



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

*ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΙΟΝΩΝ & ΚΙΟΝΟΣΤΟΙΧΙΩΝ
ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ*

ΧΡΗΣΤΟΣ ΛΙΑΣΤΟΣ

A.M. cv13045

Επιβλέπων Καθηγητής:
Δρ. Μιχάλης Φραγκιαδάκης

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Φραγκιαδάκη, επίκουρο καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. ,τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Σπύρο Διαμαντόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια τους, της στήριξη και τη καθοδήγηση που μου παρείχαν κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

1 Περιεχόμενα

2	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	10
3	ABSTRACT.....	11
4	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	12
4.1	Θέση του προβλήματος	12
4.2	Στόχος της εργασίας.....	13
4.3	Διάρθρωση της εργασίας.....	14
5	ΘΕΩΡΕΙΑ ΛΙΚΝΙΣΤΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ	15
5.1	Ολίσθηση στερεών σωμάτων-συντελεστής τριβής.....	15
5.2	Λικνισμός στερεών σωμάτων	18
5.3	Ανατροπή λικνιζόμενου κίονα	19
6	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	21
7	ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ	23
7.1	Σεισμός L'Aquila 2009	23
7.2	Σεισμός Καλαμάτα 1986	25
7.3	Σεισμός Πάρνηθα 1999	26
8	ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ.....	28
8.1	Παλαιότερες αναφορές	28
8.2	Προσομοίωση και σεισμική απόκριση αρχαίων μνημείων.....	30
8.2.1	Μονοσπόνδυλοι κίονες	30
8.2.2	Πολυσπόνδυλοι κίονες	31
8.2.3	Κιονοστοιχίες – Πλαισιακές κατασκευές.....	33
9	ΜΟΝΟΣΠΟΝΔΥΛΟΣ ΚΙΟΝΑΣ	34
9.1	Διαστάσεις και χαρακτηριστικά μονοσπόνδυλου κίονα	34
9.2	Διαγράμματα και αποτελέσματα.....	35
9.2.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	35
9.2.2	Περιορισμένη εκτός επιπέδου κίνηση	37
10	ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟΣ ΚΙΟΝΑΣ.....	40
10.1	Διαστάσεις και χαρακτηριστικά πολυσπόνδυλου κίονα	40

10.2	Διαγράμματα και αποτελέσματα	42
10.2.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	43
10.2.2	Περιορισμένη εκτός επιπέδου κίνηση	45
11	ΜΟΝΟΣΠΟΝΔΥΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	48
11.1	Διαστάσεις και χαρακτηριστικά μονοσπόνδουλου πλαισίου	48
11.2	Διαγράμματα και αποτελέσματα	49
11.2.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	50
11.2.2	Περιορισμένη εκτός επιπέδου κίνηση	51
12	ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	55
12.1	Διαστάσεις και χαρακτηριστικά πολυσπόνδουλου πλαισίου	55
12.2	Διαγράμματα και αποτελέσματα	56
12.2.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	56
13	ΚΙΟΝΟΣΤΟΙΧΙΑ	58
13.1	Διαστάσεις και χαρακτηριστικά κιονοστοιχίας	58
13.2	Διαγράμματα και αποτελέσματα	60
13.2.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	60
14	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ	62
14.1	Σύγκριση μονοσπόνδουλου κίονα – πολυσπόνδουλου κίονα	62
14.1.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	63
14.1.2	Περιορισμένη εκτός επιπέδου κίνηση	70
14.2	Σύγκριση μονοσπόνδουλου κίονα – μονοσπόνδουλου πλαισίου	76
14.2.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	77
14.2.2	Περιορισμένη κίνηση εκτός επιπέδου	83
14.3	Σύγκριση μονοσπόνδουλου κίονα – κιονοστοιχίας	90
14.3.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	90
14.4	Σύγκριση πολυσπόνδουλου κίονα – πολυσπόνδουλου πλαισίου	94
14.4.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	94
14.5	Σύγκριση μονοσπόνδουλου πλαισίου – κιονοστοιχίας	98
14.5.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	98
14.6	Σύγκριση μονοσπόνδουλου πλαισίου – πολυσπόνδουλου πλαισίου 102	
14.6.1	Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση	102

15	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
16	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ABAQUS/CAE		

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 4.1 Μορφές απόκρισης στερεών σωμάτων σε δυναμικές διεγέρσεις της βάσης τους.....	12
Σχήμα 5.1 Στερεό σώμα σε δυναμική διέγερση της βάσης του.....	16
Σχήμα 5.2 Ισορροπία δυνάμεων.....	18
Σχήμα 5.3 Λικνιζόμενο στερεό σώμα.	19
Σχήμα 5.4 Ανατροπή ελεύθερα εδραζόμενων υποστυλωμάτων μετά από σεισμό. .	20
Σχήμα 6.1 Το περιβάλλον εργασίας του Abaqus/CAE.....	21
Σχήμα 6.2 Παραμόρφωση στοιχείου υπό καμπτική ροπή M.....	22
Σχήμα 7.1 Επιταχυνσιογράφημα L'Aquila κατά τη διεύθυνση x.....	23
Σχήμα 7.2 Επιταχυνσιογράφημα L'Aquila κατά τη διεύθυνση γ.....	24
Σχήμα 7.3 Επιταχυνσιογράφημα L'Aquila κατά τη διεύθυνση z.....	24
Σχήμα 7.4 Επιταχυνσιογράφημα Καλαμάτα κατά τη διεύθυνση x.....	25
Σχήμα 7.5 Επιταχυνσιογράφημα Καλαμάτα κατά τη διεύθυνση γ.....	25
Σχήμα 7.6 Επιταχυνσιογράφημα Σύνταγμα κατά τη διεύθυνση x.....	26
Σχήμα 7.7 Επιταχυνσιογράφημα Σύνταγμα κατά τη διεύθυνση γ.....	26
Σχήμα 7.8 Επιταχυνσιογράφημα Σύνταγμα κατά τη διεύθυνση z.....	27
Σχήμα 8.1 Λικνίζουσες σπονδυλωτές κολώνες.....	29
Σχήμα 8.2 Φωτογραφία του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.....	31
Σχήμα 8.3 Φωτογραφία σπονδυλωτών κiónων σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.....	32
Σχήμα 8.4 Φωτογραφία σπονδυλωτής κατασκευής και διακριτοποίηση των σπονδύλων.....	32
Σχήμα 8.5 Κιονοστοιχία του Ναού της Αφαίας αποτελούμενη από έξι μονολιθικούς κίονες.....	33
Σχήμα 9.1 Χαρακτηριστικά μονοσπόνδουλου κίονα.....	34
Σχήμα 9.2 Μονοσπόνδυλος κίονας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.....	34
Σχήμα 9.3 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g.....	36
Σχήμα 9.4 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g.....	36
Σχήμα 9.5 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g.....	37
Σχήμα 9.6 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g.....	38
Σχήμα 9.7 Φωτογραφία μονοσπόνδουλου κίονα του Ναού της Αφαίας.....	39
Σχήμα 10.1 Χαρακτηριστικά πρώτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα.....	40
Σχήμα 10.2 Χαρακτηριστικά δεύτερου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα.....	40
Σχήμα 10.3 Χαρακτηριστικά τρίτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα.....	41
Σχήμα 10.4 Χαρακτηριστικά τέταρτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα.....	41
Σχήμα 10.5 Χαρακτηριστικά πέμπτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα.....	41
Σχήμα 10.6 Χαρακτηριστικά έκτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα.....	41

Σχήμα 10.7 Πολυσπόνδυλος κίονας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE	42
Σχήμα 10.8 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g.....	43
Σχήμα 10.9 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g	44
Σχήμα 10.10 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g	45
Σχήμα 10.11 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g.....	46
Σχήμα 10.12 Φωτογραφία πολυσπόνδουλου κίονας του Ναού της Αφαίας	47
Σχήμα 11.1 Φωτογραφία επιστηλίου μονοσπόνδουλου πλαισίου	48
Σχήμα 11.2 Χαρακτηριστικά επιστυλίου μονοσπόνδουλου πλαισίου	49
Σχήμα 11.3 Μονοσπόνδυλο πλαίσιο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.	49
Σχήμα 11.4 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g.....	50
Σχήμα 11.5 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g	51
Σχήμα 11.6 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g.....	52
Σχήμα 11.7 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g.....	52
Σχήμα 11.8 Φωτογραφία λικνιζόμενου μονοσπόνδουλου πλαισίου στο Abaqus/CAE	53
Σχήμα 11.9 Φωτογραφία πλαισιακής κατασκευής του Ναού της Αφαίας	54
Σχήμα 12.1 Πολυσπόνδυλο πλαίσιο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.	55
Σχήμα 12.2 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g	57
Σχήμα 12.3 Φωτογραφία πολυσπόνδουλου πλαισίου στο Abaqus/CAE	58
Σχήμα 13.1 Φωτογραφία επιστυλίου κιονοστοιχίας	59
Σχήμα 13.2 Χαρακτηριστικά επιστυλίου κιονοστοιχίας	59
Σχήμα 13.3 Κιονοστοιχία στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE...	60
Σχήμα 13.4 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g	61
Σχήμα 13.5 Φωτογραφία Κιονοστοιχίας του Ναού της Αφαίας	62
Σχήμα 14.1 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	63
Σχήμα 14.2 Διάγραμμα μετακίνησης –απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g.....	64
Σχήμα 14.3 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.4g	64
Σχήμα 14.4 Διάγραμμα μετακίνησης –απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.4g.....	65
Σχήμα 14.5 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.3g..	65
Σχήμα 14.6 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.3g.....	66
Σχήμα 14.7 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.4g..	66
Σχήμα 14.8 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.4g.....	67
Σχήμα 14.9 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g	67
Σχήμα 14.10 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	68

Σχήμα 14.11 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.4g	68
Σχήμα 14.12 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.4g	69
Σχήμα 14.13 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	70
Σχήμα 14.14 Διάγραμμα μετακίνησης – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	71
Σχήμα 14.15 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.4g	71
Σχήμα 14.16 Διάγραμμα μετακίνησης – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.4g	72
Σχήμα 14.17 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g	72
Σχήμα 14.18 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g	73
Σχήμα 14.19 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.4g	73
Σχήμα 14.20 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.4g	74
Σχήμα 14.21 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g	74
Σχήμα 14.22 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g	75
Σχήμα 14.23 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.4g	75
Σχήμα 14.24 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.4g	76
Σχήμα 14.25 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	77
Σχήμα 14.26 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	78
Σχήμα 14.27 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.4g	78
Σχήμα 14.28 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.4g	79
Σχήμα 14.29 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g	79
Σχήμα 14.30 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g	80
Σχήμα 14.31 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.4g	80
Σχήμα 14.32 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.4g	81
Σχήμα 14.33 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g	81
Σχήμα 14.34 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g	82
Σχήμα 14.35 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.4g	82
Σχήμα 14.36 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.4g	83
Σχήμα 14.37 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	84
Σχήμα 14.38 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	84
Σχήμα 14.39 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.4g	85

Σχήμα 14.40 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.4g.....	85
Σχήμα 14.41 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.3g	86
Σχήμα 14.42 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.3g.....	86
Σχήμα 14.43 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.4g	87
Σχήμα 14.44 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.4g.....	87
Σχήμα 14.45 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	88
Σχήμα 14.46 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	88
Σχήμα 14.47 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.4g	89
Σχήμα 14.48 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.4g.....	89
Σχήμα 14.49 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	91
Σχήμα 14.50 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.3g	91
Σχήμα 14.51 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	92
Σχήμα 14.52 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g.....	92
Σχήμα 14.53 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.3g.....	93
Σχήμα 14.54 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	93
Σχήμα 14.55 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	95
Σχήμα 14.56 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.3g	95
Σχήμα 14.57 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	96
Σχήμα 14.58 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g.....	96
Σχήμα 14.59 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.3g.....	97
Σχήμα 14.60 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	97
Σχήμα 14.61 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	99
Σχήμα 14.62 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.3g	99
Σχήμα 14.63 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	100
Σχήμα 14.64 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g.....	100
Σχήμα 14.65 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.3g.....	101
Σχήμα 14.66 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	101
Σχήμα 14.67 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g	103
Σχήμα 14.68 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.3g	103
Σχήμα 14.69 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	104

Σχήμα 14.70 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g.....	104
Σχήμα 14.71 Διάγραμμα μετακίνηση –απόσβεσης για σεισμό Λ' Aquila 0.3g.....	105
Σχήμα 14.72 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g.....	105

2 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σεισμός είναι ένα φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζεται κυρίως από την εκδήλωσή του χωρίς προειδοποίηση ,είναι αναπόφευκτος και παρά τη μικρή χρονική διάρκεια του, είναι ικανός να προκαλέσει μεγάλες ζημιές με επακόλουθα τραυματισμούς, απώλειες ανθρώπινων ζωών, ρευστοποίηση εδαφών, καταπτώσεις βράχων καθώς και δημιουργία θαλάσσιων κυμάτων (τσουνάμι) .Αυτός είναι και ο λόγος , πλήθος επιστημόνων διεξάγουν έρευνες προκειμένου να επιτευχθεί η προσέγγιση της απόκρισης των κατασκευών σε δυναμικές φορτίσεις.

Δομικά συστήματα ή αντικείμενα στα οποία καθοριστική και σημαντική παράμετρος της απόκρισης υπό δυναμικές φορτίσεις είναι η μετακίνηση και όχι η παραμόρφωση της κατασκευής είναι αυτά που μελετώνται στη παρούσα εργασία. Τέτοια δομικά συστήματα (αρχαία μνημεία, μουσειακά εκθέματα κ.α.) είναι από ανθεκτικά υλικά θεωρούνται άκαμπτα ή σχεδόν άκαμπτα και εδράζονται στη βάση τους χωρίς περιορισμό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κίνηση τέτοιων σωμάτων είτε στο χώρο είτε στο επίπεδο όταν αυτά υποβληθούν σε εξωτερική διέγερση ισοδυναμεί με κίνηση απολύτως στερεού σώματος. Όμως, στη περίπτωση σωμάτων των οποίων η βασική μετακίνηση οφείλεται σε μετακινήσεις λόγω κάμψης και όχι αποκλειστικά σε κινήσεις στερεού σώματος ,συνεπώς σε σώματα τα οποία δεν μπορεί να θεωρηθούν απολύτως άκαμπτα, τα πράγματα γίνονται πολύπλοκα. Ως αποτέλεσμα, η συμπεριφορά τέτοιων σωμάτων ή δομικών στοιχείων, τα οποία εδράζονται χωρίς περιορισμό και στη πλειοψηφία των περιπτώσεων αποτελούν πολιτιστική κληρονομιά χρήζει αντικείμενο μελέτης. Σκοπός της εργασίας συγκεκριμένα, είναι μελέτη της σεισμικής απόκρισης ελεύθερα εδραζόμενων στατικών συστημάτων αρχαίων ναών μελετώντας κατά βάση τη συμπεριφορά αυτών των στοιχείων σε μεταβαλλόμενες τιμές του συντελεστή τριβής και της απόσβεσης κάτω από συγκεκριμένες σεισμικές διεγέρσεις.

Συγκεκριμένα, τα δομικά συστήματα τα οποία μελετώνται είναι ένας κίονας κόλουρου κώνου, ένας κίονας αποτελούμενος από έξι σπονδύλους ,των οποίων η γεωμετρία είναι κόλουρου κώνου, ένα πλαίσιο αποτελούμενο από δύο κίονες κόλουρου κώνου, ένα πλαίσιο αποτελούμενο από έξι κίονες κόλουρου κώνου καθώς και ένα πλαίσιο το οποίο αποτελείται από έξι κίονες, στο οποίο κάθε κίονες αποτελείται από έξι σπονδύλους γεωμετρικού χαρακτήρα κόλουρου κώνου. Τα παραπάνω στατικά συστήματα προσομοιώνονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE και μελετάται η απόκριση τους κάτω από ένα πλήθος σεισμικών διεγέρσεων, βοηθώντας στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων όσον αφορά τη συμπεριφορά δομικών στοιχείων των αρχαίων ναών υπό δυναμικές διεγέρσεις σε σχέση με συγκεκριμένες τιμές συντελεστή τριβής και απόσβεσης.

3 ABSTRACT

The seismic is an effect which it is happen without giving an alarm reaction. It can be described as an effect that it is ineluctable and although its duration time, it can cause a lot of damage and also it causes many human losses. So, this is the main reason that many scientists trying to make a laboratory work in order to find a solution to the problem of the seismic response of rigid bodies.

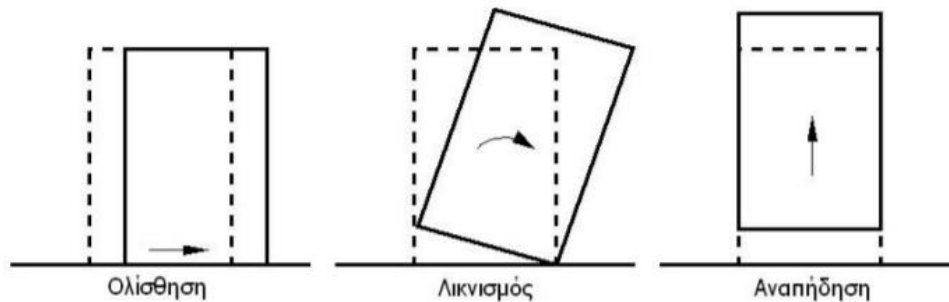
These kind of rigid bodies, at this dissertation is going to be researched. The main characteristic of these kind of bodies is that the movements are the main reason which these bodies can move, not the deformation. These kind of bodies are made by durable materials and it is considered as rigid bodies or almost rigid bodies and is anchored in their base without limitation. But, in cases that the main reason of movement is the deformation due to flection and no the movement that the rigid bodies are doing as usual, the way of research it will be difficult. So, as a result of this situation, the need of finding a solution to these kind of problems is imperative. The main aim of this dissertation is to find a solution to this problem, in order to find how it is the seismic response of these kind of bodies. These bodies are characterized as bodies with big cultural heritage. Also, in this dissertation it will be researched with many changes of dumping coefficient and friction coefficient.

More specifically, the main rigid bodies which are analyzed is the rigid block, the multidrum column , a colonnade that consists two column, a colonnade that consists two multidrum column and a colonnade that consists six columns. All of these bodies are analyzed by the seismic pressure of Kalamata in 1986, in L'Aquila in 2009 and in Syntagma in 1999. In few words the main propose of this dissertation is the dynamic response of these kind of rigid bodies.

4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

4.1 Θέση του προβλήματος

Ένα ελεύθερα εδραζόμενο στερεό σώμα, κάτω από δυναμικές διεγέρσεις της βάσης του, μπορεί να αναπτύξει ολίσθηση, λικνισμό, αναπήδηση ή συνδυασμό όλων αυτών των μορφών απόκρισης στο οριζόντιο επίπεδο της έδρασής του.



Σχήμα 4.1 Μορφές απόκρισης στερεών σωμάτων σε δυναμικές διεγέρσεις της βάσης τους

Η εμφάνιση της ολίσθησης ή του λικνισμού εξαρτάται αφενός από τη γεωμετρία του στερεού σώματος και τους συντελεστές τριβής στην οριζόντια επιφάνεια έδρασής του και αφετέρου από τις μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης της διέγερσης. Η εμφάνιση της αναπήδησης παρατηρείται όταν η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι μεγαλύτερη από την επιτάχυνση της βαρύτητας, που όμως σπάνια παρατηρείται σε σεισμικές διεγέρσεις και έτσι η μελέτη αυτής της μορφής απόκρισης δεν εξετάζεται. Κύριο χαρακτηριστικό τόσο της ολίσθησης όσο και του λικνισμού είναι η μη γραμμικότητά τους, δηλαδή η μη γραμμική σχέση ανάμεσα σε χαρακτηριστικά μεγέθη της διέγερσης και της απόκρισης. Για την εξέταση των στερεών σωμάτων σε τέτοιες μορφές απόκρισης, ολίσθησης και λικνισμού, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η γνώση των συντελεστών τριβής και αποκατάστασης (συντελεστής κρούσης) που επηρεάζουν αυτά τα φαινόμενα. Τον τελευταίο μισό αιώνα έχει παρουσιαστεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα για τη μελέτη των παραπάνω μορφών απόκρισης χάρη στους εξής κυρίως λόγους:

1) Και οι δύο μορφές απόκρισης μπορούν να εμφανιστούν αφενός σε δομικά συστήματα, αφετέρου σε διάφορα αντικείμενα όταν υποβληθούν σε δυναμικές διεγέρσεις. Βασική προϋπόθεση βέβαια είναι η ύπαρξη συνθηκών ελεύθερης έδρασης. Παραδείγματα εφαρμογών παρατηρούνται σε σύγχρονες εγκαταστάσεις με άκαμπτα δομικά συστήματα, σε στοιχεία μηχανών, σε πυρηνικούς σταθμούς και ιδιαίτερα στα υπέργεια δοχεία αποθήκευσης των

ραδιενεργών αποβλήτων τους. Επίσης έπιπλα, μουσειακά εκθέματα, αρχαία μνημεία και μνημειακά αντικείμενα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα με τέτοιες αποκρίσεις.

2) Επειδή μέσα από την απόκριση της ολίσθησης ή του λικνισμού αποσβαίνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας, υπάρχει ερευνητικό ενδιαφέρον για να μπορούν να σχεδιάζονται δομικά συστήματα, κύρια ή δευτερεύοντα, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναπτύσσουν κάποια από αυτές τις αποκρίσεις. Για παράδειγμα, κτιριακή κατασκευή όπου η βάση θεμελιώσής της έχει τη δυνατότητα να ολισθαίνει επηρεάζοντας φυσικά και την απόκριση της ανωδομής.

3) Ο έλεγχος περιπτώσεων ανάπτυξης ολίσθησης ή λικνισμού σε σχετικά άκαμπτες κατασκευές και ο ορισμός ακραίων τιμών στα πλαίσια διαμόρφωσης των αντισεισμικών κανονισμών.

Μεγάλο ενδιαφέρον και ειδικότερα στον Ελλαδικό χώρο παρουσιάζει η μελέτη της συμπεριφοράς των αρχαίων μνημείων σε περίπτωση σεισμού. Για να κατανοήσουμε τον τρόπο συμπεριφοράς αυτών των κατασκευών υπό σεισμικές διεγέρσεις εξετάζουμε διεξοδικά τον τρόπο συμπεριφοράς των ελεύθερα εδραζόμενων στερεών σωμάτων. Στο δισδιάστατο χώρο και κάτω από οριζόντιες διεγέρσεις της βάσης τους, η εξέταση αυτή εστιάζεται στη μελέτη της απόκρισης των σωμάτων αυτών σε ολίσθηση και λικνισμό.

Κοινό γνώρισμα όλων των ερευνητικών προσπαθειών είναι ότι η εξέταση της απόκρισης των δομικών συστημάτων ή αντικειμένων, σε ολίσθηση και λικνισμό, γίνεται με την παραδοχή ότι αυτά συμπεριφέρονται ως συμπαγή στερεά άκαμπτα σώματα. Η παραδοχή αυτή γίνεται διότι οι μετατοπίσεις που προκύπτουν από τέτοιες μορφές απόκρισης είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερες από τυχόν παραμορφώσεις που αναπτύσσονται, και επομένως οι παραμορφώσεις αγνοούνται. Τονίζεται, ακόμη, ότι παρά την ήδη μεγάλη ερευνητική προσπάθεια, υπάρχουν σήμερα αρκετά θέματα που δεν έχουν διερευνηθεί ή βρίσκονται σε πολύ προκαταρκτικό στάδιο μελέτης.

4.2 Στόχος της εργασίας

Στη παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκεται στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE η προσομοίωση στατικών μοντέλων που απαρτίζουν έναν αρχαίο ναό υπό σεισμικές διεγέρσεις μιας διεύθυνσης της βάσης τους. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθούν ένας μονοσπόνδυλος κίονας, ένας πολυσπόνδυλος κίονας ο οποίος αποτελείται από 6 σπονδύλους των οποίων η διάμετρος μειώνεται καθ' ύψος, ένα πλαίσιο το οποίο αποτελείται από δύο μονοσπόνδλους κίονες, ένα πλαίσιο το οποίο αποτελείται από δύο πολυσπόνδλους κίονες, καθώς και μία κιονοστοιχία η οποία απαρτίζεται από έξι

κίονες μονοσπόνδυλου χαρακτήρα. Οι προσομοιώσεις έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε οι διαστάσεις και οι παράμετροι του κάθε μοντέλου, όπως είναι η μάζα, το ειδικό βάρος καθώς η στροφική ροπή αδράνειας να προσομοιάζουν με απολύτως ρεαλιστικό τρόπο μοντέλα τα οποία αποτελούν μέρος σπουδαίων μνημείων που υπάρχουν στον Ελλαδικό χώρο. Οι βάσεις των μοντέλων θα υποβληθούν σε ένα εύρος σεισμικών διεγέρσεων και θα εξεταστεί για κάθε διεγερση η απόκριση τους σε λικνισμό και ολίσθηση. Επίσης μέρος της εργασίας είναι και εξερεύνηση της απόκρισης των μοντέλων σε διάφορες τιμές συντελεστή τριβής και απόσβεσης, με σκοπό να ερευνηθεί η σεισμική ευαισθησία των μοντέλων. Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων και λογικών συμπερασμάτων για τη σεισμική απόκριση κίωνων και κιονοστοιχιών αρχαίων μνημείων.

4.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία μαζί με παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο αποτελείται από δεκαπέντε κεφάλαια και ένα παράρτημα. Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά για στη θεωρία πίσω από την ολίσθηση, την λικνιστική συμπεριφορά και την ανατροπή στερεών σωμάτων. Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται σύντομα το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE και κάποιες βασικές παραδοχές που χρησιμοποιεί για την ανάλυση των σωμάτων. Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στους σεισμούς που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των μοντέλων και παραθέτονται τα επιταχυνσιογραφήματά τους. Στη συνέχεια, στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες παλαιότερες μελέτες σχετικά με την απόκριση παρόμοιων κατασκευών που αναλύονται στην παρούσα εργασία και επίσης αναφέρονται βασικές τεχνικές για τη προσομοίωση των μοντέλων στο Abaqus/CAE. Από το κεφάλαιο 9 έως το κεφάλαιο 13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε μοντέλο ξεχωριστά για τις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν και για τις παραμέτρους που ορίστηκαν. Ακόμα, στο κεφάλαιο 14 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των μοντέλων μεταξύ τους μαζί με συμπεράσματα τα οποία εξαχθήκαν από τη σύγκριση και τέλος στο κεφάλαιο 15 αναλύονται κάποια βασικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις τα οποία αντλήθηκαν από τις αναλύσεις των μοντέλων. Τέλος, παρατίθενται ένα εκτενές παράρτημα, στο οποίο αναλύεται επακριβώς η μοντελοποίηση του πολυσπόνδυλου κίονα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.

5 ΘΕΩΡΕΙΑ ΔΙΚΝΙΣΤΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ

5.1 Ολίσθηση στερεών σωμάτων-συντελεστής τριβής

Όπως είναι γνωστό, ένα σώμα το οποίο εδράζεται σε μια βάση χωρίς περιορισμό, υποβαλλόμενο σε οριζόντια δύναμη αντιστέκεται στη κίνησή του με δυνάμεις συνάφειας που ονομάζουμε συλλογικά δύναμη τριβής. Η διεύθυνση της τριβής είναι παράλληλη προς την επιφάνεια επαφής και η φορά της αντίθετη της επιβαλλόμενης δύναμης. Επίσης, έχει σημείο εφαρμογής την διεπιφάνεια σώματος-βάσης. Από την αρχική θέση ηρεμίας, αυξανόμενης της επιβαλλόμενης δύναμης αυξάνεται και η δύναμη τριβής, έτσι ώστε να διατηρείται η ισορροπία μεταξύ των δύο δυνάμεων. Όταν η οριζόντια δύναμη ξεπεράσει μια οριακή τιμή που ονομάζεται δύναμη στατικής τριβής ($T_{στ}$) το σώμα αρχίζει να ολισθαίνει. Καλείται συντελεστής στατικής τριβής ($\mu_{στ}$) ο λόγος της δύναμης στατικής τριβής προς την κατακόρυφη αντίσταση της βάσης:

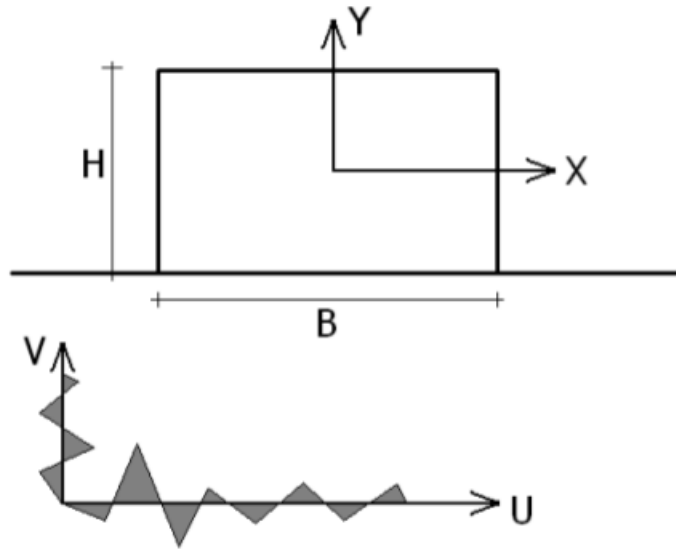
$$\mu_{στ} = T_{στ} / N \quad (5.1)$$

Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης το σώμα συνεχίζει να υφίσταται δύναμη τριβής. Η οριζόντια δύναμη που απαιτείται για να συνεχίσει το σώμα να ολισθαίνει με σταθερή ταχύτητα ονομάζεται δύναμη τριβής ολίσθησης ($T_{ολ}$) και ο λόγος αυτής προς την κατακόρυφη αντίσταση της βάσης συντελεστής τριβής ολίσθησης ($\mu_{ολ}$):

$$\mu_{ολ} = T_{ολ} / N \quad (5.2)$$

και γενικά ισχύει $\mu_{ολ} < \mu_{στ}$

Επίσης, η δύναμη τριβής ολίσθησης παραμένει σταθερή παρά την οποιαδήποτε αύξηση της οριζόντιας δύναμης κατά την ολίσθηση του σώματος. Οι συντελεστές στατικής τριβής και τριβής ολίσθησης εξαρτώνται μόνο από τη φύση των επιφανειών που εφάπτονται, και είναι ανεξάρτητοι της μάζας του σώματος και του εμβαδού της επιφάνειας επαφής. Όταν η βάση έδρασης ενός στερεού σώματος ελεύθερα εδραζόμενου σε οριζόντιο επίπεδο κινείται, τότε το στερεό σώμα είτε παρακολουθεί την κίνηση της βάσης, είτε ολισθαίνει πάνω σ' αυτήν.



Σχήμα 5.1 Στερεό σώμα σε δυναμική διέγερση της βάσης του.

Στο σχήμα \ddot{V} και \ddot{U} είναι οι επιταχύνσεις της βάσης κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση αντίστοιχα. Επίσης X και Y είναι οι οριζόντιες και κατακόρυφες αντίστοιχα μετακινήσεις του στερεού σώματος. Έτσι, στην περίπτωση που το σώμα ακολουθεί την κίνηση της βάσης θα ισχύουν:

$$\dot{X} = \dot{U} \text{ και } \dot{Y} = \dot{V}, \text{ καθώς και}$$

$$\ddot{X} = \ddot{U} \text{ και } \ddot{Y} = \ddot{V},$$

όπου η πρώτη παράγωγος των παραπάνω συμβολισμών αντιστοιχεί στην ταχύτητα, ενώ η δεύτερη στην επιτάχυνση του στερεού σώματος ή της βάσης έδρασής του. Οπότε, σύμφωνα με την αρχή του D'Alembert οι εξισώσεις κίνησης του στερεού σώματος για τις διευθύνσεις X και Y θα είναι ως εξής:

$$m\ddot{X} = T \tag{5.3}$$

$$m\ddot{Y} = N - mg \tag{5.4}$$

όπου m η μάζα του στερεού και N η κατακόρυφη αντίσταση που ασκείται στο σώμα από τη βάση έδρασής του. Με αντικατάσταση των και τροποποίηση των παραπάνω εξισώσεων προκύπτουν:

$$T = m\ddot{U} \quad (5.5)$$

$$N = mg \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g} \right) \quad (5.6)$$

Για να ολισθήσει το στερεό σώμα θα πρέπει η αδρανειακή δύναμη $m\ddot{X}$ να γίνει ίση ή μεγαλύτερη της δύναμης στατικής τριβής:

$$m\ddot{X} \geq T_{\sigma\tau}$$

Αλλά $\mu_{\sigma\tau} = T_{\sigma\tau} / N$, δηλαδή $\mu_{\sigma\tau} N = T_{\sigma\tau}$. Αντικαθιστώντας το N από την (2.6) προκύπτει ότι:

$$m\ddot{X} \geq m\mu_{\sigma\tau}g \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g} \right)$$

Λόγω του ότι $\ddot{X} = \ddot{U}$ έπεται ότι όταν αρχίσει η ολίσθηση η οριζόντια επιτάχυνση διέγερσης της βάσης πληροί την παρακάτω σχέση:

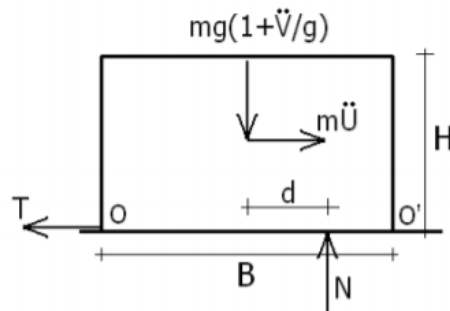
$$\ddot{U} \geq \mu_{\sigma\tau}g \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g} \right) \quad (5.7)$$

Αν αγνοήσουμε την ύπαρξη της κατακόρυφης διέγερσης προκύπτει πως ολίσθηση εμφανίζεται όταν:

$$\ddot{U} \geq \mu_{\sigma\tau}g \quad (5.8)$$

5.2 Λικνισμός στερεών σωμάτων

Κάτω από δυναμικές διεγέρσεις της βάσης ενός ελεύθερα εδραζόμενου στερεού σώματος, εκτός από το φαινόμενο της ολίσθησης υπάρχει και η πιθανότητα εμφάνιση του φαινομένου του λικνισμού, δηλαδή του ανασηκώματος του στερεού από τη βάση έδρασής του και της περιστροφής του γύρω από κάποια ακμή της βάσης του που εξακολουθεί να βρίσκεται σε επαφή με τη βάση έδρασής του. Παραδεχόμαστε και πάλι πως το σώμα ακολουθεί την κίνηση της βάσης, οπότε ισχύουν οι εξισώσεις (2.5) και (2.6). Για να εμφανιστεί λικνισμός θα πρέπει η ροπή που δημιουργεί το ζεύγος δυνάμεων του βάρους του σώματος και της αντίστασης της βάσης να υπερκεραστεί από τη ροπή την οποία δημιουργούν η αδρανειακή δύναμη και η δύναμη στατικής τριβής. Στην κατάσταση ισορροπίας (σχ. 5.2) ισχύει:



Σχήμα 5.2 Ισορροπία δυνάμεων.

$$m\ddot{U} \cdot \frac{H}{2} = mg \left(1 + \frac{\dot{V}}{g} \right) \cdot d, \text{ οριακά δε :}$$

$$m\ddot{U} \cdot \frac{H}{2} = mg \left(1 + \frac{\dot{V}}{g} \right) \cdot \frac{B}{2} \quad (5.9)$$

Έπεται πως για να αρχίσει ο λικνισμός θα πρέπει:

$$m\ddot{U} \cdot \frac{H}{2} \geq mg \left(1 + \frac{\dot{V}}{g} \right) \cdot \frac{B}{2}, \text{ ή}$$

$$\ddot{U} \geq \left(\frac{B}{H} \right) g \left(1 + \frac{\dot{V}}{g} \right) \quad (5.10)$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (5.7) και (5.10) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι:

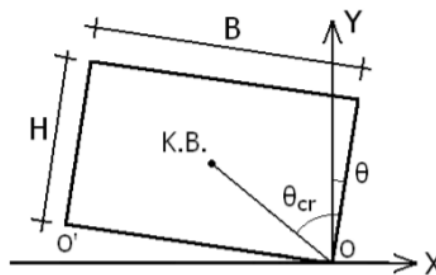
$$\mu_{στ} < \left(\frac{B}{H} \right) \rightarrow \text{Το στερεό σώμα θα αποκριθεί σε ολίσθηση.} \quad (5.11)$$

$$\mu_{στ} > \left(\frac{B}{H} \right) \rightarrow \text{Το στερεό σώμα θα αποκριθεί σε λικνισμό.} \quad (5.12)$$

Αν εφαρμόσουμε την αρχή του D'Alembert για τις ροπές γύρω από την ακμή O και O' (σχ. 5.3), μπορούμε να διατυπώσουμε τις διαφορικές εξισώσεις της λικνιστικής κίνησης για θετικές και αρνητικές γωνίες περιστροφής:

$$I_o \ddot{\theta} + mR\ddot{U} \cos(\theta_{cr} - \theta) + mg \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) R \sin(\theta_{cr} - \theta) = 0, \text{ για } \theta > 0 \quad (5.13)$$

$$I_o \ddot{\theta} + mR\ddot{U} \cos(\theta_{cr} + \theta) + mg \left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) R \sin(\theta_{cr} + \theta) = 0, \text{ για } \theta < 0 \quad (5.14)$$



Σχήμα 5.3 Λικνιζόμενο στερεό σώμα.

5.3 Ανατροπή λικνιζόμενου κίονα

Η ολίσθηση και ο λικνισμός είναι οι δύο τρόποι με τους ένα ελεύθερα εδραζόμενο σώμα μπορεί να μετακινηθεί σε σχέση με τη βάση του ή το έδαφος. Οι πιο σημαντικές ερωτήσεις στις οποίες οι ερευνητές προσπαθούν να βρουν λύσεις και λογικά συμπεράσματα είναι υπό ποιες συνθήκες ένα σώμα κάνει ολίσθηση και υπό ποιες συνθήκες ένα σώμα κάνει λικνισμό. Δηλαδή σε ποιες επιταχύνσεις ένα σώμα παραμένει αμετακίνητο και για ποιο λόγο κατασκευές στενής γεωμετρίας καταφέρνουν να επιζούν από σεισμούς. Επίσης εξαιρετικά σημαντικό είναι η απάντηση στο ερώτημα με ποιο τρόπο ένα σώμα – κατασκευή υπόκειται σε ανατροπή αλλά και πώς να προστατέψουμε αρχαία μνημεία και κατασκευές γνωρίζοντας τις ιδιότητές της. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι ένα μεμονωμένο block, μπορεί να ανατραπεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- 1) Με μία ή περισσότερες προσκρούσεις.
- 2) Χωρίς πρόσκρουση.

Σύμφωνα με τη παρακάτω φωτογραφία, γίνεται αντιληπτό πόσο δύσκολη είναι η προσέγγιση της σεισμικής απόκρισης ή της ανατροπής των υποστυλωμάτων ή των ελεύθερα εδραζόμενων κατασκευών. Δύο υποστυλώματα τα οποία υπόκεινται στον ίδιο σεισμό έχουν διαφορετική απόκριση. Το ένα ανετράπη , ενώ το άλλο παρέμεινε σταθερό .Το πλαίσιο της παρακάτω φωτογραφίας παρέμεινε σταθερό όπως ακριβώς αναμενόταν.



Σχήμα 5.4 Ανατροπή ελεύθερα εδραζόμενων υποστυλωμάτων μετά από σεισμό.

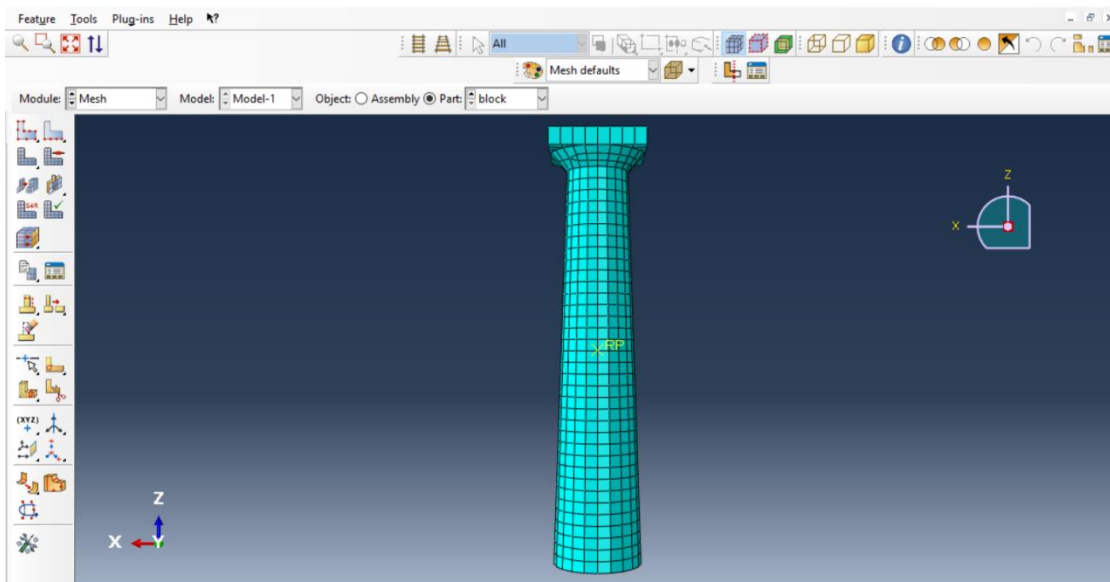
6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Abaqus/CAE 2018 student edition, το οποίο έχει ικανότητα επίλυσης οποιουδήποτε τύπου ανάλυσης εκμεταλλευόμενο τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Υπάρχουν γενικά δύο τρόποι προσέγγισης της συγκεκριμένης εφαρμογής:

α) Μέσω του Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment), το οποίο αποτελεί το βασικό interface («διασύνδεση») του προγράμματος, δηλαδή τον τρόπο «επικοινωνίας» του χρήστη με το πρόγραμμα. Από αυτό είναι προσβάσιμες όλες οι δυνατότητες προγράμματος, όπως ο ορισμός των χαρακτηριστικών των εκάστοτε επιθυμητών αναλύσεων και η επίλυσή αυτών. Επίσης, μέσω του CAE γίνεται η αξιολόγηση των αναλύσεων μετά την επίλυσή τους (σχ. 6.1).

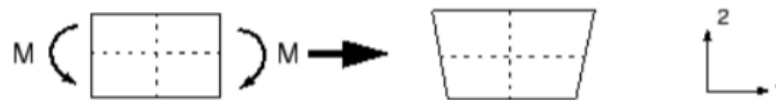
β) Μέσω της δημιουργίας «αρχείων εισαγωγής» (input files), τα οποία συντάσσονται με απλό πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου και περιέχουν όλα τα στοιχεία της εκάστοτε ανάλυσης. Αυτά στη συνέχεια δίνονται προς επίλυση στις υπολογιστικές μηχανές του Abaqus, δηλαδή τα Abaqus/Standard και Abaqus/Explicit.



Σχήμα 6.1 Το περιβάλλον εργασίας του Abaqus/CAE.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί πως το Abaqus/Standard χρησιμοποιείται κυρίως σε στατικές αναλύσεις, ενώ το Abaqus/Explicit ενδείκνυται για δυναμικές, μη γραμμικές αναλύσεις ή για προβλήματα μετάδοσης κυμάτων, οπότε είναι και η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το κάθε σώμα χωρίζεται νοητά σε πολλά μικρά στοιχεία μέσω της διαδικασίας της διακριτοποίησης («meshing»). Το κάθε στοιχείο πλέον εκλαμβάνεται ως ξεχωριστό σώμα, με απλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις δικές του εξισώσεις ισορροπίας, οι οποίες αλληλοεξαρτώνται από τα γειτονικά του στοιχεία. Η επίλυση της εκάστοτε ανάλυσης γίνεται με αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων ισορροπίας του συνόλου των πεπερασμένων στοιχείων σε στάδια μικρής χρονικής διάρκειας. Η διάρκεια του κάθε σταδίου ονομάζεται βήμα αριθμητικής ολοκλήρωσης, ή απλώς βήμα ολοκλήρωσης. Με τον τρόπο αυτό δύναται να αυξηθεί μεν η ακρίβεια της λύσης, εισάγονται δε επιπλέον ανύπαρκτες στην πραγματικότητα δυνάμεις ανάμεσα στα στοιχεία, τέτοιες ώστε να αντισταθμιστούν φαινόμενα παραμόρφωσης των στοιχείων, τα λεγόμενα φαινόμενα «hourglassing». Αυτά δεν μπορούν να ελεγχθούν αλλιώς από το πρόγραμμα (σχ.), καθώς για κάθε στοιχείο οι εξισώσεις ισορροπίας λαμβάνονται σε ένα σημείο ολοκλήρωσης («integration point»).



Σχήμα 6.2 Παραμόρφωση στοιχείου υπό καμπτική ροπή M .

Στο παραπάνω σχήμα το σημείο ολοκλήρωσης είναι το κέντρο του στοιχείου. Το στοιχείο στην πραγματικότητα παραμορφώνεται, κάτι τέτοιο όμως δεν γίνεται αντιληπτό από το πρόγραμμα καθώς ούτε η θέση του κέντρου, ούτε το μήκος των διάστικτων γραμμών, ούτε η μεταξύ τους γωνία έχει αλλάξει. Κατά συνέπεια, το συγκεκριμένο στοιχείο είναι ανίκανο να αντισταθεί σε αυτού του είδους την παραμόρφωση.

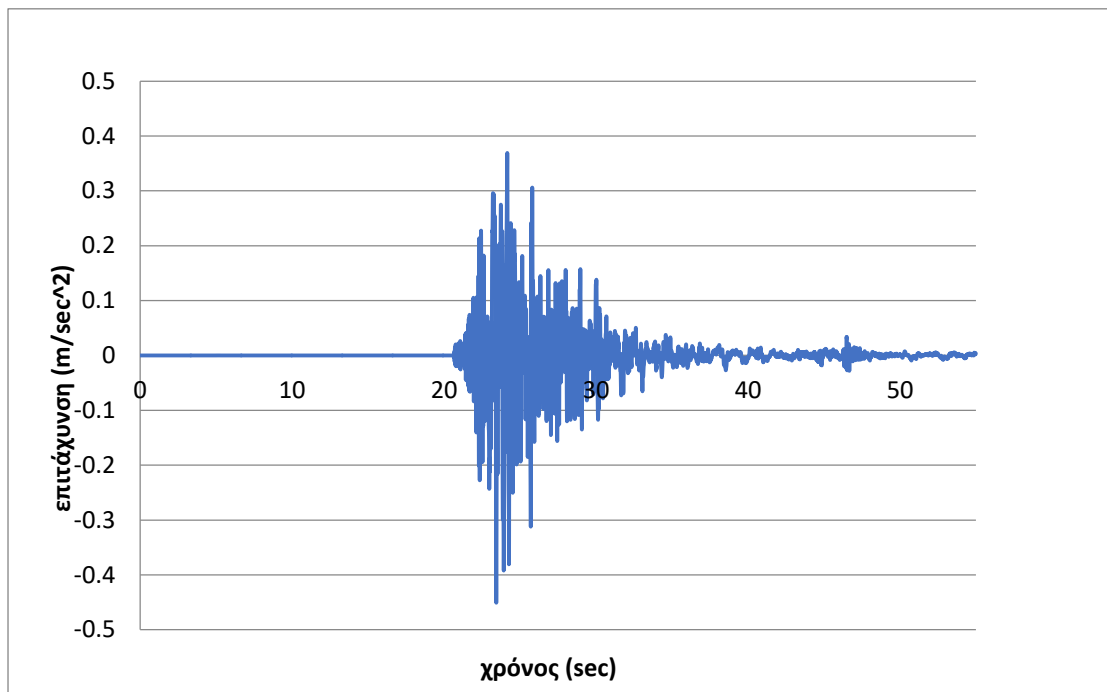
Οι επιπλέον αυτές δυνάμεις παράγουν κάποιο έργο κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, συνήθως αμελητέο, αλλά οδηγούν στην απώλεια ποσότητας ενέργειας. Το Abaqus ονομάζει αυτήν την απώλεια τεχνητή ενέργεια τροπής («artificial strain energy»). Θεωρητικά, όσο μικρότερη είναι αυτή η ενέργεια σε σχέση με τις υπόλοιπες, «πραγματικές» ενέργειες, και όσο πιο πυκνή είναι η διακριτοποίηση του δοκιμίου, τόσο η λύση προσεγγίζει την πραγματική.

7 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

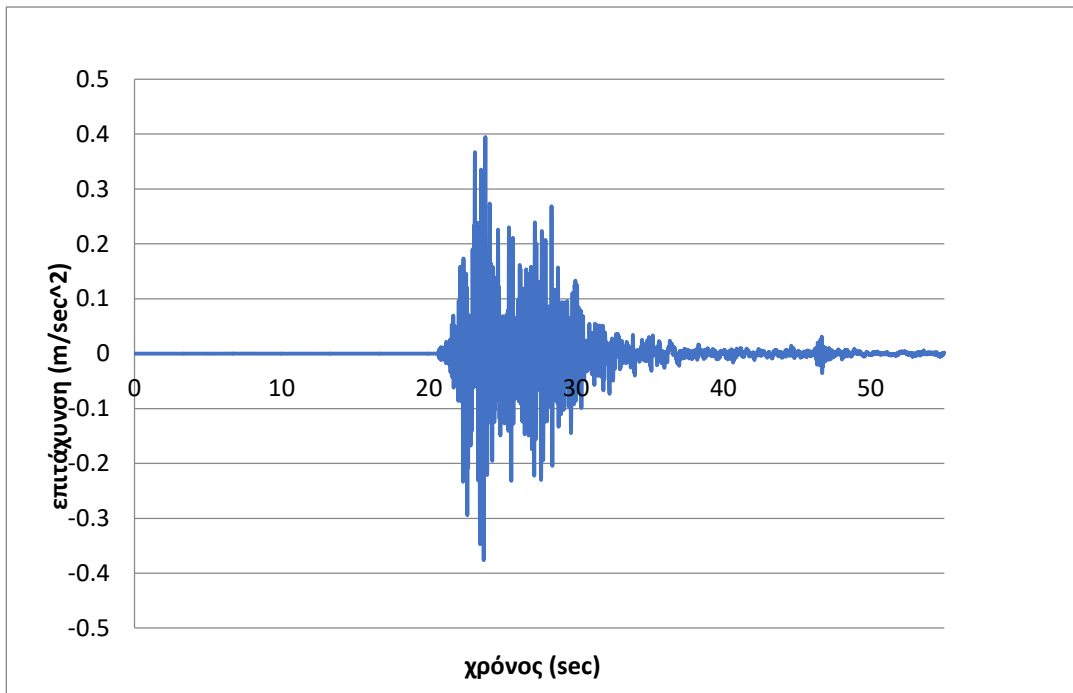
Οι βάσεις των μοντέλων υπεβλήθησαν σε ένα εύρος σεισμικών διεγέρσεων. Οι σεισμοί οποίοι χρησιμοποιήθηκαν είναι ο σεισμός της L'Aquila της Ιταλίας το 2009, ο σεισμός της Καλαμάτας το 1986 και ο σεισμός της Πάρνηθας το 1999. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με αυτές τις σεισμικές διεγέρσεις.

7.1 Σεισμός L'Aquila 2009

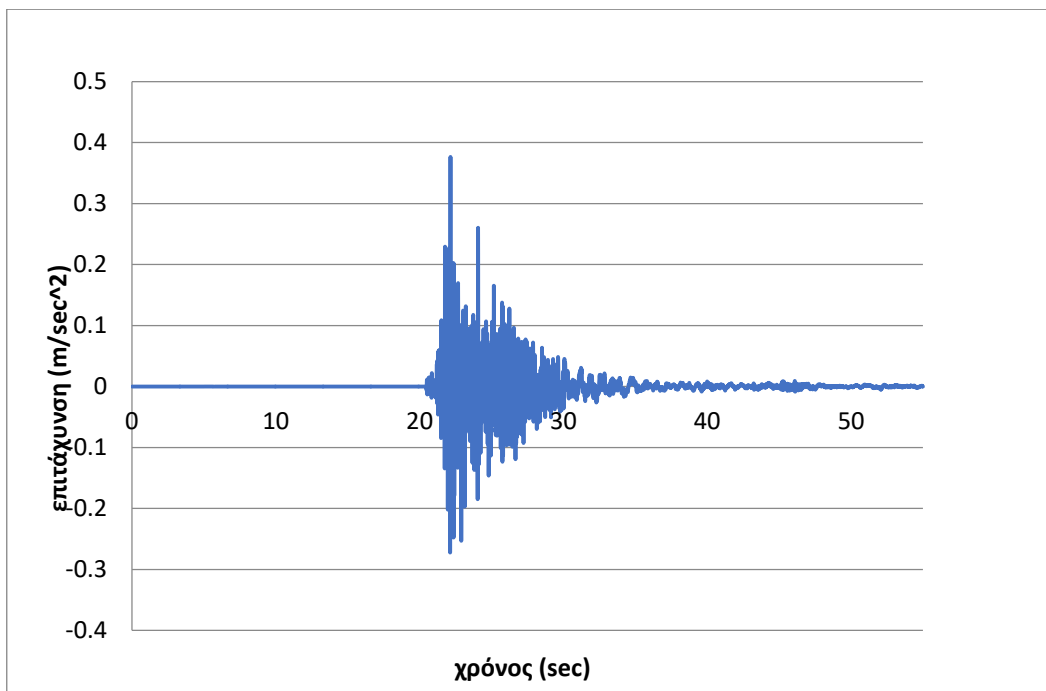
Στις 6 Απριλίου του 2009 και ώρα 3:32 π.μ τοπική συνέβη σεισμός ισχύος 6.3 M_w ή μεγέθους 5,9 στην κλίμακα ρίχτερ. Το επίκεντρο του σεισμού ήταν 7 χιλιόμετρα της πόλης L'Aquila της Ιταλίας. Παρακάτω παρατίθενται τα επιταχυνσιογράφημα του σεισμού κατά τη διεύθυνση X, κατά τη διεύθυνση Y και κατά τη διεύθυνση Z. Η χρονική διάρκεια του σεισμού ήταν 55 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 7.1 Επιταχυνσιογράφημα L'Aquila κατά τη διεύθυνση x.



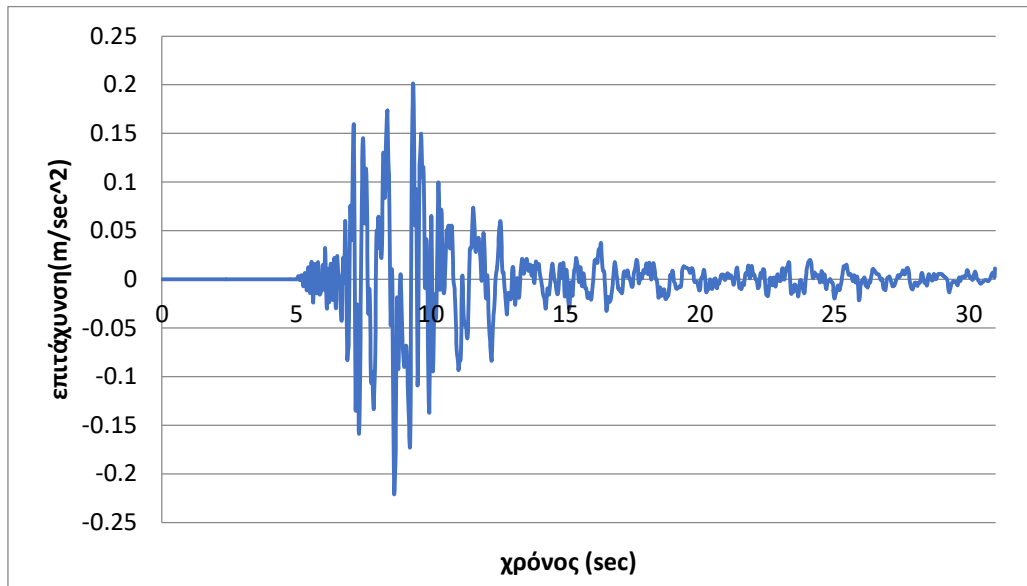
Σχήμα 7.2 Επιταχυνσιογράφημα L'Aquila κατά τη διεύθυνση γ.



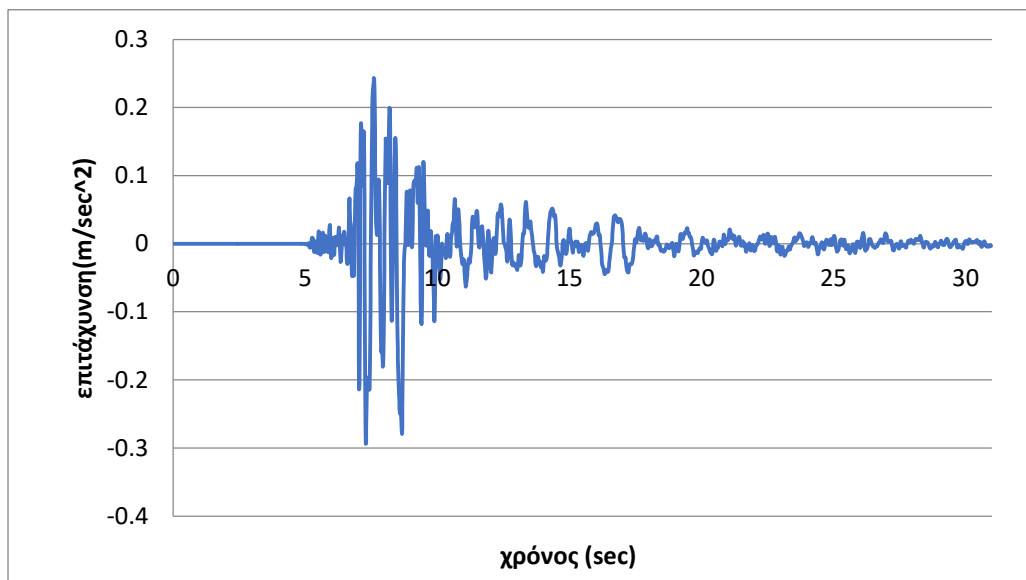
Σχήμα 7.3 Επιταχυνσιογράφημα L'Aquila κατά τη διεύθυνση z.

7.2 Σεισμός Καλαμάτα 1986

Στις 13 Σεπτεμβρίου του 1986 και ώρα 8.23 μ.μ τοπική συνέβη σεισμός ισχύος 6.2 στη κλίμακα ρίχτερ .Το επίκεντρο του σεισμού ήταν στη Καλαμάτα .Παρακάτω παρατίθενται τα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμού κατά τη διεύθυνση X ,κατά τη διεύθυνση Y και κατά τη διεύθυνση Z .Η χρονική διάρκεια του σεισμού είναι 31 δευτερόλεπτα.



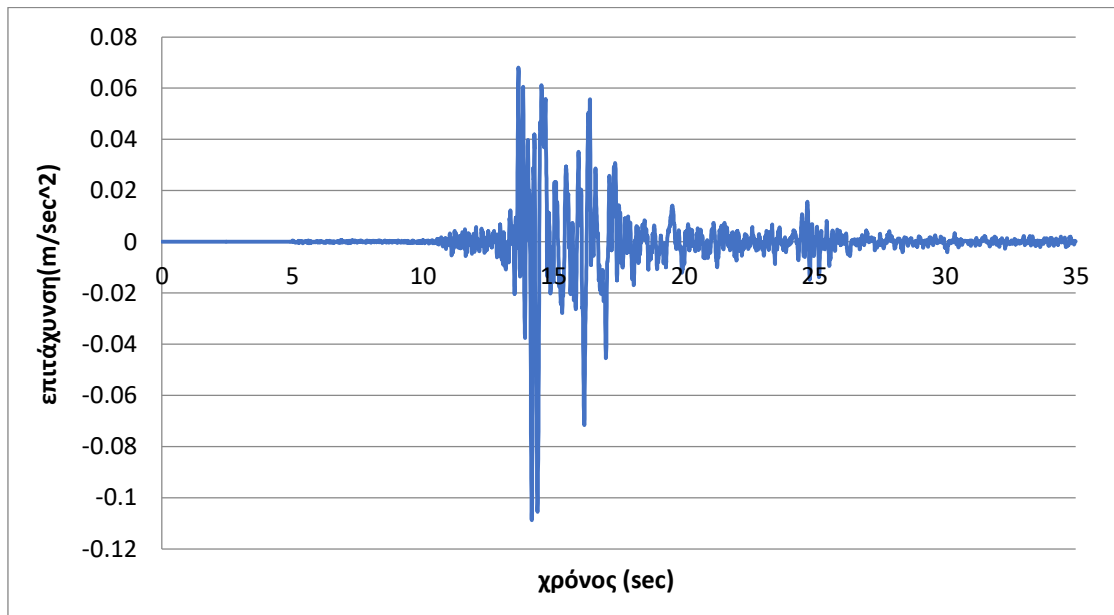
Σχήμα 7.4 Επιταχυνσιογράφημα Καλαμάτα κατά τη διεύθυνση x.



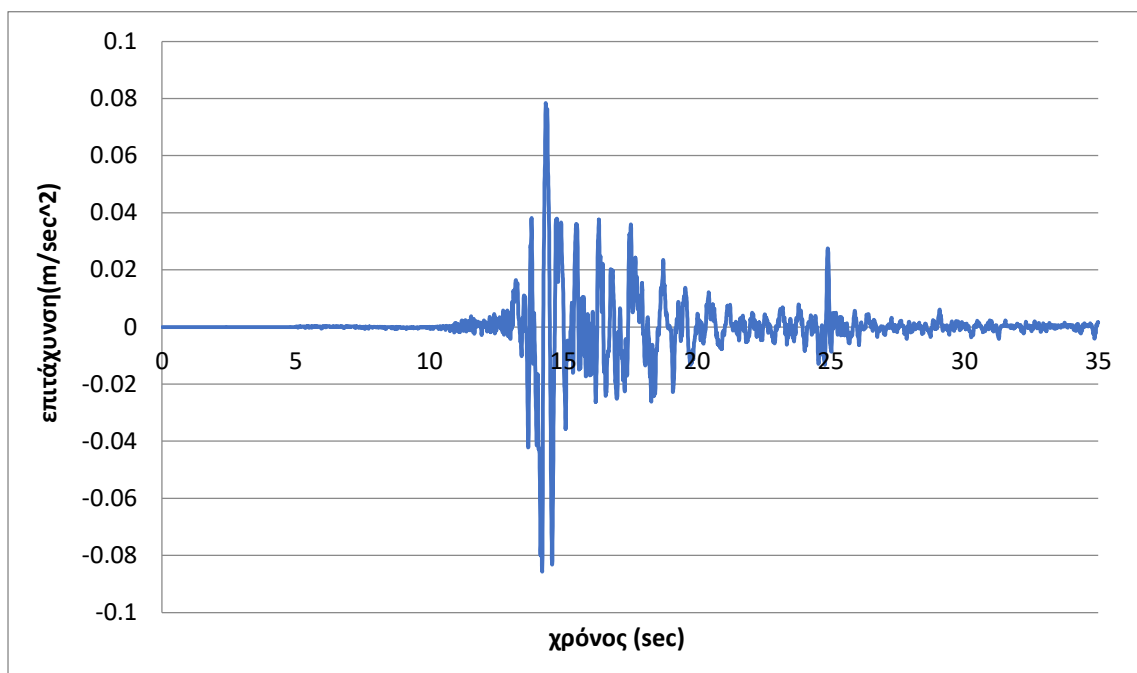
Σχήμα 7.5 Επιταχυνσιογράφημα Καλαμάτα κατά τη διεύθυνση y.

7.3 Σεισμός Πάρνηθα 1999

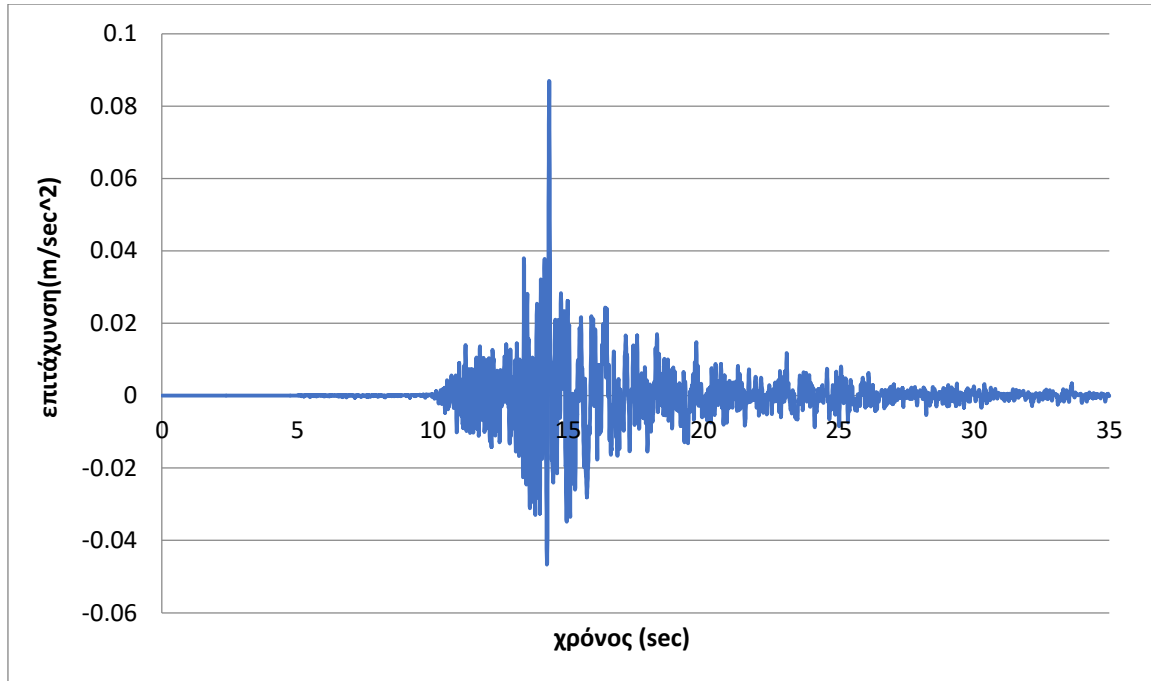
Ο σεισμός της Πάρνηθας, ως γνωστός και ως σεισμός της Αθήνας του 1999, με μέγεθος 5.9 της κλίμακας ρίχτερ, έλαβε χώρα στις 7 Σεπτεμβρίου 1999 και 2:56 τοπική ώρα. Το επίκεντρο του σεισμού ήταν 18 χιλιόμετρα από το Σύνταγμα της Αθήνας. Παρακάτω παρατίθενται τα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμού κατά τη διεύθυνση X, κατά τη διεύθυνση Y, κατά τη διεύθυνση Z. Η χρονική διάρκεια του σεισμού είναι 35 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 7.6 Επιταχυνσιογράφημα Σύνταγμα κατά τη διεύθυνση x.



Σχήμα 7.7 Επιταχυνσιογράφημα Σύνταγμα κατά τη διεύθυνση y.



Σχήμα 7.8 Επιταχυνσιογράφημα Σύνταγμα κατά τη διεύθυνση z.

8 ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

Συγκεκριμένα μεγάλο αριθμό ερευνών και επιστημονικών μελετών έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια με βασικό στόχο την προσέγγιση της σεισμικής απόκρισης στατικών συστημάτων όπως ένα ελεύθερο εδραζόμενο υποστύλωμα καθώς και πλαίσια τα οποία είναι ικανά να κινούνται στη βάση τους χωρίς περιορισμό. Βέβαια η ερευνητική μελέτη δε περιορίζεται εκεί καθώς αντικείμενο μελέτης αποτελεί και η προσέγγιση της απόκρισης συστημάτων τα οποία αποτελούνται από παραπάνω από ένα σπονδύλους, όπως είναι οι πολυσπόνδυλοι κίονες και τα πλαίσια τα οποία αποτελούνται από πολυσπόνδυλους κίονες. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις ερευνητικές εργασίες αναφορικά με τη προσέγγιση τέτοιων προβλημάτων.

8.1 Παλαιότερες αναφορές

Ειδικότερα, ο Ante Buzon, ο Jure Radnic, ο Nikola Grgic και ο Goran Baloevic του πανεπιστημίου του Split, δημοσίευσαν μία ερευνητική εργασία παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα της επίδρασης του ύψους του σπονδύλου στην σεισμική συμπεριφορά και φέρουσα ικανότητα ελεύθερα εδραζόμενων υποστυλωμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μία αύξηση στον αριθμό των σπονδύλων στο υποστύλωμα μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει σημαντικά τη μέγιστη μετακίνηση στη κορυφή του υποστυλώματος ανάλογα με το τύπο του εφαρμοζόμενου επιταχυνσιογραφήματος.

Ακόμα, έρευνα σχετικά με την απόκριση μεμονωμένων κίονων και κionoστοιχιών υπό διάφορες σεισμικές εντάσεις, δημοσίευσαν και η κα Σοφία Καραφάγκα, ο κος Γρηγόρης Τσινίδης, η κα Όλγα Ντινούδη και ο κος Κυριαζής Πιτιλάκης του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Επίσης, ερευνητική εργασία σχετικά με τη δυναμική συμπεριφορά μεμονωμένου κίονα δημοσίευσε και η κα Παπαλού, του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος δυτικής Ελλάδας, κατά την οποία τα πειραματικά αποτελέσματα δυναμικής απόκρισης υποστυλώματος το οποίο αποτελείται από πολλούς σπονδύλους συγκρίνονται με τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από ανάλυση του μοντέλου αριθμητικά σύμφωνα με τη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσέγγιση της δυναμικής συμπεριφοράς του υποστυλώματος μπορεί να επιτευχθεί με αριθμητικές μεθόδους με τη κατάλληλη επιλογή παραμέτρων.

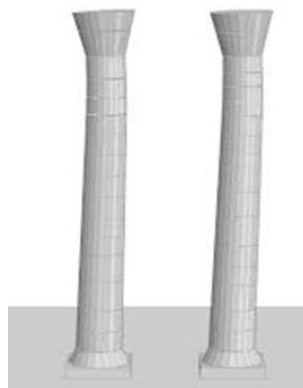
Επιπρόσθετα, ο κος Πιτιλάκης και η κα Ταβούτσκη του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης παρουσίασαν εργασία, στόχος της οποίας ήταν η σεισμική απόκριση μονολιθικών αρχαιοελληνικών κίονων. Για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς και λόγω της δυσκολίας εξαγωγής αποτελεσμάτων λόγω

της μη γραμμικής συμπεριφοράς τέτοιων συστημάτων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη αριθμητική μέθοδο. Η μοντελοποίηση έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Ansys v.11.0. Η εργασία καταλήγει με την προσέγγιση της κρίσιμης επιτάχυνσης κατάρρευσης του υποστυλώματος υπό συγκεκριμένες σεισμικές διεγέρσεις.

Επίσης, μελέτη σχετικά με τη δυναμική απόκριση κίονων πολλαπλών σπονδύλων έχουν δημοσιεύσει και ο κ. Δ. Κ. Μπάρος σε συνεργασία με τη κ. Παπαλού του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος δυτικής Ελλάδας ,χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων .Η μοντελοποίηση των στατικών συστημάτων έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Ansys.

Ακόμα, στα πλαίσια της προσπάθειας προσέγγισης της σεισμικής απόκρισης στατικών συστημάτων ελεύθερα εδραζόμενων τα οποία υπόκειται σε σεισμικές διεγέρσεις, ο κος Παπαλοΐζου σε συνεργασία με το κ. Κομοδρόμο, δημοσίευσαν εργασία ,στην οποία ερευνάται η επιρροή ορισμένων παραμέτρων στη σεισμική συμπεριφορά κίονων και κίονοστοιχιών αλλά και η δυναμική συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων υπό την επίδραση ίδιων σεισμικών διεγέρσεων. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος διακριτού στοιχείου DEM.

Τέλος, σημαντική έρευνα σχετικά με την σεισμική απόκριση κίονων πολλών σπονδύλων , την σεισμική αξιοπιστία των κλασικών μνημείων αλλά και τη διαδικασία αποκατάστασής τους δημοσίευσαν ο κος Ψυχάρης, ο κος Φραγκιαδάκης και ο κος Ιωάννου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείται μία σεισμική αξιολόγηση κατάρρευσης ενός πολυσπόνδουλου κίονα χρησιμοποιώντας προσομοίωση Monte Carlo με συνθετικές κινήσεις εδάφους. Η παρακάτω φωτογραφία είναι από την παραπάνω εργασία που αναφέρθηκε και απεικονίζει δύο κίονες ,των οποίων ο αριθμός των σπονδύλων είναι διαφορετικός όπως και η απόκριση τους κάτω από την ίδια σεισμική απόκριση. Η μοντελοποίηση των κίονων έγινε με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων DEM.



Σχήμα 8.1 Λικνίζουσες σπονδυλωτές κολώνες

8.2 Προσομοίωση και σεισμική απόκριση αρχαίων μνημείων

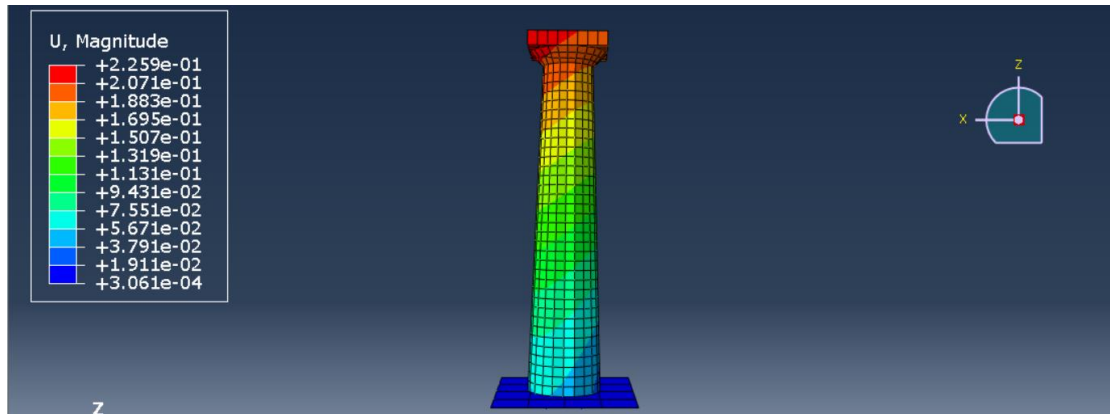
Εδώ και χιλιάδες χρόνια θα παρατηρήσουμε ότι πάρα πολλά αρχαία μνημεία και αρχαίοι ναοί συνεχίζουν ακλόνητα να κοσμούν τον Ελλαδικό και όχι μόνο χώρο, καταφέροντας να κρατήσουν στη πλειοψηφία των περιπτώσεων τη δομή τους πέραν κάποιων βλαβών που προκλήθηκαν από χιλιάδες σεισμικές διεγέρσεις στις οποίες έχουν υποβληθεί οι βάσεις τους και από φθορά των υλικών τους στο πέρασμα των αιώνων. Εξαιρετικά σημαντικό λοιπόν είναι η μελέτη τέτοιων μνημείων ώστε να εξακριβωθεί σε όποιον βαθμό είναι εφικτό αυτό, λόγω δεδομένων πρακτικών δυσκολιών όπως είναι η προσέγγιση κατάλληλων αδρανειακών παραμέτρων, όπως είναι το ειδικό βάρος του μαρμάρου, ο συντελεστής τριβής και η ο συντελεστής απόσβεσης. Έτσι λοιπόν εξαιρετικά χρήσιμος και σημαντικός είναι ο προσδιορισμός τέτοιων παραμέτρων αλλά και ορισμένων τεχνικών όσον αφορά τη προσομοίωση των αρχαίων μνημείων σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Παρακάτω λοιπόν παραθέτονται συγκεκριμένες πληροφορίες που βοηθούν τη μοντελοποίηση μοντέλων, όπως ο μονοσπόνδυλος κίονας, ο πολυσπόνδυλος κίονας και η κιονοστοιχία. Επίσης παραθέτονται και πληροφορίες σχετικά με την σεισμική απόκριση τέτοιων συστημάτων. Στο πρόγραμμα το οποίο παρατίθενται όλες αυτές οι πληροφορίες είναι το Abaqus/CAE.

8.2.1 Μονοσπόνδυλοι κίονες

Για τη προσομοίωση ενός μονολιθικού κίονα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός μοντέλου είτε άκαμπτου (στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε τύπο σώματος discrete rigid) είτε να γίνει η προσομοίωση θεωρώντας συγκεκριμένους παραμέτρους όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας και τις ιδιότητες του υλικού (στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε τύπο σώματος deformable). Ακόμα, με τον προσδιορισμό του κέντρου μάζας του εκάστοτε σώματος και ορίζοντας τα αδρανειακά χαρακτηριστικά και τη μάζα σε όλους τους άξονες περιστροφής, καθίσταται η δυνατότητα απόδοσης πλήρως της γεωμετρίας του σώματος.

Επίσης για περισσότερη ακρίβεια όσον αφορά τη γεωμετρία του σώματος, ενδείκνυται και η σχεδίαση του μοντέλου στο Autocad, και εισαγωγή του μοντέλου στο εκάστοτε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμα, μία από τις βασικές παραδοχές που λαμβάνεται υπόψη είναι ότι η αλληλεπίδραση του μονοσπόνδυλου κίονα με το έδαφος γίνεται μέσω της ξηράς τριβής – ολίσθησης και ότι ο κίονας είναι ελεύθερα εδραζόμενος στο έδαφος. Μετέπειτα, το Abaqus/CAE δίνει τη δυνατότητα μέσω της εντολής surface to surface interaction και έτσι ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις ιδιότητες των επαφών. Οι ιδιότητες αυτές είναι ο συντελεστής τριβής, ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0.5 έως 1.15 ανάλογα

κάθε φορά από τις παραδοχές που λαμβάνει ο κάθε χρήστης και ο συντελεστής απόσβεσης .



Σχήμα 8.2 Φωτογραφία του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.

Κατά τη μελέτη του μονοσπόνδυλου κίονα μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι οι βασικές κινήσεις που εκτελεί ένας κίονας είναι η λικνιστική .Η κίνηση αυτή παρατηρείται σε ένα εύρος επιταχύνσεων των οποίων είναι ίση με τη ραδινότητα του σώματος σε όρους επιτάχυνσης της βαρύτητας .Σε μεγαλύτερες επιταχύνσεις και για τιμές οι οποίες ξεπερνούν τις τιμές του συντελεστή τριβής ο κίονας μπορεί να εκτελεί ολίσθηση. Επίσης υπάρχουν περιοχές στις οποίες το σώμα μπορεί να εκτελεί συνδυασμένη κίνηση. Ακόμα, εξαιρετικά πιθανό φαινόμενο είναι να παρατηρηθεί και περιστροφή που στη πλειοψηφία των περιπτώσεων οδηγεί σε εκτός επιπέδου κίνηση. Ο κύριος λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι η κυκλική η πολλές φορές γεωμετρία με ραβδώσεις στη βάση του κίονα .

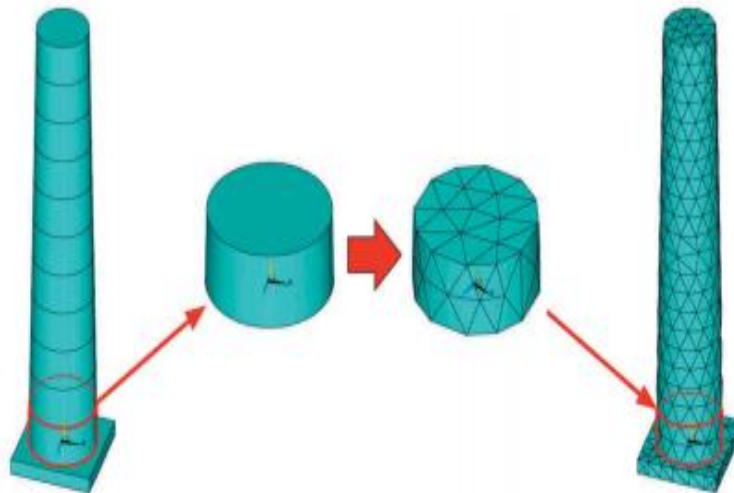
8.2.2 Πολυσπόνδυλοι κίονες

Όσον αφορά τις σπονδυλωτές κατασκευές ,στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE , μπορούν να εισαχθούν ως μεμονωμένα στερεά σώματα ,δηλαδή είτε με επιλογή τύπος σώματος discrete rigid είτε με επιλογή τύπος σώματος deformable, λαμβάνοντας όμως υπ'όψιν όπως είπαμε και παραπάνω συγκεκριμένους παράγοντες όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι σημαίνει ότι δίνεται η δυνατότητα στο σώμα είτε να στραφεί είτε να κινείται οριζόντια σε επίπεδα προβλήματα. Σαφώς , για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων, ενδείκνυται η κατασκευή τρισδιάστατων σωμάτων λαμβάνοντας υπ'όψιν τις κινήσεις του λικνισμού και της ολίσθησης. Η επιλογή των παραμέτρων συνεχίζει να είναι καθοριστική καθώς μέσω της εντολής surface to surface interaction που δίνει τη δυνατότητα το Abaqus/CAE μπορούμε να καθορίσουμε τις ιδιότητες μεταξύ των σπονδύλων. Επίσης όσον αφορά τη γεωμετρία και τη σχεδίαση του σώματος

προτείνεται η εισαγωγή του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων σχεδιασμένο στο Autocad ,για μεγαλύτερη ακρίβεια. Στη συνέχεια ορίζοντας το κέντρο μάζας του σώματος ,μας δίνεται η δυνατότητα να ορίσουμε τη μάζα και τα λοιπά αδρανειακά χαρακτηριστικά. Παραπάνω πληροφορίες για την μοντελοποίηση πολυσπόνδουλου κίονα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE υπάρχει στο τέλος της εργασίας, στο παράρτημα .



Σχήμα 8.3 Φωτογραφία σπονδυλωτών κίονων σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 8.4 Φωτογραφία σπονδυλωτής κατασκευής και διακριτοποίηση των σπονδύλων

8.2.3 Κιονοστοιχίες – Πλαισιακές κατασκευές

Αναφορικά με την αρχιτεκτονική των κιονοστοιχιών εύκολα παρατηρεί κάποιος την ύπαρξη επισυλίου πάνω στους μονολιθικούς κίονες .Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελεί όλο μαζί μία κιονοστοιχία .Η κιονοστοιχία μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας πλαισιακός φορέας ο οποίος έχει τη δυνατότητα να δίνει μεγάλες μετακινήσεις λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας που παρέχει το επιστήλιο στους κίονες .Η συγκεκριμένη ιδιότητα των κιονοστοιχιών έχει ως αποτέλεσμα τη ύπαρξη λιγότερων βλαβών σε σχέση με άλλες πλαισιακές κατασκευές οι οποίες αποτελούνται από λιγότερους κίονες .Κλασσικό παράδειγμα πολύστηλης πλαισιακής κατασκευής αποτελεί και η κιονοστοιχία στο Ναό της Αφαίας .



Σχήμα 8.5 Κιονοστοιχία του Ναού της Αφαίας αποτελούμενη από έξι μονολιθικούς κίονες

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς τέτοιων στατικών συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί με την μοντελοποίηση τους σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων όπως ακριβώς παρουσιάστηκαν στις παραδοχές που αναλύθηκαν και στα μοντέλα του μονολιθικού κίονα και του πολυσπόνδουλου κίονα .Αυτές οι παραδοχές έχουν να κάνουν με τις επαφές των σωμάτων, με την ιδιαιτερότητα ότι οι επαφές των σωμάτων ορίζονται και μεταξύ του εδάφους και του κίονα αλλά και της κορυφής του εδάφους με το επιστήλιο. Καθοριστικό ρόλο παίζουν όπως και στα προηγούμενα μοντέλα και ο ορισμός των ιδιοτήτων ,όπως είναι ο συντελεστής τριβής και ο συντελεστής απόσβεσης. Όσον αφορά τις μάζες και τα λοιπά αδρανειακά χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να εφαρμοστούν στο κέντρο βάρους κάθε κίονα, ενώ και για τον ορισμό των χαρακτηριστικών του επιστηλίου αυτά μπορούν να εφαρμοστούν στο κέντρο βάρους του ξεχωριστά .

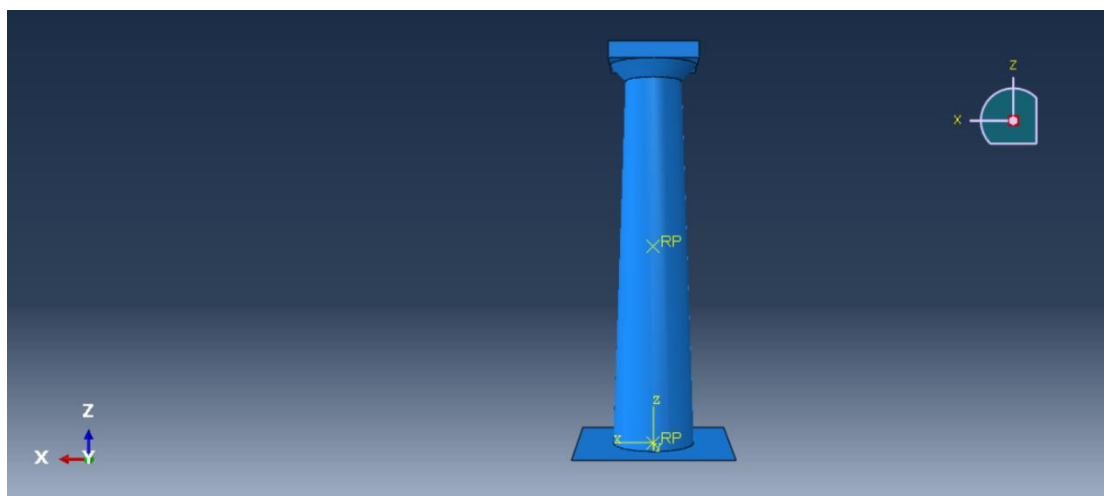
9 ΜΟΝΟΣΠΟΝΔΥΛΟΣ ΚΙΟΝΑΣ

9.1 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά μονοσπόνδουλου κίονα

Η ανάλυση και η μοντελοποίηση του μονολιθικού κίονα έγινε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE. Για τη δημιουργία του μοντέλου στο Abaqus/CAE επιλέχθηκε τύπο σώματος discrete rigid, καθώς έγινε θεώρηση ότι το σώμα είναι τελείως άκαμπτο. Ακόμα, για τη δημιουργία της βάσης –έδαφος επιλέχθηκε η δημιουργία τύπο σώματος shell. Αρχικά για τον ορισμό της μάζας και των αδρανειακών χαρακτηριστικών του κίονα, όπως είναι η στροφική ροπή αδράνειας κατά τους τρεις άξονες έγινε προσέγγιση του κέντρου βάρους. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του κίονα είναι στα πρότυπα του Ναού της Αφαίας. Επίσης επιλέχθηκε σαν βασικό υλικό το μάρμαρο, με ειδικό βάρος $27,5 \text{ t/m}^3$. Η γεωμετρία του κίονα είναι κóλουρου κώνου με μειούμενη διάμετρος με μεγάλη διάμετρο 1 m και μικρή διάμετρο 0,75m η οποία καταλήγει σε ένα κιονόκρανο διαστάσεων 1,15m x 1,15m. Το ύψος του κίονα είναι 5m. Τέλος, η μάζα και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του κίονα καταγράφονται στο παρακάτω πίνακα:

Σχήμα 9.1 Χαρακτηριστικά μονοσπόνδουλου κίονα.

Μάζα (t)	8.433
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x (t m ²)	16.5818
Στροφική ροπή αδράνειας κατά y (t m ²)	16.5818
Στροφική ροπή αδράνειας κατά z (t m ²)	1.18441



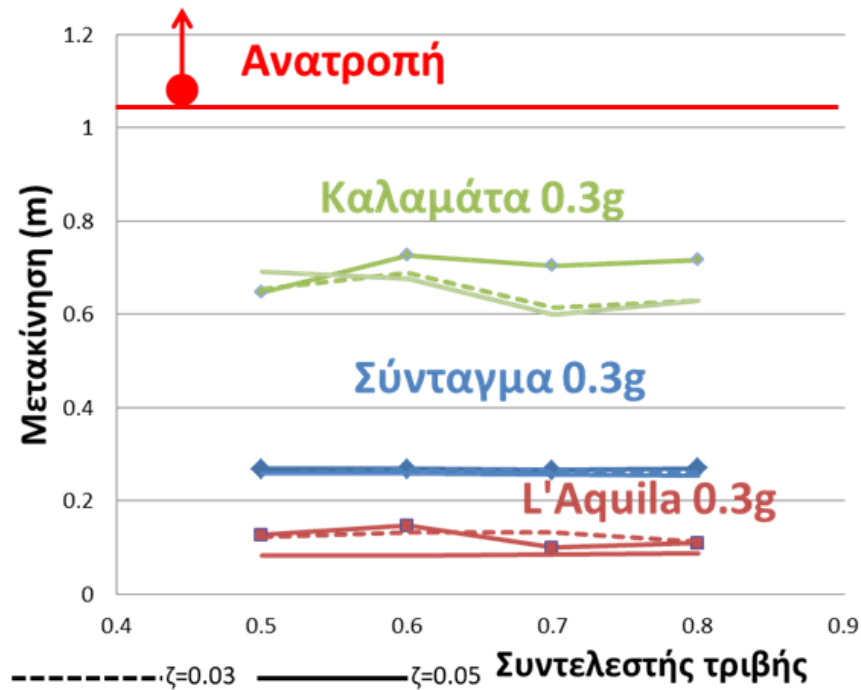
Σχήμα 9.2 Μονοσπόνδυλος κίονας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.

9.2 Διαγράμματα και αποτελέσματα

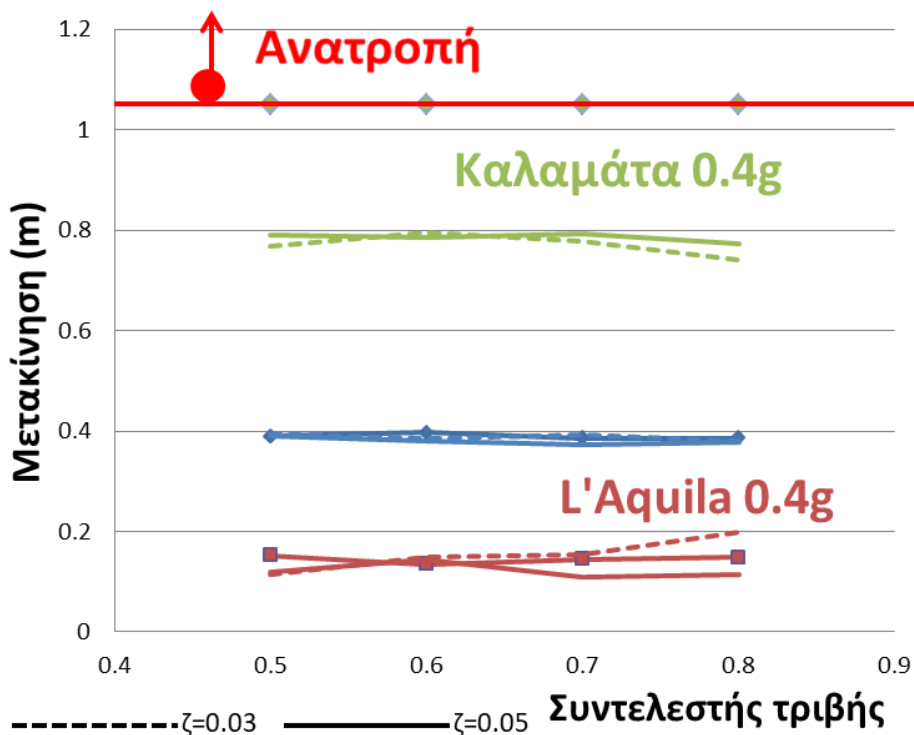
Το μοντέλο του μονοσπόνδυλου κίονα υποβλήθηκε σε ένα εύρος σεισμών στη βάση του. Συγκεκριμένα, οι σεισμικές διεγέρσεις οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι ο σεισμός στη L' Aquila του 2009 ,ο σεισμός στη Καλαμάτα το 1986 και ο σεισμός της Πάρνηθα το 1999. Για την ανάλυση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων οι επιταχύνσεις των σεισμών μεγεθύνθηκαν σε σχέση με τις μέγιστες επιταχύνσεις τους σε 0.3g και 0.4g. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με διάφορες τιμές συντελεστή τριβής. Συγκεκριμένα οι συντελεστές τριβής που ελήφθησαν υπ' όψιν είναι 0.5,0.6,0.7 και 0.8 .Επίσης το μοντέλο αναλύθηκε για συντελεστή απόσβεσης 0% ,3% και 5%. Στη συνέχεια μορφώθηκαν τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνησης – συντελεστή απόσβεση. Όσον αφορά τη μετακίνηση ,ελήφθη υπ' όψιν μέγιστες σχετικές μετακινήσεις μόνο του κίονα, χωρίς να συμπεριληφθούν οι εδαφικές μετακινήσεις. Σε μετακίνηση 1,05 m υπάρχει ανατροπή της κατασκευής. Συνεπώς όταν οι μετακινήσεις ξεπερνούν τη κόκκινη γραμμή σημαίνει ότι η κατασκευή έχει ανατραπεί. Τέλος ,οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και με περιορισμό της εκτός επιπέδου κίνησης ,αφήνοντας ελεύθερο τον κίονα να κινηθεί μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση x .Και σε αυτή τη περίπτωση ακολούθησε η μόρφωση των διαγραμμάτων μετακίνηση – συντελεστή τριβής και μετακίνηση –συντελεστή απόσβεση.

9.2.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνηση – απόσβεση για τις σεισμικές διεγέρσεις L' Aquila 0.3g -0.4g, Καλαμάτα 0.3g -0.4g και Πάρνηθα 0.3g -0.4g (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός του Συντάγματος) :



Σχήμα 9.3 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g

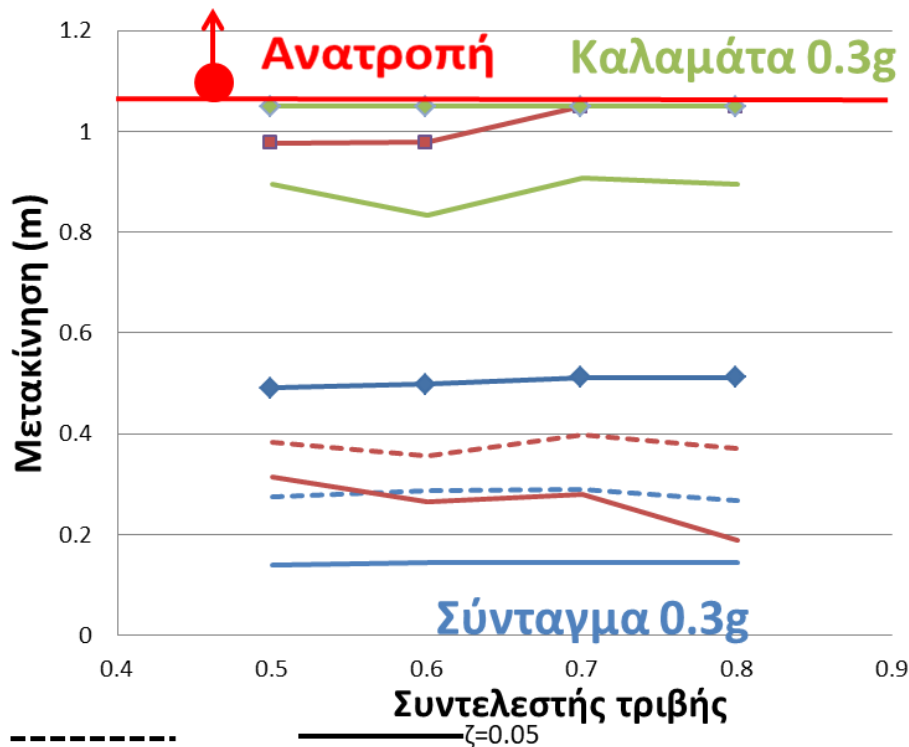


Σχήμα 9.4 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g

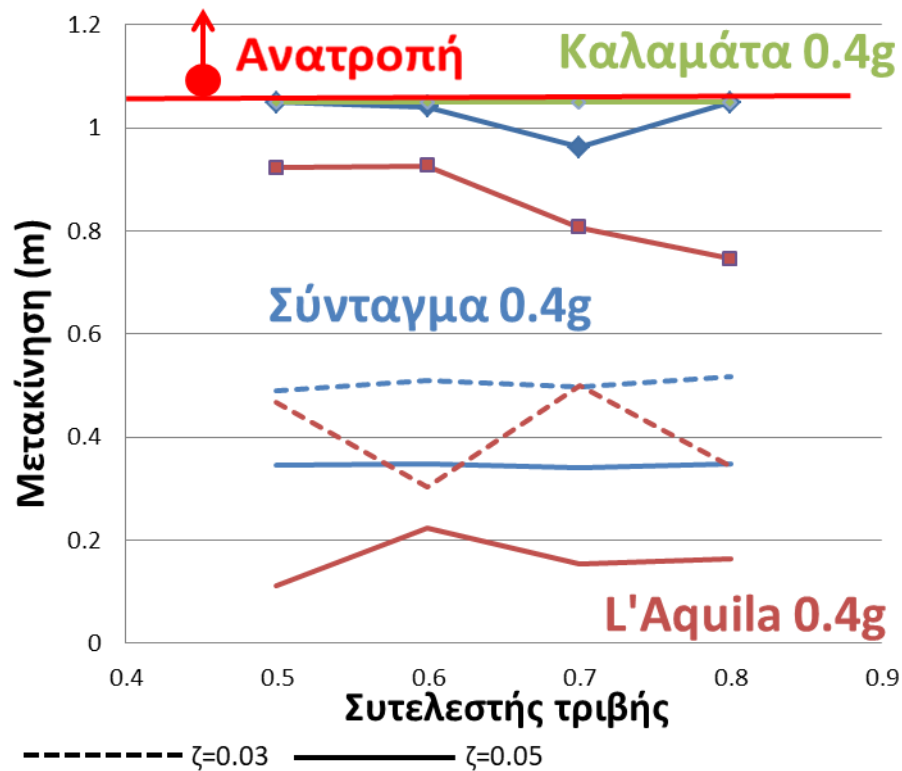
Παρατηρώντας τα διαγράμματα για τις σεισμικές διεγέρσεις σε τιμές επιταχύνσεων 0.3g και 0.4g βλέπουμε ότι το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού έχει οδηγήσει σε μεγάλες διαφορές στις μετακινήσεις. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι η σεισμική διέγερση Καλαμάτα και για τις δύο τιμές των επιταχύνσεων έχει οδηγήσει στις πιο μεγάλες μετακινήσεις σε σχέση με τους άλλους δύο σεισμούς. Ενώ είναι πασιφανές και από τα δύο διαγράμματα ότι ο σεισμός της L' Aquila έχει οδηγήσει στις μικρότερες μέγιστες σχετικές μετακινήσεις. Ακόμα, από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο συντελεστής απόσβεσης δεν κρίνεται κρίσιμος σχετικά με τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων, πλην μιας περίπτωσης και συγκεκριμένα για το σεισμό Καλαμάτα 0.4g, όπου βλέπουμε ότι για συντελεστή απόσβεσης $\zeta=0\%$ οι μετακινήσεις υπερβαίνουν τις μετακινήσεις που αντιστοιχούν σε τιμές αποσβέσεων μη μηδενικές. Τέλος, όσον αφορά το συντελεστή τριβής παρατηρούμε ότι η σεισμική απόκριση του μονοσπόνδυλου κίονα επηρεάζεται σε μικρό βαθμό, καθώς η λικνιστική κίνηση προηγείται της ολίσθησης όπως αναμενόταν για τις τιμές των επιταχύνσεων που επιλέξαμε.

9.2.2 Περιορισμένη εκτός επιπέδου κίνηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνηση – απόσβεση για τις σεισμικές διεγέρσεις L' Aquila 0.3g - 0.4g, Καλαμάτα 0.3g - 0.4g και Πάρνηθα 0.3g - 0.4g (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός του Συντάγματος) με περιορισμό στην κίνηση εκτός επιπέδου :



Σχήμα 9.5 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g



Σχήμα 9.6 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g

Από τα παραπάνω διαγράμματα που αφορούν κινήσεις στις οποίες υπάρχει περιορισμός της εκτός επιπέδου κίνησης φαίνεται ότι το συχνοτικό περιεχόμενο όπως ακριβώς και πριν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις. Δεύτερον και σημαντικότερο συμπέρασμα είναι ότι ο συντελεστής απόσβεσης είναι ιδιαίτερα καθοριστικός καθώς βλέπουμε ότι για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις και για όλες τις τιμές των επιταχύνσεων, αύξηση του συντελεστή απόσβεσης σηματοδοτεί μείωση των μετακινήσεων, συμπέρασμα το οποίο δείχνει ότι η εκτός επιπέδου κίνηση παίζει πάρα πολύ σημαντικό ρόλο στην απόκριση της κατασκευής. Τέλος, ο συντελεστής τριβής δεν κρίνεται κρίσιμος, πλην δύο περιπτώσεων για τις σεισμικές διεγέρσεις Σύνταγμα 0.3g για $\zeta=5\%$ και Σύνταγμα 0.4g για $\zeta=0$.




Σχήμα 9.7 Φωτογραφία μονοσπόνδυλου κίονα του Ναού της Αφαίας

10 ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟΣ ΚΙΟΝΑΣ


10.1 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά πολυσπόνδουλου κίονα

Η ανάλυση και η μοντελοποίηση του πολυσπόνδουλου κίονα έγινε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE .Για τη δημιουργία του μοντέλου στο Abaqus/CAE κάθε σπόνδυλος εισήχθη στο πρόγραμμα ως ένας απόλυτο στερεό σώμα και ως άκαμπτο ,για αυτό το λόγο επιλέχθηκε ως τύπο σώματος discrete rigid αντί για deformable .Επίσης ,για τη δημιουργία της βάσης – έδαφος επιλέχθηκε η δημιουργία τύπο σώματος shell .Περισσότερα λεπτομέρειες για τη μοντελοποίηση του μοντέλου στο Abaqus/CAE υπάρχουν στο τέλος της εργασίας στο παράρτημα που ακολουθεί .Αρχικά για τον ορισμό της μάζας και των άλλων αδρανειακών χαρακτηριστικών όπως είναι οι στροφικές ροπές αδράνειας στους τρεις άξονες έγινε ο ορισμός του κέντρου βάρους σε κάθε σπόνδυλο ξεχωριστά .Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του κίονα είναι στα πρότυπα του Ναού της Αφαιάς .Επίσης ,επιλέχθηκε σαν βασικό υλικό το μάρμαρο ,με ειδικό βάρος $27,5 \text{ t/m}^3$.Όσον αφορά της γεωμετρία και τα αδρανειακά στοιχεία του σπονδυλωτού κίονα ,αναφέρονται παρακάτω στα πινακάκια ,στα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά κάθε σπονδύλου .Τέλος το συνολικό ύψος του πολυσπόνδουλου κίονα φτάνει τα 5 m μαζί με το κιονόκρανο το οποίο είναι διαστάσεων $1,15 \times 1,15$ και αποτελείται από έξι σπονδύλους γεωμετρίας κόλουρου κώνου μειούμενης διαμέτρου .

Σχήμα 10.1 Χαρακτηριστικά πρώτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα

	Διάμετρος κάτω (m)	1
	Διάμετρος πάνω (m)	0,88
	Μάζα (t)	1,091
	Στροφική ροπή αδράνειας κατά x	0,0926623
	Στροφική ροπή αδράνειας κατά y	0,0926623
	Στροφική ροπή αδράνειας κατά z	0,154278

Σχήμα 10.2 Χαρακτηριστικά δεύτερου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα

	Διάμετρος κάτω (m)	0,88
	Διάμετρος πάνω (m)	0,85
	Μάζα (t)	1,01
	Στροφική ροπή αδράνειας κατά x	0,0817556
	Στροφική ροπή αδράνειας κατά y	0,0817556
	Στροφική ροπή αδράνειας κατά z	0,098804

Σχήμα 10.3 Χαρακτηριστικά τρίτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα

Διάμετρος κάτω (m)	0,85
Διάμετρος πάνω (m)	0,802
Μάζα (t)	1,21
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x	0,122349
Στροφική ροπή αδράνειας κατά y	0,122349
Στροφική ροπή αδράνειας κατά z	0,109098

Σχήμα 10.4 Χαρακτηριστικά τέταρτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα

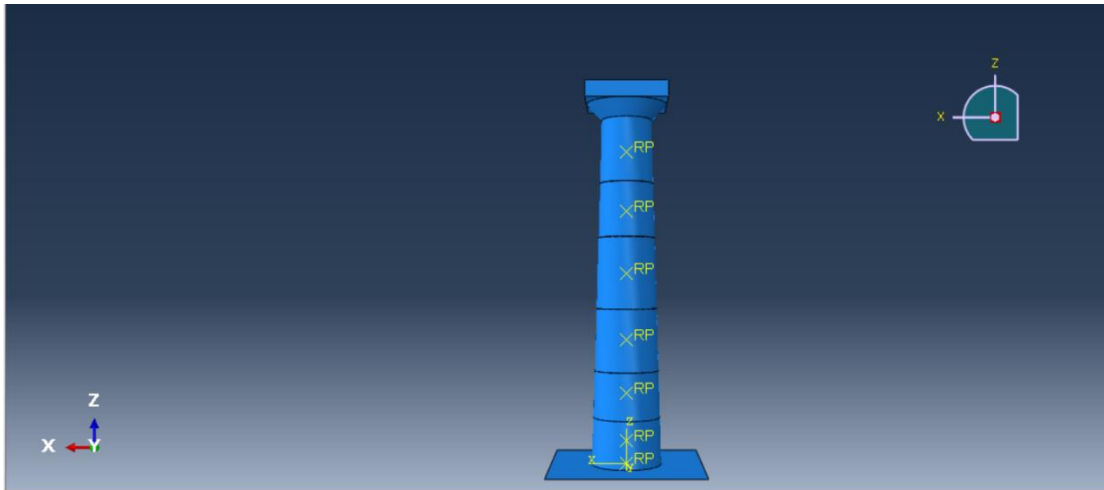
Διάμετρος κάτω (m)	0,802
Διάμετρος πάνω (m)	0,75
Μάζα (t)	1,223
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x	0,139285
Στροφική ροπή αδράνειας κατά y	0,139285
Στροφική ροπή αδράνειας κατά z	0,0984633

Σχήμα 10.5 Χαρακτηριστικά πέμπτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα

Διάμετρος κάτω (m)	0,75
Διάμετρος πάνω (m)	0,708
Μάζα (t)	0,8262
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x	0,0646565
Στροφική ροπή αδράνειας κατά y	0,0646565
Στροφική ροπή αδράνειας κατά z	0,0579293

Σχήμα 10.6 Χαρακτηριστικά έκτου σπόνδουλου του σπονδυλωτού κίονα

Διάμετρος κάτω (m)	0,708
Διάμετρος πάνω (m)	0,66
Μάζα (t)	2,18747
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x	0,0765449
Στροφική ροπή αδράνειας κατά y	0,0765449
Στροφική ροπή αδράνειας κατά z	0,0532039



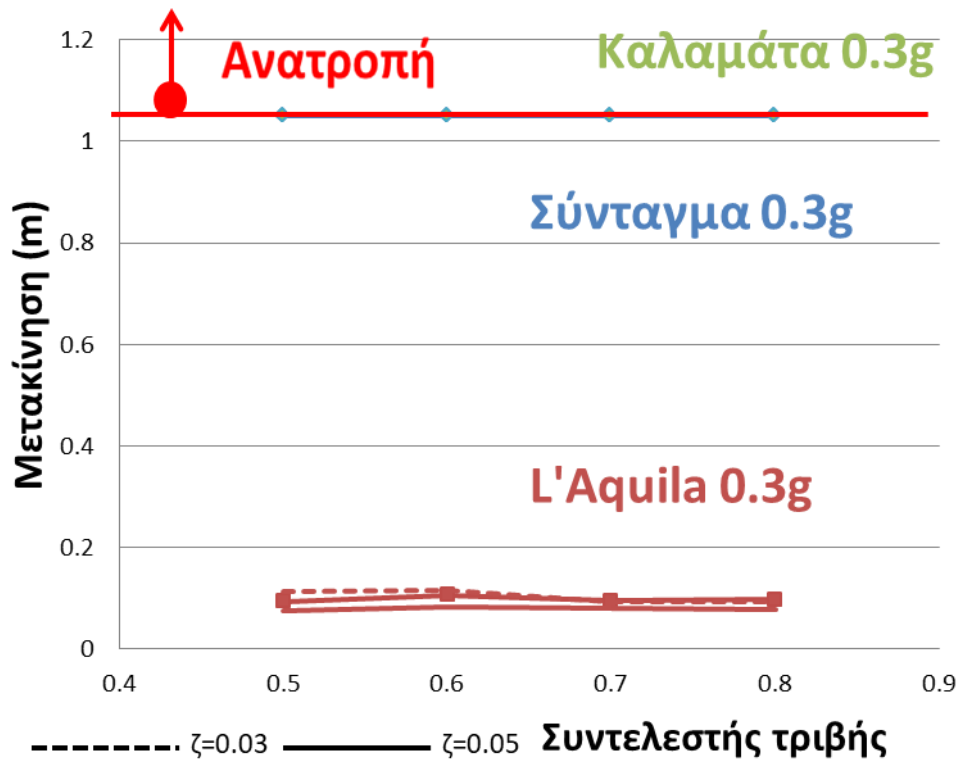
Σχήμα 10.7 Πολυσπόνδυλος κίονας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE .

10.2 Διαγράμματα και αποτελέσματα

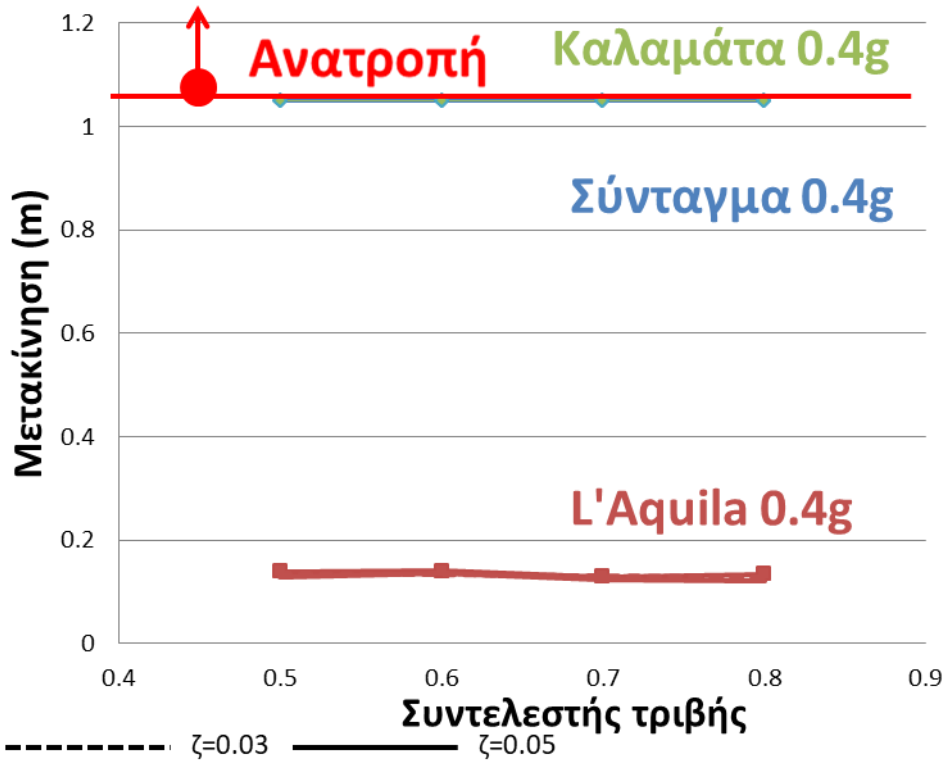
Το μοντέλο του πολυσπόνδυλου κίονα υποβλήθηκε σε ένα εύρος σεισμών στη βάση του. Συγκεκριμένα, οι σεισμικές διεγέρσεις οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι ο σεισμός στη L'Aquila του 2009, ο σεισμός στη Καλαμάτα το 1986 και ο σεισμός της Πάρνηθα το 1999. Για την ανάλυση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων οι επιταχύνσεις των σεισμών μεγεθύνθηκαν σε σχέση με τις μέγιστες επιταχύνσεις τους σε 0.3g και 0.4g. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με διάφορες τιμές συντελεστή τριβής. Συγκεκριμένα οι συντελεστές τριβής που ελήφθησαν υπ' όψιν είναι 0.5, 0.6, 0.7 και 0.8. Επίσης το μοντέλο αναλύθηκε για συντελεστή απόσβεσης 0%, 3% και 5%. Στη συνέχεια μορφώθηκαν τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνησης – συντελεστή απόσβεσης. Όσον αφορά τη μετακίνηση, ελήφθη υπ' όψιν μέγιστες σχετικές μετακινήσεις μόνο του κίονα, χωρίς να συμπεριληφθούν οι εδαφικές μετακινήσεις. Σε μετακίνηση 1,05 m υπάρχει ανατροπή της κατασκευής. Συνεπώς όταν οι μετακινήσεις ξεπερνούν τη κόκκινη γραμμή σημαίνει ότι η κατασκευή έχει ανατραπεί. Τέλος, οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και με περιορισμό της εκτός επιπέδου κίνησης, αφήνοντας ελεύθερο τον κίονα να κινηθεί μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση x. Και σε αυτή τη περίπτωση ακολούθησε η μόρφωση των διαγραμμάτων μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνησης – συντελεστή απόσβεσης.

10.2.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνηση – απόσβεση για τις σεισμικές διεγέρσεις L' Aquila 0.3g - 0.4g, Καλαμάτα 0.3g - 0.4g και Πάρνηθα 0.3g - 0.4g (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός του Συντάγματος) :



Σχήμα 10.8 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g

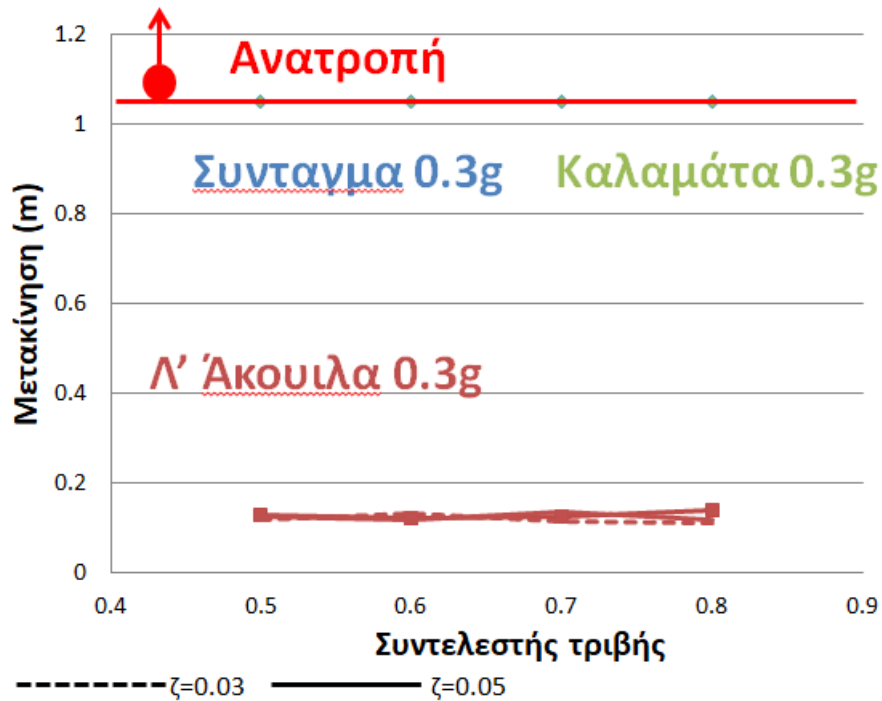


Σχήμα 10.9 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g

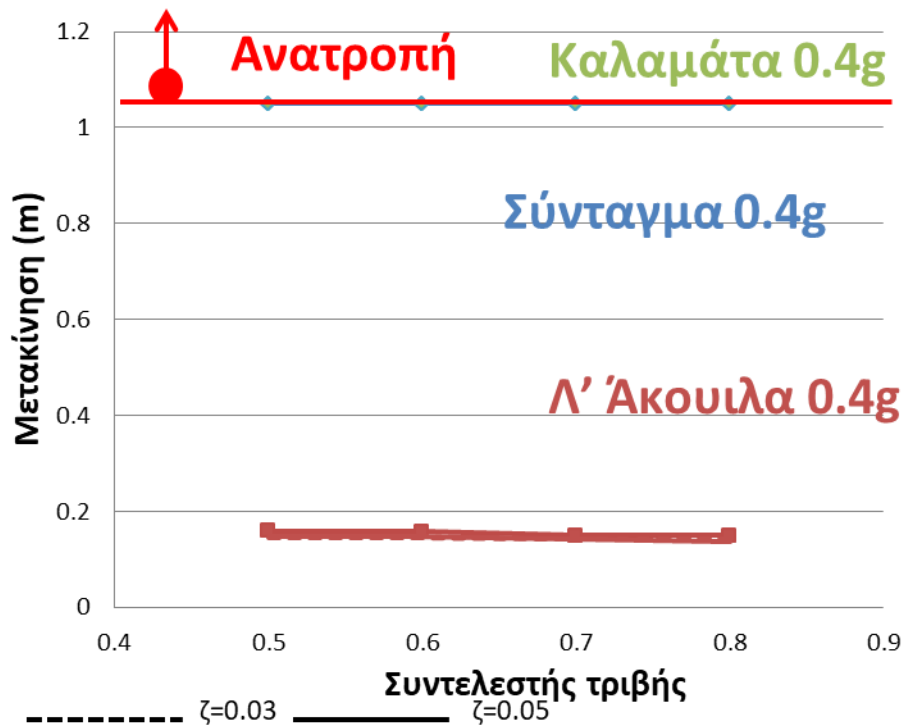
Από τα διαγράμματα του πολυσπόνδου κίονα μετακίνησης – συντελεστή τριβής φαίνεται ότι η κατασκευή ανετράπη στις δύο από τις τρεις διεγέρσεις εκτός από το σεισμό της L'Aquila, κάτι το οποίο δικαιολογείται από το μικρό συχνοτικό περιεχόμενο του συγκεκριμένου σεισμού. Ακόμα, όσον αφορά το συντελεστή τριβής, αυτός δε φαίνεται να είναι κρίσιμος καθώς από τα διαγράμματα φαίνεται ότι δεν επηρεάζονται οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις. Επίσης, όσον αφορά το συντελεστή απόσβεσης δεν κρίνεται κρίσιμος καθώς η επιρροή του στις μέγιστες μετακινήσεις είναι πάρα πολύ μικρή. Συμπέρασμα το οποίο φαίνεται να βγαίνει από τις παραπάνω αναλύσεις του πολυσπόνδου κίονα είναι ότι σε χαμηλότερες τιμές επιταχύνσεων του 0.4g, όπως στη περίπτωση του πρώτου διαγράμματος η επιρροή του συντελεστή απόσβεσης είναι μεγαλύτερη. Περίπτωση που μαρτυρά ένα τέτοιο φαινόμενο είναι για τιμή συντελεστή τριβής 0.5 και 0.6. Σε τιμές μεγαλύτερες, η επιρροή της απόσβεσης είναι ίδια με αυτή που έχει στη περίπτωση ανάλυσης του κίονα για τιμή επιτάχυνσης 0.4g.

10.2.2 Περιορισμένη εκτός επιπέδου κίνηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνηση – απόσβεση για τις σεισμικές διεγέρσεις L' Aquila 0.3g - 0.4g, Καλαμάτα 0.3g - 0.4g και Πάρνηθα 0.3g - 0.4g (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός του Συντάγματος) με περιορισμό στην κίνηση εκτός επιπέδου :

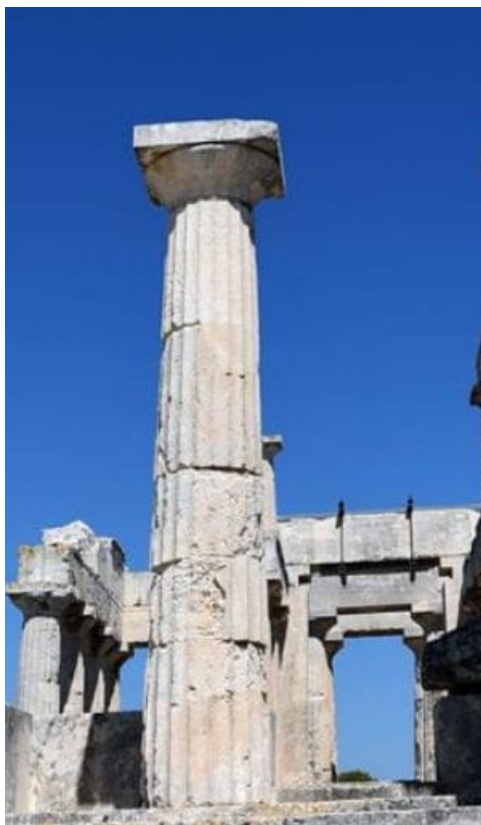


Σχήμα 10.10 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g



Σχήμα 10.11 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g

Παρατηρώντας τα διαγράμματα βλέπουμε ότι ο πολυσπόνδυλος κίονας όπως και στη περίπτωση όπου η κίνηση εκτός επιπέδου ήταν ελεύθερη ανατρέπεται για τις σεισμικές διεγέρσεις Καλαμάτα και Σύνταγμα. Η μόνη περίπτωση σεισμού στον οποίο ο πολυσπόνδυλος κίονας έδωσε αποτελέσματα ήταν ο σεισμός τα Λ' Aquila. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείτε και για τις δύο τιμές επιταχύνσεων. Ακόμα, ένα σημαντικό συμπέρασμα το οποίο είναι εμφανές είναι ότι οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις του σπονδυλωτού κίονα δεν επηρεάστηκαν στις δύο περιπτώσεις αναλύσεων, ακόμα και στη περίπτωση του σεισμού της Λ' Aquila για τον οποίο ο κίονας "έδωσε" μετακινήσεις, η διαφορά ανάμεσα στις δύο κατηγορίες αναλύσεων είναι πάρα πολύ μικρή, με μεγαλύτερες μετακινήσεις να δίνει η ανάλυση με περιορισμό της εκτός επιπέδου κίνησης. Επίσης, ο συντελεστής ούτε σε αυτή τη περίπτωση μοιάζει να είναι κρίσιμος καθώς, δεν φαίνεται να επηρεάζονται οι μέγιστες μετακινήσεις. Τέλος το ίδιο ισχύει και για το συντελεστή απόσβεσης.



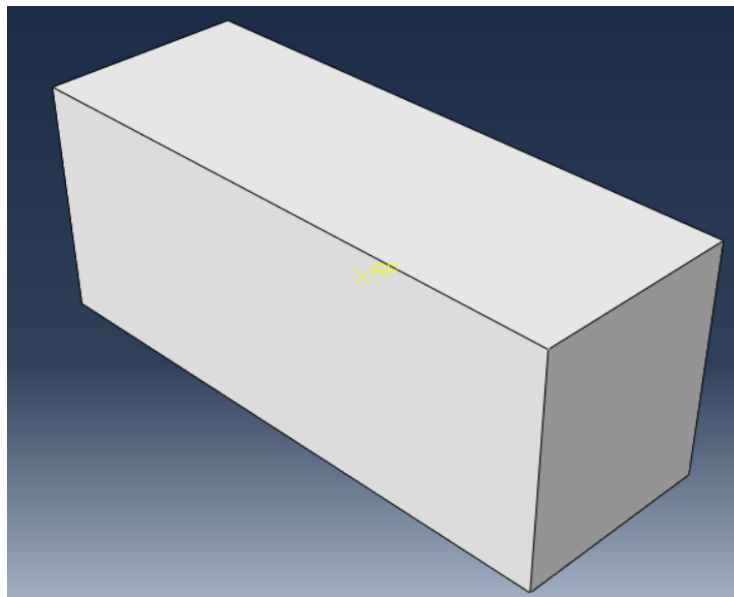
Σχήμα 10.12 Φωτογραφία πολυσπόνδου κίονας του Ναού της Αφαίας .

11 ΜΟΝΟΣΠΟΝΔΥΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

11.1 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά μονοσπόνδυλου πλαισίου

Η ανάλυση και η μοντελοποίηση του μονοσπόνδυλου πλαισίου έγινε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE. Για τη δημιουργία του μοντέλου στο Abaqus/CAE επιλέχθηκε τύπο σώματος discrete rigid, καθώς έγινε θεώρηση ότι το σώμα είναι τελείως άκαμπτο. Ακόμα, για τη δημιουργία της βάσης – έδαφος επιλέχθηκε η δημιουργία τύπος σώματος shell. Αρχικά για τον ορισμό της μάζας και των άλλων αδρανειακών χαρακτηριστικών, όπως είναι η στροφική ροπή αδράνειας και στους τρεις άξονες έγινε προσέγγιση του κέντρου βάρους. Το μονοσπόνδυλο πλαίσιο αποτελείται από δύο μονολιθικούς κίονες και το επιστύλιο. Το επιστύλιο τοποθετήθηκε στα κέντρα βάρους των κιονόκρανων των δύο μονοσπόνδυλων κίονων. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του πλαισίου είναι στα πρότυπα του Ναού της Αφαίας.

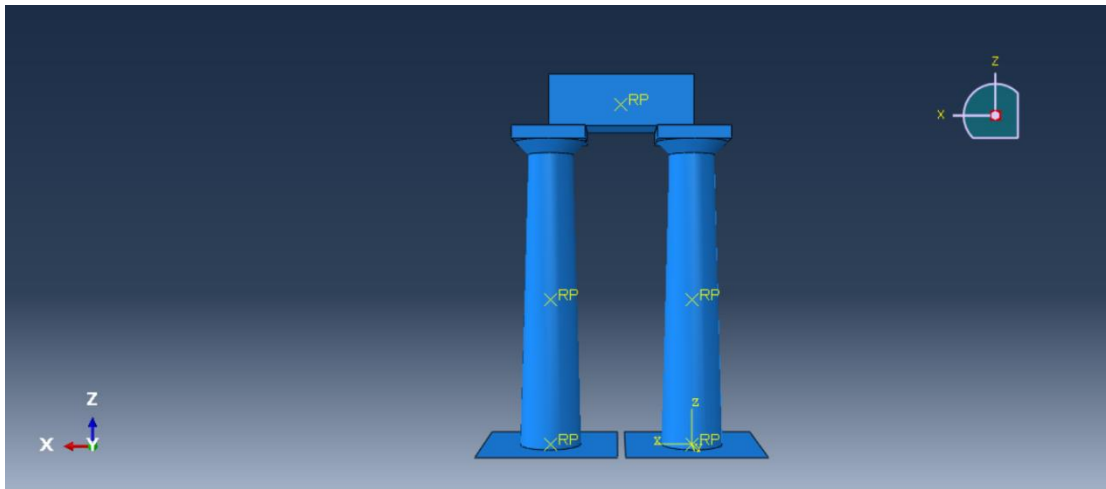
Ουσιαστικά για τη δημιουργία του μοντέλου στο πρόγραμμά, εισήχθησαν τρία στερεά σώματα, δύο μονοσπόνδυλοι κίονες και το επιστύλιο. Σε κάθε σώμα ορίστηκε το κέντρο βάρους και εν συνεχεία η μάζα και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά. Το βασικό υλικό που επιλέχθηκε όπως ακριβώς και στα δύο προηγούμενα μοντέλα είναι το μάρμαρο με ειδικό βάρος $27,5 \text{ t/m}^3$. Η γεωμετρία των δύο μονολιθικών κίονων του πλαισίου είναι ακριβώς ίδια με αυτή του μοντέλου της μονοσπόνδυλης που αναπτύχθηκε παραπάνω. Τέλος, όσον αφορά το βάρος του επιστυλίου, αυτό ελήφθη ίσο με το ημιάθροισμα των μαζών των δύο κίονων. Στο παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι διαστάσεις και τα λοιπά αδρανειακά χαρακτηριστικά του επιστηλίου.



Σχήμα 11.1 Φωτογραφία επιστηλίου μονοσπόνδυλου πλαισίου.

Σχήμα 11.2 Χαρακτηριστικά επιστυλίου μονοσπόνδυλου πλαισίου

Μήκος (m)	2,324
Πλάτος (m)	0,824
Ύψος (m)	1
Μάζα (t)	8
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x (t m ²)	1,12
Στροφική ροπή αδράνειας κατά y (t m ²)	4,055
Στροφική ροπή αδράνειας κατά z (t m ²)	4,26



Σχήμα 11.3 Μονοσπόνδυλο πλαίσιο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.

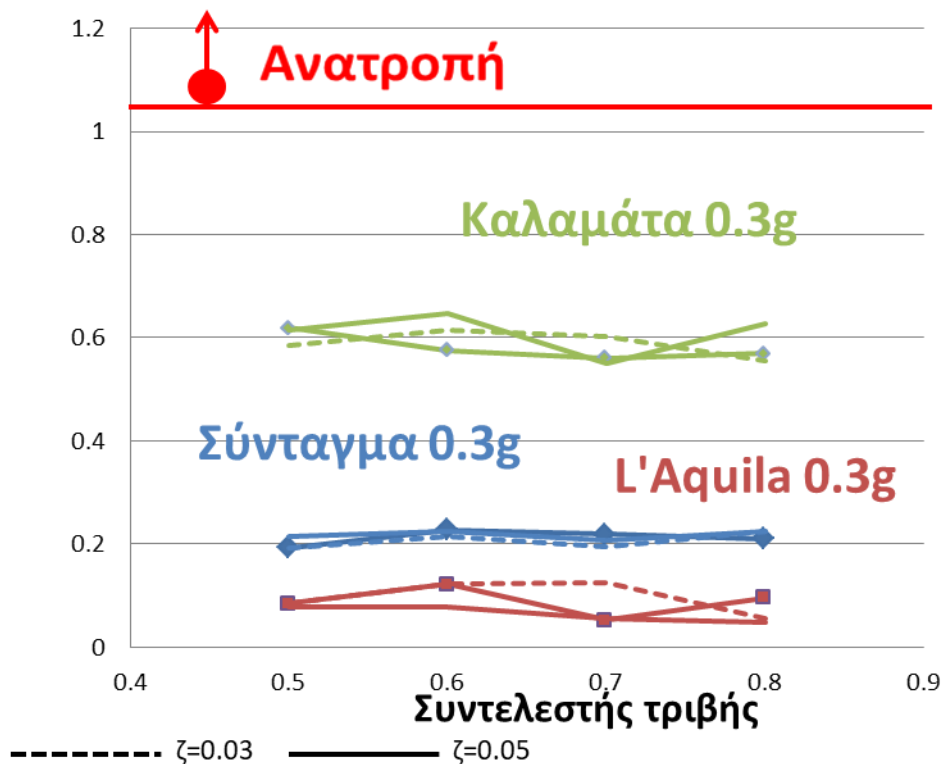
11.2 Διαγράμματα και αποτελέσματα

Το μοντέλο του μονοσπόνδυλου πλαισίου υποβλήθηκε σε ένα εύρος σεισμών στη βάση του .Συγκεκριμένα ,οι σεισμικές διεγέρσεις οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι ο σεισμός στη L'Aquila του 2009 , ο σεισμός στη Καλαμάτα το 1986 και ο σεισμός της Πάρνηθας το 1999 .Για την ανάλυση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων οι επιταχύνσεις των σεισμών μεγεθύνθηκαν σε σχέση με τις μέγιστες επιταχύνσεις τους σε 0.3g και 0.4g .Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με διάφορες τιμές συντελεστή τριβής .Συγκεκριμένα ,οι συντελεστές τριβής που ελήφθησαν υπ ' όψιν είναι 0.5 ,0.6 ,0.7 και 0.8 .Επίσης το μοντέλο αναλύθηκε για συντελεστή απόσβεσης 0% ,3% και 5% .Στη συνέχεια μορφώθηκαν τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνησης – συντελεστή απόσβεση .Όσον αφορά τη μετακίνηση ,ελήφθη υπ ' όψιν μέγιστες σχετικές μετακινήσεις μόνο του κίονα ,χωρίς να συμπεριληφθούν οι εδαφικές μετακινήσεις και το επιστύλιο. Δηλαδή, δεν μετρήθηκαν οι μετακινήσεις τις

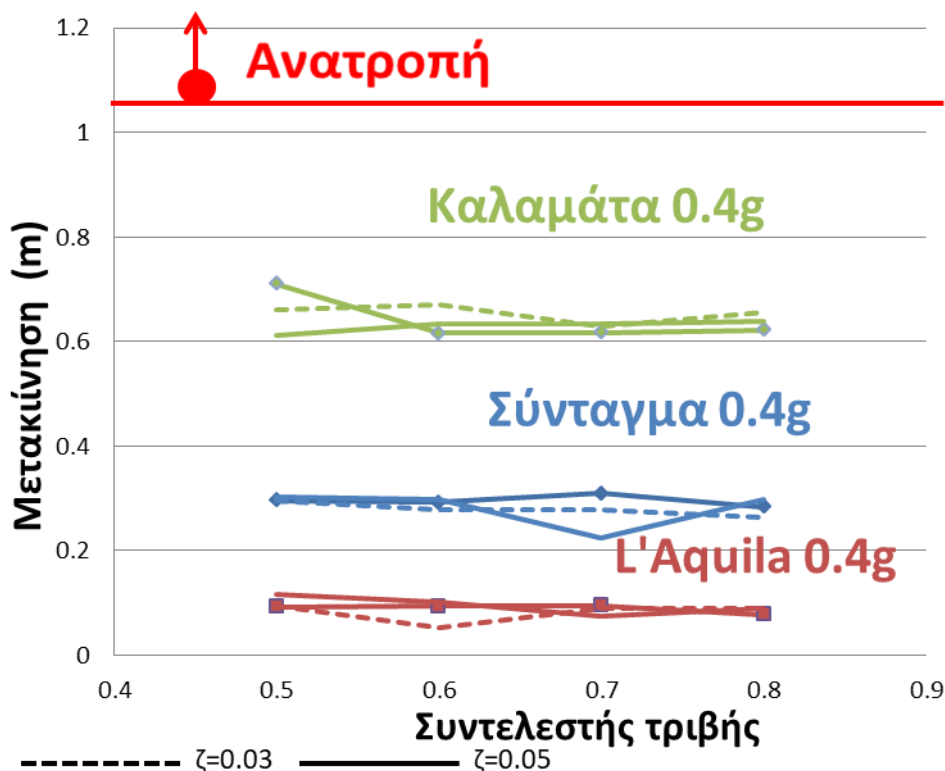
οποίες έχει το επιστύλιο κατά τις αναλύσεις αυτές .Τέλος οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και με περιορισμό της εκτός επιπέδου κίνησης ,αφήνοντας ελεύθερο το μονοσπόνδυλο πλαίσιο να κινηθεί μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση x .Και σε αυτή τη περίπτωση ακολούθησε η μόρφωση των διαγραμμάτων μετακίνηση – συντελεστή τριβής και μετακίνηση – συντελεστή απόσβεσης .

11.2.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνηση – απόσβεση για τις σεισμικές διεγέρσεις L' Aquila 0.3g - 0.4g ,Καλαμάτα 0.3g -0.4g και Πάρνηθα 0.3g -0.4g (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός του Συντάγματος) :



Σχήμα 11.4 Διάγραμμα μετακίνησης –συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g

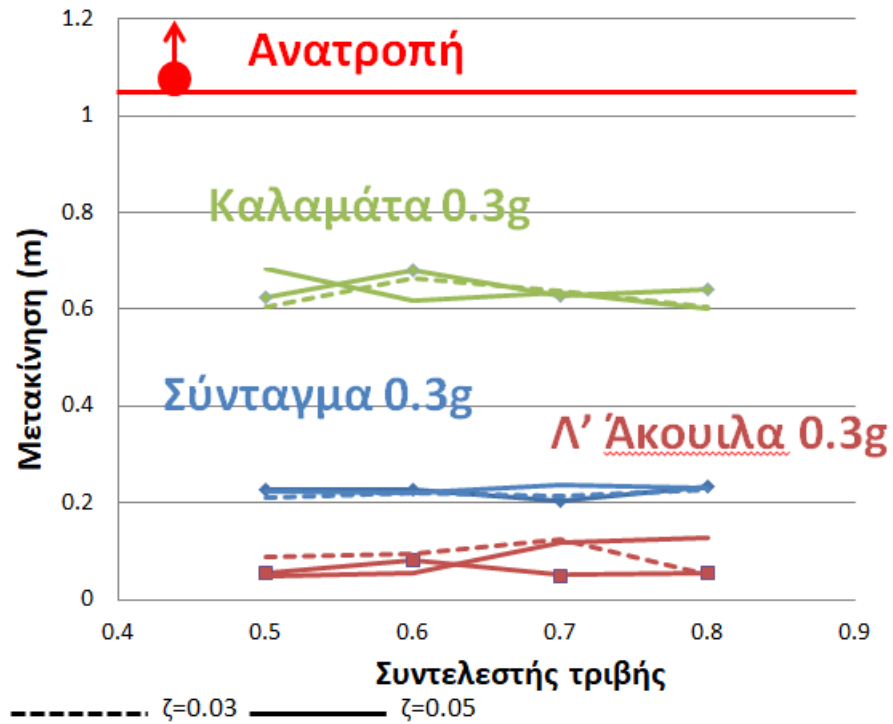


Σχήμα 11.5 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g

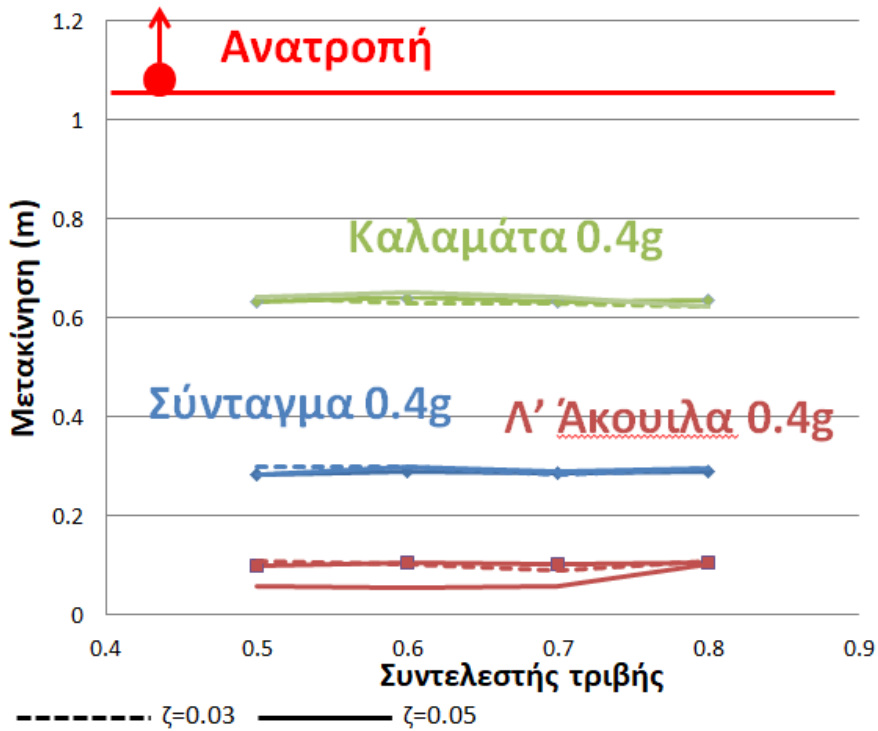
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι και σε αυτή τη περίπτωση του μοντέλου το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού επηρεάζει τις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις του μονοσπόνδυλου πλαισίου. Ο σεισμός Καλαμάτα δίνει τις μεγαλύτερες μετακινήσεις και, ενώ χαμηλές μετακινήσεις δίνει η σεισμική διέγερση της L' Aquila. Ακόμα, όσον αφορά την απόσβεση, αυτή φαίνεται να επηρεάζει τις μετακινήσεις του μοντέλου καθώς για συγκεκριμένες τιμές συντελεστή τριβής όπως στη περίπτωση του σεισμού της Καλαμάτας για $\mu=0.5$ και του Συντάγματος για $\mu=0.7$. Τέλος, όσον αφορά το συντελεστή τριβής, αυτός δείχνει να επηρεάζει περισσότερο τις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις του μονοσπόνδυλου πλαισίου για τις σεισμικές διεγέρσεις Καλαμάτα και L' Aquila για όλες τις τιμές των επιταχύνσεων.

11.2.2 Περιορισμένη εκτός επιπέδου κίνηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνηση – απόσβεση για τις σεισμικές διεγέρσεις L' Aquila 0.3g - 0.4g, Καλαμάτα 0.3g - 0.4g και Πάρνηθα 0.3g - 0.4g (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός του Συντάγματος) με περιορισμό στην κίνηση εκτός επιπέδου :

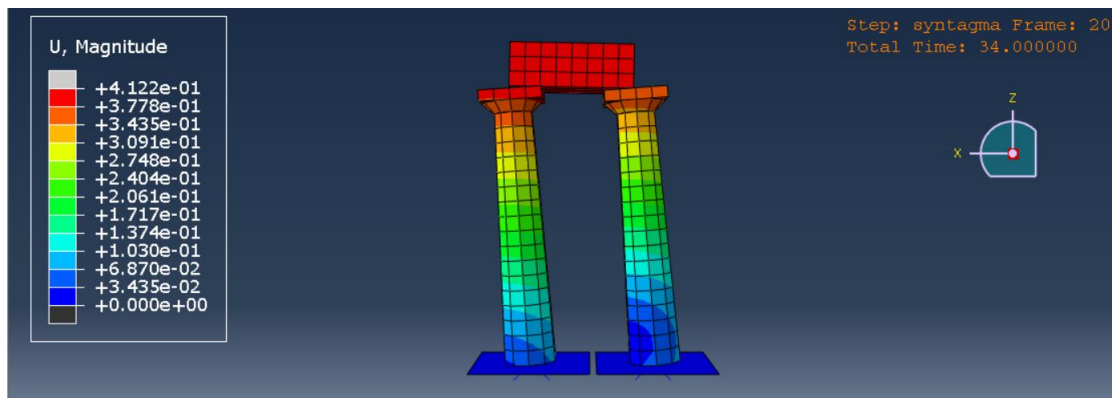


Σχήμα 11.6 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g

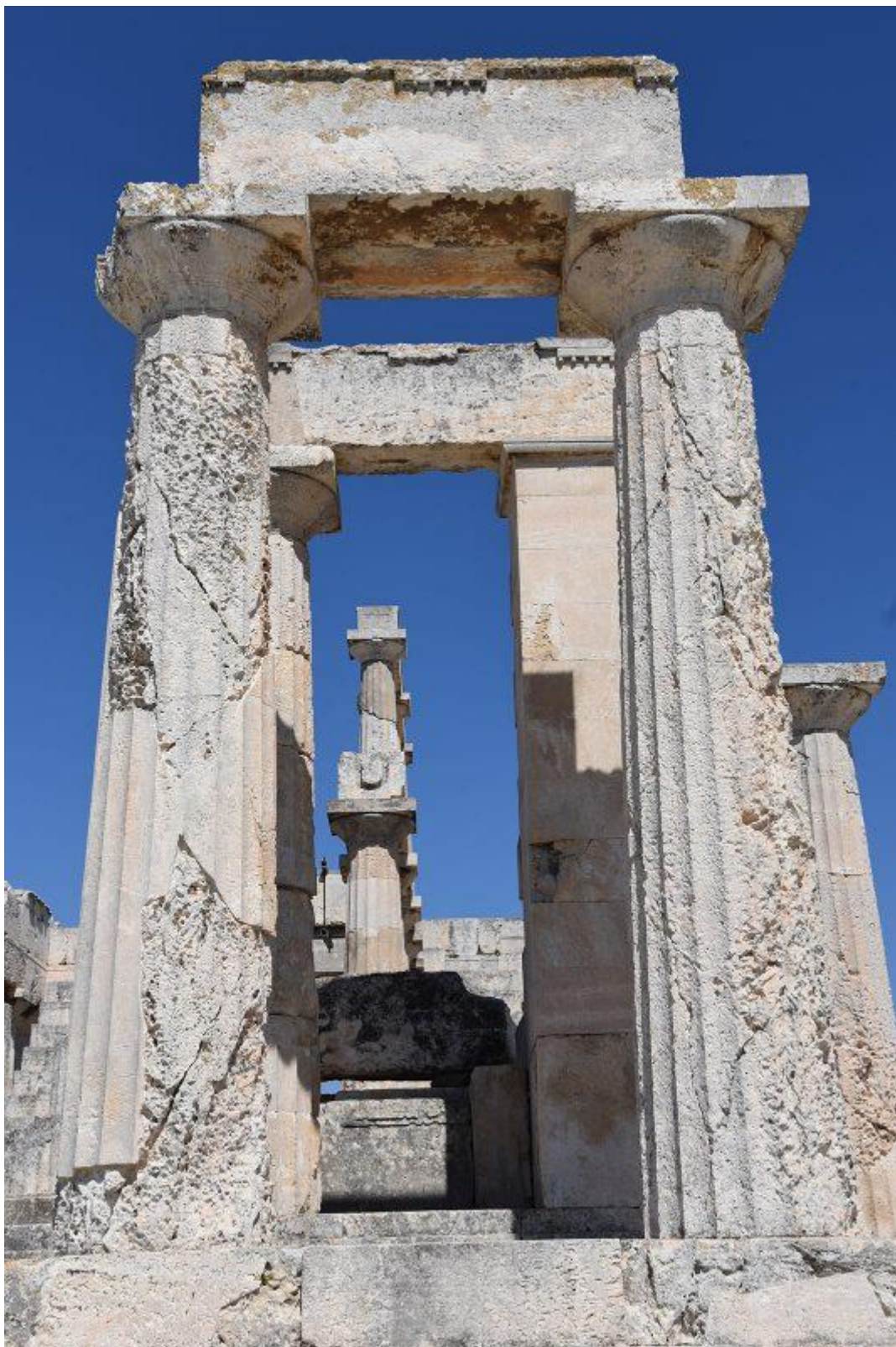


Σχήμα 11.7 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.4g

Παρατηρώντας τα διαγράμματα και συγκρίνοντάς τα με αυτά που αφορούν τις αναλύσεις με ελευθερία στην εκτός επιπέδου κίνηση φαίνεται ότι ο περιορισμός της εκτός επιπέδου κίνησης δεν επηρεάζουν τις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις του μονοσπόνδυλου πλαισίου. Ακόμα, όσον αφορά το συντελεστή απόσβεσης φαίνεται να μην επηρεάζει τις μετακινήσεις σε βαθμό που επηρέαζε τα μοντέλα του μονοσπόνδυλου κίονα, πέραν από μιας περίπτωσης, καθώς για σεισμική διέγερση L'Aquila και για επιτάχυνση 0.4g και για τιμή συντελεστή απόσβεσης 5%, οι μετακινήσεις μειώθηκαν σε σχέση με τις μετακινήσεις για μηδενική απόσβεση και απόσβεση 3% για την ίδια σεισμική διέγερση. Τέλος, όσον αφορά την επιρροή του συντελεστή απόσβεσης στη σεισμική απόκριση του μονοσπόνδυλου πλαισίου βλέπουμε ότι σε μεγαλύτερες επιταχύνσεις όπως στη περίπτωση μας για 0.4g οι μέγιστε σχετικές μετακινήσεις επηρεάζονται λιγότερο σε σχέση τις τιμές των επιταχύνσεων για 0.3g.



Σχήμα 11.8 Φωτογραφία λικνιζόμενου μονοσπόνδυλου πλαισίου στο Abaqus/CAE.

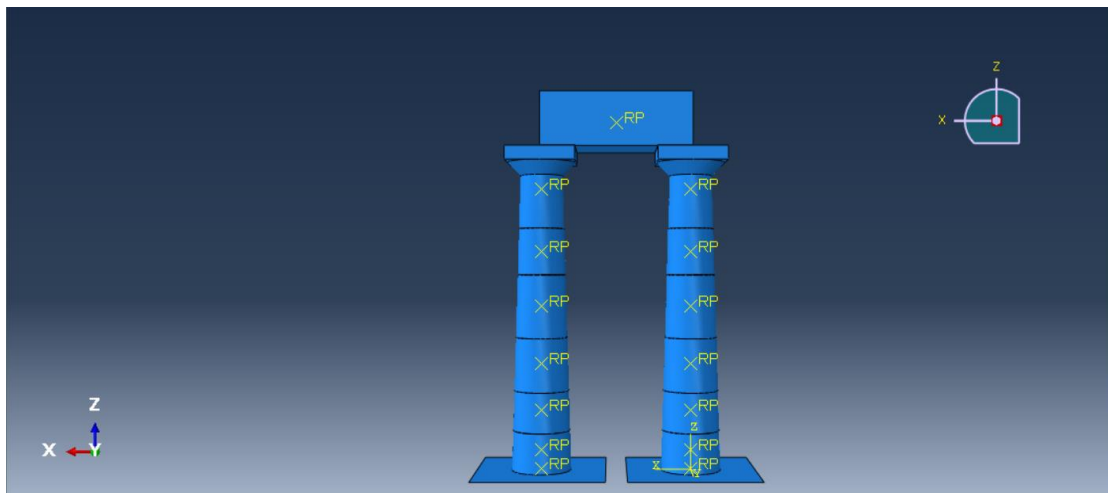


Σχήμα 11.9 Φωτογραφία πλαισιακής κατασκευής του Ναού της Αφαίας

12 ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

12.1 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά πολυσπόνδουλου πλαισίου

Η ανάλυση και η μοντελοποίηση του πολυσπόνδουλου πλαισίου έγινε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE. Για τη δημιουργία του μοντέλου στο Abaqus/CAE επιλέχθηκε τύπος σώματος discrete rigid, καθώς έγινε θεώρηση ότι το σώμα είναι τελείως άκαμπτο. Ακόμα, για τη δημιουργία της βάσης – έδαφος επιλέχθηκε η δημιουργία τύπος σώματος shell. Το πολυσπόνδυλο πλαίσιο αποτελείται από δύο πολυσπόνδουλους κίονες και ένα επιστύλιο. Το επιστύλιο τοποθετήθηκε στα κέντρα βάρους των κιονόκρανων των δύο κίονων, όπως ακριβώς και στη περίπτωση του μονοσπόνδουλου πλαισίου. Κάθε σώμα – σπόνδυλος εισήχθη στο πρόγραμμα σαν ξεχωριστό στερεό σώμα. Για τον ορισμό της μάζας και των άλλων αδρανειακών χαρακτηριστικών, προσδιορίστηκε το κέντρο βάρους κάθε στερεού σώματος, δηλαδή των σπονδύλων και του επιστυλίου. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του κίονα είναι στα πρότυπα του Ναού της Αφαιάς. Επίσης, επιλέχθηκε σαν βασικό υλικό το μάρμαρο, με ειδικό βάρος $27,5 \text{ t/m}^3$. Όσον αφορά τη γεωμετρία και τη διαδικασία μοντελοποίησης των πολυσπόνδουλων κίονων του πλαισίου, είναι ακριβώς ίδια με αυτά του μοντέλου της σπονδυλωτής κολώνας. Τέλος, το βάρος του επιστυλίου ελήφθη ίσο με το ημίθροισμα των μαζών των δύο πολυσπόνδουλων κίονων.



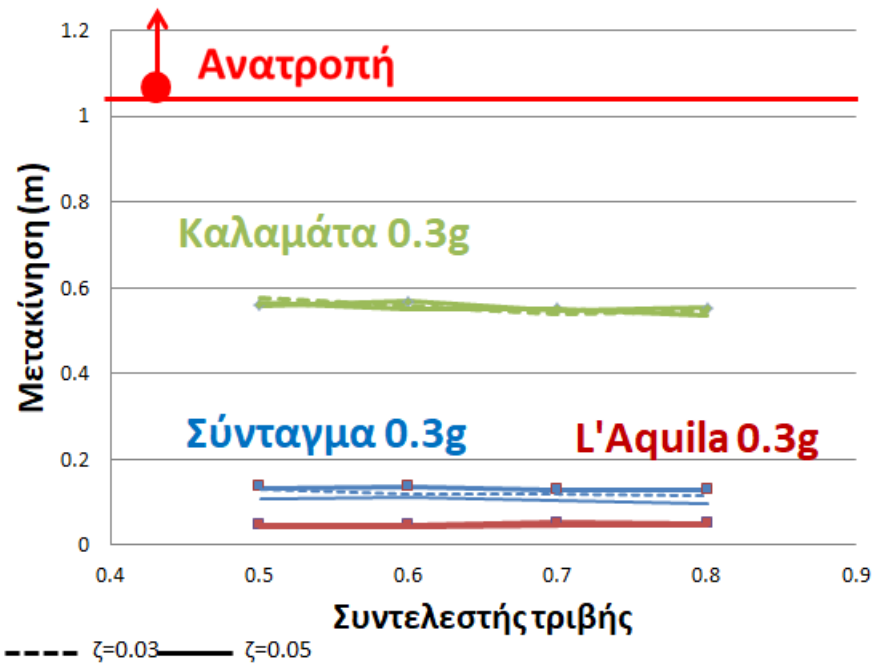
Σχήμα 12.1 Πολυσπόνδυλο πλαίσιο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE.

12.2 Διαγράμματα και αποτελέσματα

Το μοντέλο του πολυσπόνδου πλαισίου υποβλήθηκε σε ένα εύρος σεισμών στη βάση του .Συγκεκριμένα ,οι σεισμικές διεγέρσεις ,οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι ο σεισμός της L'Aquila του 2009 ,ο σεισμός στη Καλαμάτα το 1986 και ο σεισμός της Πάρνηθα το 1999 .Για την ανάλυση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων οι επιταχύνσεις των σεισμών μεγεθύνθηκαν σε σχέση με τις μέγιστες επιταχύνσεις τους σε 0.3g .Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με διάφορες τιμές συντελεστή τριβής .Συγκεκριμένα οι συντελεστές τριβής που ελήφθησαν υπ 'όψιν είναι 0.5 ,0.6 ,0.7 και 0.8 .Επίσης ,το μοντέλο αναλύθηκε για συντελεστή απόσβεσης 0% ,3% και 5% .Στη συνέχεια μορφώθηκαν τα διαγράμματα μετακίνησης –συντελεστή τριβής και μετακίνησης –συντελεστή απόσβεσης .Όσον αφορά τη μετακίνηση ,ελήφθη υπ 'όψιν μέγιστες σχετικές μετακινήσεις μόνο του κίονα ,χωρίς να συμπεριληφθούν οι εδαφικές μετακινήσεις .Τέλος ,σε αντίθεση με τα μοντέλα του μονοσπόνδου κίονα ,του πολυσπόνδου κίονα και του μονοσπόνδου πλαισίου για το μοντέλο του πολυσπόνδου πλαισίου δεν παρουσιάζονται διαγράμματα μετακίνησης –συντελεστή τριβής και μετακίνησης –απόσβεσης καθώς από τις αποτελέσματα των αναλύσεων παρατηρήθηκε ότι οι μετακινήσεις διαφέρουν σε πάρα πολύ μικρό βαθμό σε σχέση με τις μετακινήσεις που δίνει το πολυσπόνδυλο πλαίσιο για ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση .

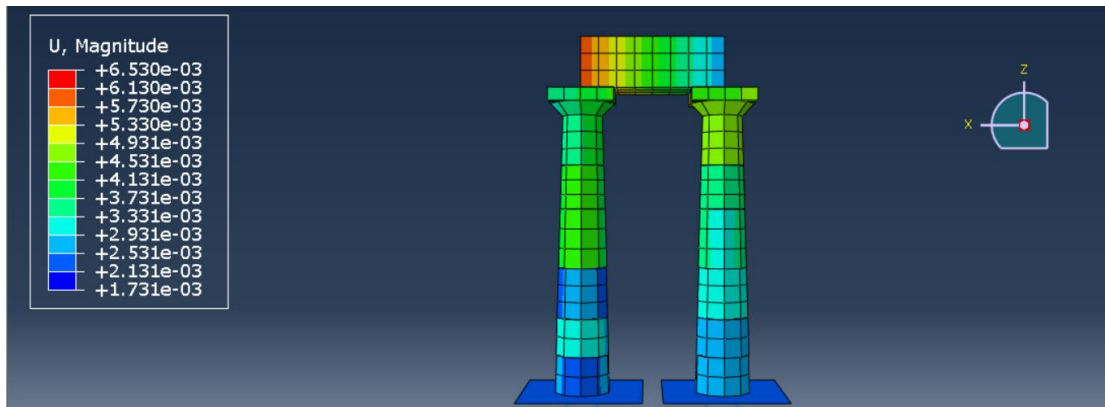
12.2.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνηση – απόσβεση για τις σεισμικές διεγέρσεις L' Aquila 0.3g ,Καλαμάτα 0.3g και Πάρνηθα 0.3g (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός του Συντάγματος) :



Σχήμα 12.2 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστής τριβής για το πολυσπόνδυλο πλαίσιο βλέπουμε ότι και σε αυτή τη περίπτωση το συχνотικό περιεχόμενο επηρεάζει σε μεγάλο τις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις της κατασκευής. Επίσης, όσον αφορά την επιρροή του συντελεστή απόσβεσης στις μέγιστες μετακινήσεις, αυτή φαίνεται να υπάρχει μόνο για τη περίπτωση της σεισμικής διεγέρσεως του Συντάγματος 0.3g, καθώς βλέπουμε ότι για αύξηση του συντελεστή απόσβεσης οι σχετικές μετακινήσεις του κίονα του σπονδυλωτού πλαισίου μειώνονται. Τέλος, όσον αφορά το συντελεστή τριβής, αυτός δε φαίνεται να είναι κρίσιμος, καθώς οι μετακινήσεις που προέκυψαν από τις συγκεκριμένες σεισμικές διεγέρσεις δεν επηρεάστηκαν. Θεωρητικά, θα περιμέναμε ότι αύξηση του συντελεστή τριβής θα προκαλούσε κάποια μείωση στις μέγιστες μετακινήσεις του μοντέλου.

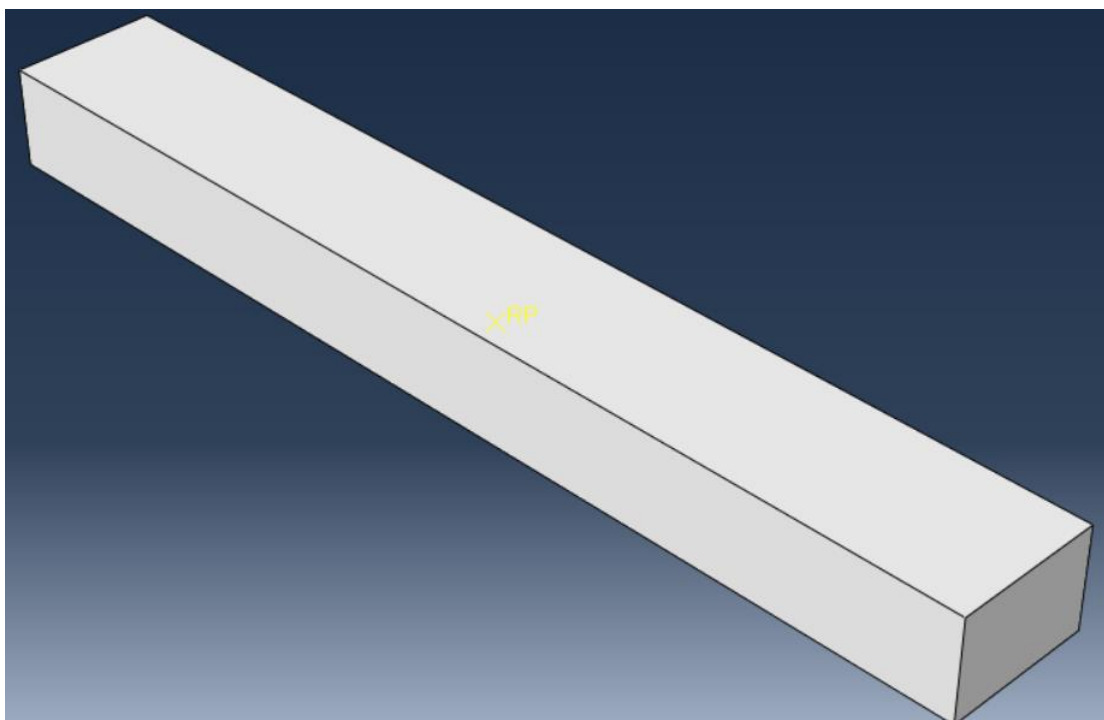


Σχήμα 12.3 Φωτογραφία πολυσπόνδουλου πλαισίου στο Abaqus/CAE .

13 ΚΙΟΝΟΣΤΟΙΧΙΑ

13.1 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά κιονοστοιχίας

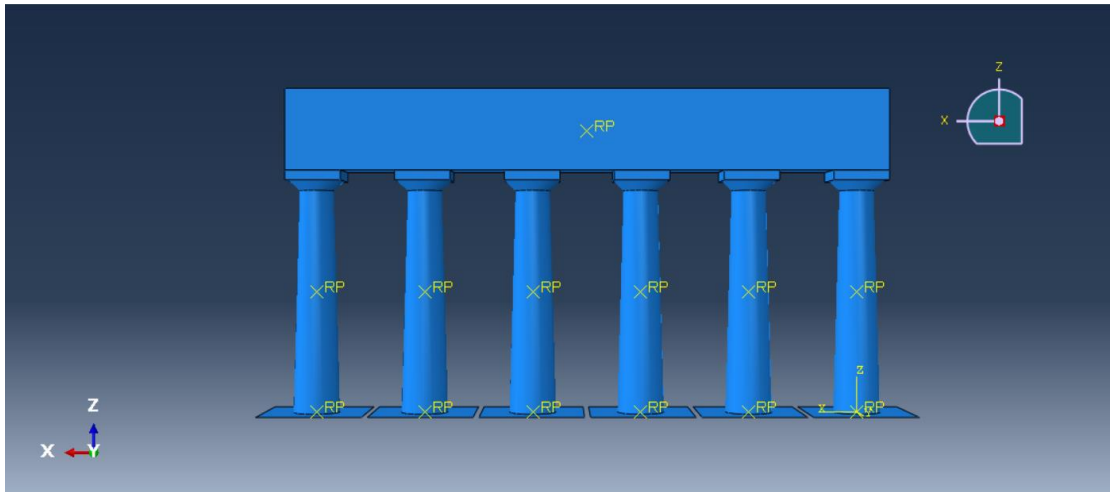
Η ανάλυση και η μοντελοποίηση της κιονοστοιχίας έγινε στο πρόγραμμα Abaqus/CAE .Για τη δημιουργία του μοντέλου στο Abaqus/CAE επιλέχθηκε τύπο σώματος discrete rigid ,καθώς έγινε θεώρηση ότι το σώμα είναι τελείως άκαμπτο .Ακόμα ,για τη δημιουργία της βάσης –έδαφος επιλέχθηκε η δημιουργία τύπο σώματος shell .Η κιονοστοιχία αποτελείται από έξι μονοσπόνδουλους κίονες και το επιστύλιο το οποίο καλύπτει όλη την επιφάνεια των κιονόκρανων των μονολιθικών κίωνων .Κάθε σώμα ,δηλαδή οι έξι μονοσπόνδυλοι κίονες και το επιστύλιο εισήχθη στο πρόγραμμα σαν ξεχωριστό στερεό σώμα .Αρχικά ,για τον ορισμό της μάζας και των λοιπών αδρανειακών χαρακτηριστικών έγινε ο ορισμός του κέντρου μάζας για κάθε σώμα ξεχωριστά .Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά της κιονοστοιχίας είναι στα πρότυπα του Ναού της Αφαίας .Η γεωμετρία και η διαδικασία κατασκευής των μονολιθικών κίωνων στο πρόγραμμα είναι ίδια με τη διαδικασία που αναλύθηκε στο μοντέλο της μονοσπόνδυλης κολώνας .Επίσης ,σαν βασικό υλικό επιλέχθηκε το μάρμαρο με ειδικό βάρος $27,5 \text{ t/m}^3$.Στο παρακάτω πίνακα καταγράφονται τα χαρακτηριστικά και η γεωμετρία του επιστυλίου .



Σχήμα 13.1 Φωτογραφία επιστυλίου κιονοστοιχίας .

Μήκος (m)	12,80
Πλάτος (m)	1,73
Ύψος (m)	1,18
Μάζα (t)	23,559
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x ($t\ m^2$)	8,59261
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x ($t\ m^2$)	327,335
Στροφική ροπή αδράνειας κατά x ($t\ m^2$)	327,173

Σχήμα 13.2 Χαρακτηριστικά επιστυλίου κιονοστοιχίας .



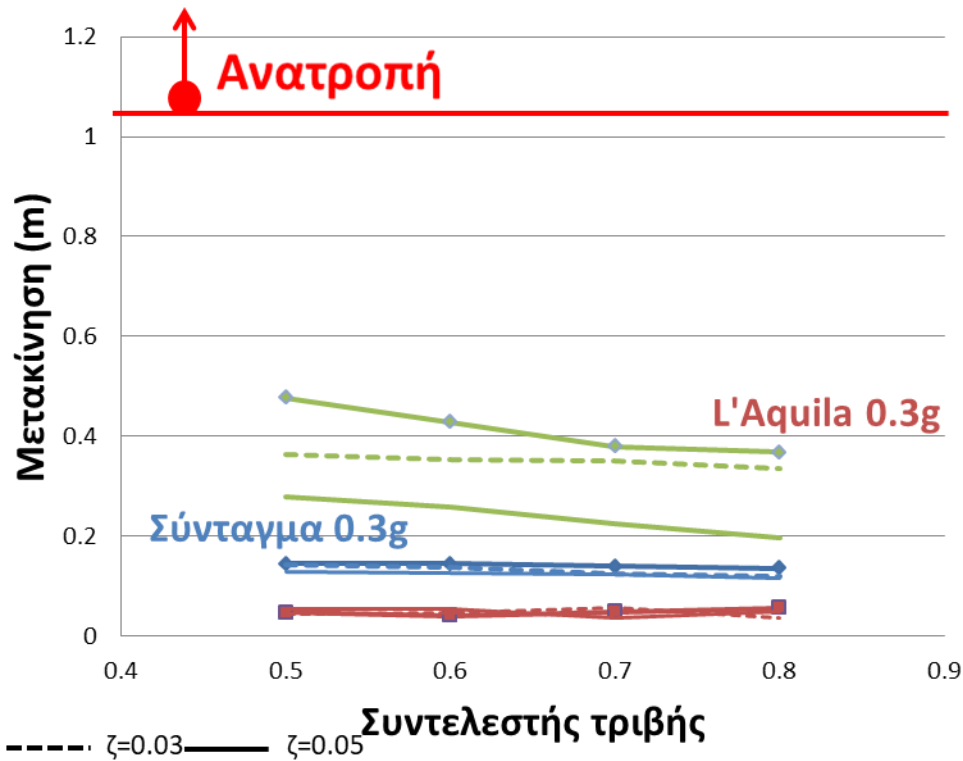
Σχήμα 13.3 Κιονοστοιχία στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE

13.2 Διαγράμματα και αποτελέσματα

Το μοντέλο της κιονοστοιχίας υποβλήθηκε σε ένα εύρος σεισμών στη βάση του. Συγκεκριμένα, οι σεισμικές διεγέρσεις οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι ο σεισμός στη Λ' Aquila του 2009, ο σεισμός στη Καλαμάτα το 1986 και ο σεισμός της Πάρνηθα το 1999. Για την ανάλυση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων οι επιταχύνσεις των σεισμών μεγεθύνθηκαν σε σχέση με τις μέγιστες επιταχύνσεις τους σε 0.3g. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με διάφορες τιμές συντελεστή τριβής. Συγκεκριμένα, οι συντελεστές τριβής που ελήφθησαν υπ' όψιν είναι 0.5, 0.6, 0.7 και 0.8. Επίσης το μοντέλο αναλύθηκε για συντελεστή απόσβεσης 0%, 3% και 5%. Στη συνέχεια μορφώθηκαν τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνησης – συντελεστή απόσβεσης. Όσον αφορά τη μετακίνηση, ελήφθη το υπ' όψιν μέγιστες σχετικές μετακινήσεις μόνο του κίονα, χωρίς να συμπεριληφθούν οι εδαφικές μετακινήσεις και οι μετακινήσεις του επιστύλιου. Τέλος, οι αναλύσεις όπως και στο μοντέλο του πολυσπόνδου πλαισίου πραγματοποιήθηκαν μόνο με ελευθερία στην εκτός επιπέδου κίνηση καθώς παρατηρήθηκε ότι ο περιορισμός της δεν επηρεάζει τις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις. Και έτσι δε κρίθηκε κρίσιμη.

13.2.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνησης – απόσβεση για τις σεισμικές διεγέρσεις Λ' Aquila 0.3g, Καλαμάτα 0.3g και Πάρνηθα 0.3g (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός του Συντάγματος) :



Σχήμα 13.4 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για επιτάχυνση 0.3g

Παρατηρώντας το διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για το μοντέλο της κιονοστοιχίας παρατηρούμε ότι ο συντελεστής απόσβεσης παίζει καθοριστικό ρόλο στις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις της κατασκευής, καθώς όσο αυξάνεται ο συντελεστής, οι μετακινήσεις φαίνεται να μειώνεται. Επίσης επιρροή του συντελεστή απόσβεσης βλέπουμε και για το σεισμό Σύνταγμα, όχι όμως στο βαθμό που εντοπίζεται στη σεισμική διέγερση Καλαμάτα. Τέλος, όσον αφορά την επιρροή του συντελεστή τριβής στις μετακινήσεις της κιονοστοιχίας, βλέπουμε ότι επηρεάζει μόνο τις μέγιστες μετακινήσεις για το σεισμό Καλαμάτα, καθώς αύξηση του συντελεστή τριβής προκαλεί μείωση των μετακινήσεων του φορέα. Στις άλλες περιπτώσεις σεισμών, δεν εντοπίζονται αλλαγές, για αυτό το λόγο δεν κρίνεται κρίσιμος.



Σχήμα 13.5 Φωτογραφία Κιονοστοιχίας του Ναού της Αφαιάς .

14 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, πέραν της ανάλυσης των μοντέλων που είδαμε παραπάνω, παρουσιάζετε και η σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, η σύγκριση γίνεται ως προς το συντελεστή τριβής και το συντελεστή απόσβεσης. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων έχουν δημιουργηθεί, για κάθε σύγκριση, κοινά διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής και μετακίνησης – συντελεστή απόσβεσης για κάθε σεισμική διέγερση που εξετάστηκε, δηλαδή του σεισμού της L’Aquila, του σεισμού της Καλαμάτας και του σεισμού της Πάρνηθας (στα διαγράμματα αναφέρεται ως σεισμός Συντάγματος) για όλες τις τιμές των επιταχύνσεων που έγινε η ανάλυση. Τέλος, οι συγκρίσεις που γίνονται και παρουσιάζονται παρακάτω είναι μεταξύ του μονοσπόνδυλο κίονα και του πολυσπόνδυλου κίονα, μεταξύ του μονοσπόνδυλου κίονα και του μονοσπόνδυλου πλαισίου, μεταξύ του μονοσπόνδυλου κίονα και της κιονοστοιχίας, μεταξύ του πολυσπόνδυλου κίονα και του πολυσπόνδυλου πλαισίου, μεταξύ του μονοσπόνδυλου πλαισίου και της κιονοστοιχίας και τέλος μεταξύ του μονοσπόνδυλου πλαισίου και του πολυσπόνδυλου πλαισίου.

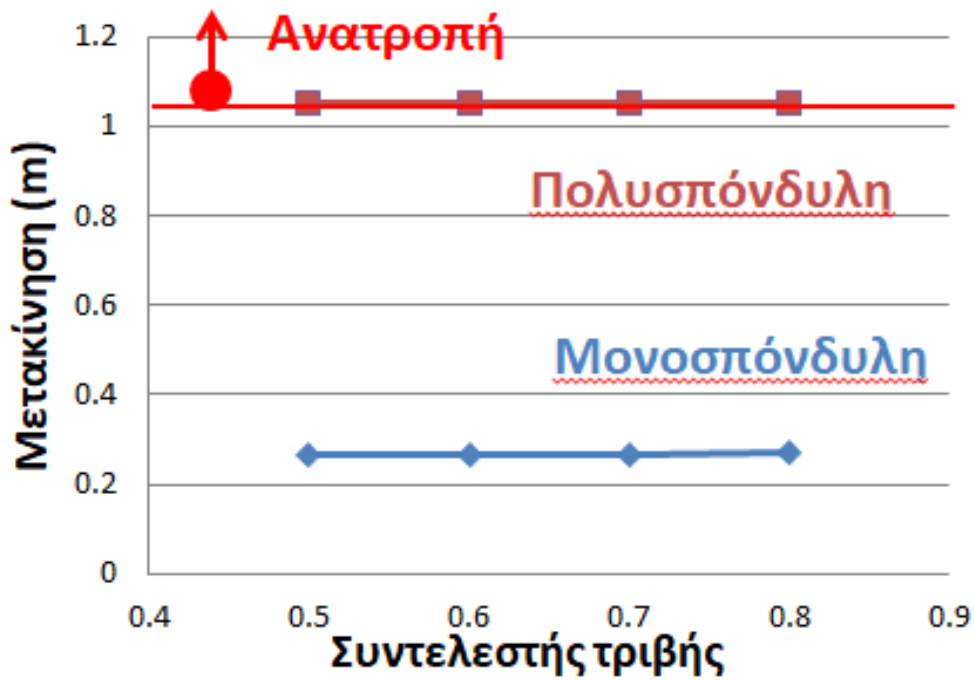
14.1 Σύγκριση μονοσπόνδυλου κίονα – πολυσπόνδυλου κίονα

Όσον αφορά τη σύγκριση του μονοσπόνδυλου κίονα και του πολυσπόνδυλου κίονα, αυτή έγινε με βάση το συντελεστή τριβής και το συντελεστή απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκρίσεις έγιναν για τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του κάθε μοντέλου

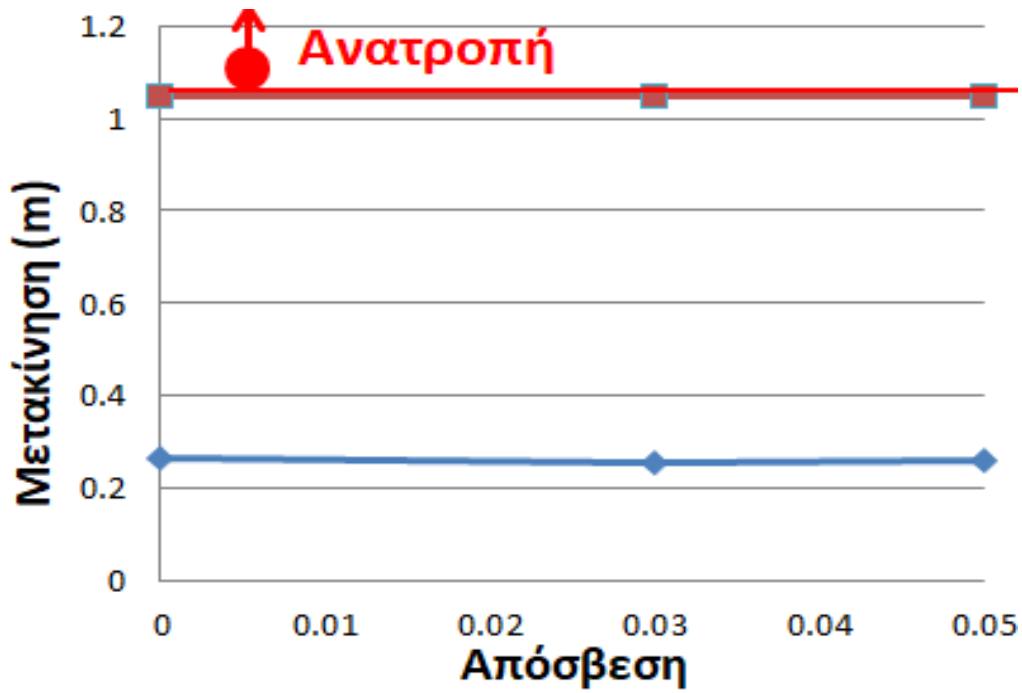
ξεχωριστά και όλες τις τιμές των επιταχύνσεων. Επίσης, τα μοντέλα συγκρίθηκαν και για την ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση αλλά και για την περιορισμένη κίνηση εκτός επιπέδου.

14.1.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

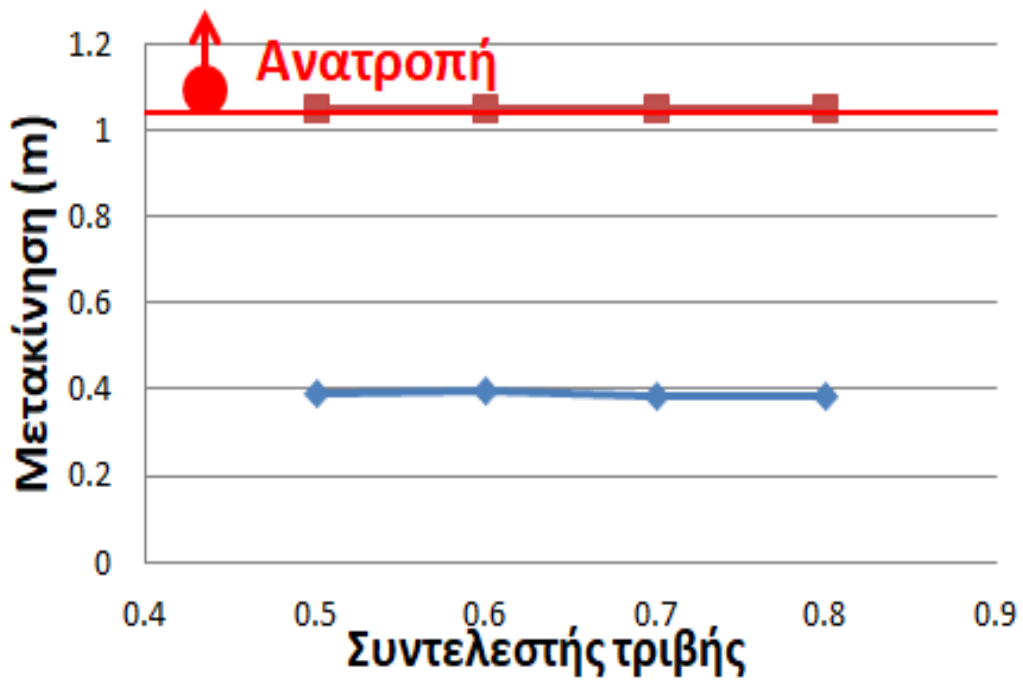
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για τα τις σεισμικές διεγέρσεις Λ' Aquila 0.3g – 0.4g, Καλαμάτα 0.3g-0.4g και Σύνταγμα 0.3g-0.4g :



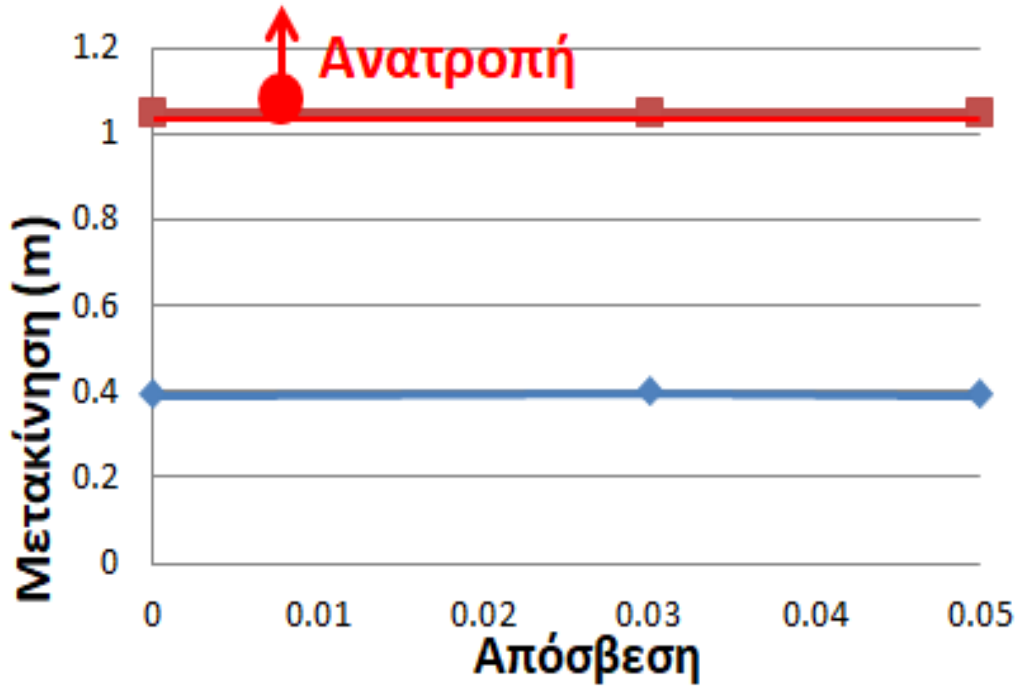
Σχήμα 14.1 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



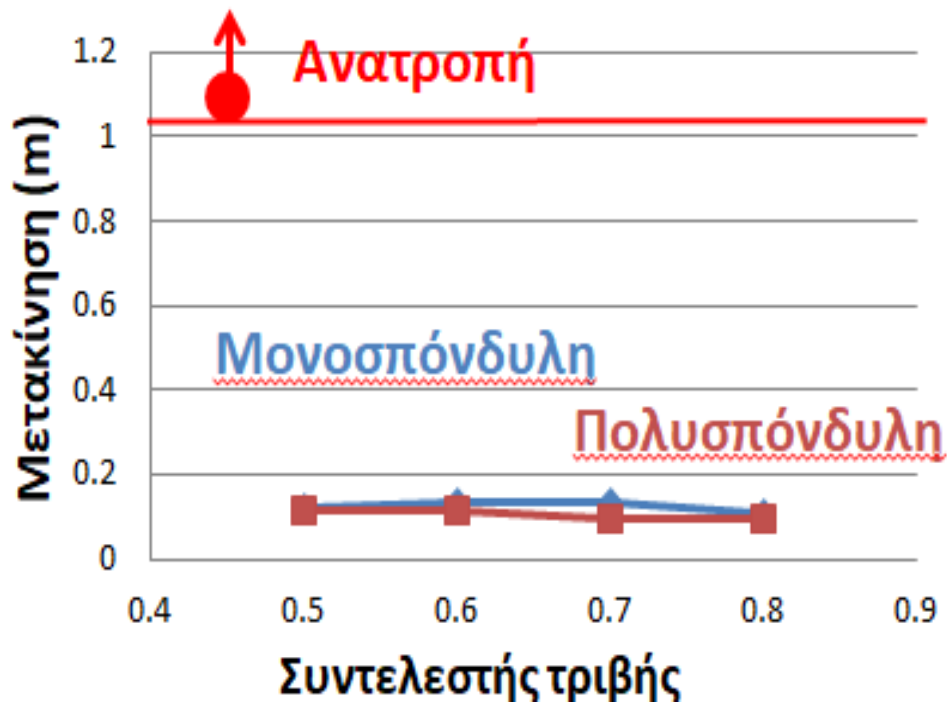
Σχήμα 14.2 Διάγραμμα μετακίνησης – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



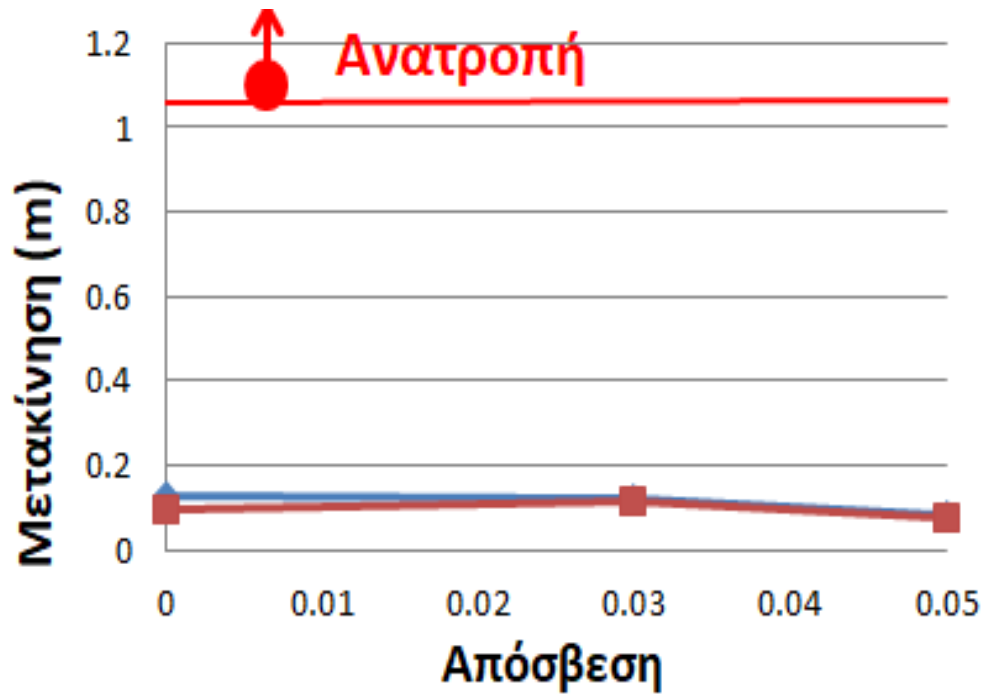
Σχήμα 14.3 Διάγραμμα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.4g



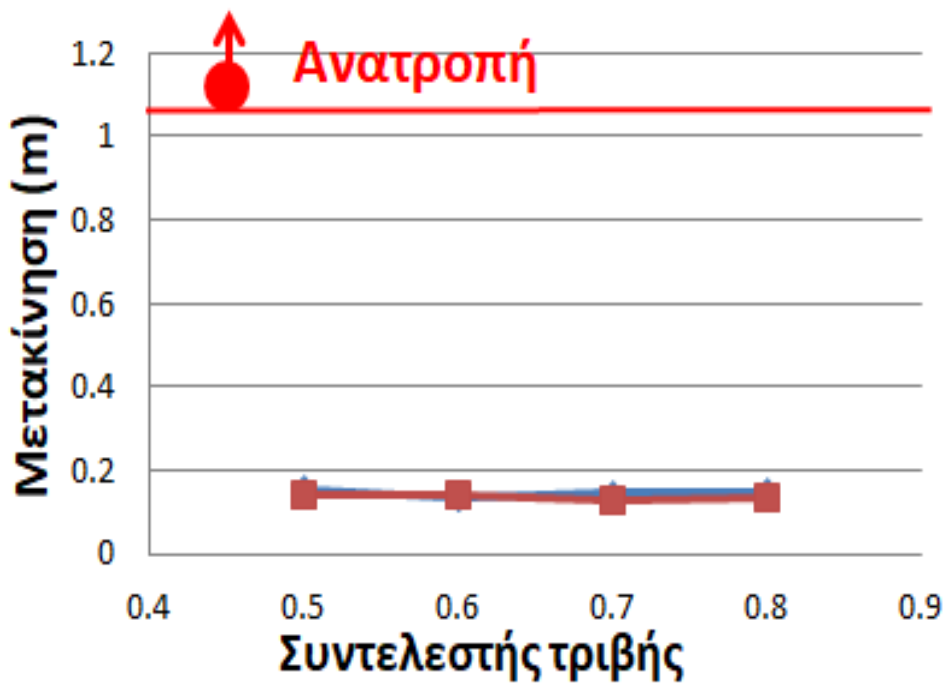
Σχήμα 14.4 Διάγραμμα μετακίνησης – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.4g



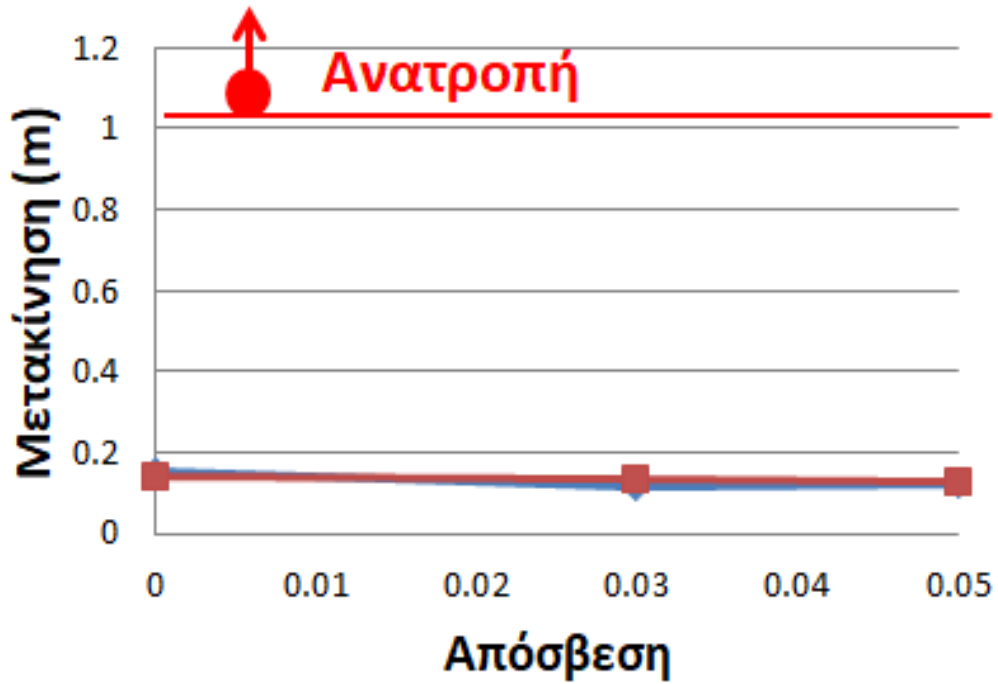
Σχήμα 14.5 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g



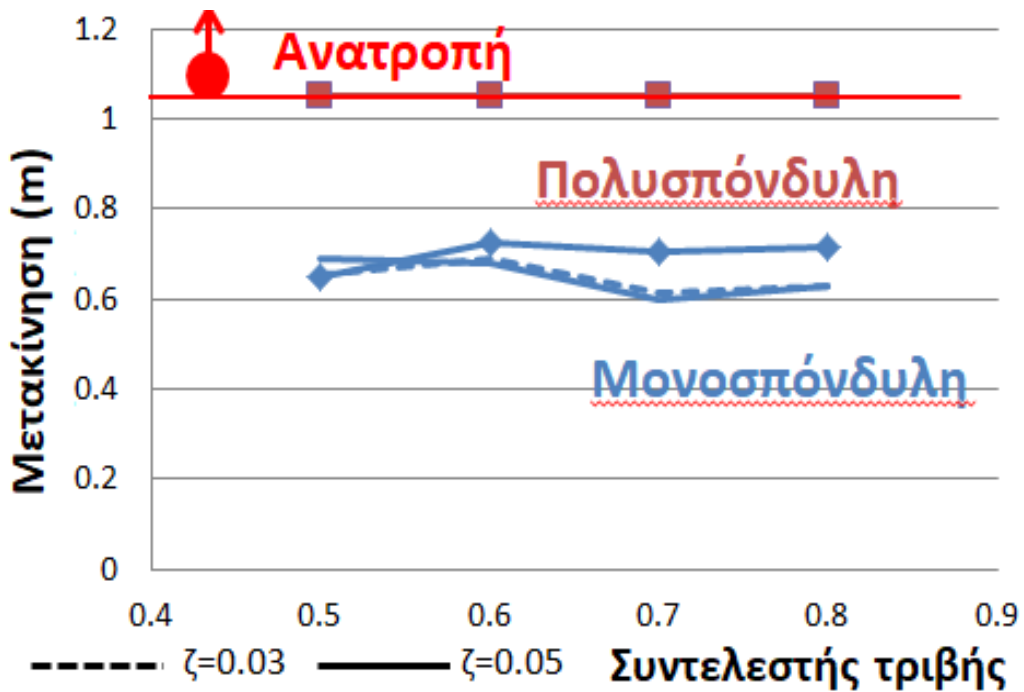
Σχήμα 14.6 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g



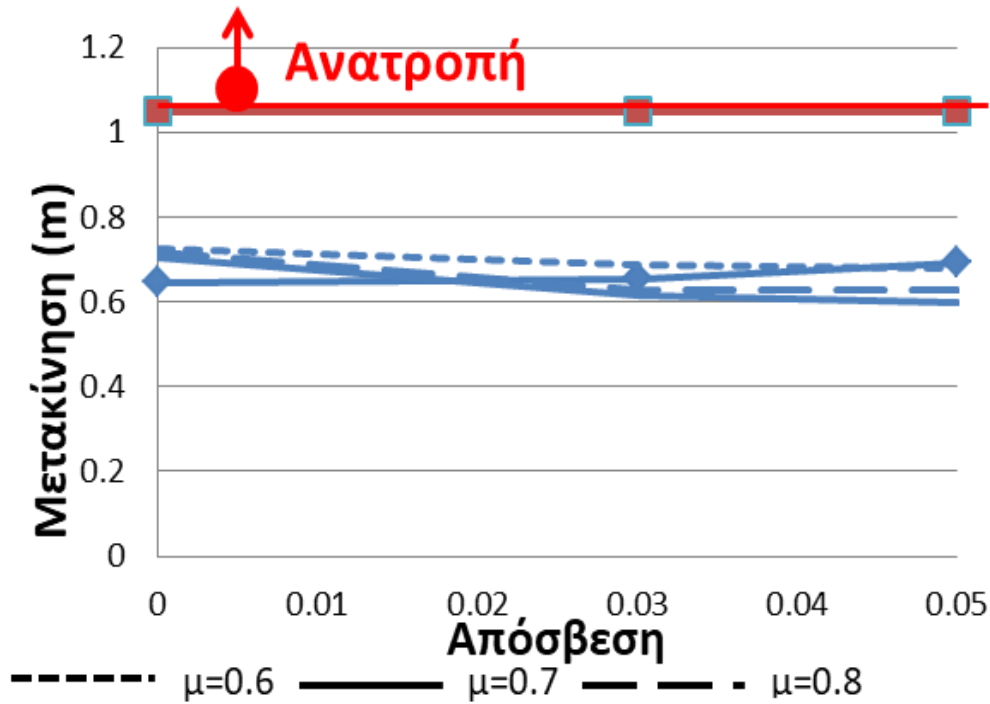
Σχήμα 14.7 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.4g



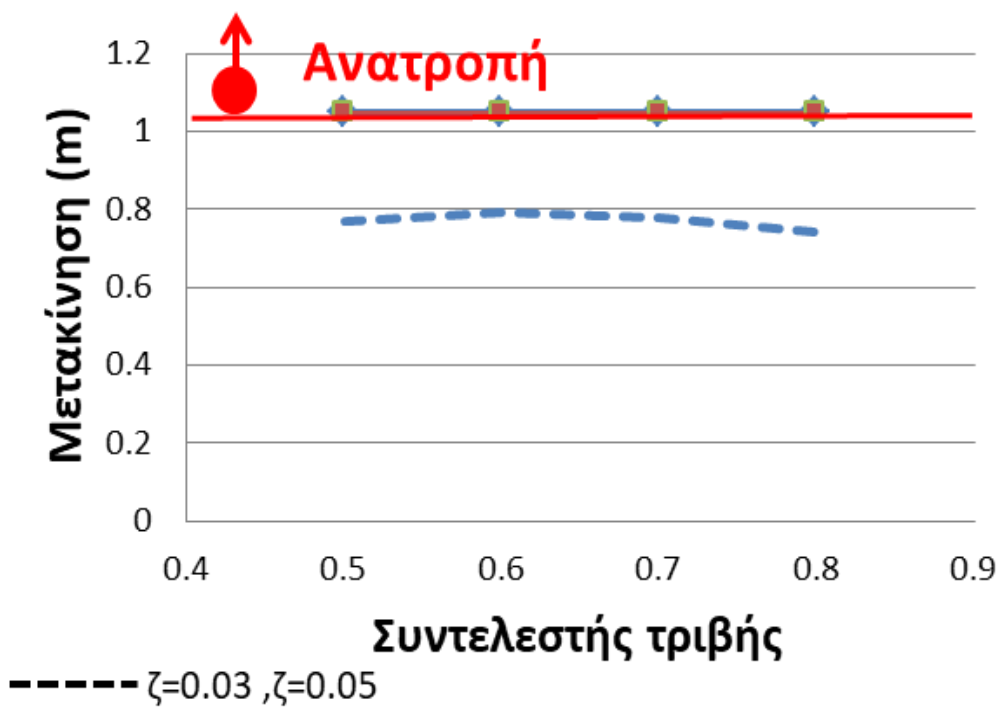
Σχήμα 14.8 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.4g



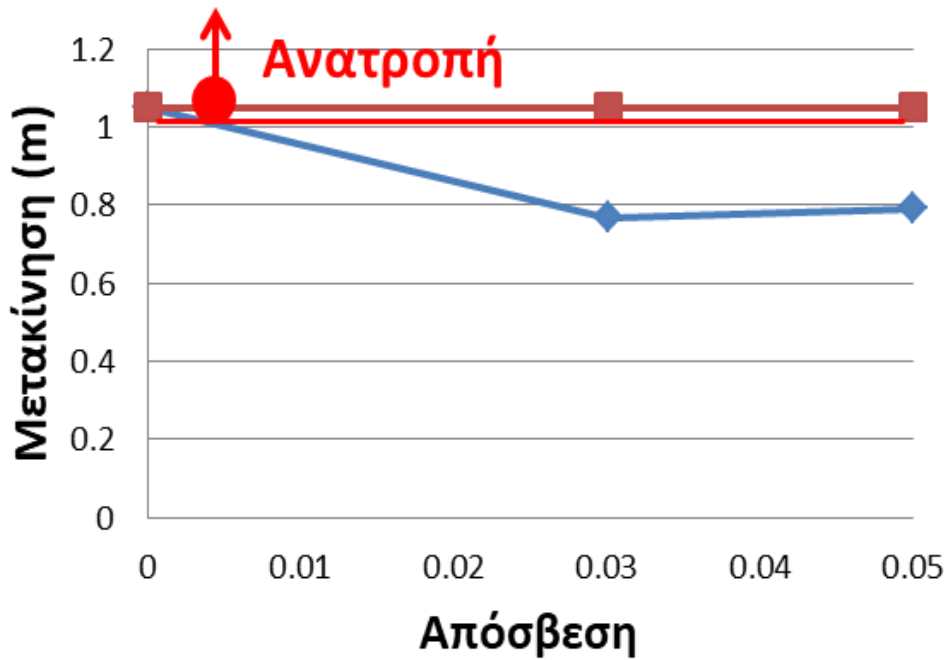
Σχήμα 14.9 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.10 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.11 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.4g

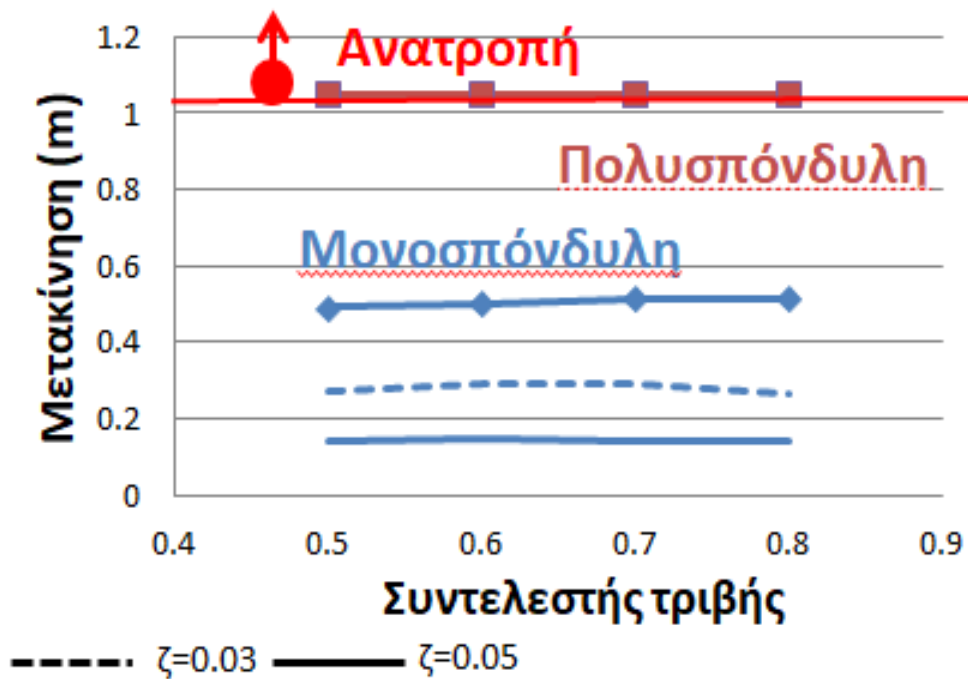


Σχήμα 14.12 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.4g

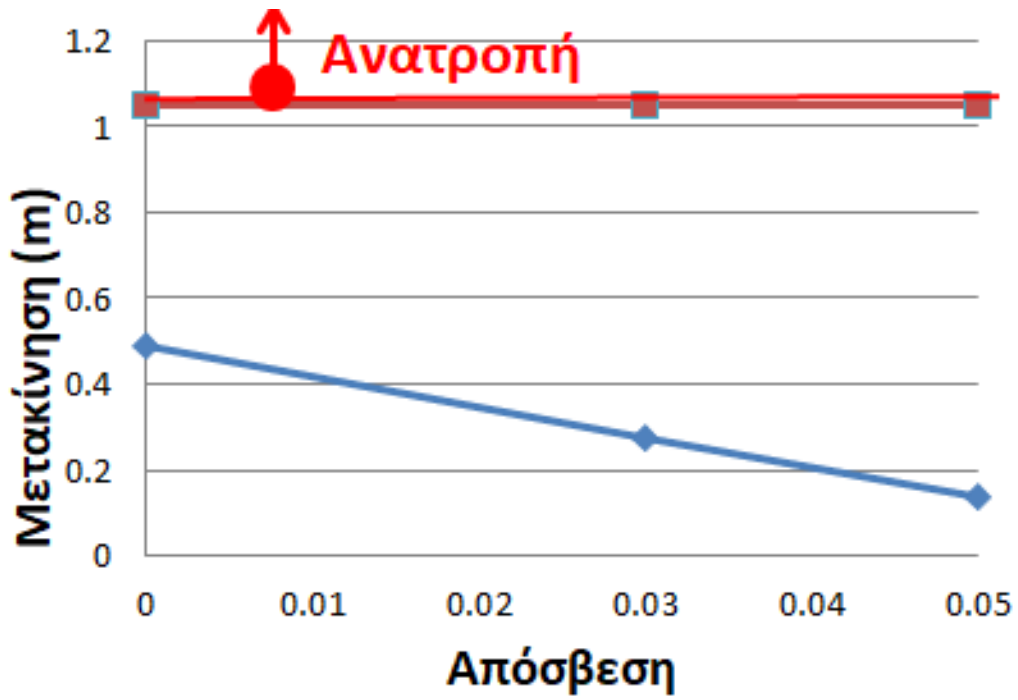
Από τα παραπάνω διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστής τριβής και μετακίνησης απόσβεσης παρατηρούμε ότι ο πολυσπόνδυλος κίονας εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες μετακινήσεις σε σχέση με τον μονοσπόνδυλο κίονα. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται σε όλες τις φορτίσεις εκτός από τη σεισμική φόρτιση L'Aquila για επιταχύνσεις 0.3g και 0.4g, στην οποία δε φαίνεται κάποιο μοντέλο να υπερέχει όσον αφορά το τομέα των μετακινήσεων. Ακόμα βλέπουμε ότι ο πολυσπόνδυλος κίονας ανετράπη για τις σεισμικές φορτίσεις του Συντάγματος κι της Καλαμάτας. Όσον αφορά το μονοσπόνδυλο κίονα αύξηση της επιτάχυνσης οδήγησε σε μεγαλύτερες μετακινήσεις σε όλες τις περιπτώσεις των σεισμικών διεγέρσεων. Ακόμα, όσον αφορά την απόσβεση, αυτή φαίνεται να επηρεάζει στο σεισμό L'Aquila για τιμή απόσβεσης $\zeta=0.05$ όπου και τα δύο μοντέλα παρουσίασαν μείωση των μετακινήσεων. Τέλος, ο συντελεστής τριβής δεν κρίνεται κρίσιμος και για τα δύο μοντέλα καθώς, η λικνιστική κίνηση φαίνεται να προηγείται της ολίσθησης.

14.1.2 Περιορισμένη εκτός επιπέδου κίνηση

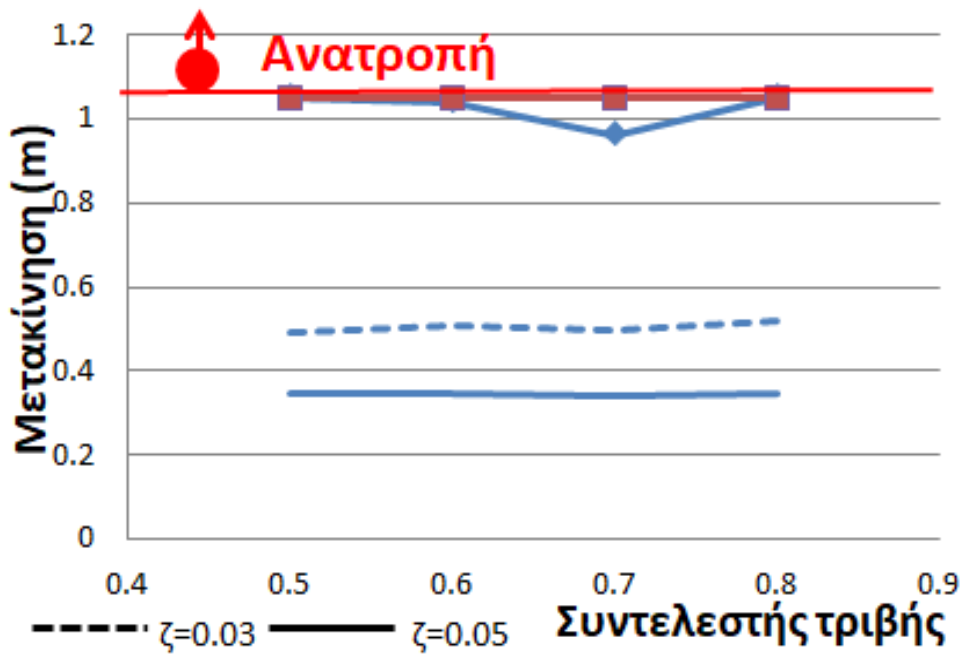
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για τα τις σεισμικές διεγέρσεις L'Aquila 0.3g-0.4g, Καλαμάτα 0.3g-0.4g και Σύνταγμα 0.3g-0.4g με περιορισμό στην εκτός επιπέδου κίνηση:



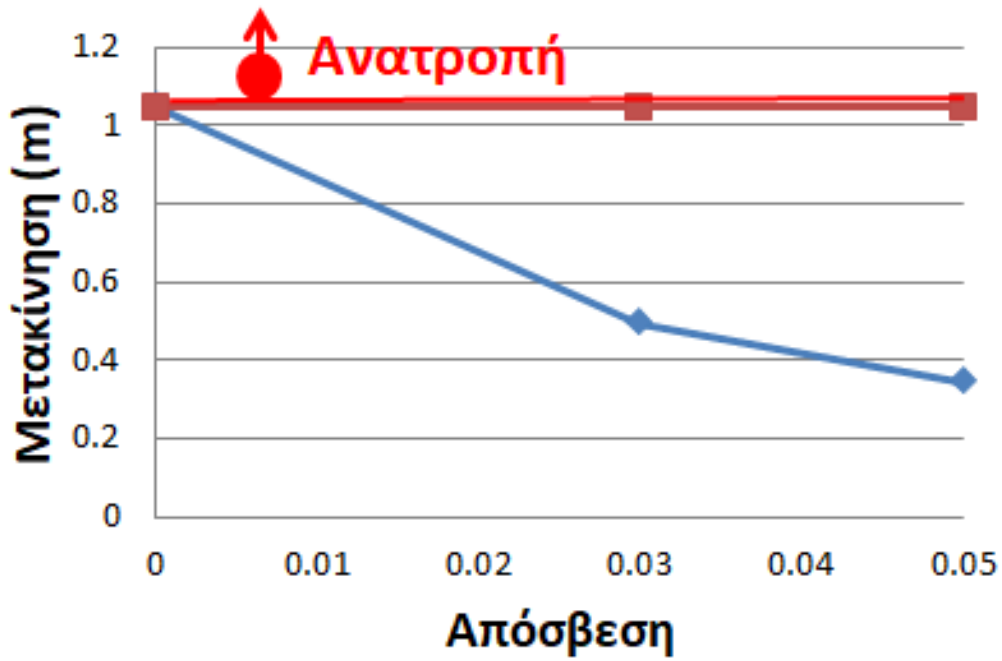
Σχήμα 14.13 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



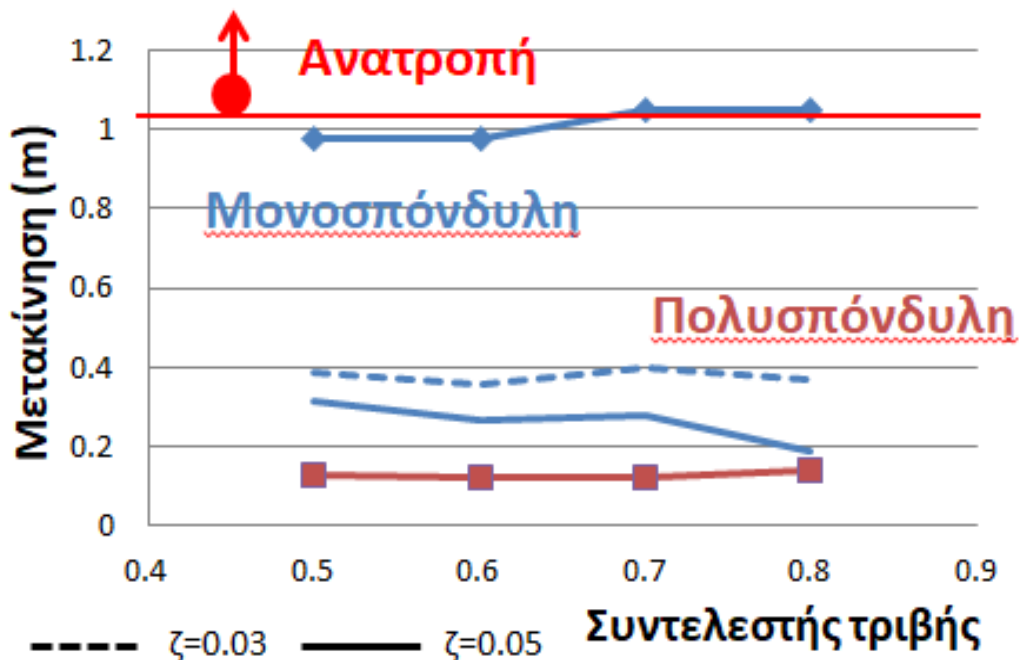
Σχήμα 14.14 Διάγραμμα μετακίνησης – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



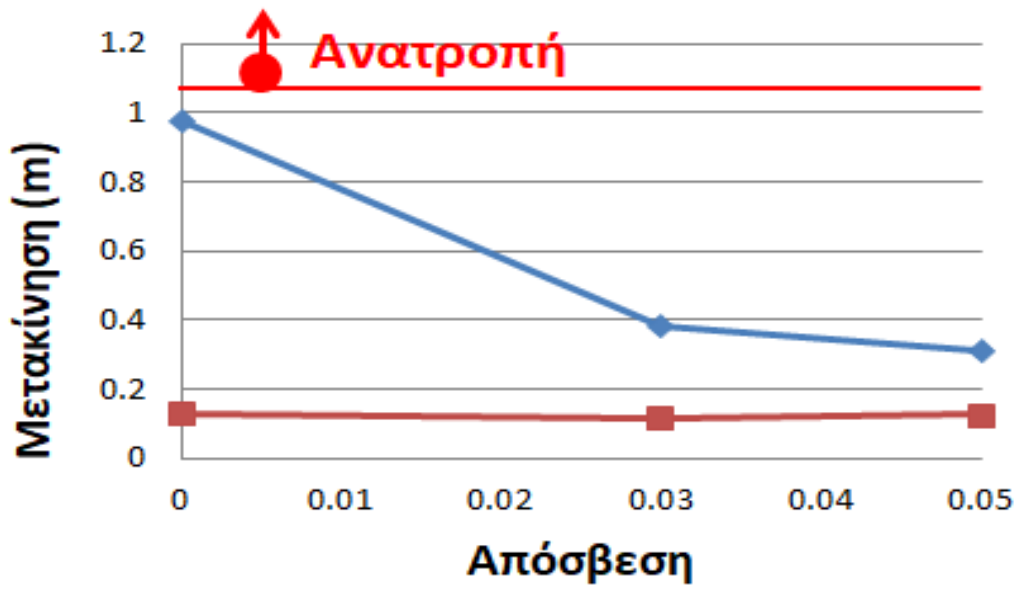
Σχήμα 14.15 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.4g



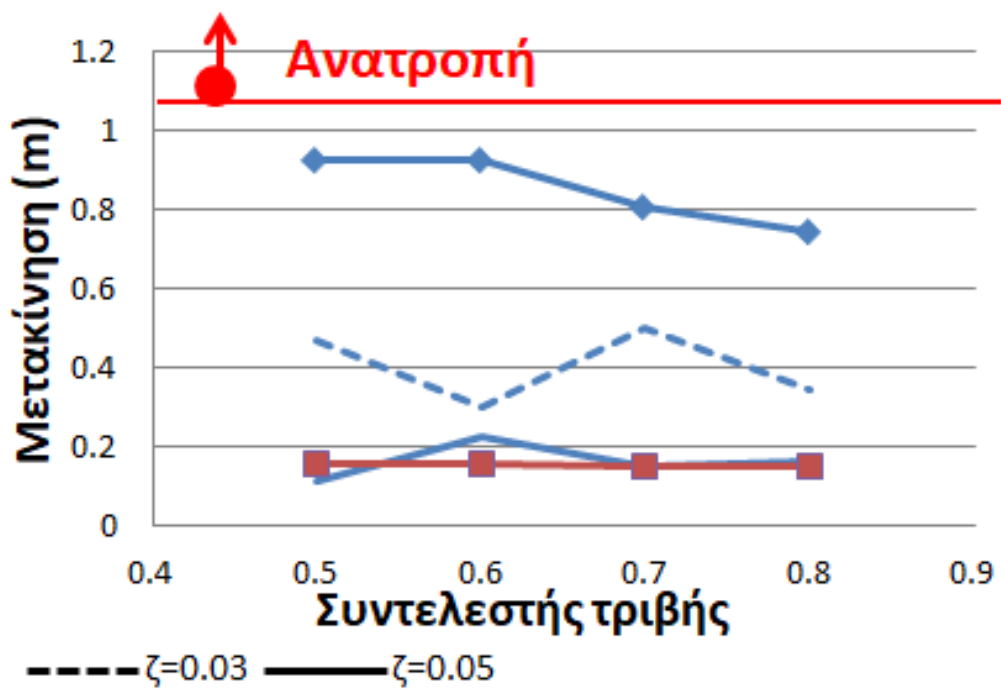
Σχήμα 14.16 Διάγραμμα μετακίνησης –απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.4g



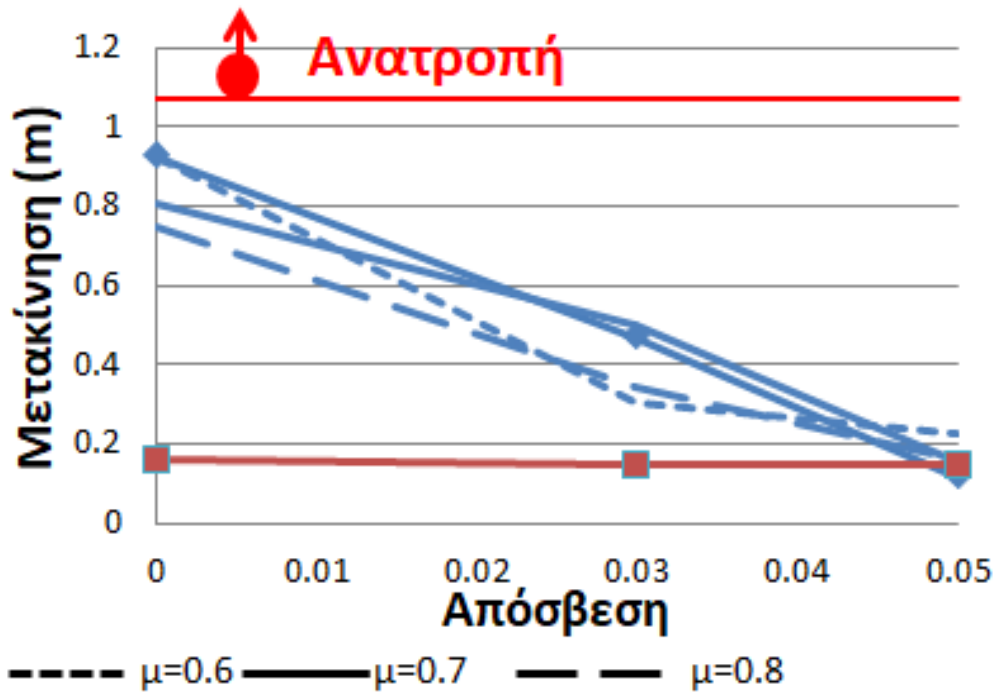
Σχήμα 14.17 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g



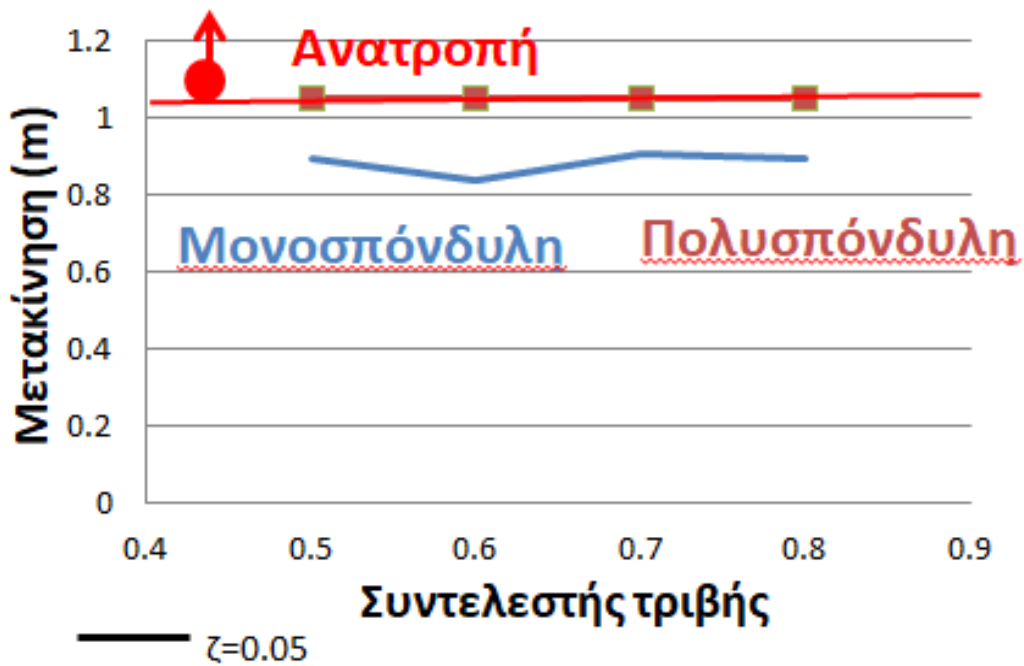
Σχήμα 14.18 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g



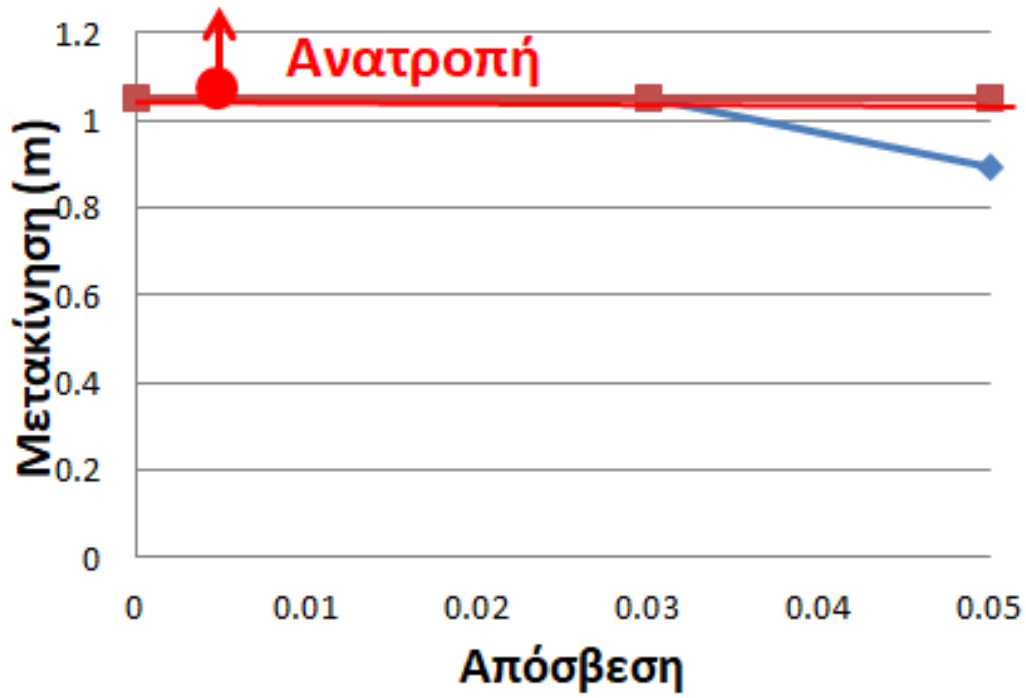
Σχήμα 14.19 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.4g



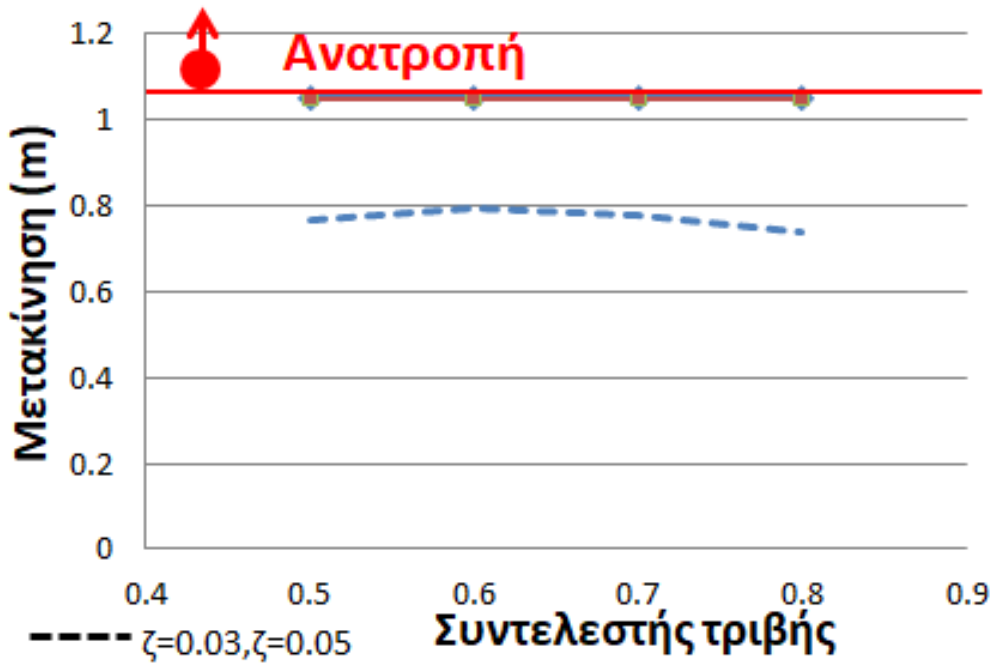
Σχήμα 14.20 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.4g



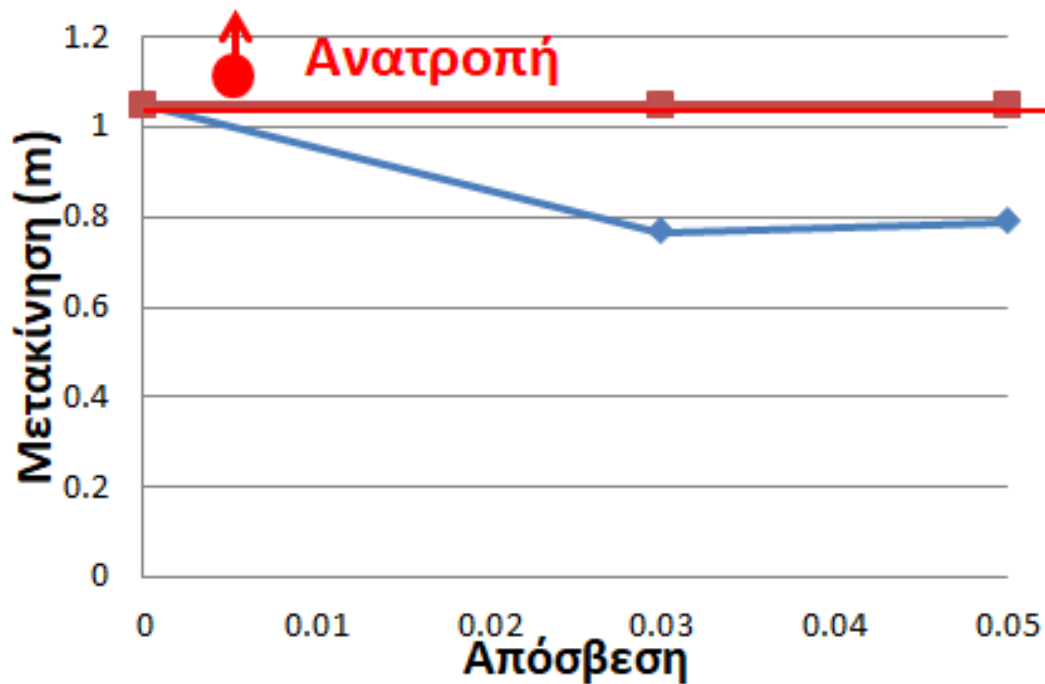
Σχήμα 14.21 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.22 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.23 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.4g



Σχήμα 14.24 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.4g

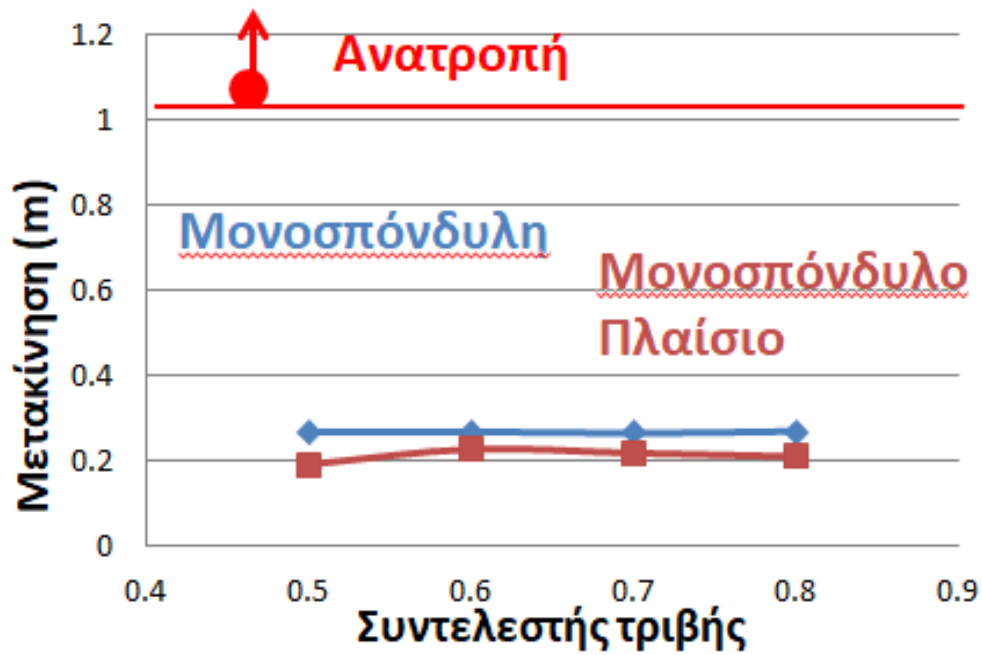
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι ο περιορισμός της εκτός επιπέδου κίνησης επηρεάζει καθοριστικά μόνο το μονοσπόνδυλο κίονα και όχι τον σπονδυλωτό, καθώς βλέπουμε ότι ο πολυσπόνδυλος κίονας δε παρουσίασε αλλαγές στις μετακινήσεις του. Επίσης όσον αφορά τη απόσβεση, αυτή φαίνεται να έπαιξε καθοριστικό ρόλο και στα δύο μοντέλα, στις σεισμικές διεγέρσεις Σύνταγμα και Καλαμάτα για τιμές επιταχύνσεων 0.4g, όπου και τα δύο μοντέλα ανετράπησαν. Ακόμα, στη σεισμική διεγερση Καλαμάτα, όσον αφορά την απόσβεση βλέπουμε ότι ο μονοσπόνδυλος κίονας παρουσιάζει μειούμενες μετατοπίσεις για αύξηση του συντελεστή απόσβεσης. Για σεισμό L'Aquila και για μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων, για τιμή απόσβεσης $\zeta=0.05$, τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν παραπλήσιες μετακινήσεις.

14.2 Σύγκριση μονοσπόνδυλου κίονα – μονοσπόνδυλου πλαισίου

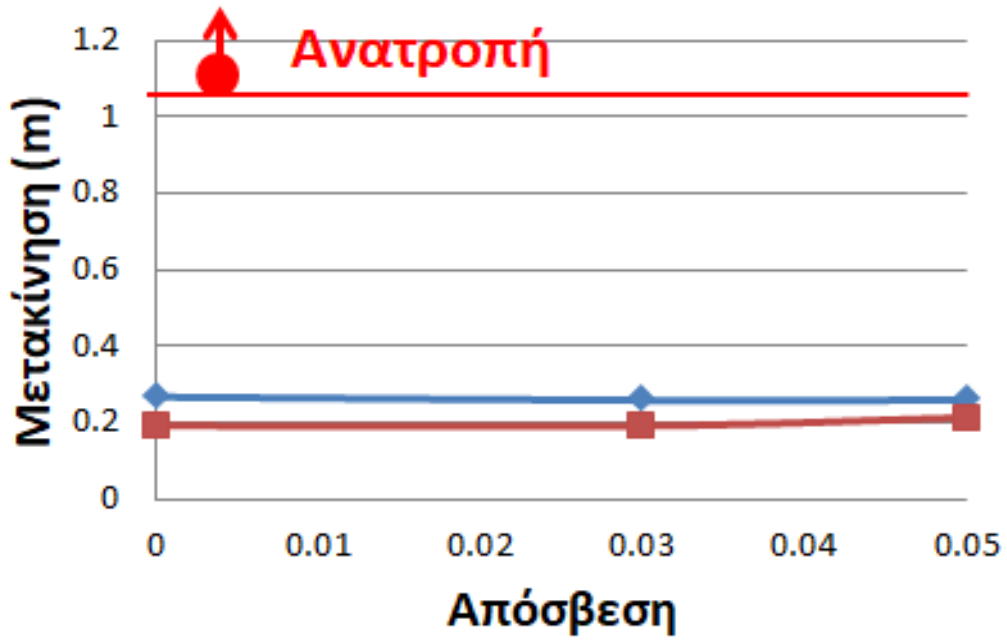
Όσον αφορά τη σύγκριση του μονοσπόνδυλου κίονα και του μονοσπόνδυλου πλαισίου, αυτή έγινε με βάση το συντελεστή τριβής και το συντελεστή απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκρίσεις έγιναν για τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του κάθε μοντέλου ξεχωριστά και όλες τις τιμές των επιταχύνσεων. Επίσης, τα μοντέλα συγκρίθηκαν και για την ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση αλλά και για την περιορισμένη κίνηση εκτός επιπέδου.

14.2.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

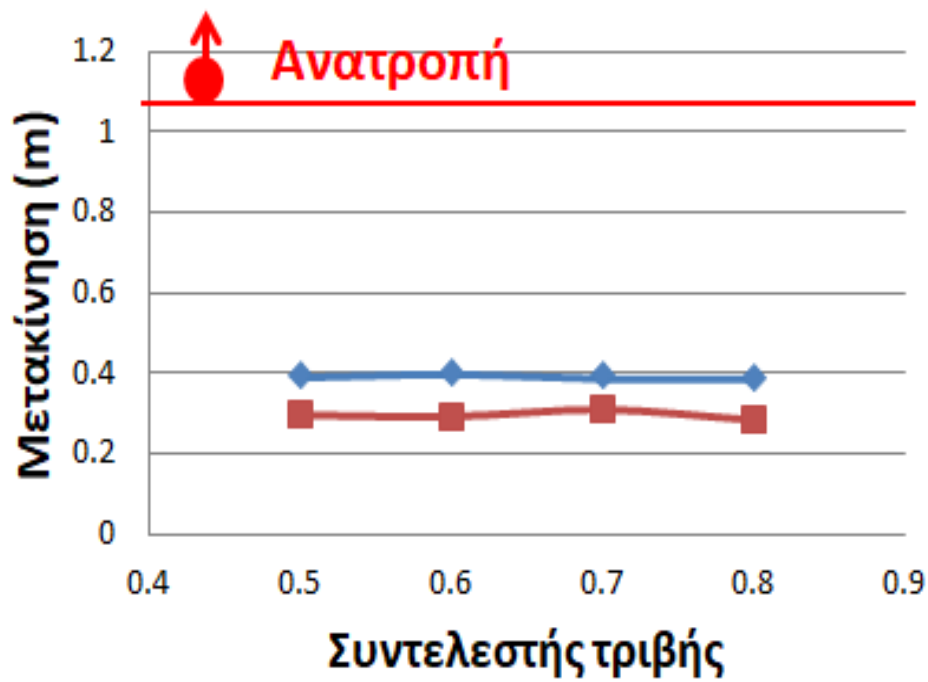
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για τα τις σεισμικές διεγέρσεις L'Aquila 0.3g – 0.4g, Καλαμάτα 0.3g-0.4g και Σύνταγμα 0.3g-0.4g :



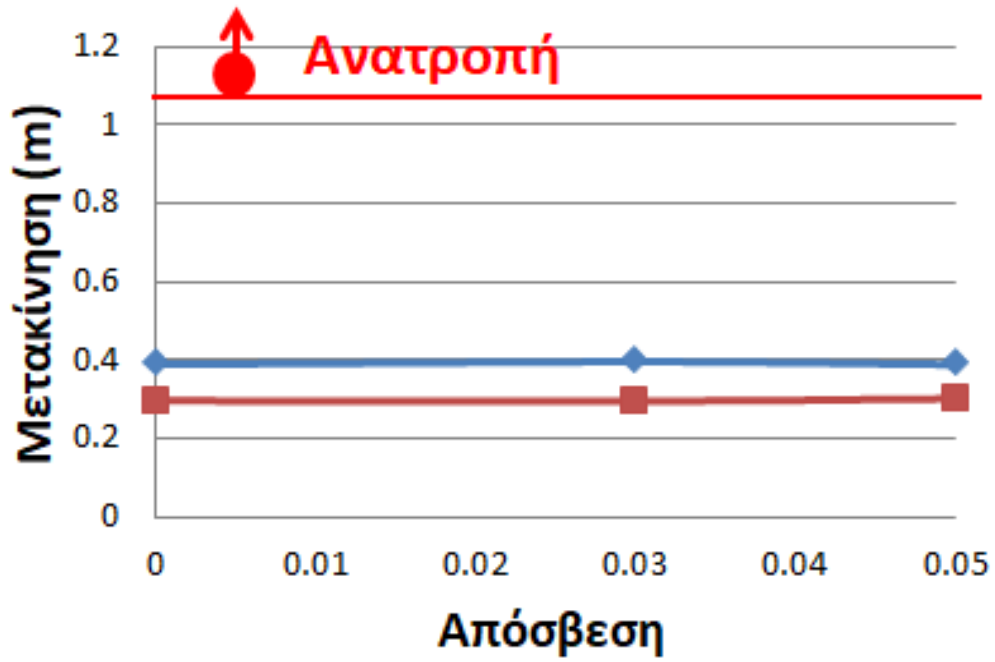
Σχήμα 14.25 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



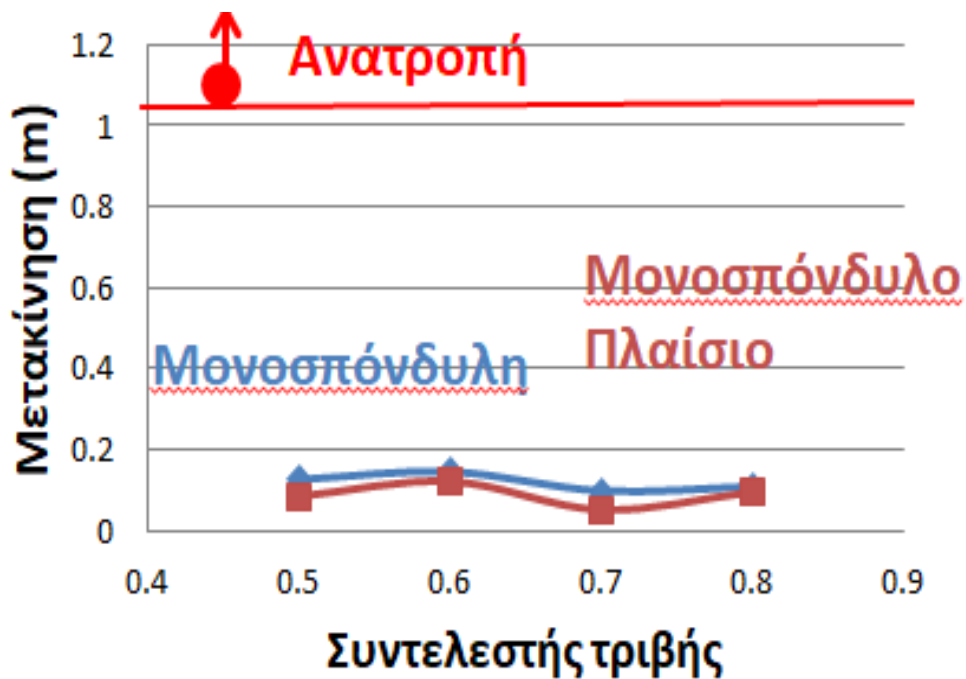
Σχήμα 14.26 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



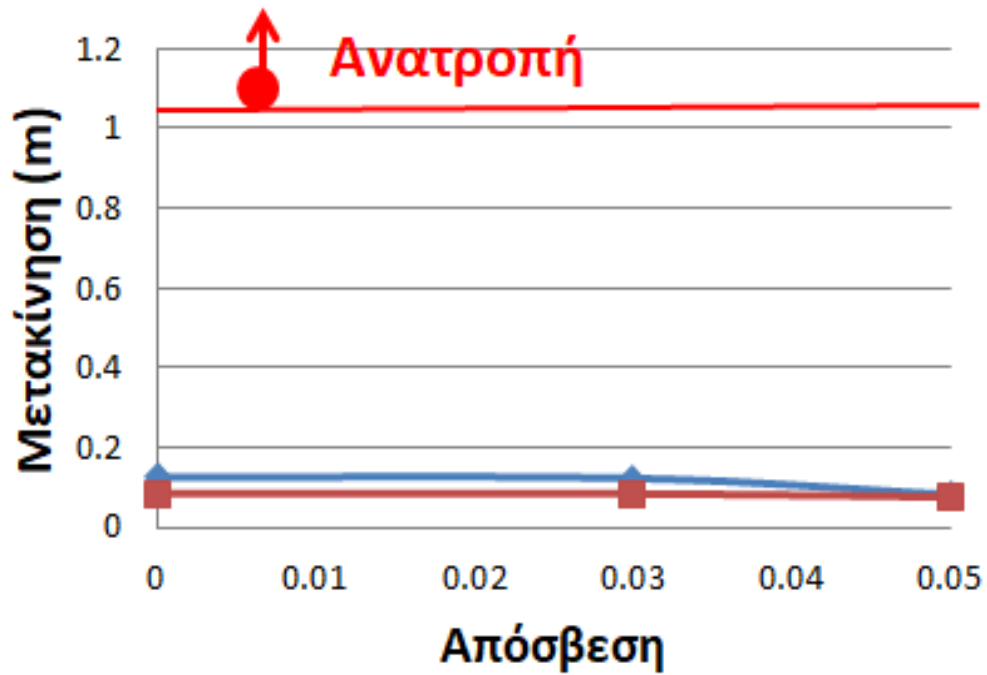
Σχήμα 14.27 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.4g



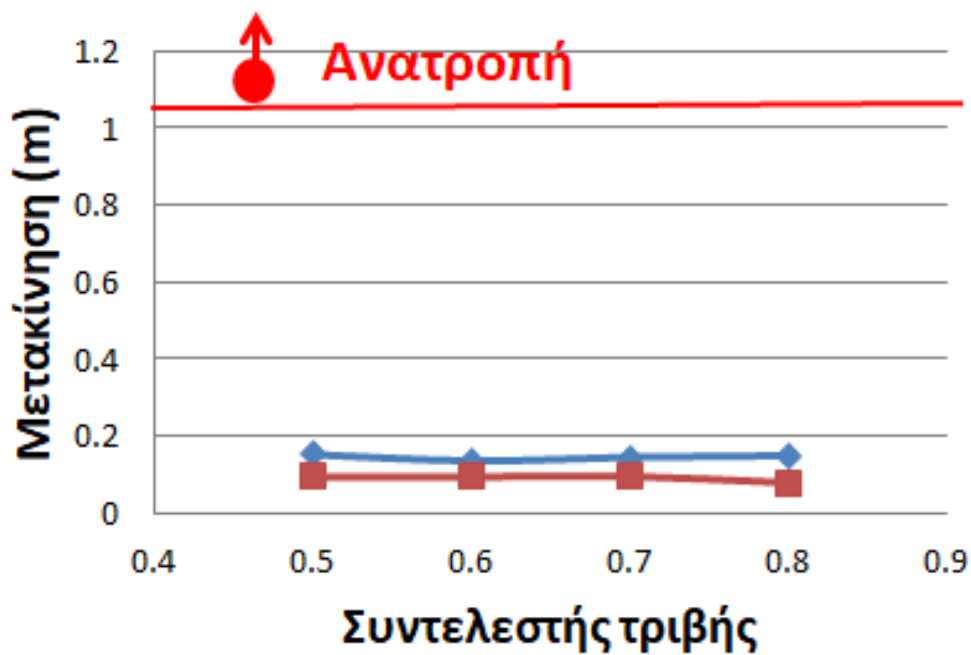
Σχήμα 14.28 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.4g



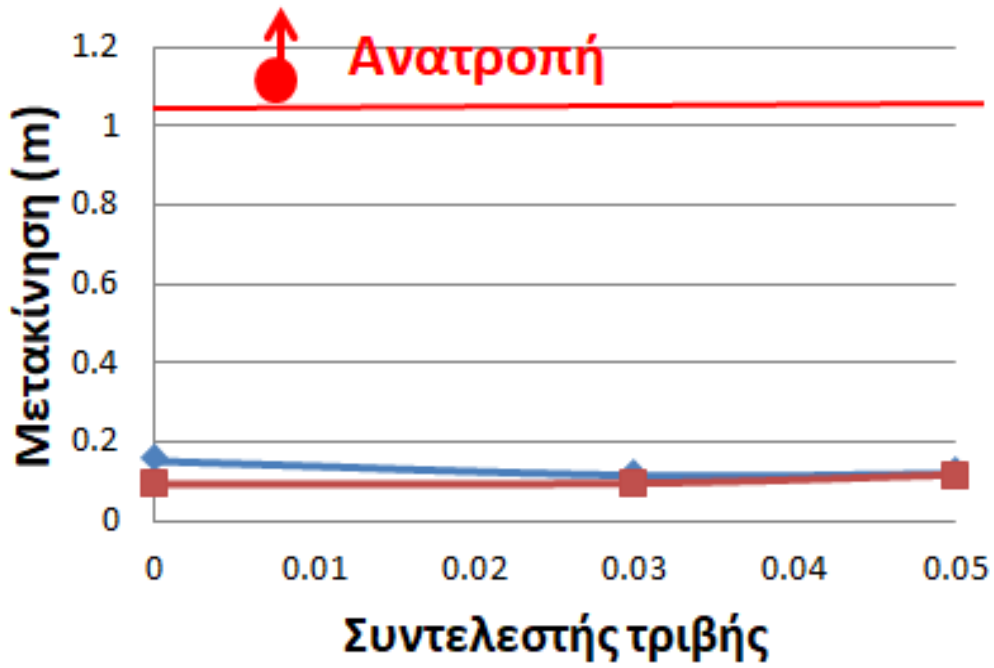
Σχήμα 14.29 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g



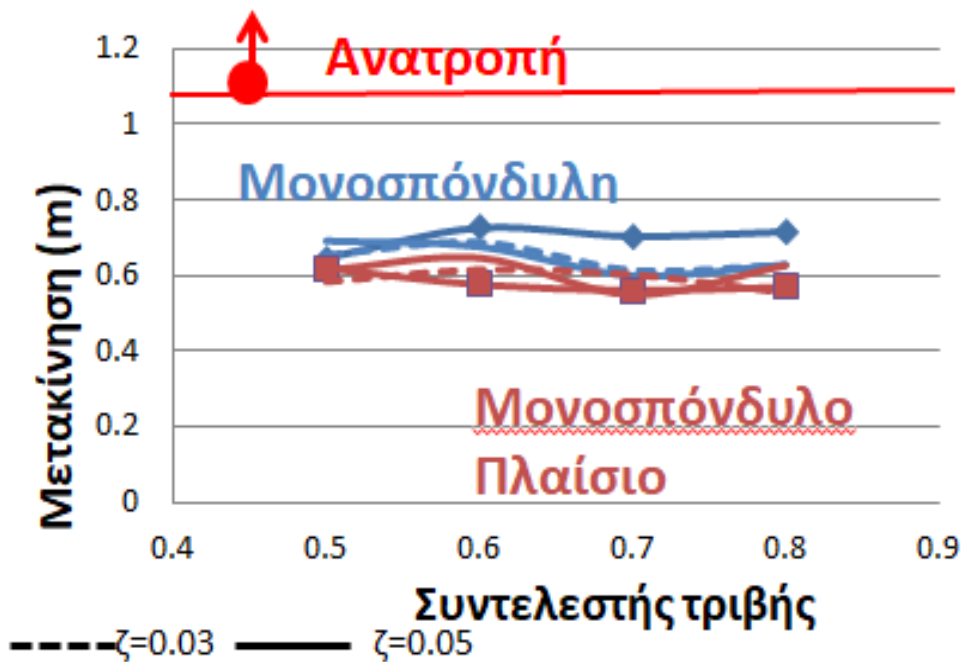
Σχήμα 14.30 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g



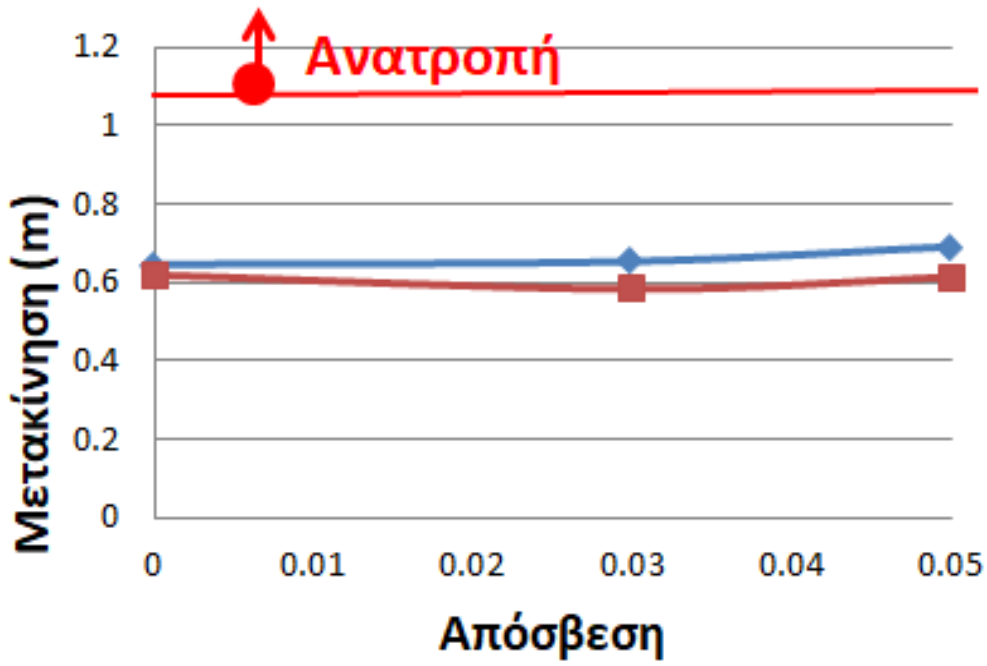
Σχήμα 14.31 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.4g



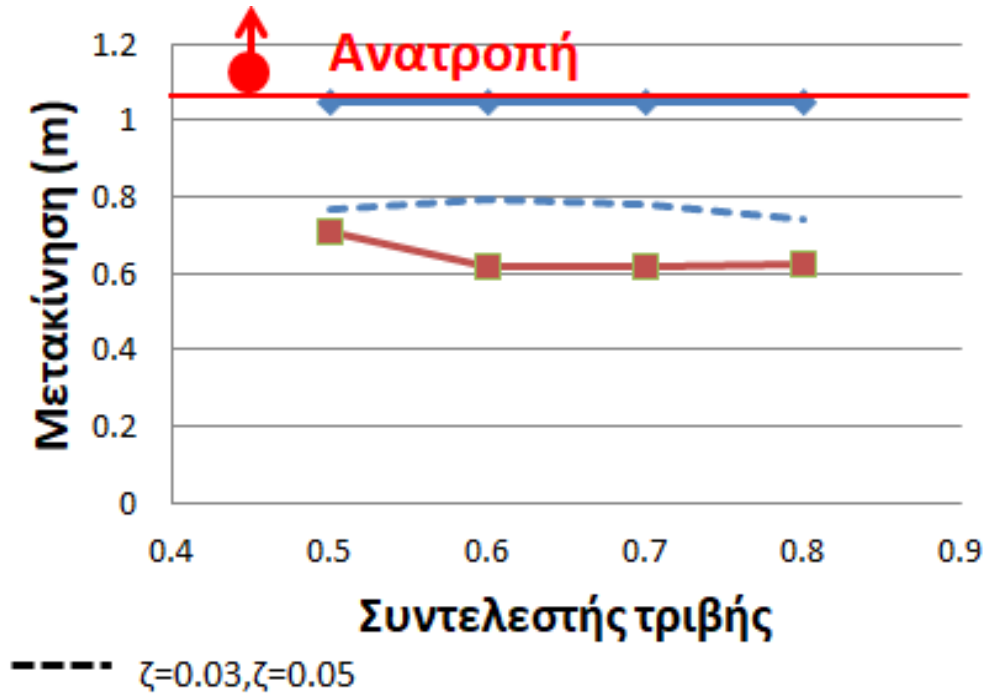
Σχήμα 14.32 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.4g



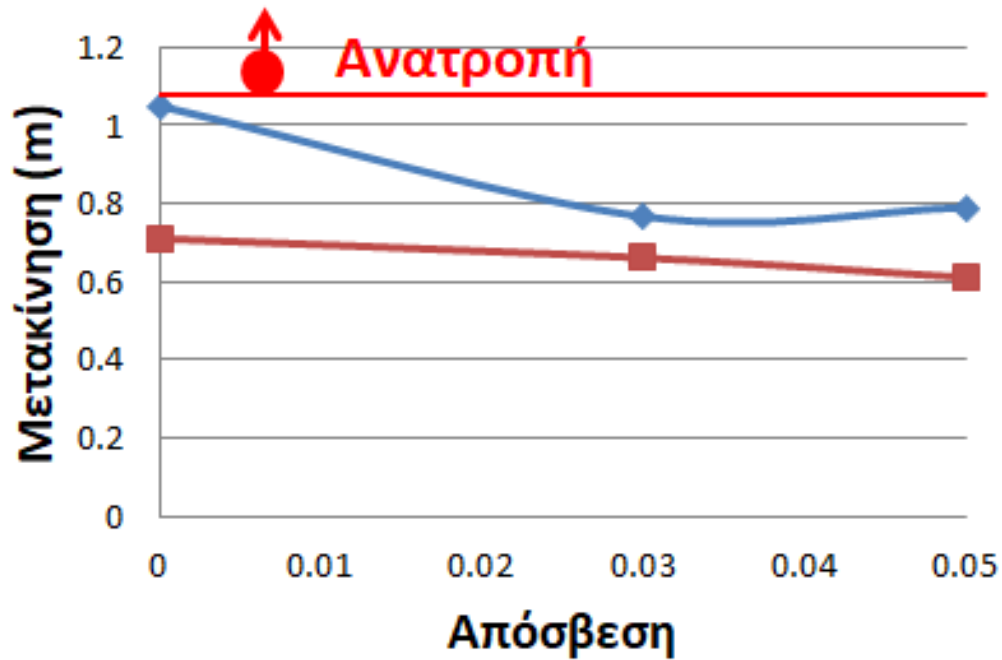
Σχήμα 14.33 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.34 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.35 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.4g

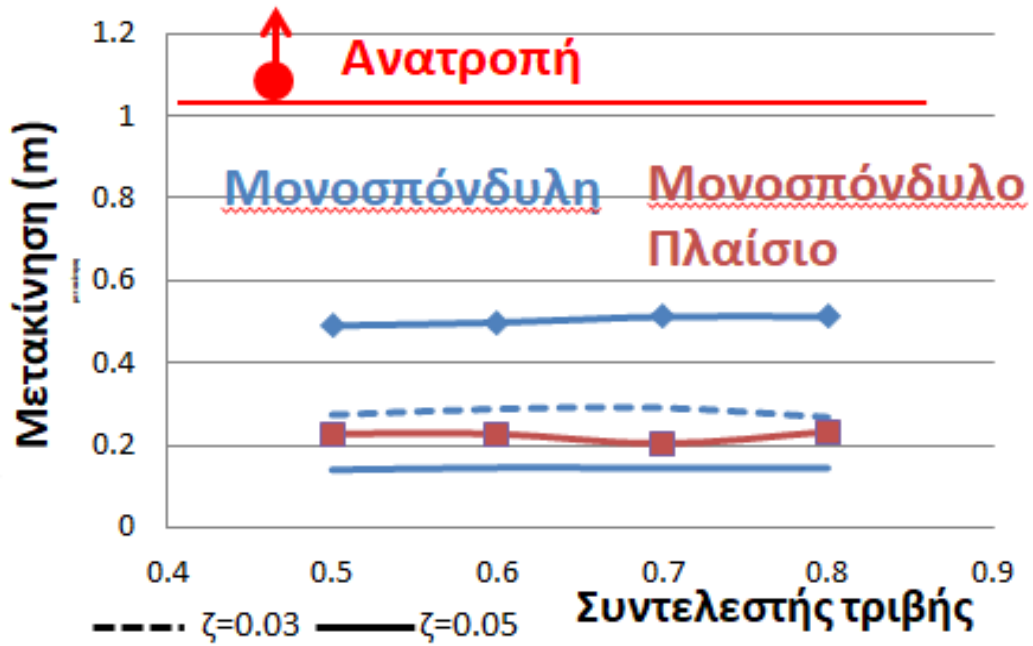


Σχήμα 14.36 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.4g

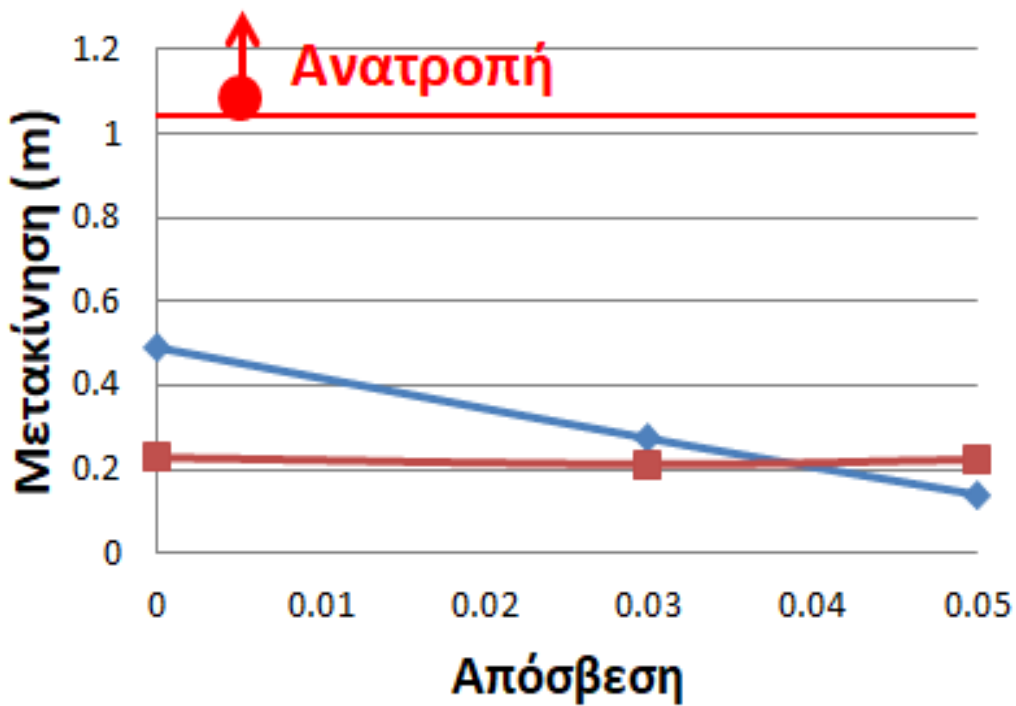
Βασικό συμπέρασμα που παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα για τις μετακινήσεις του μονοσπόνδυλου κίονα και του μονοσπόνδυλου πλαισίου είναι ότι το μονοσπόνδυλο πλαίσιο παρουσιάζει μικρότερες μετακινήσεις για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις και τιμές των επιταχύνσεων σε σχέση με το μονολιθικό κίονα. Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται απολύτως λογικό καθώς λόγω της δυσκαμψίας του παρέχει το επιστύλιο στους μονολιθικούς κίονες του πλαισίου, εμφανίζονται μικρότερες μετατοπίσεις. Ακόμα, αύξηση στις τιμές των επιταχύνσεων σηματοδοτεί και αύξηση των μέγιστων σχετικών μετακινήσεων για όλα τα μοντέλα, όπως ακριβώς αναμενόταν. Επίσης, τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν παραπλήσιες μετακινήσεις για σεισμική διέγερση L'Aquila και για τιμή συντελεστή απόσβεσης $\zeta=5\%$ παρουσιάζουν παραπλήσιες μετακινήσεις.

14.2.2 Περιορισμένη κίνηση εκτός επιπέδου

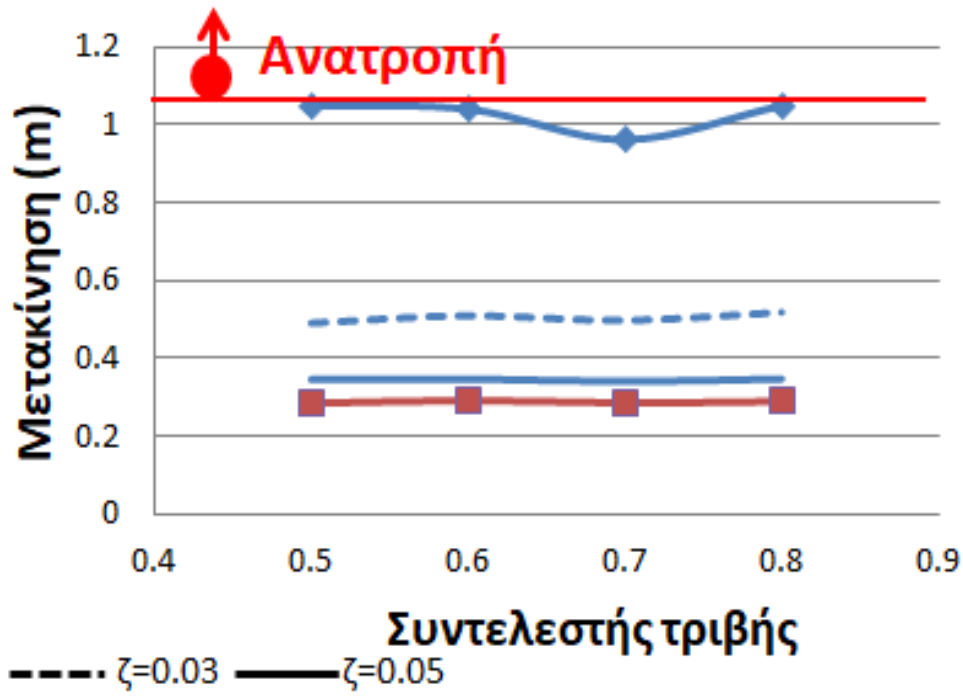
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για τα τις σεισμικές διεγέρσεις L'Aquila 0.3g-0.4g, Καλαμάτα 0.3g-0.4g και Σύνταγμα 0.3g-0.4g με περιορισμό στην εκτός επιπέδου κίνηση:



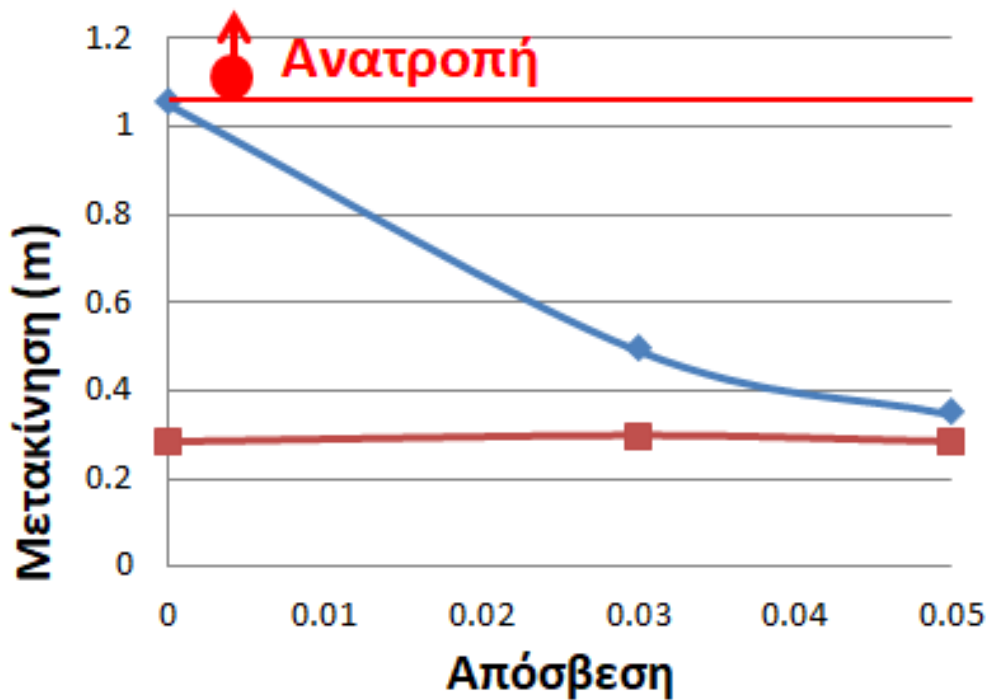
Σχήμα 14.37 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



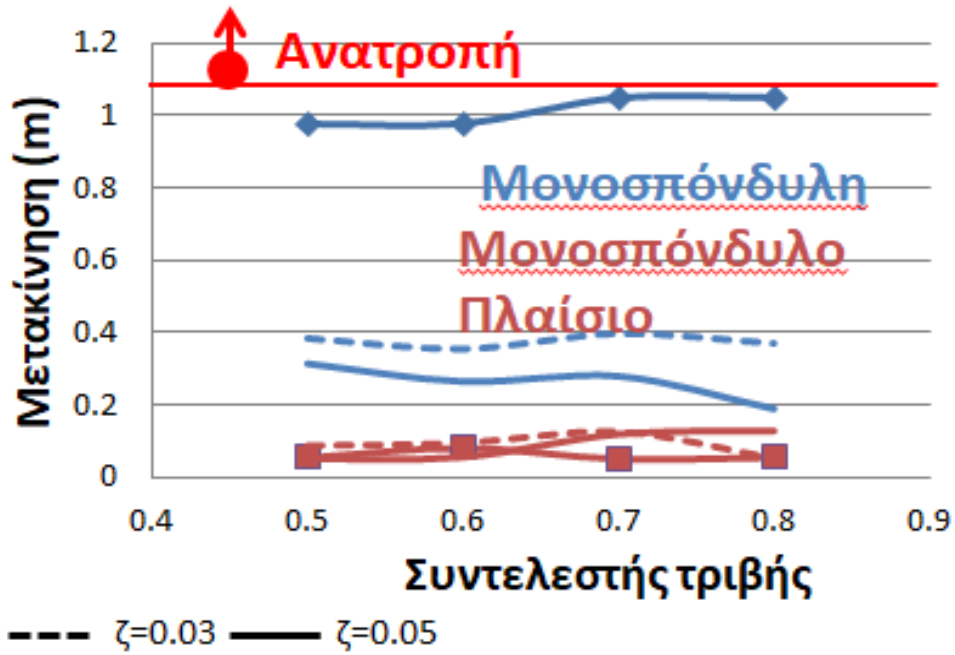
Σχήμα 14.38 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



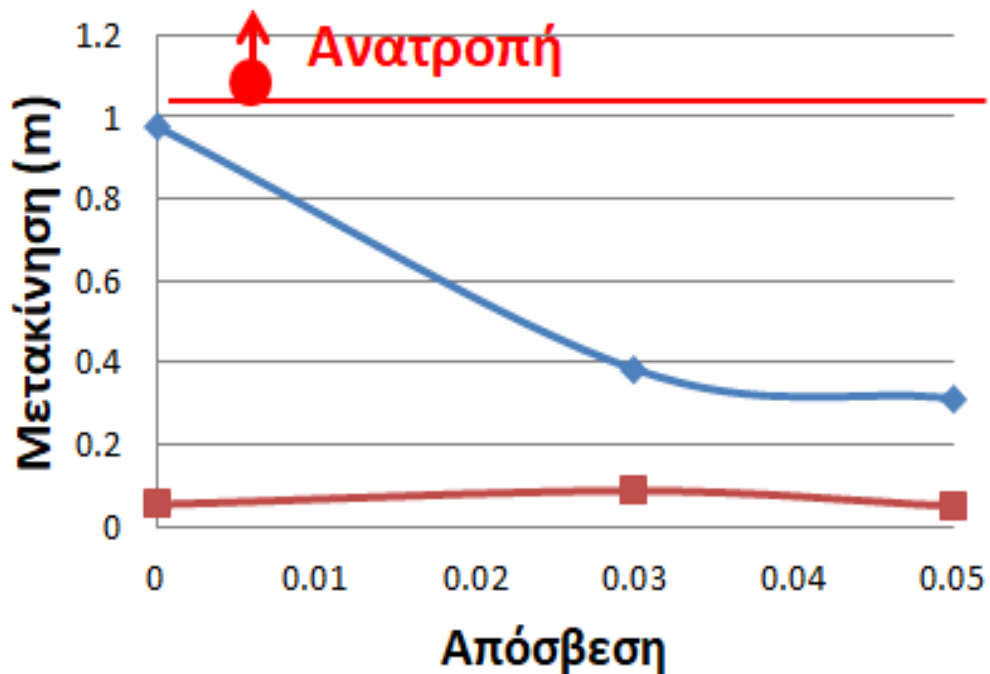
Σχήμα 14.39 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.4g



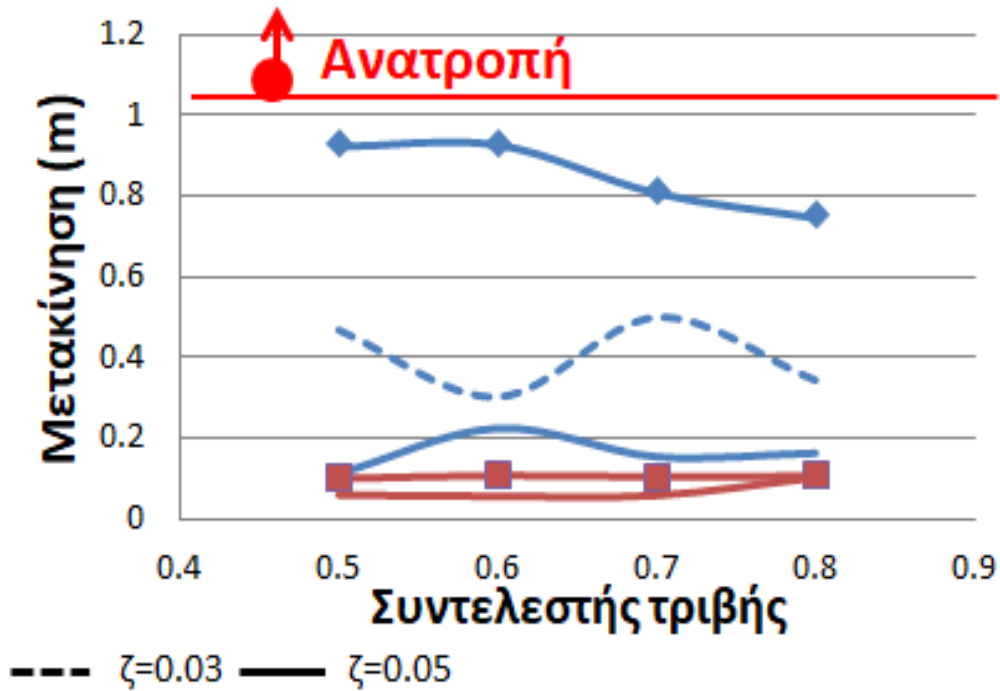
Σχήμα 14.40 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.4g



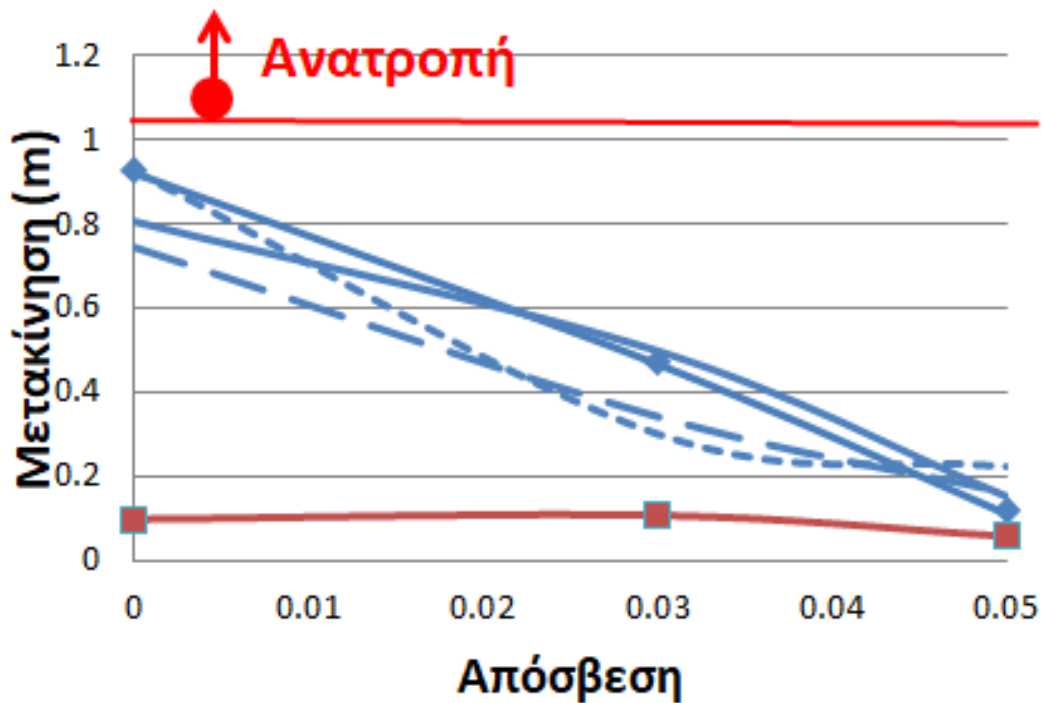
Σχήμα 14.41 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.3g



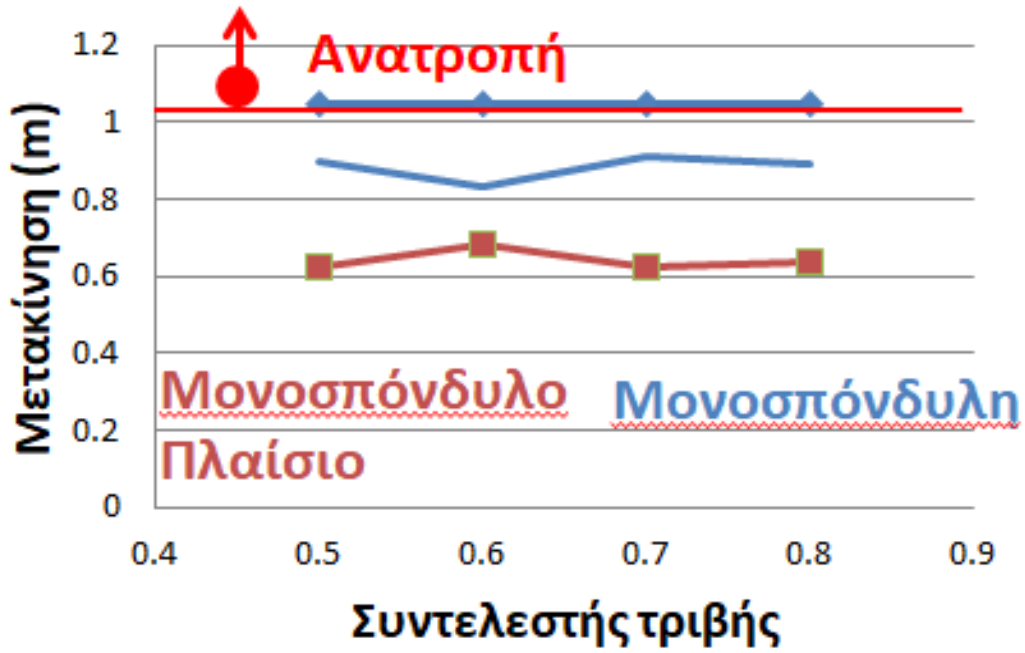
Σχήμα 14.42 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.3g



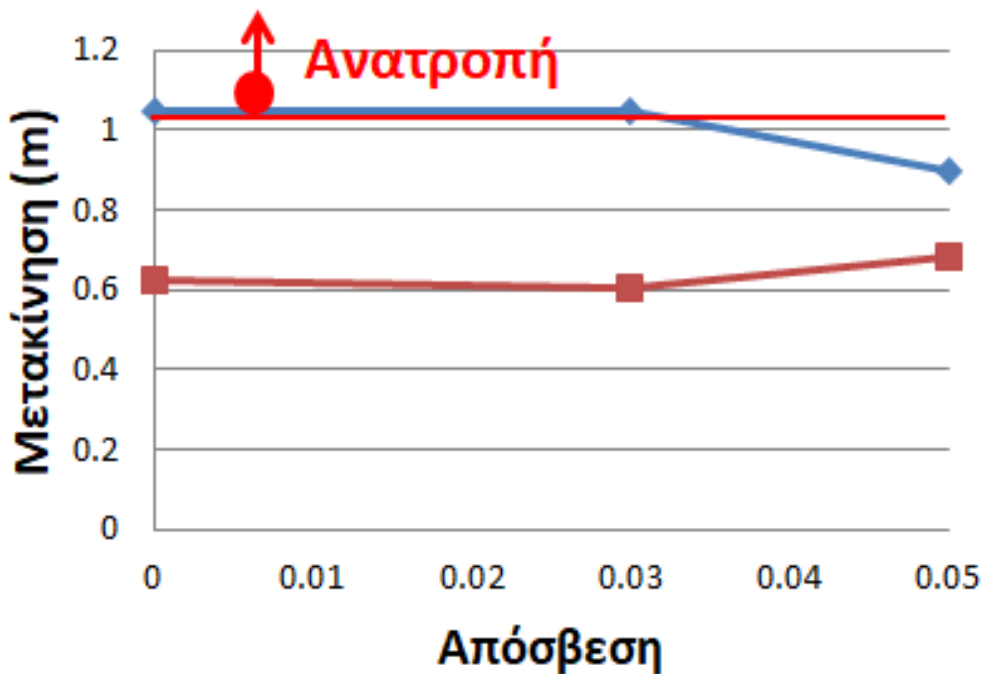
Σχήμα 14.43 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L’Aquila 0.4g



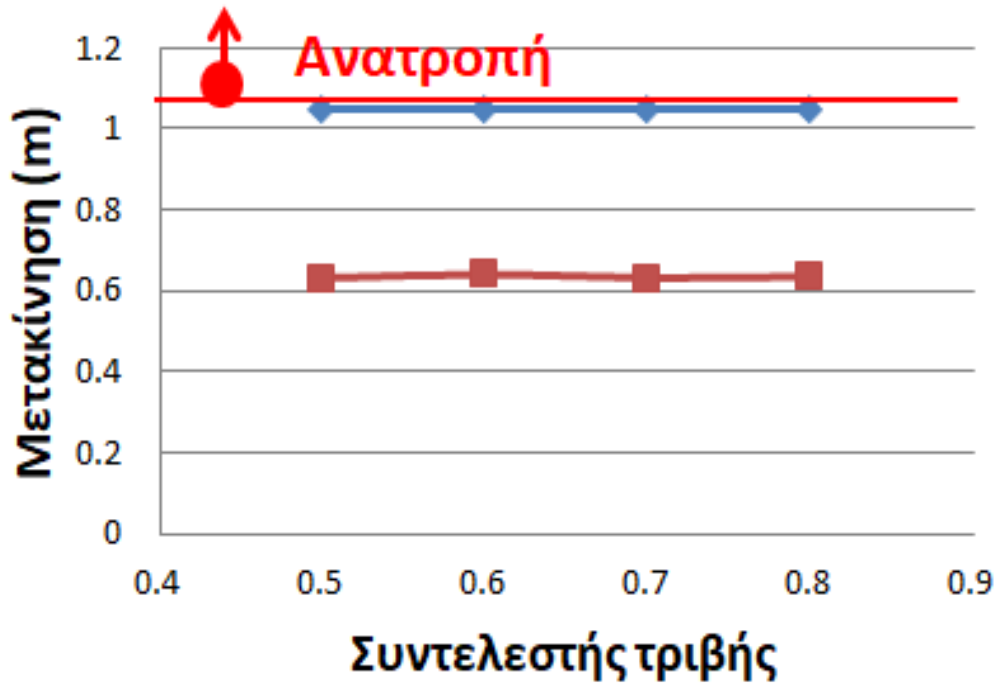
Σχήμα 14.44 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L’Aquila 0.4g



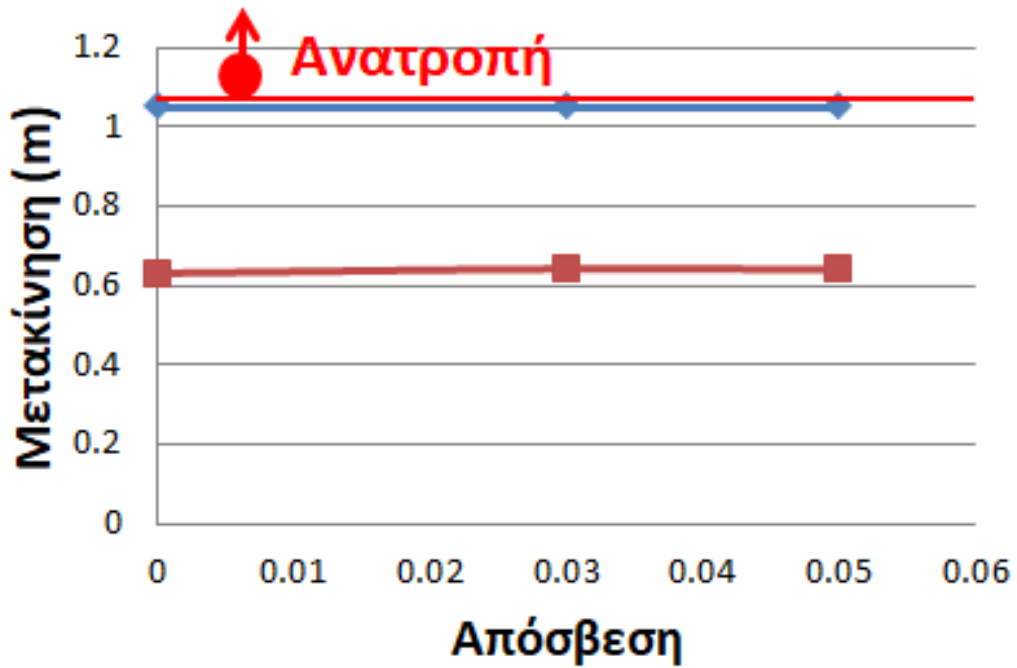
Σχήμα 14.45 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.46 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.47 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.4g



Σχήμα 14.48 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.4g

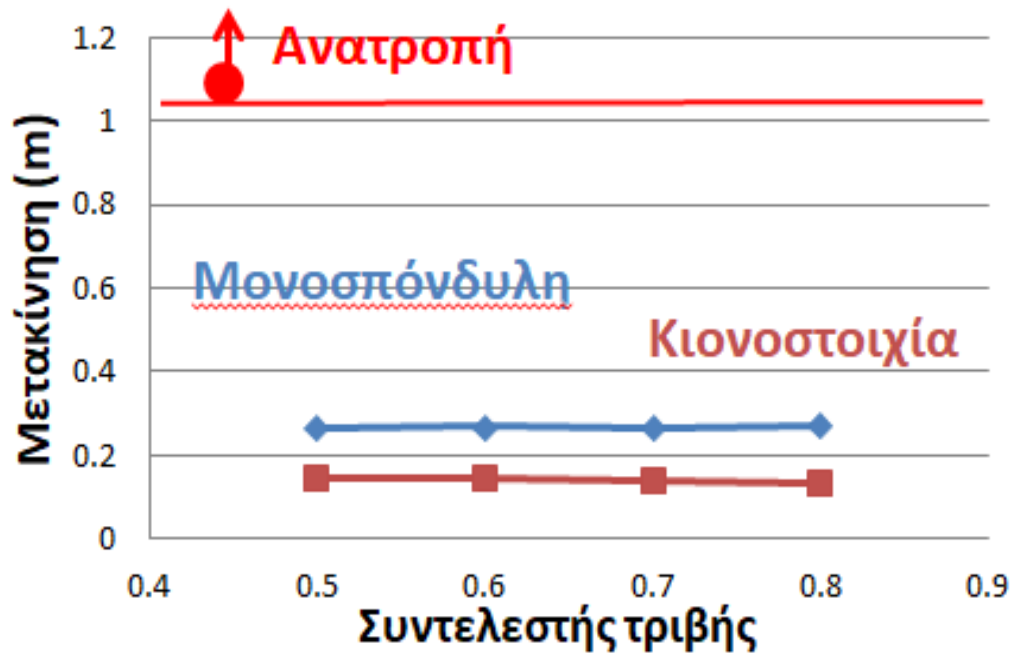
Επιβεβαιώνεται και σε αυτή τη περίπτωση των αναλύσεων για περιορισμό στην εκτός επιπέδου κίνησης ότι ο μονολιθικό κίονας εμφανίζει μεγαλύτερες μετακινήσεις σε σχέση με το μονοσπόνδυλο πλαίσιο. Ο “κανόνας” αυτός φαίνεται να σπάει μόνο σε μια περίπτωση και συγκεκριμένα στη φόρτιση του Συντάγματος για τιμή επιτάχυνσης 0.3g, παρατηρούμαι ότι το μονοσπόνδυλο πλαίσιο εμφανίζει μεγαλύτερες μετακινήσεις, όταν ο κίονας έχει απόσβεση 5%, γεγονός που δείχνει τη επιρροή του συντελεστή απόσβεσης στις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις του μονοσπόνδυλου κίονα. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και στη περίπτωση της σεισμική φόρτισης L’Aquila 0.4g, στην οποία τα δύο μοντέλα για τιμή απόσβεσης $\zeta=5\%$ παρουσιάζουν παραπλήσιες μετακινήσεις.

14.3 Σύγκριση μονοσπόνδυλου κίονα – κιονοστοιχίας

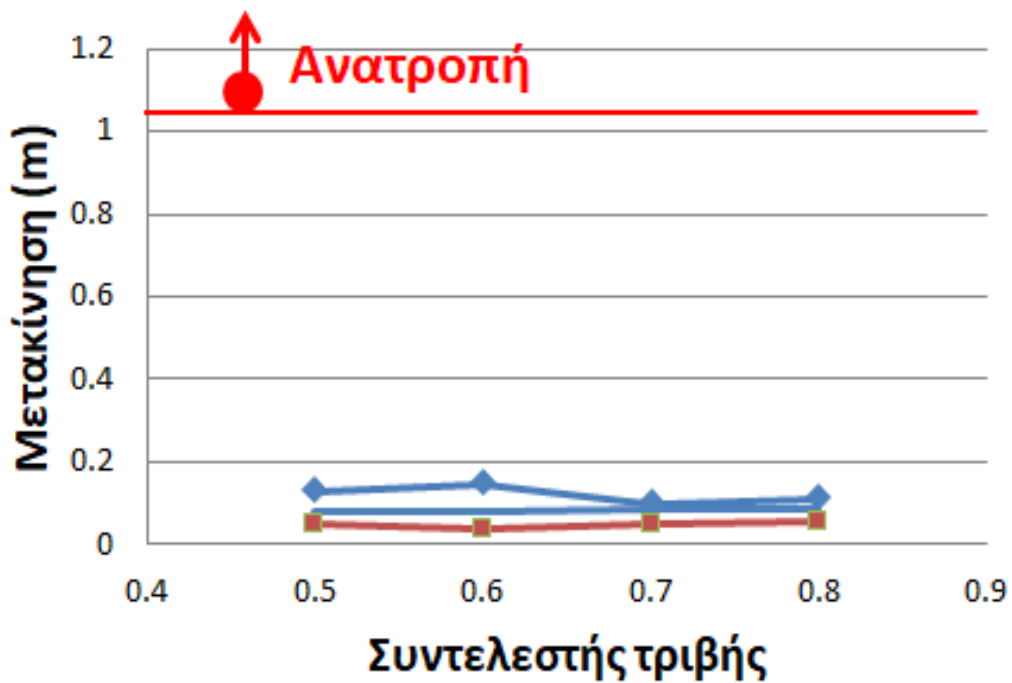
Όσον αφορά τη σύγκριση του μονοσπόνδυλου κίονα και της κιονοστοιχίας, αυτή έγινε με βάση το συντελεστή τριβής και το συντελεστή απόσβεση. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκρίσεις έγιναν για τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του κάθε μοντέλου ξεχωριστά και για τιμές επιταχύνσεων μόνο 0.3g. Επίσης, τα μοντέλα συγκρίθηκαν μόνο για ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση.

14.3.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

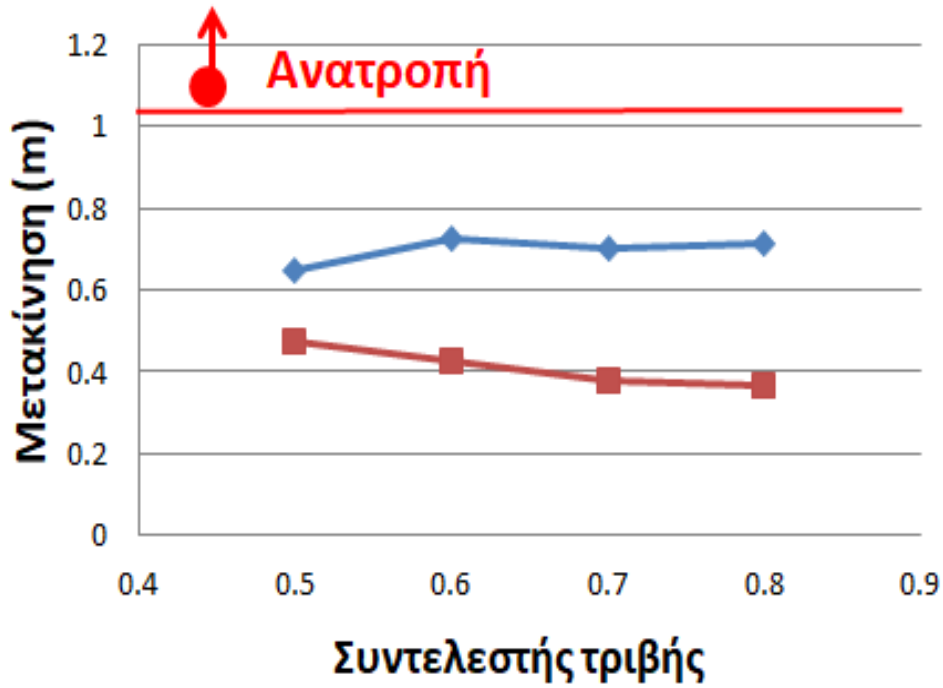
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για τα τις σεισμικές διεγέρσεις L’Aquila 0.3g, Καλαμάτα 0.3g και Σύνταγμα 0.3g :



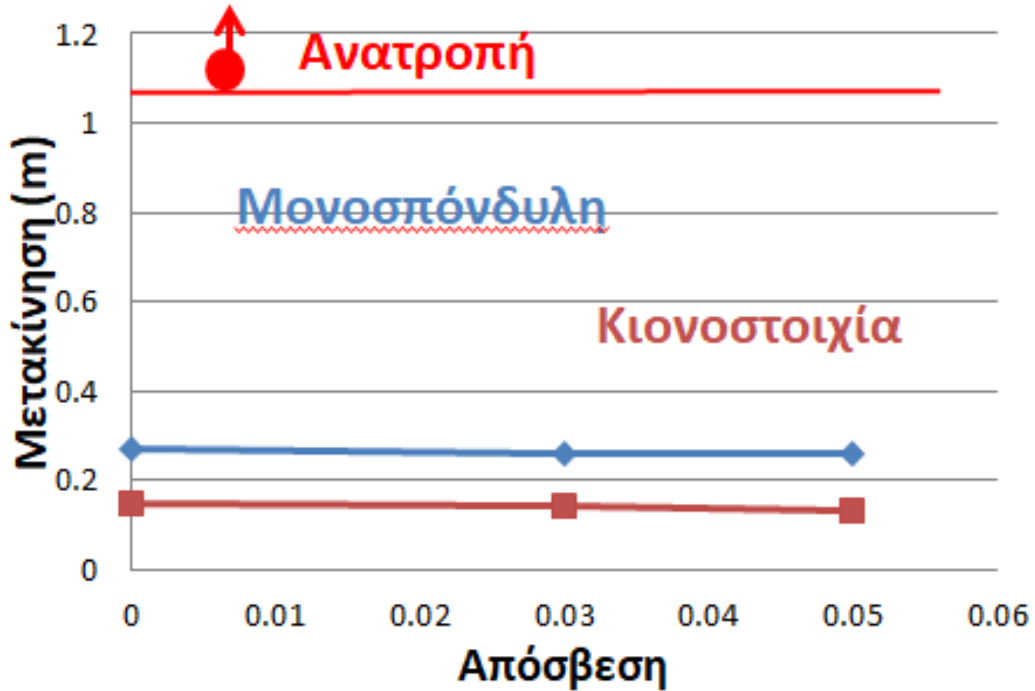
Σχήμα 14.49 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



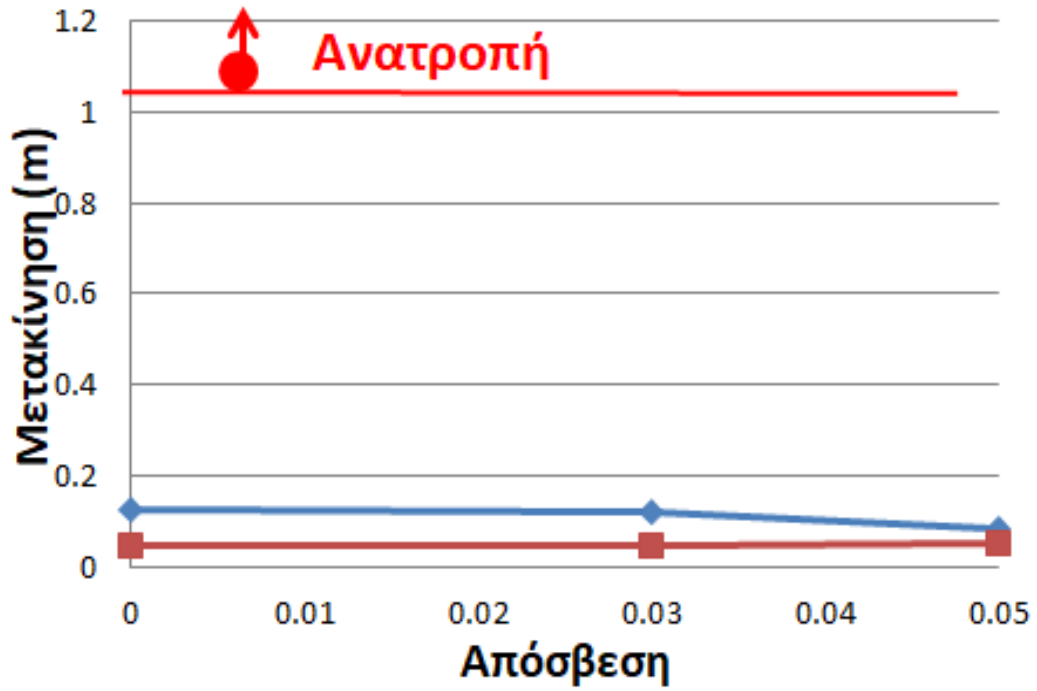
Σχήμα 14.50 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g



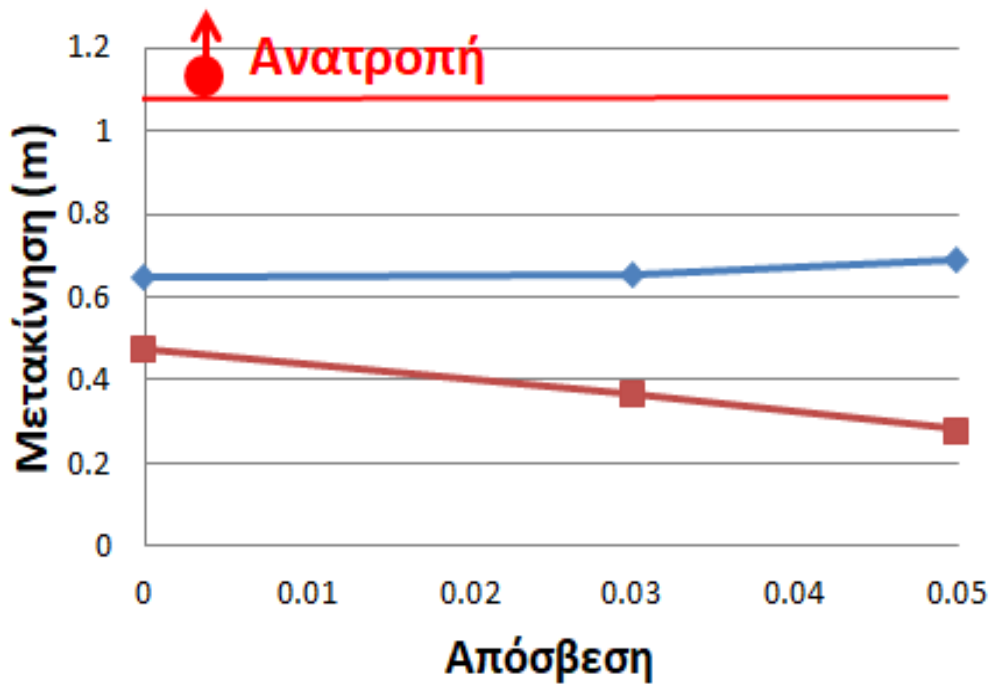
Σχήμα 14.51 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.52 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



Σχήμα 14.53 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g



Σχήμα 14.54 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g

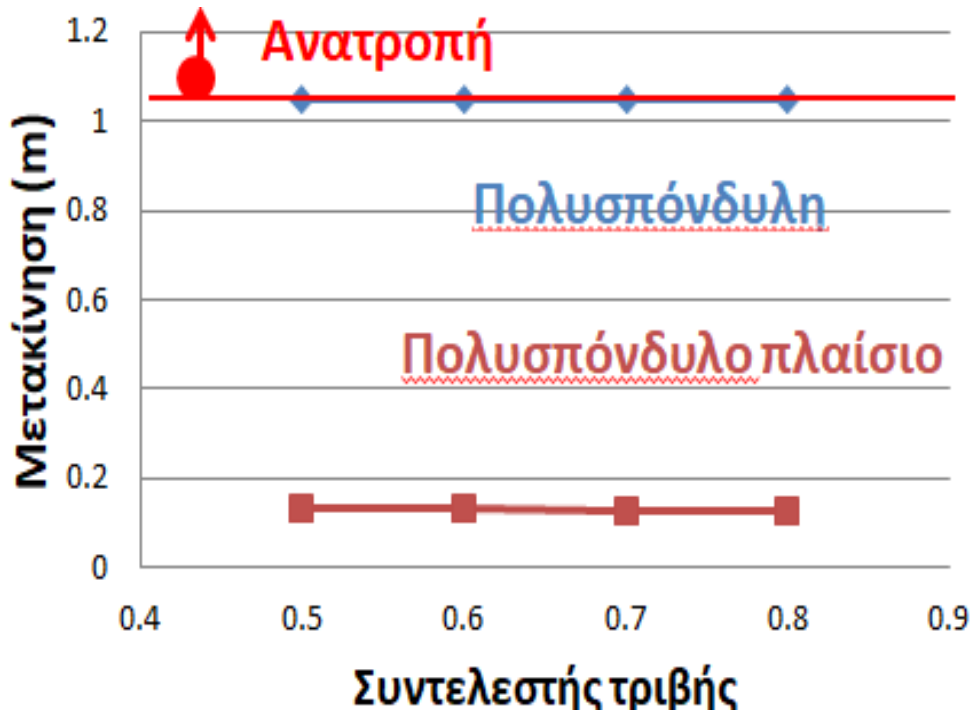
Στην περίπτωση όλων των διαγραμμάτων, φαίνεται ότι οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις της κιονοστοιχίας είναι μικρότερες από αυτές του μονοσπόνδουλου κίονα, φαινόμενο το οποίο είναι λογικό χάριν της δυσκαμψίας που παρέχει το επιστύλιο στους μονολιθικούς κίονες της κιονοστοιχίας. Ακόμα, παρατηρούμε ότι η διαφορά των μετακινήσεων των δύο μοντέλων για τη σεισμική διέγερση L'Aquila είναι μικρή, κάτι το οποίο περιμέναμε λόγω του μικρού συχνοτικού περιεχομένου του σεισμού της L'Aquila. Επίσης, όσον αφορά την απόσβεση, για τιμή συντελεστή απόσβεσης 5%, οι τιμές των μετακινήσεων των δύο μοντέλων έχουν κοντινές τιμές. Τέλος, όσον αφορά τη σεισμική διέγερση Καλαμάτα 0.3g, φαίνεται ότι αύξηση της απόσβεσης σηματοδοτεί και αύξηση της διαφοράς των μέγιστων σχετικών μετακινήσεων των δύο μοντέλων. Κάτι το οποίο δείχνει τη διαφορά συμπεριφοράς των κατασκευών στη μεταβολή του συντελεστή τριβής.

14.4 Σύγκριση πολυσπόνδουλου κίονα – πολυσπόνδουλου πλαισίου

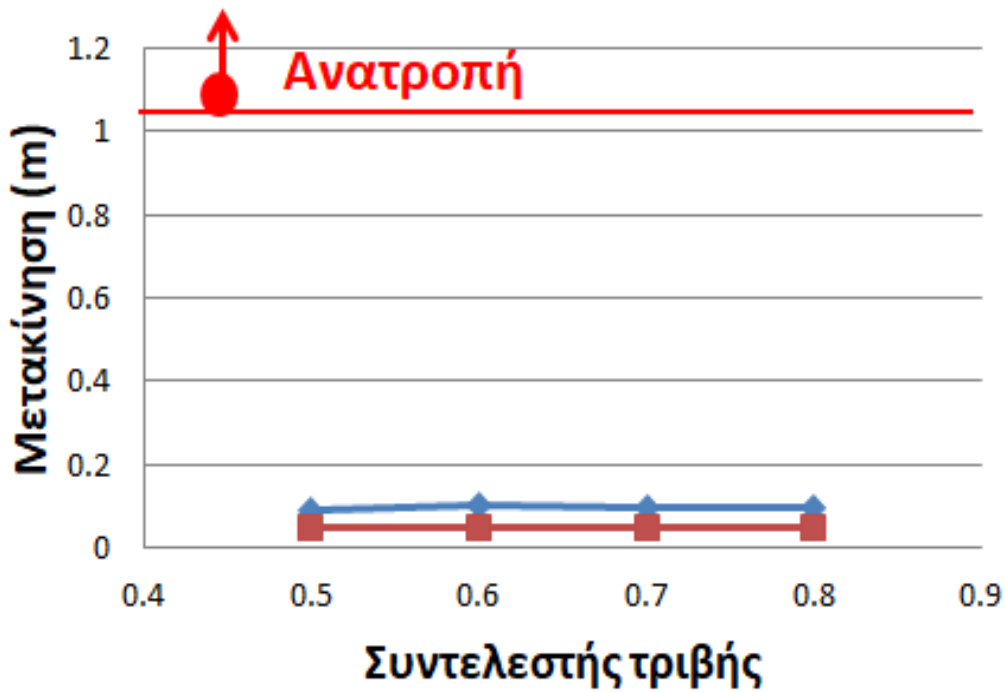
Όσον αφορά τη σύγκριση του πολυσπόνδουλου κίονα και του πολυσπόνδουλου πλαισίου, αυτή έγινε με βάση το συντελεστή τριβής και το συντελεστή απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκρίσεις έγιναν για τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του κάθε μοντέλου ξεχωριστά και για τιμές των επιταχύνσεων. Επίσης, τα μοντέλα συγκρίθηκαν και μόνο ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση αλλά και για την περιορισμένη κίνηση εκτός επιπέδου.

14.4.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

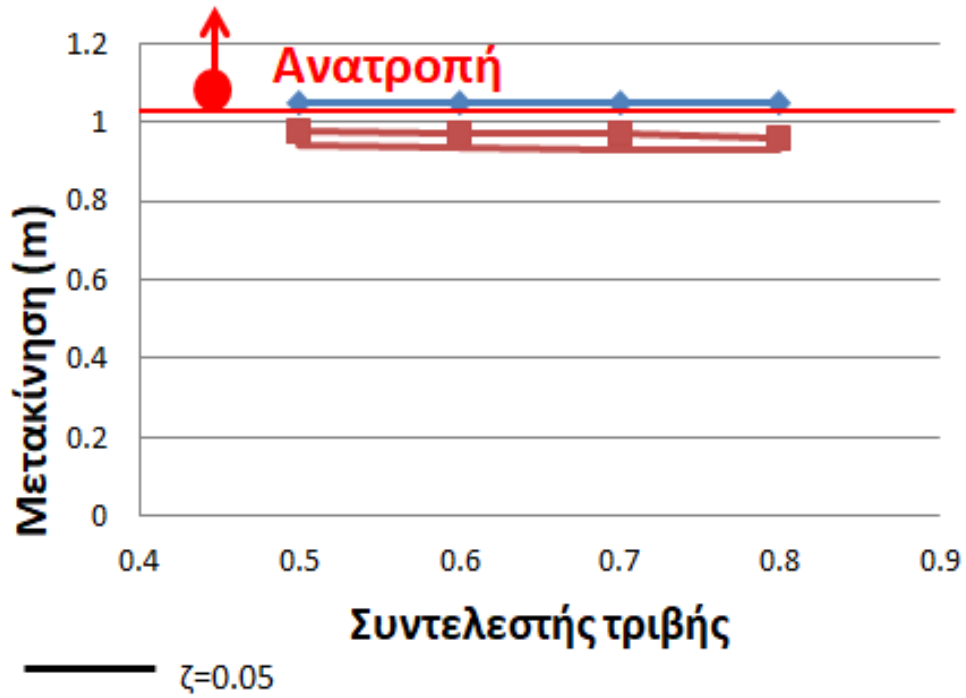
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για τα τις σεισμικές διεγέρσεις L'Aquila 0.3g, Καλαμάτα 0.3g και Σύνταγμα 0.3g:



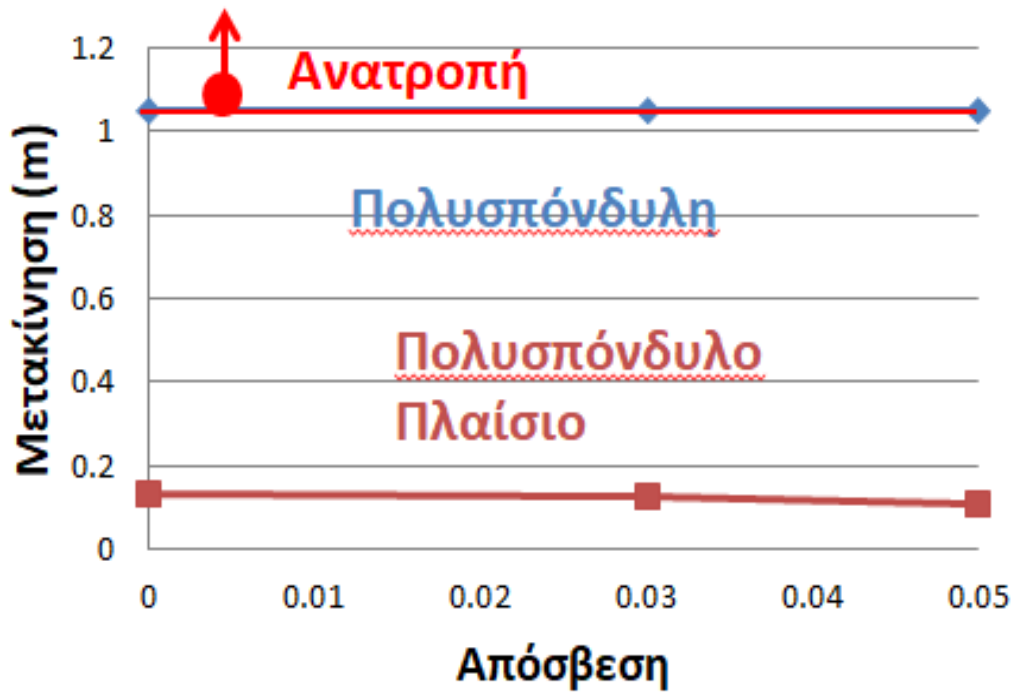
Σχήμα 14.55 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



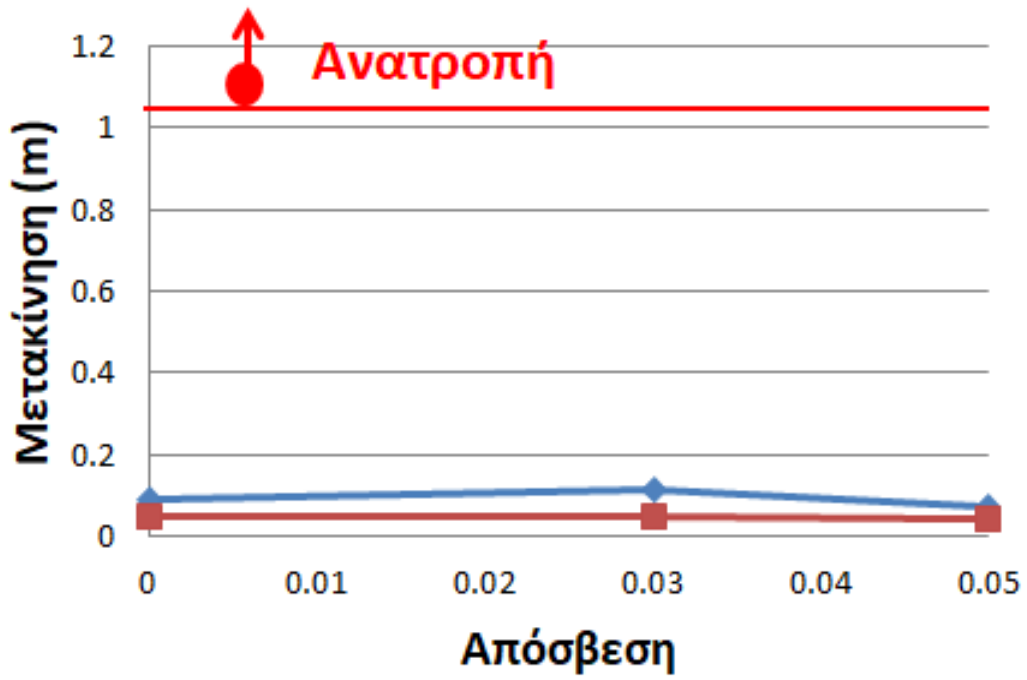
Σχήμα 14.56 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g



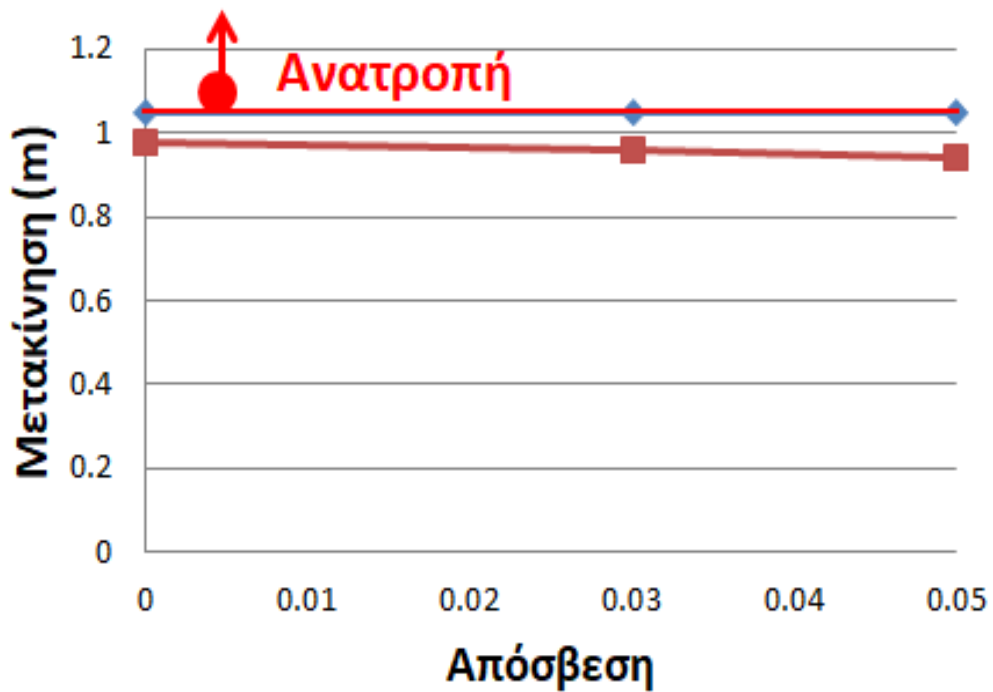
Σχήμα 14.57 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.58 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



Σχήμα 14.59 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g



Σχήμα 14.60 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g

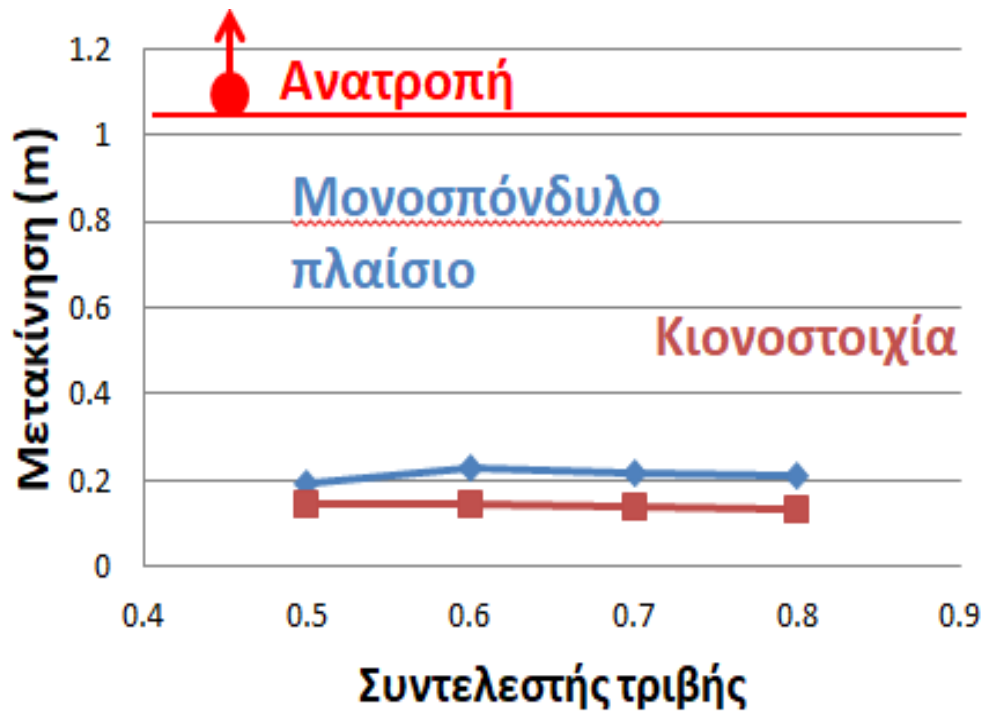
Παρατηρούμαι ότι, όπως και σε όλες τις συγκρίσεις κίωνων και πλαισιακών κατασκευών ότι οι μετακινήσεις του πολυσπόνδου πλαισίου παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές από αυτές του κίονα. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας που παρέχει το επιστύλιο στους σπονδυλωτούς κίονες του πλαισίου. Ακόμα, στη σεισμική διέγερση Σύνταγμα οι διαφορές των μέγιστων σχετικών μετακινήσεων των δύο μοντέλων είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τη διαφορά μετακινήσεων που υπάρχει στους άλλους δύο σεισμούς. Όσον αφορά το συντελεστή απόσβεσης, για σεισμό L'Aquila 0.3g, και τιμή απόσβεσης 5%, οι τιμές των μετατοπίσεων των δύο μοντέλων παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές. Τέλος, για αύξηση της απόσβεσης στο σεισμό Καλαμάτα, οι τιμές των μετακινήσεων του πολυσπόνδου πλαισίου φαίνεται να μειώνονται.

14.5 Σύγκριση μονοσπόνδου πλαισίου – κιονοστοιχίας

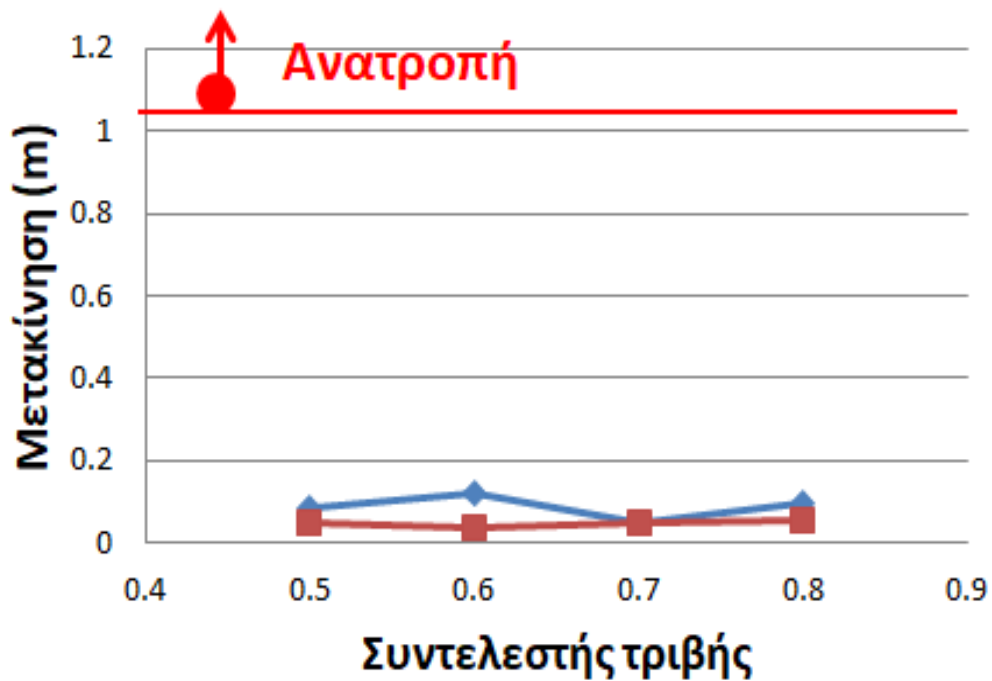
Όσον αφορά τη σύγκριση του μονοσπόνδου πλαισίου και της κιονοστοιχίας, αυτή έγινε με βάση το συντελεστή τριβής και το συντελεστή απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκρίσεις έγιναν για τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του κάθε μοντέλου ξεχωριστά και για τιμές επιταχύνσεων 0.3g. Επίσης, τα μοντέλα συγκρίθηκαν μόνο για ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση.

14.5.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

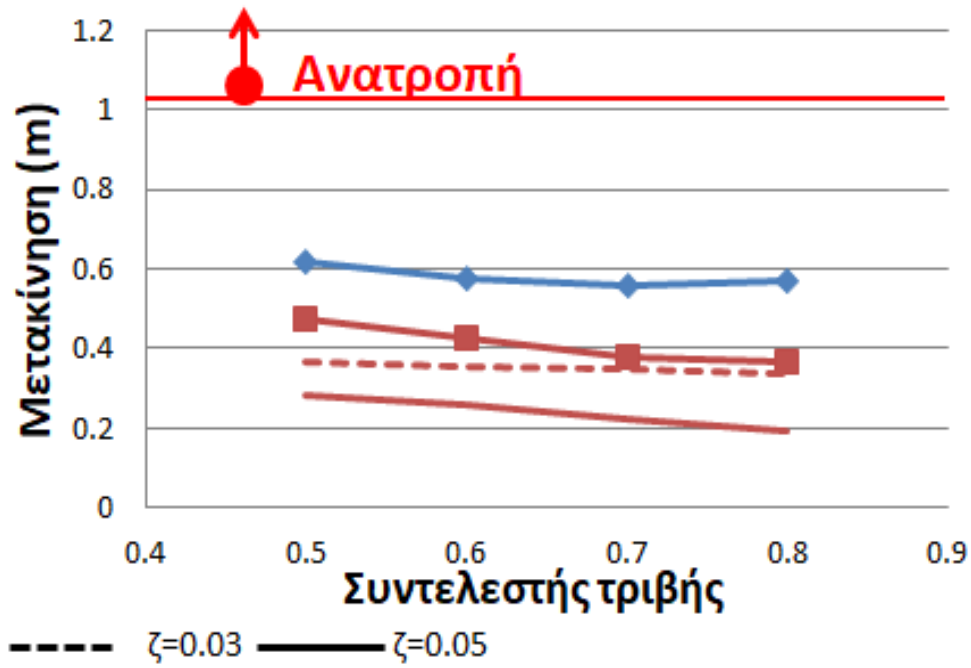
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για τα τις σεισμικές διεγέρσεις L'Aquila 0.3g, Καλαμάτα 0.3g και Σύνταγμα 0.3g:



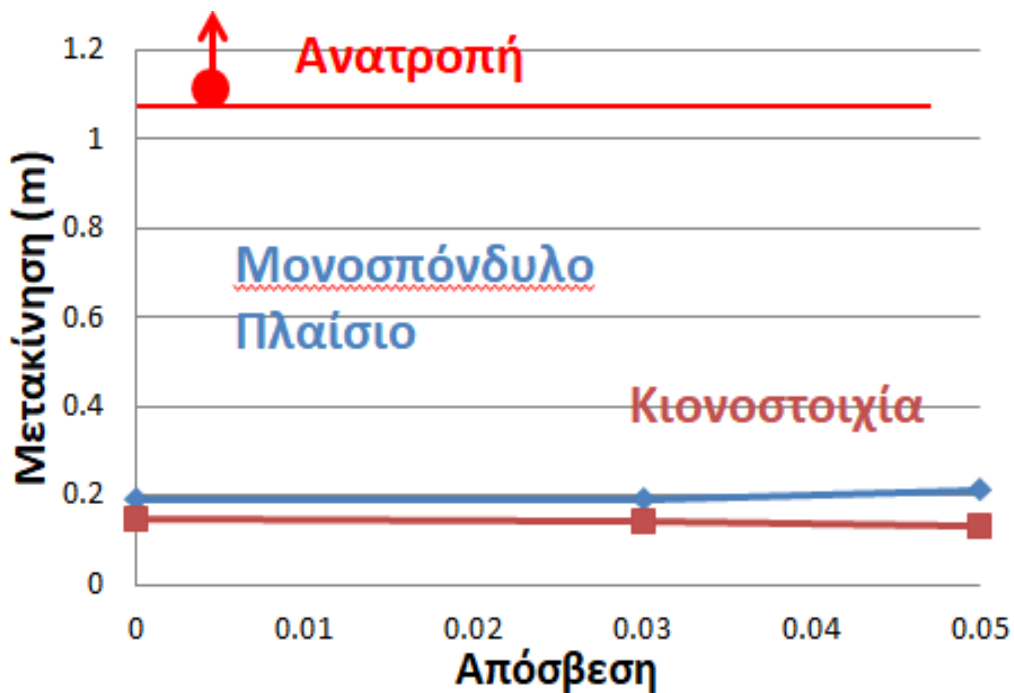
Σχήμα 14.61 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



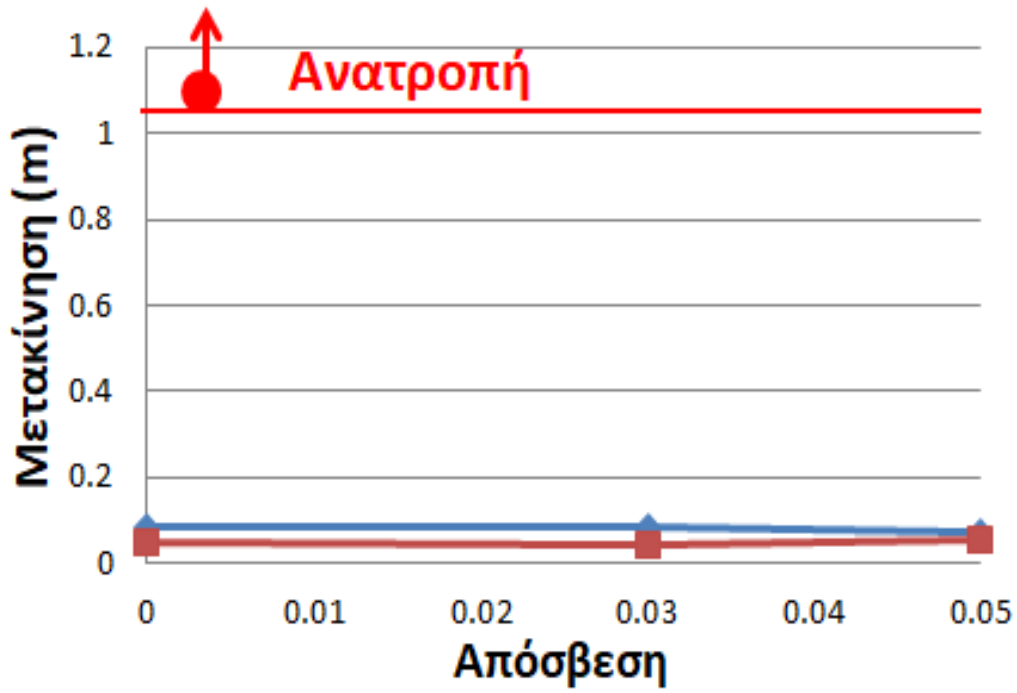
Σχήμα 14.62 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g



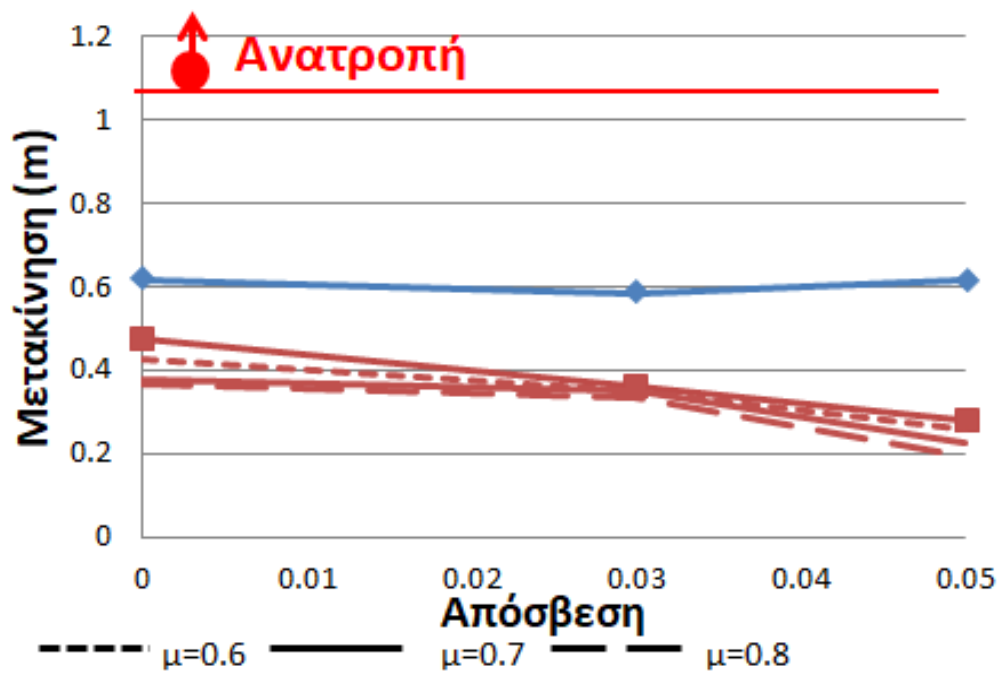
Σχήμα 14.63 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.64 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



Σχήμα 14.65 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g



Σχήμα 14.66 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g

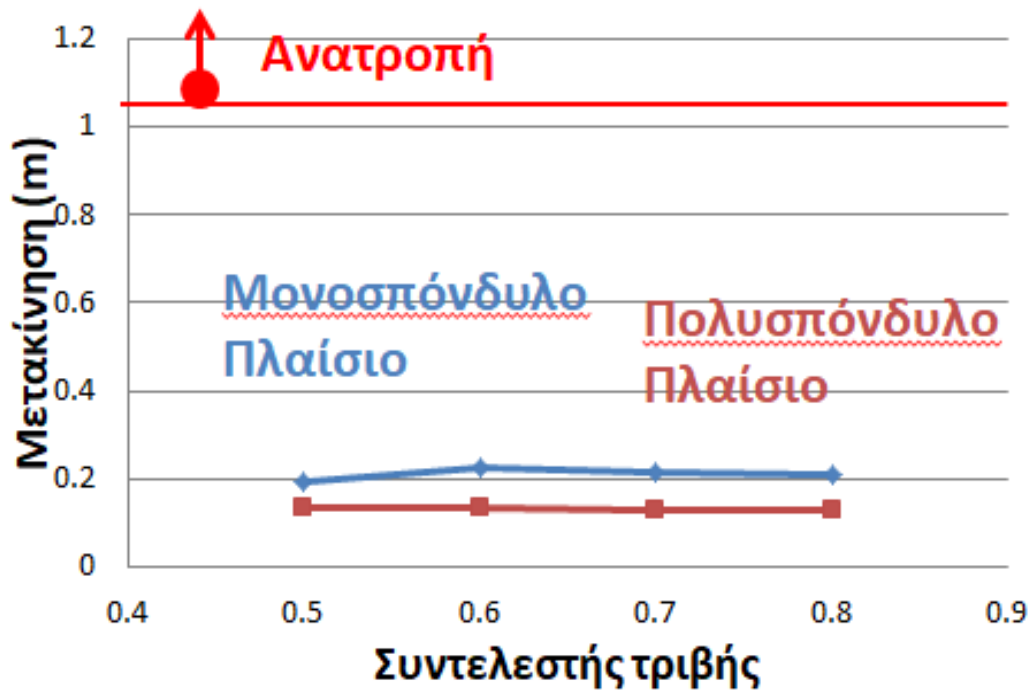
Είναι εμφανές σε όλες τις περιπτώσεις αναλύσεων ότι οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις του μονοσπόνδυλου πλαισίου είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που παρουσιάζονται στη κιονοστοιχία για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις. Ακόμα, όσον αφορά το συντελεστή τριβής, για τιμή $\mu=0.7$ και σεισμό L'Aquila 0.3g, οι τιμές των επιταχύνσεων των δύο μοντέλων έχουν παραπλήσιες τιμές. Επίσης, στη σεισμική διέγερση Καλαμάτα παρατηρούμε ότι οι διαφορές των μετακινήσεων των δύο μοντέλων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις διαφορές των μετακινήσεων που προέκυψαν στις άλλες δύο φορτίσεις. Τέλος στη σεισμική διέγερση Καλαμάτα οι μετακινήσεις μειώνονται για αύξηση του συντελεστή απόσβεσης και αύξηση του συντελεστή τριβής σε μεγαλύτερο ρυθμό από ότι μειώνονται οι μετακινήσεις του μονοσπόνδυλου πλαισίου για τις ίδιες παραμέτρους.

14.6 Σύγκριση μονοσπόνδυλου πλαισίου – πολυσπόνδυλου πλαισίου

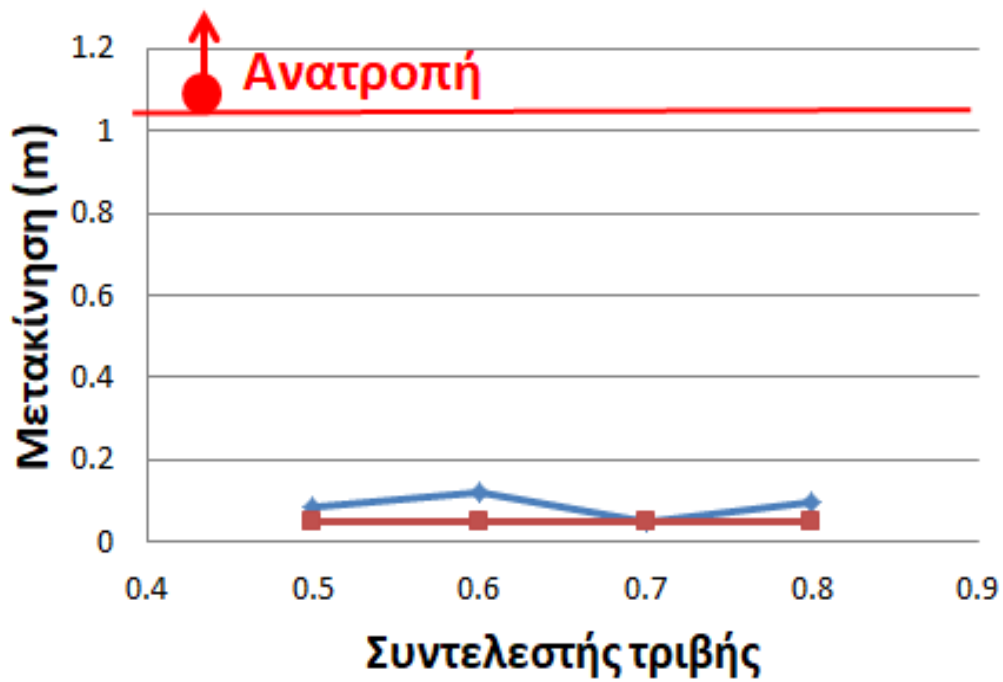
Όσον αφορά τη σύγκριση του μονοσπόνδυλου πλαισίου και του πολυσπόνδυλου πλαισίου, αυτή έγινε με βάση το συντελεστή τριβής και το συντελεστή απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκρίσεις έγιναν για τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του κάθε μοντέλου ξεχωριστά και για τιμή επιτάχυνσης 0.3g. Επίσης, τα μοντέλα συγκρίθηκαν μόνο για ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση.

14.6.1 Ελεύθερη εκτός επιπέδου κίνηση

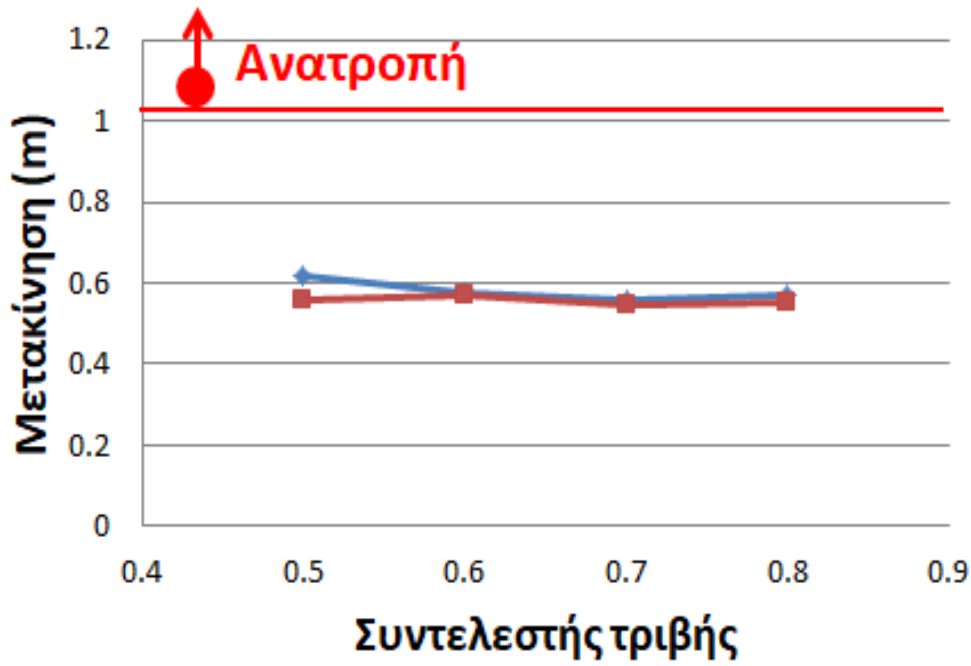
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετακίνησης – συντελεστή τριβής για τα τις σεισμικές διεγέρσεις L'Aquila 0.3g, Καλαμάτα 0.3g και Σύνταγμα 0.3g:



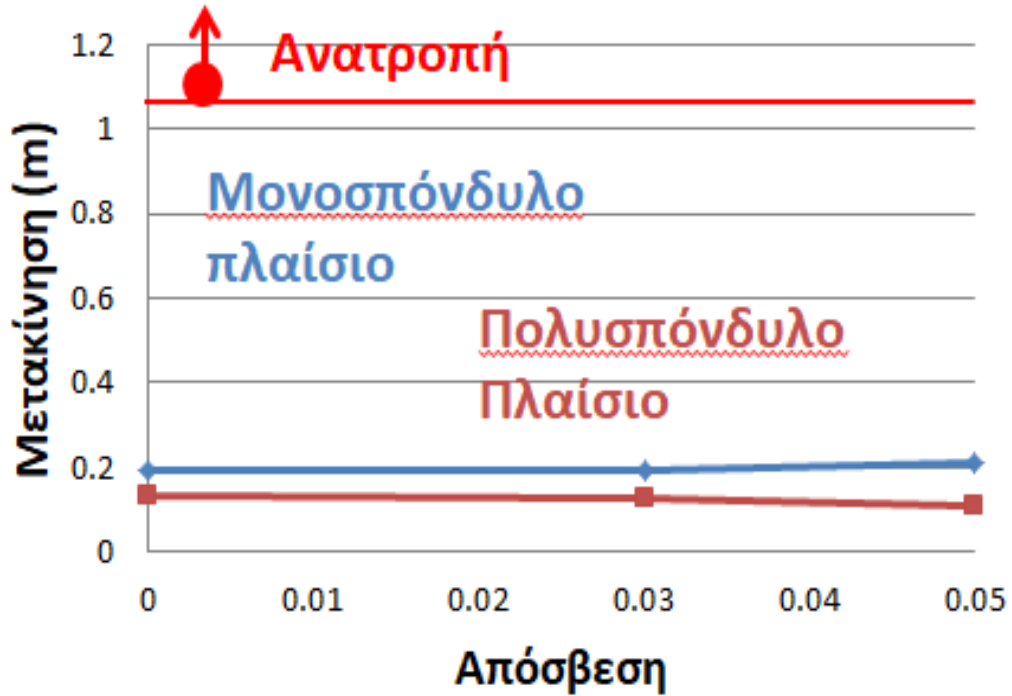
Σχήμα 14.67 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



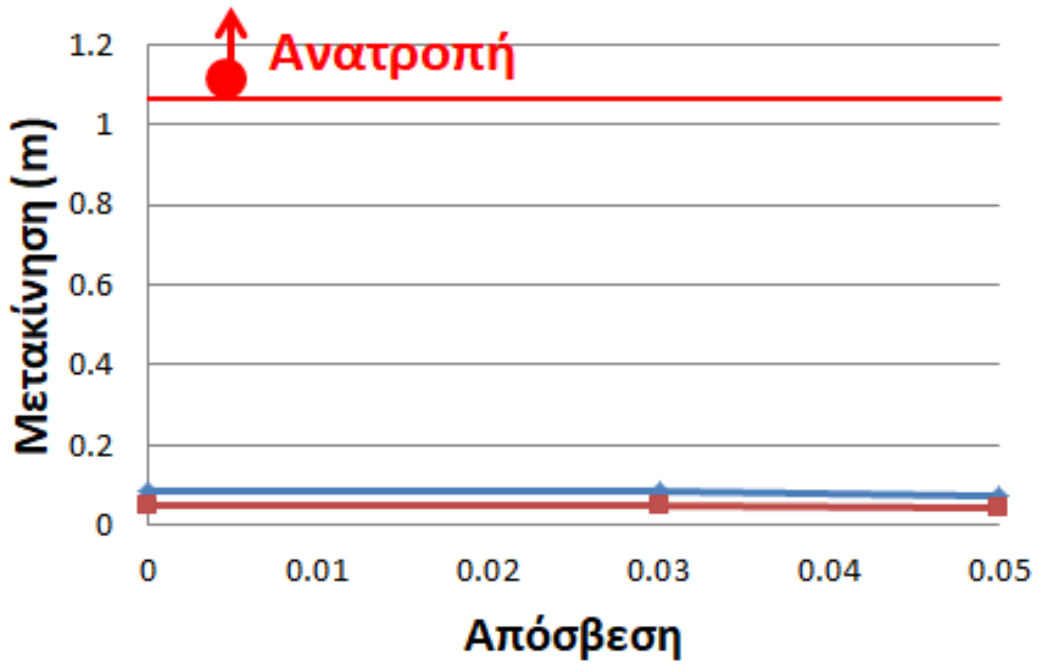
Σχήμα 14.68 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό L'Aquila 0.3g



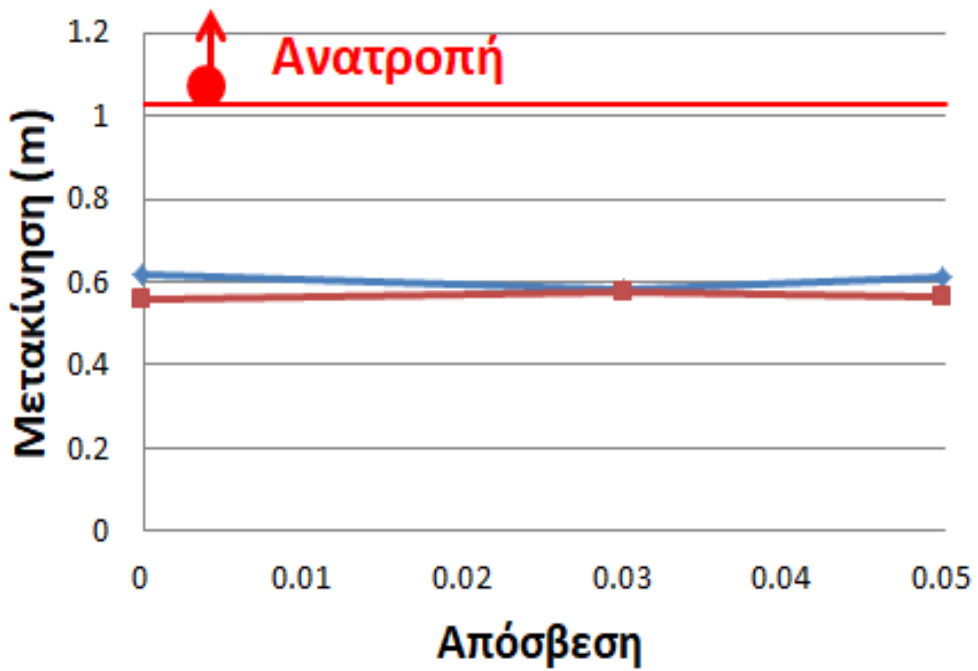
Σχήμα 14.69 Διάγραμμα μετακίνηση – συντελεστή τριβής για σεισμό Καλαμάτα 0.3g



Σχήμα 14.70 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Σύνταγμα 0.3g



Σχήμα 14.71 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό L'Aquila 0.3g



Σχήμα 14.72 Διάγραμμα μετακίνηση – απόσβεσης για σεισμό Καλαμάτα 0.3g

Από τα παραπάνω διαγράμματα που αφορούν τη σύγκριση του μονοσπόνδου με του πολυσπόνδου πλαισίου, παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις του μονοσπόνδου πλαισίου εμφανίζουν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μεγαλύτερες μετακινήσεις. Όσον αφορά το συντελεστή τριβής, παρατηρούμε ότι στη σεισμική διέγερση Καλαμάτα 0.3g, για αύξηση του συντελεστή τριβής παρατηρούμαι ότι οι τιμές των μετακινήσεων έχουν παραπλήσιες τιμές, πλην της περίπτωσης για τιμή συντελεστή τριβής $\mu=0.5$. Τέλος, όσο αφορά το συντελεστή απόσβεσης, για τιμή συντελεστή απόσβεσης $\zeta=0.03$ και σεισμό Καλαμάτα, οι τιμές των μέγιστων σχετικών μετακινήσεων των δύο μοντέλων έχουν παραπλήσιες τιμές .

15 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός και το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η προσέγγιση της σεισμικής απόκρισης κiónων και πλαισιακών κατασκευών αρχαίων. Η προσπάθεια προσέγγισης της απόκρισης είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα λόγω της ύπαρξης μη γραμμικών φαινομένων. Υπάρχει η δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος μέσω μαθηματικών εκφράσεων μόνο αν το η άκαμπτη κατασκευή λικνίζεται σε μια άκαμπτη βάση. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η λύση του προβλήματος είναι μια πραγματικά απρόβλεπτη διαδικασία. Για αυτό το λόγο, ο μόνος τρόπος να προσεγγιστεί το πρόβλημα είναι μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στον τρισδιάστατο χώρο. Στη παρούσα εργασία έγινε μια τέτοια προσπάθεια, μοντελοποίησης και ανάλυσης των μοντέλων στον τρισδιάστατο χώρο, παραθέτοντας παρακάτω τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που βγήκαν.

Πρώτον διερευνήθηκε σε βάθος η επιρροή του συντελεστή τριβής και του συντελεστή απόσβεσης στις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις των παραπάνω μοντέλων. Ο συντελεστής τριβής δε κρίθηκε κρίσιμος στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ενώ ο συντελεστής απόσβεσης έδειξε να επηρεάζει την απόκριση μόνο του μονοσπόνδυλου κίονα στη περίπτωση της περιορισμένης κίνησης εκτός επιπέδου. Στις άλλες περιπτώσεις, δηλαδή όταν η κίνηση εκτός επιπέδου ήταν ελεύθερη, ο συντελεστής απόσβεσης δεν ήταν κρίσιμος.

Δεύτερον, επιβεβαιώθηκε η κρισιμότητα του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμού, πλην της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι ο σεισμός Καλαμάτα έδωσε τις μεγαλύτερες μετακινήσεις σε όλες τις περιπτώσεις αναλύσεων για όλα τα μοντέλα, ενώ ο σεισμός L'Aquila έδωσε τις χαμηλότερες τιμές μετακινήσεων.

Τρίτον, επιβεβαιώθηκε η ευστάθεια των λικνιζόμενων πλαισιακών κατασκευών σε σχέση με τους λικνιζόμενους μεμονωμένους κίονες. Σε όλες τις περιπτώσεις αναλύσεων οι πλαισιακές συγκριτικά εμφάνιζαν χαμηλότερες μετακινήσεις. Επίσης, όσον αφορά την απόκριση των σπονδυλωτών πλαισιακών κατασκευών αυτές γίνονται πιο ευσταθείς όταν φέρουν επιστύλιο, διαφορετικά εδραζόμενοι ως μεμονωμένοι κίονες αναπτύσσουν μεγάλες μετακινήσεις πράγμα που τις καθιστά ευάλωτες στους σεισμούς που διερευνήθηκαν.

Τέταρτον, το scaling έδειξε πως αυξάνοντας την επιτάχυνση μονοτονικά, αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε μετακίνηση στη πλειοψηφία των περιπτώσεων. Οι μετακινήσεις που αναπτυσσότουσαν σε τιμές επιταχύνσεων 0.4g ήταν μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές για 0.3g.

Τέλος ,μελλοντικά σαν έρευνα στα πλαίσια διπλωματικής ή και ακόμα διδακτορικής διατριβής την ανάλυση των παραπάνω μοντέλων σε ένα εύρος πολλών σεισμών για καθαρά δειγματικούς λόγους, ώστε να προσεγγιστεί με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια η σεισμική απόκριση κίονων και πλαισιακών κατασκευών αρχαίων μνημείων .Επιπροσθέτως ,ένα ακόμα ενδιαφέρον πεδίο για μελέτη και σύνταξη διπλωματικής διατριβής είναι και η προσπάθεια προσέγγισης πολυσπόνδουλων κατασκευών ,με τη διαφορά ότι η προσέγγιση να γίνει και στους ενδιάμεσους σπονδύλους ,ώστε να προσεγγιστεί η σεισμική συμπεριφορά όλης της κατασκευής και όχι μόνο της μετακίνησης της σχετική μετακίνησης μεταξύ κορυφής και βάσης.

16 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Diamantopoulos S, Fragiadakis M. Seismic response assessment of rocking systems using single degree-of-freedom oscillators. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2019;48:689–708
2. Fragiadakis M, Diamantopoulos S. Fragility and risk assessment of freestanding building contents. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2020;49:1028-1048
3. Diamantopoulos S., Fragiadakis M. (2017). Simple models for the seismic response of rigid or flexible blocks, 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2017, Rhodes, Greece, 15-17 June 2017.
4. Diamantopoulos S., Fragiadakis M. (2019). Seismic fragility and risk assessment of rocking frame structures (Υπολογισμός της σεισμικής τρωτότητας και του σεισμικού κινδύνου σε λικνιζόμενες πλαισιακές κατασκευές), 4th Panhellenic Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology (4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας), 5-7 September 2019.
5. Spyridon G. Diamantopoulos (2017). Seismic Response Assessment of Rigid and Flexible Rocking Bodies using Simple Finite Element Models. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
6. Vlachos N., Diamantopoulos S., Fragiadakis M. (2019). Seismic response assessment of artefacts freestanding on a solid pedestal (Σεισμική συμπεριφορά έργων τέχνης που εδράζονται σε άκαμπτη λικνιζόμενη βάση), 4th Panhellenic Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology (4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας), 5-7 September 2019.
7. Diamantopoulos S., Koutoulas K., Fragiadakis M. (2018). Seismic Response Assessment of Rigid and Flexible Rocking Frames Using Simple Finite Element Models. 9th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Chania, Greece, 4-6 June 2018.
8. Milne J. (1885). "Seismic experiments", *Transactions of the Seismological Society of Japan*, Vol 8. pp. 1-82.
9. Yim C.S., Chopra A.K. (1985). "Simplified earthquake analysis of multistory structures with foundation uplift", *Earthq Eng Struct Dyn.*, 11(12):2708–2731.
10. Housner H.H. (1963). "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53:404–417.
11. Politopoulos I. (2010). "Response of seismically isolated structures to rocking-type excitations", *Earthq Eng Struct Dyn.*, 39:325–342.

12. Dimitrakopoulos E.G., DeJong M.J. (2012). "Revisiting the rocking block: closed-form solutions and similarity laws", "Proceedings of the Royal Society A; 2012; London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences", 468.
13. Taniguchi T. (2002). "Non-linear response analyses of rectangular rigid bodies subjected to horizontal and vertical ground motion", *Earthq Eng Struct Dyn.*, 31(8):1481–1500.
14. Makris N., Konstantinidis D. (2003). "The rocking spectrum and the limitations of practical design methodologies", *Earthq Eng Struct Dyn.*, 32:265–289.
15. Psycharis I., Drougas A.E., Dasiou M.E. (2011). "Seismic Behaviour of the Walls of the Parthenon. A Noumerical Study", *Computational Methods in Earthquake Engineering, Computational Methods in Applied Sciences*, 21.
16. Psycharis I. (1990). "Dynamic behaviour of rocking two-block assemblies", *Earthq Eng Struct Dyn.*, 19(4):555– 575.
17. Spanos P.D., Roussis P.C., Politis N. P.A. (2001). "Dynamic analysis of stacked rigid blocks", *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 21:559 -578
18. Ambraseys N., Psycharis I. (2012). "Assessment of the long –term seismicity of Athens from two classical columns", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10:1635–1666.
19. Giouvanidis A.I., Dimitrakopoulos E.G., DeJong M.J. (2015), "Seismic response of rocking bridge bents with parameterized flag-shaped hysteretic behavior", *Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Pacific*, Sydney, Australia, 6-8 November 2015.
20. Makris N., Vassiliou M.F. (2013), "Planar rocking response and stability analysis of an array of free-standing columns capped with a freely supported rigid beam", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42:431–449.
21. Papantonopoulos C., Psycharis I. N., Papastamatiou D. Y., Lemos J. V. and Mouzakis H. P.(2002) "Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31:1699–1717.
22. Drosos V, Anastasopoulos I, Gazetas G (2012). "Shaking table testing of multi-drum columns". Technical report, National Technical University of Athens, Greece.
23. Mander J.B., Cheng C. T. (1997), "Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design", Technical Rep., National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York, Buffalo, New York.
24. ΠΕΤΑΛΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ (2012).Αριθμητική διερεύνηση της λικνιστικής απόκρισης συμπαγών σωμάτων. Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

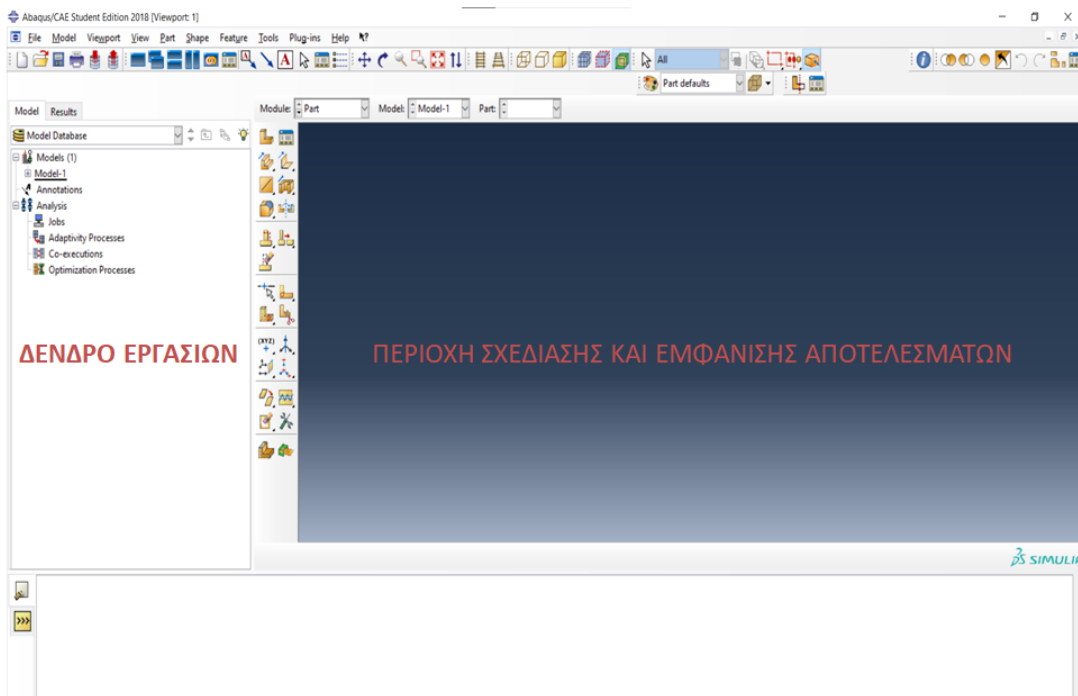
25. Ambraseys N., Psycharis I. (2011). "Earthquake Stability of Columns and Statues", *Journal of Earthquake Engineering*, 15:685–710.
26. Priestley M.N., Seible F., Calvi G.M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*, Wiley, New York.
27. Skinner R., Tyler R., Heine A., Robinson W. (1980), "Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquakes", *Bull. N. Z. Natl. Soc. Earthquake Eng.*, 13(1):22–36.
28. Schau H., Johannes M. (2013). Rocking and sliding of unanchored bodies subjected to seismic load according to conventional and nuclear rules. *COMPdyn 2013, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟΥ ΚΙΟΝΑ ΣΤΟ ABAQUS/CAE

Στο παράρτημα αυτό θα παρουσιαστεί βήμα προς βήμα η διαμόρφωση του πολυσπόνδου κίονα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE το οποίο υποβάλλεται στη σεισμική διέγερση της L'Aquila .

Ανοίγουμε το Abaqus/CAE student edition 2018. Η αρχική οθόνη του προγράμματος είναι η εξής:

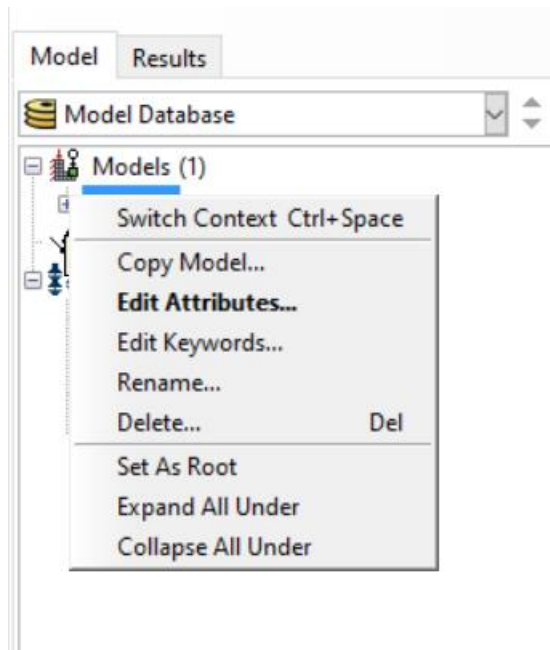


Εικόνα 1

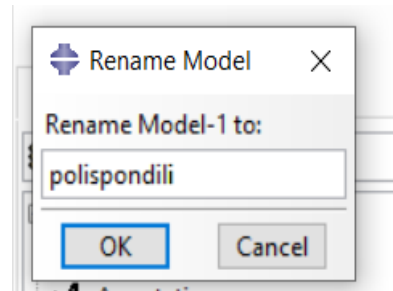
Όπως φαίνεται στην εικόνα 1 ,η οθόνη χωρίζεται χονδρικά σε δύο μέρη. Στα αριστερά της οθόνης βρίσκεται το δένδρο εργασιών ,από το οποίο είναι δυνατόν να ελεγχθούν όλες οι παράμετροι του κάθε μοντέλου και των αποτελεσμάτων. Πάνω από τη περιοχή σχεδίασης μπορούμε να δούμε ανά πάσα στιγμή σε ποια ενότητα (“module”) της εργασίας βρισκόμαστε και με ποιο μοντέλο (“model”) ασχολούμαστε . Η συνήθη διαδικασία του μοντέλου είναι η εξής: Καταρχάς ,δημιουργούμε τα “parts” ,τα σώματα ,δηλαδή ,από τα οποία θα αποτελείται το μοντέλο. Το επόμενο βήμα είναι η διακριτοποίηση (“mesh”) των σωμάτων σε πεπερασμένα στοιχεία και η διαμόρφωση της γεωμετρίας του μοντέλου (“assembly”) ,το πώς δηλαδή θα τοποθετηθεί το κάθε σώμα στο χώρο αρχικά. Κατόπιν ,ορίζουμε τα βήματα της ανάλυσης (“step”) και τα είδη των αποτελεσμάτων που επιθυμούμε (“output request”). Ορίζουμε τον τρόπο αλληλεπίδρασης των σωμάτων μεταξύ τους (“interaction”) και τα φορτία (“loads”)

και τις δεσμεύσεις (“boundary condition”) που θα εφαρμοστούν στα σώματα του μοντέλου . Τέλος ,ορίζουμε την επίλυση (“job”) και την υποβάλλουμε (“submit”). Μια καινούργια εργασία έχει ήδη δημιουργηθεί, οπότε μπορούμε να αρχίσουμε τη διαμόρφωση του μοντέλου.

Κάνουμε δεξί κλικ στο ‘Model -1’ του δένδρου εργασιών και πατάμε rename (εικ. 2) για να το μετονομάσουμε σε “polispondili” (εικ. 3) και πατάμε OK. Στη συνέχεια ανοίγουμε το δένδρο του μοντέλου “polispondili” ,πατώντας το εικονίδιο ‘+’ αριστερά του μοντέλου .



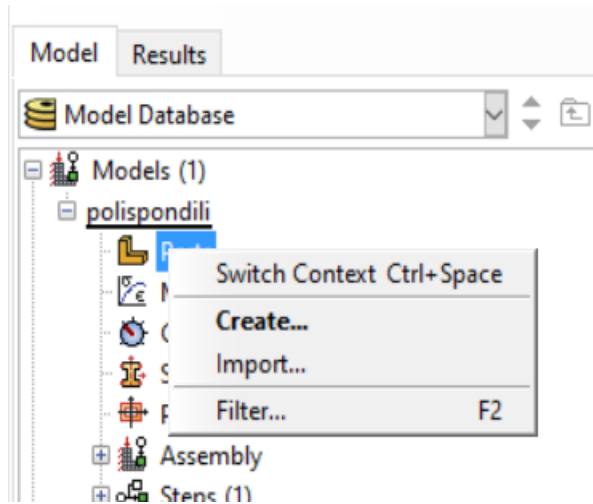
Εικόνα 2



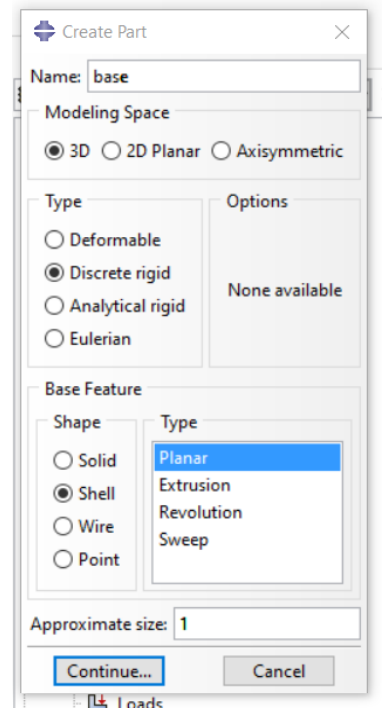
Εικόνα 3

Δημιουργία σωμάτων

Δημιουργούμε τη βάση του πολυσπόνδυλου κίονα κάνοντας δεξί κλικ στο κλάδο ‘parts’ κάτω από το μοντέλο ‘polispondili’ ,ή κάνοντας δεξί κλικ και πατώντας ‘create’ (εικ. 4) .Στο παράθυρο που εμφανίζεται μας ζητείται το όνομα του σώματος που θα δημιουργήσουμε, καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά και το μέγεθός του κατ’ εκτίμηση.

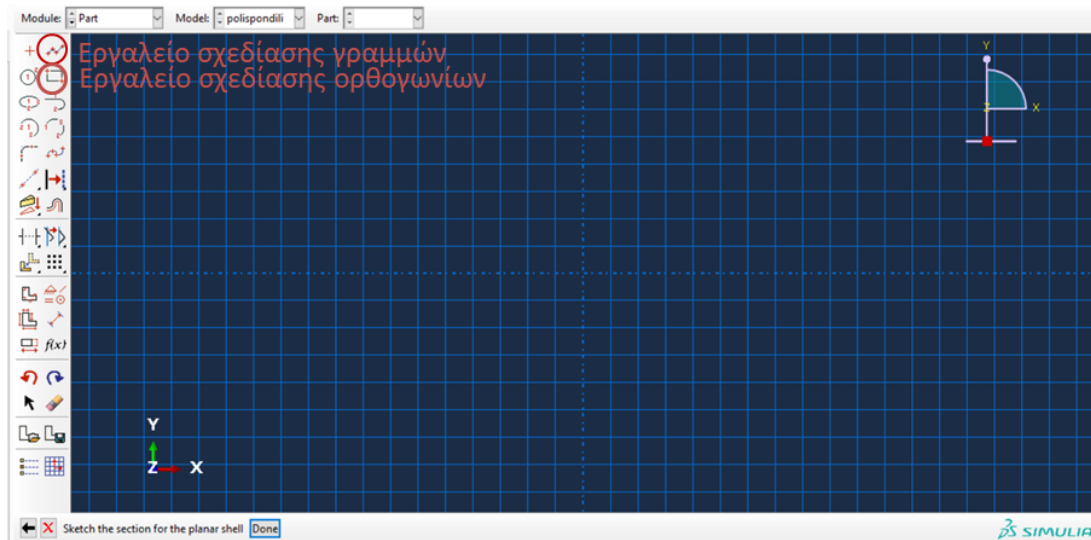


Εικόνα 4



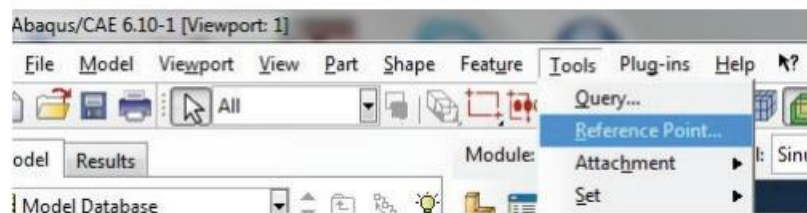
Εικόνα 5

Ας σημειωθεί, ότι το Abaqus δεν χρησιμοποιεί οποιαδήποτε μονάδα μέτρησης (μέτρα, δευτερόλεπτα, Νιούτον κλπ) εκτός των γωνιών που μετριοούνται σε μοίρες, οπότε οι μονάδες που θα εισάγουμε θα πρέπει να συμφωνούν μεταξύ τους, π.χ. να είναι όλες οι μονάδες στο SI. Το μοντέλο που θα δημιουργήσουμε θα είναι τελείως άκαμπτο, οπότε επιλέγουμε τύπο σώματος 'discrete rigid' αντί για 'deformable', ενώ η βάση του θα αναπαριστά μια επιφάνεια 'shell' (εικ.5). Πατώντας το OK το πρόγραμμα μας παραπέμπει στη οθόνη σχεδίασης, όπου μας ζητά να σχεδιάσουμε μια από τις επιφάνειες του σώματος. Η βάση που θα δημιουργήσουμε θα έχει διαστάσεις 2x2 σε μέτρα. Επιλέγουμε το εργαλείο 'create lines: Rectangle' και συμπληρώνουμε στο κουτάκι που εμφανίστηκε κάτω από τη περιοχή σχεδίασης τις συντεταγμένες των αντιδιαμετρικών από το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο που θέλουμε να σχεδιάσουμε: -1, 1 Enter 1, -1 Enter. Αποεπιλέγουμε το εργαλείο το εργαλείο για τη δημιουργία ορθογωνίων πατώντας άλλη μια φορά πάνω στο εικονίδιο του ή κάνοντας μεσαίο κλικ με το ποντίκι. Το μεσαίο κλικ με το ποντίκι υποδηλώνει ολοκλήρωση της τρέχουσας διαδικασίας, οπότε μπορούμε να πατήσουμε ακόμα μια φορά τώρα για να δηλώσουμε πως η σχεδίαση του σώματος έχει ολοκληρωθεί. Εναλλακτικά, πατάμε το πλήκτρο 'Done' που εμφανίστηκε κάτω από τη περιοχή σχεδίασης (εικ.6).



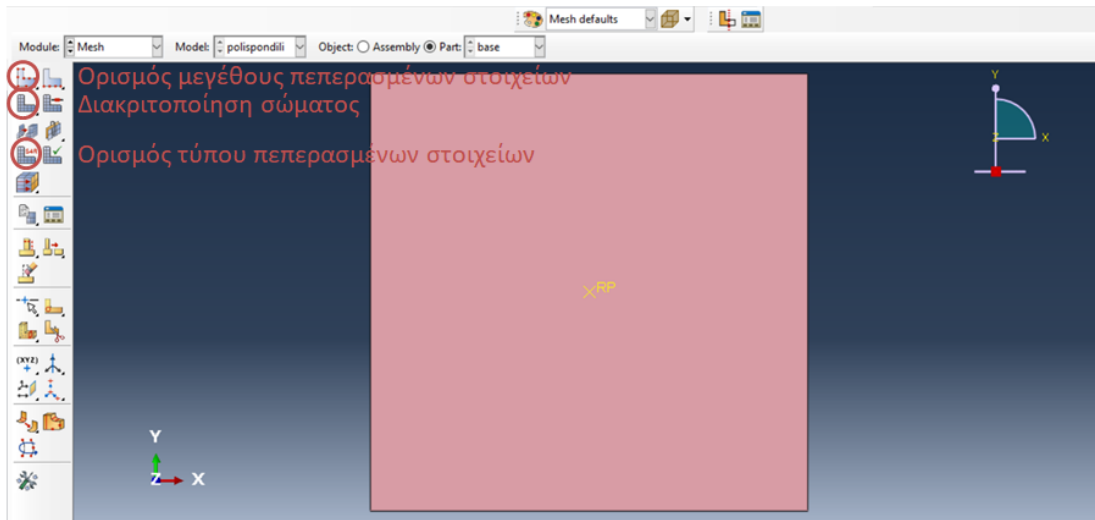
Εικόνα 6

Κάθε απολύτως στερεό σώμα στο Abaqus είναι απαραίτητο να έχει ένα σημείο αναφοράς, 'reference point' (RP), στο οποίο εφαρμόζονται οι τυχούσες δυνάμεις ή δεσμεύσεις. Για τη δημιουργία του κάνουμε κλικ στη επιλογή Tools → Reference Point από το βασικό μενού του προγράμματος (εικ.7) και συμπληρώνουμε τις συντεταγμένες του σημείου. Αυτές δεν έχουν μεγάλη σημασία ,αρκεί να τις ορίσουμε κάτω από το επίπεδο της βάσης για ευκολία του χρήστη ώστε να μη συμπέσει με το σημείο αναφοράς της βάσης του εκάστοτε μοντέλου, οπότε ορίζουμε αυθαίρετα ως :0 ,0 , -0.5.



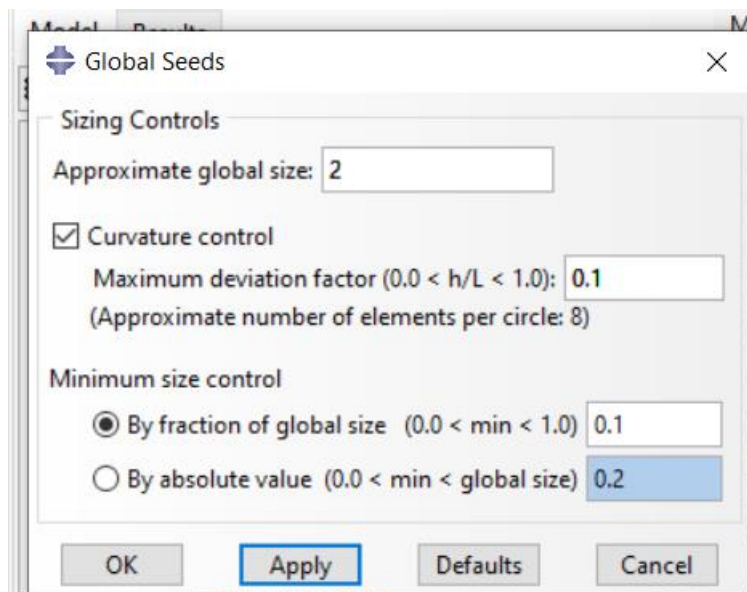
Εικόνα 7

Κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή του κλάδου 'base' του κλάδου 'parts' ώστε να ορίσουμε τη διακριτοποίηση της βάσης.



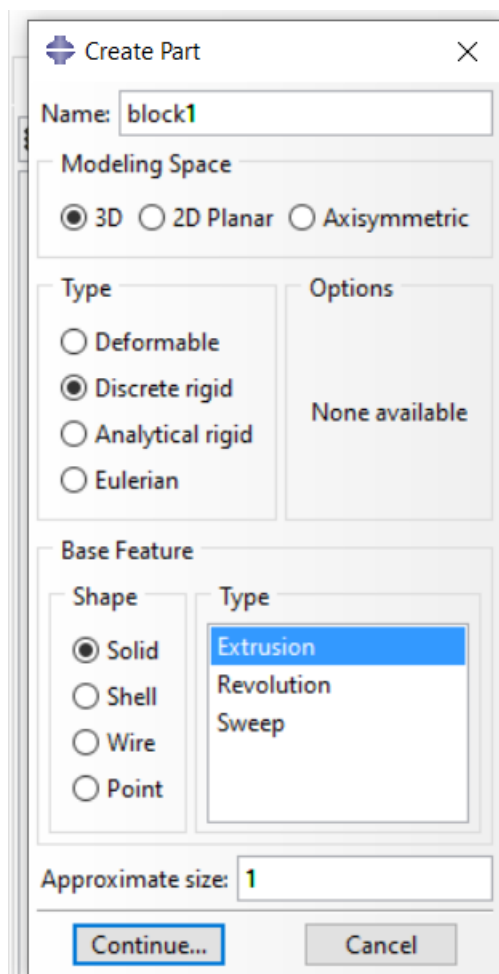
Εικόνα 8

Κάνουμε κλικ στο εργαλείο 'Seed part', όπως φαίνεται στη εικόνα 8, για να ορίσουμε το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων. Θα εκλάβουμε τη βάση ως ένα και μόνο στοιχείο, καθώς από τις δοκιμές φάνηκε πως η διακριτοποίηση της βάσης δε παίζει κανένα ρόλο στην απόκριση. Οπότε ορίζουμε το μέγεθος του στοιχείου ίσο με 2 (μέτρο) (εικ.9). Τις υπόλοιπες επιλογές τις αφήνουμε ως έχουν και πατάμε OK. Κατόπιν επιλέγουμε το εργαλείο 'Mesh part' και πατάμε YES ή μεσαίο κλικ για να γίνει η διακριτοποίηση του σώματος.

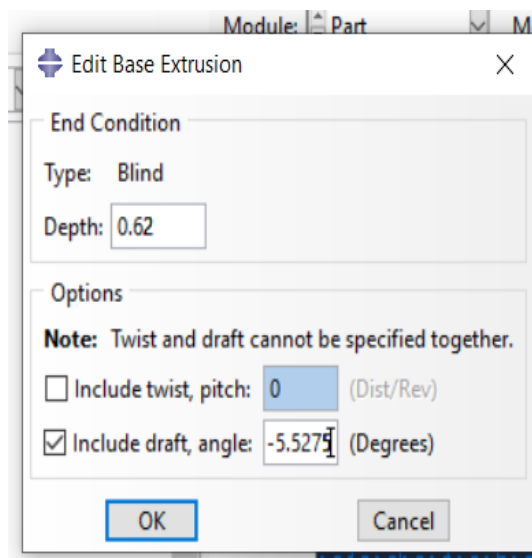


Εικόνα 9

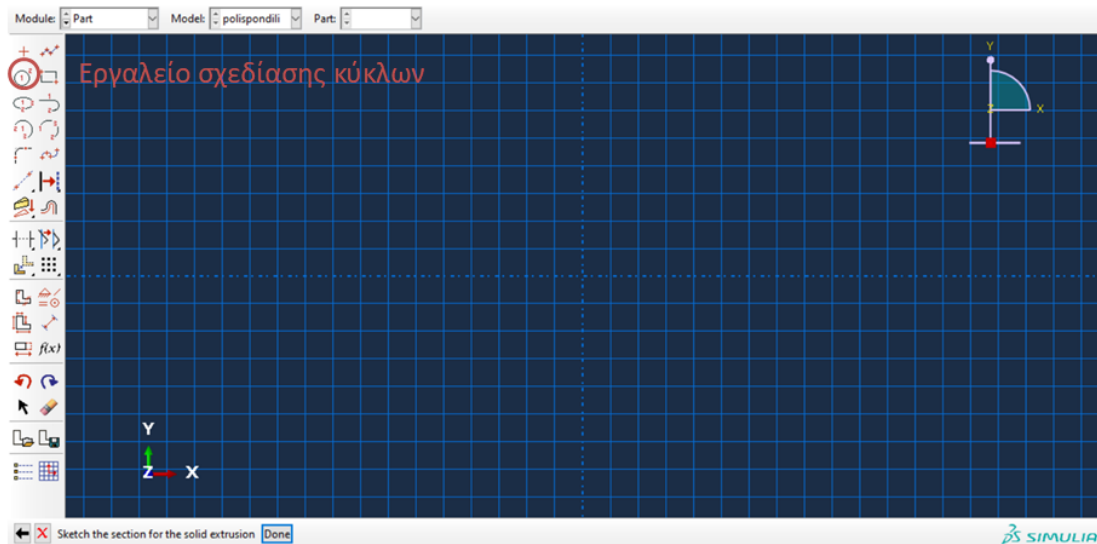
Με τον ίδιο τρόπο με προηγουμένως δημιουργούμε ένα νέο 'part' το οποίο θα αποτελέσει τη βάση του πολυσπόνδουλου κίονα και το ονομάζουμε 'block1'. Αντί για 'Shell' αυτήν τη φορά επιλέγουμε 'Solid' μιας και το σώμα θα είναι τρισδιάστατο (εικ.10). Χρησιμοποιώντας το εργαλείο για τους κύκλους (εικ.12) το πρόγραμμα μας ζητάει το κέντρο του κύκλου και ένα σημείο της εξωτερικής περιμέτρου του κύκλου. Στη περίπτωση μας ,το κέντρο του κύκλου είναι το σημείο (0,0) και το εξωτερικό σημείο της περιμέτρου είναι το (0,0.5) αφού η βάση του πρώτου σπονδύλου του κίονα έχει διάμετρο 1m. Αφού σχεδιάσουμε το κύκλο αυτό και πατήσουμε μεσαίο κλικ , το πρόγραμμα μας ζητάει να σχεδιάσουμε και τη τρίτη διάσταση του σώματος ,την οποία ορίζουμε 0.62m. Επίσης στο σημείο αυτό θα πρέπει να συμπληρώσουμε και τη κλίση που θα έχει ο σπόνδυλος ,καθώς ο σπόνδυλος είναι γεωμετρίας κόλουρου κώνου μειούμενης διαμέτρου ,με κατώτερη διάμετρο 1m και ανώτερη διάμετρο 0.88m. Συνεπώς η κλίση του σπονδύλου ορίζεται σε -5.5275 (εικ.12). Το αρνητικό πρόσημο το βάζουμε για το λόγο ότι η διάμετρος θέλουμε να μειώνεται καθ' ύψος. Το σημείο αναφοράς του κόλουρου κώνου ,το ορίζουμε στο κέντρο μάζας του, με συντεταγμένες: 0,0,0.31.



Εικόνα 10



Εικόνα 11



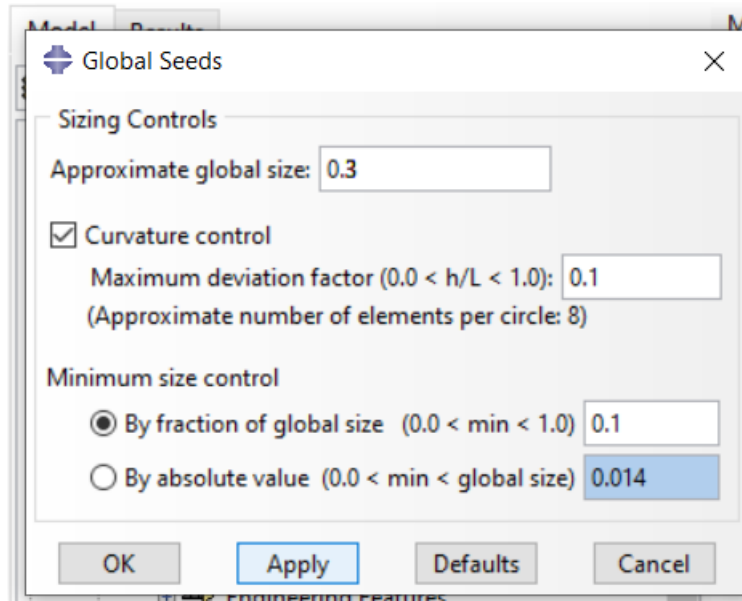
Εικόνα 12

Ένα τρισδιάστατο άκαμπτο σώμα δεν μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο, οπότε πρέπει πρώτα να αντικατασταθεί από ένα κέλυφος, δηλαδή να γίνει κούφιο και οι εξωτερικές του επιφάνειες να θεωρηθούν ως κέλυφος. Για να γίνει αυτό επιλέγουμε από το βασικό μενού Shape → Shell → From Solid (εικ.13), επιλέγουμε το σώμα και κάνουμε διπλό κλικ.



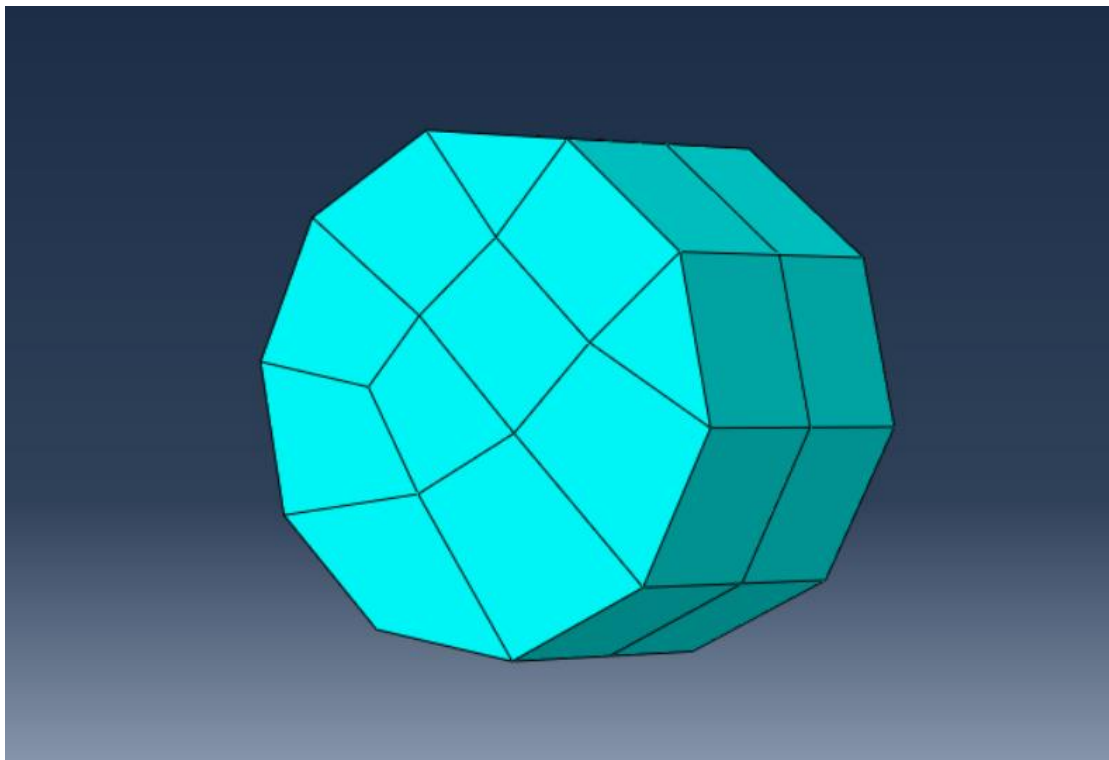
Εικόνα 13

Κατόπιν ,όπως και προηγουμένως, ορίζουμε το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων κατά προσέγγιση σε 0.3 (εικ.14).



Εικόνα 14

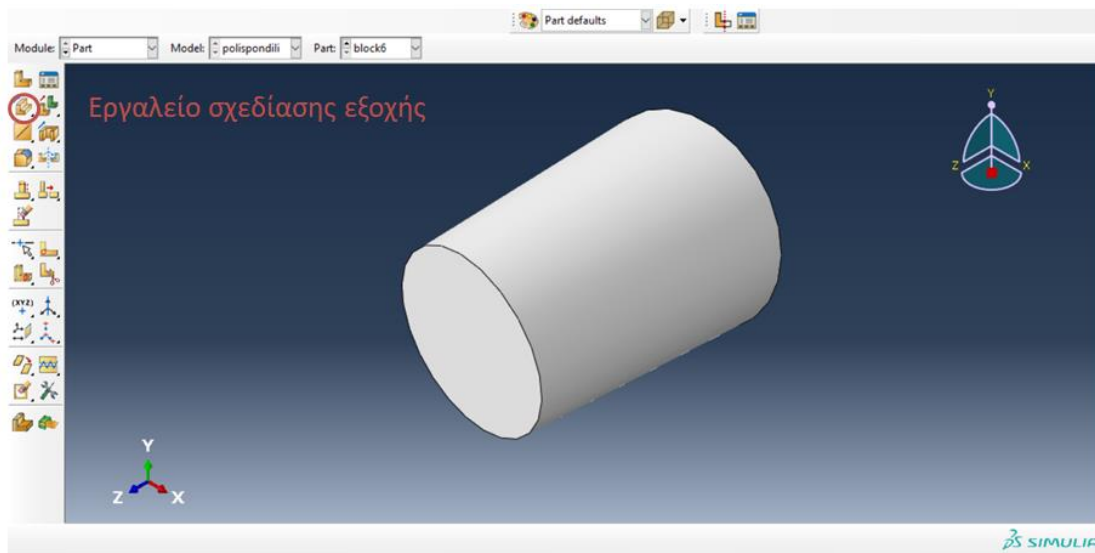
Κάνουμε τη διακριτοποίηση του δοκιμίου ,οπότε αυτό θα φαίνεται ως εξής:



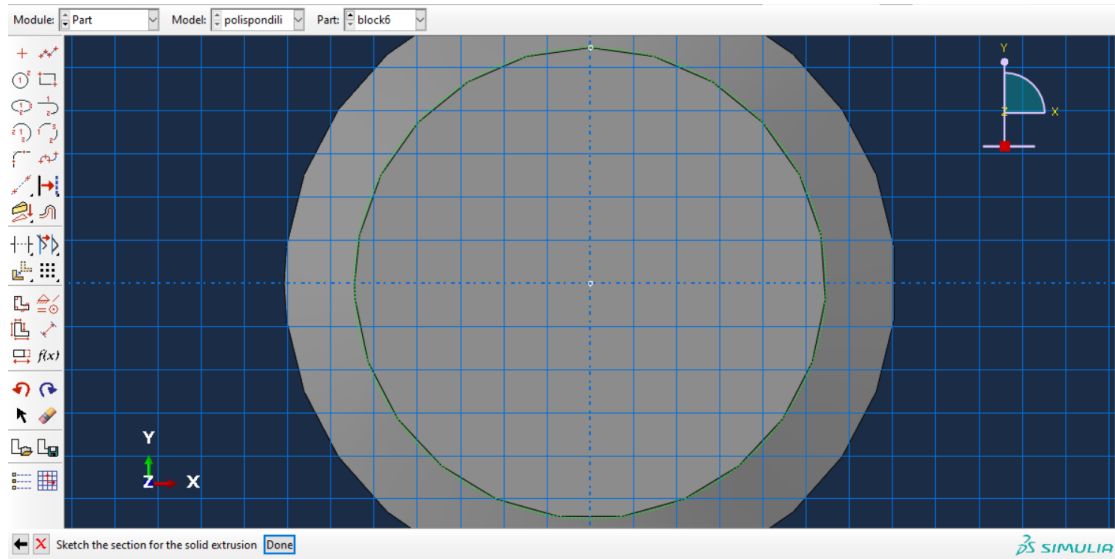
Εικόνα 15

Στη συνέχεια ,προχωράμε για τη κατασκευή των υπόλοιπων μοντέλων ,δηλαδή των υπόλοιπων 5 σπονδύλων με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που δημιουργήσαμε το πρώτο σπόνδυλο, με τη σημείωση ότι στη δημιουργία κάθε μοντέλου η κλίση να

παραμένει σταθερή και ίση με -5.5275 , καθώς ο πολυσπόνδυλος κίονας είναι γεωμετρίας κόλουρου κώνου με ομοιόμορφη μείωση της διαμέτρου καθ' ύψος. Ακόμα μία βασική ιδιαιτερότητα στη κατασκευή του μοντέλου αφορά τον τελευταίο έκτο σπόνδυλο, ο οποίος θα φέρει το κιονόκρανο του κίονα. Το κιονόκρανο θα δημιουργηθεί στη κορυφή του έκτου σπονδύλου. Για τη κατασκευή λοιπόν επιλέγουμε την εντολή 'Create Solid: Extrude' (εικ.16). Πατώντας την εντολή, το Abaqus μας ζητάει να επιλέξουμε μια επιφάνεια στην οποία θα δημιουργήσουμε ένα επιπλέον στερεό σώμα. Στη συνέχεια επιλέγουμε την περιοχή που θα δημιουργήσουμε το κιονόκρανο, δηλαδή την ανώτατη περιοχή του έκτου σπονδύλου. Στη συνέχεια αφού επιλέξουμε την ανώτατη επιφάνεια επιλέγουμε τη περίμετρο της ανώτατης επιφάνειας. Στη περιοχή σχεδίασης εμφανίζεται το επίπεδο της ανώτερης επιφάνειας (εικ.17).

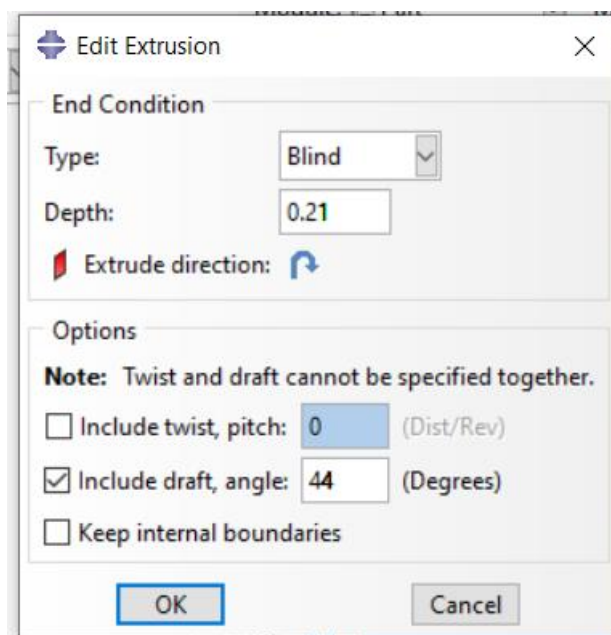


Εικόνα 16



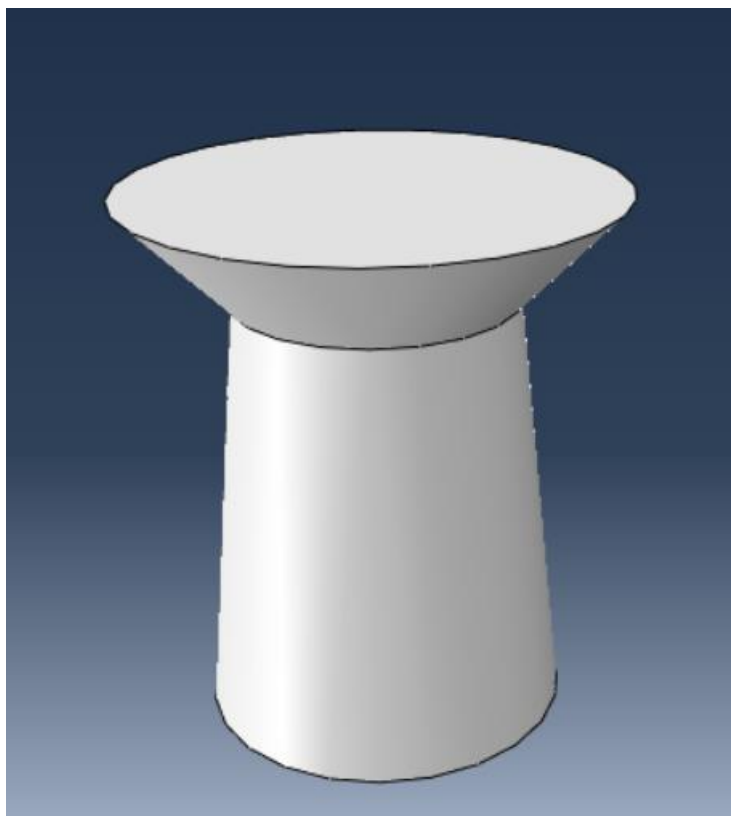
Εικόνα 17

Στο επίπεδο της ανώτατης επιφάνειας που δημιουργήθηκε σχεδιάζουμε τη βάση του κιονόκρανου, η οποία θα είναι γεωμετρίας κόλουρου κώνου με αυξανόμενη διάμετρο. Η κατώτατη διάμετρος της βάσης θα είναι ίδια με αυτή της ανώτερης επιφάνειας του έκτου σπονδύλου. Στο επίπεδο λοιπόν της βάσης θα σχεδιάζουμε ένα κύκλο με το εργαλείο σχεδίασης που αναφέρθηκε παραπάνω με κέντρο του κύκλου το κέντρο της ανώτατη επιφάνειας του έκτου σπονδύλου και σημείο εξωτερικής περιμέτρου το $(0,0.33)$ σημείο δηλαδή το οποίο είναι και σημείο της εξωτερικής περιμέτρου της βάσης του έκτου σπονδύλου. Αφού πατήσουμε μεσαίο κλικ και δημιουργήσουμε τη βάση το πρόγραμμα μας ζητά να συμπληρώσουμε και τη τρίτη διάσταση της βάσης του κιονόκρανου, δηλαδή 0.21m . Και σε αυτή τη περίπτωση στην επιλογή 'Draft Angle' επιλέγουμε τη κλίση της βάσης, η οποία ορίστηκε σε 44 (εικ.18), πατώντας μεσαίο κλικ το μοντέλο έχει δημιουργηθεί.



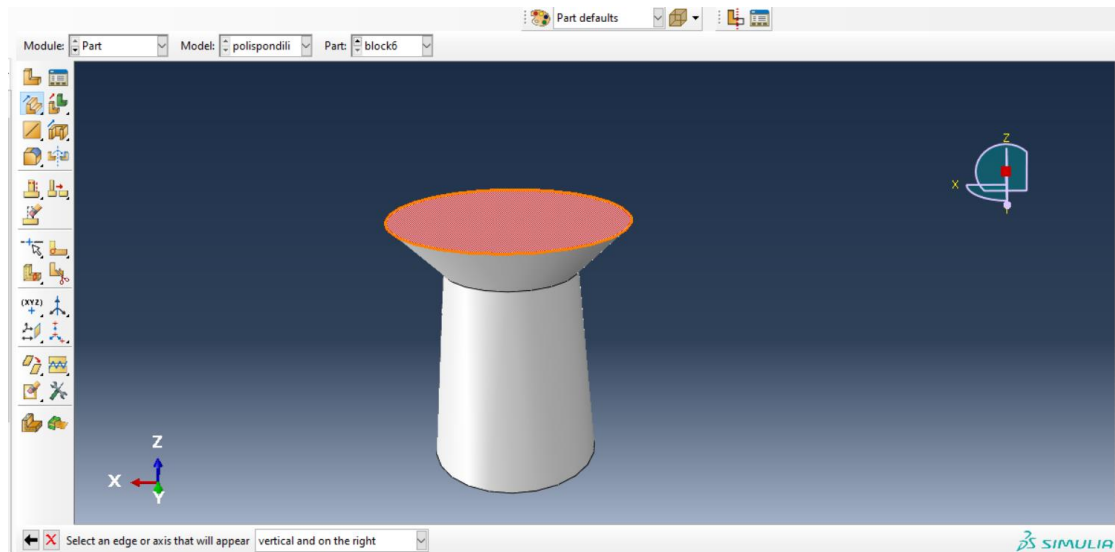
Εικόνα 18

Το μοντέλο έπειτα από την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας έχει τη παρακάτω μορφή (εικ.19).



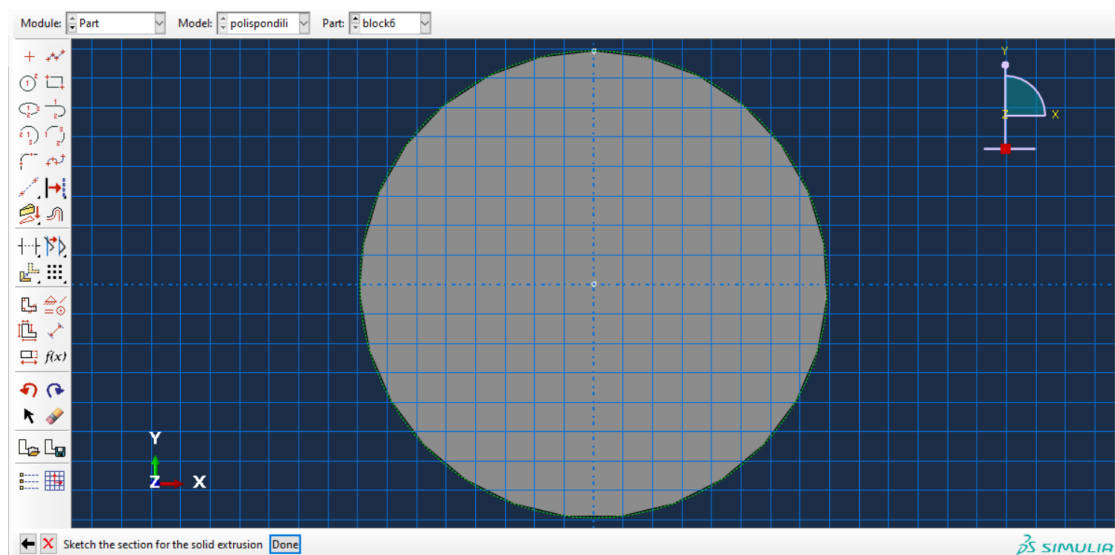
Εικόνα 19

Στη συνέχεια ,για την ολοκλήρωση του κιονόκρανου επιλέγουμε πάλι την εντολή 'Create Solid: Extrude ' και επιλέγουμε τη ανώτερη επιφάνεια της βάσης του κιονόκρανου και έπειτα τη περίμετρο της ανώτερης επιφάνειας της βάσης (εικ.20).



Εικόνα 20

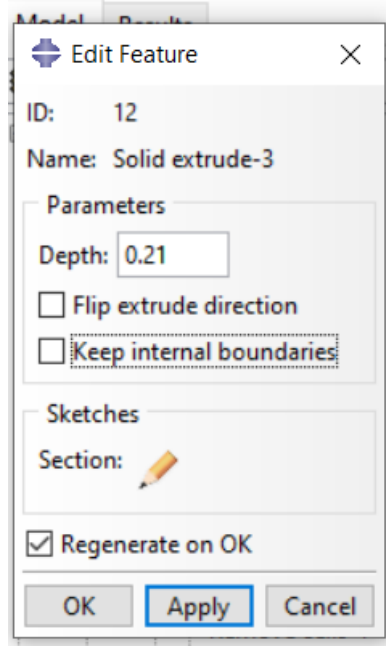
Όμοια με πριν ,και αφού πατήσουμε μεσαίο κλικ εμφανίζεται στο περιβάλλον σχεδίασης το επίπεδο της ανώτερης επιφάνειας της βάσης του κιονόκρανου (εικ.21).



Εικόνα 21

Στη συνέχεια επιλέγουμε το εργαλείο σχεδίασης ορθογωνίων ,με σκοπό να δημιουργήσουμε το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο θα βρίσκεται πάνω από την βάση του κιονόκρανου. Ορίζουμε τις διαστάσεις που ζητάει το πρόγραμμα, δηλαδή τα σημεία των δύο απέναντι κορυφών, αυτά είναι (0.53 , -0.53) και (-0.53

,0.53). Στη συνέχεια και αφού πατήσουμε μεσαίο κλικ το πρόγραμμα μας ζητάει να ορίσουμε τη τρίτη διάσταση του σώματος (εικ.22). Το ύψος του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου θα είναι 0.21.



Εικόνα 22

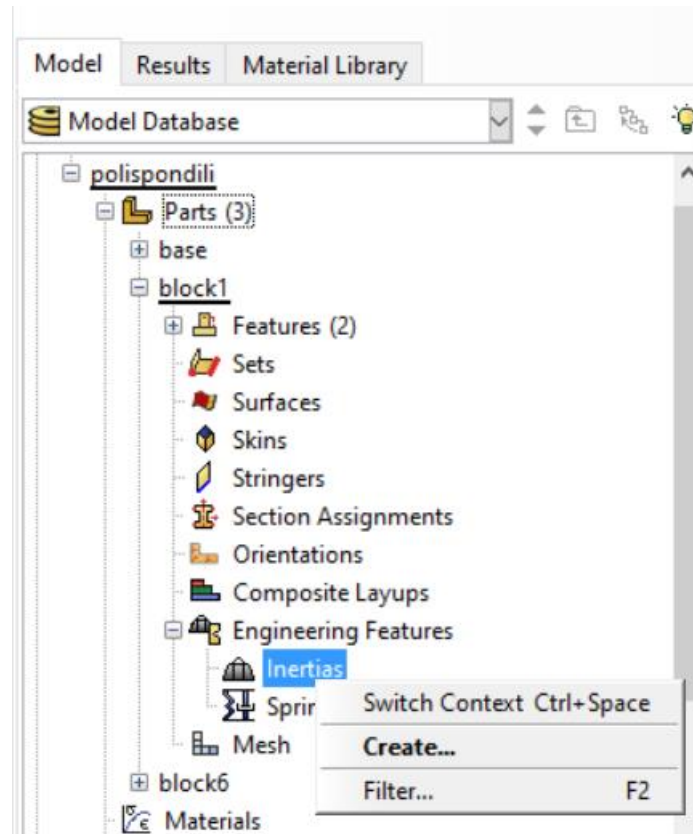
Αφού πατήσουμε OK ,η δημιουργία του κιονόκρανου έχει δημιουργηθεί (εικ.23). Το μοντέλο έπειτα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας θα φαίνεται ως εξής:



Εικόνα 23

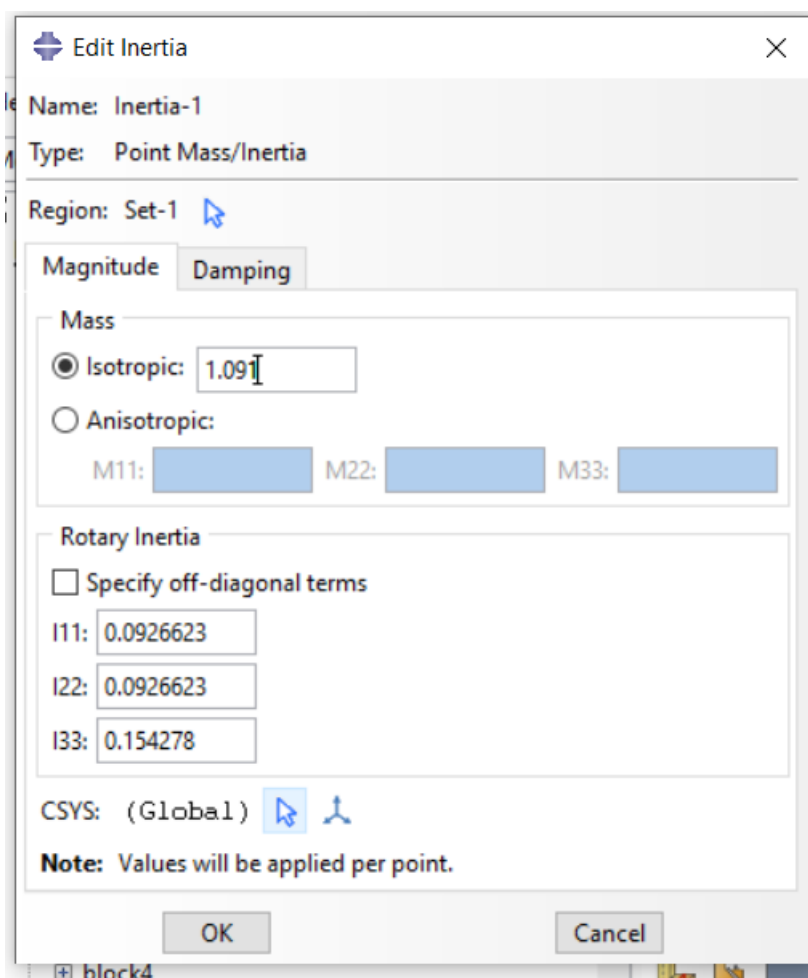
Ορισμός υλικών και διατομών

Ορισμός υλικών και διατομών δε χρειάζεται ,καθώς όλα τα σώματα είναι άκαμπτα. Αντί για αυτά, θα προσδώσουμε τα χαρακτηριστικά κάθε σπονδύλου (μάζα ,στροφικές ροπές αδράνειας) απευθείας στο σημείο αναφοράς κάθε σπονδύλου. Ανοίγουμε το δένδρο 'Engineering Features' του part 'block1' και κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Inertias' (εικ.24).



Εικόνα 24

Αφήνουμε τη προκαθορισμένη επιλογή και πατάμε Continue. Από τη περιοχή σχεδίασης επιλέγουμε το σημείο αναφοράς του πρώτου σπονδύλου, κάνουμε μεσαίο κλικ και επιλέγουμε τις τιμές μάζας και στροφικών ροπών αδράνειας όπως έχουν υπολογιστεί με αναλυτικούς τύπους (εικ.25).

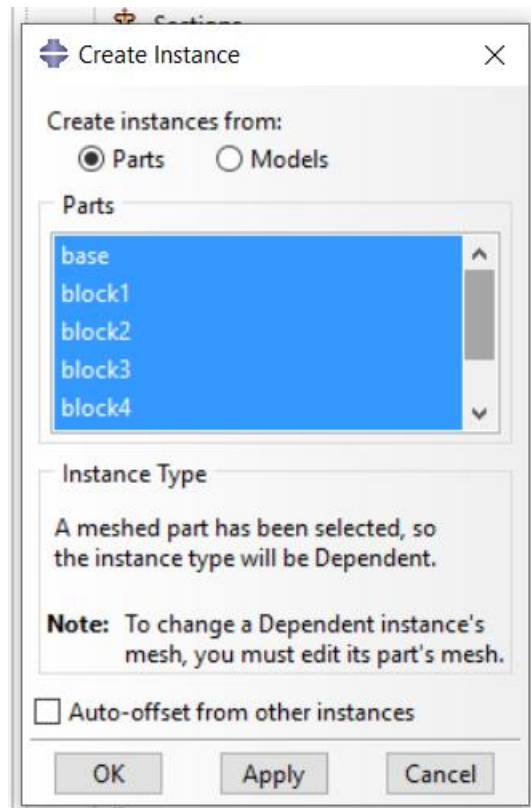


Εικόνα 25

Η διαδικασία αυτή γίνεται και για τους έξι σπόνδλους που έχουμε δημιουργήσει, προσέχοντας κάθε φορά ο ορισμός των αδρανειακών χαρακτηριστικών να γίνεται στο σημείο αναφοράς του κάθε στερεού σώματος.

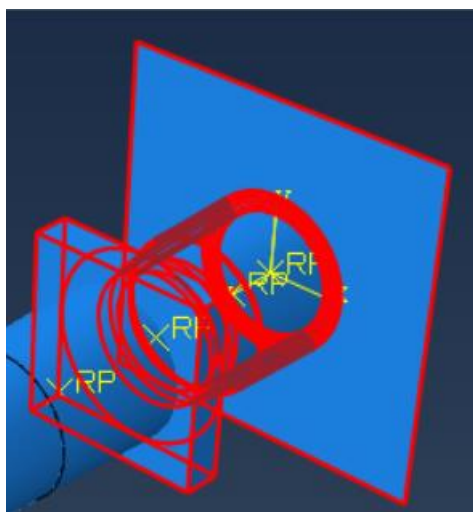
Σύνθεση μοντέλου

Για τη σύνθεση του μοντέλου ανοίγουμε το δένδρο εργασιών της επιλογής 'Assembly' (σύνθεση) και κάνουμε διπλό κλικ πάνω στην επιλογή 'Instances'. Επιλέγουμε από το πίνακα (εικ.26) όλα τα σώματα ταυτόχρονα κρατώντας πατημένο το Shift.



Εικόνα 26

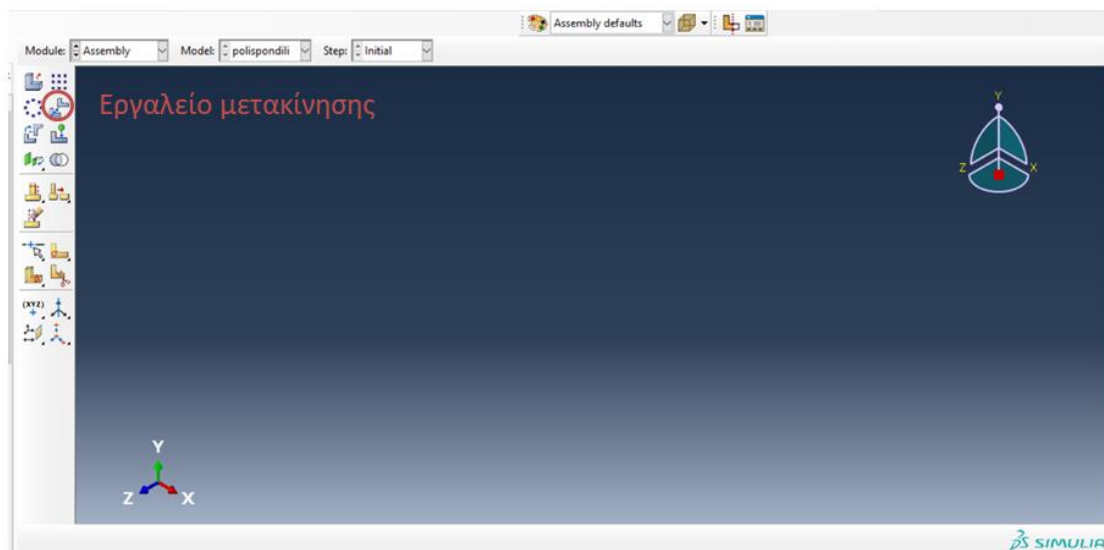
Επιλέγοντας όλα τα μοντέλα και πατώντας OK η εικόνα που φαίνεται στο περιβάλλον σχεδίασης είναι η εξής (εικ.27):



Εικόνα 27

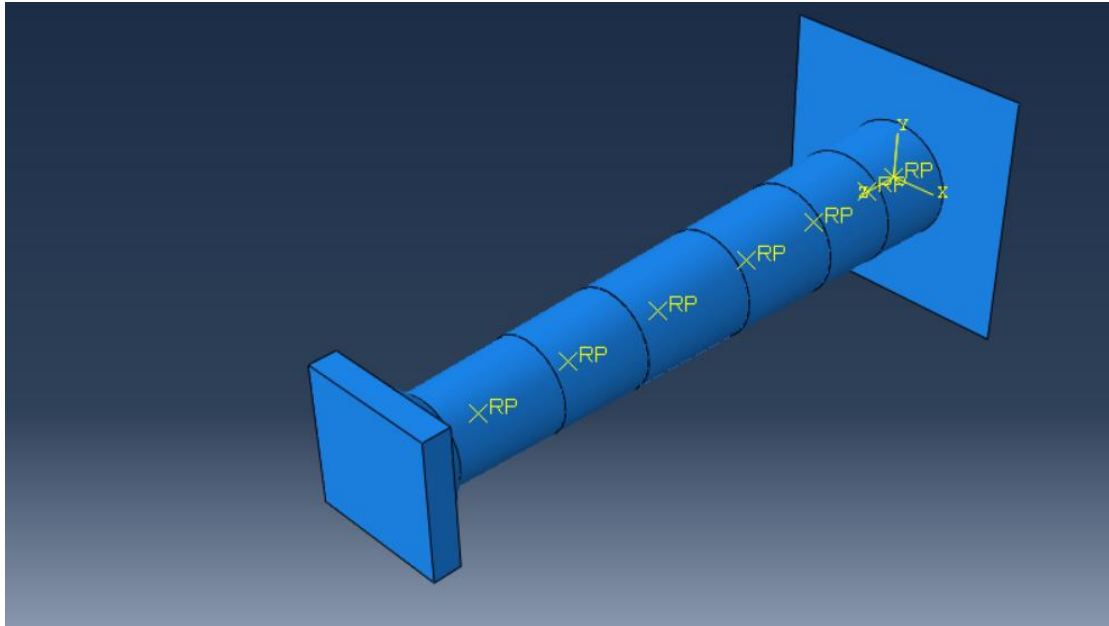
Το πρόγραμμα έχει τοποθετήσει όλα τα στερεά σώματα που δημιουργήσαμε στη βάση όπως φαίνεται στην εικόνα 27. Για τη μόρφωση του τελικού μοντέλου θα χρειαστεί να μετακινήσουμε κατακόρυφα προς πάνω κάθε σπόνδυλο. Το πόσο θα μετακινήσουμε κάθε σπόνδυλο εξαρτάται από το ύψος ή τα ύψη των προηγούμενων σπονδύλων. Για παράδειγμα, για να φέρουμε τον δεύτερο σπόνδυλο στη θέση που πρέπει, θα τον μετακινήσουμε όσο το ύψος του πρώτου σπονδύλου, δηλαδή 0.62m. Για να μετακινήσουμε τον τρίτο σπόνδυλο θα πρέπει να τον μετακινήσουμε όσο το άθροισμα των υψών του πρώτου και του δεύτερου σπονδύλου. Έτσι συνεχίζουμε τη διαδικασία μέχρι την ολοκλήρωση του πολυσπόνδυλου κίονα.

Για να μετακινήσουμε ένα στερεό σώμα πατάμε την εντολή στο περιβάλλον εργασίας 'Translate Instance' (εικ.28). Στη συνέχεια μας ζητείται να επιλέξουμε ποιό σώμα θέλουμε να μετακινήσουμε. Επιλέγουμε το σώμα και μετά ορίζουμε την κατακόρυφη μετακίνηση. Για παράδειγμα για μετακίνηση του δεύτερου σπονδύλου πληκτρολογώ αφού έχω επιλέξει το σώμα (0,0,0.62) .Πατώντας μεσαίο κλικ ή την επιλογή 'Done' το σώμα μας έχει μετακινηθεί κατακόρυφα προς τα πάνω κατά 0.62m.



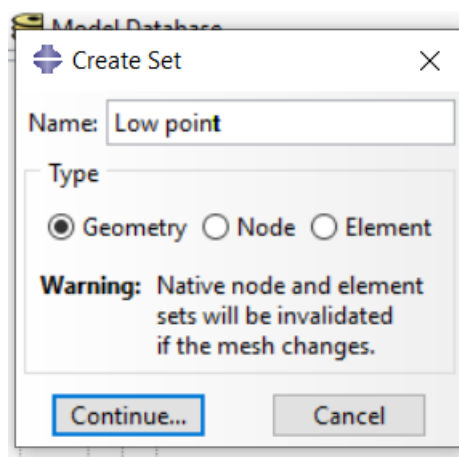
Εικόνα 28

Ύστερα από τη μετακίνηση όλων των σπονδύλων, η τελική μας κατασκευή θα φαίνεται ως εξής (εικ.29):

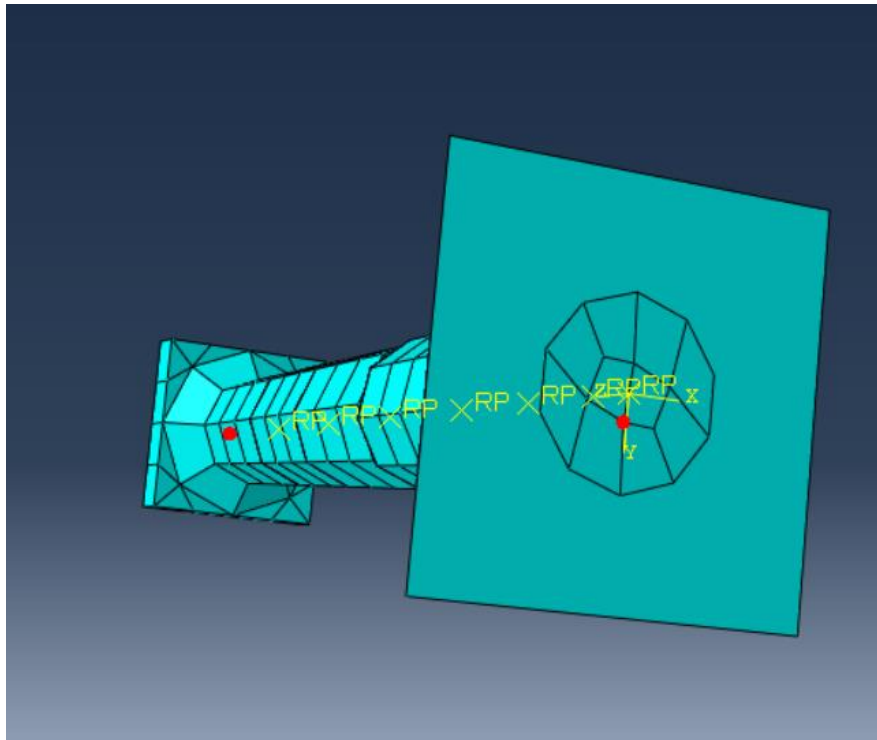


Εικόνα 29

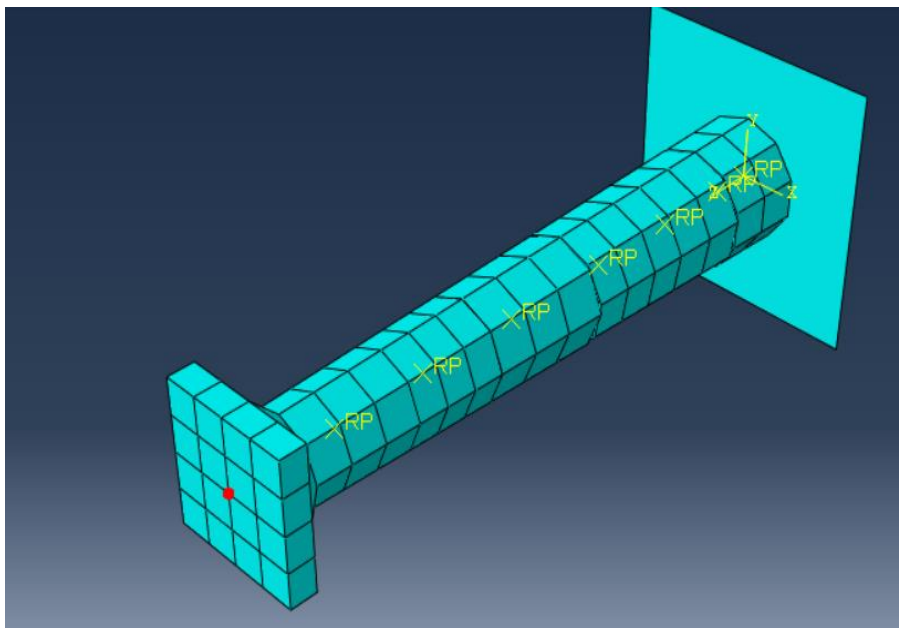
Στη συνέχεια θα δημιουργήσουμε δύο σελ σημείων ,από τα οποία στη συνέχεια θα ζητήσουμε την απόκριση τους κατά την ανάλυση. Τα σημεία αυτά θα είναι το κατώτατο σημείο της βάσης του κίονα και το ανώτατο σημείο του κιονόκρανου του κίονα. Από το κλάδο 'Assembly' κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Sets',ώστε να ορίσουμε τα σημεία. Επιλέγουμε σαν πρώτο σημείο το κατώτατο σημείο της βάσης και το ονομάζουμε 'Low point' (εικ.30). Πατάμε Continue και επιλέγουμε από μοντέλο το οποίο βρίσκετε στο περιβάλλον σχεδίασης το κατώτατο σημείο (εικ31). Κάνουμε ακριβώς την ίδια διαδικασία για την επιλογή του ανώτατο σημείου και το ονομάζουμε 'Top point' (εικ.32).



Εικόνα 30



Εικόνα 31

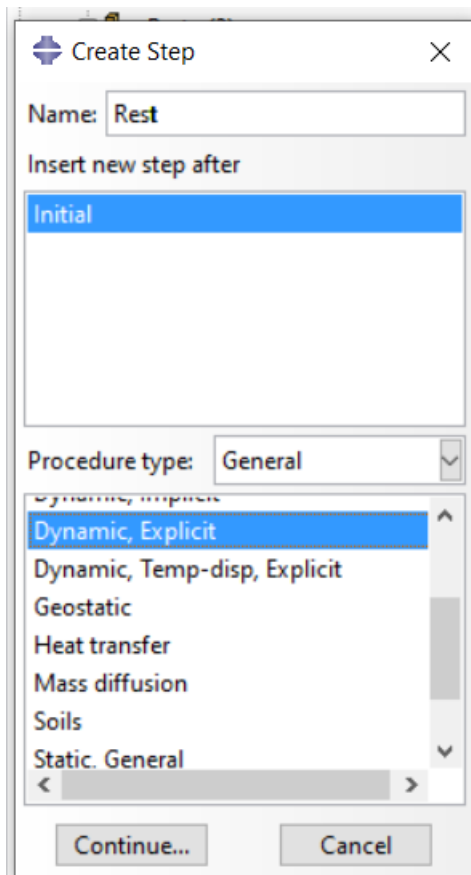


Εικόνα 32

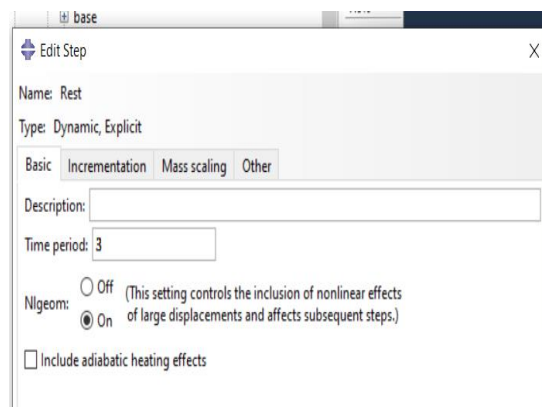
Ορισμός βημάτων ανάλυσης

Στη συνέχεια θα ορίσουμε τα βήματα της ανάλυσης. Σε κάθε βήμα ανάλυσης προσδιορίζουμε τα φορτία, τις δεσμεύσεις και το επιθυμητό είδος των αποτελεσμάτων ('output ') που θέλουμε να ισχύσουν για τη διάρκεια του βήματος που θα ορίσουμε. Το Abaqus ορίζει αυτόματα ένα αρχικό βήμα με το όνομα 'initial', κατά το οποίο μπορούν να καθοριστούν δεσμεύσεις, όχι όμως και φορτία, οπότε κατά το βήμα αυτό δεν συμβαίνει τίποτε.

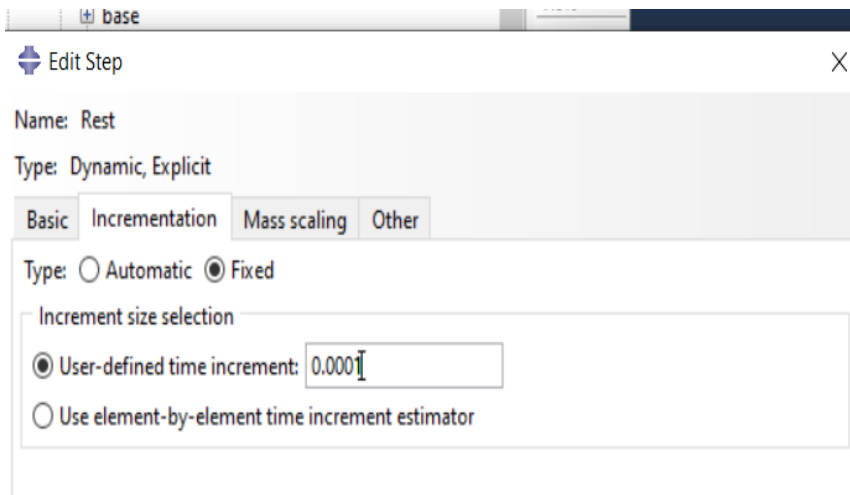
Αρχικά θα δημιουργήσουμε ένα βήμα πολύς μικρής διάρκειας κατά το οποίο θα εφαρμόζεται στο μοντέλο η επιτάχυνση της βαρύτητας και θα αναγκάζει ουσιαστικά το πολυσπόνδυλο κίονα να έρθει στην επιθυμητή αρχική θέση του κάθε ανάλυσης. Για τη δημιουργία του κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Steps' του δένδρου εργασιών, ορίζουμε το καινούργιο βήμα ως 'Dynamic, Explicit ', το ονομάζουμε 'Rest' και πατάμε Continue (εικ.32). Ορίζουμε τη διάρκεια του βήματος στα 3sec και θέτουμε την επιλογή 'Nlgeom' (Non-linear geometry, μη γραμμική γεωμετρία) στο 'On' (εικ.33). Στη συνέχεια, στη καρτέλα ' Intecrementation' ορίζουμε το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης σε 0.0001 (εικ.34). Το βήμα δεν θα έχει φορτία ή μετακινήσεις, οπότε ένα χρονικό βήμα 0.1 msec είναι αρκούτσως μικρό.



Εικόνα 32

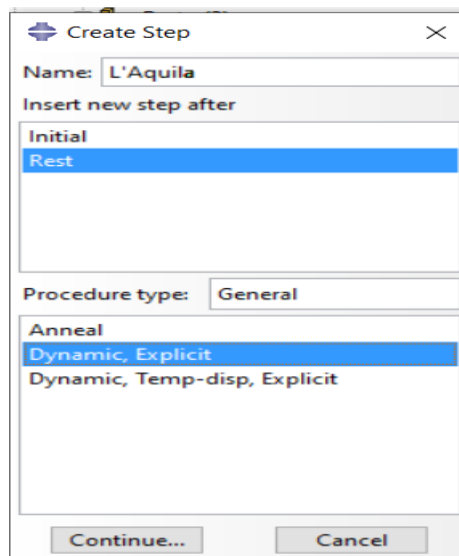


Εικόνα 33

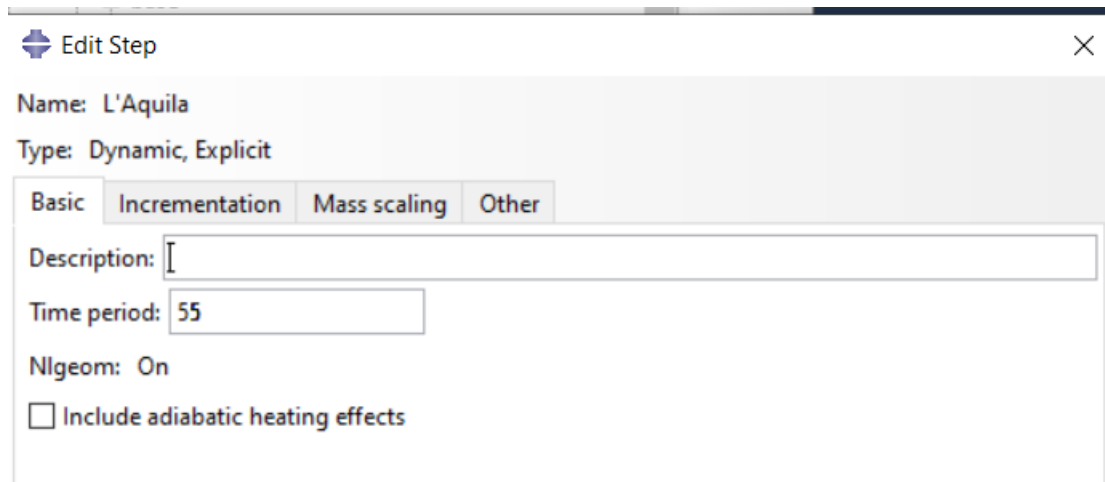


Εικόνα 34

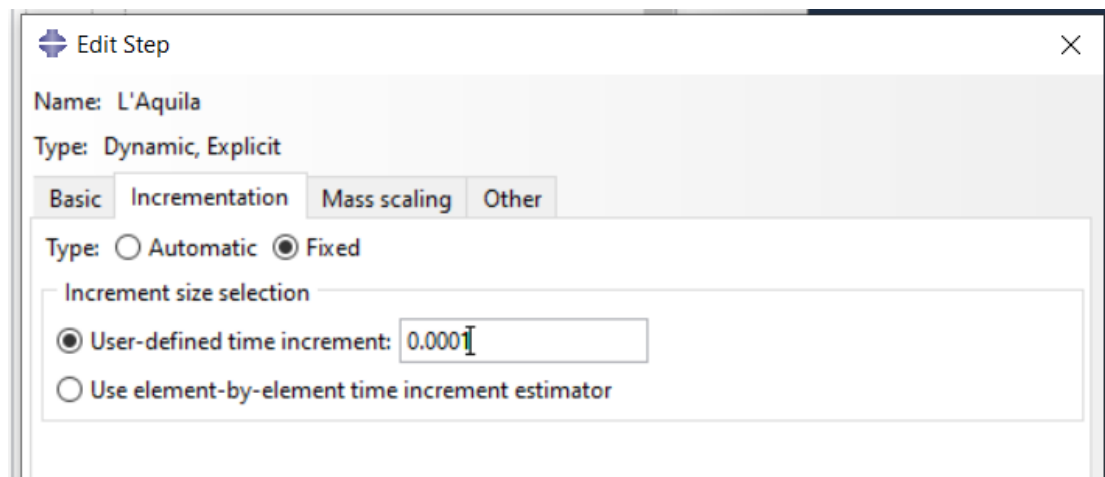
Το δεύτερο βήμα της ανάλυσης θα είναι εκείνο στο οποίο θα ασκείται η σεισμική διέγερση της L'Aquila στη βάση του μοντέλου. Κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Steps' του δένδρου εργασιών, ορίζουμε και αυτό το βήμα ως 'Dynamic Explicit', το ονομάζουμε 'L'Aquila' και πατάμε Continue (εικ.35). Ορίζουμε τη διάρκεια του βήματος στα 55 sec, όσο δηλαδή και η διάρκεια της σεισμική διέγερσης και θέτουμε την επιλογή 'Nlgeom' στο 'On' (εικ.36). Στη συνέχεια, στη καρτέλα 'intcrementation' ορίζουμε το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης σε 0.0001 (εικ.37). Προσέχουμε μόνο στη αρχή πως το βήμα 'L'Aquila' ακολουθεί το βήμα 'Rest'.



Εικόνα 35



Εικόνα 36



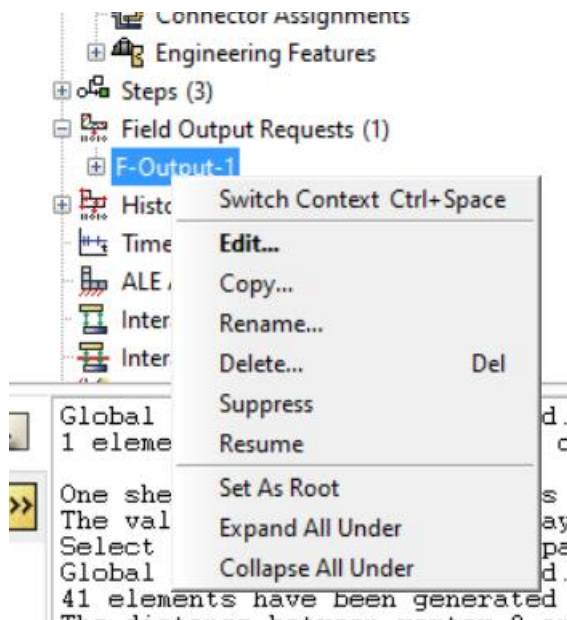
Εικόνα 37

Αιτούμενα αποτελέσματα

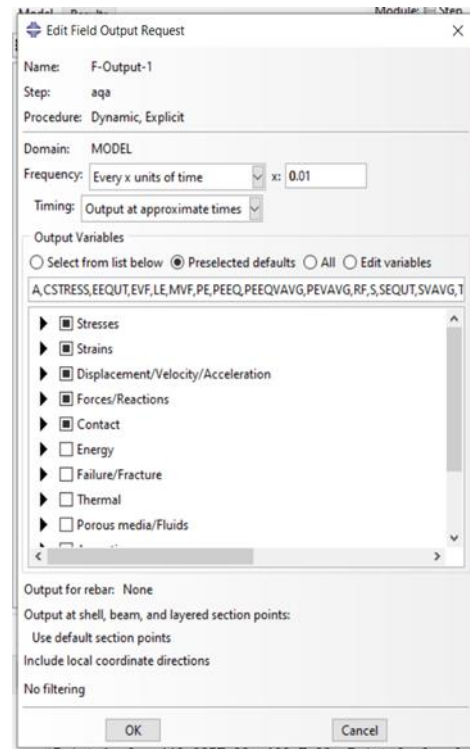
Κατόπιν θα προσδιορίσουμε το 'output', τα αποτελέσματα, δηλαδή, που θέλουμε να πάρουμε από το κάθε βήμα. Υπάρχουν δύο τύποι 'output', το 'Field Output' και το 'History Output'. Το πρώτο μας δίνει γραφικά αποτελέσματα πάνω στο μοντέλο, π.χ. με τη μορφή διανυσμάτων, και το δεύτερο μας δίνει αποτελέσματα με τη μορφή γραφικής παράστασης σε συνάρτηση με το χρόνο. Για 'History Output' θα ζητήσουμε τις μετακινήσεις του 'Low point' και του 'Top point' κατά x και κατά y. Αυτές οι αιτήσεις μπορούν να τροποποιηθούν για κάθε βήμα της ανάλυσης ξεχωριστά, όμως στο συγκεκριμένο παράδειγμα κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο, οπότε οι αιτήσεις θα γίνουν καθολικά και για τα τρία βήματα.

Ανοίγουμε διαδοχικά το δένδρο των επιλογών 'Field Output Requests', 'F-Output-1' και 'States' και κάνουμε διπλό κλικ στο 'Rest', που αντιστοιχούν σε αυτό το βήμα

ανάλυσης (εικ.38). Παρατηρούμαι πως δίπλα από κάθε βήμα υπάρχει μια παρένθεση, που δηλώνει εάν η αίτηση αποτελεσμάτων έγινε στο συγκεκριμένο βήμα (Created), αν συνεχίστηκε ως είχε από το προηγούμενο βήμα (Propagated), αν τροποποιήθηκε σε αυτό το βήμα (Modified) ή αν δεν είναι ενεργή σε αυτό το βήμα (Inactive). Στο παράθυρο που εμφανίστηκε ορίζουμε τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται ανά 0.01 δευτερόλεπτα της ανάλυσης, και γράφουμε ως επιθυμητό 'output' τα αρχικά 'RF', που σημαίνουν δυνάμεις και ροπές αντίστασης. Τα άλλα 'output' που μπορούμε να ζητήσουμε παρουσιάζονται στη λίστα του παραθύρου αυτού (εικ.39).

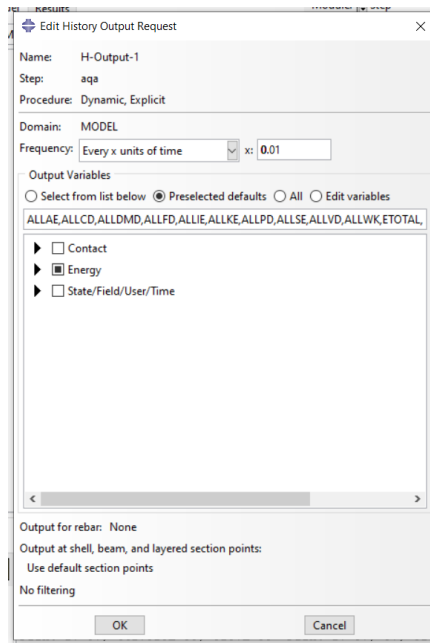


Εικόνα 38

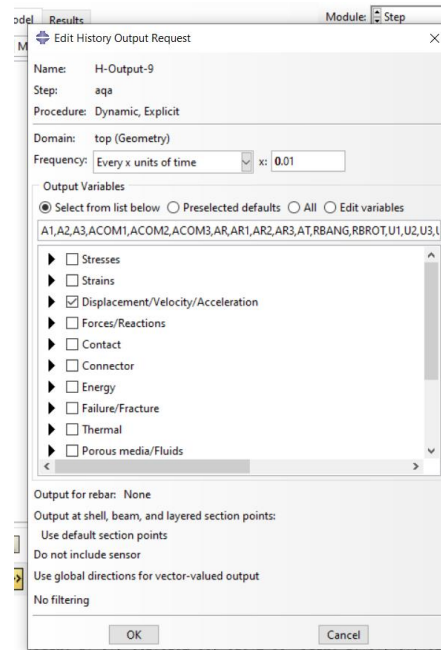


Εικόνα 39

Κατόπιν ,ανοίγουμε το δένδρο των επιλογών 'History Output Requests', 'H-Output-1' και 'States' και κάνουμε διπλό κλικ στο βήμα 'Initial', που υποδηλώνει τις αιτήσεις που αντιστοιχούν σε αυτό το βήμα ανάλυσης, στη περίπτωση αυτή τις μετακινήσεις. Ορίζουμε τη συχνότητα των αποτελεσμάτων σε 0.01 και πατάμε OK (εικ40). Έπειτα ,ανοίγουμε πάλι το δένδρο επιλογών 'History Output Requests' και επιλέγουμε από τα 'Sets' το σημείο που θέλουμε να μας δώσει μετακινήσεις. Στη περίπτωσή μας το 'Low point'. Κλικάρουμε 'Displacement/Velocity/Acceleration' και πατάμε OK.Κάνουμε ακριβώς την ίδια διαδικασία για επιλογή σημείου από τα 'Sets' 'Top point' (εικ.41).



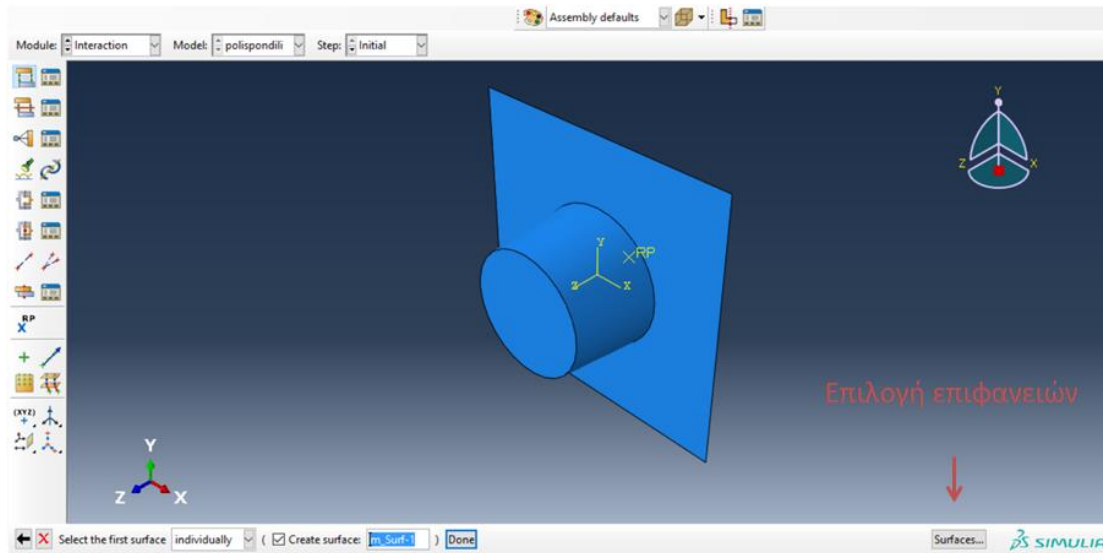
Εικόνα 40



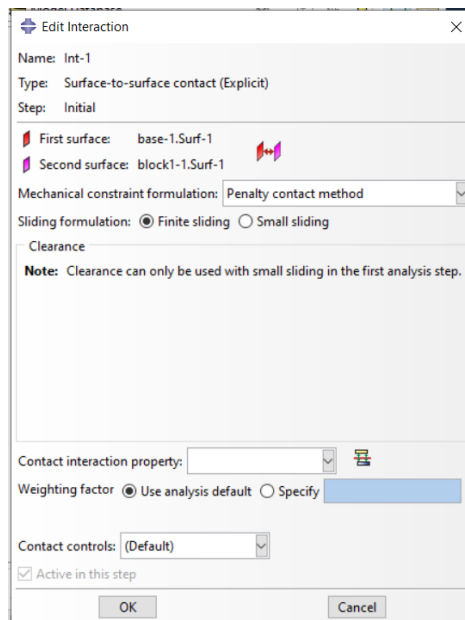
Εικόνα 41

Ορισμός επαφών

Ο πολυσπόνδυλος κίονας και η βάση δεν θα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, αν δεν ορίσουμε πρώτα τον τρόπο με τον οποίο γίνεται αυτή η αλληλεπίδραση. Για το σκοπό αυτό, κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή 'interactions', επιλέγουμε σαν πρώτο βήμα της επαφής – αυτό κατά το οποίο θα ισχύσει αρχικά η επαφή – το βήμα 'initial' και το τύπο επαφής 'Surface – to –surface Contact (Explicit)' και πατάμε Continue. Στη συνέχεια στο περιβάλλον εργασίας πατάμε την επιλογή 'Surfaces' (εικ.42) για να δούμε ποιες επαφές θα ορίσουμε μεταξύ τους. Στη περίπτωση μας, θα ορίσουμε επαφές μεταξύ της βάσης και του πρώτου σπόνδυλου και μεταξύ των σπονδύλων. Επιλέγουμε από την εντολή 'Surfaces' τη βάση του μοντέλου και τη συνέχεια την κάτω επιφάνεια του πρώτου σπονδύλου. Στη συνέχεια το πρόγραμμα μας ζητάει να ορίσουμε τον τύπο της επαφής μεταξύ των δύο επιφανειών. Στη περίπτωση μας επιλέγουμε 'Penalty Contact Method' (εικ.43). Στο κελί 'Contact interaction property' επιλέγουμε τις παραμέτρους που θέλουμε να ορίσουμε μεταξύ των δύο επιφανειών. Παρακάτω αναλύεται αυτό το βήμα.

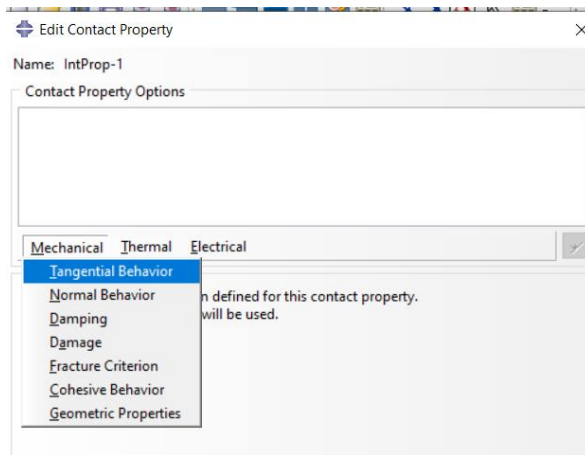


Εικόνα 42

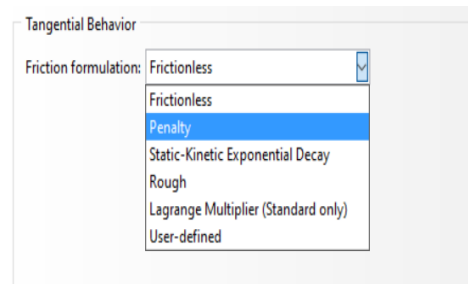


Εικόνα 43

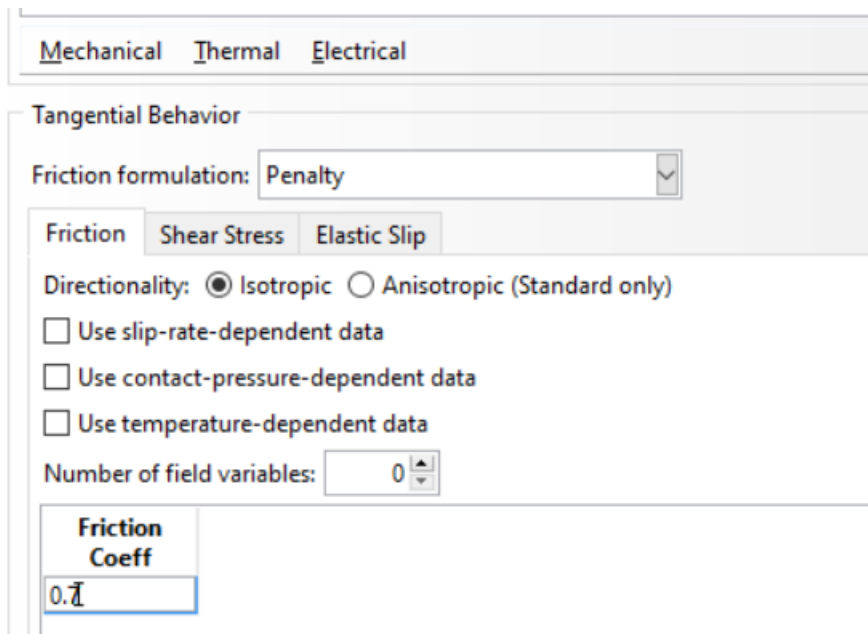
Για τον ορισμό των παραμέτρων της επαφής πατάμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Interaction properties'. Πατάμε την εντολή 'Contact' (εικ.44). Στη συνέχεια ,για τον ορισμό του συντελεστή τριβής πατάμε την επιλογή 'Mechanical' και 'Tangential Behavior' (εικ.45). Στις επιλογές που μας έχει στο 'Friction Formulation' επιλέγουμε την εντολή 'Penalty' (εικ.46) και στο κελί 'Friction Coeff' ορίζουμε τη τιμή του συντελεστή τριβής. Στη περίπτωση μας 0.7 (εικ.47).



Εικόνα 45

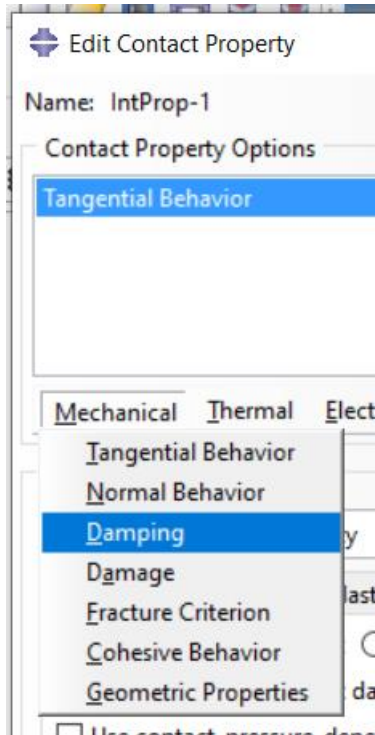


Εικόνα 46

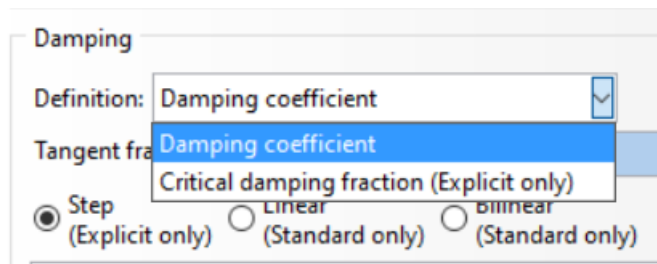


Εικόνα 47

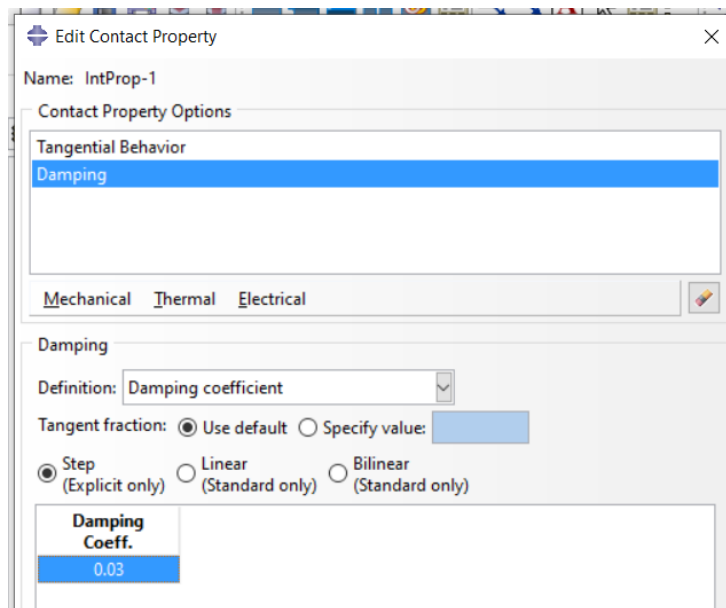
Στη συνέχεια πέρα από τον ορισμό του συντελεστή τριβής, θα πρέπει να ορίσουμε και τον συντελεστή απόσβεσης. Με την ίδια λογική στην επιλογή 'Mechanical' επιλέγουμε το 'Damping' (εικ.48). Πατώντας στην επιλογή μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε μεταξύ δύο κατηγοριών συντελεστών απόσβεσης. Στη περίπτωση μας επιλέγουμε 'Damping coefficient' (εικ.49). Στη συνέχεια ορίζουμε στο κελί το συντελεστή απόσβεσης. Στη περίπτωση μας 0.03 (εικ.50).



Εικόνα 48



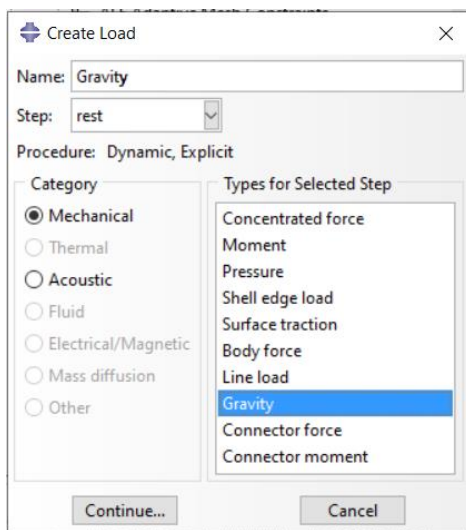
Εικόνα 49



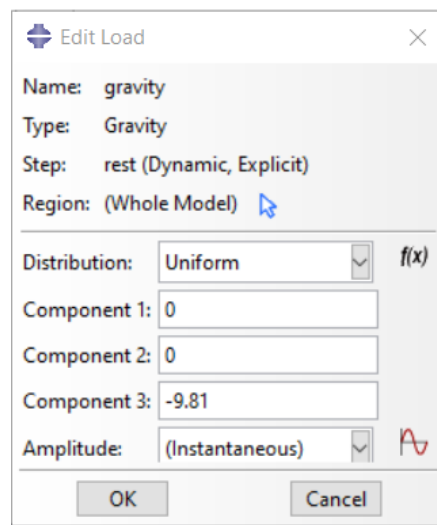
Εικόνα 50

Ορισμός φορτίων και δεσμεύσεων

Αυτό που μένει να ορίσουμε είναι τα φορτία και τις δεσμεύσεις που θέλουμε να εφαρμοστούν σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Πατάμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Loads' (φορτία) του δένδρου εργασιών και ονομάζουμε το φορτίο 'Gravity', επιλέγοντας το βήμα 'Rest' ως πρώτο βήμα εφαρμογής και τον τύπο 'Gravity' (βαρύτητα) (εικ.51). Αφού πατήσουμε Continue ορίζουμε την επιθυμητή επιτάχυνση ίση με -9.81 (m/sec^2) στον άξονα z, αυτόν δηλαδή που είναι κάθετος στην βάση έδρασης του (εικ.52).

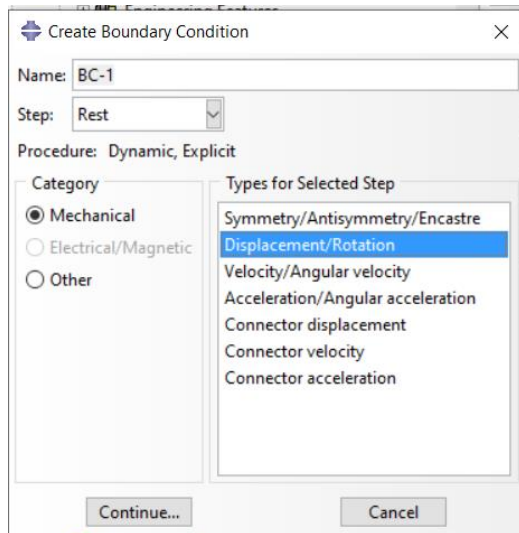


Εικόνα 51

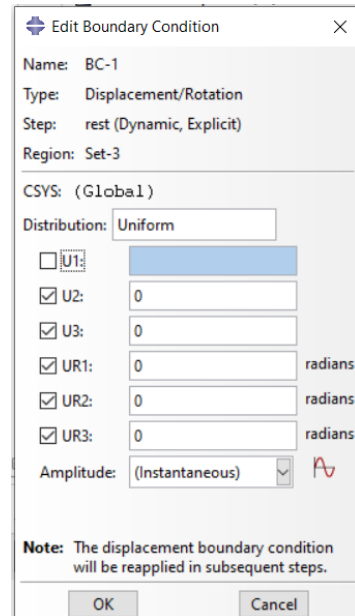


Εικόνα 52

Με διπλό κλικ στην επιλογή 'BCs' (δεσμεύσεις) του δένδρου εργασιών δημιουργούμε μια δέσμευση με βήμα εφαρμογής 'Rest' και τύπο 'Displacement/Rotation' (μετακίνηση/ στροφή) (εικ.53). Επιλέγουμε τη περιοχή στην οποία θα εφαρμοστεί η δέσμευση, δηλαδή το σημείο αναφοράς της βάσης, από τη περιοχή σχεδίασης και κάνουμε μεσαίο κλικ. Κατόπιν δεσμεύουμε τη βάση κατά όλες τις μετακινήσεις και στροφές εκτός από τη U1, σε αυτή θα εφαρμοστεί στη συνέχεια η επιτάχυνση (εικ.54).

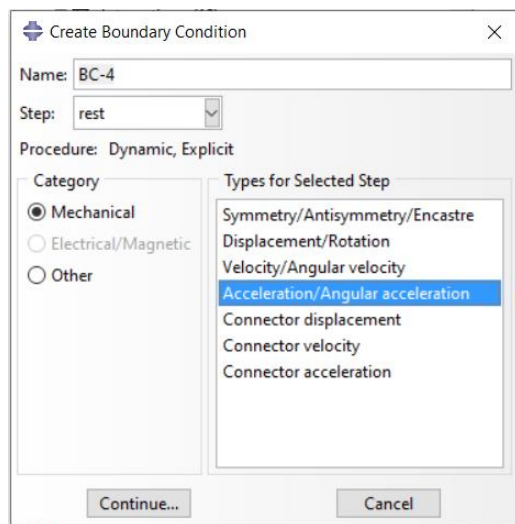


Εικόνα 53

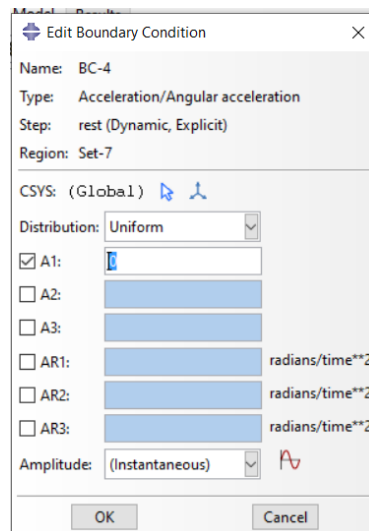


Εικόνα 54

Στη συνέχεια δημιουργούμε μια δεύτερη δέσμευση με βήμα εφαρμογής 'Rest' με τύπο 'Acceleration/Angular Acceleration' (επιτάχυνση/στροφική επιτάχυνση), επιλέγουμε το σημείο αναφοράς της βάσης και την επιλογή A1 (εικ.55 ,56).



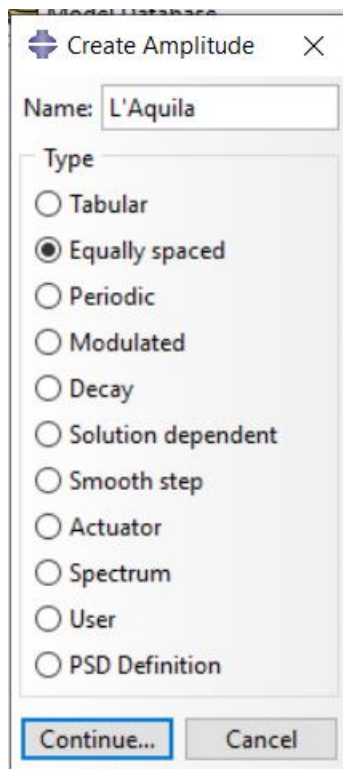
Εικόνα 55



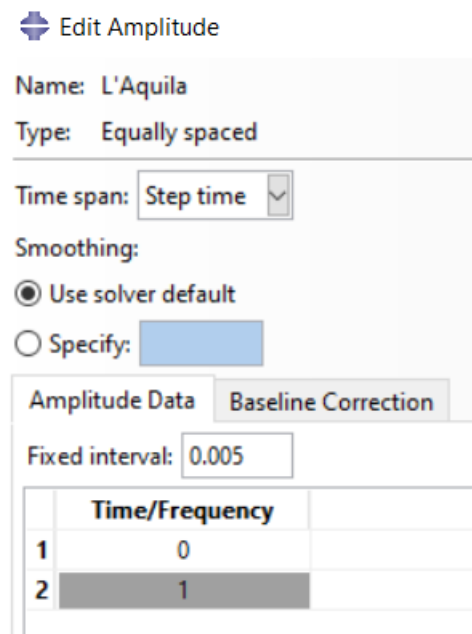
Εικόνα 56

Στη συνέχεια θα δημιουργήσουμε τη χρονοϊστορία της επιτάχυνσης. Κάνοντας διπλό κλικ στην εντολή 'Amplitudes' και ονομάζοντας την χρονοϊστορία L'Aquila πατάμε την εντολή 'Equally spaced' (ίσα διαστήματα χρόνου) (εικ.57) προσέχοντας

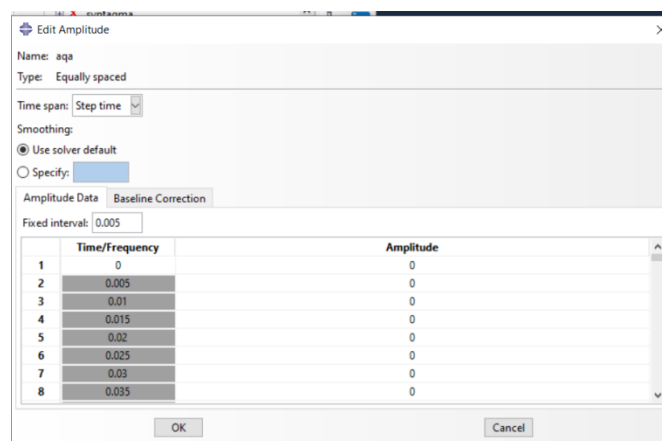
στο επόμενο παράθυρο να είναι ενεργή η επιλογή 'Step time' για το 'Time span' (εύρος χρόνου)· αυτό σημαίνει πως τα δεδομένα της χρονοϊστορίας θα αναφέρονται στο χρόνο του βήματος της ανάλυσης και όχι στον ολικό χρόνο της ανάλυσης (άθροισμα των χρόνων των διαδοχικών βημάτων ανάλυσης). Ορίζουμε το 'Fixed interval' ίσο με το χρονικό διάστημα που αναφέρεται το επιταχυνσιογράφημα (εικ.58). Στη συνέχεια, αντιγράφουμε τις τιμές της επιτάχυνσης από το Excel και τις κάνουμε επικόλληση στο πεδίο 'Amplitude', πατώντας δεξί κλικ στο πρώτο κενό και 'paste' (εικ.59). Στη συνέχεια πατάμε OK και η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης έχει οριστεί.



Εικόνα 57

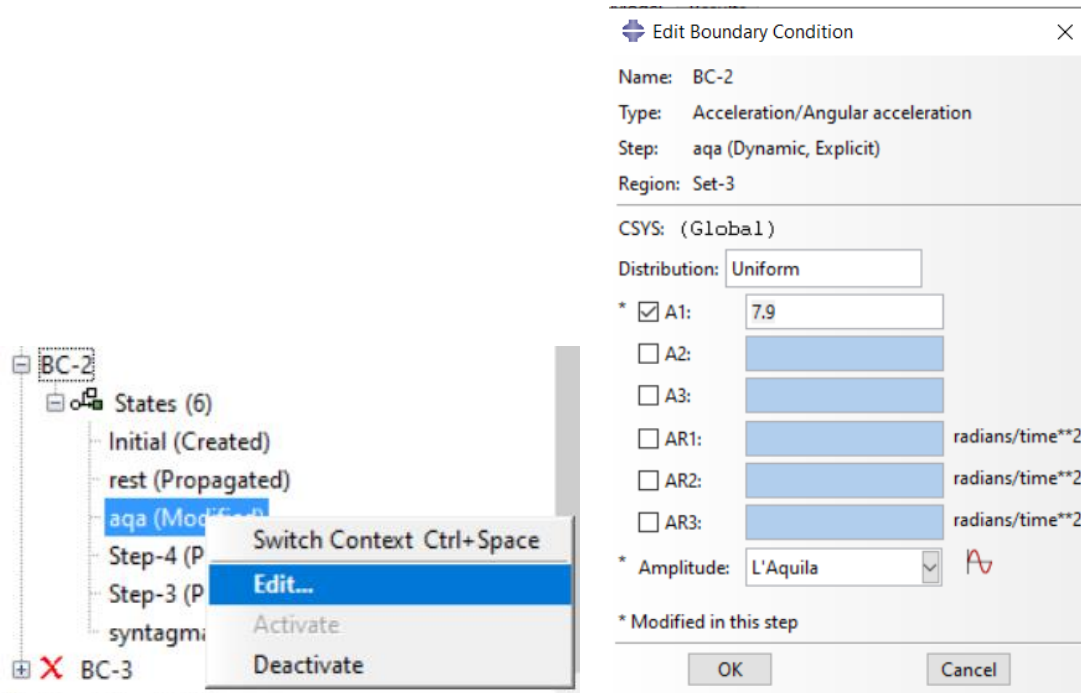


Εικόνα 58



Εικόνα 59

Στη συνέχεια, για να ορίσουμε την φόρτιση της επιτάχυνσης στη βάση του πολυσπόνδου κίονα, κάνουμε δεξί κλικ στο δεύτερο 'BCs' που δημιουργήσαμε, πατάμε 'States' και κάνουμε δεξί κλικ στο L'Aquila. Στη συνέχεια πατάμε 'edit' (εικ.60) και στο κελί 'Amplitude' επιλέγουμε το επιταχυνσιογράφημα που φτιάξαμε προηγουμένως (εικ.61). Στο κελί της επιτάχυνσης A1 βάζουμε 7.9 ώστε να κάνουμε "scale" τη σεισμική διέγερση σε 0.3g.



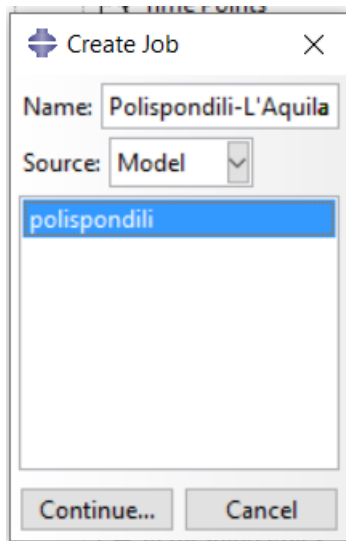
Εικόνα 60

Εικόνα 61

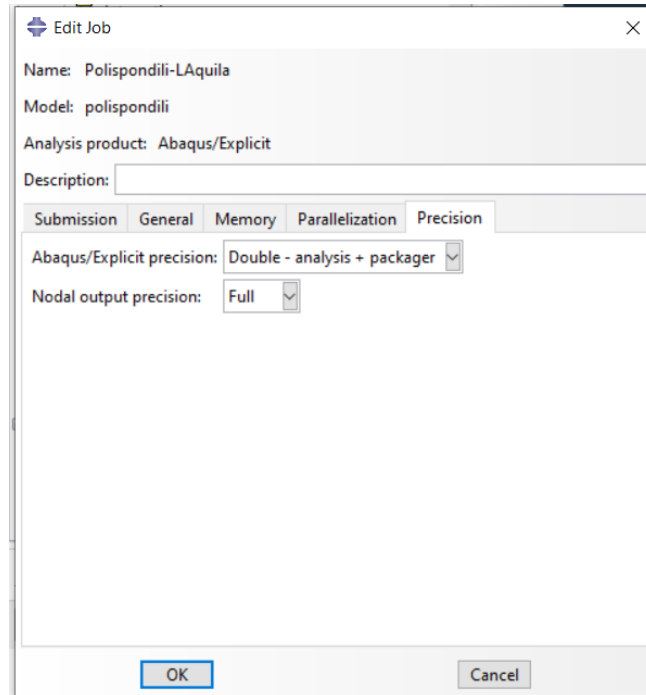
Επίλυση μοντέλου

Η δημιουργία του μοντέλου έχει ολοκληρωθεί και πλέον μπορούμε να εκτελέσουμε την ανάλυση. Για το σκοπό αυτό πρέπει να δημιουργήσουμε μια δουλειά από την επιλογή 'Jobs' του δένδρου 'Analysis'. Κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Jobs' και ονομάζουμε την εργασία 'Polisprondili- L'Aquila' και πατάμε Continue (εικ62). Στο παράθυρο που εμφανίζεται έχουμε τη δυνατότητα να γράψουμε μια σύντομη περιγραφή της εργασίας αυτής, η οποία θα εμφανίζεται μαζί με αποτελέσματα στη περιοχή σχεδίασης όταν θα έχει ολοκληρωθεί η ανάλυση. Σημαντικό είναι να ορίσουμε την ακρίβεια της ανάλυσης ως διπλή στην καρτέλα 'Precision', καθώς αυτό απαιτείται λόγω των πολλαπλών διαδοχικών κρούσεων που θα συμβούν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης (εικ.63). Πατάμε OK και κατόπιν κάνουμε δεξί κλικ στη δημιουργηθείσα δουλειά και επιλέγουμε 'Submit' για να την υποβάλλουμε για

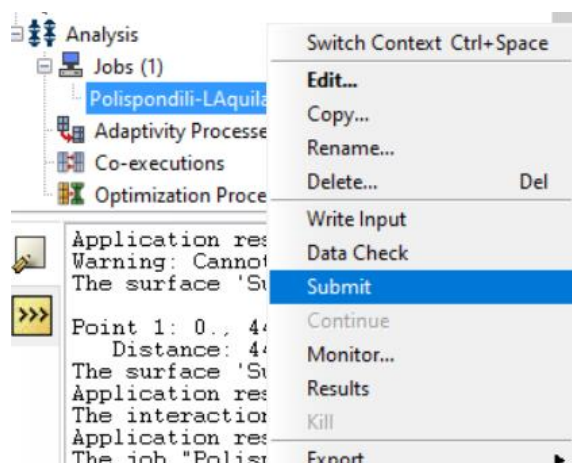
ανάλυση (εικ.64).Με εκ νέου δεξί κλικ και 'Monitor' εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο μπορούμε να παρακολουθήσουμε τη πορεία της ανάλυσης (εικ.66). Εάν παρουσιαστούν οποιαδήποτε λάθη αυτά θα παρουσιαστούν στη καρτέλα 'Errors'. Μπορούμε να δούμε συνολικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης όταν αυτή τελειώσει, ή ακόμα και κατά τη διάρκεια της επίλυσης, κάνοντας δεξί κλικ πάνω σε αυτήν και επιλέγοντας 'Results' (εικ.65).



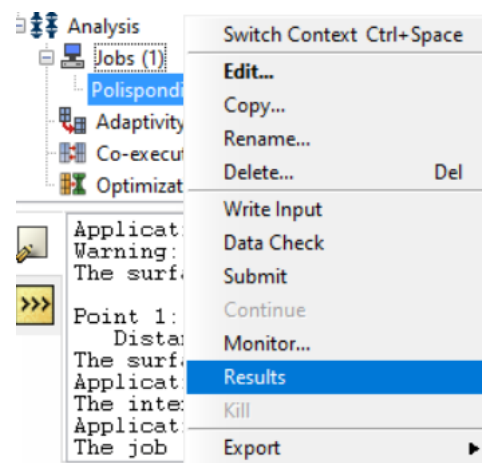
Εικόνα 62



Εικόνα 63



Εικόνα 64



Εικόνα 65

Polispondili-LAquila Monitor

Job: Polispondili-LAquila Status: Completed

Step	Increment	Total Time	CPU Time	Step Time	Stable Time Inc	Kinetic Energy	Total Energy
2	72000	10.2	10	7.2	0.0001	1.62262e-05	-9.34063e-1
2	90000	12	11.7	9	0.0001	0.000129023	-1.00356e-1
2	108000	13.8	13.4	10.8	0.0001	1.57312e-05	-9.15956e-1
2	126000	15.6	15.1	12.6	0.0001	0.000628898	-9.99289e-1
2	144000	17.4	16.6	14.4	0.0001	0.247138	0.00053242

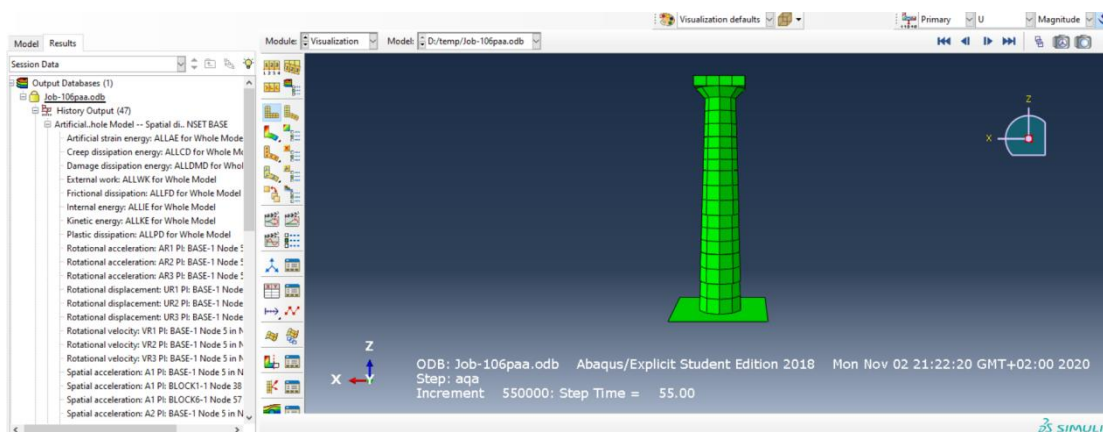
Log Errors ! Warnings Output Data File Message File Status File

Completed: Abaqus/Explicit
Completed: Tue Nov 10 01:32:17 2020

Search Text
Text to find: Match case

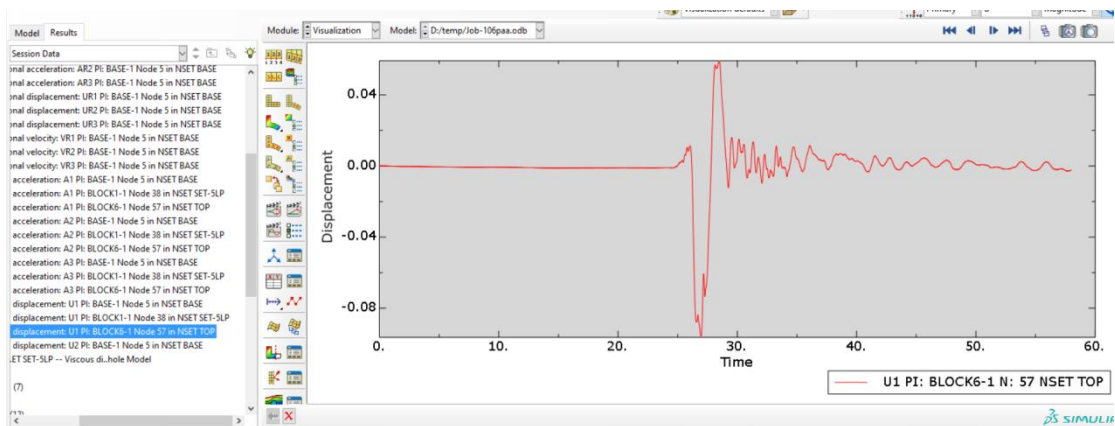
Εικόνα 66

Με το κουμπί 'Animate: Time History' μπορούμε να παρακολουθήσουμε τη κίνηση του πολυσπόνδου κίονα στο χώρο (εικ.67), ενώ ανοίγοντας το δέντρο της δουλειάς 'Polispondili-L'Aquila' του δένδρου 'Output Databases' (από τη καρτέλα εργασιών 'Results' του δένδρου εργασιών) έχουμε πρόσβαση στα αποτελέσματα και στις χρονιοιστορίες που είχαμε ζητήσει.



Εικόνα 67

Τέλος, για να αποθηκεύσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης, π.χ. τις μετακινήσεις U1 του ανώτατου σημείου 'Top point' επιλέγοντας τη χρονοϊστορία που αυτή και κάνοντας διπλό κλικ στο περιβάλλον σχεδίασης του προγράμματος εμφανίζεται η χρονοϊστορία (εικ.68). Για επεξεργασία των αποτελεσμάτων και αποθήκευση των τιμών τις μετακίνησης επιλέγουμε την εντολή 'XY Data Manager' στο παράθυρο που ανοίγει πατάμε την εντολή 'edit' και εμφανίζονται οι τιμές μετακινήσεων σε κάθε χρονική στιγμή (εικ.69).



Εικόνα 68

Edit XY Data

Name: _temp_1

	X	Y
1	0	0
2	0.01	-2.12142E-06
3	0.02	-9.93443E-06
4	0.03	-2.05105E-05
5	0.04	-2.7535E-05
6	0.05	-3.78691E-05
7	0.06	-2.68333E-05
8	0.07	8.64255E-06
9	0.08	3.83838E-06
10	0.09	6.52678E-05

Quantity Types
 X: Time Y: Displacement

OK Cancel

Εικόνα 69