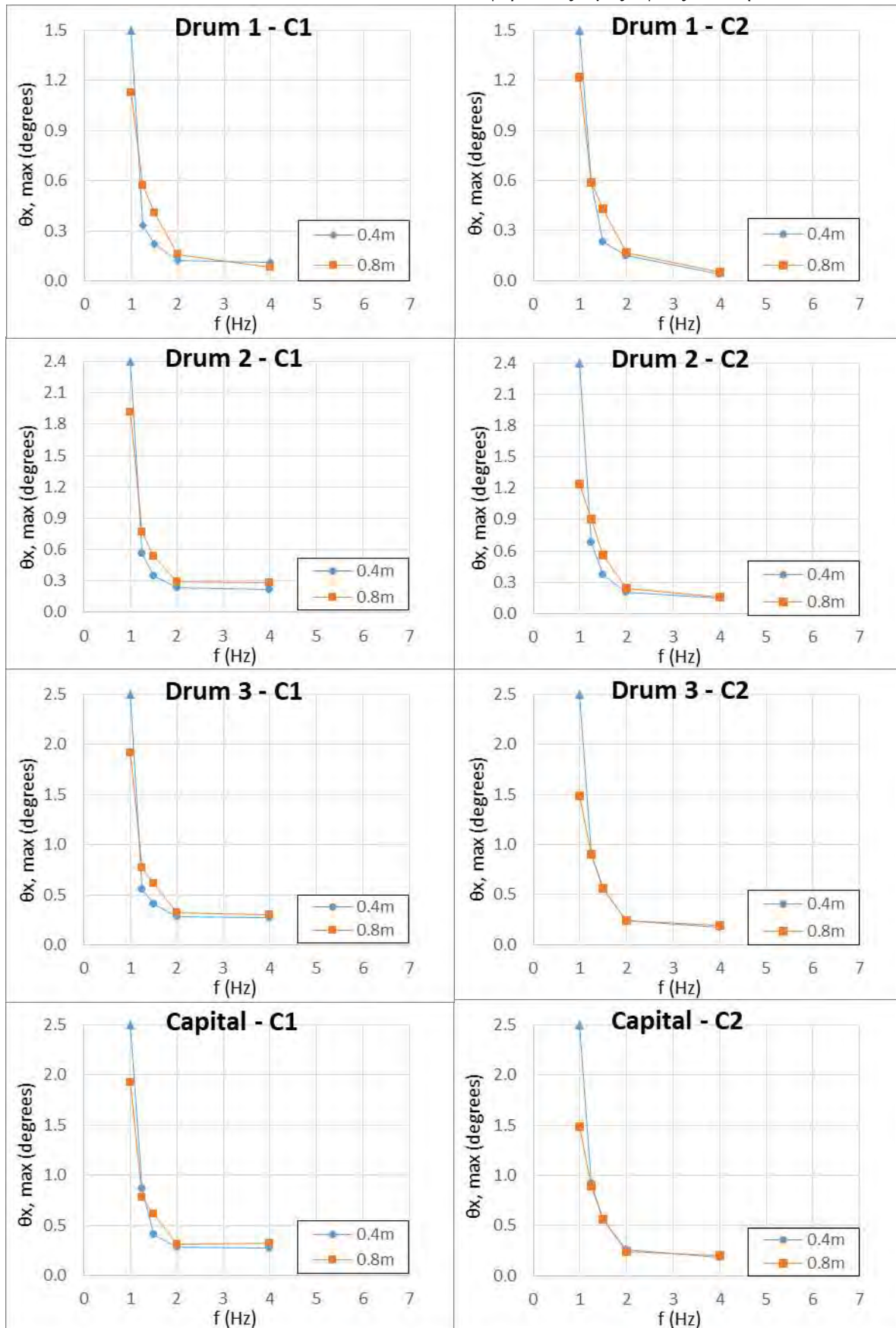
Συνεπώς, στις χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις ($0.20g$) το ύψος του επιστηλίου δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την λικνιστική απόκριση των κίωνων. Στις υψηλότερες εδαφικές επιταχύνσεις ($0.30g$, $0.40g$) το ύψος του επιστηλίου επηρεάζει την εντός επιπέδου λικνιστική απόκριση των ανώτερων σπονδύλων, η οποία εμφανίζεται μειωμένη στην περίπτωση του συστήματος των δύο κίωνων με μεγάλο ύψος επιστηλίου.



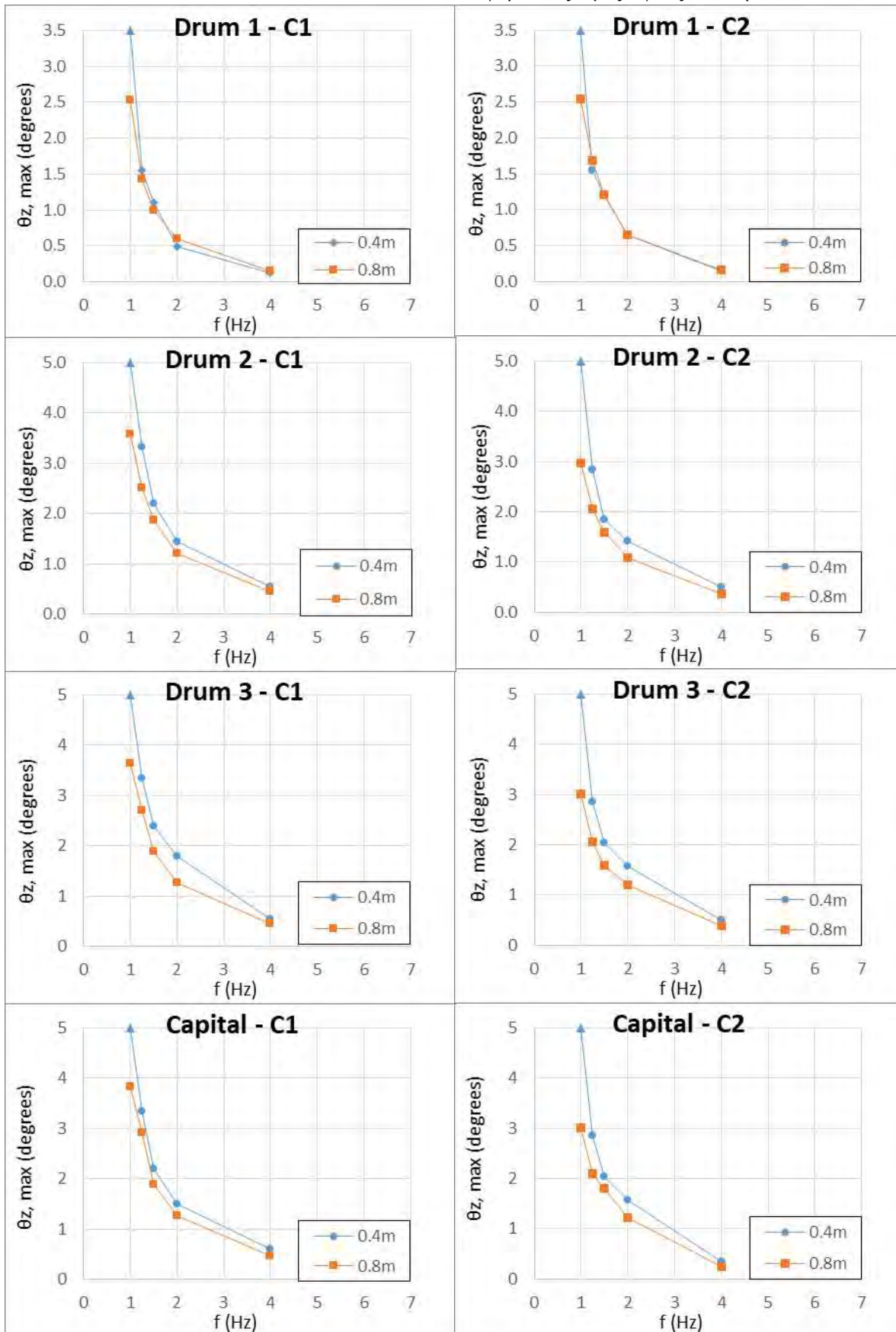
Σχήμα 6.6. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{x, \max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



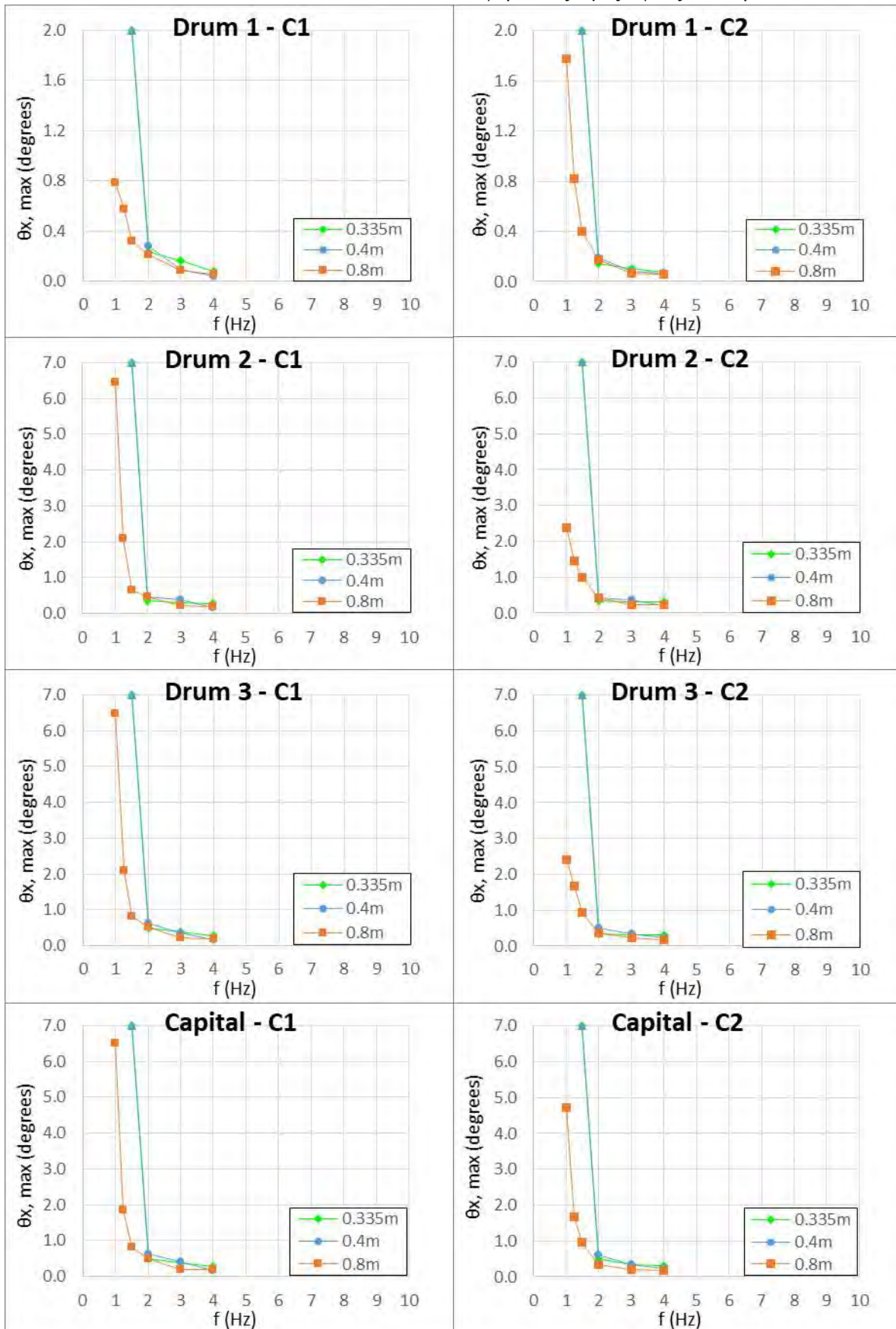
Σχήμα 6.7. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_z, \max$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



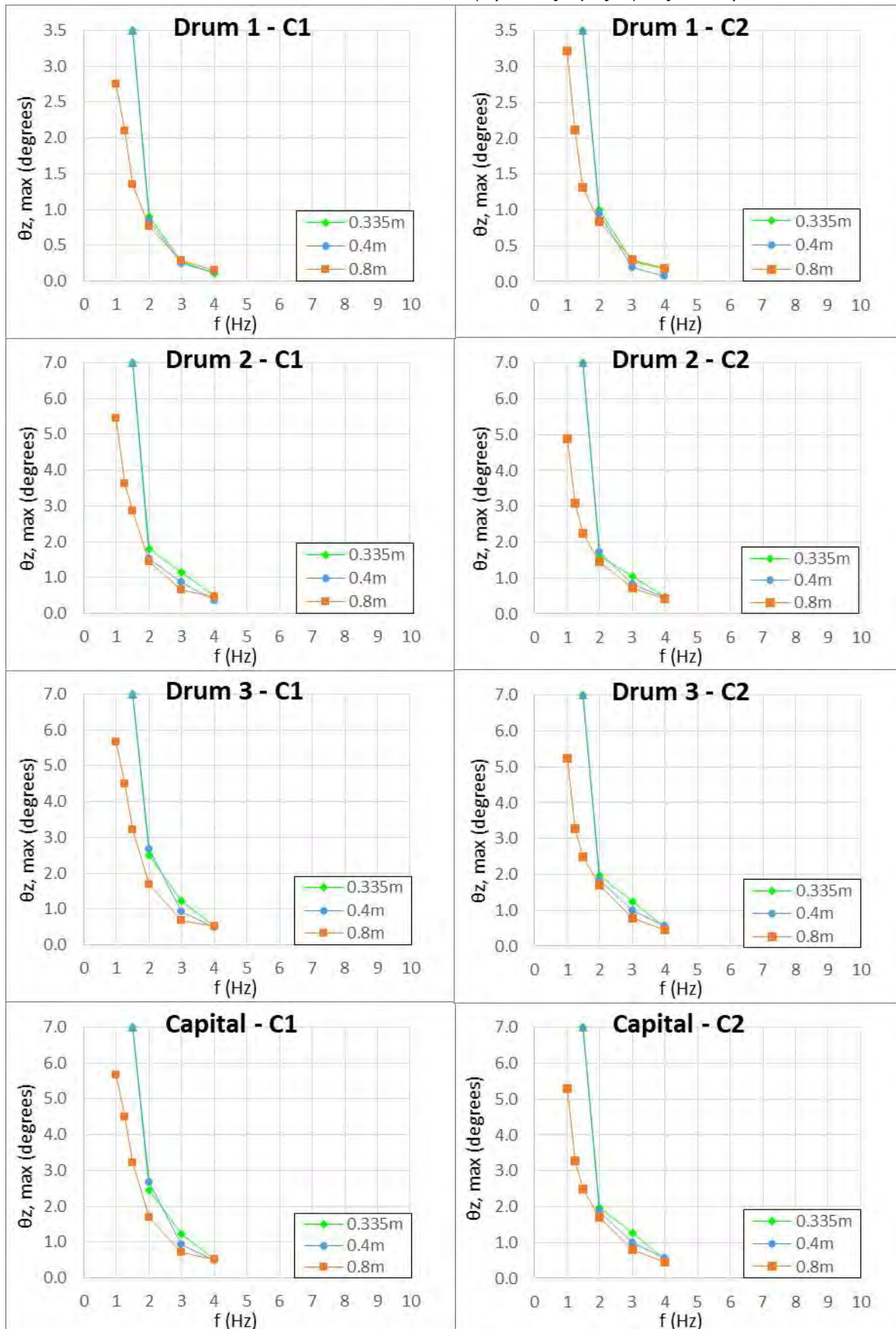
Σχήμα 6.8. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{x,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με $0.30g$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 6.9. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_z, \max$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.30g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 6.10. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{x, \max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 6.11. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_z, \max$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)

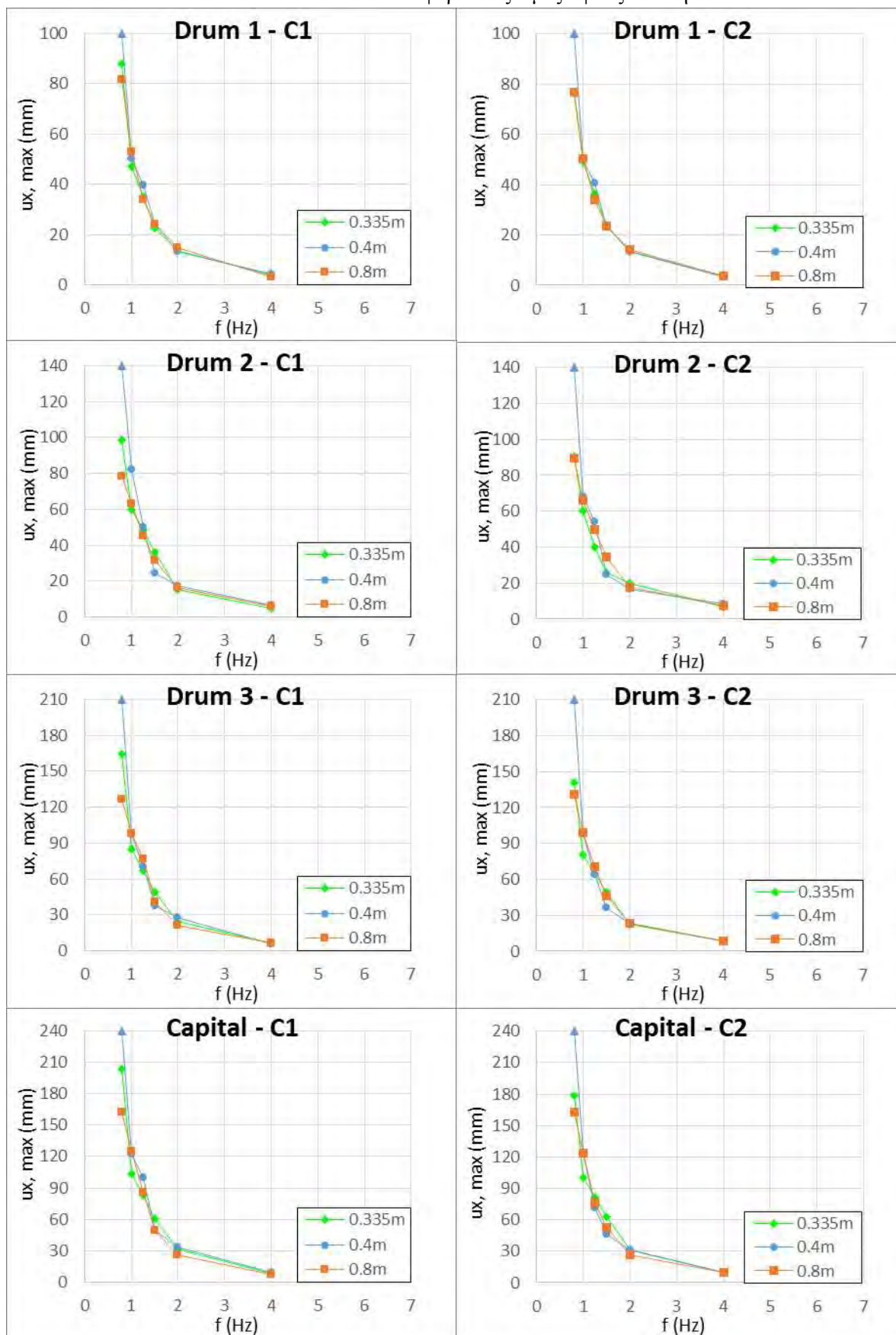
6.4 Μετατοπίσεις των σπονδύλων για διαφορετικές τιμές ύψους επιστηλίου

Στα Σχήματα 6.12 έως 6.17 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μέγιστων τιμών των εντός και εκτός επιπέδου μετατοπίσεων των σπονδύλων των κίωνων του πλαισίου με επιστήλιο για τις διεγέρσεις που μελετήθηκαν και κατά τις οποίες δεν επήλθε κατάρρευση του συστήματος. Συγκεκριμένα, γίνεται σύγκριση των μέγιστων τιμών των μετατοπίσεων που καταγράφονται στο κέντρο βάρους του κάθε σπονδύλου, για όλες τις περιπτώσεις ύψους του επιστηλίου που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική καθώς και για την περίπτωση που είχε ήδη μελετηθεί (Κοζανίτης, 2022).

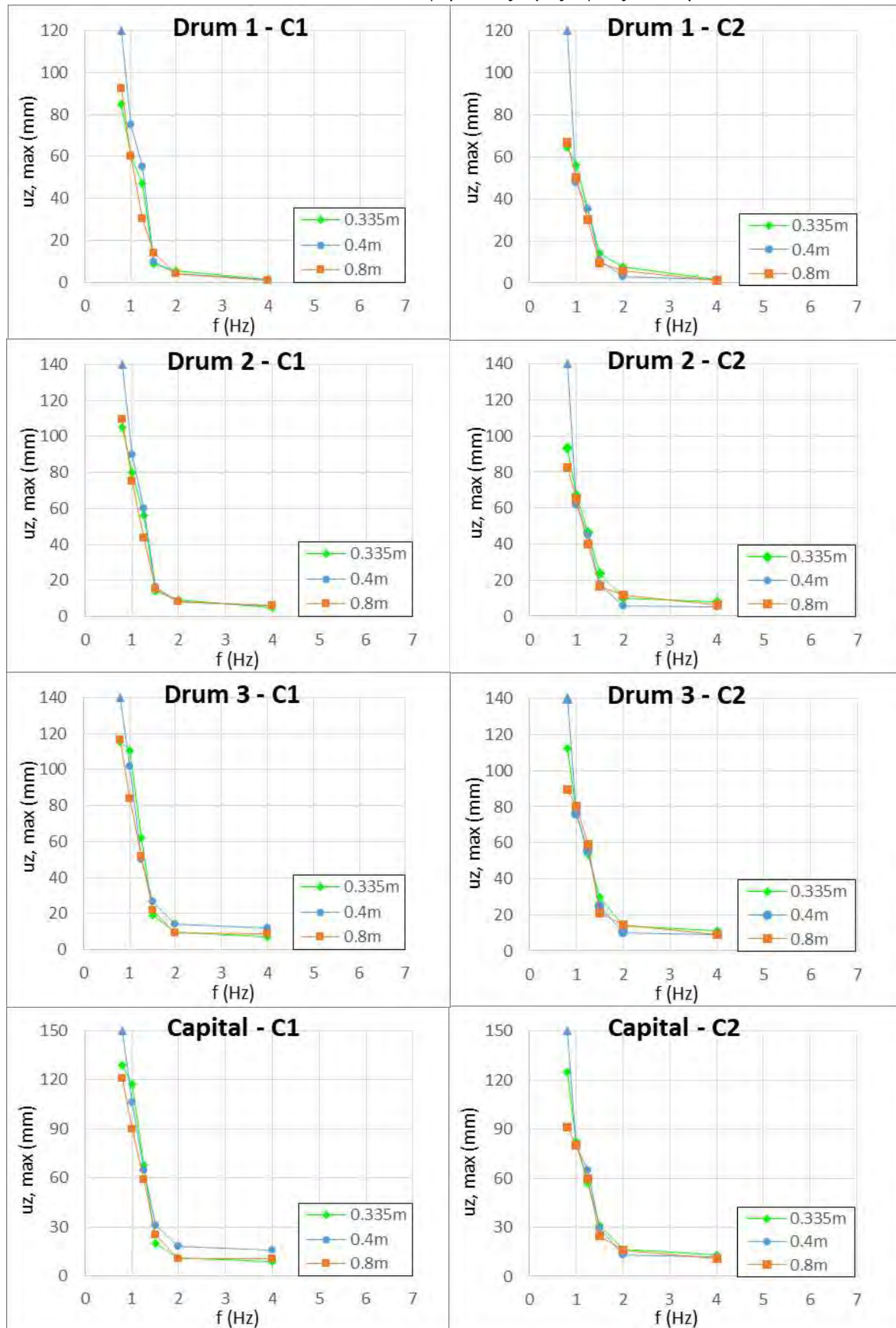
Από τη μελέτη των διαγραμμάτων αυτά προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα :

- Κατά την κατεύθυνση x παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές μετατοπίσεων των σπονδύλων από ότι κατά την κατεύθυνση z ανεξάρτητα από την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης και του ύψους του επιστηλίου.
- Στις χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις (0.20g), οι μετατοπίσεις των σπονδύλων κατά την κατεύθυνση x δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις. Αντίθετα, κατά την κατεύθυνση z , στις χαμηλές κυρίως συχνότητες (0.8 Hz, 1 Hz, 1.25 Hz), καταγράφονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις στις περιπτώσεις που το επιστήλιο έχει μικρό ύψος.
- Σε υψηλότερες εδαφικές επιταχύνσεις (0.30g) φαίνεται ότι η αύξηση του ύψους του επιστηλίου οδηγεί σε σημαντικά μικρότερες μετακινήσεις των σπονδύλων ιδιαίτερα στις μεσαίες συχνότητες ($1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 4 \text{ Hz}$).
- Στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις (0.40g) και στις μεσαίες συχνότητες ($1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 4 \text{ Hz}$) οι μετακινήσεις u_x των ανώτερων σπονδύλων (Drum 3, Capital) εμφανίζονται σημαντικά μικρότερες στο σύστημα των κίωνων με επιστήλιο μεγάλου ύψους. Τέλος, και οι εκτός επιπέδου μετατοπίσεις u_z εμφανίζονται μικρότερες στους ανώτερους σπονδύλους, στην περίπτωση επιστηλίου με μεγάλο ύψος.

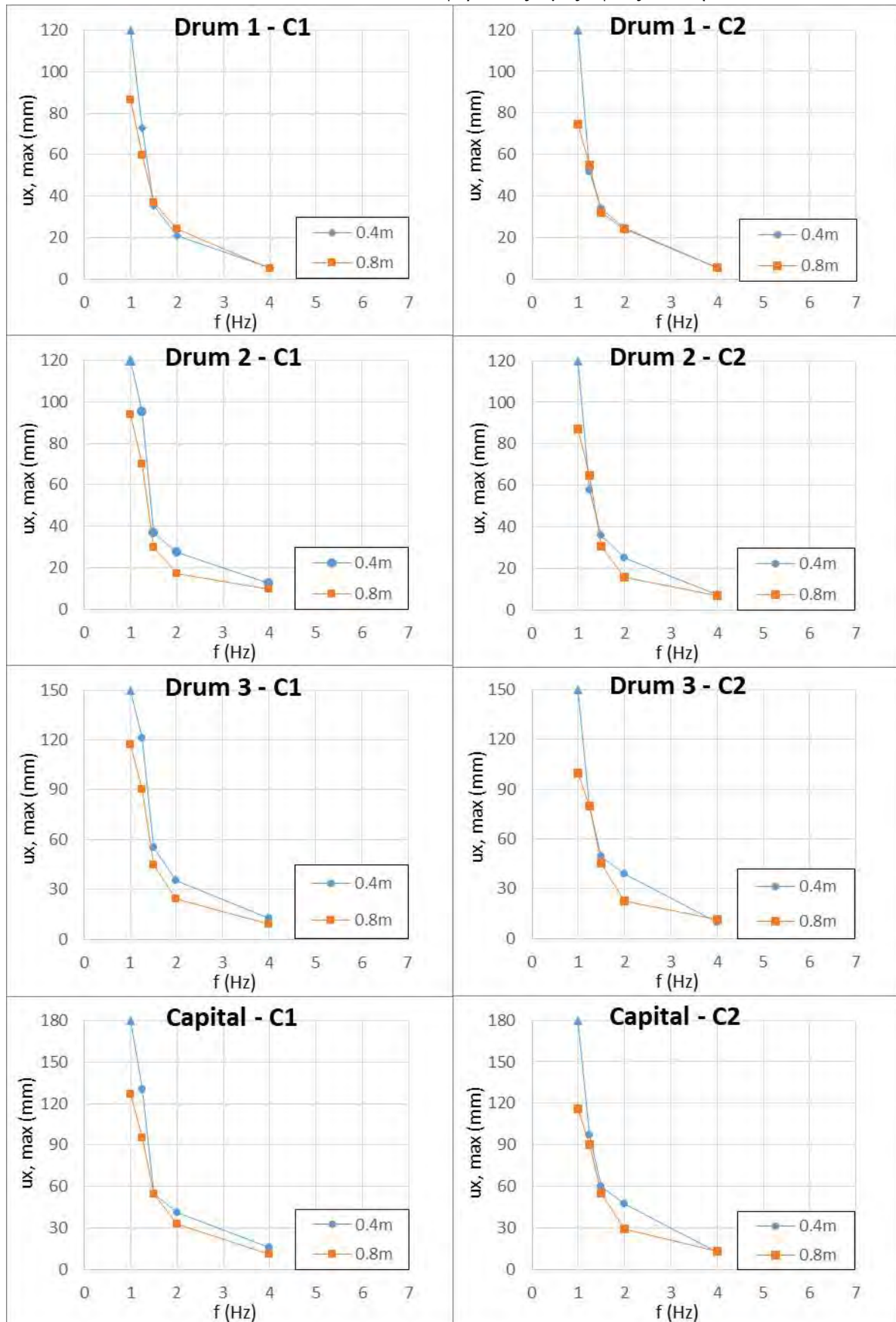
Άρα, στις χαμηλές εδαφικές επιταχύνσεις (0.20g) το ύψος του επιστηλίου δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τις εντός και εκτός επιπέδου μετακινήσεις των σπονδύλων. Στις υψηλότερες εδαφικές επιταχύνσεις (0.30g) και στις μεσαίες συχνότητες ($1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 4 \text{ Hz}$) οι εντός επιπέδου μετακινήσεις u_x των ανώτερων σπονδύλων είναι σημαντικά μικρότερες στην περίπτωση που το επιστήλιο έχει ύψος $H = 0.8 \text{ m}$. Τέλος, στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις (0.40g) και στο ίδιο εύρος συχνοτήτων, τόσο οι εντός όσο και οι εκτός επιπέδου μετακινήσεις των σπονδύλων μειώνονται σημαντικά με την αύξηση του ύψους του επιστηλίου.



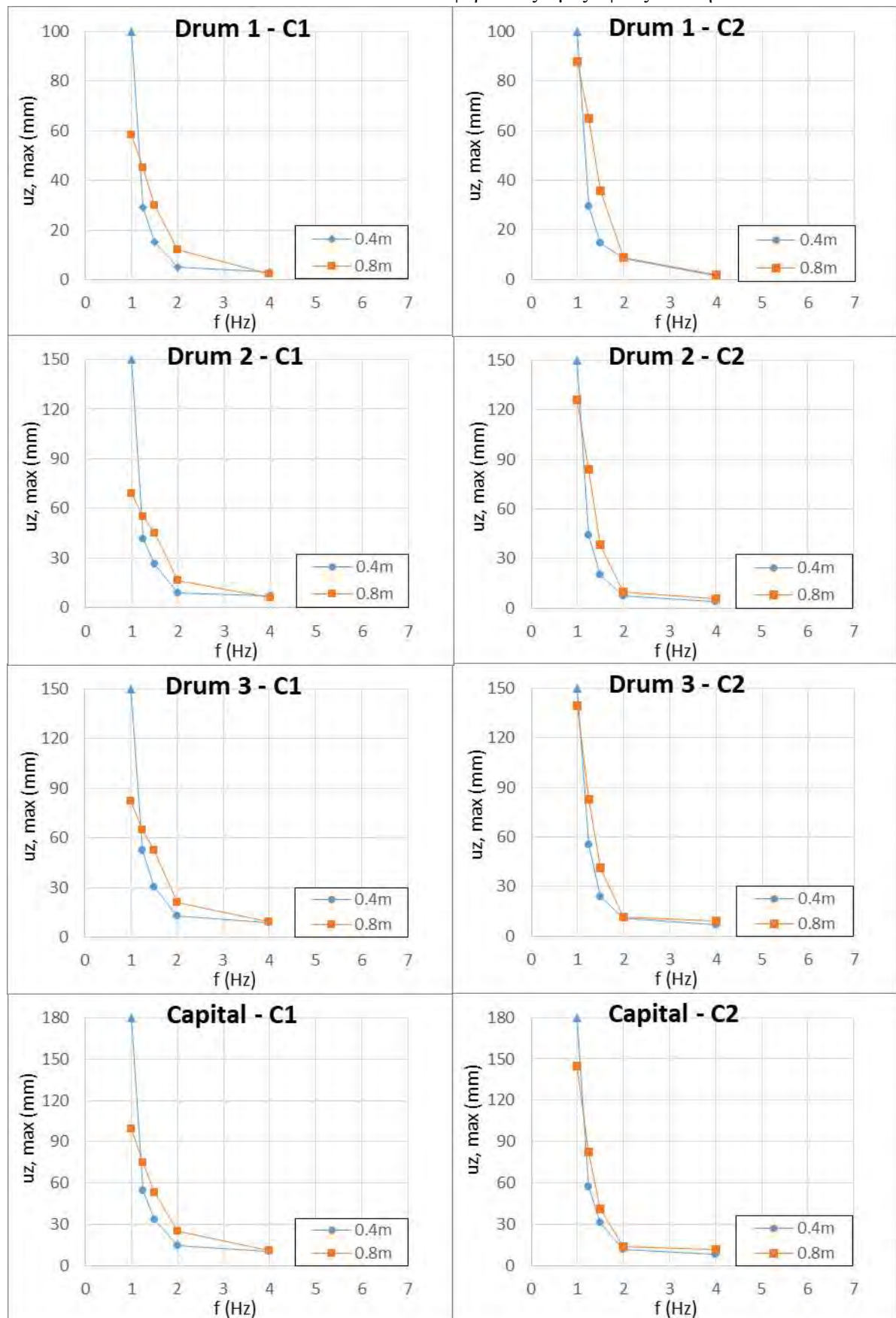
Σχήμα 6.12. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{x, \max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



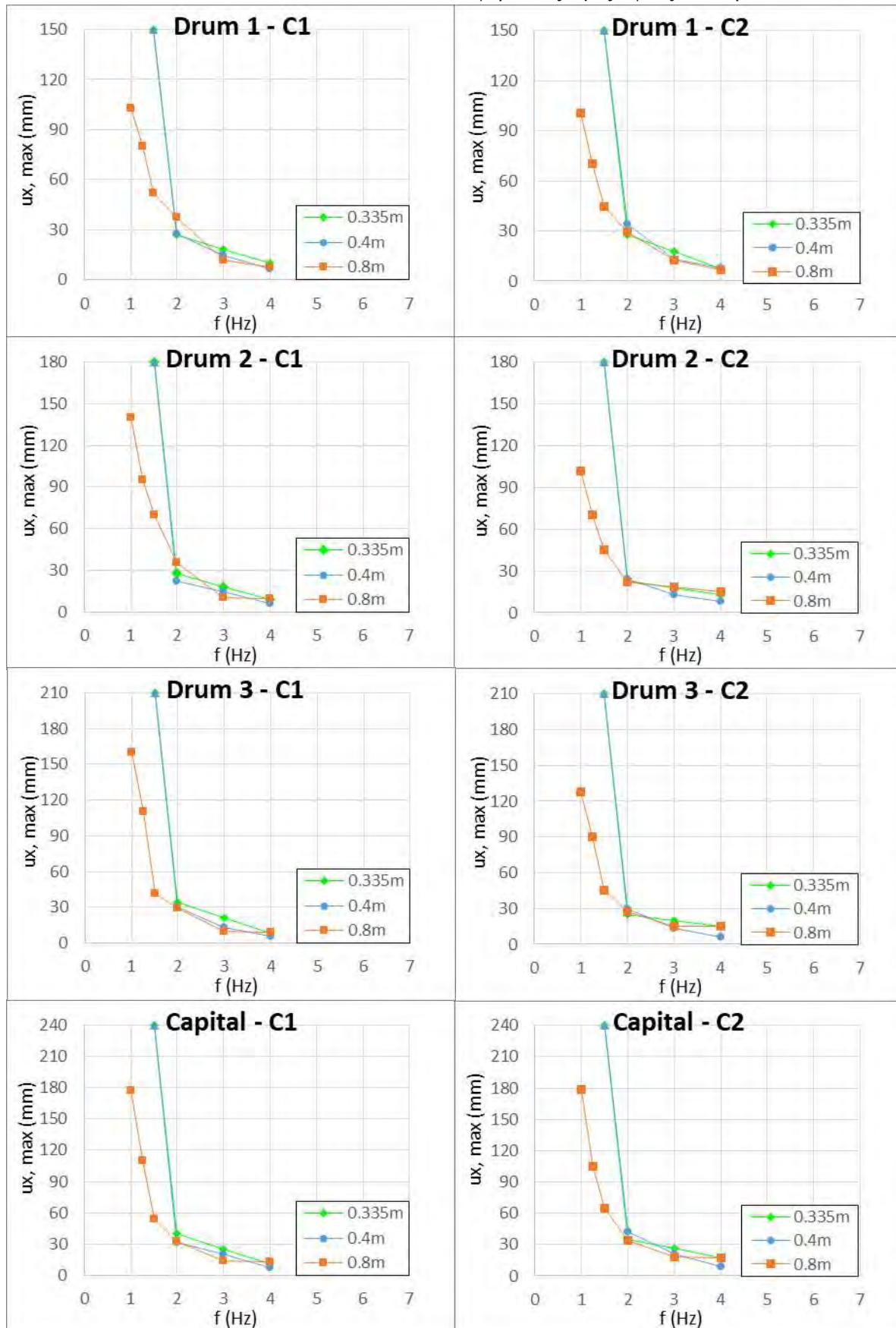
Σχήμα 6.13. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_z, \max$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



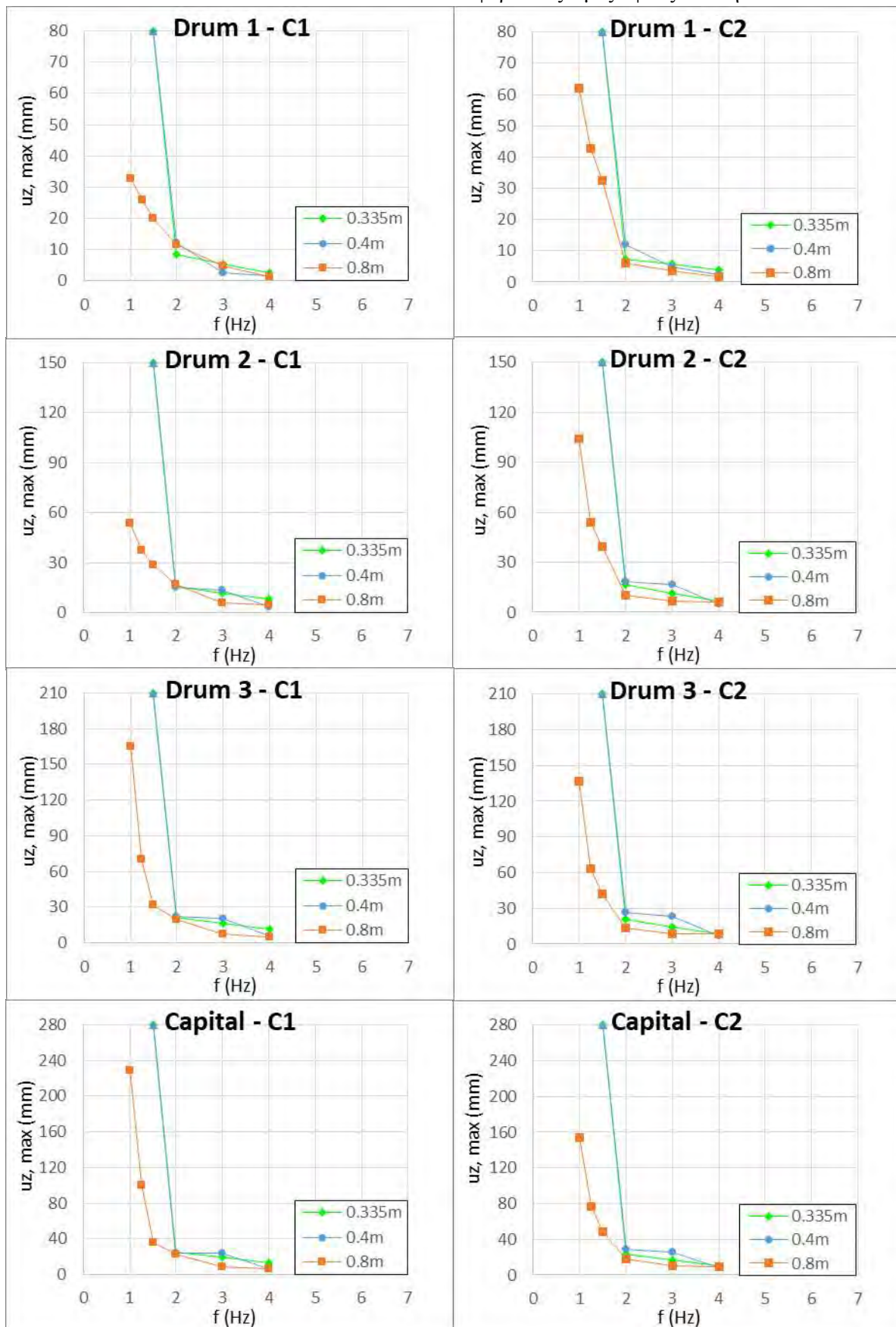
Σχήμα 6.14. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{x,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με $0.30g$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 6.15. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_z, \max$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.30g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 6.16. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{x, \max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)



Σχήμα 6.17. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_z, \max$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με $0.40g$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επιρροής του ύψους του επιστηλίου στη δυναμική απόκριση σπονδυλωτών πλαισίων με επιστήλιο και μεταλλικούς πείρους ως σύστημα σύνδεσης μεταξύ των σπονδύλων. Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις για ύψος επιστηλίου 0.4 m και 0.8 m, έγινε σύγκριση με ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα για ύψος επιστηλίου 0.335 m (Κοζανίτης, 2022) και προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα :

Σχετικά με την απόκριση του συστήματος ανεξάρτητα από το ύψος του επιστηλίου :

- Στις περιπτώσεις που παρατηρείται κατάρρευση του συστήματος, κύρια αιτία είναι η έντονη λικνιστική συμπεριφορά των σπονδύλων και η ανάπτυξη γωνιών στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y, κυρίως των ανώτερων σπονδύλων και του κιονόκρανου.
- Με την αύξηση της εδαφικής επιτάχυνσης αυξάνεται το εύρος των συχνοτήτων που οδηγούν σε κατάρρευση του συστήματος.
- Σε κάθε περίπτωση εδαφικής διέγερσης, με την αύξηση της συχνότητας παρατηρείται μείωση των γωνιών λικνισμού των σπονδύλων, των γωνιών στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα y, αλλά και των ολισθήσεων των σπονδύλων.
- Η ύπαρξη του επιστηλίου μειώνει αισθητά την εκτός επιπέδου λικνιστική απόκριση των κιόνων, ακόμα και στις χαμηλές συχνότητες.
- Η παρουσία του επιστηλίου οδηγεί σε μικρές εκτός επιπέδου μετακινήσεις με κυρίαρχες τις εντός επιπέδου μετακινήσεις, σε όλες τις περιπτώσεις των εδαφικών διεγέρσεων στις οποίες δεν παρατηρείται κατάρρευση του συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι σε αυτή τη συμπεριφορά συμβάλλει και η ύπαρξη των μεταλλικών γόμφων.

Σχετικά με το ρόλο του ύψους του επιστηλίου του συστήματος :

- Όσο αυξάνεται το ύψος του επιστηλίου τόσο μειώνεται το εύρος των εδαφικών διεγέρσεων κατά τις οποίες επέρχεται κατάρρευση του συστήματος. Η μείωση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στις υψηλότερες εδαφικές επιταχύνσεις (0.40 g).
- Αύξηση του ύψους του επιστηλίου οδηγεί σε μείωση της λικνιστικής απόκρισης των κιόνων, ιδιαίτερα των ανώτερων σπονδύλων τους και του κιονόκρανου.
- Επίσης, αύξηση του ύψους του επιστηλίου οδηγεί σε σημαντική μείωση της εκτός επιπέδου λικνιστικής απόκρισης των κιόνων.
- Σε όλες τις εδαφικές επιταχύνσεις, αύξηση του ύψους του επιστηλίου οδηγεί σε μείωση των εκτός επιπέδου μετακινήσεων ακόμα και στις χαμηλές συχνότητες.
- Συνολικά, οι εντός και εκτός επιπέδου μετατοπίσεις των σπονδύλων μειώνονται με την αύξηση του ύψους του επιστηλίου. Η μείωση αυτή είναι αρκετά μεγάλη στις υψηλές εδαφικές επιταχύνσεις (0.40 g).

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα :

- Μελέτη της απόκρισης του συστήματος σπονδυλωτών κιόνων με επιστήλιο υπό καταγεγραμμένη σεισμική διέγερση.
- Εξέταση της δυναμικής απόκρισης σπονδυλωτών κιόνων με επιστήλιο για διαφορετικές τιμές του συντελεστή τριβής τόσο μεταξύ των σπονδύλων όσο και μεταξύ του κιονόκρανου και του επιστηλίου.
- Σύγκριση της δυναμικής απόκρισης σπονδυλωτών κιόνων με επιστήλιο και μεταλλικούς γόμφους μεταξύ των σπονδύλων με την απόκριση ιδίου συστήματος το οποίο διαθέτει και σύστημα κατακόρυφης σύνδεσης του επιστηλίου με το κιονόκρανο.

Βιβλιογραφικές αναφορές**Ελληνόγλωσση :**

Κοζανίτης, Α., (2022). 3-D Δυναμική απόκριση σπονδυλωτών πλαισίων με επιστήλιο και μεταλλικούς πείρους μεταξύ των σπονδύλων. Η περίπτωση κίωνων του Γυμνασίου της Αρχαίας Μεσσήνης. Volos

Ορλάνδος ΑΚ. (1958). Τα υλικά δομής των Αρχαίων Ελλήνων και οι τρόποι εφαρμογής τους. Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας

Ξενόγλωσση :

Acikgoz, S., Delong, M.J., (2014). The rocking response of large flexible structures to earthquakes. Bulletin of Earthquake Engineering, 12(2), pp. 875–908

Christodoulou, A., Panagouli, O., & Tzaros, K. (2019, September 22-25). The role of the connections in the dynamic response of multidrum classical columns. 12th HSTAM International Congress on Mechanics, p. 11

Drosos, V., Anastasopoulos, I., (2014). Experimental investigation of the seismic response of classical temple columns. Bulletin of Earthquake Engineering, 13(1), pp. 299–310

Housner, G. (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America 53(2), pp. 403-417

Ishiyama, Y. (1982). Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 10 (5), pp. 635-650

Konstantinidis, D., Makris, N., (2005). Seismic response analysis of multi-drum classical columns. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34(10), pp. 1243–1270

Makris, N., (2014a). The role of rotational inertia on the seismic resistance of free-standing rocking columns and articulated frames. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(5), pp. 2226–2239

Makris, N., (2014b). A half century of rocking isolation. Earthquakes and Structures, 7(6), pp. 1187–1221

Makris, N., Kampas, G., (2016). Size versus slenderness: two competing parameters in the seismic stability of free-standing rocking columns. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(1), pp. 104–122

- Makris, N., Vassiliou, M.F., (2012). Sizing the slenderness of free-standing rocking columns to withstand earthquake shaking. *Archive of Applied Mechanics*, 82(10–11), pp. 1497–1511
- Milne J. Seismic experiments. *Transactions of the Seismological Society of Japan* 1885; 8:1–82
- Mouzakis, H.P., Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y., Carydis, P.G., Papantonopoulos, C., Zambas, C., (2002). Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(9), pp. 1681–1698
- Panagouli, O.K., Christodoulou A., (2022). Numerical investigation of the contribution of metallic dowels to the stability of multi-drum columns. *Developments in the Built Environment*, 11
- 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
- Papantonopoulos, C., Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y., Lemos, J.V., Mouzakis, H.P., (2002). Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the district element method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(9), pp. 1699–1717
- Perry, J. (1881) "Note on the rocking of a column" *Trans. Seism Soc. Japan*, 3, 103-106
- Priestley, M., Evison, R., & Carr, A. (1978). Seismic response of structures free to rock on their foundation. *Bulletin of New Zealand Natural Society for Earthquake Engineering* 11(3), pp. 141-150
- Psycharis, I., (2015). Ancient monuments under seismic actions: modelling and analysis. In: Beer, M., Kougiumtzoglou, I.A., Patelli, E., Au, S.K. (Eds.), *Encyclopedia of Earthq. Eng.* Springer, Berlin, Heidelberg
- Psycharis, I.N., (1990). Dynamic behavior of rocking two-block assemblies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(4), pp. 555-575
- Psycharis, I.N., Jennings, P.C., (1983). Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11(1), pp. 57–76
- Psycharis, I.N., Lemos, J.V., Papastamatiou, D.Y., 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), pp. 2063–2084
- Tso, W., & Wong, C. (1989). Steady state rocking response of rigid blocks part1: Analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 18(1), pp. 89-206

Wong, C., & Tso, W. (1989). Steady state rocking response of rigid blocks part2: Experiment. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 18(1), pp. 107-120

Yim CS, Chopra AK, Penzien J. Rocking response of rigid blocks to earthquakes. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1980; 8(6):565–587

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Κατηγοριοποίηση κινήσεων άκαμπτου στερεού σώματος.....	4
Σχήμα 1.2. Γεωμετρία άκαμπτου στύλου υπό ελεύθερο λικνισμό.....	5
Σχήμα 1.3. Λικνιστική απόκριση άκαμπτου στύλου για μία χρονική περίοδο T αμελώντας τις απώλειες ενέργειας.....	7
Σχήμα 1.4. Περίοδος T του λικνιζόμενου σώματος υπό αρχική γωνία θ_0 (Housner, 1963).....	8
Σχήμα 1.5. Περιπτώσεις ταλάντωσης συστήματος δύο άκαμπτων σωμάτων (Psycharis, 1990)....	10
Σχήμα 1.6. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συστήματος δύο άκαμπτων σωμάτων (Psycharis, 1990).10	
Σχήμα 1.7. Σύγκριση ευστάθειας απλού κίονα και πλαισίου κίωνων (Makris, 2014).....	13
Σχήμα 2.1. Στοές του Γυμνασίου γύρω από το Στάδιο στην περιοχή της Αρχαίας Μεσσήνης.....	18
Σχήμα 2.2. Μονολιθικός κίονας.....	18
Σχήμα 2.3. Σπονδυλωτός κίονας.....	19
Σχήμα 2.4. Απεικόνιση γόμφων εντός των εντορμιών.....	20
Σχήμα 2.5. Σύστημα πόλου – εμπόλιου (Καρακίτσος, Κοντέας, 2013).....	20
Σχήμα 2.6. Σπονδυλωτό πλαίσιο υπό μελέτη (Kozanitis, 2022).....	21
Σχήμα 2.7. Διάταξη γόμφων.....	22
Σχήμα 3.1. Απεικόνιση τοποθέτησης μεταλλικών πείρων.....	24
Σχήμα 3.2. Επιστήλιο.....	25
Σχήμα 3.3. Στοιχείο 98 (α), 241 (β), 7 (γ) της βιβλιοθήκης του Marc.....	26
Σχήμα 3.4. Λεπτομερής απεικόνιση του συστήματος πεπερασμένων στοιχείων.....	27
Σχήμα 3.5. Διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ ελαστοπλαστικού νόμου χωρίς κράτυνση.....	27
Σχήμα 3.6. Μοντέλο Coulomb Bilinear.....	28
Σχήμα 4.1. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.4 m.....	31
Σχήμα 4.2. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.4 m.....	31
Σχήμα 4.3. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.4 m.....	32
Σχήμα 4.4. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.4 m.....	33
Σχήμα 4.5. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	35
Σχήμα 4.6. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1$ Hz εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	36
Σχήμα 4.7. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	37
Σχήμα 4.8. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	38
Σχήμα 4.9. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.5$ Hz εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	39
Σχήμα 4.10. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	40
Σχήμα 4.11. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	41

Σχήμα 4.12. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.25Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	42
Σχήμα 4.13. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.25 Hz$ εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	43
Σχήμα 4.14. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.5 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	44
Σχήμα 4.15. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 2 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	45
Σχήμα 4.16. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 4 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	46
Σχήμα 4.17. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	47
Σχήμα 4.18. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2 Hz$ εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	48
Σχήμα 4.19. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 3 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	49
Σχήμα 4.20. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 4 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	50
Σχήμα 4.21. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	51
Σχήμα 4.22. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.25 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	52
Σχήμα 4.23. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.5 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	52
Σχήμα 4.24. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 2 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	53
Σχήμα 4.25. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 4 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	53
Σχήμα 4.26. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.5 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	54
Σχήμα 4.27. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 2 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	54
Σχήμα 4.28. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 4 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	55
Σχήμα 4.29. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	55
Σχήμα 4.30. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 3 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	56
Σχήμα 4.31. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 4 Hz$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	56
Σχήμα 4.32. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών λικνισμού εντός επιπέδου θ_x για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	58

Σχήμα 4.33. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών λικνισμού εκτός επιπέδου θz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	59
Σχήμα 4.34. Διαγράμματα καθ' ύψος παραμενουσών γωνιών στροφής θy για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	60
Σχήμα 4.35. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση x για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	62
Σχήμα 4.36. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση y για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	63
Σχήμα 4.37. Διάγραμμα παραμενουσών γωνιών επιστηλίου θy για όλες τις εδαφικές διεγέρσεις που μελετήθηκαν.....	65
Σχήμα 4.38. Διαγράμματα παραμενουσών ολισθήσεων επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	65
Σχήμα 4.39. Διαγράμματα παραμενουσών ολισθήσεων επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	65
Σχήμα 5.1. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.8 m.....	66
Σχήμα 5.2. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.8 m.....	67
Σχήμα 5.3. Στιγμιότυπο κατάρρευσης πλαισίου με ύψος επιστηλίου 0.8 m.....	68
Σχήμα 5.4. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 0.8$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	70
Σχήμα 5.5. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $a_g = 0.20g$ και $f = 0.8$ Hz εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	71
Σχήμα 5.6. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	72
Σχήμα 5.7. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	73
Σχήμα 5.8. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $a_g = 0.20g$ και $f = 1.25$ Hz εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	74
Σχήμα 5.9. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	75
Σχήμα 5.10. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	76
Σχήμα 5.11. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.20g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	77
Σχήμα 5.12. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	78
Σχήμα 5.13. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $a_g = 0.30g$ και $f = 1$ Hz εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	79
Σχήμα 5.14. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	80
Σχήμα 5.15. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	81
Σχήμα 5.16. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $a_g = 0.30g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	82

Σχήμα 5.17. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	83
Σχήμα 5.18. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	84
Σχήμα 5.19. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1$ Hz εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	85
Σχήμα 5.20. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	86
Σχήμα 5.21. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	87
Σχήμα 5.22. Στιγμιότυπα για την απόκριση πλαισίου για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1.5$ Hz εντός επιπέδου (αριστερά) και εκτός επιπέδου (δεξιά).....	88
Σχήμα 5.23. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	89
Σχήμα 5.24. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 3$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	90
Σχήμα 5.25. Διαγράμματα γωνιών στροφής σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	91
Σχήμα 5.26. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 0.8$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	93
Σχήμα 5.27. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	93
Σχήμα 5.28. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	94
Σχήμα 5.29. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	94
Σχήμα 5.30. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	95
Σχήμα 5.31. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.20g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	95
Σχήμα 5.32. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	96
Σχήμα 5.33. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	96
Σχήμα 5.34. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	97
Σχήμα 5.35. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	97
Σχήμα 5.36. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.30g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	98
Σχήμα 5.37. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	98

Σχήμα 5.38. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1.25$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	99
Σχήμα 5.39. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 1.5$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	99
Σχήμα 5.40. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 2$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	100
Σχήμα 5.41. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 3$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	100
Σχήμα 5.42. Διαγράμματα ολισθήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για $\alpha_g = 0.40g$ και $f = 4$ Hz για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	101
Σχήμα 5.43. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών λικνισμού εντός επιπέδου θ_x για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	103
Σχήμα 5.44. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος γωνιών λικνισμού εκτός επιπέδου θ_z για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	104
Σχήμα 5.45. Διαγράμματα καθ' ύψος παραμενουσών γωνιών στροφής θ_y για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	105
Σχήμα 5.46. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση x για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	107
Σχήμα 5.47. Διαγράμματα μέγιστων καθ' ύψος μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση z για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	108
Σχήμα 5.48. Διάγραμμα παραμενουσών γωνιών επιστηλίου θ_y για όλες τις εδαφικές επιταχύνσεις.....	110
Σχήμα 5.49. Διαγράμματα παραμενουσών ολισθήσεων επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.20g$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	110
Σχήμα 5.50. Διαγράμματα παραμενουσών ολισθήσεων επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με $0.40g$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και για τον κίονα C2 (δεξιά).....	110
Σχήμα 6.1. Στιγμιότυπα κατάρρευσης του συστήματος για διαφορετικά ύψη επιστηλίου και εδαφική επιτάχυνση $\alpha_g = 0.20g$	113
Σχήμα 6.2. Στιγμιότυπα κατάρρευσης του συστήματος για διαφορετικά ύψη επιστηλίου και εδαφική επιτάχυνση $\alpha_g = 0.30g$	113
Σχήμα 6.3. Στιγμιότυπα κατάρρευσης του συστήματος για διαφορετικά ύψη επιστηλίου και εδαφική επιτάχυνση $\alpha_g = 0.40g$	114
Σχήμα 6.4. Απεικόνιση ασφαλών και μη συνδυασμών εδαφικών διεγέρσεων συστήματος με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.4 m.....	114
Σχήμα 6.5. Απεικόνιση ασφαλών και μη συνδυασμών εδαφικών διεγέρσεων συστήματος με ύψος επιστηλίου ίσο με 0.8 m.....	114
Σχήμα 6.6. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{x,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με $0.20g$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	116
Σχήμα 6.7. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{z,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με $0.20g$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	117
Σχήμα 6.8. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{x,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με $0.30g$ για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	118

Σχήμα 6.9. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{z,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.30g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	119
Σχήμα 6.10. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{x,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	120
Σχήμα 6.11. Σύγκριση γωνιών λικνισμού $\theta_{z,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	121
Σχήμα 6.12. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{x,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	123
Σχήμα 6.13. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{z,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.20g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	124
Σχήμα 6.14. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{x,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.30g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	125
Σχήμα 6.15. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{z,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.30g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	126
Σχήμα 6.16. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{x,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	127
Σχήμα 6.17. Σύγκριση μετατοπίσεων $u_{z,max}$ για όλα τα ύψη επιστηλίου και τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.40g για τον κίονα C1 (αριστερά) και τον κίονα C2 (δεξιά).....	128

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1. Διαστάσεις σπονδύλων και επιστηλίου.....	22
Πίνακας 2.2. Μηχανικές ιδιότητες (Χριστοδούλου, 2019).....	23
Πίνακας 2.3. Συνδυασμοί εδαφικών επιταχύνσεων και συχνοτήτων που μελετήθηκαν.....	23
Πίνακας 4.1. Τιμές παραμενουσών γωνιών στροφής και ολισθήσεων του επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g.....	64
Πίνακας 4.2. Τιμές παραμενουσών γωνιών στροφής και ολισθήσεων του επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g.....	64
Πίνακας 5.1. Παραμένουσες τιμές ολισθήσεων και γωνιών στροφής θy του επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.20g.....	109
Πίνακας 5.2. Παραμένουσες τιμές ολισθήσεων και γωνιών στροφής θy του επιστηλίου για εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.40g.....	109
Πίνακας 6.1. Περιγραφή αναλύσεων συστήματος σπονδυλωτών κιόνων με επιστήλιο ύψους 0.4 m.....	111
Πίνακας 6.2. Περιγραφή αναλύσεων συστήματος σπονδυλωτών κιόνων με επιστήλιο ύψους 0.8 m.....	111
Πίνακας 6.3. Περιγραφή αναλύσεων συστήματος σπονδυλωτών κιόνων με επιστήλιο ύψους 0.335m (Κοζανίτης, 2022).....	112