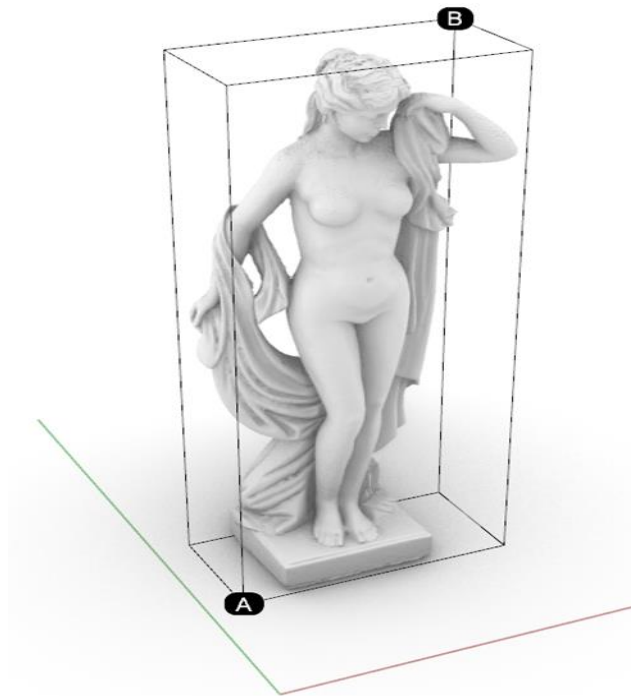




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

## Μελέτη της απόκρισης μη-συμμετρικών λικνιζόμενων εκθεμάτων υπό σεισμική διέγερση



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Βαρβέρης Στέφανος

Επιβλέπων : Επίκουρος Καθηγητής Μιχαήλ Φραγκιαδάκης  
Συνεπιβλέπων : Υποψήφιος Διδάκτωρ Σπυρίδων Διαμαντόπουλος

ΑΘΗΝΑ 4 ΜΑΡΤΙΟΥ 2021



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και κατά συνέπεια των προπτυχιακών σπουδών μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Επίκουρο Καθηγητή Μιχαήλ Φραγκιαδάκη. Η υποστήριξη και διαθεσιμότητά του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αποτέλεσε σπουδαία βοήθεια, συμβάλλοντας ποικιλοτρόπως στην ολοκλήρωσή της, παρέχοντας μεταξύ άλλων πολύτιμες συμβουλές και καθοδήγηση όπου κρίθηκε αναγκαίο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Σπυρίδων Διαμαντόπουλο του οποίου η άμεση ανταπόκρισή στις ανάγκες που προέκυπταν και η βαθιά γνώση του αντικειμένου και των δεδομένων ήταν καθοριστική. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους καθηγητές και καθηγήτριες που είχα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας στο Μετσόβειο Πολυτεχνείο και τους ευγνωμωνώ για την αστείρευτη γνώση που μου παρείχαν τόσο για το πεδίο της εργασίας όσο και για θεωρητικό απαραίτητο υποβαθρο. Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αγάπη κατανόηση και υποστήριξή τους, χωρίς τους οποίους δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Βαρβέρης Στέφανος, 2021



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς δύο πρότυπων αγαλμάτων γυναικείου φύλου υπό τις σεισμικές διεγέρσεις διαφόρων παλμών-σεισμών.

Συγκεκριμένα αφού διαστασιολογήθηκαν τα εκθέματα σε συνθήκες εργαστηρίου εν συνεχεία προσμοιώθηκαν σε δύο λογισμικά : το Abaqus και το Matlab. Αρχικά, τοποθετήθηκαν με την μορφή δύο πρισμάτων δοκιμίου-βάσης λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους όπως οι νόμοι περιγραφής των υλικών, οι διαστάσεις, οι αποσβέσεις καθώς επίσης και τα κατακόρυφα φορτία(Βάρος) που τα καταπονούν.

Μέσω του Matlab με την βοήθεια ενός solver σεισμικών αποτελεσμάτων και μιας νέας συνάρτησης ερευνήθηκε η λικνιστική συμπεριφορά τους και η ενδεχόμενη ανατροπή τους υπό μία πληθώρα παλμών Ricker και ημιτονειδών διεγέρσεων καθώς επίσης και πρώτυπων σεισμών που έχουν συμβει σε διάφορα σημεία με σημαντικά μουσειακά εκθέματα.

Τέλος στο Abaqus μετά την προσομοίωσή τους και μετέπειτα επίλυση στην βάση των επιταχύνσεων του Matlab μελετήθηκε η κίνηση στους δύο άξονες και επιτεύχθηκε η ταύτιση που ήταν και το ζητούμενο .

## ABSTRACT

Target of this diploma thesis is the understanding of the seismic response of symmetric and non-symmetric especially statues in which paper are of femminum configuration and are better introduced in section 2 .These statues suffer from cycloid pulses and seismic excitations for the purpose of current survey.First of all they were both tested in labs in order to obtain the geometrical data of these specimens .

Furthemore we created a new method to analyze better the dynamic equation of rocking In rigid block.For this purpose via Matlab we manufactured a new function with name main and we did this with success as it is deccribed in the document .All these methods were compared with the outputs of Abaqus analysis ,a program tha helped as a lot in the following surveys.In order to get the perect result the approach of the statues were of rectangular shape for both the base and the rigid column .This simple approach is of severe priority because it made less difficult to insert the inertias and mass characteristics of the statues in the show .Finally the diagrams that are shown in this diploma thesis show the success made and that when the coefficient of friction  $\mu$  is downgraded the maximum of the angular displacement is reduced and so forth.



# Περιεχόμενα

1	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΚΑΜΠΤΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ .....	16
1.1	Επεξήγηση του προβλήματος .....	17
1.2	Λικνισμός άκαμπτων σωμάτων (μαθηματική υπόσταση) .....	18
1.3	Επιρροή της γεωμετρίας και ενεργειακό ισοζύγιο.....	22
1.4	Ανατροπή ολόσωμων μνημείων.....	24
2	ΛΙΚΝΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΠΤΩΝ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΛΜΩΝ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΩΝ.....	28
2.1	Γεωμετρία πρότυπων αγαλμάτων που εξετάστηκαν .....	28
2.2	Μετρήσεις κίνησης σε παλμούς στα πρότυπα αγάλματα .....	30
2.2.1	Εισαγωγή και επεξήγηση ημιτονοειδούς κίνησης.....	30
2.2.2	Αποτελέσματα μετρήσεων στο Matlab.....	30
2.2.3	Απόκριση αγαλμάτων σε κυκλικές ημιτονικές διεγέρσεις .....	32
2.3	Σεισμική ανάλυση σε επίπεδο Matlab και Abaqus.....	41
2.3.1	Εισαγωγή στο Abaqus και χρησιμότητά του στο εν λόγω θέμα .....	41
2.3.2	Αποτελέσματα ανάλυσης σεισμών .....	43
2.4	Πρώτη εκτίμηση των μετρήσεων σε συμμετρικό επίπεδο .....	50
3	ΑΣΣΥΜΕΤΡΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	53
3.1	Εισαγωγή στην δυναμική ανάλυση ασσύμετρων δοκιμίων.....	53
3.2	Αποτελέσματα μετρήσεων για παλμούς-ημίτονο.....	57
3.3	Παλμοί Ricker και αποτελέσματα τους .....	69
3.4	Σεισμική καταπόνηση των ασσύμετρων προτύπων .....	75
3.4.1	Σύγκριση συμπεριφοράς ασσύμετρων αγαλμάτων στους σεισμούς 312,313,317.....	80
3.5	Επιρροή συντελεστή αποκατάστασης σε κανονικούς σεισμούς και σύγκριση συμμετρικών ασσύμετρων εκθεμάτων .....	84
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΚΕΨΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....	94
5	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	97
6	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΓΑΛΜΑΤΩΝ .....	101





## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Παρουσίαση φάσεων απόκρισης.....	17
Εικόνα 2 : Λικνισμός σώματος περί Ο και Ο' .....	19
Εικόνα 3:Κίονες στον ναό του Απόλλωνα .....	20
Εικόνα 4:Οριακές τιμές ροπής πριν ανατραπεί το άκαμπτο σώμα .....	21
Εικόνα 5:Γεωμετρία άκαμπτου σώματος όπου φαίνεται ότι $b_1=b_{crit}$ .....	22
Εικόνα 6 :Διάγραμμα Ενεργειακών απόσβέσεων Houssner.....	24
Εικόνα 7: Προτομή αγάλματος Feminille .....	28
Εικόνα 8:Κέντρο βάρους ασύμμετρου 1 <sup>ου</sup> αγάλματος .....	29
Εικόνα 9 : Προτομή και Κέντρο Βάρους αγάλματος Fanciulla .....	29
Εικόνα 10: Μέθοδος newmark για λικνισμό σωμάτων.....	32
Εικόνα 11: Ημιτονικός παλμός 0.6g στο άγαλμα Feminille.....	33
Εικόνα 12: Ημιτονικός παλμός 0.62g στο άγαλμα Feminille.....	33
Εικόνα 13: Ημιτονικός παλμός 0.36g στο άγαλμα Fanciulla.....	34
Εικόνα 14:Παλμός ημίτονο με $\alpha_r=0.385g$ για το άγαλμα Fanciulla .....	35
Εικόνα 15: Χρονοιστορίες παλμών Ricker για amplitude 0.6-0.65g αντίστοιχα .....	36
Εικόνα 16 :Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για παλμούς Ricker 0.6g αντίστοιχα κατά $x$ στο άγαλμα Feminille.....	37
Εικόνα 17:Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για παλμούς Ricker 0.65g αντίστοιχα κατά $x$ στο άγαλμα Feminille.....	37
Εικόνα 18:Διαγράμματα γωνίας στροφής χρόνου για παλμό Ricker 0.45 g ασκούμενοι στο άγαλμα Fanciulla .....	39
Εικόνα 19:Διαγράμματα γωνίας στροφής χρόνου για παλμό Ricker 0.48 g ασκούμενοι στο άγαλμα Fanciulla .....	39
Εικόνα 20:Σύγκριση απόκρισης στα συμμετρικά αγάλματα Fanciulla και Feminille ....	40
Εικόνα 21-Abaqus .....	42
Εικόνα 22:Χρονοιστορίες 312-313.....	44
Εικόνα 23:Χρονοιστορίες σεισμών 316-317 .....	45
Εικόνα 24- Πίνακας σεισμών .....	46
Εικόνα 25:Διάγραμμα $\theta$ -χρόνου για το συμμετρικό άγαλμα Feminille υποβαλλόμενο σε σεισμό κατά $x-x'$ για συντελεστή απόσβεσης $\zeta=5\%$ .....	46
Εικόνα 26 : Διάγραμμα $\theta$ -χρόνου για το συμμετρικό άγαλμα Feminille υποβαλλόμενο σε σεισμό κατά $x-x'$ για συντελεστές απόσβεσης $\zeta=4,3.7\%$ αντίστοιχα .....	47
Εικόνα 27:Διαγράμματα $\theta$ -χρόνος με $\zeta=3.78$ και $3.5\%$ αντίστοιχα για το συμμετρικό άγαλμα Fanciulla σε σεισμό κατά $y$ .....	48

Εικόνα 28 : Σύγκριση απόκρισης αγαλμάτων στους σεισμούς Νο 312 και 317 κατα xx yy αντίστοιχα .....	49
Εικόνα 29 : Ζημιές σε ελεύθερα εδραζόμενα αγάλματα.....	53
Εικόνα 30 : Ολόσωμο άγαλμα Feminille.....	54
Εικόνα 31: Ολόσωμο άγαλμα Fanciulla.....	55
Εικόνα 32: Πίνακες abaqus me inertias.....	55
Εικόνα 33:Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγαλμάτων .....	56
Εικόνα 34: Θέση KB στο 1 <sup>ο</sup> άγαλμα Feminille .....	56
Εικόνα 35:Θέση KB αγάλματος Fanciulla.....	57
Εικόνα 36:Χρονοιστορία παλμού 0.6g.....	58
Εικόνα 37:-Διαγράμματα γωνίας στροφής χρόνου για ημιτονικό παλμό με amplitude 0.6g (Feminille) για συντελεστή απόσβεσης $\zeta=5\%$ : .....	59
Εικόνα 38: Διάγραμμα γωνίας στροφής χρόνου για ημιτονικό παλμό με amplitude 0.6g(Feminille) .....	59
Εικόνα 39-Διάγραμμα γωνίας στροφής χρόνου για amplitude 0.62g για το άγαλμα Feminille.....	60
Εικόνα 40: Χρονοιστορία με $\theta_{max}=0.0272rad$ για το άγαλμα Fanciulla .....	61
Εικόνα 41: Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου με συντελεστή απόσβεσης $\zeta= 5\%$ για amplitude 0.35g για το άγαλμα Fanciulla.....	61
Εικόνα 42:Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου με συντελεστή απόσβεσης $\zeta= 3\%$ για amplitude 0.35g για το άγαλμα Fanciulla.....	62
Εικόνα 43 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου με συντελεστή απόσβεσης $\zeta= 0\%$ για amplitude 0.35g για το άγαλμα Fanciulla.....	62
Εικόνα 44:Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για ημιτονικό παλμό 0.3g κατα yy-με συντελεστή απόσβεσης 5% για το άγαλμα Feminille.....	63
Εικόνα 45:Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για ημιτονικό παλμό 0.3g κατα yy-με συντελεστή απόσβεσης 3% για το άγαλμα Feminille.....	63
Εικόνα 46 Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για ημιτονικό παλμό 0.3g κατα yy-με συντελεστή απόσβεσης 0%για το άγαλμα Feminille.....	64
Εικόνα 47 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για το άγαλμα Fanciulla για απόσβεση 3.78% .....	64
Εικόνα 48:Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για το άγαλμα Fanciulla για απόσβεση 5% κατα yy .....	65
Εικόνα 49 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για το άγαλμα Fanciulla για απόσβεση 0% κατα yy .....	65
Εικόνα 50-Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για τα αγάλματα Fanciulla-Feminille για συντελεστή τριβής $\eta=1$ σε ημιτονικό παλμό 0.54g κατα xx.....	66
Εικόνα 51:Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για τα αγάλματα Fanciulla-Feminille για συντελεστή αποκατάστασης $\eta=1$ σε ημιτονικό παλμό 0.33g κατα yy .....	67
Εικόνα 52 : Ραδινότητες αγαλμάτων κατα χ και y για τα αγάλματα Feminille πάνω και Fanciulla κάτω αντίστοιχα σε rad .....	68
Εικόνα 53: Διάγραμμα $\theta$ - tΠαλμός με amplitude 0.68g Feminille (xx) ασύμμετρο .....	69
Εικόνα 54:Διάγραμμα $\theta$ - tΠαλμός με amplitude 0.28g Feminille (yy) ασύμμετρο .....	70

Εικόνα 55 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.54g κατά χχ-με συντελεστή απόσβεσης 5% για το άγαλμα Feminille.....	71
Εικόνα 56-Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.54g κατά χχ-με συντελεστή απόσβεσης 3%,0% αντίστοιχα για το άγαλμα Feminille .....	71
Εικόνα 57 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.54g για το άγαλμα Feminille.....	72
Εικόνα 58-Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.54g για το άγαλμα Feminille .....	73
Εικόνα 59 : Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.27g για το άγαλμα Feminille .....	74
Εικόνα 60 : Εκκεντρότητες Feminille .....	75
Εικόνα 61: Χρονοιστορία σεισμού Νο 313.....	76
Εικόνα 62 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό Νο313(χχ) για το άγαλμα Feminille.....	76
Εικόνα 63: Φιλτράρισμα που έγινε χάρη στα προκαθορισμένα σημεία του Seismosignal .....	77
Εικόνα 64: Διάγραμμα αναπαράστασης απόκρισης σε σεισμό κατά τον 312 του αγάλματος Feminille για $\zeta=3.78\%$ και $\eta=1$ .....	77
Εικόνα 65 : Διάγραμμα θ/α-χρόνος με συντελεστή απόσβεσης 3.78% και συντελεστή αποκατάστασης $\eta=1$ για το άγαλμα Feminille υποβαλλόμενο σε στον σεισμό Νο317 ..	78
Εικόνα 66: Διάγραμμα θ/α-χρόνος με συντελεστή απόσβεσης 3.78% και συντελεστή αποκατάστασης $\eta=1.5$ για το άγαλμα Feminille υποβαλλόμενο στον σεισμό Νο317 ....	78
Εικόνα 67: Χρονοιστορία σεισμού Νο312 στον άξονα yy η επιτάχυνση εδάφους σε m/s <sup>2</sup> και τετμημένη σε sec .....	79
Εικόνα 68 : Μείωση ενέργειας για τον σεισμό Νο312 για το άγαλμα Fanciulla.....	80
Εικόνα 69:Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό Νο312 για τα αγάλματα Feminille και Fanciulla -ασσύμμετρα .....	81
Εικόνα 70 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό Νο313 για τα αγάλματα Feminille και Fanciulla -ασσύμμετρα .....	81
Εικόνα 71:Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό Νο316 για τα αγάλματα Feminille και Fanciulla.....	82
Εικόνα 72: Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό Νο317 για τα αγάλματα Feminille και Fanciulla.....	83
Εικόνα 73: Ασυμμετρία Κ.Β. Feminille.....	83
Εικόνα 74: Εμφανής διαφορά συμπεριφοράς στον σεισμό .....	84
Εικόνα 75: Ασύμμετρη προτομή αγάλματος.....	85
Εικόνα 76:Χρονοιστορία Loma Prieta.....	86
Εικόνα 77:Διάγραμμα θ-t για τον σεισμό Loma Prietta με $\eta_1=1, \eta_2=1$ για συμμετρικό και ασσύμμετρο προσομοίωμα(χχ) .....	86
Εικόνα 78:Διάγραμμα θ-t για τον σεισμό Loma Prietta με $\eta_1=0.6885, \eta_2=0.6979$ και $\eta_1, \eta_2=1$ για ασσύμμετρο προσομοίωμα(χχ).....	87
Εικόνα 79: Χρονοιστορία Imperial Valley .....	88

Εικόνα 80:Διάγραμμα $\theta$ - $t$ για τον σεισμό Imperial Valley με $\eta_1, \eta_2=1$ για συμμετρικό και ασύμμετρο προσομοίωμα για το άγαλμα Feminille(xx) .....	88
Εικόνα 81:Διάγραμμα $\theta$ - $t$ για τον σεισμό Chucapah για δύο συντελεστες αποκαταστασης $\eta=0.85$ —Feminille στο Abaqus -Matlab.....	89
Εικόνα 82:Διάγραμμα $\theta$ - $t$ για τον σεισμό Imperial Valley κατά xx με $\eta_1, \eta_2=1$ για συμμετρικό και ασύμμετρο προσομοίωμα για το άγαλμα Fanciulla.....	90
Εικόνα 83: Διάγραμμα $\theta$ - $t$ για τον σεισμό Imperial Valley κατά xx με $\eta_1=0.8520, \eta_2=0.8677$ για συμμετρικό και ασύμμετρο προσομοίωμα για το άγαλμα Fanciulla.....	91
Εικόνα 84:Χρονοιστορία SUNNYVALE COLTON AVE .....	91
Εικόνα 85: Διάγραμμα $\theta$ - $t$ για τον σεισμό Synnyvale με $\eta_1=0.8961, \eta_2=0.9092$ και $\eta_1, \eta_2=1$ για ασύμμετρο προσομοίωμα(yy).....	92
Εικόνα 86:Διάγραμμα $\theta$ - $t$ για τον σεισμό Synnyvale με $\eta_1=0.8961, \eta_2=0.9092$ και $\eta_1, \eta_2=1$ για συμμετρικό προσομοίωμα(yy) .....	92
Εικόνα 87: Περίγραμμα εργασία στο Abaqus Cae.....	101
Εικόνα 88 : Επιλογή μοντέλου Feminille και ονοματοδοσία του στο πρόγραμμα .....	102
Εικόνα 89: Είδος σώματος βάσης και γεωμετρική της προσέγγιση.....	103
Εικόνα 90: Σχεδιάγραμμα στο Abaqus .....	104
Εικόνα 91: Προσέγγιση της άκαμπτης βάσης ως τετράγωνο 5 x 5.....	104
Εικόνα 92: Συντεταγμένες Κέντρου Βάρους πλάκας .....	105
Εικόνα 93: Ειδικός συμβολισμός του KB πλάκας .....	106
Εικόνα 94:Διακριτοποίηση βάσης Feminille .....	106
Εικόνα 95: Ορισμός αριθμού πεπερασμένων στοιχείων στη βάση του αγάλματος Feminille.....	107
Εικόνα 96: Αποτέλεσμα διακριτοποίησης στην βάση .....	108
Εικόνα 97:Τρισδιάστατη όψη της Figura Feminille .....	108
Εικόνα 98: Ορισμός του ως άκαμπτο σώμα και τρισδιάστατο (extrusion) .....	109
Εικόνα 99: Τρισδιάστατη διάπλωση του μοντέλου (extrude).....	109
Εικόνα 100: Κουφιοποίηση του κορμού από κέλυφος που ήταν .....	110
Εικόνα 101:Βαθμονόμηση πεπερασμένων κορμού Feminille .....	110
Εικόνα 102: Διακριτοποίηση κορμού .....	111
Εικόνα 103: Γεωμετρικά στοιχεία βάσης κορμού Femille .....	112
Εικόνα 104:Δέντρο επιλογής inertias.....	112
Εικόνα 105: Μάζα και ροπές αδρανείας κατα τους τρεις άξονες για το ασύμμετρο άγαλμα Feminille .....	113
Εικόνα 106: Ένωση της βάσης και του κορμού με μία κίνηση.....	113
Εικόνα 107: Πρώτο σετ σημείων Key nodes .....	114
Εικόνα 108: Σχηματοποίηση του σετ Key nodes στον κορμό του Feminille .....	114
Εικόνα 109: Set base .....	115
Εικόνα 110:Ορισμός βήματος Rest ως Dynamic explicit.....	116
Εικόνα 111: Διάρκεια βήματος Rest ανάλυσης.....	116
Εικόνα 112:Χρονικό βήμα ολοκλήρωσης Rest.....	117
Εικόνα 113: Step sinus και στοιχεία του .....	117

Εικόνα 114: Ορισμός αποτελεσμάτων στο βήμα Rest .....	118
Εικόνα 115:History output 1 .....	119
Εικόνα 116 Set Key nodes History output .....	120
Εικόνα 117: Set base History output 3 .....	121
Εικόνα 118: Τύπος επαφής δοκιμίου και βάσης .....	122
Εικόνα 119: Συντελεστής αποκατάστασης και συμπεριφορά κατα την φορά της διεύθυνσης -τριβή .....	123
Εικόνα 120:Αναπαράσταση σχηματικά της αλληλεπίδρασης .....	123
Εικόνα 121: Συντελεστής απόσβεσης κορμού βάσης – Feminille και Fanciulla .....	124
Εικόνα 122: Ορισμός Φορτίων .....	125
Εικόνα 123: Διεύθυνση φορτίου gravity.....	125
Εικόνα 124: Δέσμευση Bind base .....	126
Εικόνα 125: Bind block για παλμό κατα x-x' .....	126
Εικόνα 126: Δέσμευση για εφαρμογή εδαφικής επιτάχυνσης.....	127
Εικόνα 127: Επιταχύνσεις για τους παλμούς.....	128
Εικόνα 128: Αριστερή στήλη χρόνος δεξιά η χρονοιστορία σεισμού .....	128
Εικόνα 129: Κατω κουτί επιλογής επιτάχυνσης .....	129
Εικόνα 130: Ονοματοδοσία Job.....	129
Εικόνα 131: 1η Εντολή -ορισμός ακρίβειας ανάλυσης.....	130
Εικόνα 132: Υποβολή project.....	131
Εικόνα 133: Animate time history με χαρακτηριστική κόκκινη κουκίδα .....	131
Εικόνα 134:History outputs.....	131



# 1 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΚΑΜΠΤΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ

## Εκτενής Εισαγωγή

Είναι γνωστό πως μια πληθώρα μουσειακών εκθεμάτων-ανθρωπόμορφων αγαλμάτων εκατομμυρίων χρόνων ανυπέρβλητης αξίας απαντώνται σε σεισμογενείς περιοχές του πλανήτη όπως στην Ιταλία, τις ΗΠΑ, την Ελλάδα και την Κίνα. Ως επακόλουθο η συντήρηση και προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς έχει μετατραπεί σε πρωταρχικό στόχο ερευνών ατόμων διαφόρων ειδικοτήτων όπως γεωλόγων, πολιτικών μηχανικών, αγρονόμων τοπογράφων καθώς και ατόμων που δραστηριοποιούνται στους κύκλους του πολιτισμού (αρχαιολόγοι- υπάλληλοι μουσείων κλπ). Τα υπάρχοντα συστήματα ενίσχυσης των εκθεμάτων χρίζουν περαιτέρω ανάλυσεως όπως φαίνεται στους πρόσφατους σεισμούς του 2011 στο Christchurch και στη Νότια Νάπα του 2014 όπου η ανατροπή-κατάρρευση αυτών των συστημάτων έγινε ζητήματα απώλειας ενός αναντικατάστατου αντικειμένου, ζημιάς στην πολιτιστική κληρονομιά, καθυστερήσεις στη λειτουργία του κτιρίου μετά το σεισμό και ακόμη και την απώλεια ζωής.

Με βάση αυτά τα ενδιαφέροντα ζητήματα η παρούσα εργασία αφορά στη δυναμική απόκριση έργων τέχνης που εδράζονται ελεύθερα σε μία άκαμπτη ταυτόχρονα λικνιζόμενη βάση. Τέτοια εκθέματα είναι συνήθως αγάλματα, προτομές και γενικά έργα τα οποία τοποθετούνται σε μία βάση ώστε να βρεθούν στο επίπεδο των ματιών του μέσου επισκέπτη. Η απουσία συνδετικού υλικού μεταξύ της βάσης και του εκθέματος, οδηγεί σε ένα σύστημα δύο σωμάτων, το οποίο υπό σεισμική φόρτιση μπορεί να λικνιστεί, να ολισθήσει ή/και να ανατραπεί. Η κύρια δυσκολία στην εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς τέτοιων συστημάτων είναι η ασυμμετρία των εκθεμάτων καθώς και η σύνδεση των εκθεμάτων με την βάση τους. Διερευνάται η περίπτωση ενός συμμετρικού και ενός ασύμμετρου προσομοιώματος και συγκρίνεται η λύση με την περίπτωση στην οποία μόνο το έκθεμα υποβάλλεται σε λικνιστική κίνηση καθώς η βάση έχει μεγάλη ραδιότητα. Σε αυτή την απλή περίπτωση, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα άκαμπτο σώμα με τη θεωρία που προτάθηκε από τον Housner (1963). Στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση προσομοιωμάτων για την δυναμική συμπεριφορά μουσειακών εκθεμάτων που συμπεριφέρονται ως ένα ή δύο άκαμπτα σώματα τα οποία μπορεί να είναι και ασύμμετρα. Επιπροσθέτως, εξετάζεται η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς ενός τέτοιου συστήματος (λικνισμός, ανατροπή) χωρίς την ανάγκη για επίλυση μακροσκελών και περίπλοκων εξισώσεων κίνησης χρησιμοποιώντας απλά αλλά ακριβή προσομοιώματα.

- Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και εξισώσεις κίνησης για το λικνισμό ενός άκαμπτου σώματος. Αποδεικνύεται ότι ο συντελεστής αποκατάστασης εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία του σώματος και όχι από 0.

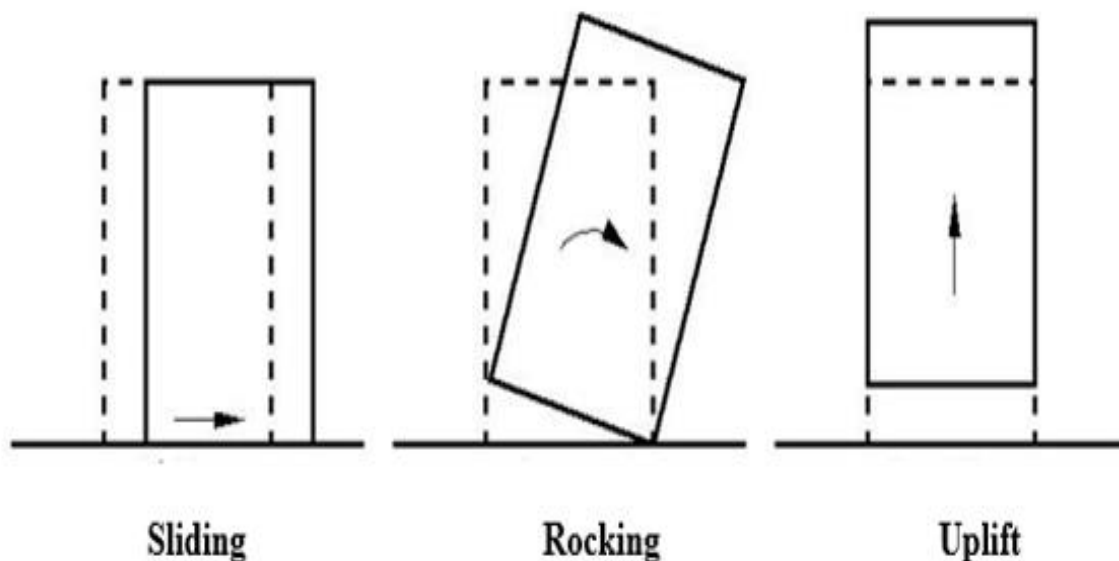


- Στο κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω γλώσσας προγραμματισμού Matlab σε συμμετρικά προσομοιώματα των δύο πρότυπων αγαλμάτων εδραζόμενων σε ορθογωνική βάση. Οι εξωτερικές διεγέρσεις περιλαμβάνουν ημιτονοειδείς παλμούς , Ricker και σεισμούς. Οι συντελεστές αποκατάστασης στον κώδικα προγραμματισμού υπολογίζονται με βάση τις εκφράσεις που ανέπτυξε ο Psycharis (1990) . Τέλος, πραγματοποιείται ανάλυση λαμβάνοντας σταθερές τιμές για τους συντελεστές αποκατάστασης με σκοπό τη διερεύνηση της επιρροής στην τελική απόκριση του συστήματος, καθώς και ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία με το πρόγραμμα Abaqus και δίνεται έμφαση στο ενεργειακό ισοζύγιο κατά κάθε σεισμική απόκριση.
- Στο κεφάλαιο 3 έχουμε τις αναλύσεις σε ασύμμετρο επίπεδο των αγαλμάτων τόσο μέσω της μητρικής γλώσσας τύπου ode solver καθώς και μιας εξ ολοκλήρου καινούργιας συνάρτησης που περιλαμβάνει όλες τις εξισώσεις που διέπουν την μετάπτωση από διαδοχικές καταστάσεις (ολίσθηση-λικνισμός ) στην γλώσσα Matlab .Τέλος προσομοιώθηκαν τα αγάλματα στο Abaqus
- Στο κεφάλαιο 4 υπογραμμίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις ανωτέρω αναλύσεις. Συνοψίζονται οι διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης για το πρόβλημα του λικνισμού και κατά πόσο τα αποτελέσματα που προκύπτουν κρίνονται ικανοποιητικά.

## 1.1 Επεξήγηση του προβλήματος

Αναρίθμητα πειράματα σε σημαντικής κλίμακας σεισμούς έχουν καταδείξει ότι ένα ελεύθερα εδραζόμενο- άκαμπτο σώμα υπό την διέγερση σεισμού ενδέχεται να έχει τέσσερις αντιδράσεις:

A) Ολίσθηση ,B) Ανασήκωμα ,Γ) Λικνισμός και Δ) Ανατροπή όπως φαίνεται και στην κατώθι φωτογραφία.



Εικόνα 1 : Παρουσίαση φάσεων απόκρισης

Συνεχίζοντας στο ίδιο μήκος κύματος υπάρχουν επίσης και πολλοί τρόποι έδρασης των άκαμπτων σωμάτων-εκθεμάτων .Για παράδειγμα ένα άγαλμα μπορεί να είναι τόσο ελεύθερα εδραζόμενο σε λεία επιφάνεια όσο και να έχει χώμα στον πυθμένα του που ανεβάσει τον συντελεστή τριβής . Ακόμα και αυτές οι διαφορές μπορούν κάλλιστα να μεταβάλλουν κατά σημαντικό βαθμό την τιμή της επιτάχυνσης του εδάφους με ολέθριες συνέπειες για την ακεραιότητα του μνημείου.Για αυτό τον σκοπό ,την πρόβλεψη δηλαδή των αποτυχιών αυτών και κατα κύριο λόγο εξετάζοντας κατα πόσο εκθέματα με υψηλή ραδιότητα (γωνία ύψους κέντρου βάρους προς βάση) θα ανατραπούν .

Εμβαθύνοντας, το φαινόμενο κατα το οποίο η μερική ανύψωση ενός άκαμπτου σώματος με ταυτόχρονη περιστροφή γύρω από ένα σώμα το οποίο αλλάζει συνεχώς με την παρεύλευση των σεισμικών κυμάτων ονομάζεται λικνισμός.Η μαθηματική επεξήγηση του είναι αρκετά δύσκολο εγχείρημα μιας και είναι εύκολη η μετάπτωση από την μία κατάσταση στην άλλη όπως αναφέρθηκαν ανωτέρω .

## 1.2 Λικνισμός άκαμπτων σωμάτων (μαθηματική υπόσταση)

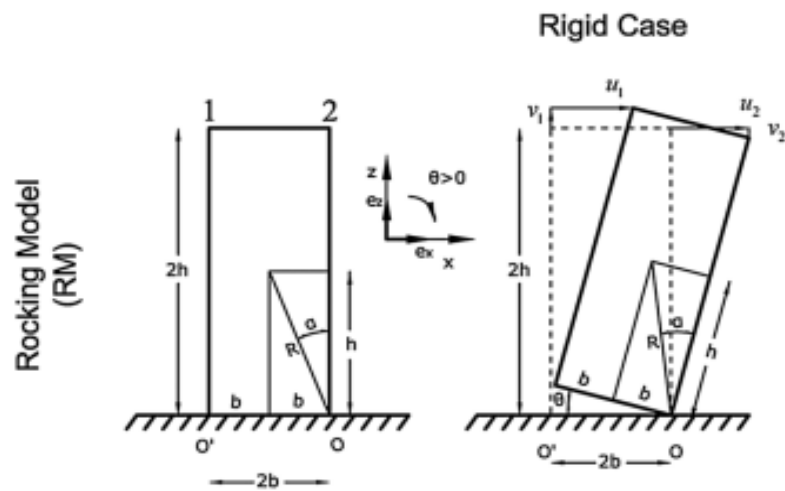
Με την υπόθεση ότι ο συντελεστής τριβής είναι αρκετά μεγάλος όποτε και δεν έχουμε ολίσθηση η εξίσωση περιστροφής περί των σημείων Ο-Ο´ καθώς υπόκειται σε οριζόντια διέγερση  $u_g(t)$  ενός εκθέματος με τα παρακάτω χαρακτηριστικά γεωμετρίας-αδράνειας όπως αποτυπώνονται στην φωτογραφία είναι :

$$I_0 \ddot{\theta}(t) + mgR \sin[\alpha \operatorname{sgn} \theta(t) - \theta(t)] = -m \ddot{u}_g(t) R \cos[\alpha \operatorname{sgn} \theta(t) - \theta(t)] \quad (1)$$

Η ανωτέρω εξίσωση προτάθηκε από τους Μακρή και Ρούσσο και μπορεί να συμπυχθεί για περιπτώσεις ορθογώνιων πρισμάτων ,όπου η ροπή αδρανείας είναι  $I_0=(4/3)*m*R^2$  ως εξής:

$$\theta(\ddot{t}) = - p^2 \left\{ \sin[asgn(\theta(t)) - \theta(t)] + \frac{\ddot{u}}{g} \cos (asgn(\theta(t)) - \theta(t)) \right\} \quad (2)$$

( R η ακτίνα ραδινότητας και α η γωνία που σχηματίζει η ακτίνα R με την κατακόρυφο όταν το σώμα βρίσκεται σε ηρεμία )



Εικόνα 2 : Λικνισμός σώματος περί O και O'

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανωτέρω απόκριση ενός σώματος είναι όπως αναφέρει ο Χούσνερ να συμβαίνει η ακόλουθη αναγκαία συνθήκη:

$$\ddot{u}_g \geq a_{g,min} = g \tan \alpha \quad (3)$$

Όπου  $\tan \alpha = h/b$ .

Η εξίσωση κίνησης που καλύπτει το φαινόμενο του λικνισμού ενός ελεύθερα εδραζόμενου ακάμπτου εκθέματος αξίζει εδώ να σημειωθεί πως είναι ταυτόσημη με την εξίσωση ενός ελεύθερα εδραζόμενου σώματος με επιπλέον μάζα και συνδεση ελατηρίου-ελαστική. Επιπλέον έχουμε ότι ανάμεσα σε δύο πανομοιότυπα μπλόκ-ίδιες ραδιονότητας εκείνο με την μεγαλύτερη ακτίνα όπως αναφέρει ο Χούσνερ είναι πιο σταθερό. Ως ένα άλλο συμπέρασμα του λικνισμού άκαμπτων σωμάτων ο Κουνάδης αναφέρει πως όταν ορισμένα αδρανειακά στοιχεία (μάζα ,ροπή αδρανείας) δεν έχουν την δυνατότητα να αντιδρούν καθώς έχουμε ανατροπή σώματος χωρίς επαφή με το στηρίζων έδαφος τότε τα μεγαλύτερα εκθέματα καταλήγουν να είναι πιο ασταθή.

Προσθέτωντας κάποια άλλα στοιχεία μαθηματικής επεξήγησης έχουμε την αναφορά των Δημητρακόπουλου και Ντε γιόν ,ότι η ποσότητα  $\rho = \sqrt{\frac{3g}{4R}}$  , που είναι μέτρο της ευκινισίας και της δυναμικής απόκρισης του σώματος είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα που προκύπτει αν το ίδιο σώμα κρεμόταν από το δικό του σημείο περιστροφής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το ελεύθερα εδραζόμενο σώμα του ναού του Απόλλωνα στην Κόρινθο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα έχει  $\rho = 1.4r/s$ .

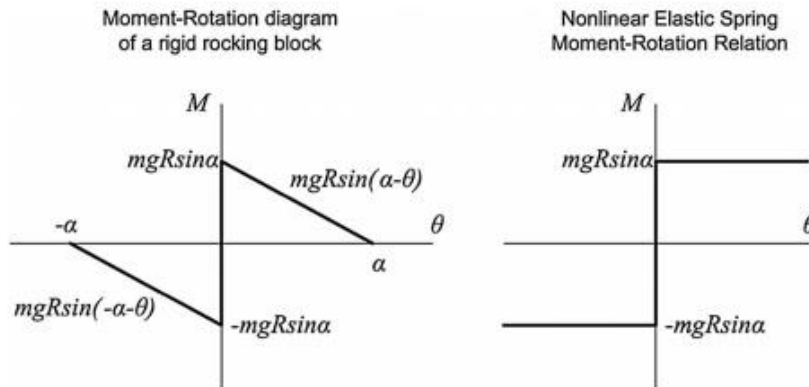


Εικόνα 3:Κίονες στον ναό του Απόλλωνα

Ανύψωση του σώματος θα πραγματοποιηθεί, όταν η σεισμική απαίτηση (ροπή ανατροπής) =  $m\ddot{u}gh$  φτάνει την τιμή της σεισμικής αντοχής =  $mgb$  . Τη στιγμή της επικείμενης ανύψωσης, από τη 'στατική' ισορροπία του σώματος περί το σημείο περιστροφής προκύπτει η σχέση:

$$M\ddot{u}gh = mgb \rightarrow \ddot{u}g = ga \tag{4}$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως η εξίσωση του West και μας δείχνει ότι ένα σώμα διαστάσεων θα ανυψωθεί όταν  $\ddot{u}g \geq ga$ . Ακολούθως φαίνεται η εικόνα ροπής-περιστροφής ενός άκαμπτου σώματος. Πιο συγκεκριμένα έχουμε ότι το σύστημα σώματος-βάσης έχει άπειρη στιβαρότητα όταν το μέγεθος της ροπής φτάσει  $m \cdot g \cdot r \cdot \sin \alpha$ .



Εικόνα 4:Οριακές τιμές ροπής πριν ανατραπεί το άκαμπτο σώμα

Στην περίπτωση της σεισμικής δόνησης ο Houssner μας λέει πως ο λικνισμός αρχίζει μόλις η ροπή ανατροπής ξεπεράσει την ροπή ευστάθειας λόγω βάρους δηλαδή :

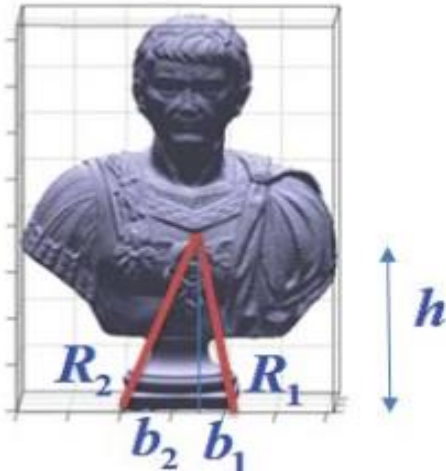
$$M_{res} < M_{our} \Rightarrow Wb < Wa \times g \frac{h}{g} \Rightarrow a \times g > b \frac{g}{h} \Rightarrow a \times g > g \tan \alpha \quad (5)$$

Με απλή ισορροπία στροφορμών περί τους πόλους περιστροφής θα προκύψει η εξής σχέση:

$$I_o \ddot{\theta} = -W R \sin(\alpha - \theta) - W R a \times g \cos(\alpha - \theta) / g \quad (6)$$

Που ισχύει για όταν έχουμε λικνισμό περί το σημείο O .

Στην περίπτωση ασύμμετρου σώματος θα είναι τα εξής :



Εικόνα 5:Γεωμετρία άκαμπτου σώματος όπου φαίνεται ότι  $b_1 = b_{crit}$

Εδώ θα ισχύει μια απλή επέκταση των όσων γνωρίζουμε για τα συμμετρικά σώματα. Το πλάτος του block θα είναι  $b = b_1 + b_2$ . Ως προς το μετατοπισμένο πλέον ΚΜ θα έχουμε την ροπή αδραειάς  $I_{cm}$ . Από την Wittich and Hutchinsson θα είναι τελικά:

$$(I_{cm} + m R_i^2) \cdot \ddot{\theta}(t) + mgR \sin[\alpha_i \operatorname{sgn}\theta(t) - \theta(t)] = -m \ddot{u}_g(t) R_i \cos[\alpha_i \operatorname{sgn}\theta(t) - \theta(t)] \quad (7)$$

Όπου ο δείκτης  $i$  υποδηλώνει την αρνητική η θετική στροφή με τιμή=1 για στροφή περί το  $O$  και τιμή=2 για στροφή περι το  $O'$  ενώ το  $\operatorname{sgn}$  είναι συνημιτοειδής συνάρτηση αναφερέμενη στο αν βρισκόμαστε σε κρίσιμη η μή κρίσιμη κατάσταση.

### 1.3 Επιρροή της γεωμετρίας και ενεργειακό ισοζύγιο

Αρκετοί ερευνητές μελέτησαν τις αλλαγές στις εξισώσεις κίνησης λόγω ποικιλίας γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Αδρανειικά στοιχεία και το διάνυσμα της ακτίνας  $R$
- Ενέργεια που χάνεται σε κάθε επαφή ή συντελεστή αποκατάστασης
- Δυνατότητα αναπήδησης ειδικά σε περίπτωση ενός υψηλού μνημείου
- Πρόσθετοι όροι που στην εξίσωση της κίνησης που ενδέχεται να οφείλονται σε απόσβεση η ελατήριο

Η ενεργειακή απόσβεση παρατηρείται όταν κατα την άσκηση της σεισμικής διέγερσης το σημείο περιστροφής του σώματος αλλάζει από  $O$  σε  $O'$ , όπως φαίνεται στην φωτογραφία 2. Κατά τα κλασσικά όταν έχουμε μείωση κινητικής ενέργειας σε κάθε κρούση, τότε παρατηρείται αυτή η πτώση. Με ισορροπία ροπών έχουμε μέσω του Χούσνερ ότι πριν και μετά την κάθε κρούση στο στηρίζων έδαφος έχουμε την εξής σχέση για τον συντελεστή αποκατάστασης για ορθογώνια και λεπτά σώματα:

$$e_H = 1 - \frac{3}{2} \sin^2 a = \frac{2\mu^2 - 1}{2(\mu^2 + 1)} \quad (8)$$

Στην άνωθι σχέση έχουμε ότι  $\mu = h/b$  είναι το ύψος στην λεπτότερη πλευρά. Γενικά ο συντελεστής αποκατάστασης εξαρτάται από τον συντελεστή ραδινότητας  $a$  : όσο μεγαλύτερη είναι η λεπτότητα τόσο θα γίνουν περισσότερες κρούσεις θα γίνουν που θα έχουν ως αποτέλεσμα την ίδια απώλεια εισόδου. Τιμή του  $e_H = 0$  καταδεικνύει εντελώς ανελαστική κρούση ενώ τιμή  $e_H = 1$  δείχνει τέλεια ελαστική πρόσκρουση. Γενικά η απώλεια ενέργειας είναι σε αρκετά πειράματα χαμηλότερη σε αντίθεση με αυτά που προβλέπονται από τον Χούσνερ. Με άλλα λόγια η πειραματική αξία του συντελεστή αποκατάστασης είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη θεωρητική. Επίσης επισημαίνουμε ότι στο τέλος κάθε κύκλου η αναλογία μεταξύ της παρούσας ενέργειας και της ενέργειας στην αρχή του κύκλου θα είναι :

$$\frac{E}{E_0} = r^2 = \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 a\right)^4 \quad (9)$$

Όπου το  $r$  είναι ο συντελεστής αποκατάστασης.

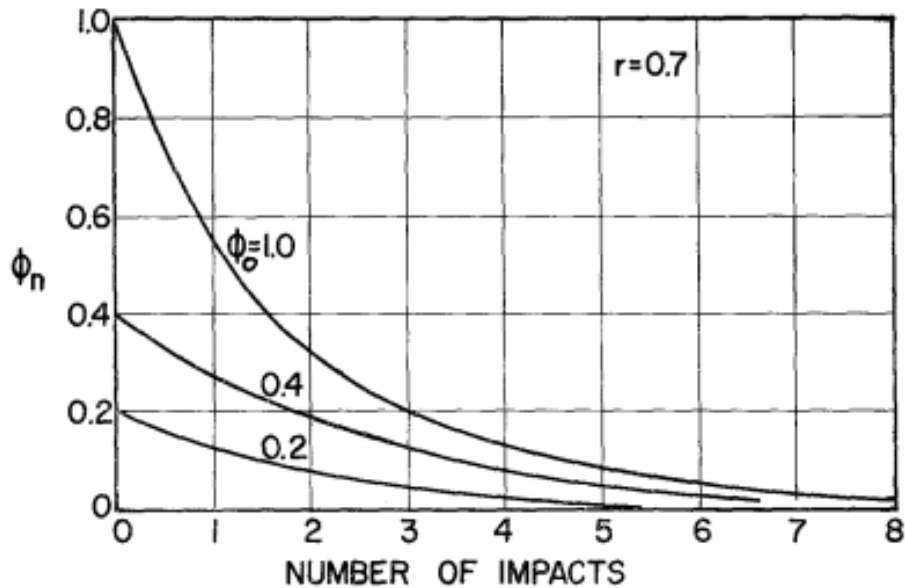
Για αγάλματα με μικρή γωνία ραδινότητας ή όπως αλλιώς αποκαλούνται στην αγγλική ορολογία (slender blocks) που είναι και συχνότερα στα μουσεία ανα τον κόσμο θα έχουμε την εξής σχέση για την μείωση της κινητικής ενέργειας:

$$\sqrt{r} = 1 - \frac{2 m R^2 a^2}{I_0} \quad (10)$$

Η λύση της εξίσωσης ανατροπής για κάθε κρούση μας δίνει ως νιοστή λύση σύμφωνα με τον Houssner (άγνωστος θα είναι η γωνία στροφής των εκθεμάτων):

$$\Phi_n = 1 - \sqrt{1 - r^n [1 - (1 - \phi_0)^2]} \quad (11)$$

Αξιοσημείωτο για την ενεργειακή παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς είναι το εξής διάγραμμα όπου τετμημένη είναι ο αριθμός των κρούσεων και τεταγμένη η εκάστοτε γωνία στροφής



Εικόνα 6 :Διάγραμμα Ενεργειακών απόσβέσεων Houssner

Από αυτό αντλούμε δύο χρήσιμα συμπεράσματα. Πρώτον ότι για μεγάλα πλάτη διέγερσης και άρα μεγαλύτερα  $\phi$  θα έχουμε απότομη μείωση κινητικής ενέργειας ενώ για πιο μικρές ταλαντώσεις θα είναι εξίσου μικρότερη η μείωση της ενέργειας και δεύτερον μια επεξήγηση της κίνησης. Σύμφωνα με αυτήν ένα ελεύθερα εδραζόμενο άκαμπτό σώμα δεν πραγματοποιεί πλήρως ανελαστική κρούση στο έδαφος όταν λικνίζεται αλλά υπάρχει και λικνισμός και ταυτόχρονη ολίσθηση. Κατα συνέπεια δεν είναι επακόλουθο ότι μεγάλης σιγερσης σεισμός θα προκαλέσει ανατροπή του εκθέματός μας . Τουναντίων είναι η διάρκεια του που θα μας οδηγήσει σε αυτήν.

Σε εμάς που έχουμε και ασύμμετρη ανάλυση θα χρησιμοποιήσουμε για τους συντελεστές αποκατάστασης τις σχέσεις Houssner ως  $\eta_1, \eta_2$  τώρα με διάτηρηση της στροφορμής πριν και μετά την κρούση το σώμα θα έχει μετάπτωση από δεξιόστροφες-θετικές σε αριστερόστροφες αρνητικές τιμές .

## 1.4 Ανατροπή ολόσωμων μνημείων

Η ολίσθηση όπως και ο λικνισμός είναι δύο άμεσα φαινόμενα που ενδέχεται να προκληθούν κατά την σεισμική διέγερση ενός άκαμπτου σώματος. Οι ερευνητές τόσα χρόνια ψάχνουν να δώσουν λύση σε ερωτήματα όπως γιατί σώματα με μεγάλη ραδιότητα αντέχουν σεισμούς , πότε ανατρέπονται τα μνημεία-σε τι κλιμάκας ρίχτερ σεισμό και πως μπορούμε γνωρίζοντας τις ιδιότητές των αγαμάτων σε ποιά κατάσταση θα βρεθούν αν ανατραπούν και πως να την προλάβουμε την ανατροπή γενικότερα.



Κατα την δυναμική απόκριση του μνημείου ενδέχεται να υπάρξουν και μή ελαστικά φαινόμενα –ολίσθηση .Ολίσθηση γενικά έχουμε όταν οποιαδήποτε κατασκευή δεν μπορεί να ακολουθήσει την διέγερση του εδάφους.Η τριβή στην διεπιφάνεια ανάμεσα στην βάση και το μνημείο έχει παράλληλη κατεύθυνση με την διεπιφάνεια και δεν εξαρτάται από την ταχύτητες που θα αναπτυχθούν εκεί.Ο συντελεστής της δύναμης τριβής ως προς την αδρανειακή αντίσταση ονομάζεται στατικός συντελεστής τριβής  $\mu_{st}$ :

$$\mu_{st} = \frac{T_{st}}{N} \tag{12}$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις του D’Alembert για την αδρανειακή δύναμη και την αντίστοιχη τριβή τότε θα είναι :

$$m \ddot{X} = T \tag{13}$$

$$m \ddot{Y} = n - mg$$

Όπου X δεύτερη παράγωγος είναι η επιτάχυνση κατα την οριζόντια διεύθυνση και Y δεύτερη κατα την κατακόρυφη αντίστοιχα .Για να επέλθει ανατροπή θα είναι κατα σειρά:

$$\begin{aligned} m \ddot{X} &\geq T_{st} \Rightarrow \\ m \ddot{X} &\geq \mu_{st} N \Rightarrow \\ m \ddot{X} &\geq \mu_{st} mg \left( 1 + \frac{\ddot{Y}}{g} \right) \Rightarrow \\ \ddot{X} &\geq \mu_{st} g \left( 1 + \frac{\ddot{Y}}{g} \right) \end{aligned}$$

- Πρώτος τρόπος ανατροπής  
Θέτουμε  $t_{fv}$  τη χρονική στιγμή κατά την οποία το σώμα εισέρχεται στο καθεστώς ελεύθερης δόνησης. Αφού το σώμα έχει πραγματοποιήσει μία πρόσκρουση, για να συμβεί ανατροπή του σώματος, πρέπει να ισχύει:

$$\ddot{\theta}(t_{fv}) + \rho[\theta(t_{fv}) - a] = 0 \tag{14}$$

Η πρόσκρουση λαμβάνει χώρα μετά το πέρας της διέγερσης, δηλαδή ισχύει  $t_i > T_{ex}$  . Η επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων μας δίνει την ελάχιστη επιτάχυνση ανατροπής του σώματος.

- Δεύτερος τρόπος ανατροπής

Το σώμα υπό αυτόν τον τρόπο ανατροπής δε θα υποστεί καμία πρόσκρουση. Θεωρώντας  $T_{ex}$  τη χρονική στιγμή όπου η διέγερση εκπνέει, η συνθήκη για την ανατροπή του σώματος είναι:

$$\frac{\theta(T_{ex})}{p} + [\theta(T_{ex}) + a] = 0 \quad (15)$$

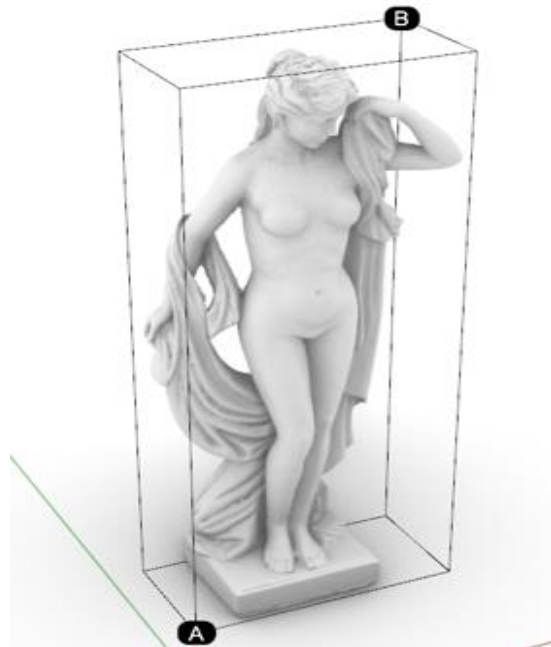
Ομοίως με προηγουμένως, η επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων που προκύπτουν από την παραπάνω συνθήκη δίνει το ελάχιστο πλάτος της επιτάχυνσης που είναι ικανό να ανατρέψει το σώμα χωρίς να συμβεί κάποια πρόσκρουση.



## 2 ΛΙΚΝΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΠΤΩΝ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΛΜΩΝ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΩΝ

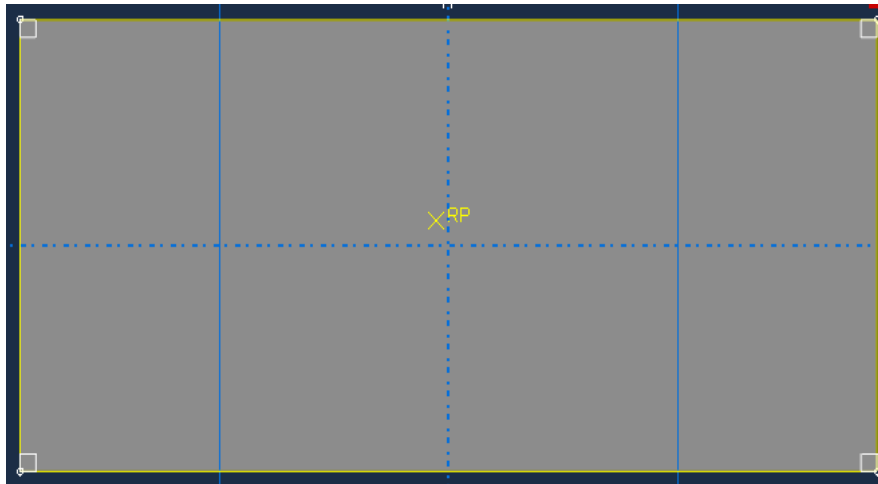
### 2.1 Γεωμετρία πρότυπων αγαλμάτων που εξετάστηκαν

Αρχικά θα αναφερθούμε στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγαλμάτων με ονόματα Figura Feminnile και Fanciulla. Πρώτον παρατίθεται η εικόνα του άκαμπτου σώματος **Feminnile**.



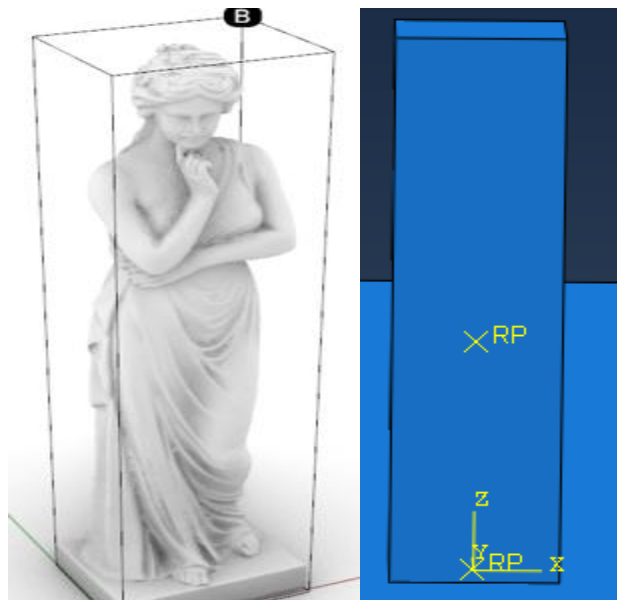
Εικόνα 7: Προτομή αγάλματος Feminnille

Το άνωθεν άγαλμα έχει συνολικό ύψος 1.6909 m και εμβαδόν βάσης-πεδίου  $A=748.9 \times 362,3 \text{ mm}^2 = 0.2713\text{m}^2$ . Το συνολικό του βάρος ανέρχεται σε 0.3128 tones ,ενώ το Κέντρο βάρους του είναι σε απόσταση 0.7383 μέτρων με μία εκκενρότητα της τάξης ( $e_x=-9.75\text{mm}$  and  $e_y=19.95\text{mm}$ )ως ασύμμετρό προσομοίωμα από το Κέντρο της βάσεως όπως φαίνεται στην εικόνα 6 του Abaqus .Στο συμμετρικό προσομοίωμα βέβαια το τοποθετήσαμε στο κέντρο.Επιπλέον ορισμένα χρήσιμά στοιχεία του είναι η Ραδινότητα  $\alpha=\text{Arctan}(b_i/h)= 0.4694\text{rad}$  όπου  $h_{\kappa\beta}=0.7383\text{m}$  και η χαρακτηριστική του συχνότητα που είναι  $\rho=2.49\text{r/s}$ .



Εικόνα 8:Κέντρο βάρους ασύμμετρου 1<sup>ου</sup> αγάλματος

Το δεύτερο άγαλμα ονόματι **Fanciulla** είναι λεπτότερο και παρουσιάζει μικρότερη ραδινότητα  $\alpha=0.3108 \text{ rad}$ . Επίσης είναι κατα λίγο χαμηλότερο με  $h_{tot}=1.6187\text{m}$ . Εδώ οι διαστάσεις βάσεως θα είναι  $A=0.4407 \times 0.3617=0.1594\text{m}^2$ ,  $R_1(x)=0.72\text{m}$  και  $R_1(y)=0.71\text{m}$  και το συνολικό του βάρος ανέρχεται σε  $0.2598\text{Mgr}$ , ενώ η χαρακτηριστική του συχνότητα κατά  $x$  είναι  $\rho=\sqrt{\frac{3g}{4R}}=3.2\text{r/s}$ . Παρατίθενται ακολούθως η προτομή του σε μορφή excel καθώς και η υπό προσομοίωση σαν κύβο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.



Εικόνα 9 : Προτομή και Κέντρο Βάρους αγάλματος Fanciulla

## 2.2 Μετρήσεις κίνησης σε παλμούς στα πρότυπα αγάλματα

### 2.2.1 Εισαγωγή και επεξήγηση ημιτονοειδούς κίνησης

Αρχικά θα θέσουμε τα ζητήματα που κυρίως μας αφορούν και επεξηγούνται παρακάτω. Η επεξήγηση της ανατροπής ενός άκαμπτου σώματος που αναφέρθηκε και τώστο Πρώτο Κεφάλαιο πρέπει να τονίσουμε ότι γίνεται μέσω της επίλυσης της υπερβατικής εξίσωσης όπως προτάθηκε από τους Zaggis and Roussos το 2001. Πιο συγκεκριμένα έχουμε τα εξής :

- Για αγάλματα με μικρή ραδιότητα η μή γραμμική σχέση μέσω μεθηματικών επαλληλιών είναι :

$$\ddot{\theta} - p^2 \theta + p^2 a \operatorname{sgn}(\theta) = -p^2 \frac{u g}{g} \quad (16)$$

Για ημιτονοειδή παλμό θα είναι

Όπου  $a_g$  και  $\omega$  είναι η επιτάχυνση εδάφους και η γωνιακή ταχύτητα του παλμού αντίστοιχα. Η στιγμή που λήγει η διέγερση είναι  $T_{exc} = \frac{(2\pi i - \psi)}{\omega}$  και  $\psi$  είναι η φάση που αρχίζει να υφίσταται λικνισμό το άγαλμα. Αξίζει να σημειωθεί και για τα επόμενα αποτελέσματα πως η γωνία στροφής ορίζει το  $t=0$  ως την αρχή της εκκίνησης και όχι του παλμού.

### 2.2.2 Αποτελέσματα μετρήσεων στο Matlab

#### 2.2.2.1 Εισαγωγή και χρησιμότητα της newmark

Στην παρούσα εργασία εξετάσαμε την χρησιμότητα δύο συναρτήσεων επίλυσης της κίνησης Wittich. Η μία ήταν τύπου solver και λειτουργούσε εύχρηστα από τον εκπονητή και η δεύτερη ήταν καινούργια συνάρτηση – στην πραγματικότητα η μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης newmark όπου τώρα όμως έχει ως μοναδικό βαθμό ελευθερίας την στροφή( $\Theta$ ) περί το  $O$  η  $O'$ . Σκοπός την ανάλυσης με την newmark είναι η δυναμική μετατόπιση  $\theta(t)$  να προσδιοριστεί με απ' ευθείας αριθμητική ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης

$$M \ddot{\theta}(t) + c \dot{\theta}(t) + k \theta(t) = p(t) \quad (17)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο Newmark, οι μετακινήσεις και οι ταχύτητες σε ένα χρονικό βήμα προέρχονται από ολοκλήρωση της αντίστοιχης συνάρτησης επιτάχυνσης, αφού θεωρηθεί κάποια συγκεκριμένη μεταβολή της επιτάχυνσης μέσα στο βήμα.

$$\dot{\theta}(i + 1) = \dot{\theta}_i + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{\theta}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{\theta}_{i+1} \quad (18)$$

Οι παράμετροι  $\beta$  και  $\gamma$  είναι συντελεστές βάρους, που περιγράφουν τη μεταβολή της επιτάχυνσης μέσα στο βήμα.

– Για  $\gamma=1/2$  και  $\beta=1/4$ , η μέθοδος βασίζεται στην παραδοχή σταθερής επιτάχυνσης και ίσης με το μέσο όρο της αρχικής και τελικής τιμής.

– Για  $\gamma=1/2$  και  $\beta=1/6$ , η μέθοδος βασίζεται στην παραδοχή γραμμικά μεταβαλλόμενης επιτάχυνσης.

Τα σφάλματα που εμφανίζονται κατά την αριθμητική ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες:

- Σφάλμα στρογγυλοποίησης που οφείλεται σε επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς συνεπεία μικρού βήματος ολοκλήρωσης.

-Σφάλμα αποκοπής κατά την προσέγγιση των και με πεπερασμένο αριθμό όρων του αναπτύγματός τους σε σειρά Taylor.

-Σφάλμα που εισάγεται από την αντικατάσταση της διαφορικής εξίσωσης με εξίσωση διαφορών.

Τα σφάλματα αποκοπής συσσωρεύονται τοπικά σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης. Το μέγεθος των σφαλμάτων αυτών δίνει μια καλή ένδειξη της ακρίβειας της μεθόδου, αρκεί η μέθοδος ολοκλήρωσης να είναι ευσταθής. Για να μελετήσουμε την ευστάθεια της αριθμητικής μεθόδου πρέπει να γνωρίζουμε την επιρροή του σφάλματος που εισάγεται σε ένα βήμα, στο αμέσως επόμενο του. Εάν το σφάλμα τείνει να αυξάνει, τότε λέμε ότι η μέθοδος είναι ασταθής. Αυτό το πρόβλημα εξετάζεται στην επίλυση της newmark στο παρόν θέμα της εξέτασης του λικνισμού των άκαμπτων σωμάτων .Η Newmark συνοψίζεται ως εξής :

Αρχικοί υπολογισμοί:

1.1 Προσδιορισμός  $\mathbf{F}_{s,0}$  και  $\mathbf{K}_{T,0}$

1.2  $\hat{\mathbf{u}}_0 = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{P}_0 - \mathbf{C}\hat{\mathbf{u}}_0 - \mathbf{K}\mathbf{u}_0)$

1.3  $\mathbf{A}_1 = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{C} + \frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{M},$   $\mathbf{A}_2 = \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)\mathbf{C} + \frac{1}{\beta\Delta t}\mathbf{M}$  και  
 $\mathbf{A}_3 = \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\mathbf{C} + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\mathbf{M}$

Για κάθε χρονικό βήμα  $i$ :

2.1 Για  $j = 1, \mathbf{u}_{i+1}^{(j)} = \mathbf{u}_i, \mathbf{F}_{s,i+1}^{(j)} = \mathbf{F}_{s,i}, \mathbf{K}_{T,i+1}^{(j)} = \mathbf{K}_{T,i}$

2.2  $\hat{\mathbf{P}}_{i+1} = \mathbf{P}_{i+1} + \mathbf{A}_1\mathbf{u}_i + \mathbf{A}_2\dot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{A}_3\ddot{\mathbf{u}}_i$

Για κάθε επανάληψη  $j$ :

3.1  $\hat{\mathbf{R}}_{i+1}^{(j)} = \hat{\mathbf{P}}_{i+1} - \mathbf{F}_{s,i+1}^{(j)} - \mathbf{A}_1\mathbf{u}_{i+1}^{(j)}$

3.2 Έλεγχος σύγκλισης. Εάν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης, πηγαίνει στο βήμα 4.

3.3  $\hat{\mathbf{K}}_{T,i+1}^{(j)} = \mathbf{K}_{T,i+1}^{(j)} + \mathbf{A}_1$

3.4  $\Delta\mathbf{u}^{(j)} = \text{inv}\hat{\mathbf{K}}_{T,i+1}^{(j)}\hat{\mathbf{R}}_{i+1}^{(j)}$

3.5  $\mathbf{u}_{i+1}^{(j+1)} = \mathbf{u}_{i+1}^{(j)} + \Delta\mathbf{u}^{(j)}$

3.6 Προσδιορισμός  $\mathbf{F}_{s,i+1}^{(j+1)}$  και  $\mathbf{K}_{T,i+1}^{(j+1)}$

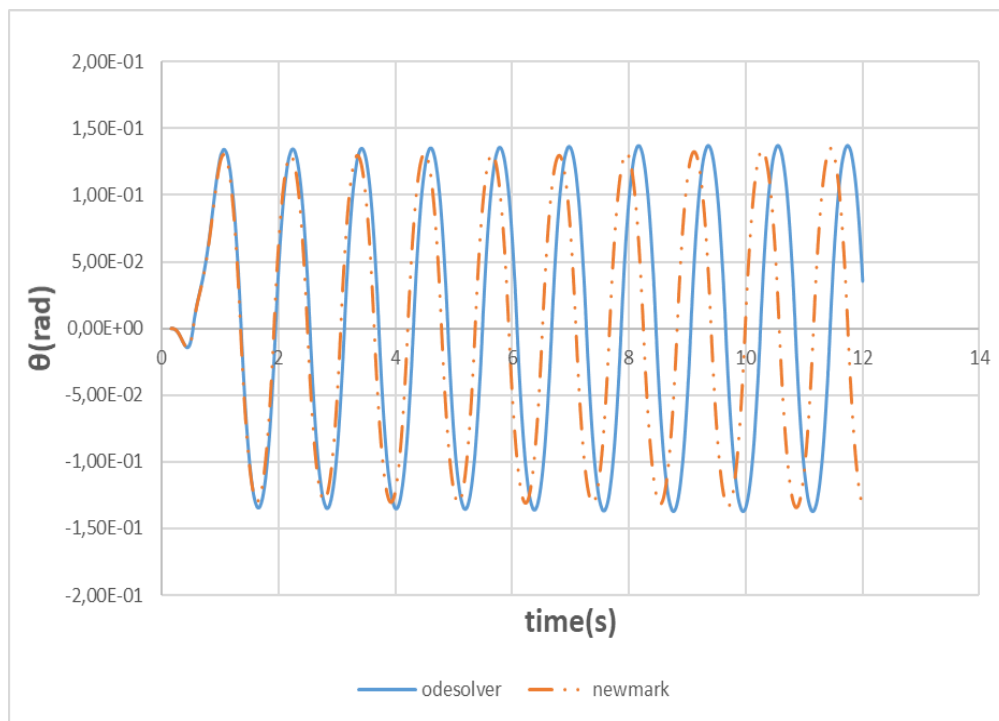
Εικόνα 10: Μέθοδος newmark για λικνισμό σωμάτων

### 2.2.3 Απόκριση αγαλμάτων σε κυκλικές ημιτονικές διεγέρσεις

Χρησιμοποιώντας την προγραμματιστική γλώσσα Matlab (Matrix Laboratory), έκδοση R2016a δημιουργήθηκε ένας κώδικας τύπου ode solver , ο οποίος είναι σε θέση να εξάγει αποτελέσματα σχετικά με την απόκριση σωμάτων -χρησιμοποιώντας στην πραγματικότητα τις σχέσεις των Wittich-Hoyssner που διέπουν την φιλοσοφία του λικνισμού - των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως και τα χαρακτηριστικά του παλμού, εισάγονται από τον χρήστη.Επίσης συγκρίθηκαν όπως φαίνεται στις εικόνες τα αποτελέσματα του Ode solver με αυτά μίας καινούργιας συνάρτησης εν ονόματι main που κάνει την ίδια διαδικασία και αναπαριστάται με πορτοκαλί χρώμα ακολουθώντας την φιλοσοφία της newmark.Ακολουθώς παρατίθενται τα διαγράμματα στροφής – χρόνου για απόκριση του πρώτου μπλόκ σε ημιτονική διέγερση με amplitude=0.6g και 0.62 g αντίστοιχα ,ενώ οι παλμοί τονίζεται ότι έχουν χαρακτηριστική περίοδο  $T_g=1s$ .

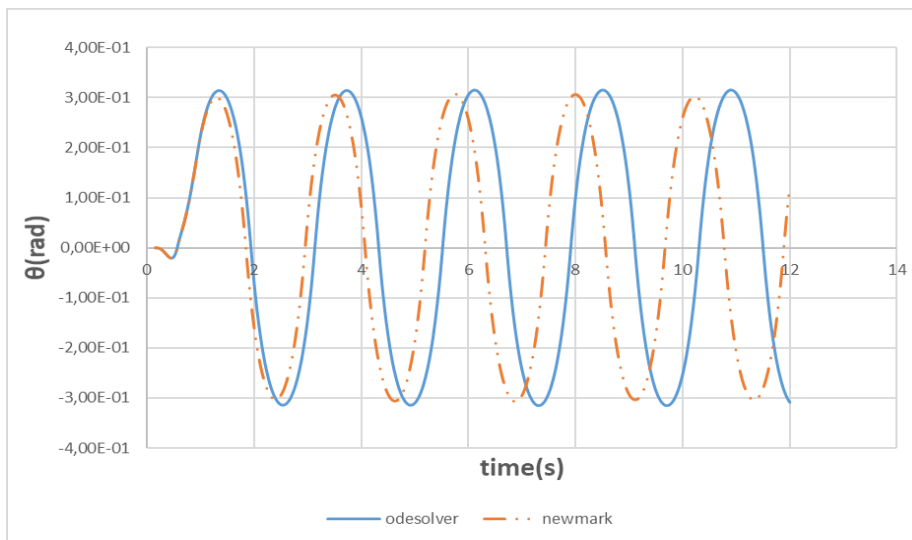
- Παλμός 0.6g με  $\max\theta=0.1372$  rad





Εικόνα 11: Ημιτονικός παλμός 0.6g στο άγαλμα Feminille

- 0.62 g με  $\theta_{max}=0.3154$  rad

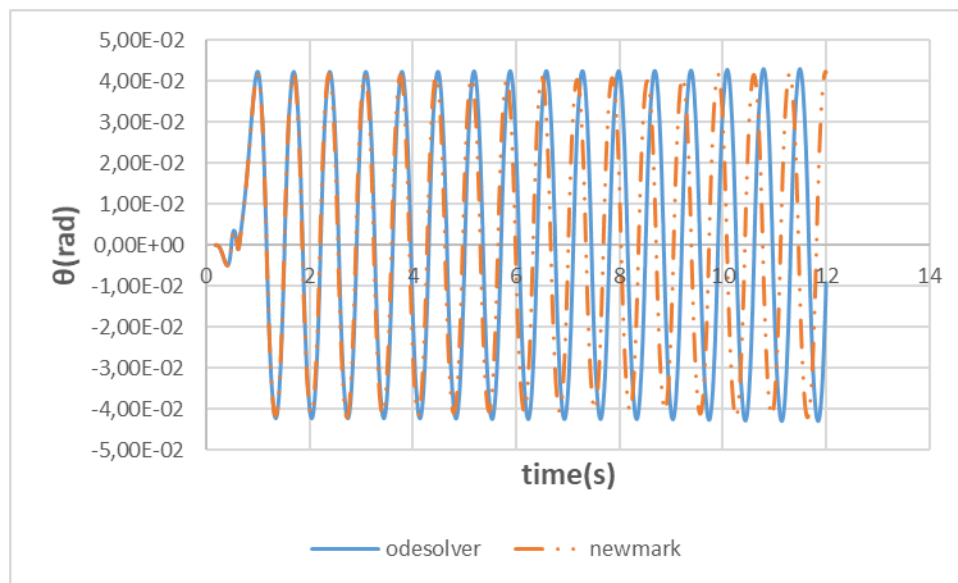


Εικόνα 12: Ημιτονικός παλμός 0.62g στο άγαλμα Feminille

Εξ όσων παρατηρούμε έχουμε μια καλύτερη συγκλίση των αποτελεσμάτων μεταξύ της καινούργιας συνάρτησης και του solver όσο έχουμε αύξηση της επιτάχυνσης του εδάφους ,μιας και σε μεγάλη δόνηση 0.62 g λίγο πριν ενδεχόμενη ανατροπή πετυχαίνεται το ιδανικό αποτέλεσμα.Επίσης αξίζει να τονιστεί ότι θεωρήθηκε πως ο Ode solver αντικρατοπτρίζει καλύτερα την κίνηση του άκαμπτου συμμετρικού σώματος.Τέλος όπως φαίνεται και είναι γνωστό στην περίπτωση του ημιτονικού παλμού, κατά την έναρξη της κίνησης η επιτάχυνση του εδάφους είναι μηδενική κι αυξάνεται σταδιακά.

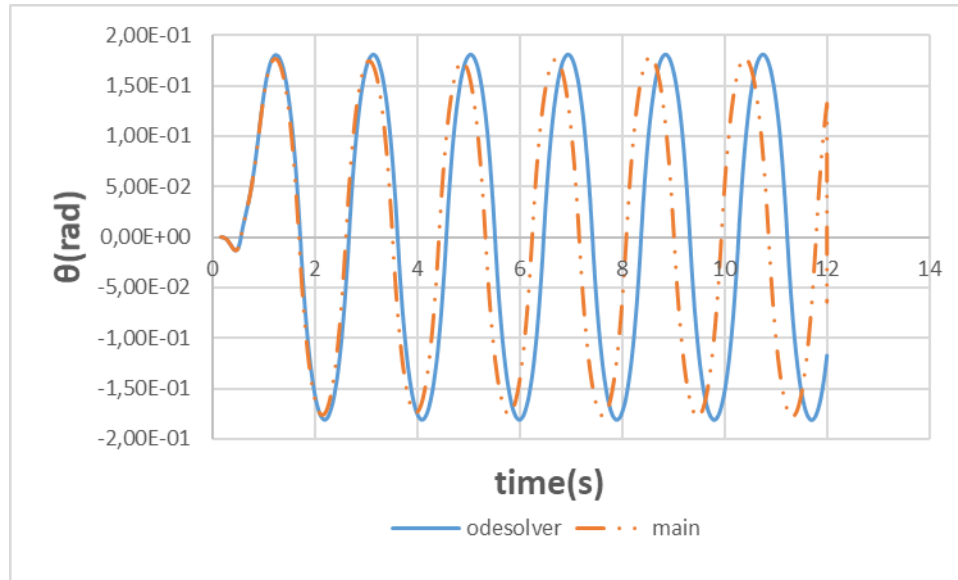
Στο **δεύτερο μπλοκ** που έχει ραδινότητα  $\alpha=0.3108 \text{ rad}$  (κατα  $x$ ) κατανοούμε ότι προκύπτει παρόμοια απόκριση μεταξύ των δύο συναρτήσεων όταν αυτό υποβλήθηκε σε συμμετρικούς ημιτονικούς παλμούς σαν το Female.Πιο συγκεκριμένα θα είναι τώρα

για  $\text{amplitude}=0.36g$   $\text{max}\theta=0.0430 \text{ rad}$  :



Εικόνα 13: Ημιτονικός παλμός 0.36g στο άγαλμα Fanciulla

Ενώ για  $\text{ampl}=0.385g$  και  $\text{max}\theta=0.1810 \text{ rad}$  θα είναι :



Εικόνα 14: Παλμός ημίτονο με  $ap=0.385g$  για το άγαλμα Fanciulla

Αρχικά βλέπουμε δύο εμφανή πράγματα : πρώτον ότι τό άγαλμα Feminille είναι πιο σταθερό λόγω α ( $a_1\text{feminille}=0.4694\text{ rad}$  ενώ  $a_1\text{fanciulla}=0.3108\text{ rad}$ ) καθώς και δεύτερον ότι δέχεται πολύ μικρότερες επιταχύνσεις και αρχίζει γρηγορότερα τον λικνισμό αφού εμφανίζει μεγάλες γωνίες για μικρότερα amplitudes.

### Παλμοί Ricker

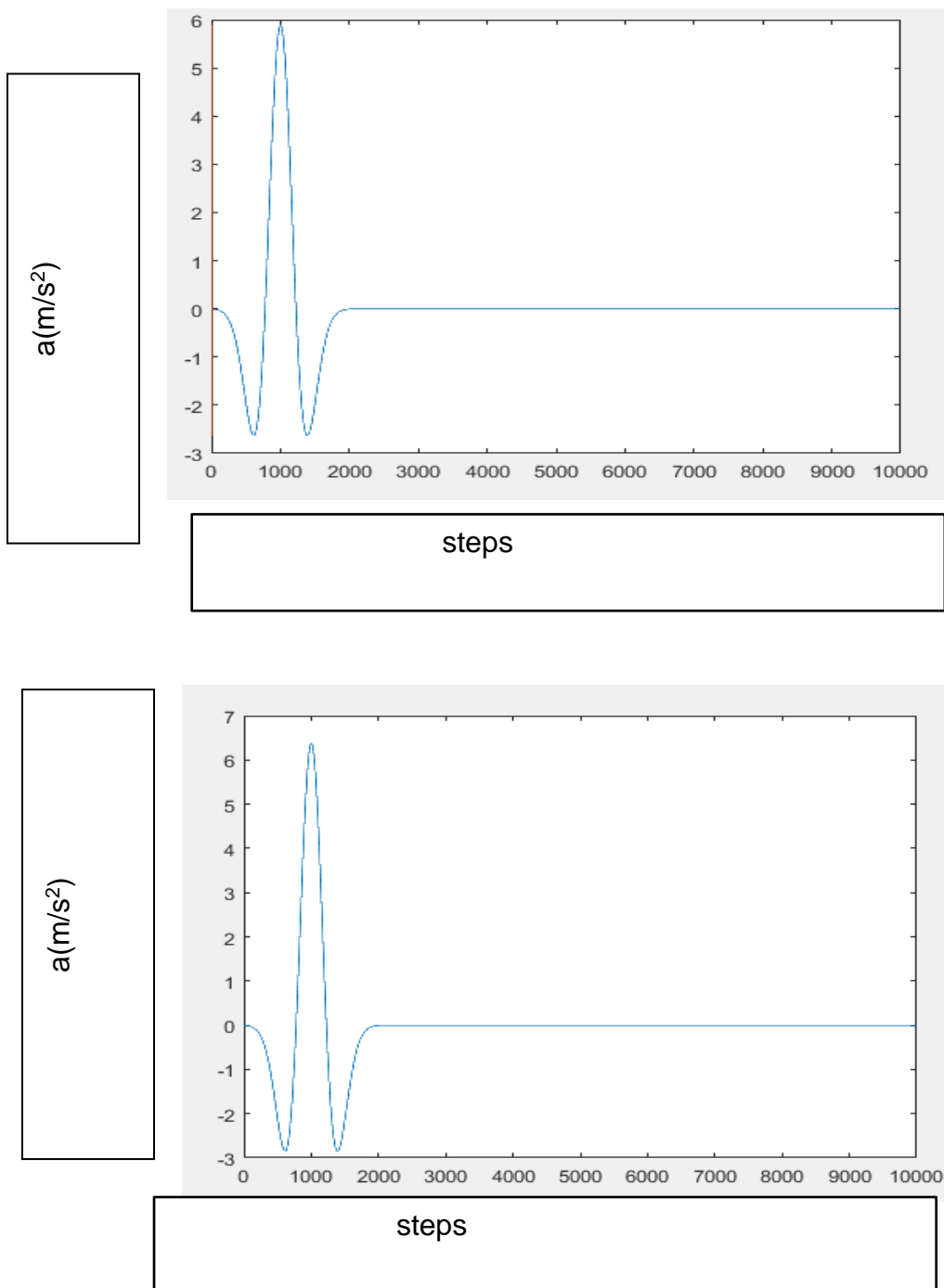
Ακόμα ,εξετάσαμε την περίπτωση διεγέρσεως της βάσης από **παλμούς Ricker**.Γενικά παλμός Ricker είναι μια κλιμακωτή έκφραση της δεύτερης παραγώγου της κατανομής του Gauss:  $e^{-\frac{t^2}{2}}$  και τελική εξίσωση κίνησης:

$$\ddot{u}_g(t)=ap\left(1-\frac{2\pi^2t^2}{T_p^2}\right)e^{-\frac{2\pi^2t^2}{2T}} \quad (18)$$

Στην ανωτέρα σχέση η τιμή  $T_p=2\pi/\omega$  είναι η περίοδος που μεγιστοποιεί το φάσμα του Fourier στον παλμό Ricker.Ενδεικτικά έχουμε τις ακόλουθες χρονοιστορίες παλμών Ricker στα δύο αγάλματα με τις επιταχύνσεις και τις ιδιοπεριόδους να αναγράφονται κάτω από κάθε εικόνα χωριστά.

#### Χρονοιστορίες δύο μορφών παλμών Ricker

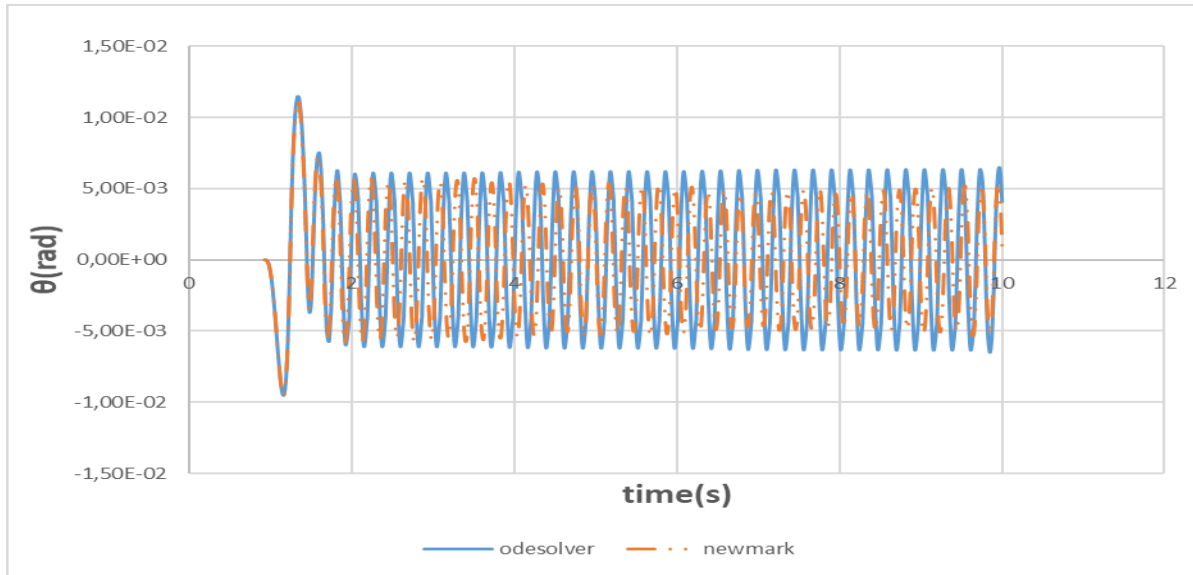
A) στο άγαλμα Feminille για επιταχύνσεις 0.6g και 0.65g αντίστοιχα με συχνότητα παλμού  $f=1\text{Hz}$  όπου το rocking αρχίζει στα 0.87s εξίσου.



Εικόνα 15: Χρονοιστορίες παλμών Ricker για amplitude 0.6-0.65g αντίστοιχα

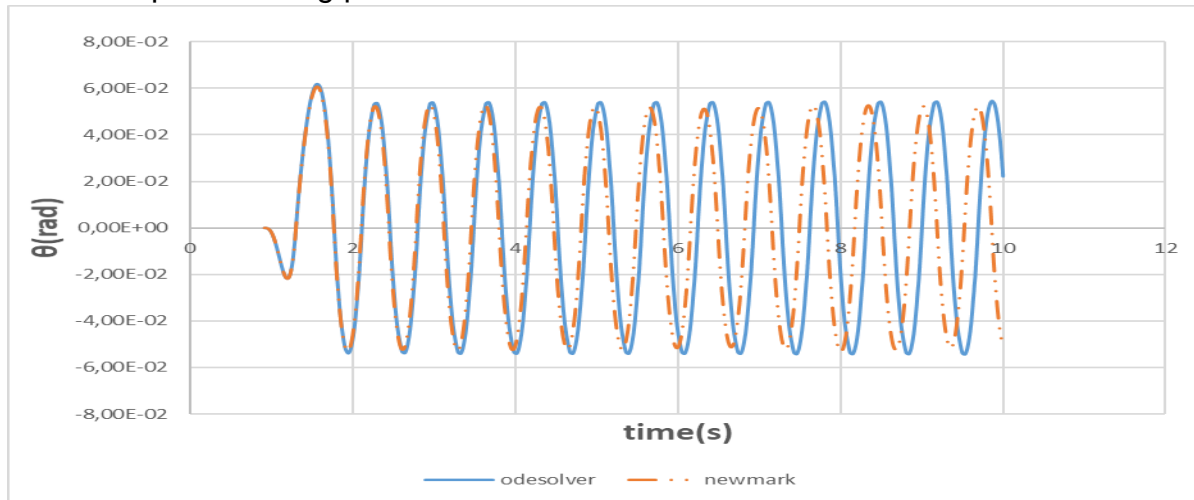
Με τις αντίστοιχες αποκρίσεις όπως αποτυπώνονται σε διάγραμμα  $(\theta-t)$  :

- Amplitude 0.6g όπου και είναι  $\theta_{max}=0.0115\text{rad}$



Εικόνα 16 :Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για παλμούς Ricker 0.6g αντίστοιχα κατά xx στο άγαλμα Feminille

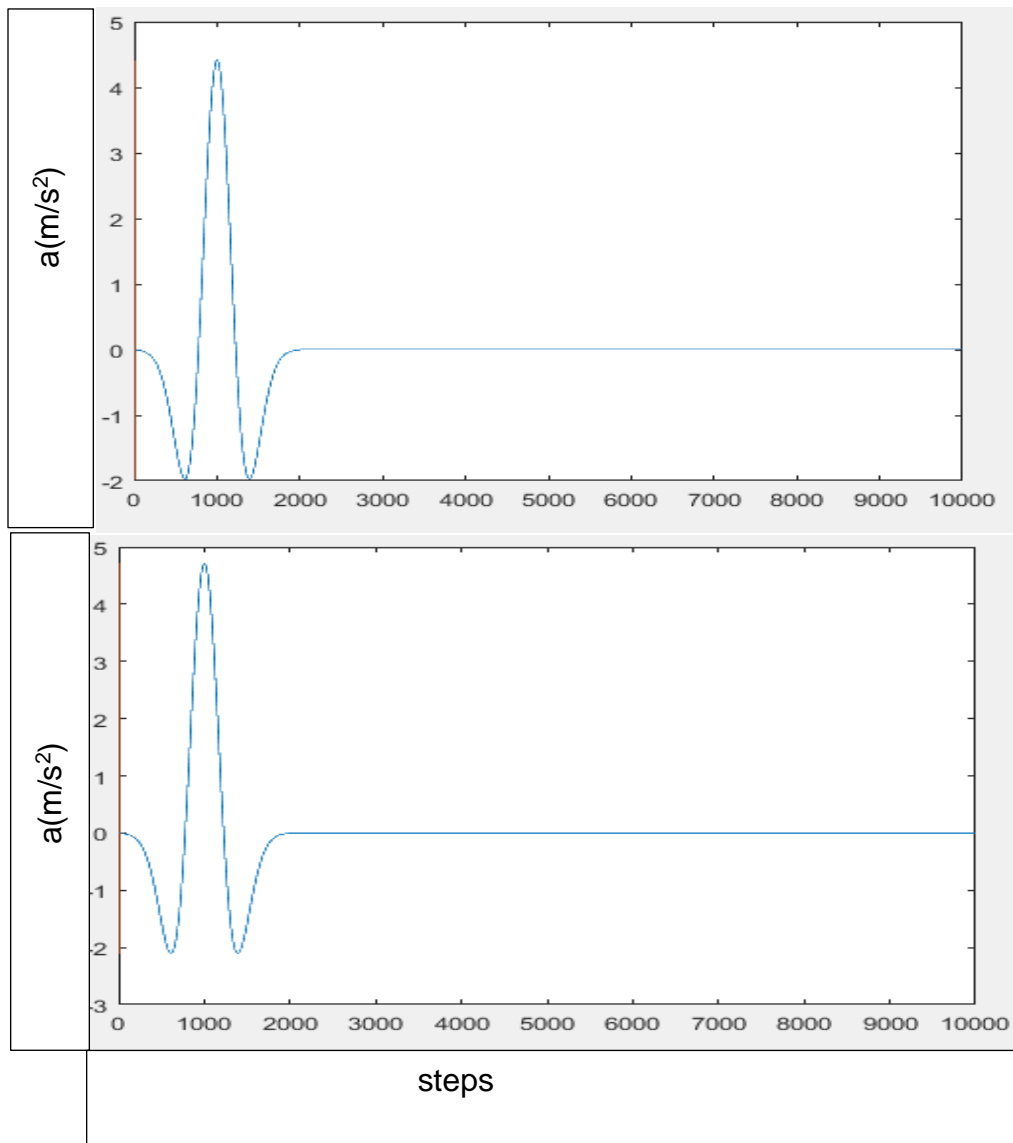
- Amplitude 0.65g με  $\theta_{max}=0.0617\text{ rad}$



Εικόνα 17:Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για παλμούς Ricker 0.65g αντίστοιχα κατά xx στο άγαλμα Feminille

Σε πρώτο επίπεδο τόσο στους παλμούς ημιτόνου όσο και στους παλμούς Ricker παρατηρούμε ταύτιση των δύο αναλυτικών επιλύσεων ειδικά στην αρχή της ταλάντωσης όμως προς το τέλος παρατηρείται το φαινόμενο της αραίωσης(δηλαδή η Newark τρέχει τις εξισώσεις κίνησης με μικρότερη ταχύτητα)για αυτό και δεν είναι χρήσιμη στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον λικνισμό ειδικά των ασύμμετρων δοκιμίων.

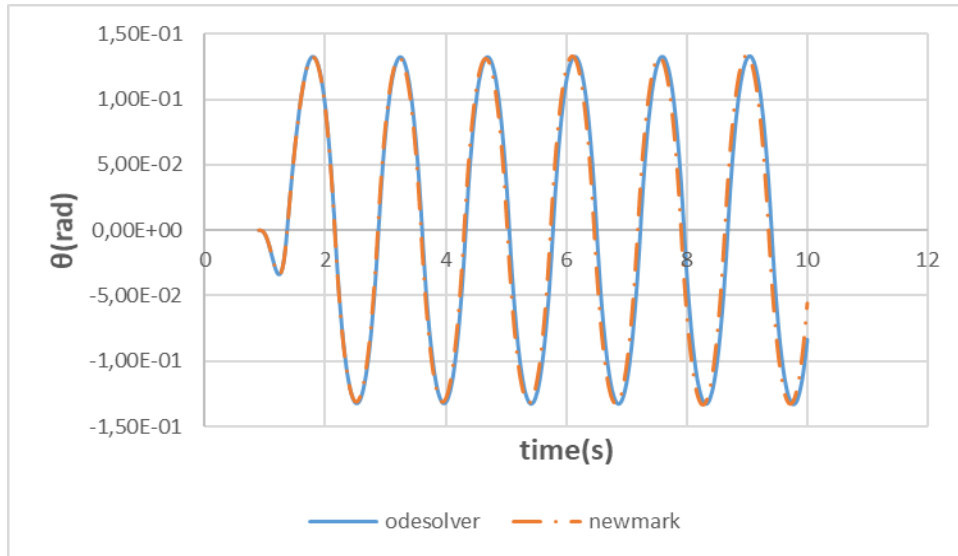
B) στο άγαλμα *Fanciulla* για επιταχύνσεις εδάφους 0.45g και 0.48g αντίστοιχα με συχνότητες πάλι 1Hz καθώς και με επιτάχυνση σε 0.6g για σύγκριση των δύο μορφών αγαλμάτων.



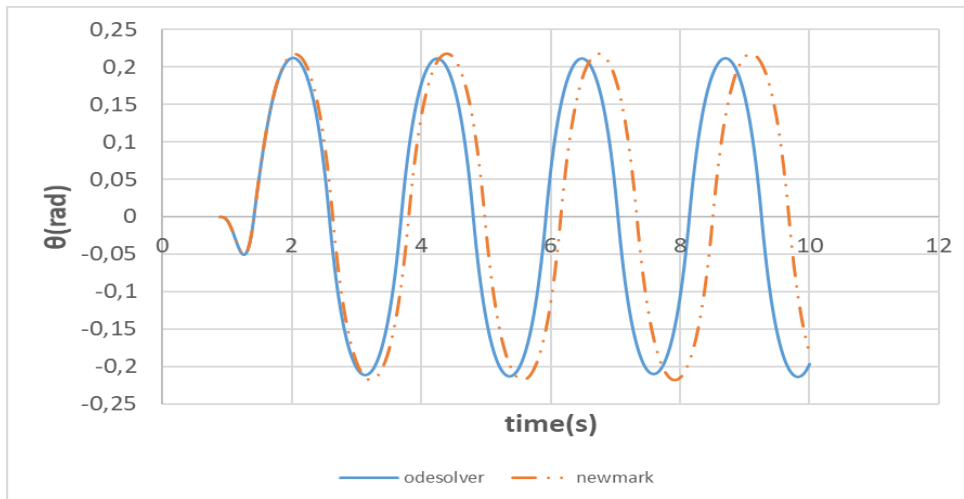
Εικόνα14 : Χρονοιστροία παλμών Ricker για το άγαλμα *Fanciulla*

Με τα εξής αποτελέσματα σε επίπεδο γωνίας -χρόνου:

- 1<sup>ος</sup> παλμός με amplitude 0.45g και  $\theta_{max}=0.1332\text{rad}$
- 2<sup>ος</sup> παλμός με amplitude 0.48g και  $\theta_{max}=0.2178\text{rad}$

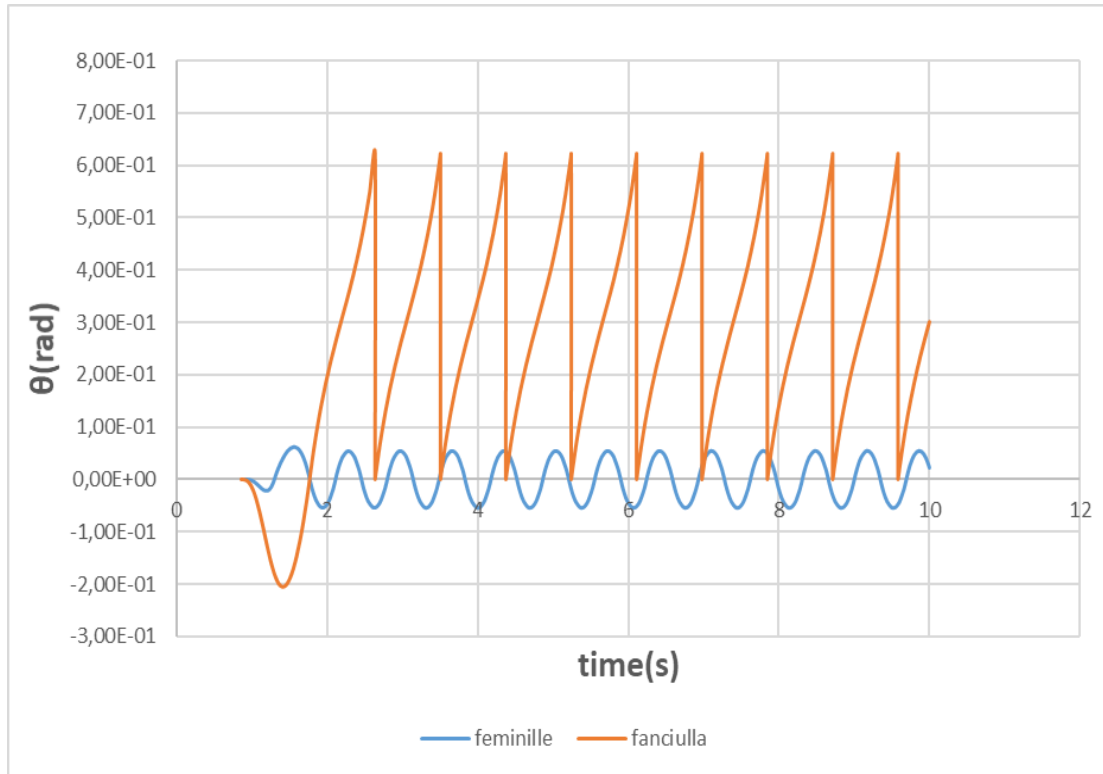


Εικόνα 18: Διαγράμματα γωνίας στροφής χρόνου για παλμό Ricker 0.45 g ασκούμενοι στο άγαλμα Fanciulla



Εικόνα 19: Διαγράμματα γωνίας στροφής χρόνου για παλμό Ricker 0.48 g ασκούμενοι στο άγαλμα Fanciulla

- Amplitude 0.65g και πτώση στα  $\theta_{max}=0.3730\text{ rad}$



Εικόνα 20: Σύγκριση απόκρισης στα συμμετρικά αγάλματα Fanciulla και Feminille

Ως παρατήρηση έχουμε ότι το δεύτερο άγαλμα ανατρέπεται στην ίδια επιτάχυνση εδάφους γεγονός ευκολότερα που φαίνεται και στα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν ανωτέρω. Αυτό μπορεί να αποδίδεται σε δύο λόγους:

- Επιρροή της ραδινότητας  $\alpha$

Θεωρώντας το μέγεθος  $\lambda = h/b$ , παρατηρούμε πως τα λυγηρά σώματα (δηλαδή αυτά που έχουν μικρότερη γωνία  $\alpha$ ) είναι πιθανότερο να ανατραπούν, καθώς τίθενται σε λικνισμό για μικρότερες τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης PGA. Επιπλέον, τα λυγηρότερα σώματα ανατρέπονται για σημαντικά μικρότερες γωνίες περιστροφής  $\theta$  σε σχέση με τα στιβαρότερα. Αυτό σημαίνει πως είναι πιο ευάλωτα σε εδαφικές κινήσεις μικρής περιόδου. Έτσι εξηγείται ότι το δεύτερο άγαλμα με  $\alpha_2 < \alpha_1$  είναι πιθανότερο να ανατραπεί.

- Επιρροή του μεγέθους R

Θεωρώντας σώμα ορθογωνικού σχήματος (δηλαδή  $I_o = 4/3 m R^2$ ) και παραποιώντας την εξίσωση κίνησης (1) θα έχουμε :



$$\frac{4}{3}R^2\ddot{\theta}(t)+g R \sin(a \operatorname{sgn}\theta(t)-\theta(t))=\ddot{u}_g(t) R \cos(a \operatorname{sgn}\theta(t)-\theta(t)) \quad (16)$$

Από την παραπάνω εξίσωση συμπεραίνουμε πως όταν ένα ελευθέρως εδραζόμενο λυγηρό σώμα έχει τεθεί σε λικνισμό, η σεισμική απαίτηση (σεισμική ροπή ανατροπής) είναι ανάλογη του μεγέθους R, ενώ η σεισμική αντοχή (αντίσταση στο λικνισμό) είναι ανάλογη του μεγέθους R<sup>2</sup>. Έτσι εύλογα αποδεικνύεται πως ανεξαρτήτως της λυγηρότητας ενός σώματος ή της έντασης της εδαφικής επιτάχυνσης  $\ddot{u}_g$  (δηλαδή μεγάλη σεισμική απαίτηση), όταν για πεπερασμένη τιμή του  $\theta(t)$  το λικνιζόμενο σώμα είναι αρκετά μεγάλο, η τετραγωνική δύναμη του μεγέθους R μπορεί πάντα να εξασφαλίσει τη σταθερότητα του σώματος, εφόσον αυξάνει σημαντικά την σεισμική του αντοχή. Αυτό το φαινόμενο του μεγέθους-συχνότητας είναι απλά μία υπενθύμιση της αρχής ότι ένας όρος υψωμένος στο τετράγωνο κυριαρχεί έναντι του ίδιου όρου υψωμένου στην πρώτη δύναμη, ανεξάρτητα από τις τιμές των άλλων συντελεστών.

Αυτός ο συλλογισμός απορρέει και από την πρόταση του Houssner, ότι δηλαδή η σταθερότητα ενός λικνιζόμενου σώματος μπορεί να υπολογιστεί συγκρίνοντας την εισαγόμενη ενέργεια με την ενέργεια που απαιτείται για να ανατραπεί το σώμα. Αν η εισαγόμενη ενέργεια υπολογίζεται από το φάσμα ταχύτητας απόκρισης,  $S_v$ , της σεισμικής εδαφικής κίνησης, τότε η εξίσωση που ικανοποιεί την απαίτηση για να έχουμε ανατροπή είναι:

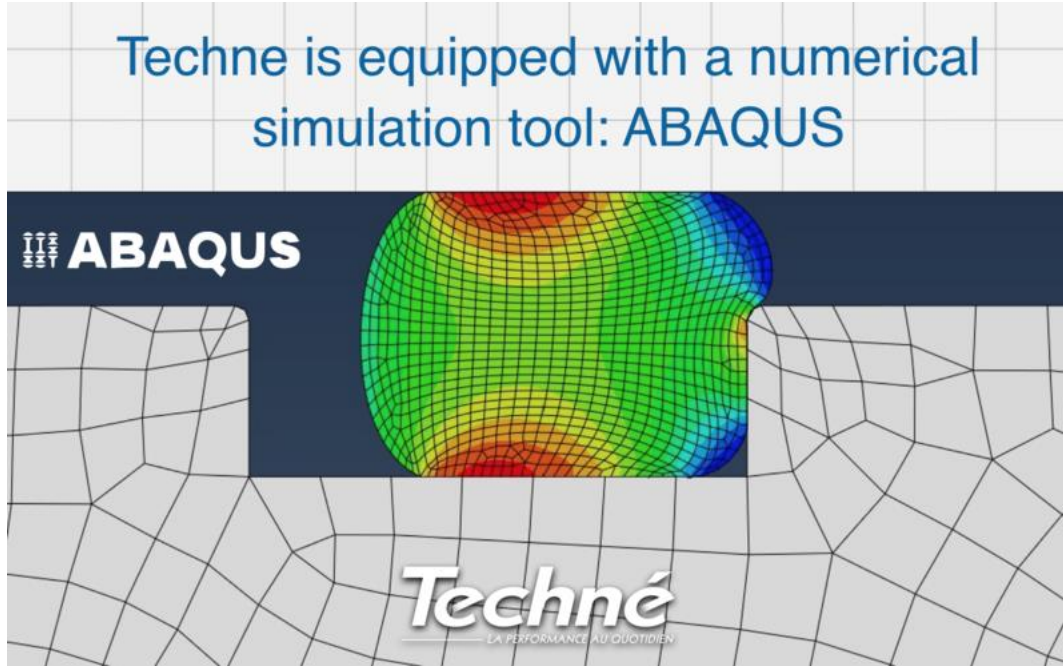
$$a = \frac{S_v}{\sqrt{gR}} \quad (17)$$

Αυτή η εξίσωση δηλώνει πως για δεδομένη φασματική τιμή  $S_v$ , ένα σώμα ραδινότητας  $\alpha$ , η οποία υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης (3), έχει 50% πιθανότητα να ανατραπεί. Άρα, από δύο σώματα ίδιων αναλογιών, το σώμα με το μεγαλύτερο μέγεθος είναι σταθερότερο σε σχέση με αυτό που έχει μικρότερο μέγεθος. Στο εν λόγω παράδειγμα έχουμε πως  $R(\text{Feminille})=0.8279\text{m}$  ενώ  $R(\text{Fanciulla})=0.7205\text{m}$ . Επομένως τόσο όγω ραδινότητας όσο και λόγω του R το Feminille αναδεικνύεται σταθερότερο άγαλμα κατά  $\chi\chi$ . Ο συντελεστής αποκατάστασης δεν διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο αφού είτε τόν είχαμε τοποθετήσει σύμφωνα με την εξίσωση Houssner 0.94 είτε 1 είχαμε τα ίδια αποτελέσματα.

## 2.3 Σεισμική ανάλυση σε επίπεδο Matlab και Abaqus

### 2.3.1 Εισαγωγή στο Abaqus και χρησιμότητά του στο εν λόγω θέμα

Είναι αξιόλογη η χρησιμότητα των προγραμμάτων επίλυσης υπολογιστών εξισώσεων τρίτου η και νιοστού βαθμού( αναλόγως των βαθμών ελευθερίας των σωμάτων) που διέπουν την κίνηση άκαμπτων σωμάτων σε πρακτικώς άκαμπτη βάση μιας και εξαλείφεται η αβεβαιότητα της απόσβέσεως όταν εισάγεται στα λογισμικά τύπου πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 21-Abaqus

Το Abaqus είναι ένα σύνολο ισχυρών προγραμμάτων προσομοίωσης για μηχανικούς, που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη δυνατότητα να λύσει προβλήματα που κυμαίνονται από σχετικά απλές γραμμικές αναλύσεις έως τις πιο δύσκολες μη γραμμικές προσομοιώσεις. Ακόμη περιέχει μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη στοιχείων που μπορούν να μοντελοποιήσουν σχεδόν οποιαδήποτε γεωμετρία. Έχει έναν εξίσου εκτεταμένο κατάλογο υλικών μοντέλων που μπορούν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά των πιο κλασσικών μηχανικών υλικών όπως μέταλλα, καουτσούκ, πολυμερή, σύνθετα υλικά, οπλισμένο σκυρόδεμα και άλλα. Σχεδιασμένο ως γενικό εργαλείο προσομοίωσης, το Abaqus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μελετήσει όχι μόνο απλά δομικά προβλήματα (τάσεων / μετατοπίσεων) αλλά είναι ικανό να προσομοιώσει προβλήματα σε διάφορους τομείς, όπως διάχυση της μάζας, η μεταφορά θερμότητας, η θερμική διαχείριση ηλεκτρικών εξαρτημάτων (συζευγμένες θερμικές ηλεκτρικές αναλύσεις), μηχανική του εδάφους, πιεζοηλεκτρική ανάλυση, ηλεκτρομαγνητική ανάλυση και δυναμική ρευστού. Το Abaqus προσφέρει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων για την προσομοίωση γραμμικών και μη γραμμικών εφαρμογών όπου επιλέγει αυτόματα τις κατάλληλες αυξήσεις φορτίου και τις ανοχές σύγκλισης και τις προσαρμόζει ανάλογα συνεχώς κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, ώστε να διασφαλίζεται μία αποτελεσματική λύση

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος

υπολογισμού με χρήση H/Y) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η διαδεδομένη χρήση της μεθόδου οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζεται ως ενιαίο εργαλείο για τη στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από τρία στάδια:

1. Το πρώτο στάδιο συνίσταται στην υποδιαίρεση και διάσπαση της κατασκευής σε ένα, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια, μικρότερο ή μεγαλύτερο πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων (elements), τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς να αφήνουν κανένα κενό και συνδέονται με τους κόμβους (nodes) που βρίσκονται στα σύνορα των στοιχείων. Το σύνολο αυτό των στοιχείων ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα (mesh) και η προσομοίωση του φορέα με το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται διακριτοποίηση του φορέα (discretization).

2. Στο δεύτερο βήμα, μετά τη διακριτοποίηση της κατασκευής, θεωρείται κάθε τέτοιο πεπερασμένο στοιχείο ξεχωριστά και για το λόγο αυτό αποσπάζεται από το σύμπλεγμα των στοιχείων που συνθέτουν την κατασκευή.

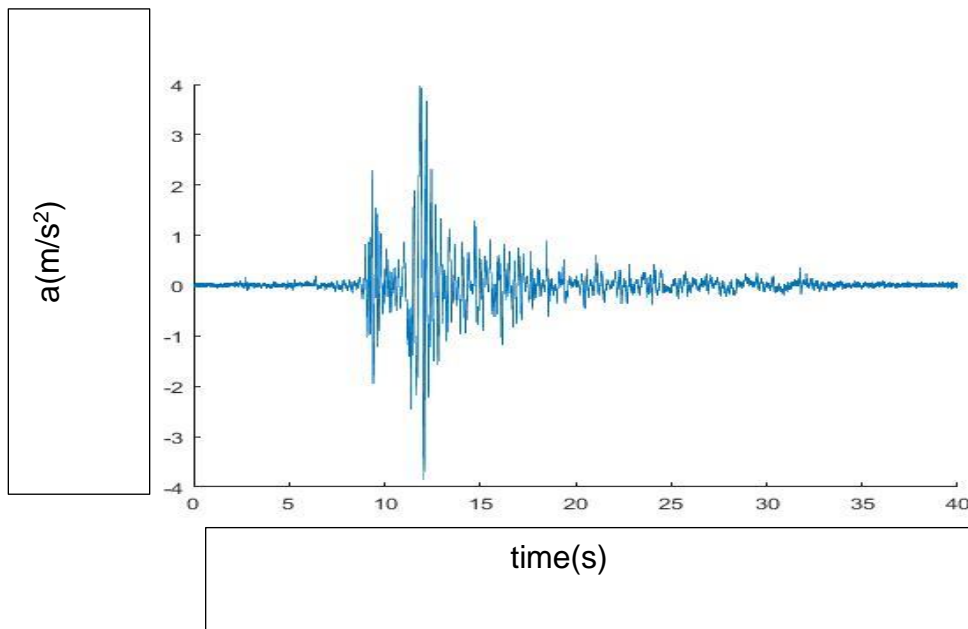
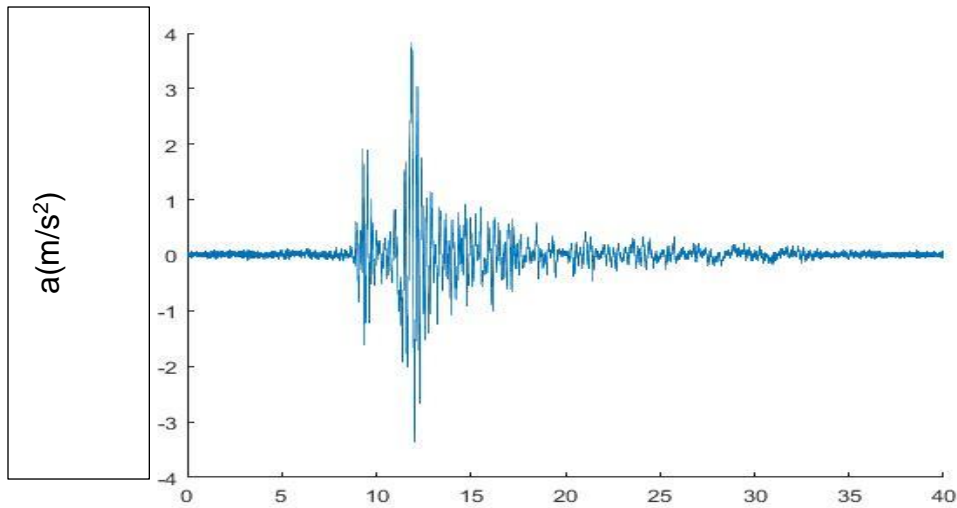
3. Αφού μελετηθεί και καθορισθεί η μηχανική συμπεριφορά κάθε στοιχείου ακολουθεί το τρίτο βήμα της διαδικασίας επίλυσης που είναι η σύνθεση της κατασκευής από τα επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία, η κατάλληλη δηλαδή επανασύνδεση των στοιχείων προς σχηματισμό της διακριτοποιημένης κατασκευής. Η μηχανική συμπεριφορά κάθε στοιχείου καθορίζεται συνήθως από τη σχέση ανάμεσα στις δυνάμεις και τις μετατοπίσεις στους κόμβους του

### 2.3.2 Αποτελέσματα ανάλυσης σεισμών

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της απόκρισης σωμάτων με διαφορετικό μέγεθος και λυγηρότητα ( $\alpha$ ), οι οποίοι υπόκεινται σε πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις στη βάση τους. Σημειώνεται πως για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων της Matlab και του προσομοιώματος στο Abaqus, θεωρήθηκε πως δεν υπάρχει απώλεια ενέργειας, δηλαδή  $\eta = 1$ . Προφανώς, σε κάθε σώμα υπεβλήθησαν διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις –ήτοι στο παράδειγμά μας N0311-313, καθώς η γεωμετρία κάθε σώματος αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τη λικνιστική του απόκριση. Έτσι, υποβαλλόμενο στην ίδια σεισμική διέγερση, ένα ορθογωνικό σώμα μπορεί να λικνιστεί, ενώ ένα άλλο διαφορετικής γεωμετρίας μπορεί να μην ξεκινήσει καθόλου να λικνίζεται.

Αρχικά παραθέτουμε τις χρονοιστορίες 2 σεισμών που υποβλήθησαν τα εν λόγω αγάλματα τόσο στον άξονα  $x$  όσο και στον  $y$  να παρατηρήσουμε αν προκύπτει διαφορά λόγω αλλαγής γεωμετρίας και κατά συνέπεια ( $R$  και  $\alpha$ ) των οποίων η επιρροή υπερτονίστηκε προηγουμένως στην απόκριση σε κυκλοειδείς διεγέρσεις. Ακόμα δίνουμε σε μορφή πινάκων τόσο την μέγιστη επιτάχυνση εδάφους, ταχύτητα καθώς και την χαρακτηριστική περίοδο του κάθε σεισμού ( $T_r$ ). Οι εν λόγω σεισμοί δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα αλλά δόθηκαν από τον καθηγητή για ερευνητικούς λόγους. Στο τέλος του κεφαλαίου 2-3 έχουμε την απόκριση σε πραγματικούς σεισμούς 5 τον αριθμό για πιο ενδιαφέρον οπτική του προβήματος.

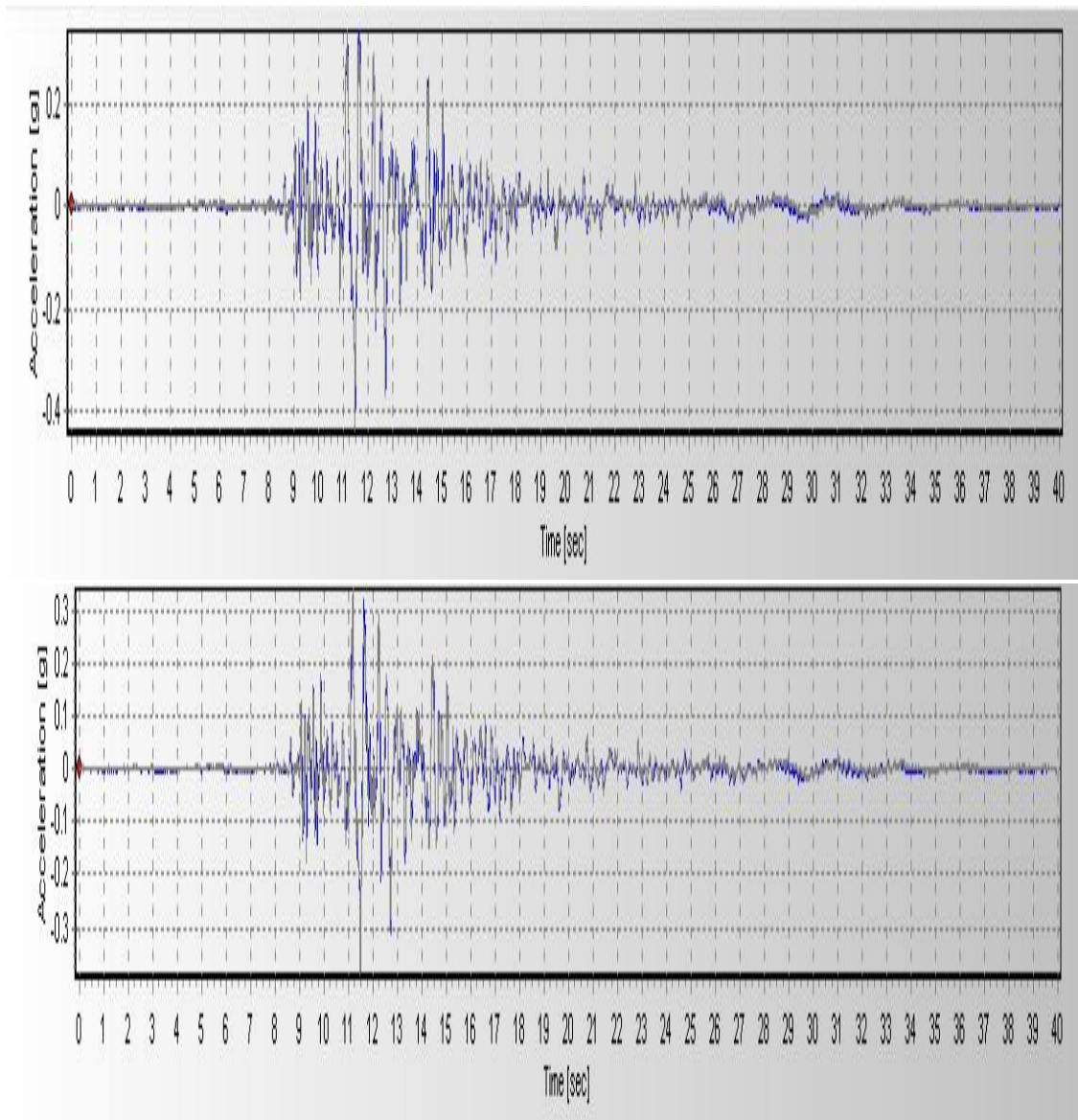
- $x-x$  No 312-313 Χρονοιστορίες



Εικόνα 22: Χρονοιστορίες 312-313

- y-y

**Χρονοιστορία σεισμού Νο316-317** με διόρθωση και φιλτράρισμα στο πρόγραμμα Seismosignal λόγω ακούσιας ταλάντωσης του Abaqus(με μπλε η διορθωμένη απόκριση και γκρί η προυπάρχουσα



Εικόνα 23:Χρονοιστορίες σεισμών 316-317

και σε μια πιο συμπτηγμένη μορφή πίνακα συγκεντρώνουμε όλα τα στοιχεία :

number	max ag	M
No 316	0.3241	2.310679
No 317	0.3813	2.381267
No 312	0.391758	2.393018
No 313	0.405672	2.408175

Εικόνα 24- Πίνακας σεισμών

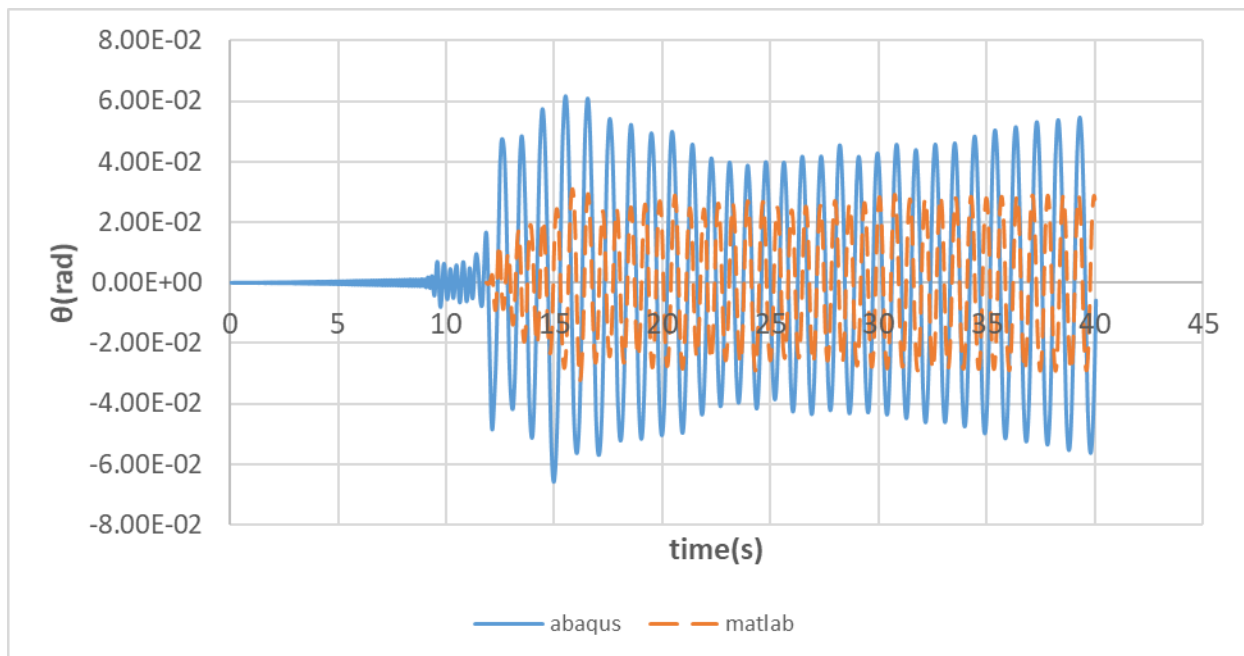
Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $\theta$ -time που προκαλούνται από τους εν λόγω σεισμούς και στα δύο αγάλματα των οποίων τα χαρακτηριστικά προαναφέρθηκαν προηγουμένως. Από το matlab χρησιμοποιήθηκε μόνον η συνάρτηση **odesolver** λόγω αξιοπιστίας, οπότε από εδώ και στο εξής θα θεωρούμε στα διαγράμματα  $\theta$ -t ως **matlab to odesolver**.

• **Feminille**

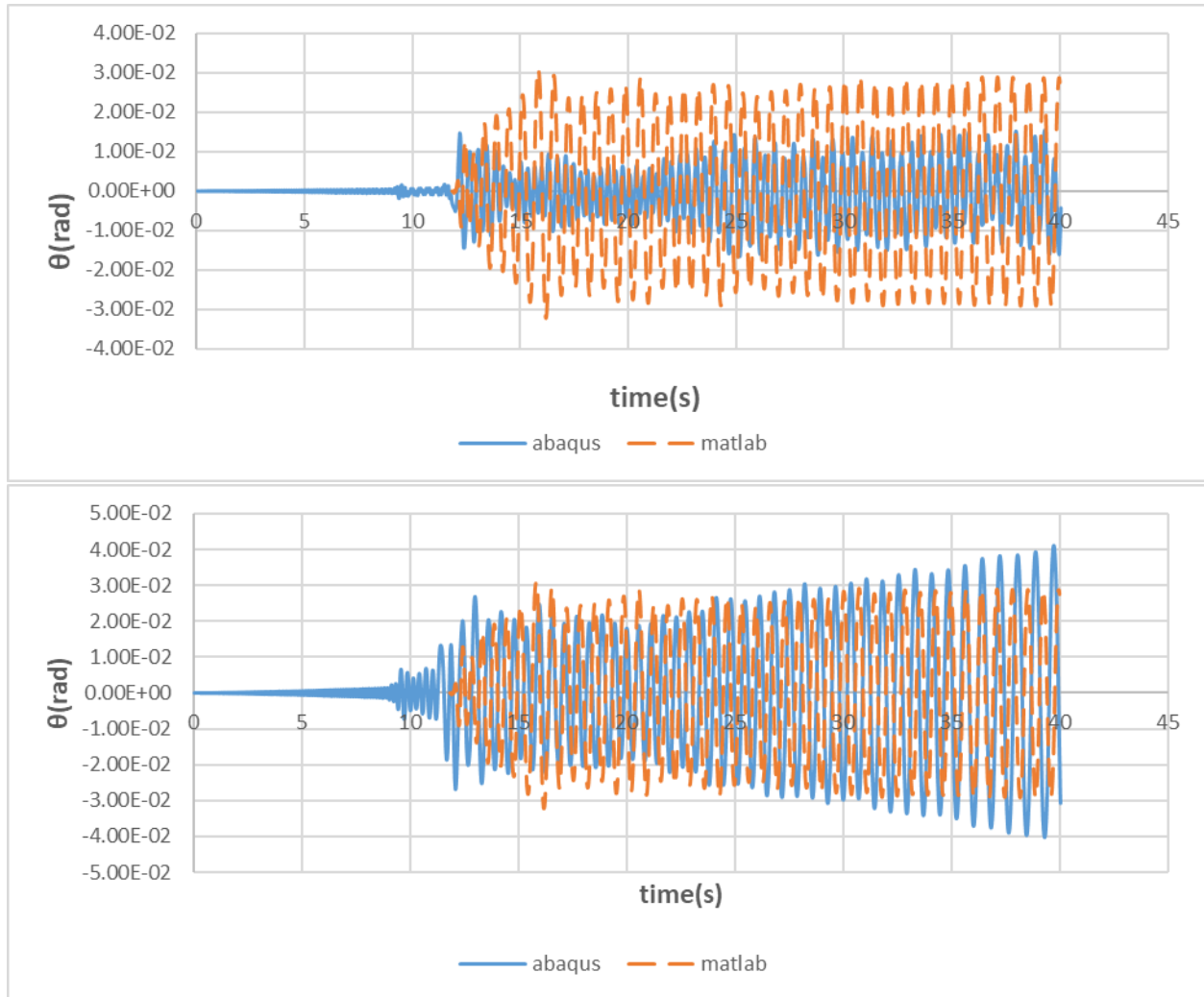
Για λόγους ανάλυσης επειδή δεν έτρεχε αρχικά για τους σεισμούς αυτούς το άγαλμα κατά x λόγω μεγάλης ραδιότητας οι χρονοιστορίες πολλαπλασιάστηκαν με 1.25 για σύγκριση των προγραμμάτων.

Σεισμός No 313

Διάγραμμα σύγκρισης για  $\zeta=5-4-3.7\%$



Εικόνα 25: Διάγραμμα  $\theta$ -χρόνου για το συμμετρικό άγαλμα Feminille υποβαλλόμενο σε σεισμό κατά x-x' για συντελεστή απόσβεσης  $\zeta=5\%$

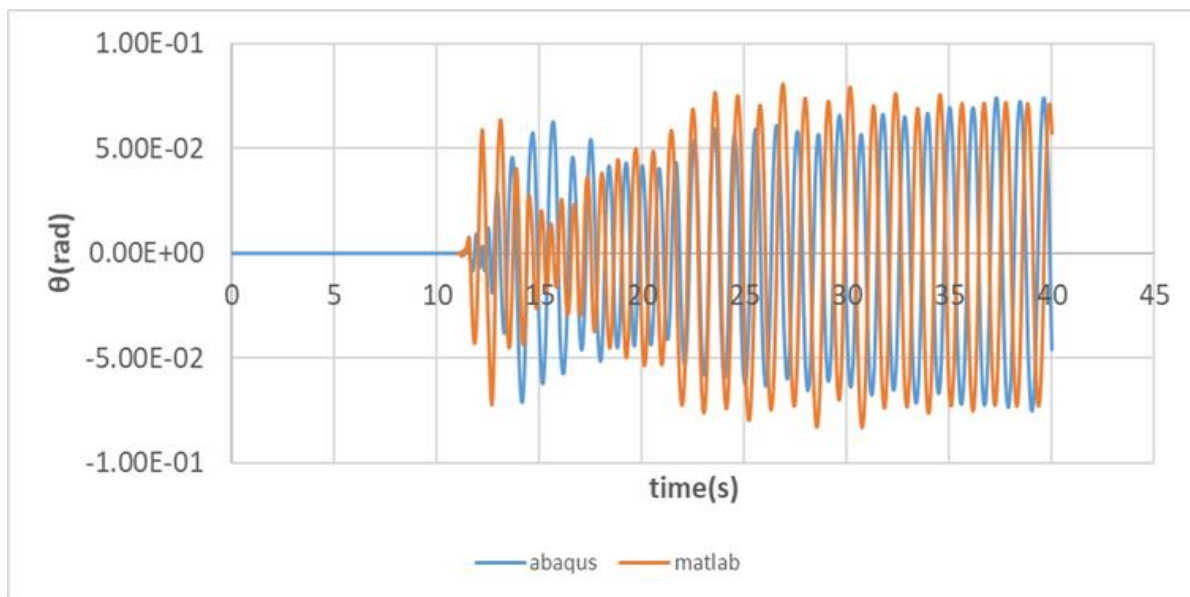
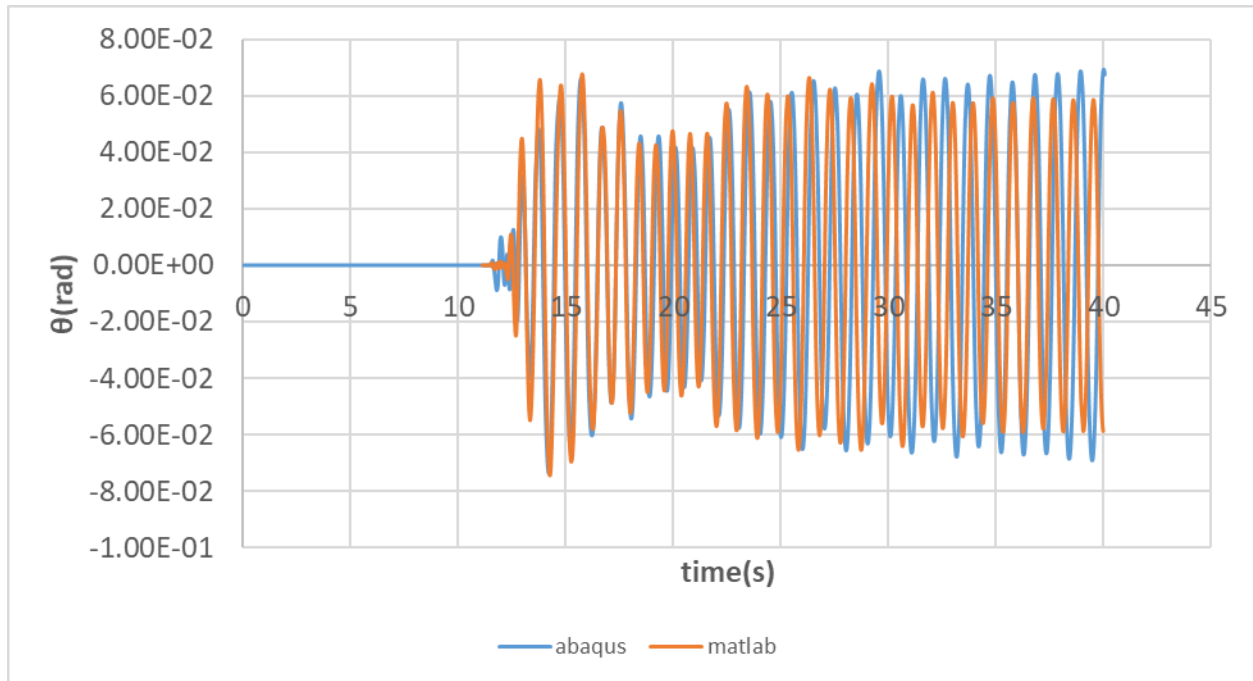


Εικόνα 26 : Διάγραμμα  $\theta$ -χρόνου για το συμμετρικό άγαλμα Feminille υποβαλλόμενο σε σεισμό κατά x-x' για συντελεστές απόσβεσης  $\zeta=4,3.7\%$  αντίστοιχα

Παρατηρούμε μία αρκετά μεγάλη ευαισθησία στον συντελεστή απόσβεσης καθώς όταν μειώνεται έχουμε μεγάλη αύξηση του πλάτους ταλάντωσης ενώ για  $\zeta=5\%$  έχουμε μεγάλα  $\theta$  αλλά και μεγαλύτερες περιόδους ταλαντώσεων .Για αυτό ενδείκνυται καλή συμπεριφορά της λύσης του Abaqus για  $\zeta \rightarrow (3.5:4.2)$ .

Σεισμός No 316- Fanciulla(χωρίς προσαύξηση)

- $\zeta=3.78-3.5\%$

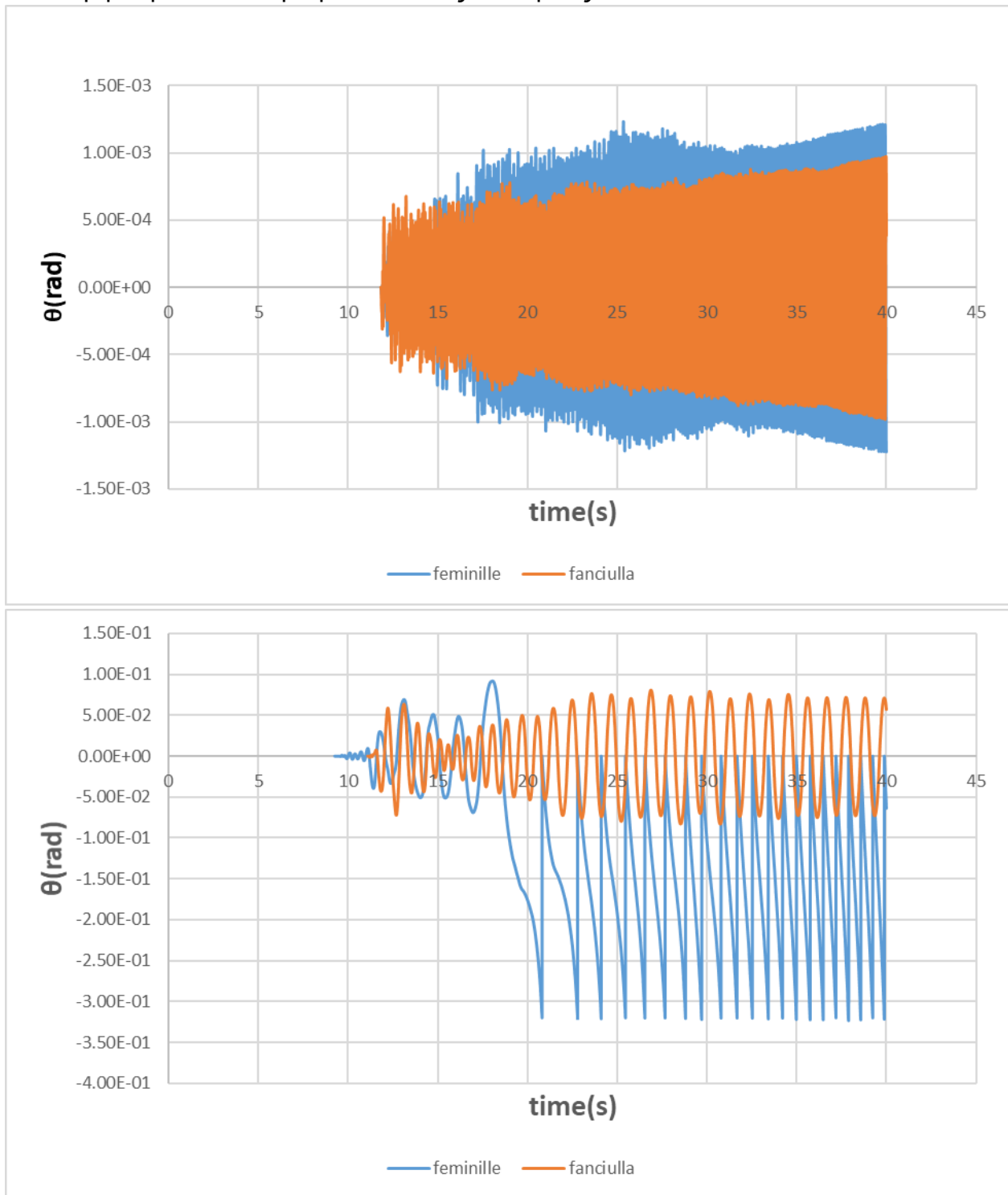


Εικόνα 27: Διαγράμματα  $\theta$ -χρόνος με  $\zeta = 3.78$  και  $3.5\%$  αντίστοιχα για το συμμετρικό άγαλμα Fanciulla σε σεισμό κατά  $yy$

Παρατηρείται μία σχεδόν άριστη απόδοση του προβλήματος από το Abaqus ενώ για  $\zeta = 3.5\%$  δεν έχουμε καλή εικόνα στα αποτελέσματα του στην αρχή από τα 12 μισή μέχρι τα 17 sec γεγονός που αποδίδεται και στον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων.



Και σύγκριση των δύο αγαλμάτων στους σεισμούς No 312 και 317:



Εικόνα 28 : Σύγκριση απόκρισης αγαλμάτων στους σεισμούς No 312 και 317 κατά xx yy αντίστοιχα

## 2.4 Πρώτη εκτίμηση των μετρήσεων σε συμμετρικό επίπεδο

Για αρχή θα εξετάσουμε τις μετρήσεις στους σεισμούς κατα  $x$  που πραγματοποιήθηκαν. Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 26 υπάρχει ανομοιομορφία στην απόκριση του σώματος καθώς μειώνεται το  $\zeta$  ( απόσβεση) στο πρόγραμμα Abaqus .Επίσης στην αρχή όπως φαίνεται στο μπλε χρώμα του Abaqus πρόσδίδεται μια αρχική λανθάνουσα ταλάντωση η οποία για την ασύμμετρη κίνηση διορθώνεται με επιπεδοποίηση και φιλτράρισμα της καταγραφής όπως θα αναφερθεί στο κεφάλαιο 3.Σ

Σε αυτό το σημείο θα επιχειρήσουμε μια πιο ενδελεχή αναφορά στον λικνισμό των συμμετρικών αγαλμάτων . Όπως διακρίνεται στην εικόνα 28 έχουμε παρόμοια συμπεριφορά εκτός από την περιοχή μεγίστων στην αρχή της ταλαντώσεως αλλά και στο τέλος για ίδιο συντελεστή απόσβεσης(θεωρητικά τον τοποθετήσαμε ίσα με 1 για να αποφευχθούν φαινόμενα ολίσθησης).Αυτό αποδίδεται τόσο στην μορφή της απόκρισης (μικρό  $ag$  ) σε κάθε επανάληψη και κατα συνέπεια η αλλαγή στην γεωμετρία δεν επηρέασε τόσο σημαντικά την πορεία των διαγραμμάτων.

Ακόμα σύμφωνα και με τον Houssner θα πρέπει να συγκρίνουμε τις ενεργειακές μεταπτώσεις σε κάθε κρούση κατα την ίδια ταλάντωση για να εξάγουμε συμπέρασμα για το είδος της κίνησης τους.Σε εμάς θα είναι :

Απαιτούμενη ραδιότητα για ανατροπή  $\alpha$ :

$$a = S_v / (g \cdot R) \tag{19}$$

Όπου  $S_v$  είναι η μέγιστη τιμή της ταχύτητας του άνω κόμβου στην προσομοίωση μας στο Abaqus . Διαιρώντας κατά μέλη με την φασματική ταχύτητα θα είναι :

$$a_1/a_2 = (g R_1) / (g R_2) = R_1/R_2$$

Επομένως πιο επιρρεπές σε ανατροπή θα είναι το άγαλμα με μικρότερο  $R$  ,καθώς θα έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να ανατραπεί όποιος έχει μικρότερο απαιτούμενο  $a$  .Στην δική μας ανάλυση κατά  $x$  όπως τονίστηκε είναι το Fanciulla ενώ κατα  $yy$  αυτό θα είναι το πρώτο άγαλμα το επονομαζόμενο Feminille όπως φαίνεται και από τον σεισμό No 317 όπου ανατρέπεται μετά από λίγες κρούσεις ,5 τον αριθμό.Αυτό γίνεται γιατί κατά  $y$  είναι  $\alpha(\text{Feminille})=0.2406 \text{ rad}$  ενώ  $\alpha(\text{Fanciulla})=0.2577 \text{ rad}$ .

Τέλος οφείλουμε να κάνουμε μια ενδοσκόπηση στις αναλύσεις που προηγήθηκαν. Αρχικά διαφαίνεται μια αρκετά καλή ομοιότητα στις αναλύσεις και με το λογισμικό Abaqus και με το Matlab γεγονός που μας χαροποιεί για την διεργασία τόσο των ασύμμετρων δοκιμών (πολυπλοκότητα λόγω εκκεντρότητας) και για μελλοντική διεργασία. Στον σεισμό 317 ανατράπηκε το δεύτερο άγαλμα ίσως δικαιολογώντας το λήμμα του Houssner:

Είναι η διατήρηση της ενέργειας ο λόγος που μια φαινομενικά μικρή διέγερση οδηγεί σε ανατροπή ενός εκθέματος ελεύθερα εδραζομένου, καθώς αυτή η ισορροπία επιβάλλει φαινομενικά μεγάλα πλάτη αντιστάθμισης και οδηγούμαστε σε αυτή.

Επίσης παρατηρούμε στο διάγραμμα κατά  $yy$  πως το άγαλμα Fanciulla που έχει  $\alpha_{1(yy)}=0.2577$  rad και το άγαλμα Feminille έχει  $\alpha_{1(yy)}=0.2406$  rad έχουμε ότι δικαιολογείται το πρώτο άγαλμα ανατρέπεται πιο εύκολα και είναι ασθενέστερο κατά  $yy$  ενώ κατά  $xx$  έχει πιο σταθερή απόδοση από το δεύτερο (Fanciulla). Επίσης φαίνεται πιο κρίσιμη η διεύθυνση  $yy$  καθώς στις μετρήσεις τα αγάλματα ανατρεπόντουσαν για μικρότερες γωνίες  $\theta$ .



### 3 ΑΣΣΥΜΕΤΡΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗ

#### 3.1 Εισαγωγή στην δυναμική ανάλυση ασύμμετρων δοκιμίων

Μια πληθώρα εργαστηριακών δοκιμών διεξήχθη και συνεχίζει να διαδραματίζεται όλα αυτά τα χρόνια και οδήγησε σε μαθηματικές επεξηγήσεις του λικνισμού των σωμάτων(π.χ. Konstantinidis and Makris 2009, 2010).Βεβαίως οι αναλύσεις αυτές εστιάζουν σε συμμετρική ανάλυση άκαμπτων σωμάτων.Τυπικά γεωμετρικές εκκεντρότητες του εκάστοτε Κέντρου Βάρους των αγαλμάτων εξετάστηκαν ως επί το πλείστον σε δοκιμές αξιοπιστίας μηχανών αποσβέσεως σε μιας χρήσης τεστ.

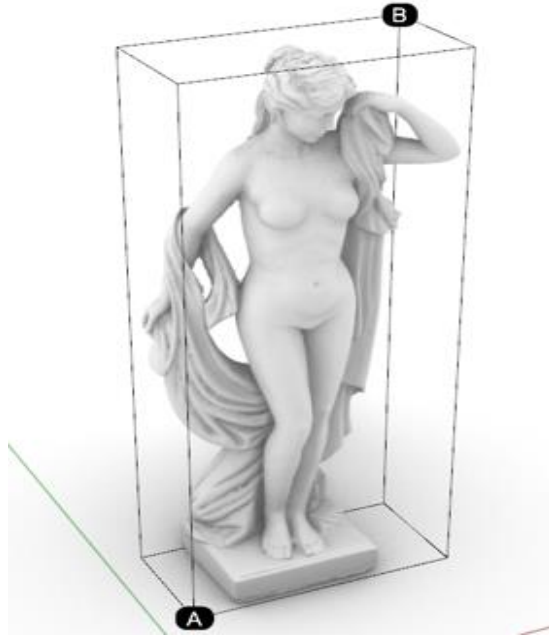
Εν αντιθέσει με αυτή την τάση ,οι μελέτες που έγιναν από τον Purvance et al. (2008) για να προσδιορίσουν τις γεωμετρικές και εδαφικές ιδιότητες που προκαλούν την ανατροπή ασύμμετρων μπλοκ ήταν πολύ χρήσιμες όπως και οι αναλύσεις της Wittich που επέκτειναν τις εξισώσεις του Houssner σε τυπικά εκθέματα με εκκεντρότητα ,οι οποίες αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1.Αυτή η μελέτη μας υπέδειξε κατ' άρχήν την μετάπτωση των καταστάσεων και την αλληλουχία τους μέχρι την πτώση του αντικειμένου και επικεντρώθηκε σε ένα σημαντικό στόχο που είναι τροχοπέδι για την ασύμμετρη ανάλυση.Ποικιλίες στην ραδινότητα λόγω της εκκεντρότητας των δοκιμίων διαδραματίζουν μεγαλύτερη επιρροή στην κίνηση ενός ελεύθερα εδραζόμενου δοκιμίου σε αντιδιαστολή με τις ποικιλίες λόγω μεγέθους και αλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών π.χ. R.



Εικόνα 29 : Ζημιές σε ελεύθερα εδραζόμενα αγάλματα

Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν στα προαναφερθέντα δύο αγάλματα στο κεφάλαιο 1 τα οποία παρουσιάζονται εκ νέου με τις καινούργιες φωτογραφίες του Abaqus με τις ευνόητες αλλαγές στο Κέντρο Βάρους.

- 1° ΑΓΑΛΜΑ –FEMINILLE



Εικόνα 30 : Ολόσωμο άγαλμα Feminille

Πραγματοποιώντας ανάλυση σε γεωμετρικό επίπεδο για τον ορισμό της βάσης του υπολογίσαμε ως  $b_1=0.3842$  m και  $b_2=0.3647$ (critical)m με συνολικό πλάτος κατα  $x=b_1+b_2=0.7489$ m. Ενώ κατα  $y-y$  θα είναι  $b_1'=0.1612$  m  $b_2'=0.2011$  m με συνολικό πλάτος κατα  $y=0.3623$  m. Τέλος θα έχουμε τόσο  $\alpha_{2(critical)xx}$  και  $\alpha_{1(critical)yy}$  ραδινότητες που θα είναι αντίστοιχα  $\alpha_{2(xx)}=0.4588$ rad  $\alpha_{1(yy)}=0.2149$  rad. Αυτα τα πλάτη αναφέρονται στις εξής εξισώσεις κίνησης με άγνωστο το  $\theta$ (στροφή περί  $O$  η  $O'$ ) όπως αποτυπώνονται στην εξίσωση (6) του κεφαλαίου 1. Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του αγάλματος συνοψίζονται σε έναν πίνακα μαζί με τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του αγάλματος Fanciulla όπως φαίνονται παρακάτω.





- 2° άγαλμα Fanciulla

Εδώ θα είναι  $b_1=0.2355$  m και  $b_2=0.2052$  κατα  $x-x$ . Ενώ κατα  $y-y$  θα είναι  $b_1'=0.1948$ m  $b_2'=0.1669$  m με συνολικό πλάτος κατα  $y=0.3617$ m και ραδινότητες  $\alpha_{2(xx)}=0.2906$ rad και  $\alpha_{2(yy)}=0.2387$ rad.



Εικόνα 31: Ολόσωμο άγαλμα Fanciulla

Και τώρα έχουμε τον συγκεντρωτικό πίνακα αδρανειακών χαρακτηριστικών καθώς και τον πίνακα περιεχομένων του Excel που μας βοήθησε :

<p><b>Mass</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Isotropic: <input type="text" value="0.3128"/></p> <p><input type="radio"/> Anisotropic:</p> <p>M11: <input type="text"/> M22: <input type="text"/></p>	<p><b>Mass</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Isotropic: <input type="text" value="0.2598"/></p> <p><input type="radio"/> Anisotropic:</p> <p>M11: <input type="text"/> M22: <input type="text"/></p>
<p><b>Rotary Inertia</b></p> <p><input type="checkbox"/> Specify off-diagonal terms</p> <p>I11: <input type="text" value="0.0779"/></p> <p>I22: <input type="text" value="0.08915"/></p> <p>I33: <input type="text" value="0.018041"/></p>	<p><b>Rotary Inertia</b></p> <p><input type="checkbox"/> Specify off-diagonal terms</p> <p>I11: <input type="text" value="0.0594964"/></p> <p>I22: <input type="text" value="0.0608688"/></p> <p>I33: <input type="text" value="0.00703719"/></p>
<p>CSYS: (Global)  </p> <p><b>Note:</b> Values will be applied per point.</p>	<p>CSYS: (Global)  </p> <p><b>Note:</b> Values will be applied per point.</p>

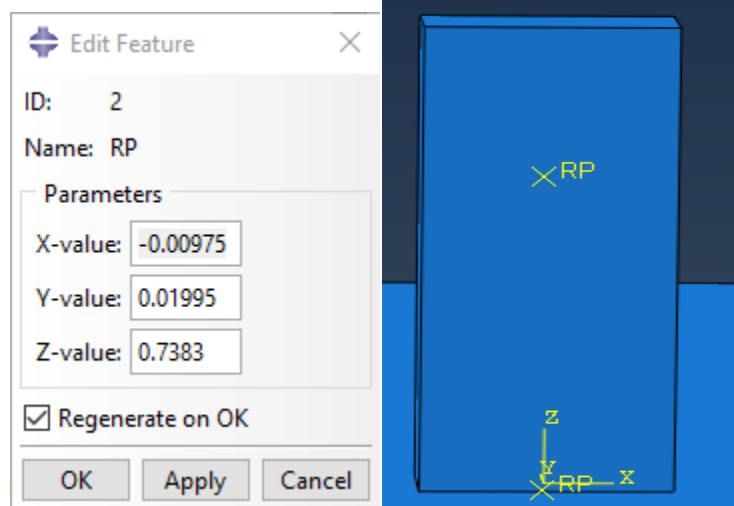
Εικόνα 32: Πίνακες abaqus με inertias

FIGURA FEMMINILE				
Geometric characteristics				
Vertici	Vertices	v =	2256342	-
Facce	Faces	f =	4429676	-
Parallelepipedo limite (point A)	Bounding Box (point A)	x <sub>A</sub> =	-90,3	mm
		y <sub>A</sub> =	8,5	mm
		z <sub>A</sub> =	384,9	mm
Parallelepipedo limite (point B)	Bounding Box (point B)	x <sub>B</sub> =	658,6	mm
		y <sub>B</sub> =	370,8	mm
		z <sub>B</sub> =	2075,8	mm
Densità	Density	ρ <sub>i</sub> =	2750	kg/m <sup>3</sup>
Volume	Volume	V <sub>i</sub> =	1,137E+08	mm <sup>3</sup>
Peso	Weight	P <sub>i</sub> =	312,8	kg
Posizione baricentro	Centroid	x <sub>0j</sub> =	274,4	mm
		y <sub>0j</sub> =	209,6	mm
		z <sub>0j</sub> =	1123,2	mm
Primi momenti	First moments	x <sub>i</sub> =	3,120E+10	mm <sup>4</sup>
		y <sub>i</sub> =	2,384E+10	mm <sup>4</sup>
		z <sub>i</sub> =	1,277E+11	mm <sup>4</sup>
Secondi momenti	Second moments	xx <sub>i</sub> =	1,043E+13	mm <sup>8</sup>
		yy <sub>i</sub> =	5,672E+12	mm <sup>8</sup>
		zz <sub>i</sub> =	1,677E+14	mm <sup>8</sup>
Momenti del prodotto	Product moments	xy <sub>i</sub> =	6,474E+12	mm <sup>8</sup>
		yz <sub>i</sub> =	2,570E+13	mm <sup>8</sup>
		zx <sub>i</sub> =	3,650E+13	mm <sup>8</sup>

FANCIULLA				
Geometric characteristics				
Vertici	Vertices	v =	1694096	-
Facce	Faces	f =	3360696	-
Parallelepipedo limite (point A)	Bounding Box (point A)	x <sub>A</sub> =	-2,1	mm
		y <sub>A</sub> =	-11,7	mm
		z <sub>A</sub> =	-0,8	mm
Parallelepipedo limite (point B)	Bounding Box (point B)	x <sub>B</sub> =	438,6	mm
		y <sub>B</sub> =	350,0	mm
		z <sub>B</sub> =	1617,8	mm
Densità	Density	ρ <sub>i</sub> =	2750	kg/m <sup>3</sup>
Volume	Volume	V <sub>i</sub> =	9,446E+07	mm <sup>3</sup>
Peso	Weight	P <sub>i</sub> =	259,8	kg
Posizione baricentro	Centroid	x <sub>0j</sub> =	203,1	mm
		y <sub>0j</sub> =	155,2	mm
		z <sub>0j</sub> =	686,0	mm
Primi momenti	First moments	x <sub>i</sub> =	1,919E+10	mm <sup>4</sup>
		y <sub>i</sub> =	1,466E+10	mm <sup>4</sup>
		z <sub>i</sub> =	6,480E+10	mm <sup>4</sup>
Secondi momenti	Second moments	xx <sub>i</sub> =	4,637E+12	mm <sup>8</sup>
		yy <sub>i</sub> =	2,782E+12	mm <sup>8</sup>
		zz <sub>i</sub> =	6,421E+13	mm <sup>8</sup>

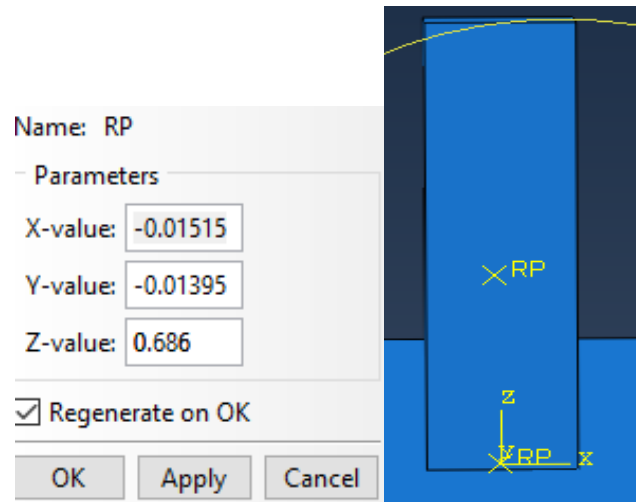
Εικόνα 33:Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγαλμάτων

Τέλος δείχνουμε την μετάθεση η οποία περιήλθε στα Κέντρα Βάρους των δύο αγαλμάτων με δύο εικόνες από το Abaqus.



Εικόνα 34: Θέση ΚΒ στο 1<sup>ο</sup> άγαλμα Feminille





Εικόνα 35:Θέση ΚΒ αγάλματος Fanciulla

### 3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων για παλμούς-ημίτονο

Η προσομοίωσή τους στο Abaqus έγινε με ορθογώνια πρίσματα όπως φαίνεται στην ανωτέρω εικόνα και όπως φάνηκε στο συμμετρικά αγάλματα είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν ανωτέρω με την βοήθεια των εμπειρικών σχέσεων της Wittich καθώς και την ανάπτυξή τους από τους Μακρή και Ρούσσο το 2001 μας χρησιμεύουν για δύο εργασίες που εξετάζονται σε αυτή την εργασία.

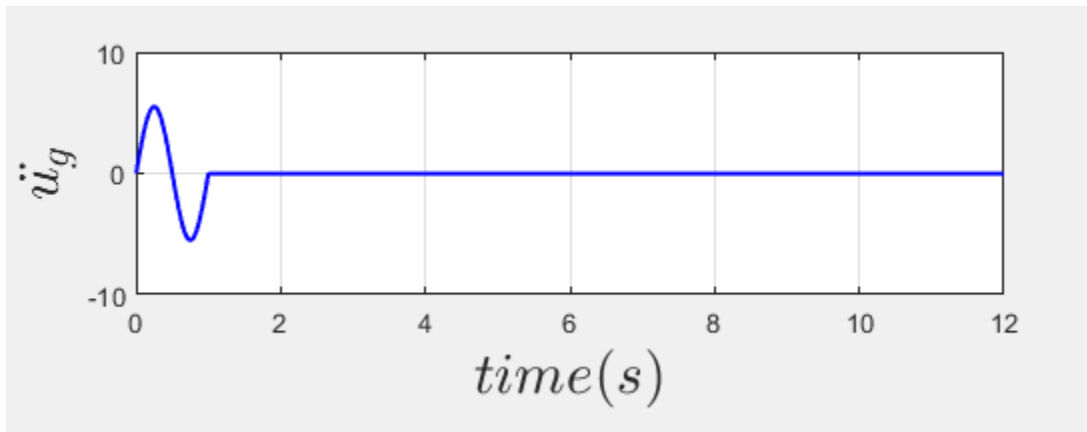
Η πρώτη αφορά την χρησιμότητα του Abaqus που επικυρώνει τις διαπιστευμένες λύσεις που απορρέουν από την μαθηματική επίλυση του Matlab και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επομένως για όλες τις ενδεχόμενες καταστάσεις και με αζομείωση του συντελεστή απόσβεσης στα όρια που δίνουν τόσο ο Houssner όσο και την επέκταση που προτείνουν οι Jelenic και Bicanic μέσα από μία πληθώρα τεστ σε δοκίμια πάνω σε μία αρχικώς άκαμπτη βάση που της αυξάναν την δυνατότητα ευκαμψίας βάζοντας συνεχόμενα ελατήρια να συνδέουν τα Κέντρα Βάρους των αγαλμάτων και εξήγαγαν την ακόλουθη σχέση :

$$\eta_{mat} = \frac{\eta_{e,full}}{\eta_{RB}} \rightarrow H_{rb} = \eta_{e,full} / h_{mat} \quad (4)$$

Η δεύτερη δεν έχει να κάνει τόσο με την επιτυχία των δύο αναλύσεων όσο με ένα έμμεσο συμπέρασμα που αφορά τα εκθέματα με εκκεντρότητα στο ΚΒ τους και που υπόκεινται στους ίδιους σεισμούς . Ότι είναι η μακρόχρονη καταπόνηση αυτή που προκαλεί την ανατροπή σύμφωνα με τους νόμους που παρουσιάστηκαν στο 1.5 και όχι το μέγεθος της ταλάντωσης. Αυτό το φαινόμενο της επιμύκνησης του χρόνου της διέγερσης με παράλληλη μείωση των μέγιστων πλατών παλμών ή σεισμών ονομάζεται σεισμική απομόνωση και ενώ φαινομενικά μοιάζει ιδανικό για όλες τις κατασκευές με υψηλή ραδιότητα α δεν ισχύει αυτό όπως αποδείχτηκε από τους Βασιλλίου και Μακρή το 2012 σε μεγάλες κατασκευές που υποβλήθησαν σε ικανοποιητικούς παλμους της τάξης  $\omega_p / \rho > 6$  και μας υπέδειξαν το ακριβώς αντίθετο. Σκοπός είναι και αυτό να επιβεβαιωθεί απο το παρόν τεύχος. Ακολουθούν διάφοροι ημιτονικοί παλμοί και η επακόλουθη επεξήγηση των διαγραμμάτων γωνίας στροφής-χρόνου. Όλες οι συγκρίσεις μεταξύ abaqus και matlab έγιναν με την συνάρτηση **odesolver**.

### ΑΓΑΛΜΑ FEMINILLE

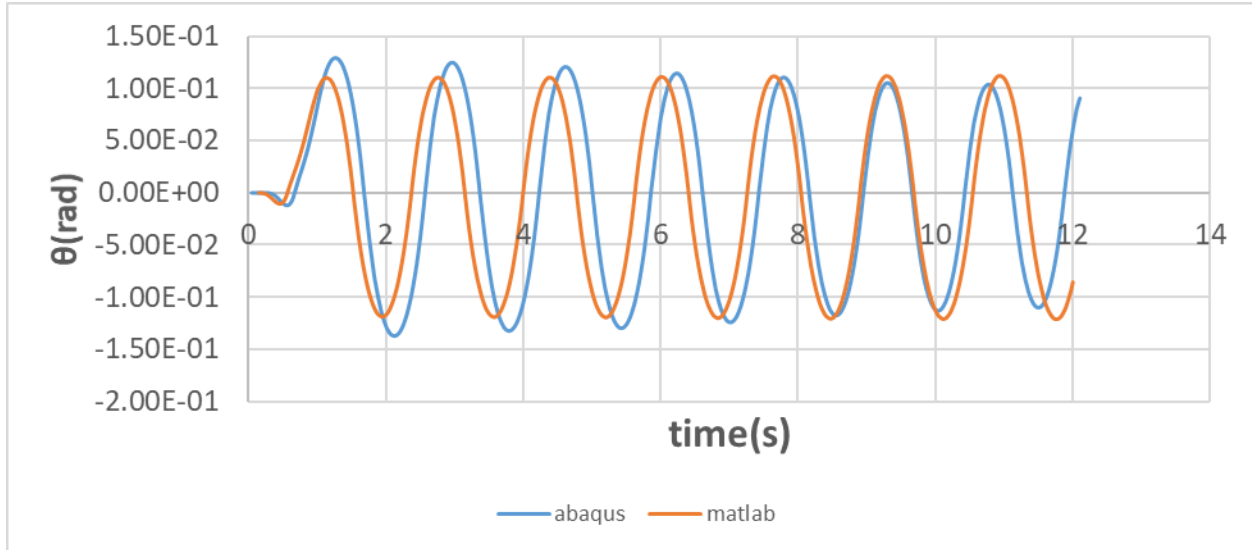
1<sup>ος</sup> παλμός ημίτονο με amplitude  $a_p=0.6g$  και  $\theta_{max}=0.1218rad$  χρονοιστορία ως εξής :



Εικόνα 36:Χρονοιστορία παλμού 0.6g

Και το ακόλουθο διάγραμμα  $\theta-t$  :

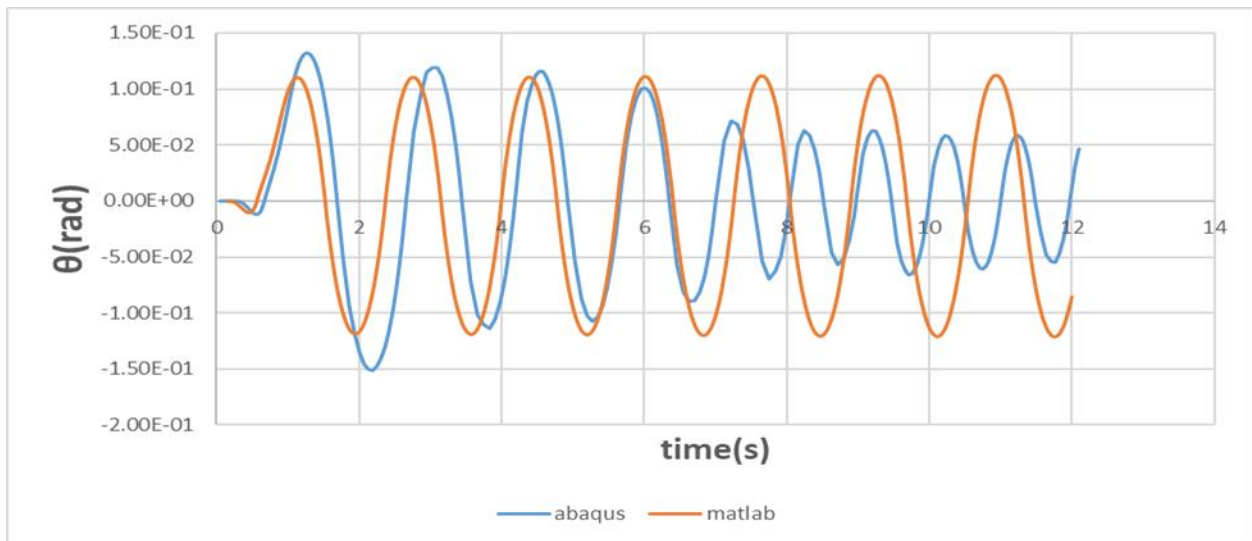
Με  $\zeta=5\%$  και το δεύτερο με  $\zeta=3\%$  ενώ παντού υπήρχε συντελεστής απόκατάστασης  $\eta=1$



Εικόνα 37:-Διαγράμματα γωνίας στροφής χρόνου για ημιτονικό παλμό με amplitude 0.6g (Feminille) για συντελεστή απόσβεσης  $\zeta=5\%$

:

Με  $\zeta=3\%$  και συντελεστή αποκατάστασης  $\eta=1$



Εικόνα 38: Διάγραμμα γωνίας στροφής χρόνου για ημιτονικό παλμό με amplitude 0.6g(Feminille)

Γενικά θεωρείται ικανοποιητική η απόδοση του θέματος (σύγκλιση δύο λύσεων).

2<sup>ος</sup> ημιτονικός παλμός με μεγαλύτερο πλάτος  $a_p=0.62g$  και  $\theta_{max}=0.2296rad$

Με  $\zeta=5\%$  και συντελεστή αποκατάστασης  $\eta=1$



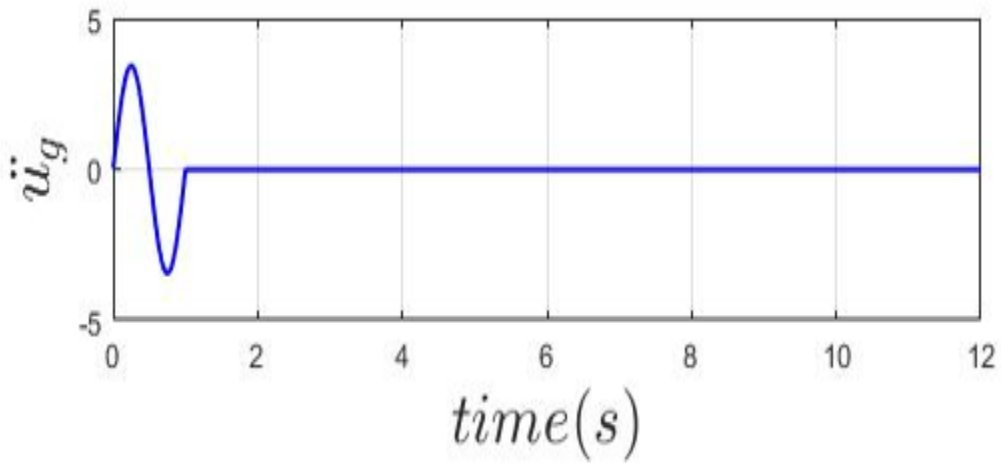
Εικόνα 39-Διάγραμμα γωνίας στροφής χρόνου για amplitude 0.62g για το άγαλμα Feminille

Εδώ σταματήσαμε στην πιο συντηρητική δοκιμή με  $\zeta=5\%$  μιας και επιτεύχθη γρήγορη ανατροπή του σώματος στο Abaqus.

### ΑΓΑΛΜΑ FANCIULLA

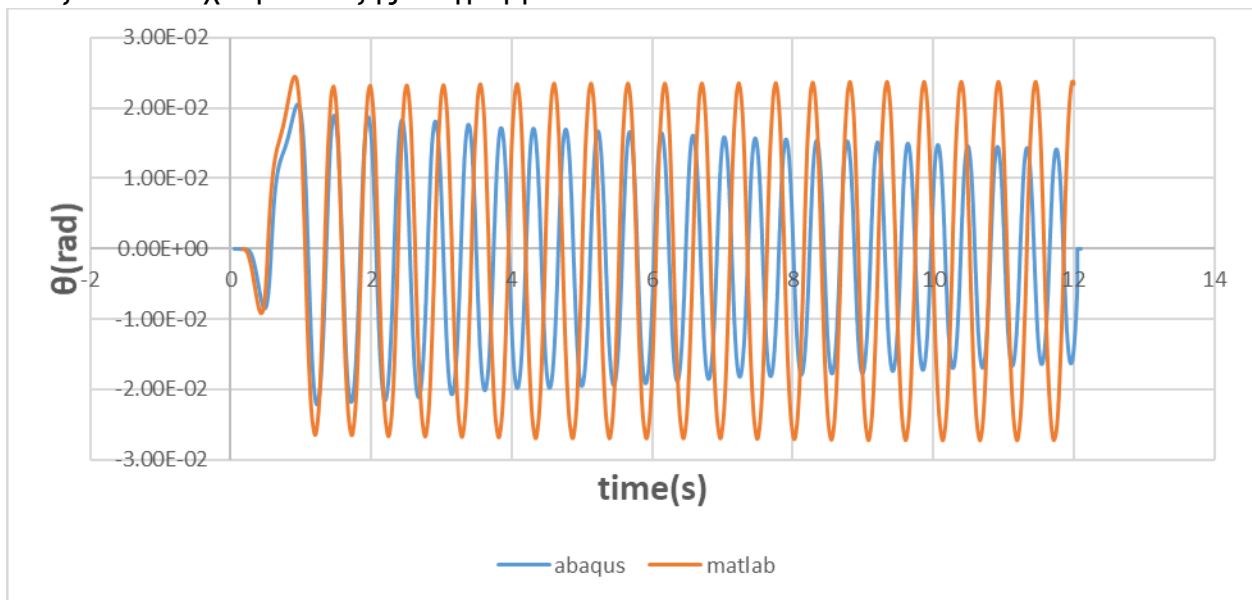
Αρχικά τονίζεται ότι δοκιμάσαμε διαφορετικούς παλμούς και έναν όμοιο με το αντίστοιχο διάγραμμα για να κατανοήσουμε την διαφορά που ενδέχεται να διαδραματίζουν η γεωμετρία και το είδος της φόρτισης στην κίνηση κάθε αγάλματος χωριστά. Η σύγκριση έγινε με βάση το υπολογιστικό κομμάτι της γλώσσας Matlab και πιο συγκεκριμένα της συνάρτησης **odesolver** μιας και ανταποκρίνεται περισσότερο στην τυποποίηση του προβλήματος αφού δεν εμπεριέχει την αβεβαιότητα τόσο των συντελεστών αποκατάστασης  $\eta_{1,2}$  όσο και του συντελεστή τριβής  $\zeta$ . Ενδεικτικά θα είναι :

1<sup>ος</sup> παλμός ημίτονο με amplitude  $a_p=0.35g$  και  $\theta_{max}=0.0272$  rad με χρονοιστορία και διαγράμματα να ακολουθούν :



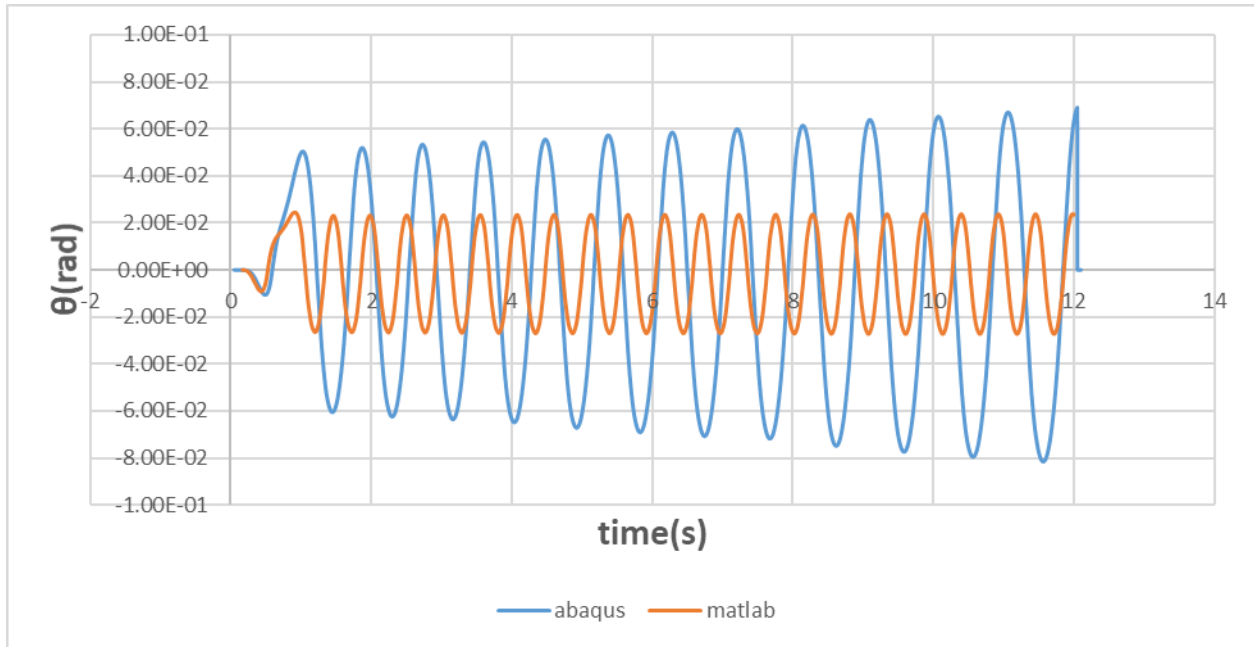
Εικόνα 40: Χρονοιστορία με  $\theta_{\max}=0.0272\text{rad}$  για το άγαλμα Fanciulla

Με  $\zeta=5\%$  θα έχουμε το εξής διάγραμμα:



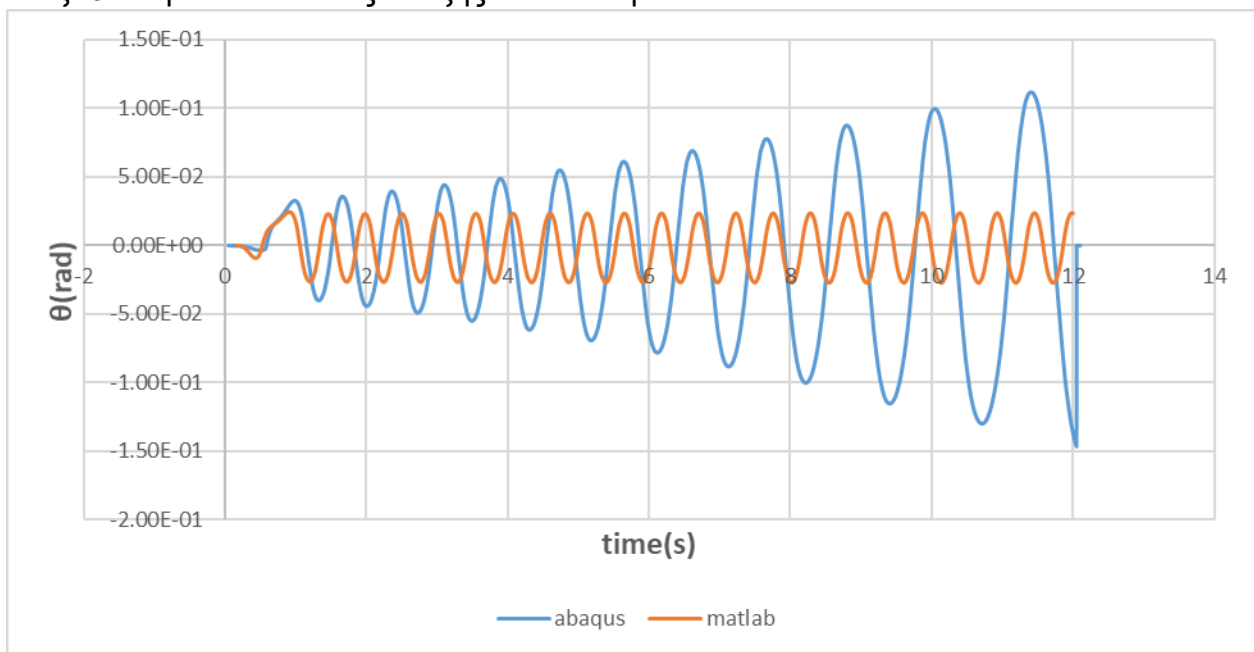
Εικόνα 41: Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου με συντελεστή απόσβεσης  $\zeta= 5 \%$  για amplitude 0.35g για το άγαλμα Fanciulla

$\zeta=3\%$  έχουμε



Εικόνα 42: Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου με συντελεστή απόσβεσης  $\zeta = 3\%$  για amplitude 0.35g για το άγαλμα Fanciulla

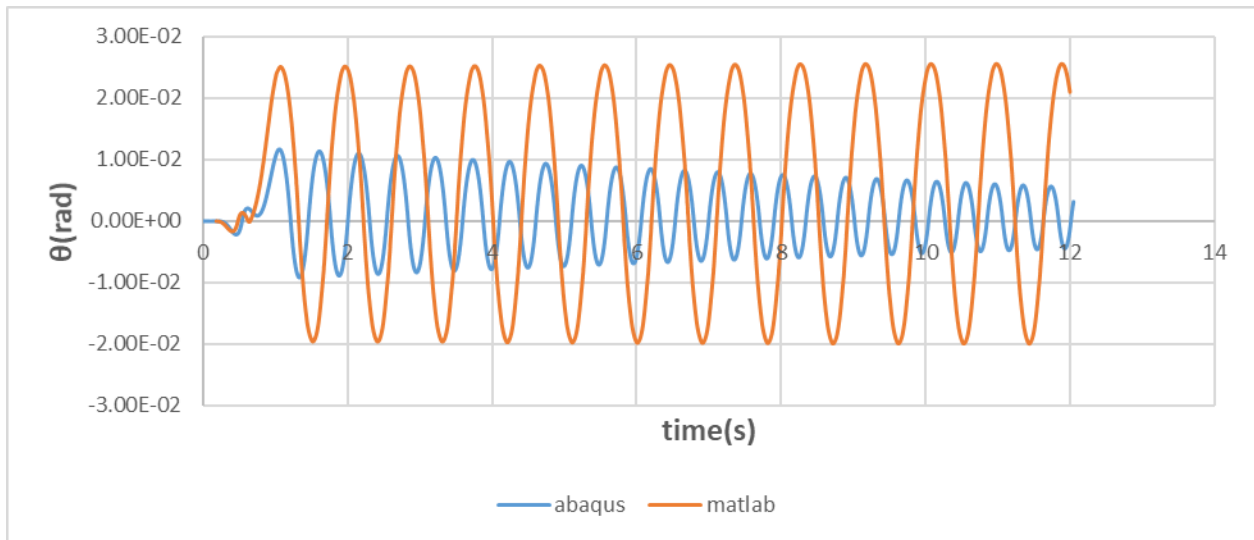
Με  $\zeta = 0\%$  προκύπτει τέλος το εξής αποτέλεσμα:



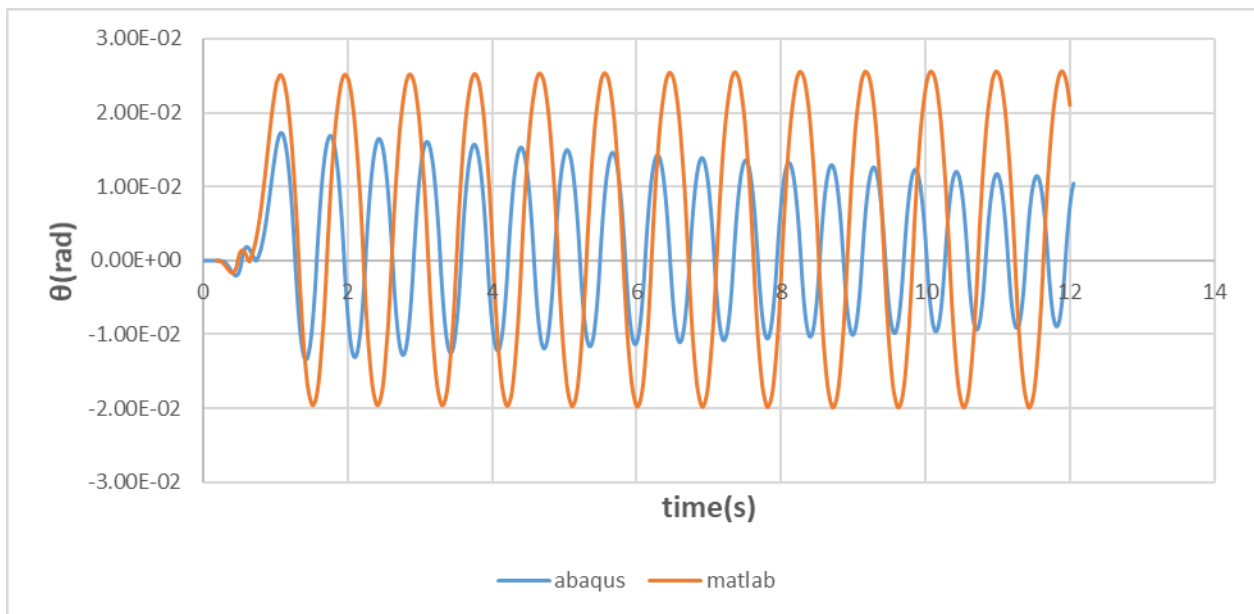
Εικόνα 43 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου με συντελεστή απόσβεσης  $\zeta = 0\%$  για amplitude 0.35g για το άγαλμα Fanciulla

Και δύο παλμοί κατα yy αντίστοιχα για το άγαλμα Feminille και Fanciulla:

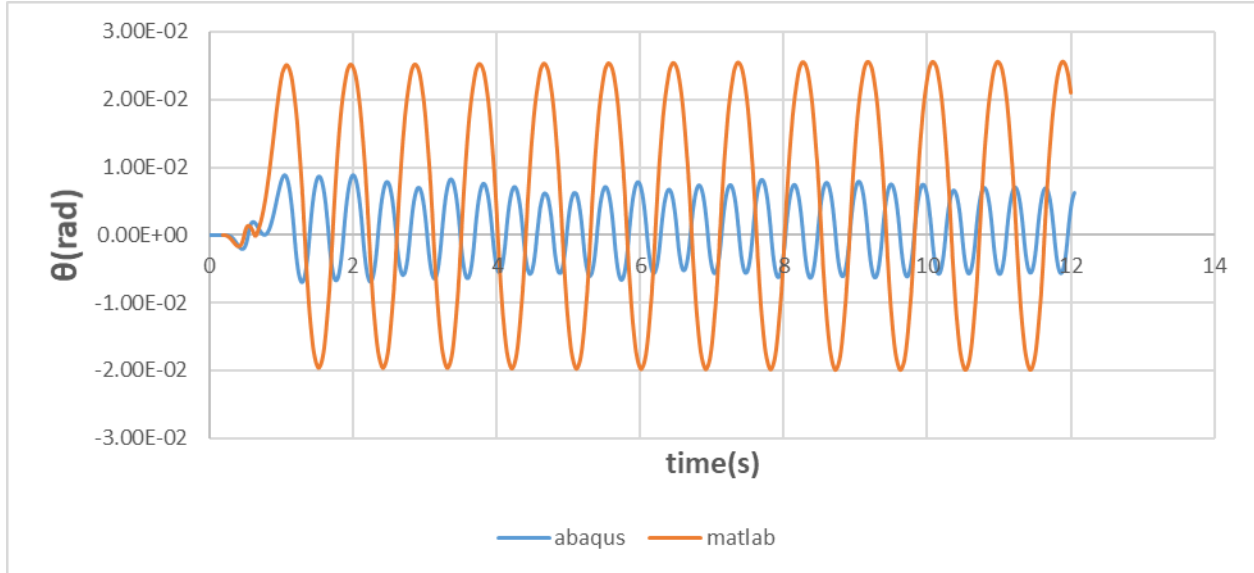
1<sup>ος</sup> παλμός ημίτονο 0.3g με  $\theta_{max} = 2.0808e-04\text{rad}$  και  $\text{duration} = 12\text{sec}$  όπως και τα προηγούμενα.



Εικόνα 44: Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για ημιτονικό παλμό 0.3g κατά γγ-με συντελεστή απόσβεσης 5% για το άγαλμα Feminille

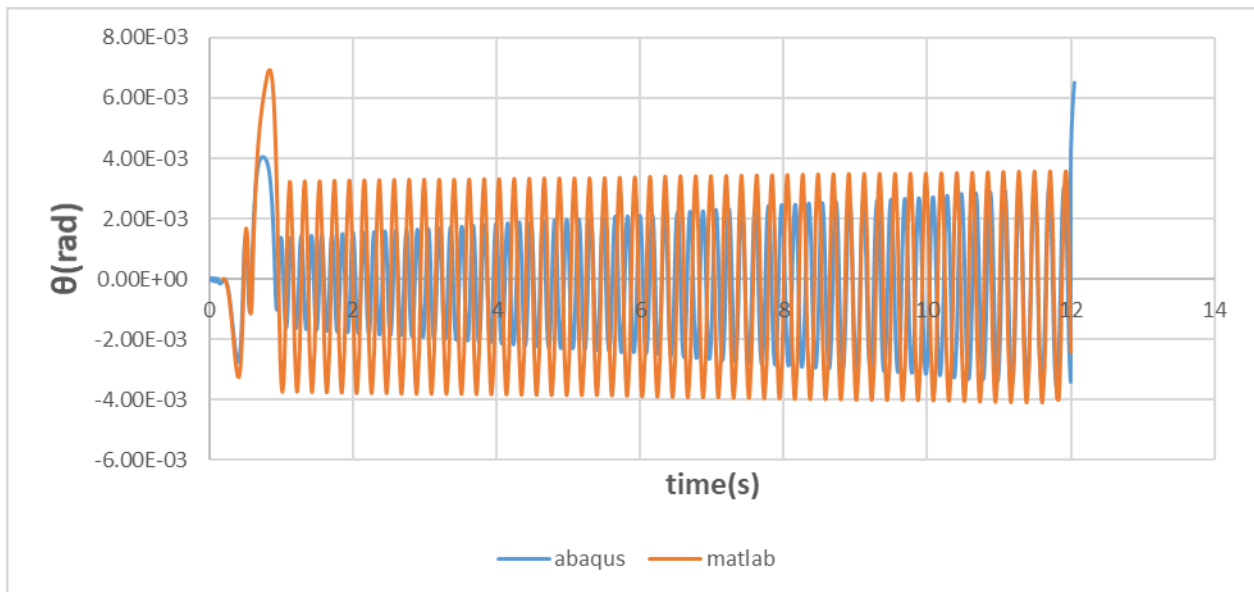


Εικόνα 45: Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για ημιτονικό παλμό 0.3g κατά γγ-με συντελεστή απόσβεσης 3% για το άγαλμα Feminille



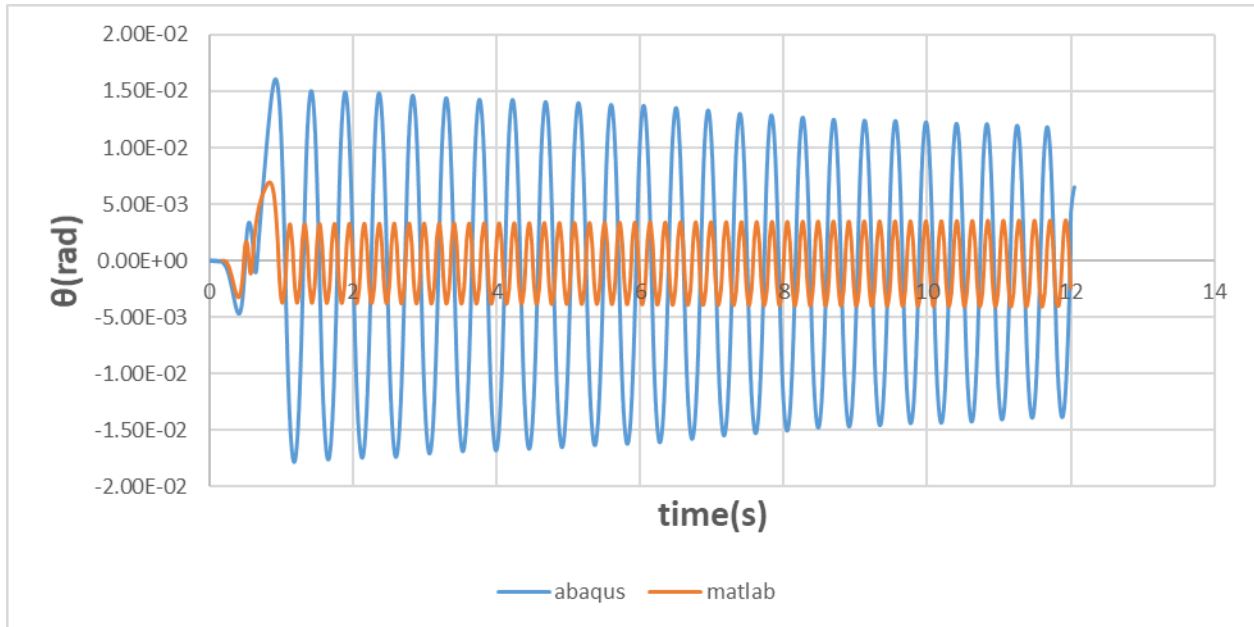
Εικόνα 46 Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για ημιτονικό παλμό 0.3g κατα γγ-με συντελεστή απόσβεσης 0%για το άγαλμα Feminille

2ος παλμός ημίτονο για το άγαλμα Fanciulla -0.36 g και  $\theta_{max}=0.0069$  rad

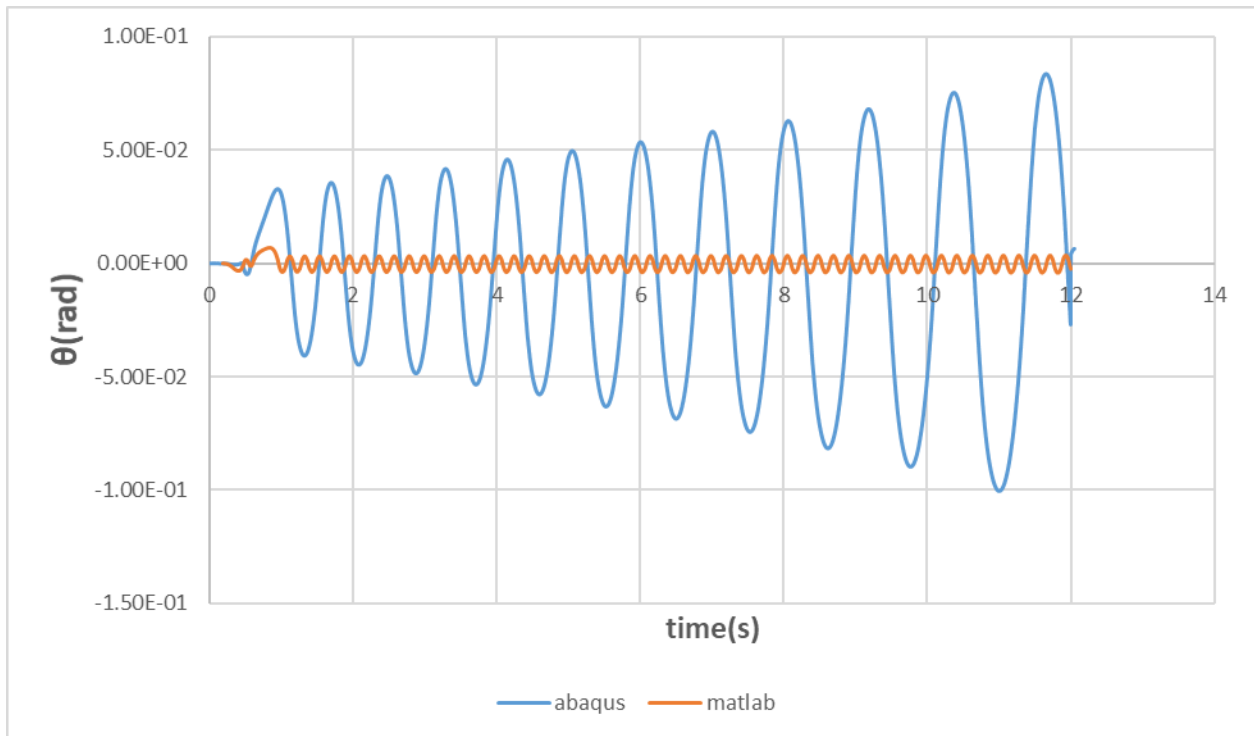


Εικόνα 47 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για το άγαλμα Fanciulla για απόσβεση 3.78%





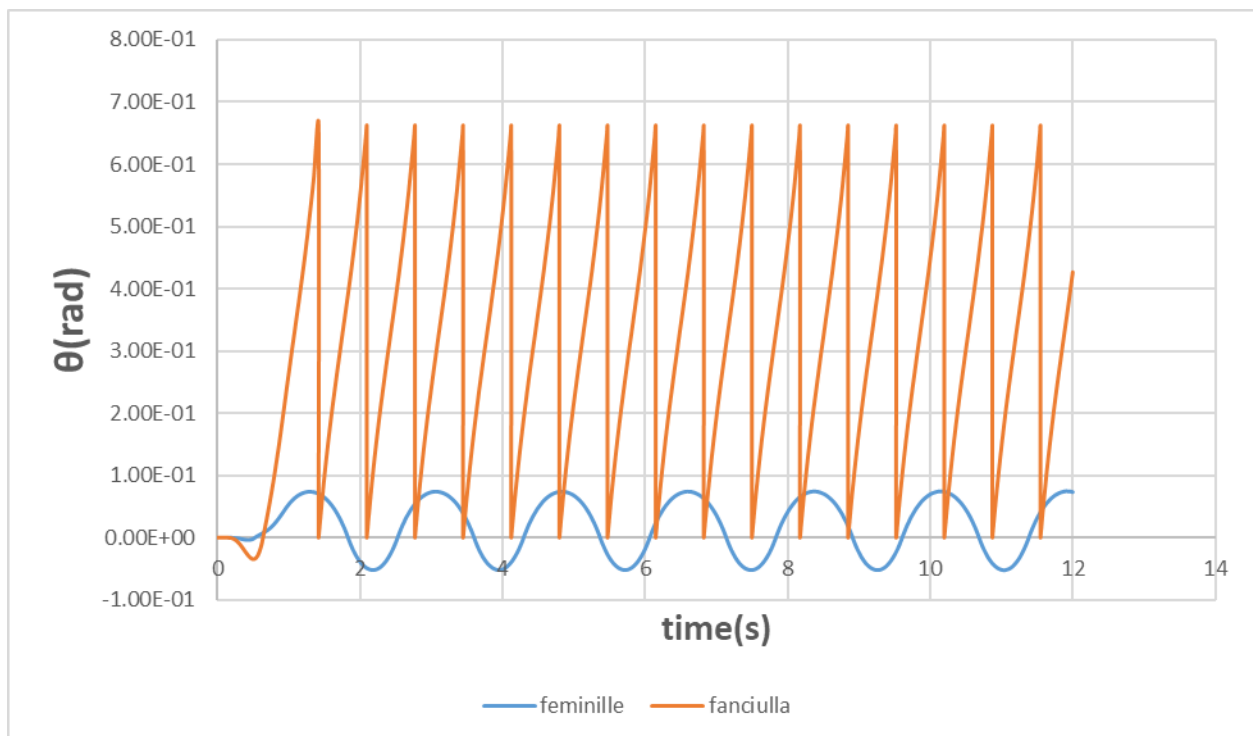
Εικόνα 48: Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για το άγαλμα Fanciulla για απόσβεση 5% κατά  $\gamma\gamma$



Εικόνα 49 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για το άγαλμα Fanciulla για απόσβεση 0% κατά  $\gamma\gamma$

Και τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση για καλύτερη εικόνα της απόκρισης των δύο αγαλμάτων και τα υποβάλλαμε σε δύο παλμούς ίδιας έντασης και διάρκειας για να κατανοήσουμε και τον ενδεχόμενο ρόλο στην αλλαγή γεωμετρίας. Τονίζεται πως η σύγκριση εδώ έγινε σε επίπεδο Matlab των δύο συναρτήσεων που έχουν δημιουργηθεί μιας και όπως τονίστηκε και στο κεφάλαιο 2 με τα συμμετρικά προσομοιώματα είναι ικανοποιητική η απόκριση της newmark και θέλαμε μία επιπλέον επιβεβαίωση επί τούτου. Όμως όπως τονίστηκε το σφάλμα της newmark είναι πως σε κάθε επαφή φαίνεται να χάνει ερισσότερη ενέργεια γεγονός που αποδίδεται στα πεπερασμένα στοιχεία και την πολυπλοκότητα τους , αφού επιλύουν την εξίσωση της Wittich με τις διπλές ραδιότητες για κάθε στοιχείο χωριστά. Για αυτό τον λόγο και έχουμε και πιο χρονοβόρα διαδικασία.

- 1<sup>ος</sup> παλμός σύγκρισης με amplitude 0.54g (x-x)

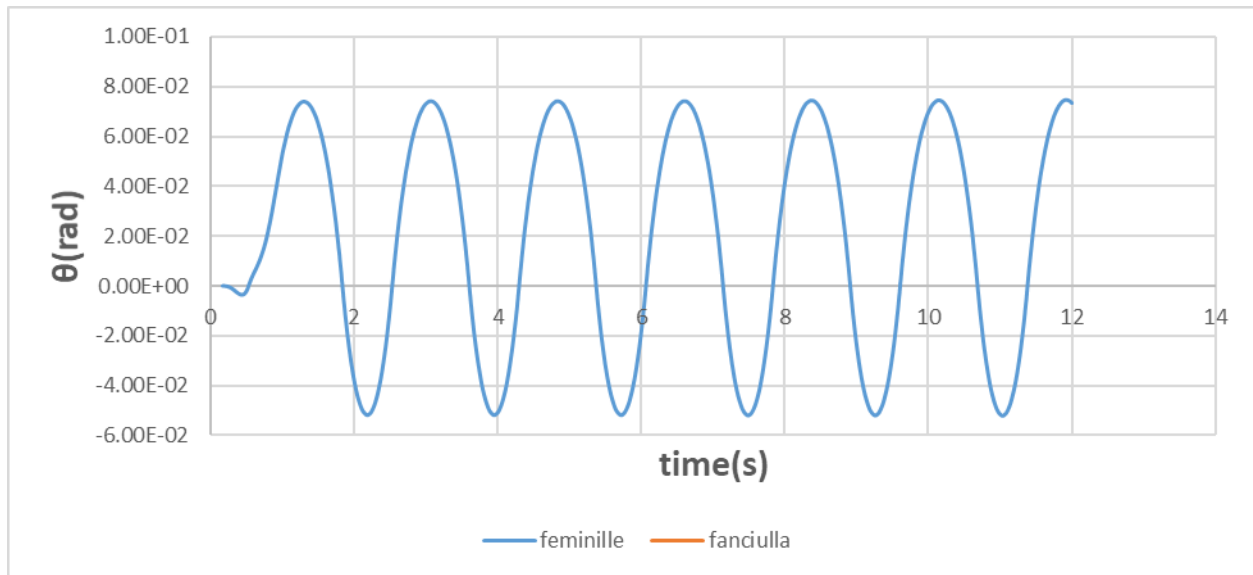


Εικόνα 50-Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για τα αγάλματα Fanciulla-Feminille για συντελεστή τριβής  $\eta=1$  σε ημιτονικό παλμό 0.54g κατά xx

Όπως φαίνεται εκ νέου για 0.54g η Fanciulla είναι πιο ασταθής και έτσι παίζει πολύ σημαντικό ρόλο πως κατά x θα είναι :

Για το άγαλμα Feminille  $b_2(\text{critical})=0.3647\text{m}$  και  $h_{cm}=0.7383\text{m}$  ενώ για το άγαλμα Fanciulla  $b_2(\text{critical})=0.2052\text{m}$  και  $h=0.686\text{m} \rightarrow a_2(\text{critical})[\text{Feminille}]=0.4588 \text{ rad}$  και  $a_2(\text{critical})[\text{Fanciulla}]=0.2906\text{rad} \rightarrow a_{2(1)} > a_{2(2)} \rightarrow$  ότι το άγαλμα 2 είναι λυγρότερο τουλάχιστον κατά την κρίσιμη εννοια  $x_x$  και έτσι επέρχεται η ανατροπή του .Ακόμα όσον αφορά την επίδραση του  $R_2(\text{critical})$  εκ νόου παρατηρούμε πως  $R_2(\text{critical})[\text{Feminille}]=0.8234\text{m}$  ενώ το αντίστοιχο για το δεύτερο άγαλμα θα είναι  $R_2=0.716\text{m}$  .Άρα παρατηρούμε πως τόσο η ραδινότητα όσο και η ακτινική ραδινότητα R εξακολουθούν να διαδραματίζουν ρόλο και στα ασύμμετρα εκθέματα.

2ος παλμός σύγκρισης κατα  $yy$  για  $0.33g$  με  $\theta_{\max}=0.0747 \text{ rad}$  για το άγαλμα Feminille



Εικόνα 51:Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για τα αγάλματα Fanciulla-Feminille για συντελεστή αποκατάστασης  $\eta=1$  σε ημιτονικό παλμό  $0.33g$  κατα  $yy$









Κατα  $yy$  το λυγρότερο άγαλμα ( $\alpha_1(\text{Feminille})=0.2149 \text{ rad} < \alpha_2(\text{Fanciulla})=0.2386 \text{ rad}$ ) διεγείρεται για μικρότερες επιταχύνσεις όπως διακρίνεται,ενώ το δεύτερο άγαλμα είναι αρκετά στοιβαρό για να <<νιώσει>> μεγάλη επιρροή από αυτόν τον παλμό.

### Παρατηρήσεις επι των αποτελεσμάτων των παλμών ημιτόνου και επεξήγησή τους

1. Επί των αρχικών διαγραμμάτων του Feminille παρατηρούμε πως κατά  $x$  έχουμε ικανοποιητική απόδοση τόσο του matlab όσο και του Abaqus 2014.1 για συντελεστές απόσβεσης 3-5 % στο Abaqus για παλμό  $0.6g$
2. Στον ίδιο παλμό  $0.6g$  έχουμε για απόσβεση 0% ότι το Abaqus κάνει μια περίεργη τροχιά απόκρισης με καλή απόδοση για αρχή και στα  $6\text{sec}$  αρχίζει να φθίνει γεγονός που αποδίδεται στα πεπερασμένα στοιχεία και στον συντελεστή αποκατάστασης.

3. Ενω για 0.62 g η αλήθεια είναι ότι έχουμε ανατροπή στα 3s ακόμα και με 5% συντελεστή απόσβεσης γεγονός που μας κάνει να μην ανατρέξουμε περισσότερο σε άλλους συντελεστές.
4. Όσον αφορά το άγαλμα Fanciulla( το μικρότερο) είναι κατανοητό ότι αντέχει μικρότερες διεγέρσεις αφού αναφερόμαστε σε μικρότερη επιτάχυνση με σχεδόν ίδιες μέγιστες τιμές γωνιών.
5. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι για  $\chi-\chi$  στα 0.35g διέγερση με ραδιότητες τώρα να έχουν αλλάξει δεν έχουμε πτώση του δοκιμίου αλλά όσο αυξάνουμε την ένταση του παλμού με αποκορύφωμα το 0.54g έχουμε ανατροπή απότομη κιόλας πριν τα 2 s μετά από μόλις μία επαφή με το έδαφος .
6. Στο σεισμό κατα  $\gamma$  το άγαλμα Feminille έχει εκ νέου για 0.3g παρατηρούμε πως το 1<sup>ο</sup> άγαλμα τώρα δέχεται μικρότερους παλμούς μιας και έχουμε μικρότερα  $b$  και συνεπακόλουθα μικρότερα  $a_1$  ,  $a_2$  και λικνίζεται για μικρότερες επιταχύνσεις.
7. Εκ νέου παρατηρούμε πως έχουμε καλή απόκριση κατα 3-5 % με τον συντελεστή αποκατάστασης η στο Abaqus εκ νέου να μην επηρεάζει είτε τον έχουμε 0.8 είτε 0.9.
8. Τέλος κατα  $\gamma\gamma$  παρατηρούμε πως για τους ίδιους παλμούς πιο σταθερό αποδεικνύεται το δεύτερο άγαλμα αφού είναι λιγότερο λυγηρό όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα(έχει μικρότερη γωνία ραδιότητας) και έτσι όπως αναφέρει και ο Houssner θα λικνίζεται σε μεγαλύτερους παλμούς .Αυτό διαφαίνεται και στο τελευταίο διάγραμμα σύγκρισης(Εικόνα 51) όπου το 1<sup>ο</sup> άγαλμα λικνίζεται κανονικά για 0.33g ενώ το δεύτερο δεν μπορεί να λικνιστεί καθόλου.

### ΠΙΝΑΚΑΣ ΡΑΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΓΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ Χ ΚΑΙ Υ

 a1	0.4588	 a1	0.2150
 a2	0.4798	 a2	0.2659
 a1	0.2907	 a1	0.2387
 a2	0.3307	 a2	0.2767

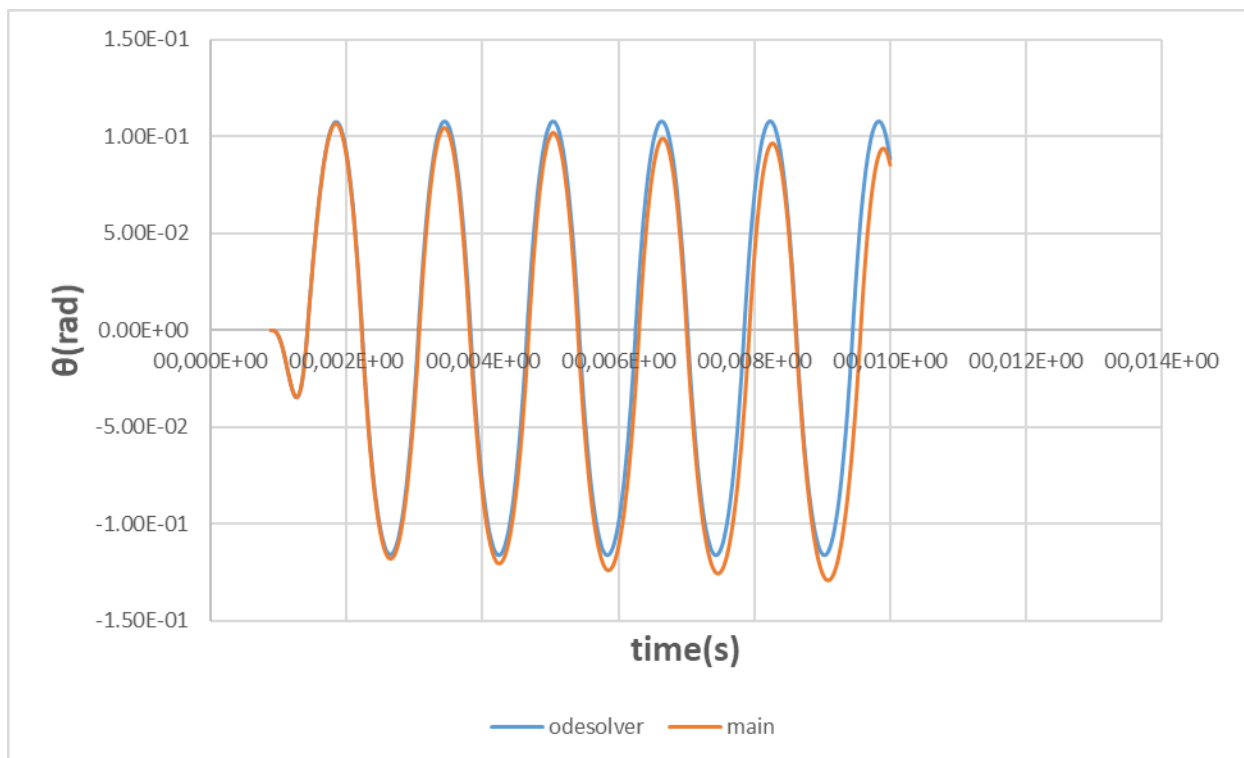
Εικόνα 52 : Ραδιότητες αγαλμάτων κατα  $\chi$  και  $\gamma$  για τα αγάλματα Feminille πάνω και Fanciulla κάτω αντίστοιχα σε rad

### 3.3 Παλμοί Ricker και αποτελέσματα τους

Ακολουθούν τα αποτελέσματα σε παλμούς Ricker των οποίων η έννοια αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Εν συνεχεία η συνάρτηση **newmark** είχε το όνομα **main**.

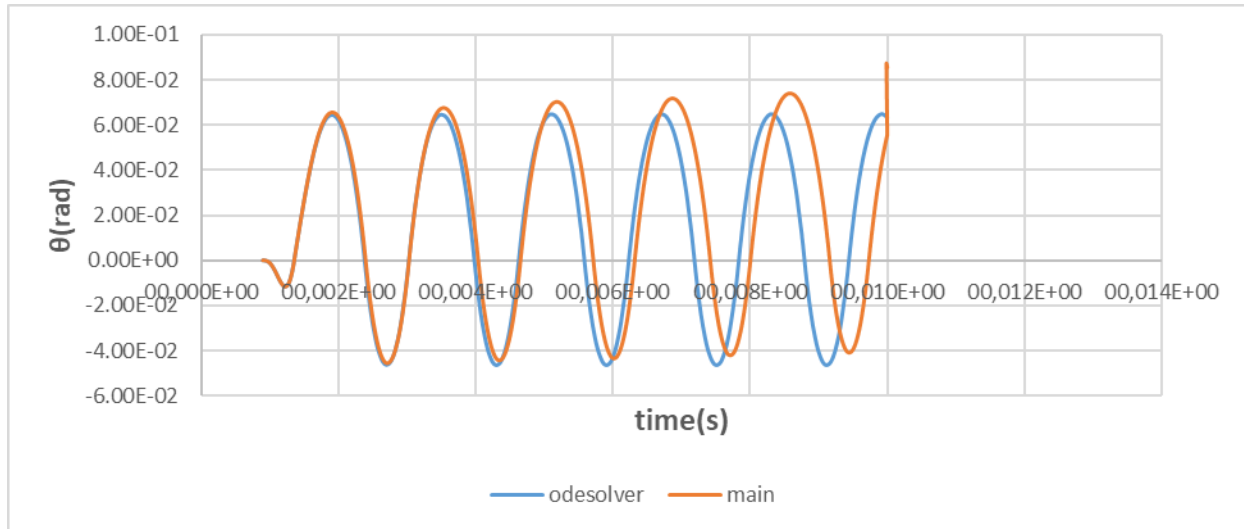
#### Feminille

- Παλμός με amplitude 0.68g με  $\theta_{max}=0.1160\text{rad}$  κατά x



Εικόνα 53: Διάγραμμα  $\theta$ -  $t$  Παλμός με amplitude 0.68g Feminille (xx) ασύμμετρο

- Παλμός με amplitude  $a_p=0.28\text{ g}$  κατά yy

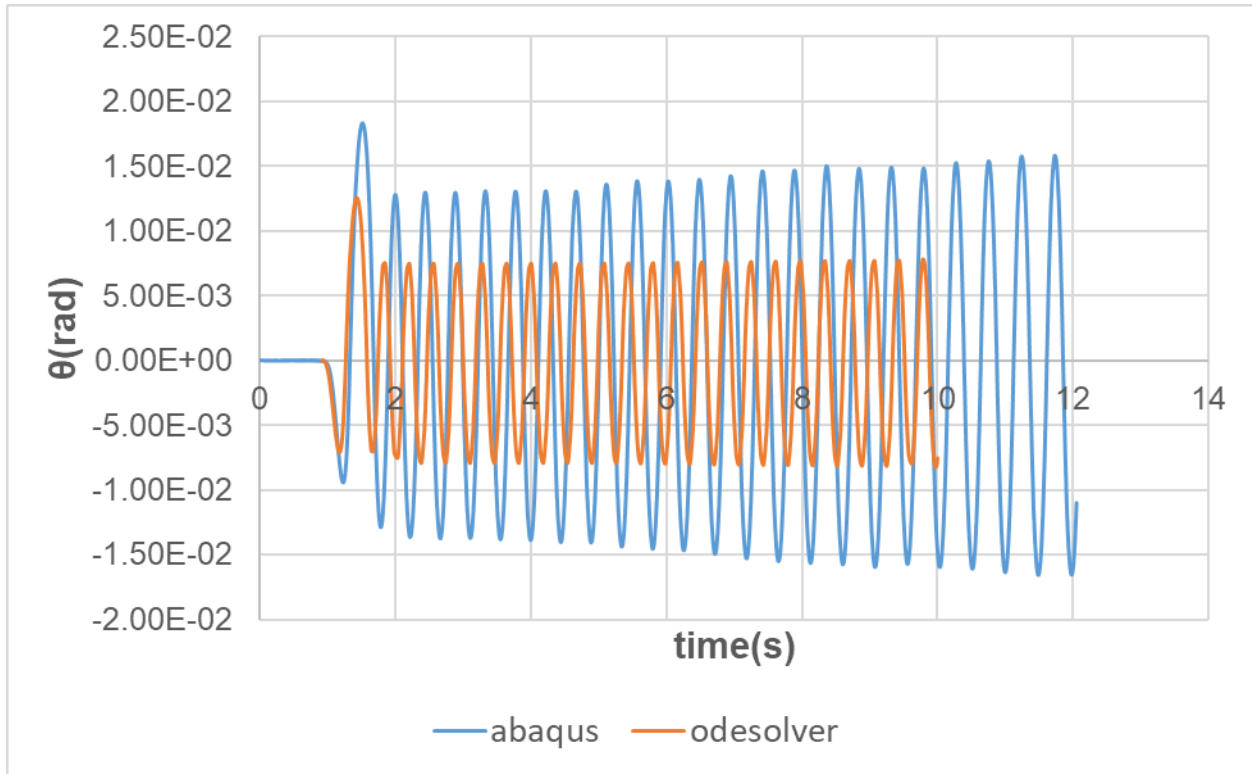


Εικόνα 54:Διάγραμμα  $\theta$ -  $t$ Παλμός με amplitude 0.28g Feminille (yy) ασύμμετρο

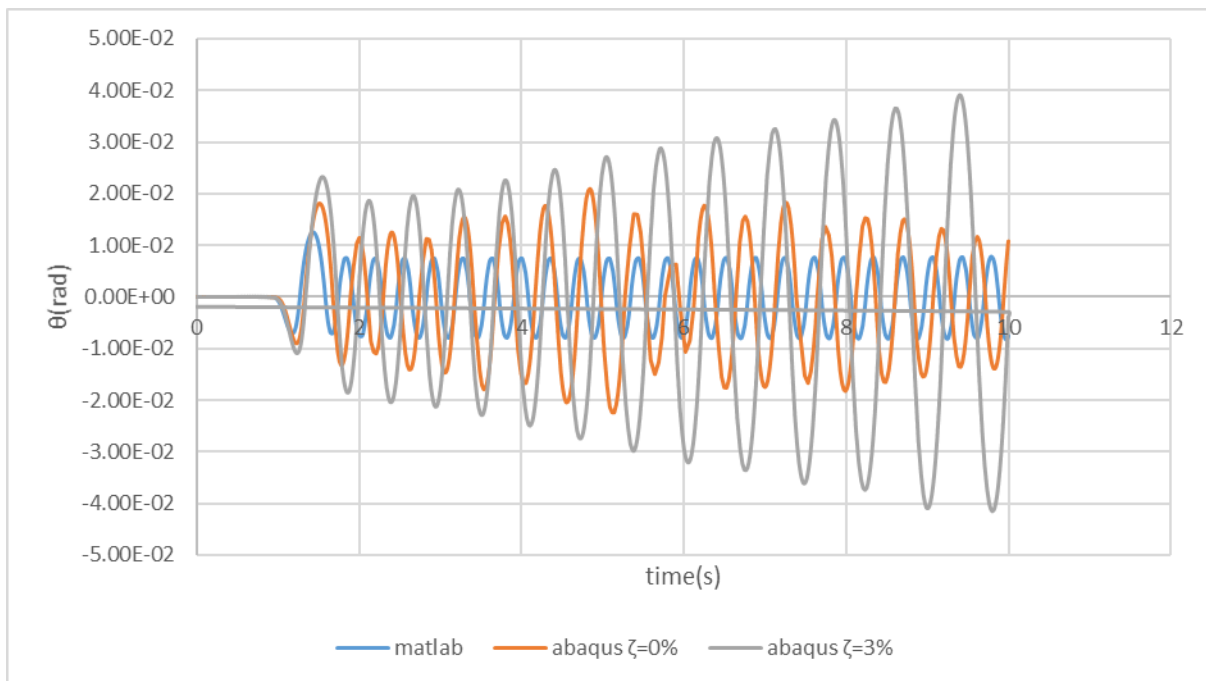
Εκ νέου όπως και στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο φαίνεται πως έχουμε καλή σύγκλιση αποτελεσμάτων απλά προκύπτει ένα θέμα μετά τα 5 sec καθώς η newmark επιλύει πιο αργά τις εξισώσεις κίνησης με άγνωστο μόνο την γωνία στροφής  $\theta$  και αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυτό να φαίνεται και με την ύπαρξη της απόσβεσης  $C$  που την έχουμε εκ νέου ίση με την μονάδα για να μην υπάρχει ολίσθηση δημιουργείται φαινόμενικα μια μικρότερη απορρόφηση ενέργειας και μια αύξηση επακόλουθη στο πλάτος της γωνίας. Αυτό μεγενθύνεται στους σεισμούς στα ασύμμετρα προσομοιώματα για αυτον τον λόγο και απορρίφθηκε η λύση της newmark στους σεισμούς που αναφέρονται σε επόμενο εδάφιο.

Ακολουθούν δύο παλμοί κατα  $x$  και  $y$  για να ελέγξουμε την σύγκλιση των αποτελεσμάτων της λύσης του Abaqus και της γλώσσας odesolver.

Παλμός ricker με amplitude κατα  $x$  για το 1<sup>ο</sup> άγαλμα  $a_r=0.54 \cdot g$  με  $\theta_{max}=0.0126$  rad με τα ακόλουθα διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου στις δύο λύσεις που ακολουθήθηκαν για διάφορες τιμές αποσβέσεως.



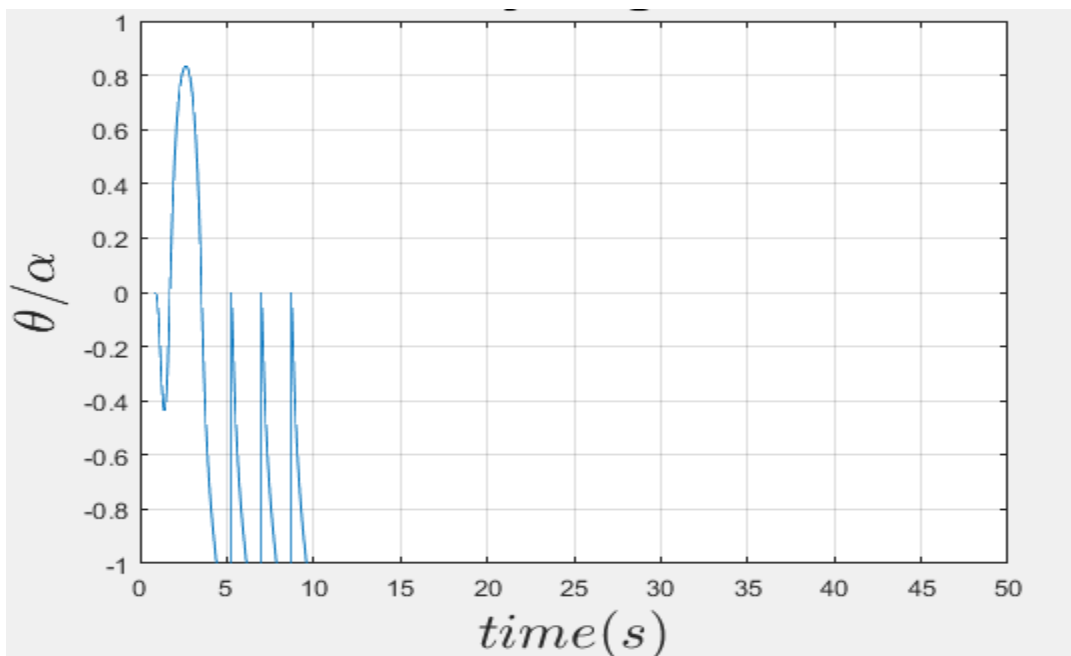
Εικόνα 55 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.54g κατά χχ-με συντελεστή απόσβεσης 5% για το άγαλμα Feminille



Εικόνα 56-Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.54g κατά χχ-με συντελεστή απόσβεσης 3%,0% αντίστοιχα για το άγαλμα Feminille

Η σύγκριση των δύο προτεινόμενων λύσεων μας οδηγεί εκ νέου στο συμπέρασμα πως όπως και στον ημιτονικό παλμό η ενδεικνυόμενη επιφάνεια εδάφους πρέπει να έχει περί το 4% συντελεστή απόσβεσης καθώς όσο προχωράει ο αριθμός των επαναφορών με φθίνουσα πορεία συντελεστή  $\zeta$  δεν έχουμε σωστά αποτελέσματα. Επίσης όσο μειώνεται το  $\zeta$  έχουμε μία λογική αύξηση του πλάτους ταλάντωσης με την ενέργεια να μειώνεται με μικρότερο ρυθμό αλλά μετά το  $\zeta=2.5\%$  παρατηρούμε ακανόνιστα αποτελέσματα απο το πρόγραμμα Abaqus. Ακολουθεί μία δοκιμή αντοχής του 1<sup>ου</sup> αγάλματος σε δύο παλμούς Ricker με αρχική ανατροπή του και επακόλουθη πιθανή σεισμική μόνωσή του ( μείωση αρ με αύξηση περιόδου ταλαντώσεως):

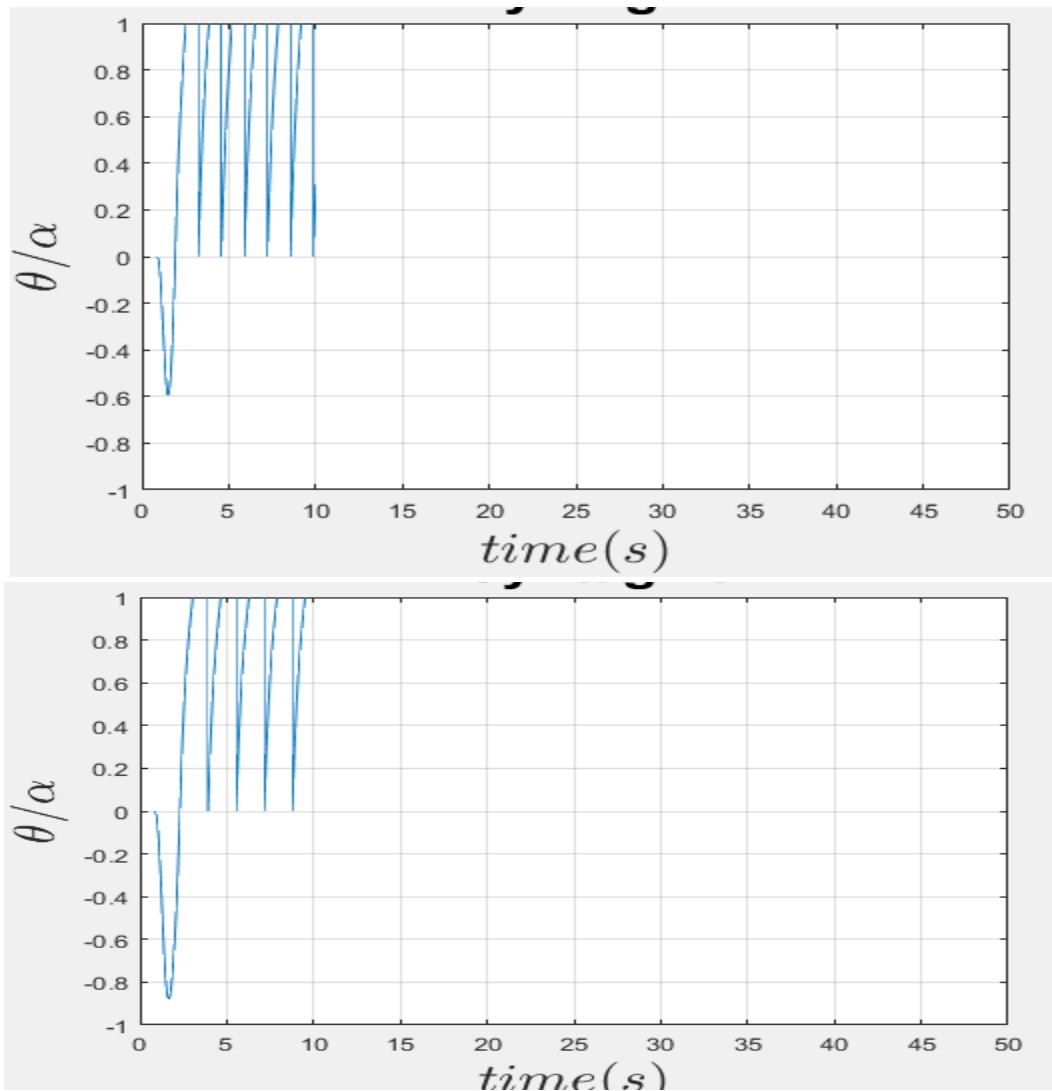
Παλμός Ricker με  $a_r=0.54g$  έχουμε ανατροπή στα 2.5 sec μετά από διπλή επαφή με το έδαφος όπως φαίνεται μία αρνητική στροφή(αριστερόστροφη) και μία θετική(δεξιόστροφη) για  $T=1.2.sec$  από 1 που άντεχε πριν.



Εικόνα 57 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.54g για το άγαλμα Feminille

Τώρα μειώνουμε ελάχιστα την συχνότητα  $f$  από 1 σε 0.8 Hz και έχουμε το εξής αποτέλεσμα απρόσμενο αρχικά καθώς παρατηρούμε εκ νέου μη σταθερότητα και στα 0.6g.

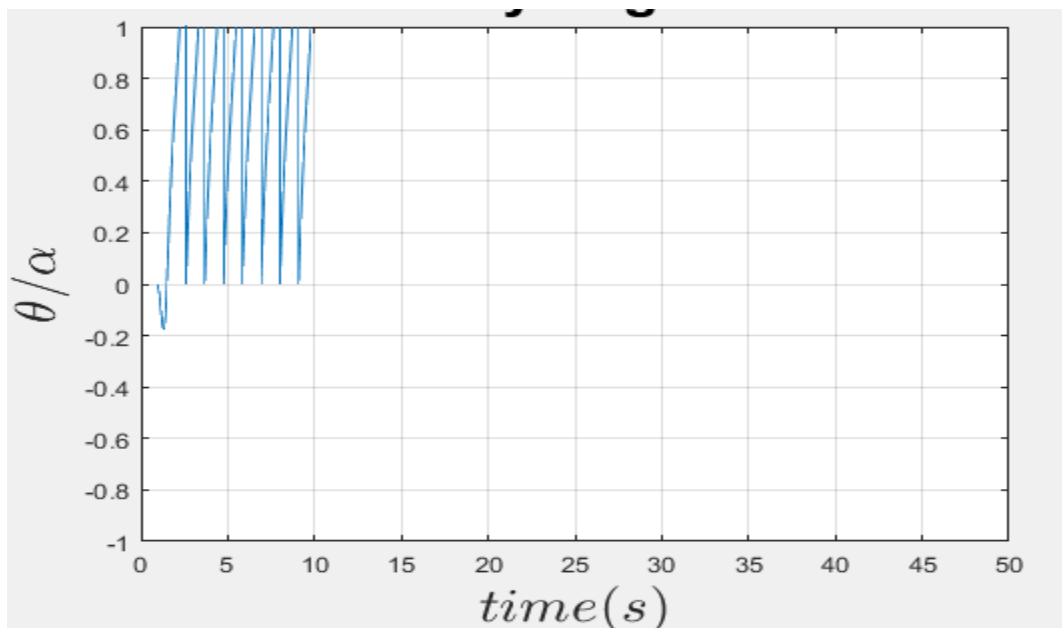




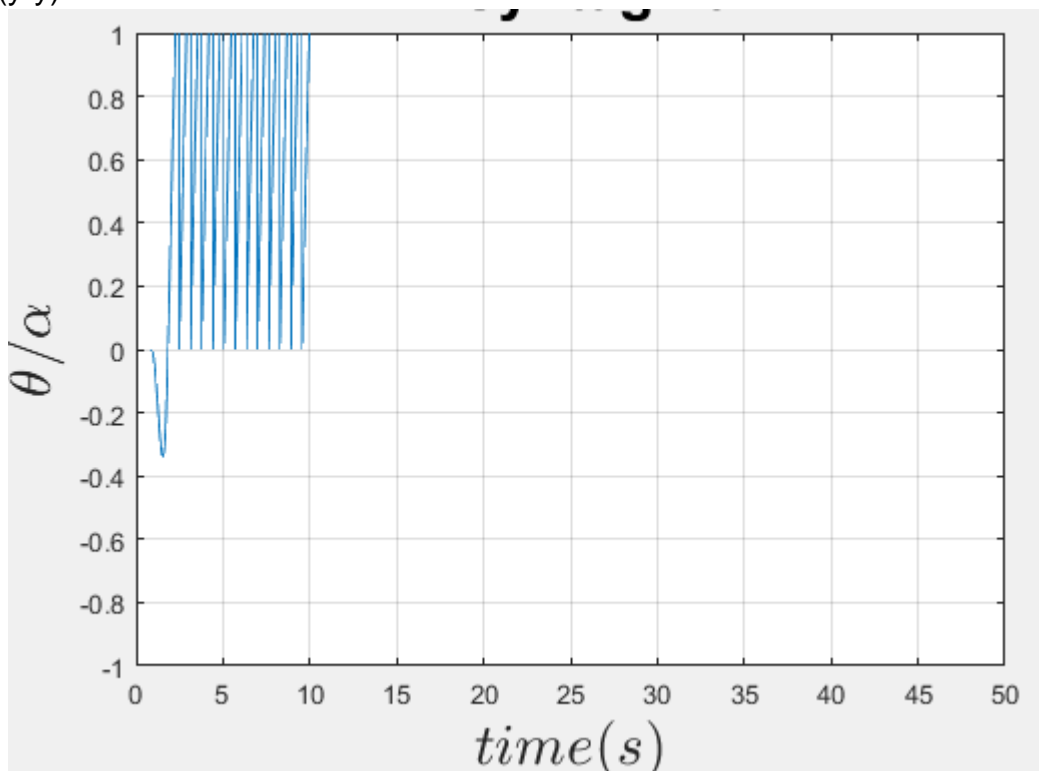
Εικόνα 58-Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.54g για το άγαλμα Feminille

Μολονότι αποδεδειγμένα από η σεισμική μόνωση είναι ευεργετική για τα μικρά μπλοκ ,για τα μεγάλα δεν ισχύει το ίδιο όπως φαίνεται και στο παράδειγμά μας .Το άγαλμα Feminille θεωρείται ικανοποιητικά μεγάλο αφού  $\omega r/p > 6$ . Ακολουθείται η ίδια πορεία για παλμό Ricker κατά τον  $\gamma\gamma$ .

Παλμός Ricker με amplitude  $a_p=0.27g$  και  $T_p=1s(\gamma-\gamma)$



$T_p=2s(y-y)$



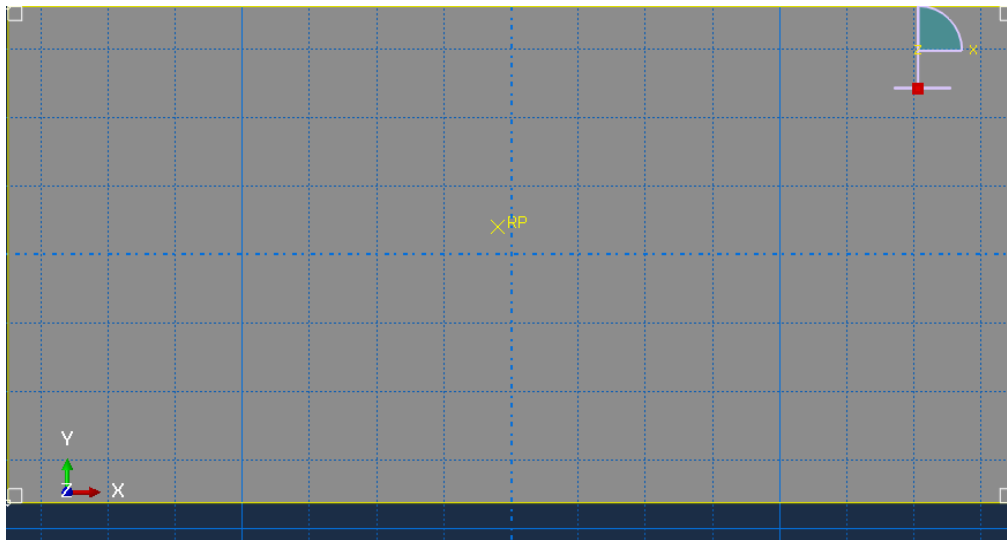
Εικόνα 59 : Διαγράμματα γωνίας στροφής-χρόνου για Ricker παλμό 0.27g για το άγαλμα Feminille

Επομένως υπάρχει επαλήθευση του γεγονότος ότι τα μεγάλα εκθέματα εξαντλούν την αντοχή τους μόνο αν είναι ελεύθερα εδραζόμενα χωρίς μονωτές αφού όπως απέδειξαν και οι Μακρής και Βασιλλείου το 2011 δεν αυξάνεται η αντοχή των άκαμπτων σωμάτων με αύξηση της περιόδου ταλαντώσεως ίσα ίσα όπως φαίνεται μειώθηκε ( στην αρχή έπεσε στα 1.4 sec ενώ στο τέλος φάνηκε ανατροπή στα 1.2 s) . Αυτό το είναι εξαιρετικά γεγονός χρήσιμο στην προστασία αρχαίων μνημείων καθώς με αυτό το εκτενέστατο παράδειγμα παρατηρούμε μείωση της ευστάθειας παρά την αύξηση της περιόδου ταλαντώσεως.Επομένως για μεγάλα αγάλματα είναι καλύτερο να εδράζονται ελεύθερα παρά να μονώνονται.

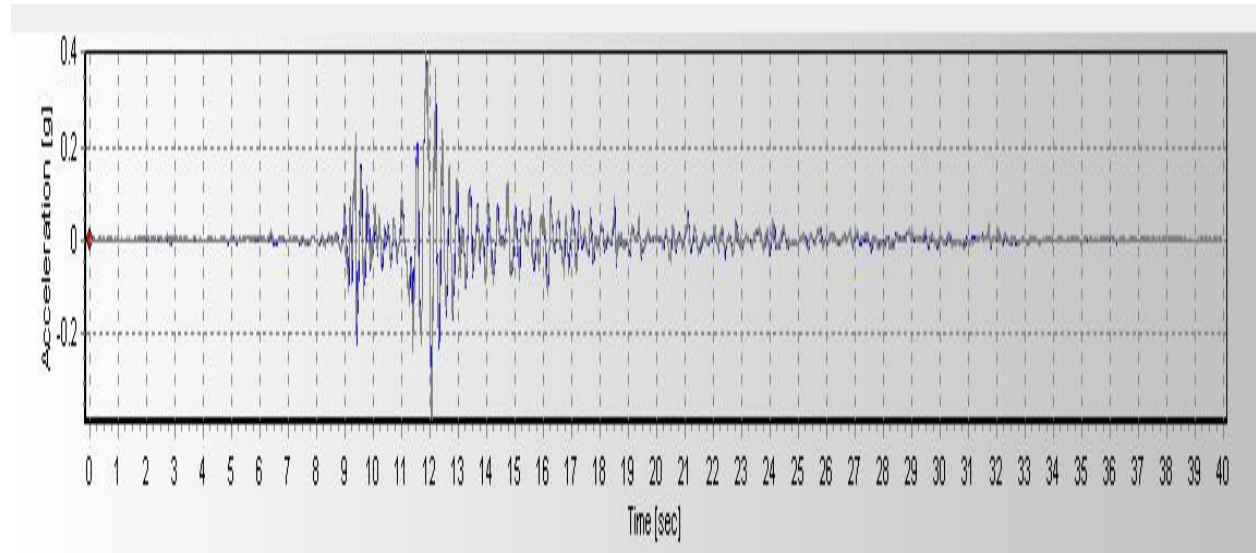
### 3.4 Σεισμική καταπόνηση των ασύμμετρων προτύπων

Ακολουθούν οι αποκρίσεις των ασύμμετρων προσομοιάτων στους σεισμούς Νο 312,313,316,317 όπως αυτοί ορίστηκαν στο εδάφιο 2.3.2

(x-x) άγαλμα Feminille διαγράμματα θ-χρόνου σε άγαλμα με εκκεντρότητες  $e_x=-9.75\text{mm}$  και  $e_y=19.95\text{mm}$ .

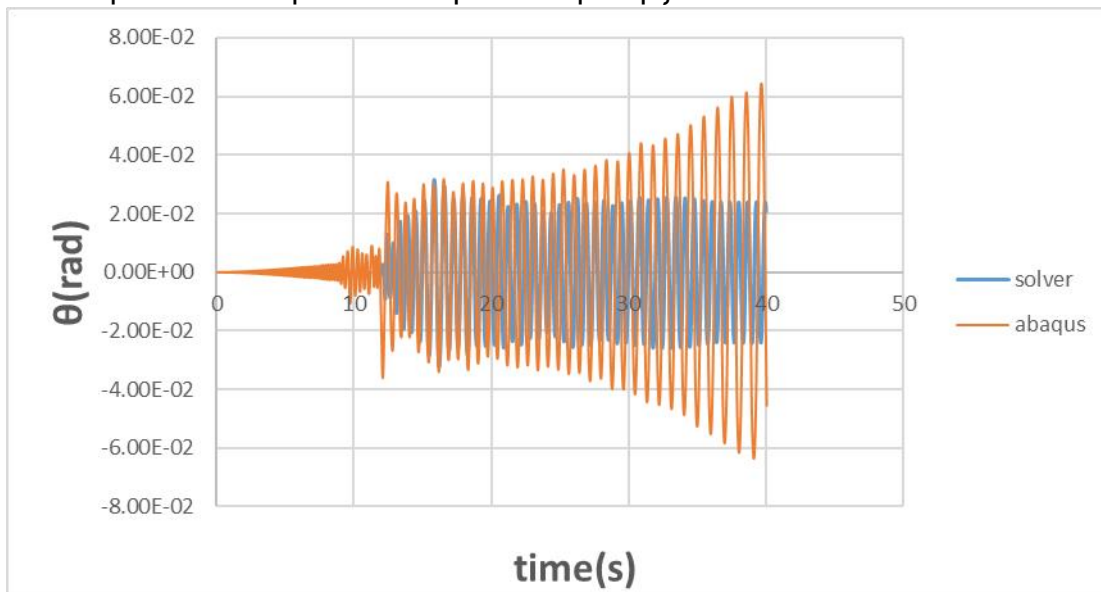


Εικόνα 60 : Εκκεντρότητες Feminille



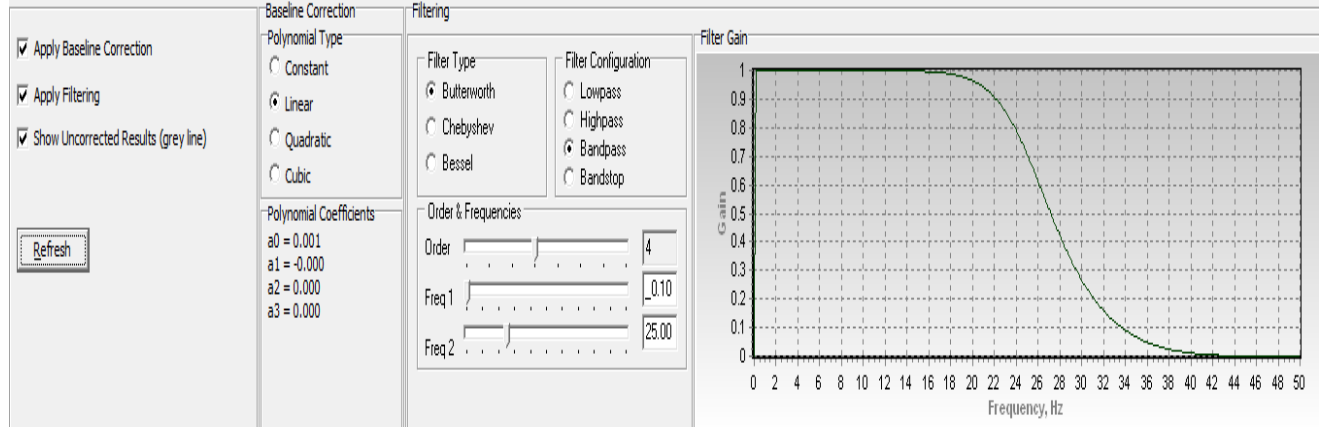
Εικόνα 61: Χρονοιστορία σεισμού Νο 313

Αρχικά κάναμε βελτιστοποίηση της αρχικής απόκρισης αφού το Abaqus εμφάνισε αυτό το αποτέλεσμα στον σεισμό Νο 313 για απόσβεση  $\zeta=5\%$



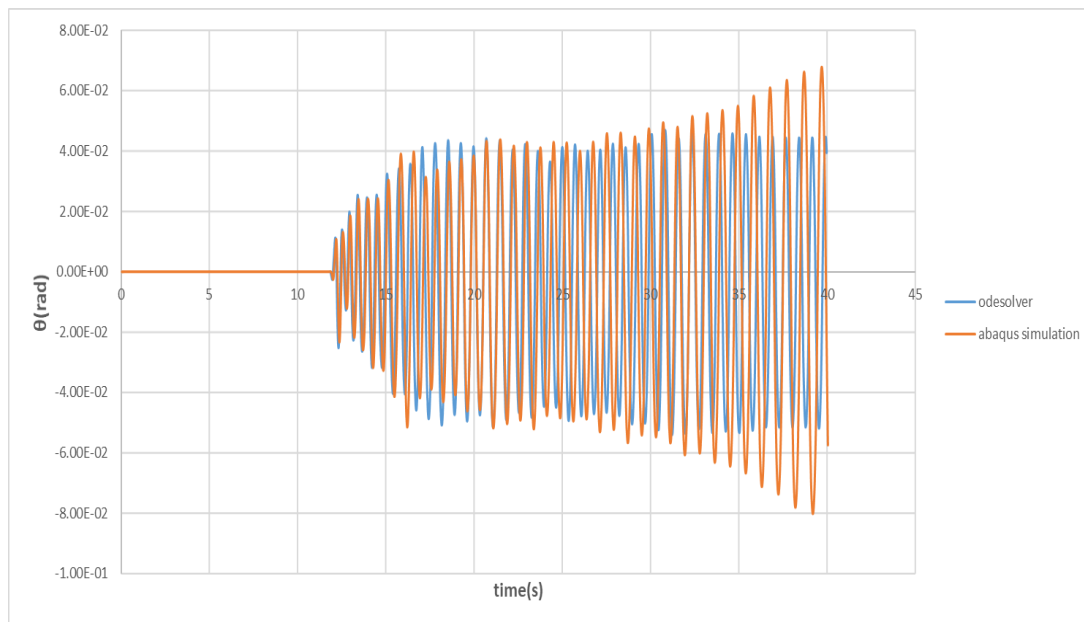
Εικόνα 62 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό Νο313(xx) για το άγαλμα Feminille

με τις έτοιμες εντολες του Seismosignal( default) –Linewidth δηλαδή - και είχαμε την ανωτέρω(Εικόνα) απόκριση. Τα διαγράμματα που προέκυψαν τελικά είναι τα εξής :



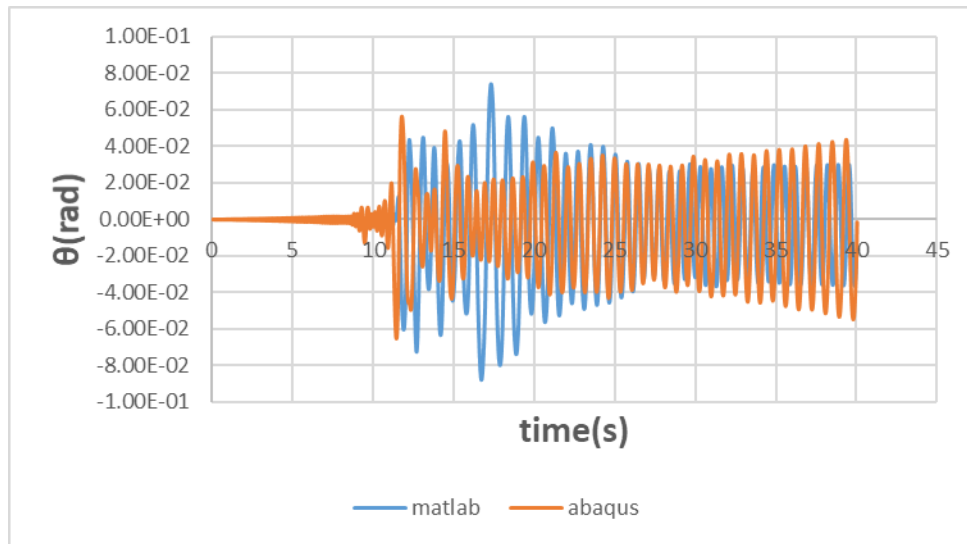
Εικόνα 63: Φιλτράρισμα που έγινε χάρη στα προκαθορισμένα σημεία του Seismosignal

και τελικά είχαμε το εξής αποτέλεσμα μετά την απαραίτητη επιπεδοποίηση της διέγερσης του σεισμού:



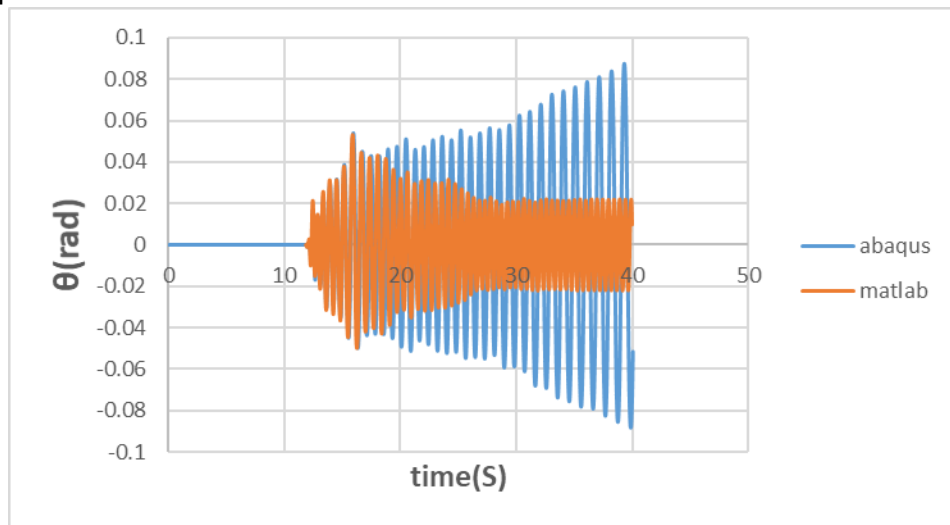
Εικόνα 64: Διάγραμμα αναπαράστασης απόκριση σε σεισμό κατά τον 312 του αγάλματος Feminille για  $\zeta=3.78\%$  και  $\eta=1$

το οποίο καταδεικνύει σωστή προσέγγιση και του ασύμμετρου αγάλματος δεχόμενοι την ακεραιότητα του odesolver. Περιγράφοντας την απόκριση του αγάλματος έχουμε ότι καθώς το άγαλμα υπόκειται στον σεισμό του οποίου η χρονιοιστορία αποτυπώνεται στο κεφάλαιο 2 αρχίζει να λικνίζεται χωρίς να υφίστανται φαινόμενα αναπήδησης η ολίσθησης καθώς τόσο ο συντελεστής απόσβεσης είναι ανταποκρινόμενος στην πραγματικότητα και παίρνει τιμές (2.5-5%) όσο και η επιτάχυνση είναι σχετικά μικρή με μέγιστη τιμή  $a_g=0.46g$ .



Εικόνα 65 : Διάγραμμα  $\theta/\alpha$ -χρόνος με συντελεστή απόσβεσης 3.78% και συντελεστή αποκατάστασης  $\eta=1$  για το άγαλμα Feminille υποβαλλόμενο σε στον σεισμό No317

και μετά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης της δόνησης θα έχουμε το εξής θετικό αποτέλεσμα:



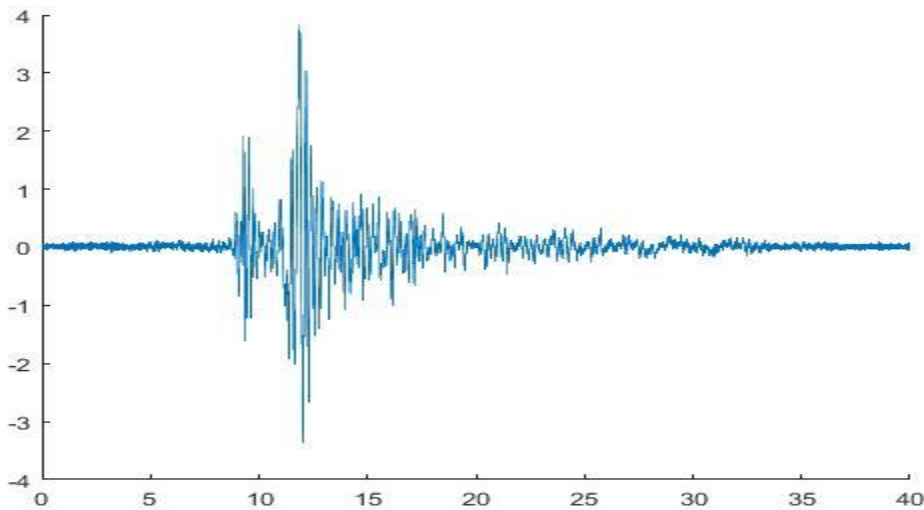
Εικόνα 66: Διάγραμμα  $\theta/\alpha$ -χρόνος με συντελεστή απόσβεσης 3.78% και συντελεστή αποκατάστασης  $\eta=1.5$  για το άγαλμα Feminille υποβαλλόμενο στον σεισμό No317

Όπως φαίνεται με αύξηση του συντελεστή αποκατάστασης από 1 σε 1.5 έχουμε αύξηση του ρυθμού της μείωσης της κινητικής ενέργειας και το σώμα περιστρέφεται με μεγαλύτερη δυσκολία πραγματοποιώντας εναλλαγές από και προς θετικές δεξιόστροφες στροφές. Λόγω της πολυπλοκότητας των παραμέτρων καταγράφουμε κατωτέρω της κίνηση του αγάλματος Fanciulla ερευνώντας την επιρροή τόσο της μεταβολής του συντελεστή απόσβεσης με σταθερό η (συντελεστή αποκατάστασης, όσο και με μεταβολές στον συντελεστή αποκατάστασης για σταθερό ζ).

Συγκεντρωτικά για το άγαλμα Fanciulla θα είναι ορισμένα σημαντικά στοιχεία :

$$\begin{array}{llll} \alpha_1 = 0.3307\text{rad} & \alpha_2 = 0.2907 \text{ rad} & R_2=0.7160\text{m} & R_1=0.7253 \text{ m (x-x)} \\ \alpha_1= 0.2767 \text{ rad} & \alpha_2=0.2387 \text{ rad} & R_2=0.7060\text{m} & R_1=0.7131 \text{ m (y-y)} \end{array}$$

Αρχίζοντας τις αναλύσεις έχουμε τον σεισμό Νο312 με την ακόλουθη χρονιοστορία :



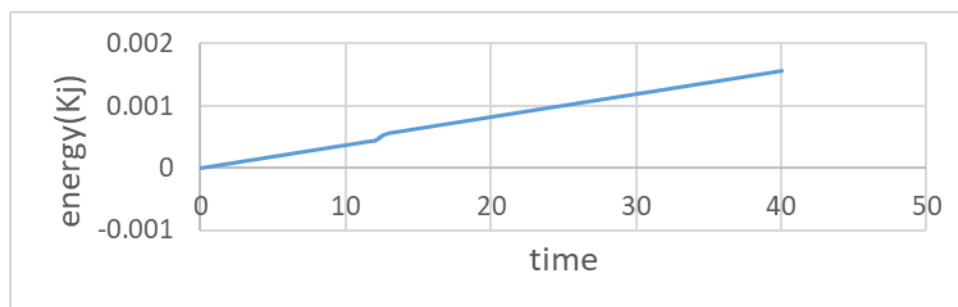
Εικόνα 67: Χρονιοστορία σεισμού Νο312 στον άξονα yy η επιτάχυνση εδάφους σε m/s<sup>2</sup> και τετμημένη σε sec

Μέγιστο  $a_g$  απαντάται στα 12 sec και είναι  $a_g \max=3.9117\text{m/s}^2$

Έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα γωνίας προς χρόνο όπου η στροφή προκύπτει από την μετακίνηση του άνω κόμβου αφαιρούμενη από την μετακίνηση του κόμβου της βάσεως διαιρουμένου κατά 1.6178 m ώστε να προκύψει η απαιτούμενη στροφή και εν τέλει συγκρίνεται με την εξαγόμενη στροφή από την γλώσσα προγραμματισμού matlab.

1<sup>η</sup> διέγερση κατά χχ(No312) με  $\theta_{max}$  όπως προκύπτει από το Matlab είναι 0.0053 rad σχετικά μικρή που έχει να κάνει τόσο με τις ραδιότητες  $\alpha_2 = 0.2907$  rad  $\alpha_1 = 0.3307$  rad όσο και με τα γεωμετρικά του στοιχεία μεγάλα R τα οποία συνεπάγονται και μεγάλο λόγο  $\omega/\rho$ . Που υποδεικνύουν ότι δεν είναι και αρκετά λυγνό το σώμα και έτσι με μικρές επιταχύνσεις είναι δύσκολο να διεγερθεί και όπως τονίστηκε και στις συμμετρικές αναλύσεις προκύπτει μεγαλύτερη σεισμική αντοχή που είναι ανάλογη του  $R^2$ . Όπως φάνηκε και από τους παλμούς έχουμε μια ικανοποιητική σύγκριση στις αναλύσεις τόσο στο συμμετρικό όσο και στο ασύμμετρο προσομοίωμα. Η μοναδική διαφορά είναι πως τώρα αλλάζει το κρίσιμο πλάτος το οποίο επηρεάζει και την εν γένει συμπεριφορά του σώματος. Στην πραγματικότητα όμως λόγω μικρής εκκεντρότητας όπως τονίστηκε στο 3.2 δεν διαδραματίζονται καθοριστικές αλλαγές.

Αποτέλεσμα για  $\eta = 1$  και  $\zeta = 4\%$

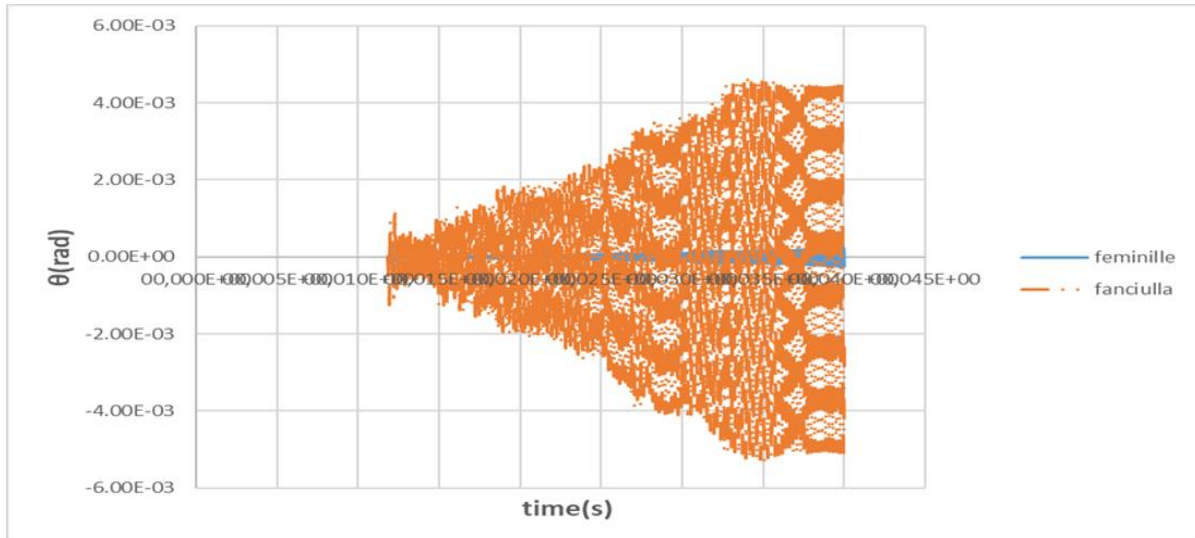


Εικόνα 68 : Μείωση ενέργειας για τον σεισμό No312 για το άγαλμα Fanciulla

Παρατηρούμε πως έχουμε γραμμική μεταβολή της ενέργειας γεγονός λογικά αφού έχουμε μόνο ένα βαθμό ελευθέριας παρά την πολυπλοκότητα του συστήματος.

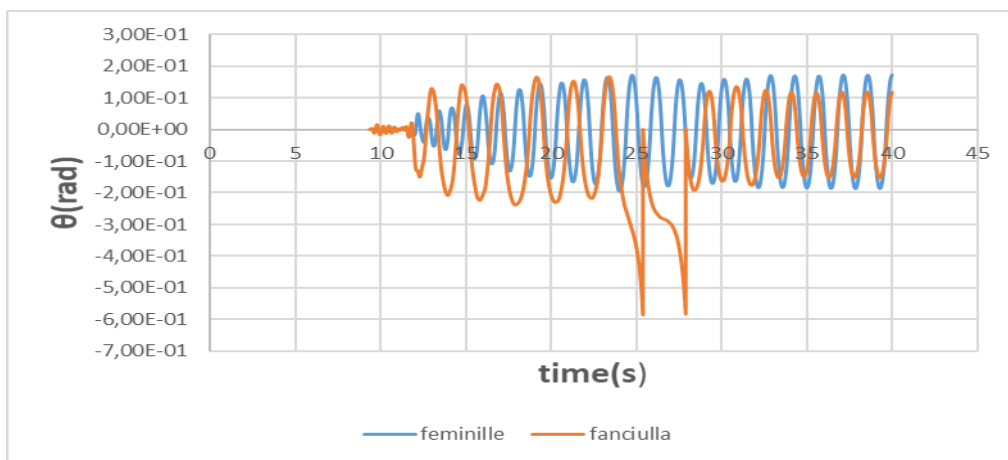
### 3.4.1 Σύγκριση συμπεριφοράς ασύμμετρων αγαλμάτων στους σεισμούς 312,313,317





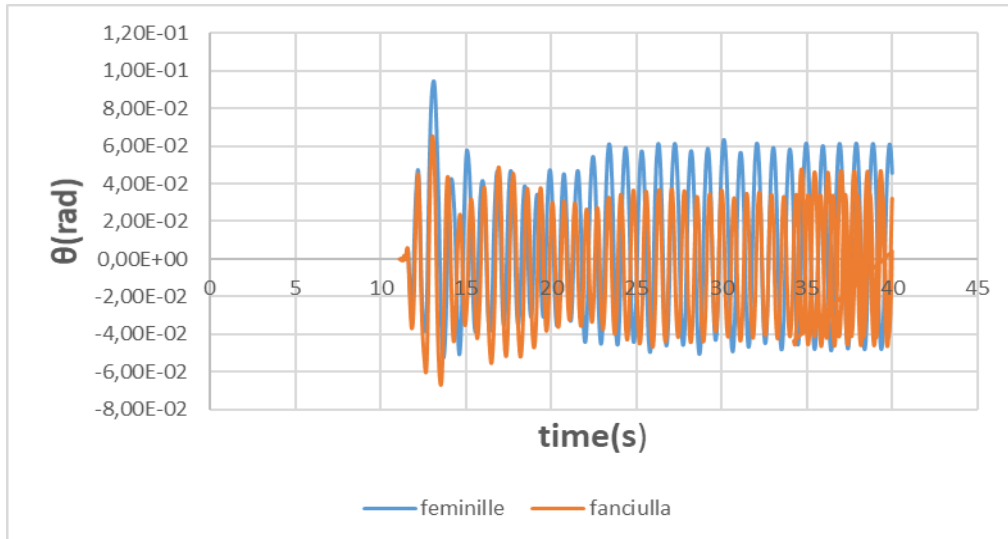
Εικόνα 69: Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό Νο312 για τα αγάλματα Feminille και Fanciulla -ασύμμετρα

Παρατηρούμε πως το άγαλμα Fanciulla λικνίζεται αρκετά εντονότερα σε σύγκριση με το άγαλμα feminille (Η απάντηση σε αυτό αποδίδεται τόσο στην γεωμετρία του καθώς έχει μικρότερα  $R_1$  και μικρότερες ραδινότητες ( λυγηρότερο). Επομένως είναι λογικό να λικνίζεται σε μικρότερες επιταχύνσεις εδάφους αφού έχει και μικροτερες ραδινότητες και έτσι είναι πιο εύκολο να ανατραπεί. Αυτό το θεώρημα φαίνεται να επεκτείνεται και στα ασύμμετρα αγάλματα αφού οι εκκεντρότητες είναι μικρές .



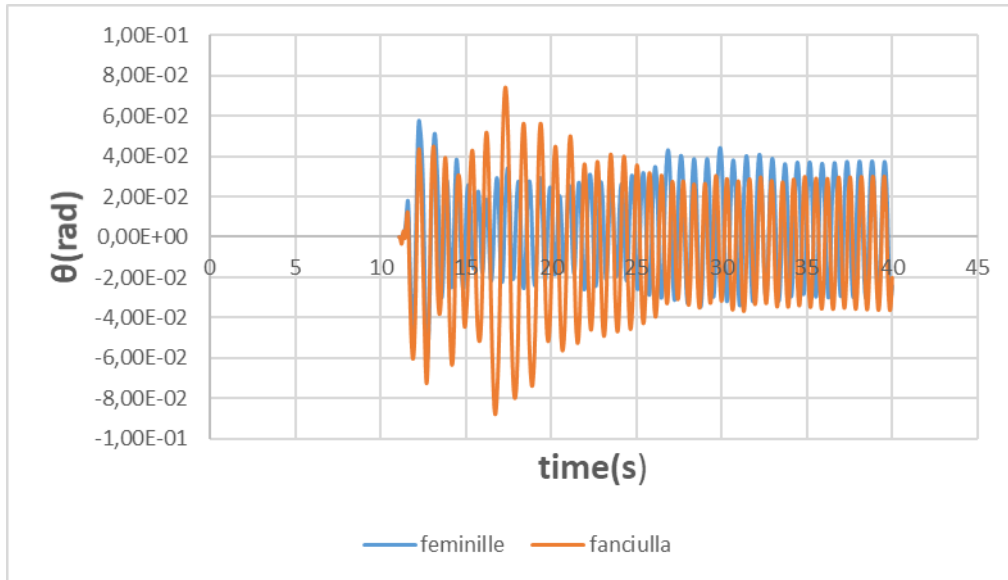
Εικόνα 70 : Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό Νο313 για τα αγάλματα Feminille και Fanciulla -ασύμμετρα

Όπως φαίνεται από το άνωθεν διάγραμμα το δεύτερο άγαλμα με  $\alpha_{2critical}=0.2906rad$  είναι πιθανότερο να ανατραπεί σε σχέση με το πρώτο άγαλμα με  $\alpha_{2critical}=0.4588 rad$  και για αυτό τον λόγο βλέπουμε αυτή την συμπεριφορά με την Feminille να ανατρέπεται σε έναν σχετικά ισχυρό σεισμό αφού  $a_{max}=0.6g$  (έχουμε πολλαπλασιάσει τις τιμές της χρονοιστορίας με 1.5 λόγω του 1<sup>ου</sup> αγάλματος όπως τονίστηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο).



Εικόνα 71: Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό No316 για τα αγάλματα Feminille και Fanciulla

Παρατηρούμε όμοια συμπεριφορά μιας και τόσο οι ραδινότητες όσο και οι ακτινικές ραδινότητες που διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στην σεισμική απόκριση είναι σχετικά όμοιες. ( $\alpha_{critical}(yy)-feminille=0.21496rad$  και  $\alpha_{critical}(yy)-fanciulla=0.2387rad$ ). Άρα συμπεραίνουμε πως γενικότερα δύο ασύμμετρα εκθέματα με ίδιες αυτές τις δύο παραμέτρους θα έχουν όπως φαίνεται παρόμοια συμπεριφορά στον ίδιο παλμό-σεισμό. Αυτό αποδεικνύεται και στο επόμενο διάγραμμα για τον σεισμό No317 (yy).



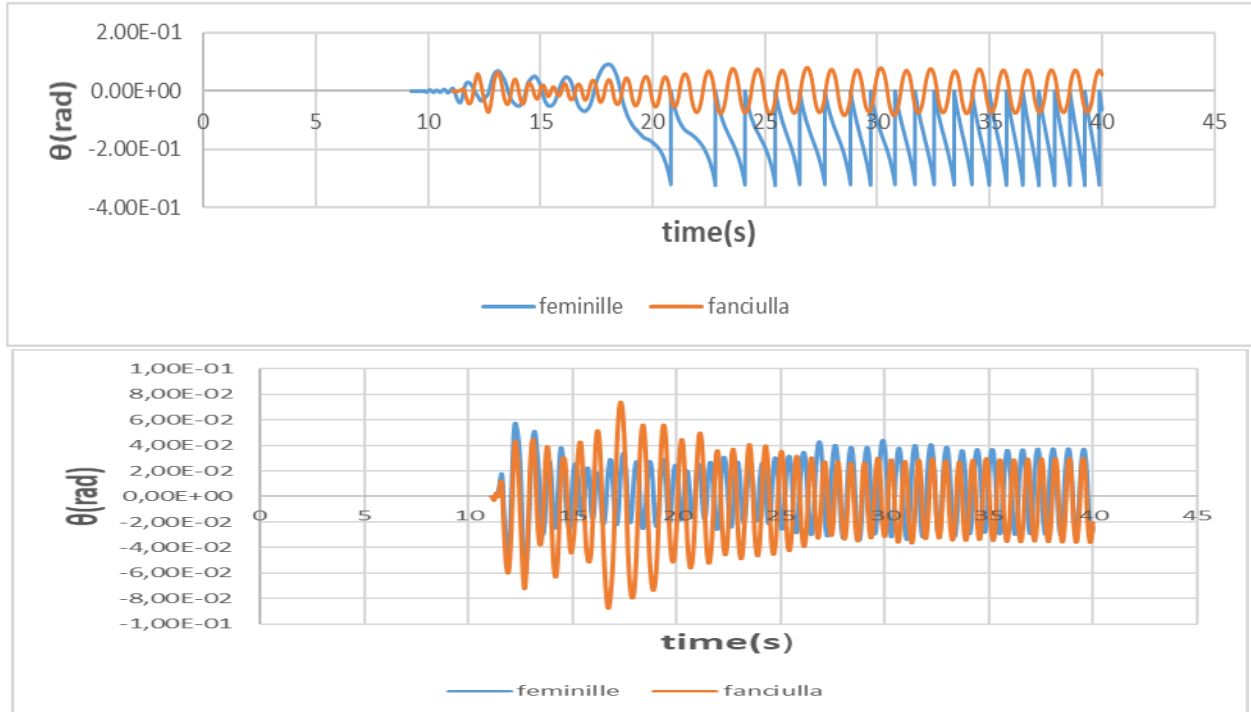
Εικόνα 72: Διάγραμμα γωνίας στροφής-χρόνου για σεισμό No317 για τα αγάλματα Feminille και Fanciulla

Καθώς αρχίζει ο σεισμός και επέρχεται ο λικνισμός όταν ισχύει για κάθε άγαλμα η σχέση  $\mu_{στ} > b_{crit}/h_{cm}$  έχουμε μια παρόμοια συμπεριφορά σε αυτή την διέγερση. το άγαλμα fanciulla μόνον φαίνεται να εισέρχεται σε μεγαλύτερα πλάτη  $\theta$  ( $\max\theta=0.08\text{rad}$ ) καθώς τώρα κατα γ έχει μειωμένη ραδιότητα  $\rightarrow$  πιο λυγηρό. Παρ όλα αυτά δεν φαίνεται να επηρεάζεται η αστάθειά του και έχουμε ως φαίνεται μια καλή προσέγγιση εκ νέου από το abaqus προς τον odesolver. Άμα παρατηρήσουμε την απόκριση του αγάλματος feminille στον σεισμό κατα γγ όπου είχε ραδιότητα  $\alpha_1=0.2406 \text{ rad}$  και εν τέλει ανέβηκε στο ασύμμετρο στην noncritical έννοιά του που το ανέτρεπε σε  $\alpha_{2crit}=\text{Arctan}(b_{2noncrit}/h_{cm})=0.2659 \text{ rad}$  θα κατανοήσουμε την επίπτωση που έχει η ασυμμετρία στο άγαλμα αυτό. Χάρη στην ασυμμετρία που αποτυπώνεται σε μέτρα στην κάτωθι εικόνα το άγαλμα Feminille.

C.M.(-0.00975,0.01995,0.7383)

Εικόνα 73: Ασυμμετρία Κ.Β. Feminille

τελικά επιτεύχθη να παραμείνει ακέραιο στον σεισμό. Ξαναυπενθυμίζεται για χάριν του αναγνώστη:



Εικόνα 74: Εμφανής διαφορά συμπεριφοράς στον σεισμό

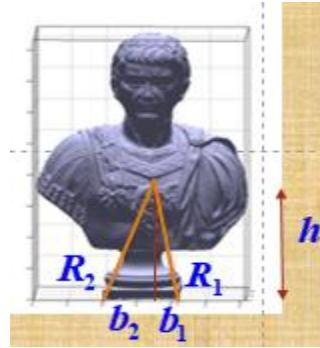
Αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. οι τρόποι δηλαδή της μετακίνησης του Κ.Β. ώστε ένα λυγηρό σώμα που ανατρέπεται ευκολότερα σε παλμούς και σεισμούς να μετατραπεί σε στοιβαρότερο με ειδικά μηχανήματα μετακίνησης του Κ.Β. Μια ενδεικνυόμενη λύση που αποκολλουθείται είναι η τοποθέτηση μεγάλου πεδίου, οπότε το σώμα μετατρέπεται σε διπλό και έχουμε άλλο γεωμετρικό υπόβαθρο επομένως.

### 3.5 Επιρροή συντελεστή αποκατάστασης σε κανονικούς σεισμούς και σύγκριση συμμετρικών ασύμμετρων εκθεμάτων

Ακολουθούν διάφορες σεισμικές αποκρίσεις σε σεισμούς κανονικών καταγραφών για να παρακολουθηθεί η επιρροή του η (συντελεστού αποκατάστασης) όταν χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις προσδιορισμού του για τα ασύμμετρα εκθέματα όπως τις παρείχε ο Ψυχαρής το 1990. Δηλαδή θα είναι όχι οι εξισώσεις Housner αλλά αναφερόμενοι σε ασυμμετρία :

$$\begin{aligned} \eta_1 &= (1 / (I_{01} / m + R_1^2)) * ((I_{01} / m + R_2^2) - b * R_2 * \sin(a_2)) \\ \eta_2 &= (1 / (I_{02} / m + R_2^2)) * ((I_{02} / m + R_1^2) - b * R_1 * \sin(a_1)) \end{aligned} \tag{23}$$

Όπου  $I_{o1}, I_{o2}$  οι ροπές αδρανείας ως προς τα σημεία  $O, O'$ .  $b = b_1 + b_2$  και τα μεγέθη με δείκτη 1,2 αποτυπώνονται καλύτερα στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 75: Ασύμμετρη προτομή αγάλματος

Αρχικά για χάριν της ανάλυσης ξαναυπενθυμίζονται τα εξής σημαντικά :

- **Feminile με εκκενρότητα (-0.00975, 0.01995)**

x-x

$$b_2(\text{critical}) = 0.3647\text{m} \rightarrow a(\text{critical}) = 0.4588\text{rad} \rightarrow R(\text{critical}) = 0.8235\text{m}$$

$$b_1(\text{noncritical}) = 0.3842\text{m}$$

y-y

$$b_1(\text{critical}) = 0.1612\text{ m} \rightarrow a(\text{critical}) = 0.2149\text{ rad} \rightarrow R(\text{critical}) = R_1 = 0.755\text{m}$$

$$b_2(\text{noncritical}) = 0.2011\text{ m}$$

- **Fanciulla με εκκενρότητα (-0.01515, -0.01395)**

x-x

$$b_2(\text{critical}) = 0.2052\text{m} \rightarrow a(\text{critical}) = 0.2906\text{ rad} \rightarrow R(\text{critical}) = R_2 = 0.716\text{ m}$$

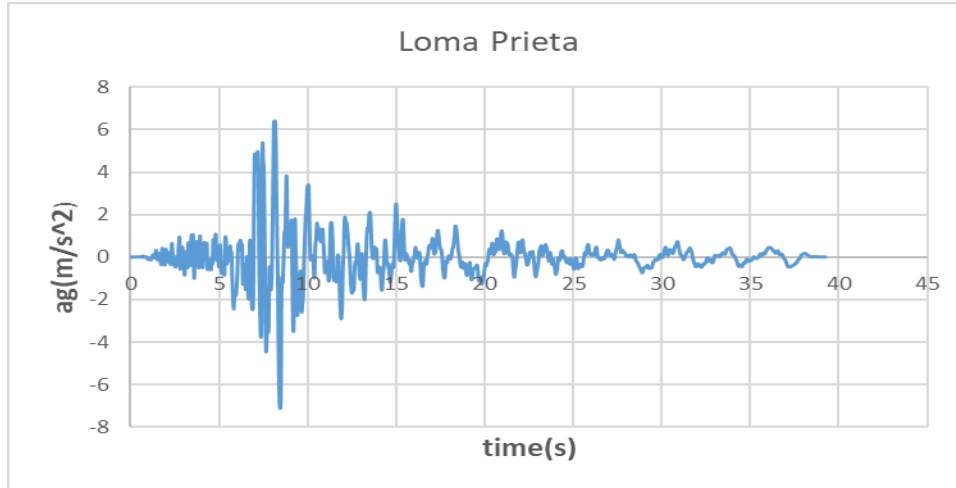
$$b_1(\text{noncritical}) = 0.2355\text{m}$$

y-y

$$b_2(\text{critical}) = 0.1669\text{m} \rightarrow a(\text{critical}) = 0.2387\text{ rad} \rightarrow R(\text{critical}) = R_2 = 0.706\text{m}$$

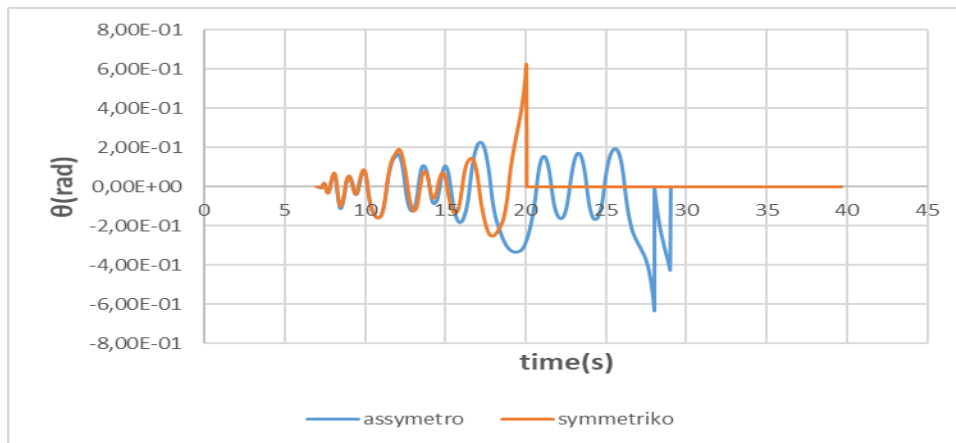
$$b_1(\text{noncritical}) = 0.1948\text{m}$$

Πρώτον έχουμε τον σεισμό με τα ακόλουθα στοιχεία (xx) –**FEMINILLE Πρώτα**  
**PACIFIC ENGINEERING AND ANALYSIS STRONG-MOTION DATA**  
**LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, HOLLISTER DIFF ARRAY, 255 με την ακόλουθη**  
 χρονοιστορία :



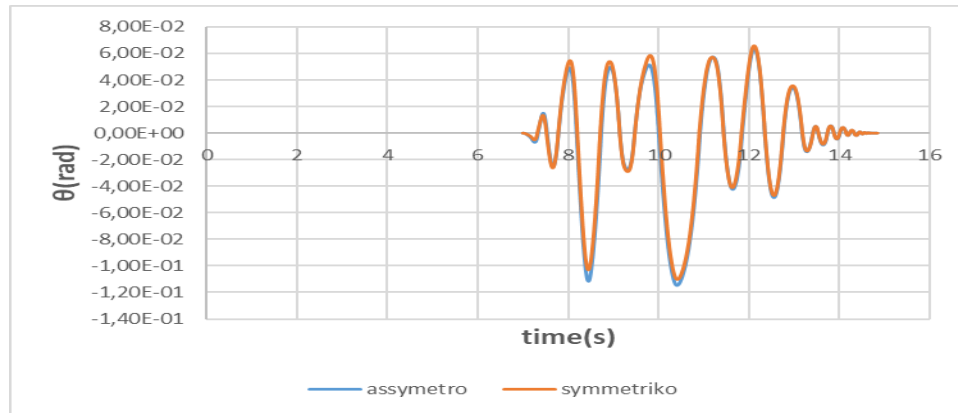
Εικόνα 76:Χρονοιστορία Loma Prieta

Για  $\eta_1, \eta_2=1$  θα είναι η εξής απόκριση για το άγαλμα Feminille για συμμετρικό και ασύμμετρο:



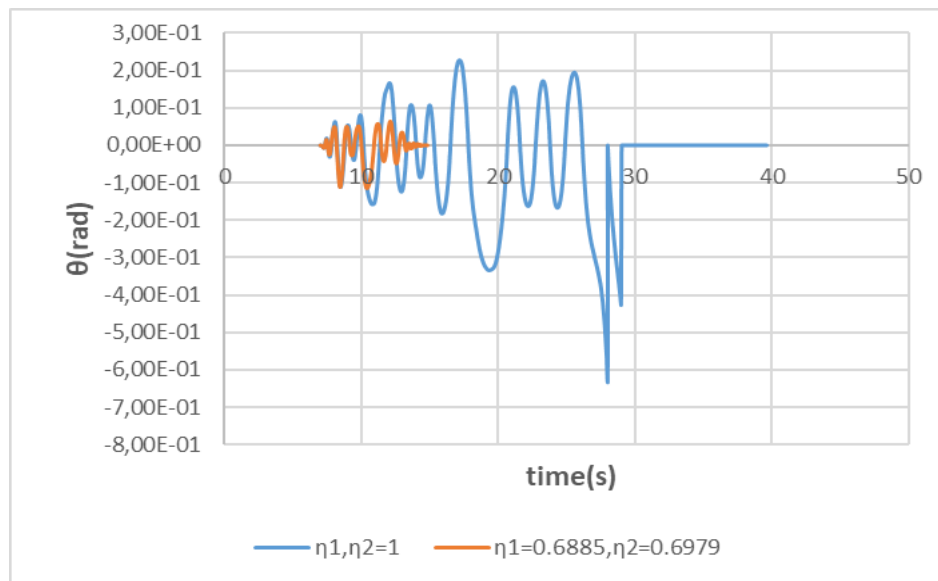
Εικόνα 77:Διάγραμμα  $\theta$ -t για τον σεισμο Loma Prietta με  $\eta_1, \eta_2=1$  για συμμετρικό και ασύμμετρο προσομοίωμα(xx)

Με  $\theta_{max}$  να προκύπτει για το συμμετρικό 0.3861rad .Τώρα υπολογίζοντας την πραγματική τιμή συντελεστών αποκατάστασης από τους τύπους της (23) ως  $\eta_1=0.6979$  και  $\eta_2=0.6885$  θα έχουμε εντελώς διαφορερική απόκριση όπως φαίνεται:



Εικόνα 78:Διάγραμμα  $\theta$ - $t$  για τον σεισμό Loma Prietta με  $\eta_1=0.6885$  και  $\eta_2=0.6979$  για συμμετρικό και ασύμμετρο προσομοίωμα(xx)

Με την ακριβή μείωση του συντελεστή αποκατάστασης είχαμε για το συμμετρικό άγαλμα  $\theta_{max}=0.1102\text{rad}$  και για το ασύμμετρο είχαμε βλέποντας και αρκετά καλή σύγκλιση τους(λόγω μικρής εκκεντρότητας)  $\theta_{max}=0.1147\text{rad}$  .Επομένως με μείωση του συντελεστή αποκατάστασης έχουμε εμφανή μείωση των πλατών ταλάντωσης ( $\theta \downarrow$ ) για τον ίδιο σεισμό .Πιο εμπειριστατωμένα θα είναι για το ασύμμετρο προσομοίωμα :



Εικόνα 78:Διάγραμμα  $\theta$ - $t$  για τον σεισμό Loma Prietta με  $\eta_1=0.6885$ ,  $\eta_2=0.6979$  και  $\eta_1, \eta_2=1$  για ασύμμετρο προσομοίωμα(xx)

Επομένως πρώτη εκτίμηση είναι η μείωση των γωνιών στροφής  $\theta$  και την υψηλή ευαισθητοποίηση του αγάλματος Feminille με μείωση των  $\eta$  του στο ασύμμετρο μοντέλο όπως και η διαφορά στην αντίδραση των σωμάτων όταν λύνονται με τους συντελεστές αποτάστασης της εξίσωσης (23) αφού για  $\eta_1, \eta_2=1$  τόσο το ασύμμετρο όσο και το συμμετρικό προσομοίωμα ανατρέπονται ,με το συμμετρικό να ανατρέπεται πιο

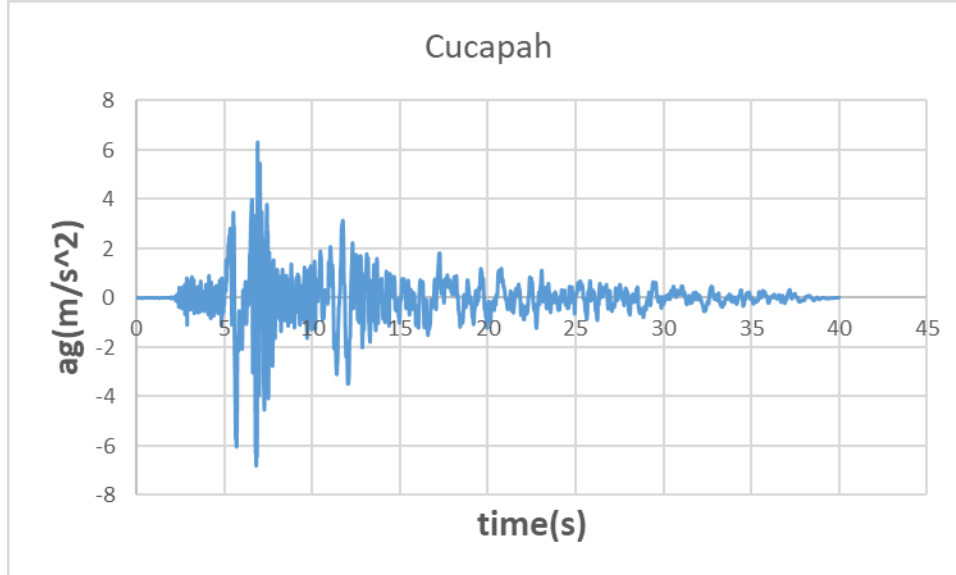
εύκολα.Επομένως χρειαζόμαστε πιο μικρούς η υπολογισμένους από την (23)και επίσης παρατηρούμε καλύτερη συμπεριφορά για το ασύμμετρο άγαλμα για  $\eta=1$ .

2<sup>ο</sup> παράδειγμα εκ νέου κατα xx

έχουμε τον σεισμό με τα ακόλουθα στοιχεία :

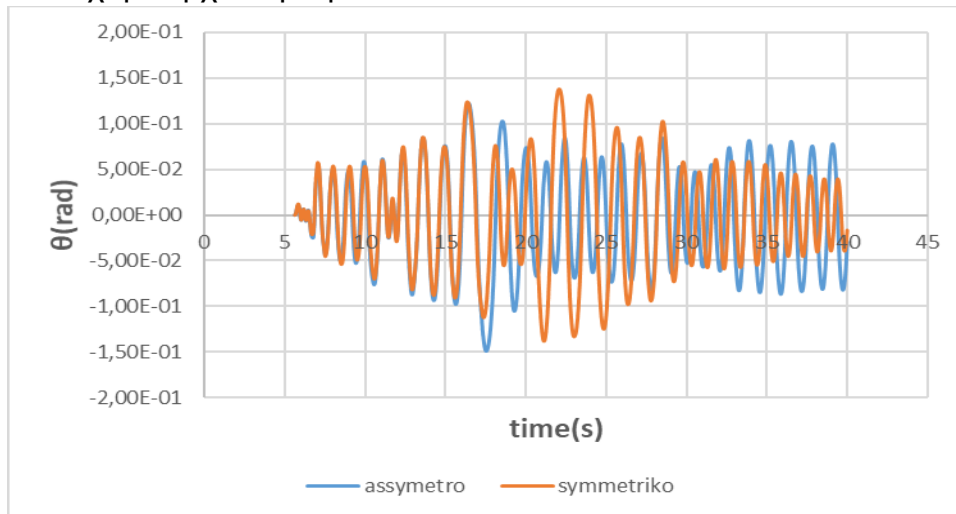
PACIFIC ENGINEERING AND ANALYSIS STRONG-MOTION DATA

IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, CUCAPAH, 085 με την ακόλουθη χρονιοιστορία:



Εικόνα 79: Χρονιοιστορία Imperial Valley

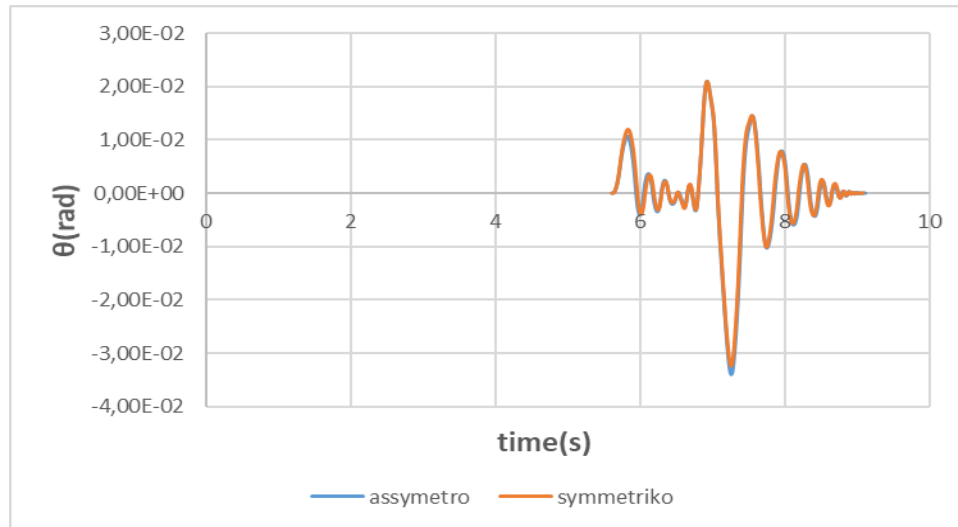
Τώρα θα έχουμε τα εξή αποτελέσματα για το συμμετρικό και ασύμμετρο άγαλμα Feminille ενώ είχαμε αρχικά  $\eta_1=\eta_2=1$ :



Εικόνα 80:Διάγραμμα  $\theta$ -t για τον σεισμό Imperial Valley με  $\eta_1, \eta_2=1$  για συμμετρικό και ασύμμετρο προσομοίωμα για το άγαλμα Feminille(xx)

Έδω έχουμε  $\theta_{max}=0.1488\text{rad}$  ενώ με τον πλήρη υπολογισμό των συντελεστών αποκατάστασης έχουμε πάλι ως  $\eta_1=0.6885$  και  $\eta_2=0.6979$  αφού είναι το ίδιο άγαλμα:

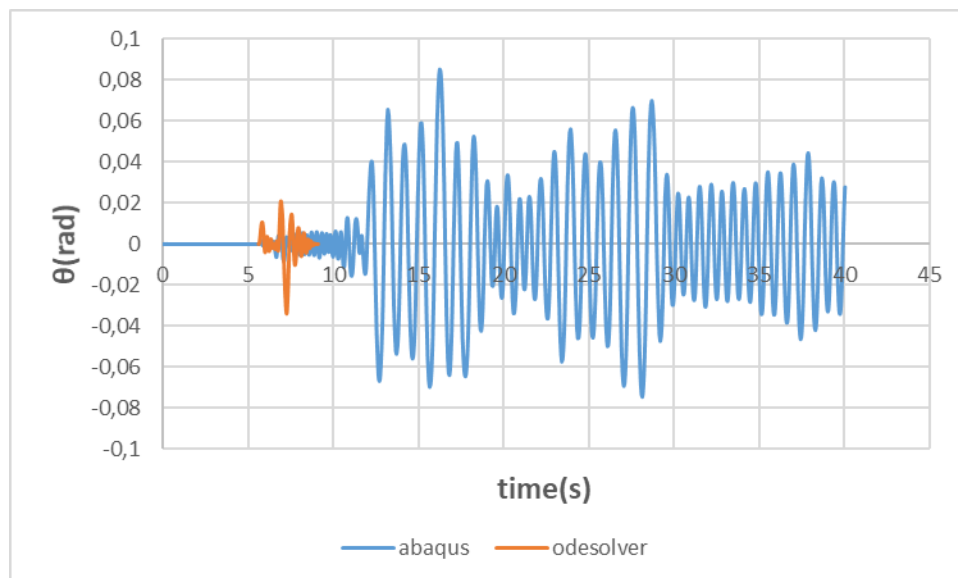




Όπου έχουμε αναλυτικά για το συμμετρικό Feminille  $\theta_{max}=0.0324\text{rad}$  ενώ για το ασύμμετρο έχουμε  $\theta_{max}=0.0340\text{ rad}$  .Δηλαδή έχουμε μια μείωση στις γωνίες ταλάντωσης της τάξης  $\epsilon_1=78.22\%$  και  $\epsilon_2$  για τα ασύμμετρα= $77.15\%$  .**Οι παραπάνω συγκρίσεις έγιναν μέσω του Odesolver**.Πραγματοποιούμε επίσης σύγκριση με το Abaqus και για τους δύο σεισμούς όπου έχουμε ορίζει  $\zeta=3.5\%$  που είναι σύμφωνα και με τα προηγούμενα καλή τιμή.

Σεισμός Chucarah κατά xx συγκρίνοντας την απόκριση του Feminille για  $\eta=1$  και  $\eta$  υπολογιζόμενα στον Odesolver και το Abaqus.

α) $\eta=0.85$  (μέσο όρο τοποθετήσαμε καθώς το Abaqus δεν δίνει δυνατότητα για  $\eta_1,\eta_2$  διαφορετικά



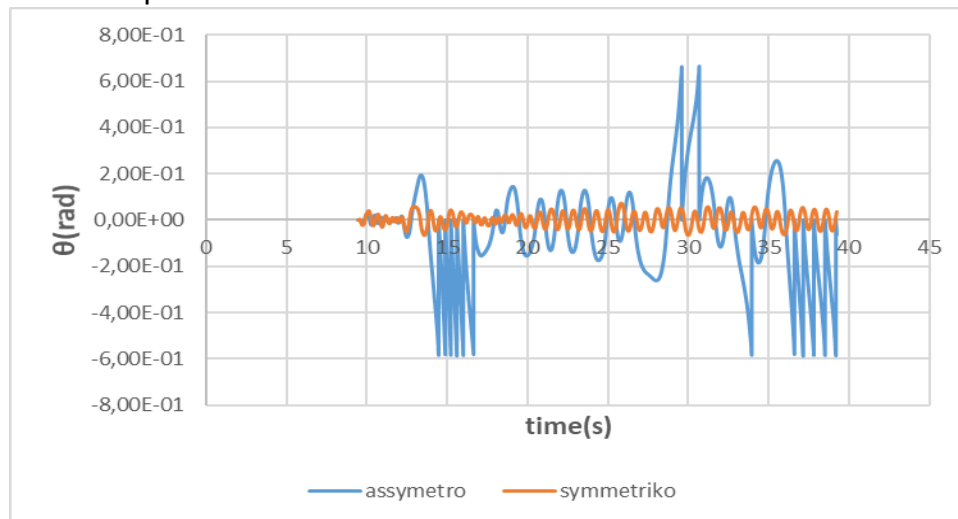
Εικόνα 81:Διάγραμμα  $\theta-t$  για τον σεισμό Chucarah για δύο συντελεστες αποκαταστασης  $\eta=0.85$ –Feminile στο Abaqus -Matlab

Παρατηρούμε και στα δύο διαγράμματα πως δεν αποτυπώνεται η μείωση στο πλάτος της ταλάντωσης στο Abaqus καθώς μειώσαμε τους συντελεστές αποκατάστασης για τους δύο αυτούς σεισμούς .Για αυτόν τον λόγο δεχόμαστε πως το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων αποδίδει καλύτερα με  $\eta=1$  .Εξ ού και οι συγκρίσεις που περιγράφονται στα ανωτέρω κεφάλαια ως επί τω πλείστων έγιναν με η μία καθορισμένη τιμή του.**Οι σεισμοί στο πρώτο άγαλμα όπως και παραπάνω παραποιήθηκαν κατα 25% για λόγους ανάλυσης αφού το άγαλμα δεν μπορούσε να λικνιστεί αρχικά.**

### Fanciulla

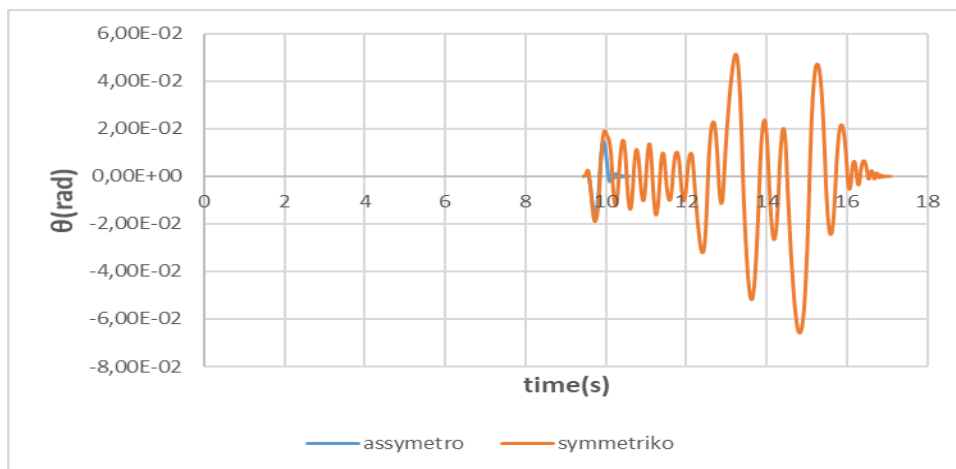
xx Εδώ εφαρμόσαμε σεισμό και κατά τον xx και κατά τον yy

1<sup>ος</sup> ο Imperial Valley κατά xx του οποίου τα χαρακτηριστικά παρατέθηκαν προηγουμένως.Εδώ για  $\eta_1, \eta_2=1$  το συμμετρικό προσομοίωμα είχε σχετικά μικρή επίπτωση αφού είχε  $\theta_{max}=0.0722rad$  ενώ το ασύμμετρο με λίγες ταλαντώσεις τελικά ανετράπη στα 14,5sec αγγίζοντας  $\theta_{max}=0.3968rad$  με το ακόλουθο διαγραμμα να τα αποτυπώνει καλύτερα αυτά:



Εικόνα 82:Διάγραμμα  $\theta-t$  για τον σεισμό Imperial Valley κατά xx με  $\eta_1, \eta_2=1$  για συμμετρικό και ασύμμετρο προσομοίωμα για το άγαλμα Fanciulla

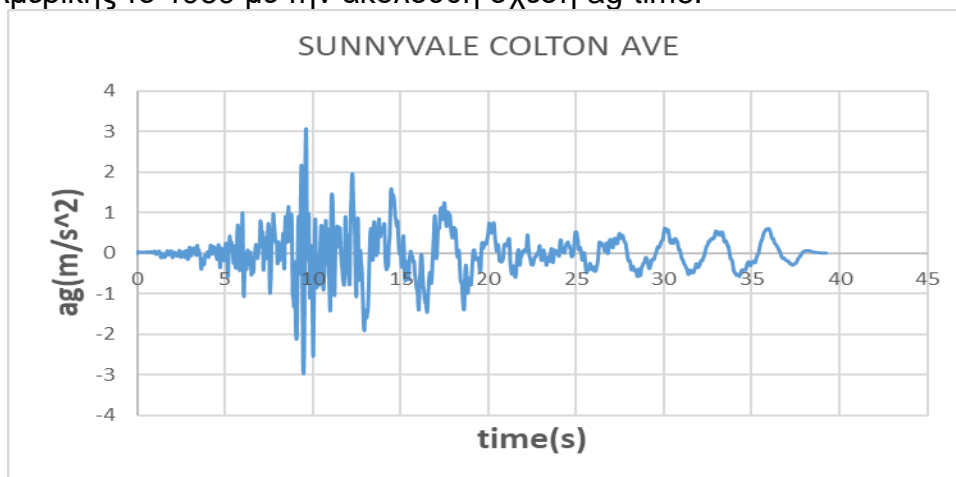
Εδώ έχουμε πάλι ότι μειώνεται ο κίνδυνος καταστροφής λόγω ανατροπής του αγάλματος όταν και στις δύο μορφές του (συμμετρικά και μη ) τοποθετήσουμε τους συντελεστές αποκατάστασης όπως στην εξίσωση 23 καθώς έχουμε το νέο διάγραμμα με  $\eta_1= 0.8520$  και  $\eta_2=0.8677$  :



Εικόνα 83: Διάγραμμα  $\theta$ - $t$  για τον σεισμό Imperial Valley κατά  $x$  με  $\eta_1=0.8520, \eta_2=0.8677$  για συμμετρικό και ασύμμετρο προσομοίωμα για το άγαλμα Fanciulla

Παρατηρούμε πως για τον εν λόγω σεισμό για  $x$ - $x$  η συμπεριφορά του ασύμμετρου αγάλματος είναι πολύ διαφορετική για  $\eta_1, \eta_2=1$  και για  $\eta_1=0.8520$  και  $\eta_2=0.8677$  αφού έχουμε μείωση εμφανής στα  $\theta$  εκ νέου  $:\varepsilon=(\theta\alpha-\theta\beta)/\theta\alpha=95,9\%$  αφού  $\theta_{\max}(\eta \text{ διάφορο του } 1)=-0.0162 \text{ rad}$ . Επομένως και στο συμμετρικό και στο ασύμμετρο προσομοίωμα έχουμε μείωση των  $\theta$  και μείωση του κινδύνου λικνισμού σύμφωνα με τα παραπάνω όταν έχουμε μείωση των  $\eta$ .

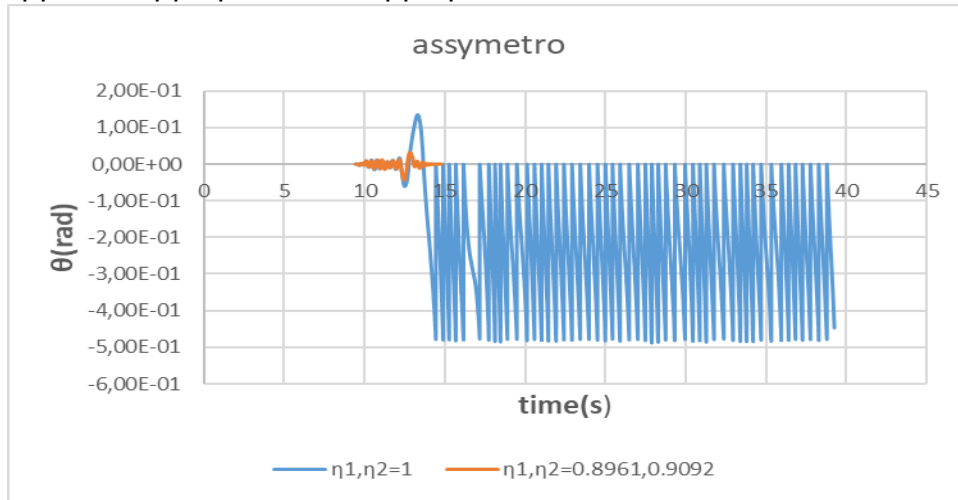
Υγ) Σεισμός PACIFIC ENGINEERING AND ANALYSIS STRONG-MOTION DATA LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, SUNNYVALE COLTON AVE, 360 όπου συνέβη στην περιοχή Αμερικής το 1989 με την ακόλουθη σχέση  $ag$ -time.



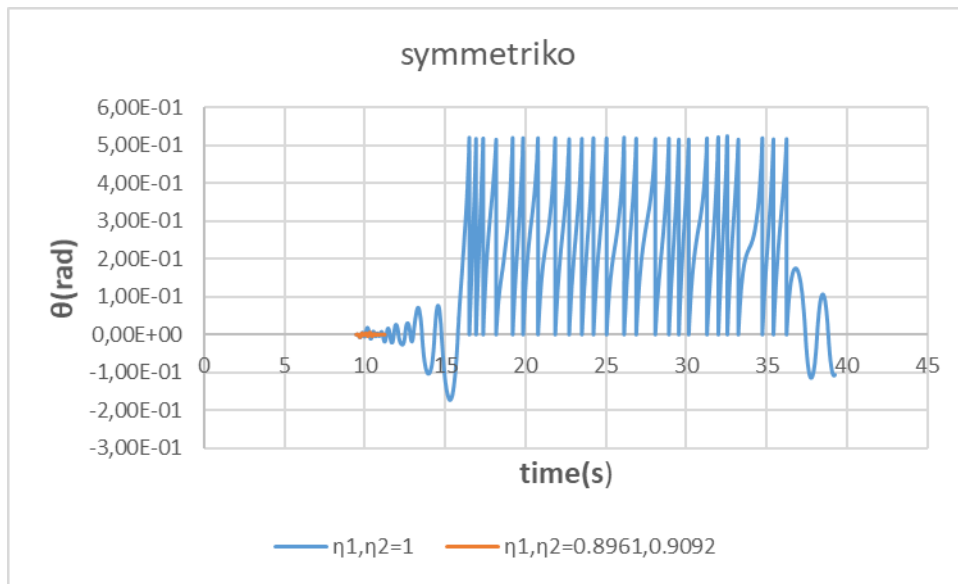
Εικόνα 84: Χρονοιστορία SUNNYVALE COLTON AVE

Και ενώ αρχικά είχαμε τοποθετήσει  $\eta_1, \eta_2$  με  $\theta_{\max\text{συμ}}=0.3093\text{rad}$  και  $\theta_{\max\text{ασύμ}}=0.3320\text{rad}$ , με τους συντελεστές αποκατάστασης υπολογισμένους από την εξίσωση 23 ως  $\eta_1=0.8961$   $\eta_2=0.9092$  εντέλει είχαμε  $\theta_{\max\text{συμ}}=0.043 \text{ rad}$  και

Θταχασσύμ=0.0068 rad δηλαδή εμφανή αλλαγή συμπεριφοράς όπως αποτυπώνεται και στα διαγράμματα συμμετρικών ασύμμετρων.



Εικόνα 85: Διάγραμμα  $\theta-t$  για τον σεισμό Synnyvale με  $\eta_1=0.8961$  ,  $\eta_2=0.9092$  και  $\eta_1, \eta_2=1$  για ασύμμετρο προσομοίωμα( $\gamma\gamma$ )



Εικόνα 86: Διάγραμμα  $\theta-t$  για τον σεισμό Synnyvale με  $\eta_1=0.8961$  ,  $\eta_2=0.9092$  και  $\eta_1, \eta_2=1$  για συμμετρικό προσομοίωμα( $\gamma\gamma$ )



## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΚΕΨΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Αυτό που κατανοήσαμε από τα πειράματα στα συμμετρικά και ασύμμετρα σώματα είναι ότι ο λικνισμός τους αποτελεί μία έννοια με πολλές παραμέτρους. Εν γένει συνειδητοποιήσαμε πώς :

- Επίλυση προβλήματος λικνισμού άκαμπτου σώματος είναι εφικτή με απλοποιητικές προσεγγίσεις. Εμείς στα παραδείγματά μας χρησιμοποιήσαμε προσομοίωση ορθογωνίου πρίσματος όπως φαίνεται στο σχήμα τόσο για την βάση (10επί10) όσο και για το κυρίως σώμα του
- Είναι εμφανής η εγκυρότητα τριών ισοδύναμων λύσεων με ικανοποιητικά αποτελέσματα
- Υπάρχουν αποκλίσεις στα αποτελέσματα μεταξύ αναλυτικής λύσης και λύσεων με Πεπερασμένα Στοιχεία χρήζουν βελτίωσης λόγω και της newmark που έχει δύσκολο τρόπο επίλυσης μολονότι ένας βαθμός ελευθερίας
- Ασφαλέστερος είναι υπολογισμός απωλειών ενέργειας σε σύγκριση με τη μέθοδο συνεχούς αποσβεστήρα
- Απότομες αλλαγές φάνηκαν στην ταχύτητα των σωμάτων λόγω των απωλειών ενέργειας και στην απότομη αλλαγή γωνίας στροφής
- Το PGA με την ραδινότητα (λυγηρότητα σωμάτων) και το συχνотικό περιεχόμενο του σεισμού συνιστούν τις σημαντικότερες παραμέτρους για συμμετρικά σώματα
- Σε ασύμμετρα σώματα το πρόσημο του επιταχυνσιογραφήματος σε σχέση με την κρίσιμη πλευρά διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση.
- Δεν ήταν δυνατό να βρεθεί μία παράμετρος, η οποία να κυριαρχεί στην τελική απόκριση ειδικά στους παλμούς ημίτονο φάνηκε αυτή η συμπεριφορά.
- Παρατηρήθηκε κατά το λικνισμό ενός σώματος ένα φαινόμενο κλίμακας το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη σταθερότητα μεγαλύτερα σε διαστάσεις σώματα σε σύγκριση με μικρότερα σώματα παρόμοιας όμως γεωμετρικής αναλογίας αφού το άγαλμα Fanciulla έχει  $R1$  και  $R1' R2'$  μεγαλύτερα από του Feminille
- Όσο χαμηλότερος ο συντελεστής αποκατάστασης τόσο μειώνονται τα πλάτη λικνισμού άρα και ο κίνδυνος ανατροπής του συστήματος

- Τα μεγάλα εκθέματα εξαντλούν την αντοχή τους μόνο αν είναι ελεύθερα εδραζόμενα χωρίς μονωτές γεγονός χρήσιμο στην προστασία αρχαίων μνημείων.
- Ο αποσβεστήρας της γωνίας στροφής που εκφράζεται μέσω του  $\zeta$  διαδραματίζει ισχυρότερο ρόλο στην σεισμική διέγερση εν αντιθέσει με τους παλμούς που ασκήθηκαν όπου ειδικά στα συμμετρικά έχει σχεδόν ταυτόσημη απόκριση και η μία και η άλλη λύση.

Ως μία αποτίμηση έχουμε ότι από όλες τις αναλύσεις προκύπτει ότι η κρίσιμη διεύθυνση για ανατροπή είναι ο άξονας  $X$  αφού για τις ίδιες επιταχύνσεις εμφανίζονται μεγαλύτερες γωνίες  $\theta$  σε σχέση με τον άξονα  $Y$  ειδικά όπως φαίνεται στις αναλύσεις με την γλώσσα Matlab. Ακόμα το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ευρύτατο καθώς περιλαμβάνει και τις επιρροές των ασύμμετρων δοκιμίων και συνεπώς απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την ορθή και αποτελεσματική προσέγγιση του θέματος. Η αξία των αγαλμάτων είναι ανυπολόγιστη και γι' αυτό απαιτείται η διερεύνηση της απόκρισης των αγαλμάτων συγκρινόμενη με την πραγματική τους απόκριση σε πρόσφατους σεισμούς. Επιπλέον, η θέση των αγαλμάτων στο κτίριο και καθ' ύψος αυτού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόκρισή τους και συνεπώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η επιρροή του κτιρίου. Επιπρόσθετα είναι σημαντικό να μελετηθούν πιο σύνθετα συστήματα λικνιζόμενων σωμάτων, καθώς σημαντικός αριθμός αγαλμάτων εδράζονται πάνω βάσεις, ίδιου ή διαφορετικού υλικού και είναι καθόλου ή άκαμπτα συνδεδεμένα με αυτές. Τέλος φαίνεται πως είναι σημαντική η διερεύνηση της σεισμικής μόνωσης των αγαλμάτων, προκειμένου να προστατευτούν από τις σεισμικές φορτίσεις.





## 5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. ABAQUS DOCUMENTATION, “Getting Started with Abaqus: Keywords Edition”, ενότητα 4.1.2
2. ABAQUS DOCUMENTATION, “Getting Started with Abaqus: Keywords Edition”, ενότητα 4.2.2
3. ABAQUS DOCUMENTATION, “Getting Started with Abaqus: Keywords Edition”, ενότητα 12.10.8
4. ABAQUS DOCUMENTATION, “Abaqus Analysis User’s Manual”, ενότητα 6.3.3
5. ABAQUS DOCUMENTATION, “Abaqus Analysis User’s Manual”, ενότητα 33.1.5
6. Diamantopoulos S, Fragiadakis M. Seismic response assessment of rocking systems using single degree-of-freedom oscillators. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2019; 48(7): 689–708
7. Fragiadakis M, Diamantopoulos S. Fragility and risk assessment of freestanding building contents. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2020; 49(10): 1028-1048
8. Diamantopoulos S., Fragiadakis M. (2017). Simple models for the seismic response of rigid or flexible blocks, 6<sup>th</sup> International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2017, Rhodes, Greece, 15-17 June 2017.
9. Diamantopoulos S., Fragiadakis M. (2019). Seismic fragility and risk assessment of rocking frame structures (Υπολογισμός της σεισμικής τρωτότητας και του σεισμικού κινδύνου σε λικνιζόμενες πλαίσιακές κατασκευές), 4th Panhellenic Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology (4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας), 5-7 September 2019.
10. Spyridon G. Diamantopoulos (2017). Seismic Response Assessment of Rigid and Flexible Rocking Bodies using Simple Finite Element Models. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

11. 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.
12. 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.
13. Diamantopoulos S., Fragiadakis M. (2019). The effect of building's response on the fragility of freestanding symmetric or asymmetric contents, XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece, 23–25 November 2020.
14. Diamantopoulos S., Fragiadakis M. (2019). The effect of building's response on the fragility of freestanding symmetric or asymmetric contents, XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece, 23–25 November 2020.
15. M. Fragiadakis, L. DiSarno, A. Saetta, M.G. Castellano, I. Rocca, S. Diamantopoulos, V. Crozet, I. Politopoulos, T. Chaudat, S. Vasic, I.E. Bal, E. Smyrou, I. Psycharis, T.C. Hutchinson, L. Berto, Experimental seismic assessment and protection of museum artefacts , XI International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2020), Athens, Greece, 23–25 November 2020.
16. Shake table tests of unattached, asymmetric, dual-body systems, C. E. Wittich and T. C. Hutchinson\*, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, USA, 20 January 2017 Psycharis IN. Dynamic behaviour of rocking two-block assemblies. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1990; 19(4):555–575. DOI:10.1002/eqe.4290190407.
17. Spanos PD, Roussis PC, Politis NPA. Dynamic analysis of stacked rigid blocks. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2001; 21(7):559–578. DOI:10.1016/S0267-7261(01)00038-0.
18. Ambraseys N, Psycharis IN. Earthquake stability of columns and statues. Journal of Earthquake Engineering 2011;15(5):685–710. DOI:10.1080/13632469.2010.541549.

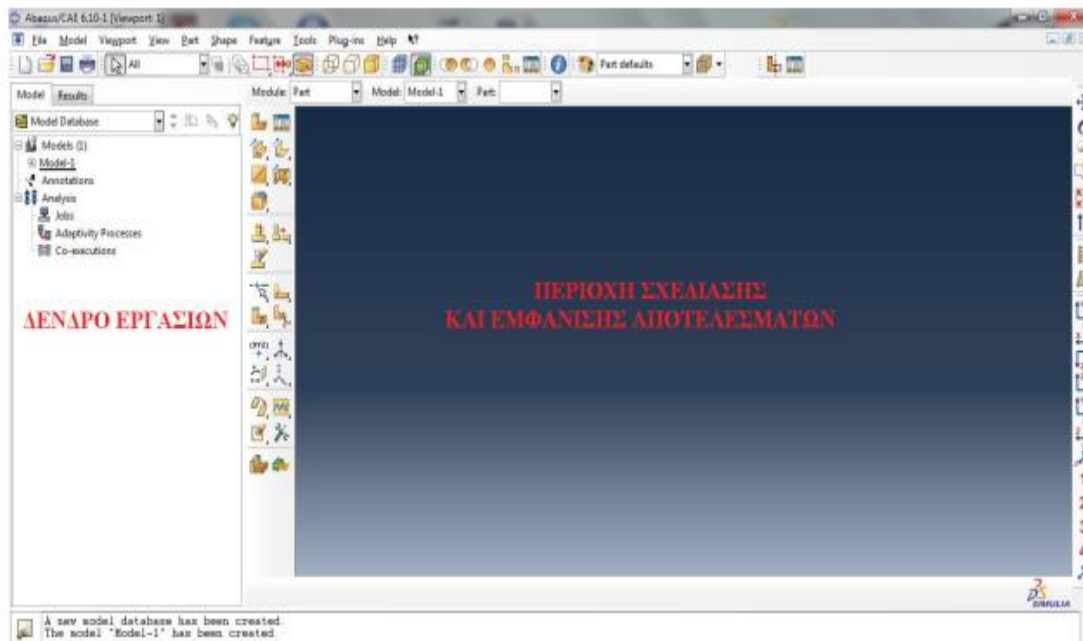
19. Kounadis AN. Rocking instability of free-standing statues atop slender cantilevers under ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2013; 48(1):294–305. DOI:10.1016/j.soildyn.2011.12.002.
20. Konstantinidis D, Makris N. Seismic response analysis of multidrum classical columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2005; 34(10):1243–1270. DOI:10.1002/eqe.478.
21. Zhang J., Makris N. Rocking response of free-standing blocks under cycloidal pulses. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 5; 2001.
22. Πεταλάς Α. Αριθμητική διερεύνηση της λικνιστικής απόκρισης συμπαγών σωμάτων. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης; 2012.
23. Μαριέττα Ελένη Κολοκυθά, Προσομοίωση της συμπεριφοράς αγαλμάτων σε σεισμική φόρτιση, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018
24. M. Fragiadakis, M. Kolokytha, S. Diamantopoulos, Seismic risk assessment of rocking building contents of multistorey buildings, *Procedia Engineering*, 199: 3534-3539, 2017



## 6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΓΑΛΜΑΤΩΝ

Στο εν λόγω παράρτημα γίνεται μνεία στον τρόπο που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση-προσομοίωση των αγαλμάτων που μελετήθηκαν στο Abaqus, μιας και η διεργασία αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για μελλοντικές έρευνες.

Αρχικά ανοίγουμε την εφαρμογή Abaqus 6.10 πραγματοποιώντας διπλό κλικ στο αντίστοιχο εικονίδιο της .Αμέσως θα μας εμφανιστεί η ακόλουθη εικόνα



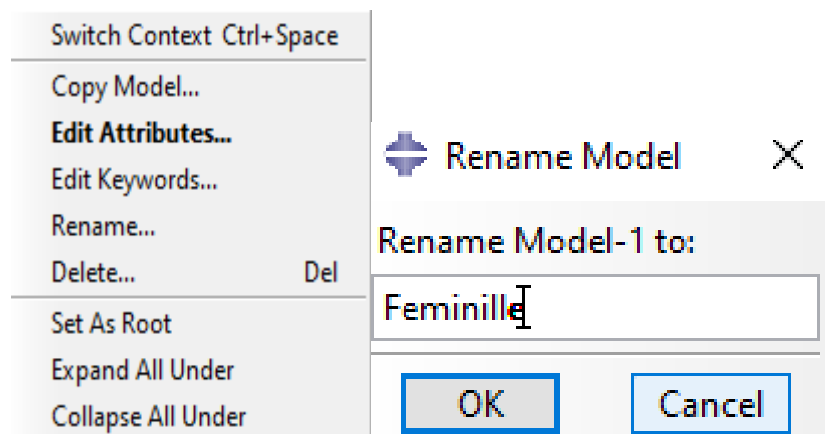
Εικόνα 87: Περίγραμμα εργασία στο Abaqus Cae

Όπως φαίνεται στο δεξιά πλαίσιο βρίσκεται η περιοχή προβολής του μοντέλου, στο κόκκινο πλαίσιο αριστερά είναι το δέντρο εργασιών και στο πλαίσιο χαμηλά με τη είναι η περιοχή εμφάνισης μηνυμάτων του συστήματος, ενώ αν επιλεχθεί το κίτρινο εικονίδιο η ίδια περιοχή μετατρέπεται στη γραμμή εντολών του Abaqus που δέχεται εντολές σε γλώσσα Python. Επιλέγεται αρχικά στο μήνυμα που εμφανίζεται πάνω αριστερά Start Session => Create Model Database with Standard/Explicit Model. Ως πρώτο βήμα επιγραμματικά δημιουργούμε τα parts δηλαδή τα σώματα που απαρτίζουν το μοντέλο ,στην συνέχεια ορίζουμε τα υλικά από το material και κατόπιν γίνεται αντιστοίχηση τους στα parts.

Το επόμενο βήμα είναι το απαιτούμενο **meshing**(διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία) και η γεωμετρική τους σύνδεση στο κουτάκι assembly .Ορίζουμε τα steps ( με τον αντίστοιχο τους χρόνο υλοποίησης) και κατόπιν προχωράμε στα outputs είτε αυτά είναι διανυσματικά (field) είτε έχουν να κάνουν με δυναμικής ανάλυση(history).Τέλος ορίζουμε την αλληλεπίδραση βάσεως και αγαλμάτων και με το έδαφος (interactions) τα φορτία ως gravity loads, τις δεσμεύσεις και δημιουργούμε το αντίστοιχο project –job και πατάμε ανάλυση.

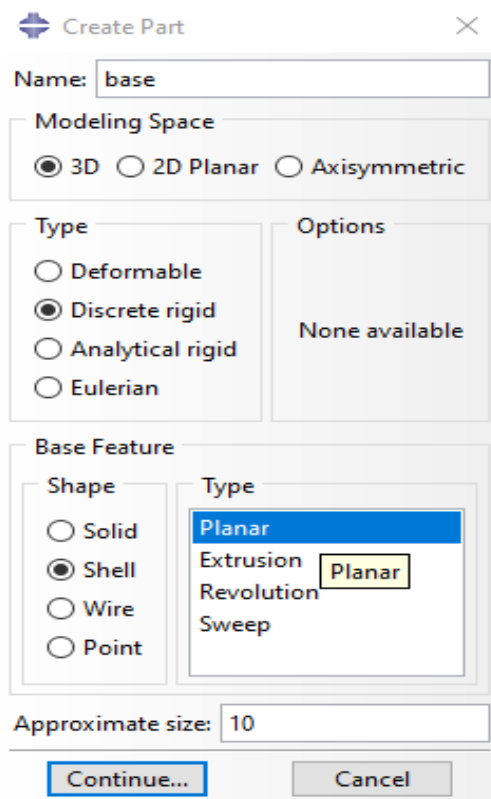
### Δημιουργία αγαλμάτων

Με δεξί κλικ στο model-1 πατάμε Rename και δίνουμε το όνομα του πρώτου αγάλματος Feminille.Για ευνόητους λόγους θα αρουσιάσουμε την κατασκευή του αγάλματος Feminille και τα βήματα είναι παρόμοια και για το δεύτερο Fanciulla για το οποίο θα δώσουμε μόνον τις εικόνες δεξιά από το Feminille.Πατάμε στο + που εμφανίζεται στο Femilnille για να συνεχίσουμε τις εργασίες.Ενδεικτικά θα είναι :



Εικόνα 88 : Επιλογή μοντέλου Feminille και ονοματοδοσία του στο πρόγραμμα

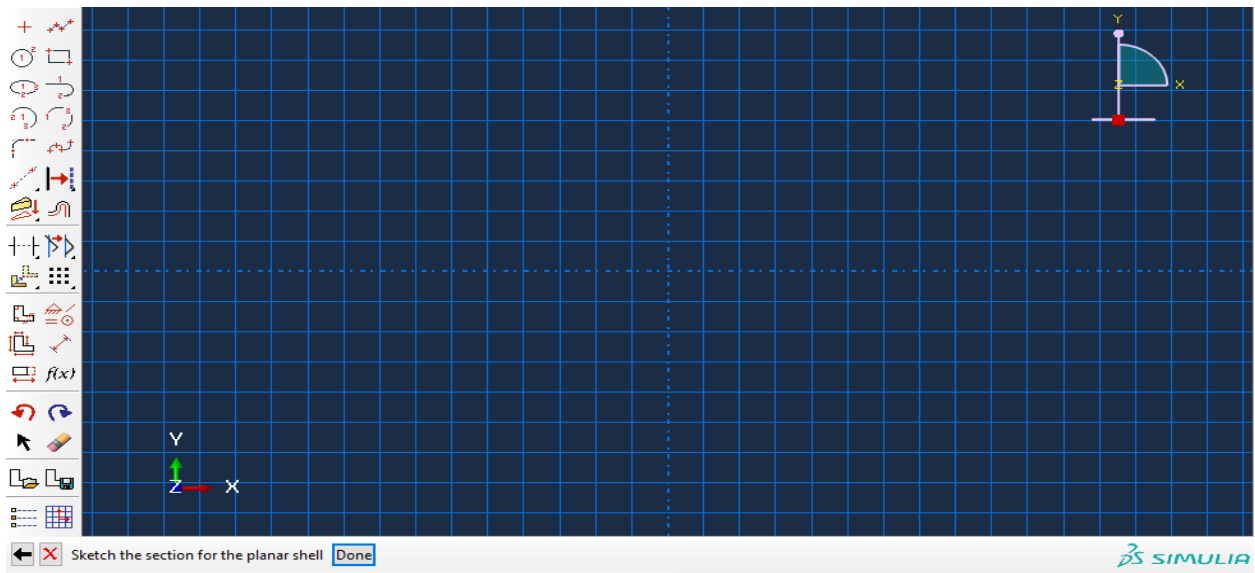
Δημιουργούμε πρώτον την βάση του πρίσματος ορθογωνικής μορφής -( έτσι προσομοίασαμε τα ασύμμετρα-συμμετρικά αγάλματα της εργασίας)-κάνοντας διπλό κλικ στο κλάδο parts κάτω από το Feminille όπως αποτυπώνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 89: Είδος σώματος βάσης και γεωμετρική της προσέγγιση

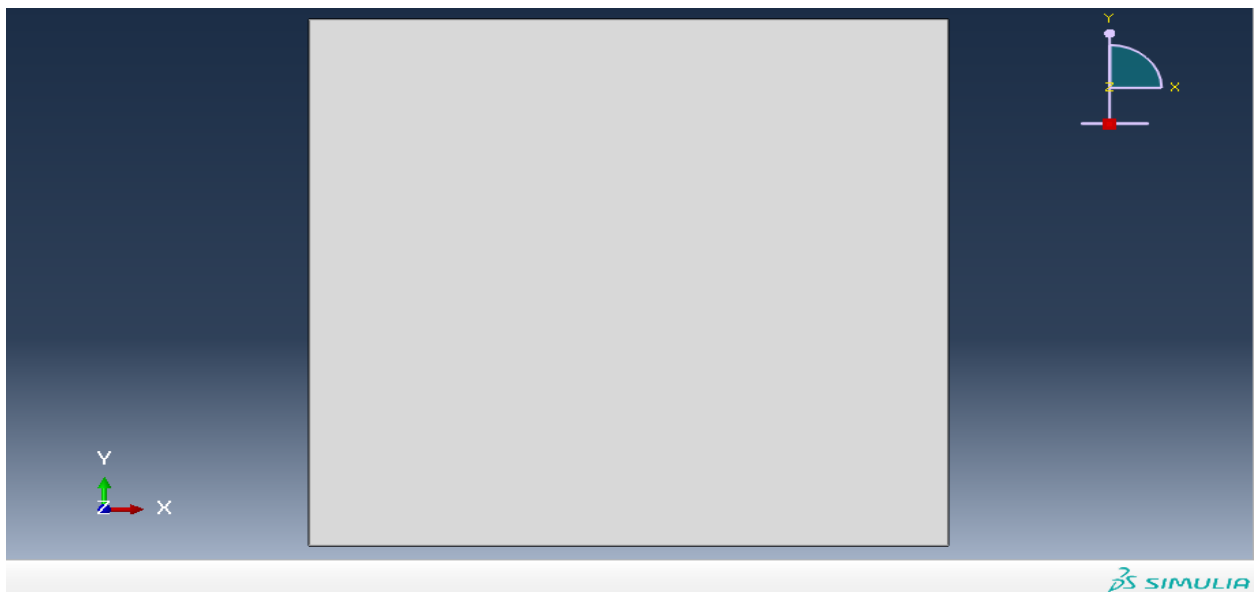
Όπως παρατηρούμε στον εν λόγω παράθυρο που άνοιξε μας ζητείται το όνομα του σώματος που θα δημιουργηθεί ( τώρα base) ,καθώς και κάποιου είδους μορφολογικά χαρακτηριστικά όπως αν θα είναι τρισδιάστατο-κέλυφος και την γεωμετρία του στο περίπου για αρχή.

Πρίν προχωρήσουμε περαιτέρω αξίζει να σημειωθεί πως το Abaqus δεν έχει μονάδες μέτρησης πλην γωνιών που είναι σε μοίρες .Επόμενως θα πρέπει οι μονάδες που θα εισαγάγουμε στο εν λόγω θέμα να είναι σε αρμονία μεταξύ τους.(SI).Μιας και έχουμε άκαμπτο μοντέλο θα χρησιμοποιήσουμε όπως φάνηκε την επιλογή discrete rigid και όχι αυτή του deformable .Με κλικ στο ok αφού δώσουμε ενδεικτικά ένα μέγεθος της τάξης των 100 m<sup>2</sup> θα μας εμφανιστεί η ακόλουθη εικόνα όπου και θα σχεδιάσουμε την βάση μας.



Εικόνα 90: Σχεδιάγραμμα στο Abaqus

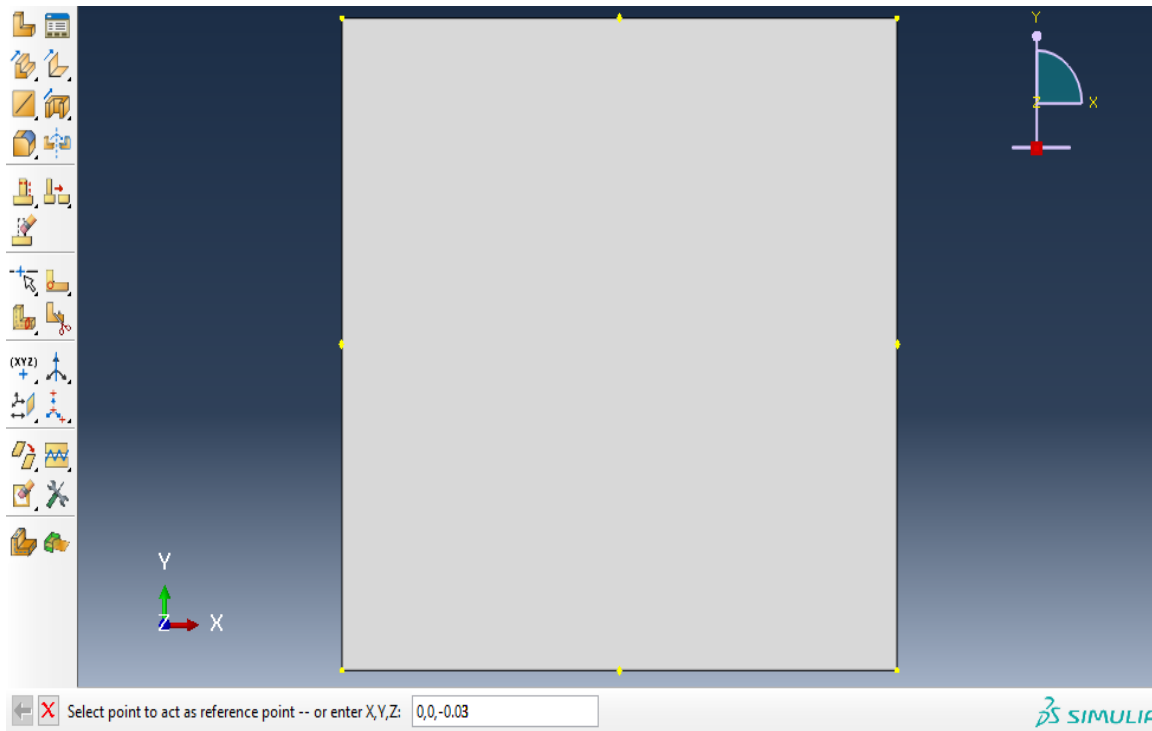
Όπως προαναφέρθηκε θα μορφοποιήσουμε την βάση του αγάλματος στα 10x10 τετραγωνικά μέτρα .Για αυτον τον λόγο πάμε στο δεύτερο κουτάκι της δεξιάς στήλης και ορίζουμε τα αντιδιαμετρικά σημεία της βάσεως (-5,-5) (5,5).αφου το κάνουμε αυτο πατάμε το μεσαί κλικ του ποντικιού (scrolling) και παρατηρούμε αυτό το αποτέλεσμα (την βάση ).



Εικόνα 91: Προσέγγιση της άκαμπτης βάσης ως τετράγωνο 5 x 5

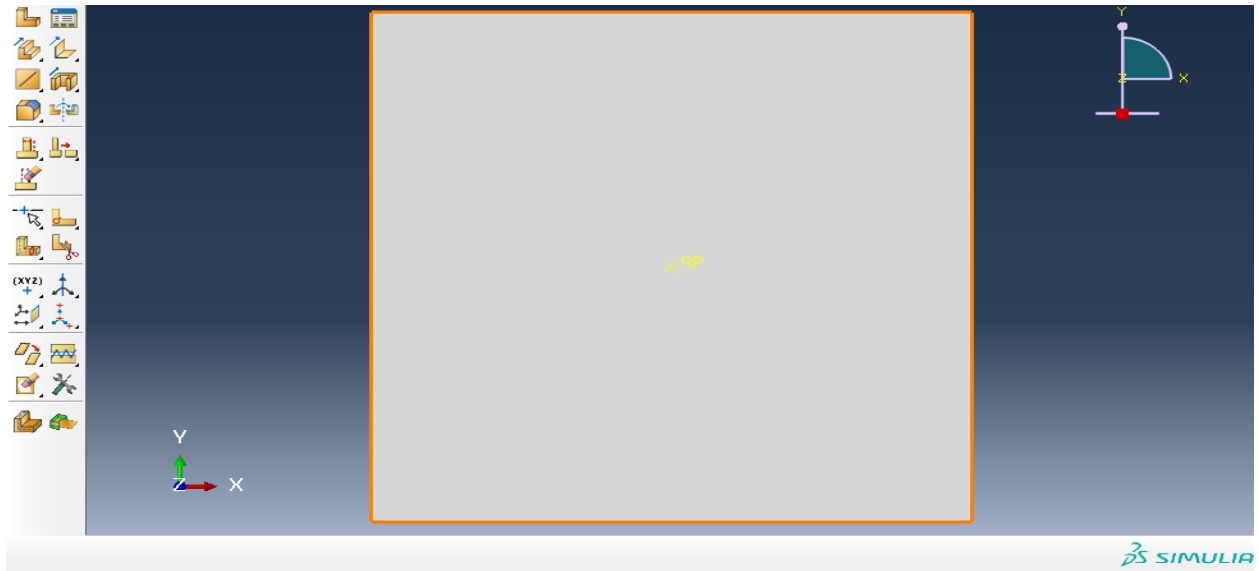


Διακρίνουμε όμως πως λείπει το Κέντρο Βάρους της. Τα άκαμπτα σώματα στο Abaqus εκπροσωπούνται από ένα σημείο, το σημείο αναφοράς, το οποίο περιγράφει την κίνηση του σώματος. Στο σημείο αυτό ασκούνται οι περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας του σώματος. Η επιλογή του έγινε με τη χρήση της εντολής `Tools=>ReferencePoint` (Εργαλεία=>Σημείο Αναφοράς) και την επιλογή των συντεταγμένων του σημείου που έπρεπε να οριστεί σαν σημείο αναφοράς. Στο εν λόγω θέμα δεν ήταν απαραίτητες οι συντεταγμένες και ορίσαμε :0,0,-0.03



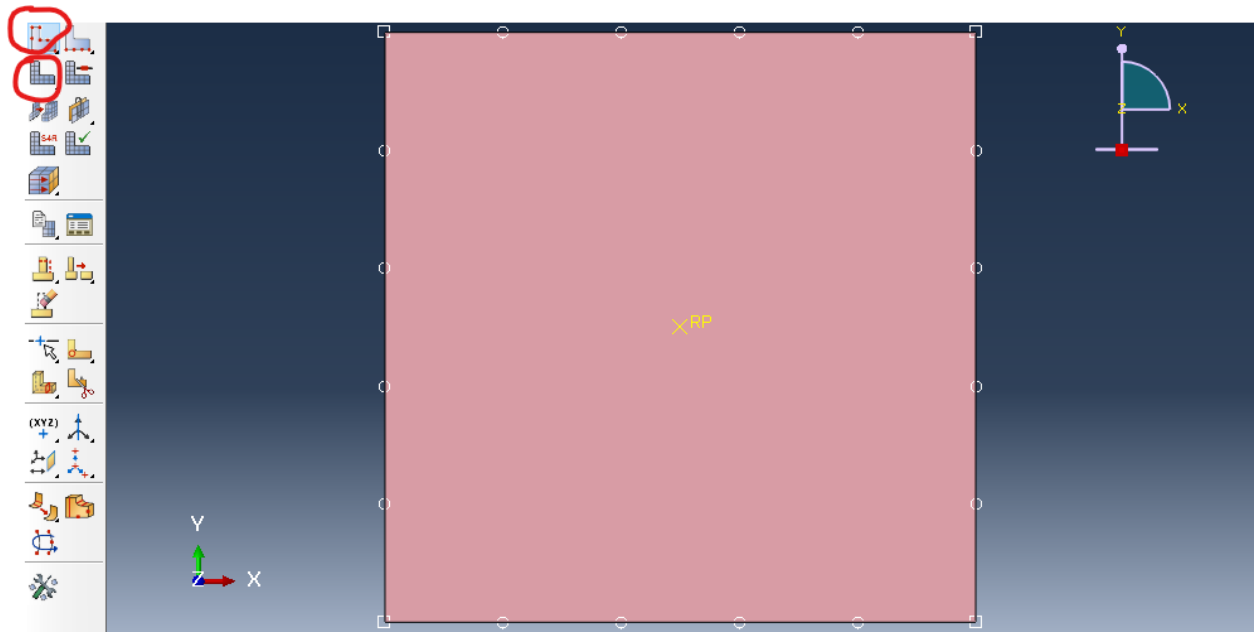
Εικόνα 92: Συντεταγμένες Κέντρου Βάρους πλάκας

Και εν τέλει θα αναπαριστάται ως εξής με κίτρινη κουκίδα :



Εικόνα 93: Ειδικός συμβολισμός του KB πλάκας

Επόμενο βήμα στην δυναμική μας ανάλυση αποτελεί ο καθορισμός των πεπερασμένων στοιχείων του σώματος-βάση.Κάνοντας διπλό κλικ στην καρτέλλα εργασιών στο σημείο <<Mesh>> της υποομάδας <<Base>> του γενικού συνόλου <<Parts>> θα ξεκινήσουμε την διακριτοποίηση της βάσης.Στο σημείο αυτό να τονιστεί πως και στο δεύτερο άγαλμα είχε η βάση τις ίδιες διαστάσεις για να μην διαδραματίσει κάποιον επιπλέον άγνωστο παράγοντα στην εξίσωση κίνησης.

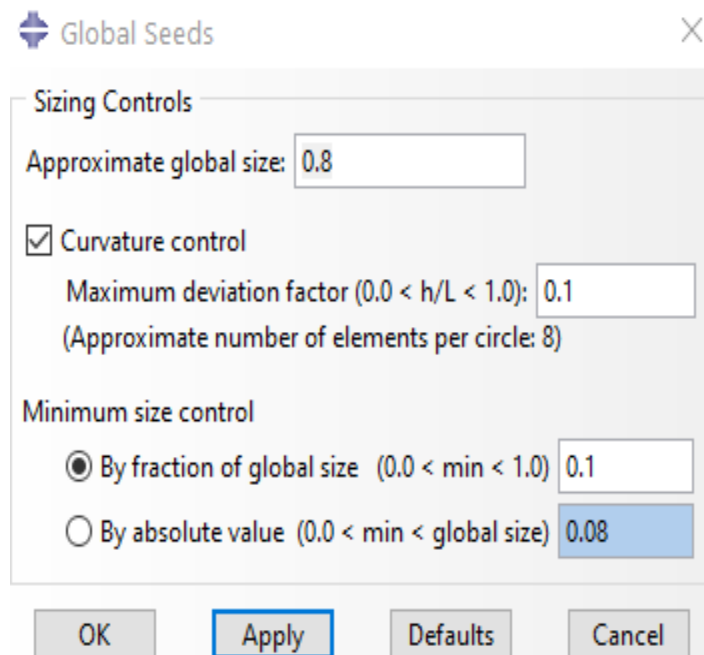


Εικόνα 94: Διακριτοποίηση βάσης Feminille

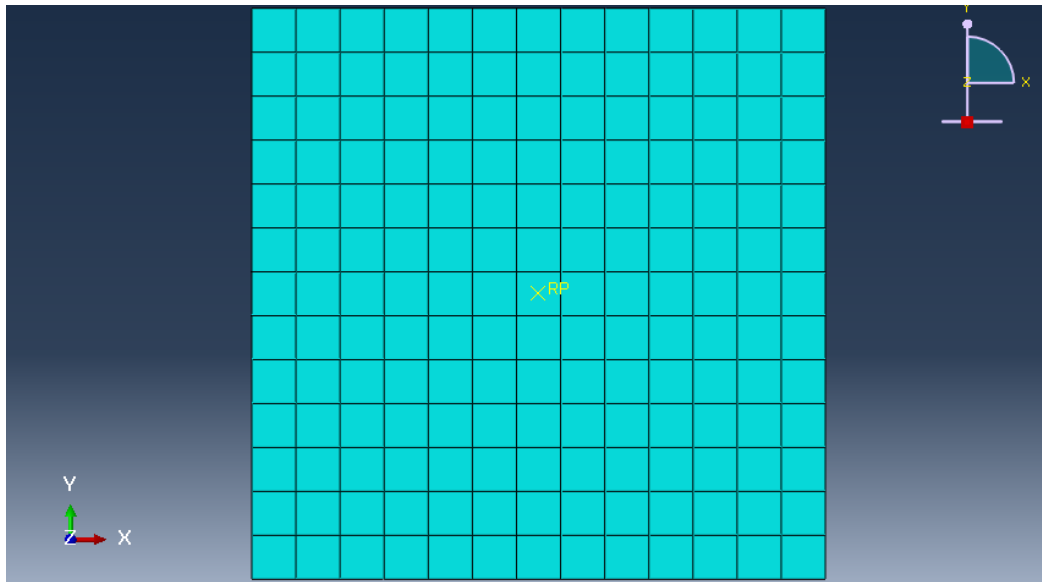
Το άνω αριστερά κουκίδιο μας οδηγεί στον καθορισμό του πλήθους των πεπερασμένων στοιχείων που θα ορίσουμε ενώ το αμέσως κάτω του βοηθάει στην επικαιροποίησή τους. Πιο εμπειριστατωμένα θα έχουμε :

Πραγματοποιούμε κλικ στο εργαλείο **seed part** το πάνω αριστερά. στην βάση τοποθετήσαμε συνολικά 169 διαφορετικά στοιχεία και για αυτό το λόγο δώσαμε όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα την τιμή 0.7(μέτρο). Τις υπολοιπες επιλογές τις αφήνουμε ως έχουν και πατάμε ok. Κατόπιν επιλέγουμε το εργαλείο <<**Mesh part**>> και πατάμε <<Yes>> ή καταφεύγουμε στην επιλογή του μεσαίου κλικ του ποντικιού που όπως προείπαμε είναι το Ok .

Έτσι διαδοχικά θα κάνουμε τα εξής βήματα :



Εικόνα 95: Ορισμός αριθμού πεπερασμένων στοιχείων στη βάση του αγάλματος *Feminille*



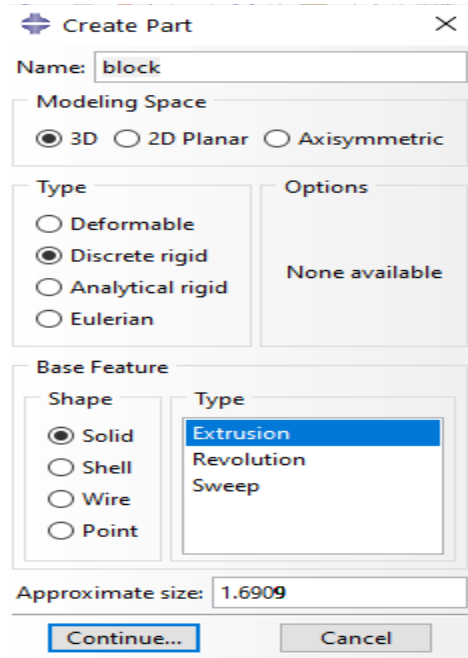
Εικόνα 96: Αποτέλεσμα διακριτοποίησης στην βάση

Συνεχίζοντας στο μοτίβο της προσομοίωσης με ορθογωνικά πρίσματα θα δημιουργήσουμε ένα νέο part με το όνομα <<block>> , που θα αναφέρεται στο κυρίως σώμα της Figura Feminille. Αντί για Shell αυτή την φορά θα χρησιμοποιήσουμε Solid αφού αναφερόμαστε σε τρισδιάστατο σώμα-άγαλμα(Εικόνα 71). Κάνοντας χρήση του εργαλείου για δημιουργία ορθογωνίων τώρα θα ορίσουμε αρχικά την βάση του πρίσματος .θα έχει συντεταγμένες αντιδιαμετρικών σημείων που προκύπτουν από τις δοσμένες συντεταγμένες εργαστηρίου για τηνFigura Feminille.Επομένως θα είναι :  $A(-0.37445,-0.18115)$  και  $A'(0.37445,0.18115)$ .

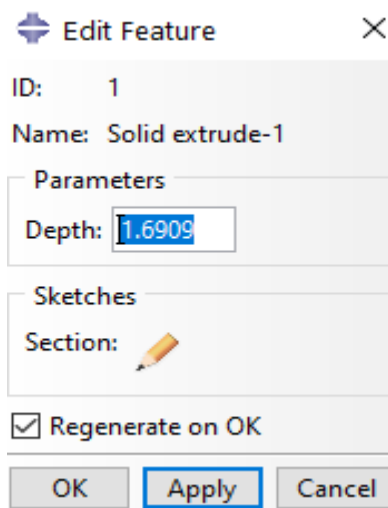


Εικόνα 97:Τρισδιάστατη όψη της Figura Feminille

Μετα την σχεδίαση το Abaqus μας ζητάει το ύψος του αγάλματος ( depth)το οποίο ορίζουμε ως  $z_b - z_a = 1.6909\text{m}$ . Το σημείο αναφοράς το ορίζουμε ως προηγουμένως μόνο που τώρα θα έχει τις πραγματικές συντεταγμένες C.M.(-0.00975,0.01995,0.7383) και για το συμμετρικό θα είναι C.M.(0,0,0.7383).Ακολουθούν ορισμένες εικόνες που αποτυπώνουν τα βήματα .



Εικόνα 98: Ορισμός του ως άκαμπτο σώμα και τρισδιάστατο (extrusion)



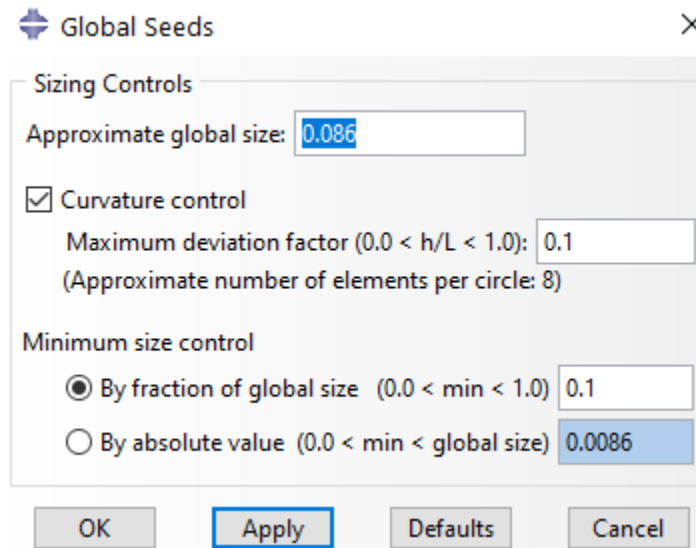
Εικόνα 99: Τρισδιάστατη διάπλωση του μοντέλου (extrude)

Για να προχωρήσουμε όμως στην ενοποίηση βάσης και κορμού θα πρέπει πρώτα να αντικατασταθεί από ένα κέλυφος ,γεγονός που γίνεται από το βασικό μενού στην συνέχεια πατάμε Shape → Shell → From Solid (Εικόνα 75) επιλέγουμε εόλες τις ακμές και πλευρές του σώματος και πατάμε Ok . Παραστατικά αποτυπώνεται στην κάτω εικόνα :



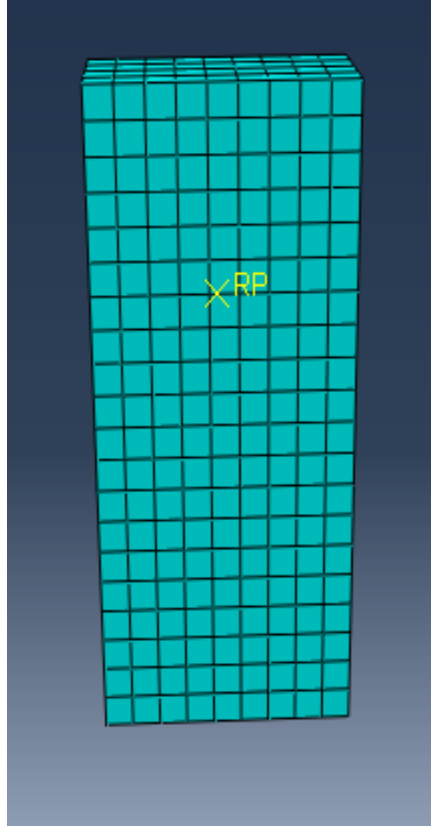
Εικόνα 100: Κουφιοποίηση του κορμού από κέλυφος που ήταν

Τέλος θα ορίσουμε τα πεπερασμένα στοιχεία ,τα οποία θλουμε να είναι αρκετά ώστε να αποτυπώσουν ομαλότερα την πολυπολοκότητα του συστήματος .Βέβαια με όριο πάντα τα 1000 elements μιας και δουλεύουμε σε μαθητική έκδοση.Εν τέλει χρησιμοποιήσαμε στον κορμό 694 αδιάσειστα πεπερασμένα στοιχεία και για αυτό τον λόγο δώσαμε την τιμή 0.086(m).Έτσι προκύπτει η εξής εικόνα :



Εικόνα 101:Βαθμονόμηση πεπερασμένων κορμού Feminille

Ακολουθεί το επανομαζόμενο <<meshing-διακριτοποίηση >> του στοιχείου block και αυτό θα γίνει ως εξής :



Εικόνα 102: Διακριτοποίηση κορμού

Θέμα ορισμού τόσο των αδρανειακών όσο και του υλικού που απαρτίζει το άγαλμα

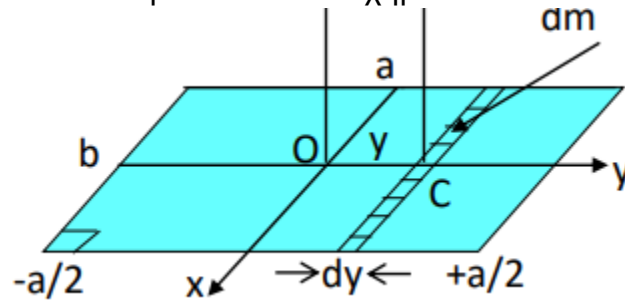
Ελέω ακαμψίας απαλλασόμαστε απο την επιλογή των υλικών και την διατομών .Η μοναδική μας παρέμβαση στο πρόγραμμα γίνεται με την προσθήκη τόσο της μάζας σε τόνους όσο και των ροπών αδρανείας σε  $m^3$  .Οι ροπές αδρανείας υπολογίστηκαν με τους τύπους που μας παρέχονται για τους τρεις άξονες αντίστοιχα :

$$I_{xx}=1/12*m*(a^2 +h_{tot}^2)$$

$$I_{yy}=1/12*m*(b^2+h_{tot}^2)$$

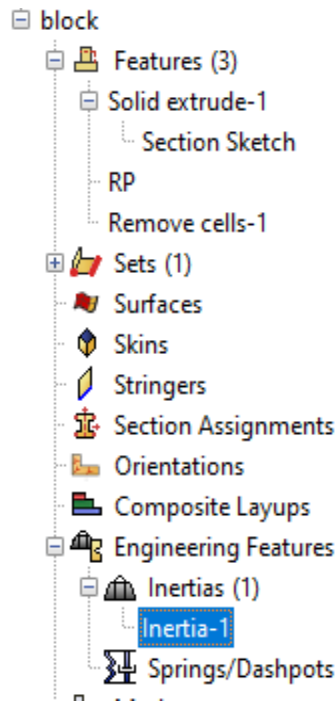
$$I_{zz}=1/12 *m (a^2+b^2)$$

Όπου  $a$  και  $b$  φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί .



Εικόνα 103: Γεωμετρικά στοιχεία βάσης κορμού Femille

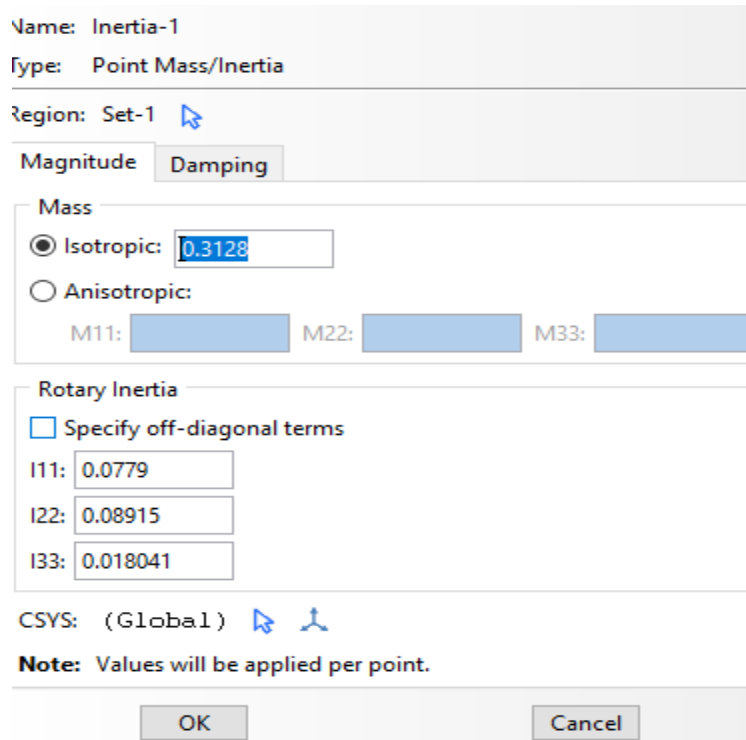
Επομένως ανοίγουμε το δέντρο <<Engineering features>> του <<part>> block και κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή Inertias .(εικόνα 79).



Εικόνα 104:Δέντρο επιλογής inertias

Αφήνουμε την προκαθορισμένη επιλογή και πατάμε <<Continue>> .Εν συνεχεία επιλέγουμε το σημείο αναφοράς του σώματος από το κολλάζ σχεδίασης και παταμε το μεσαίο κλικ του ποντικιού .Τέλος εισάγουμε τις τιμές που υπολογίσαμε προηγουμένως στον παρακάτω πίνακα :





Εικόνα 105: Μάζα και ροπές αδρανείας κατα τους τρεις άξονες για το ασύμμετρο άγαλμα Feminille

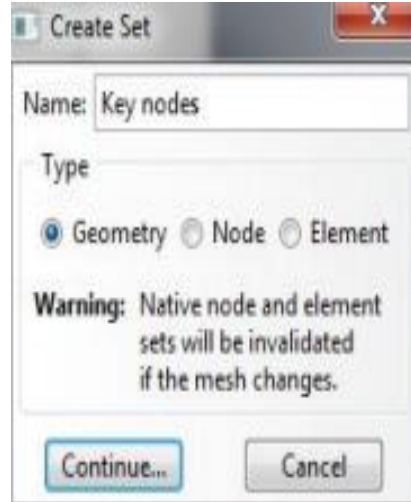
Ενοποίηση-σύνθεση του μοντέλου μέσω της εντολής Assembly

Για την μορφοποίηση του αγάλματος ανοίγουμε διαδοχικά το δέντρο της επιλογής Assembly και κάνουμε διπλό κλικ στην εντολή <<Instances>>.Επιλέγουμε και τα δύο parts και συνεχίζουμε κρατώντας πατημένο το Shift.



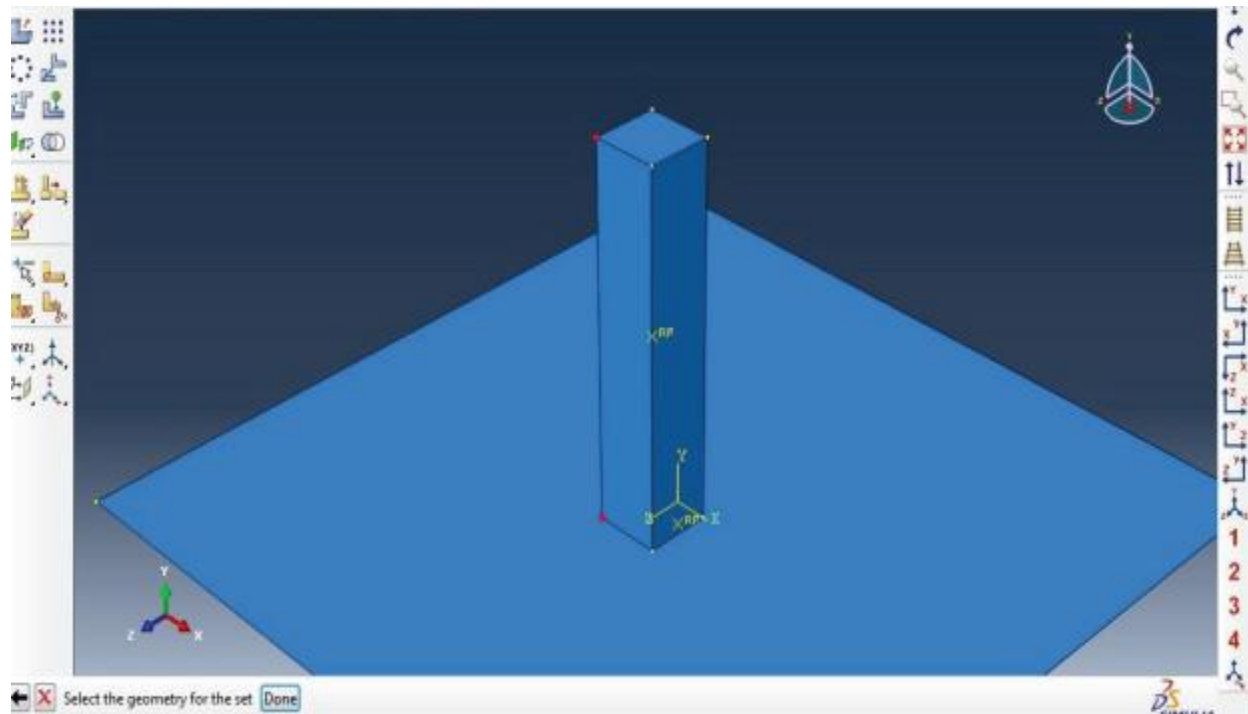
Εικόνα 106: Ένωση της βάσης και του κορμού με μία κίνηση

Εδώ εισέρχεται το κομμάτι της ανάλυσης του ανελαστικού μοντέλου .Αρχικά ορίζουμε δύο σετ σημείων ως προς τα οποία υπολογίσαμε μετακινήσεις και μετέπειτα στροφές διαιρώντας δια του ύψους του κορμού.Από τον κλάδο Assembly κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή Sets και ονομάζουμε το σετ Key nodes και πατάμε **Continue** .



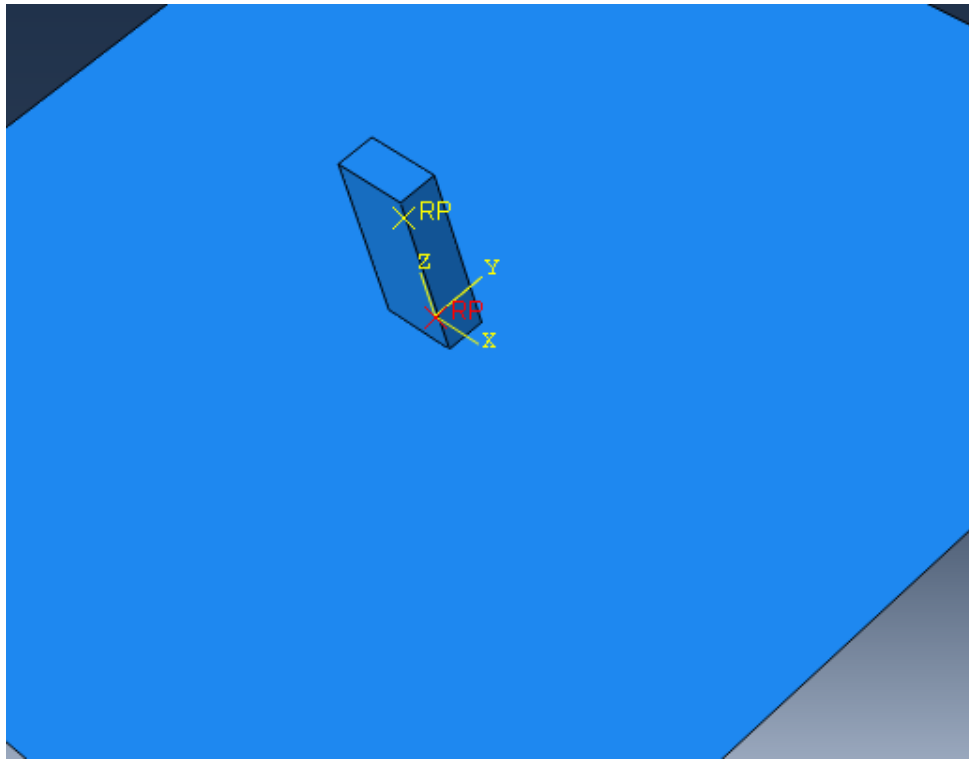
Εικόνα 107: Πρώτο σετ σημείων Key nodes

Με το Shift πατημένο επιλέγουμε δύο σημεία από την ίδια ακμή του σώματος block π.χ.



Εικόνα 108: Σχηματοποίηση του σετ Key nodes στον κορμό του Feminille

Όμοια δημιουργούμε ένα σετ με το όνομα Base που περιέχει το σημείο αναφοράς της βάσης στο οποίο θα ασκηθεί η επιτάχυνση του εδάφους όπως και θα τοποθετήσουμε ανάλογες στηρίξεις. Δηλαδή θα είναι έτσι ακριβώς :

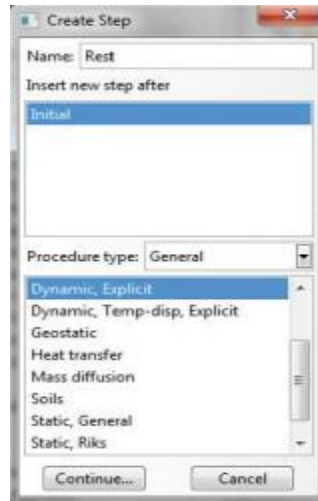


Εικόνα 109: Set base

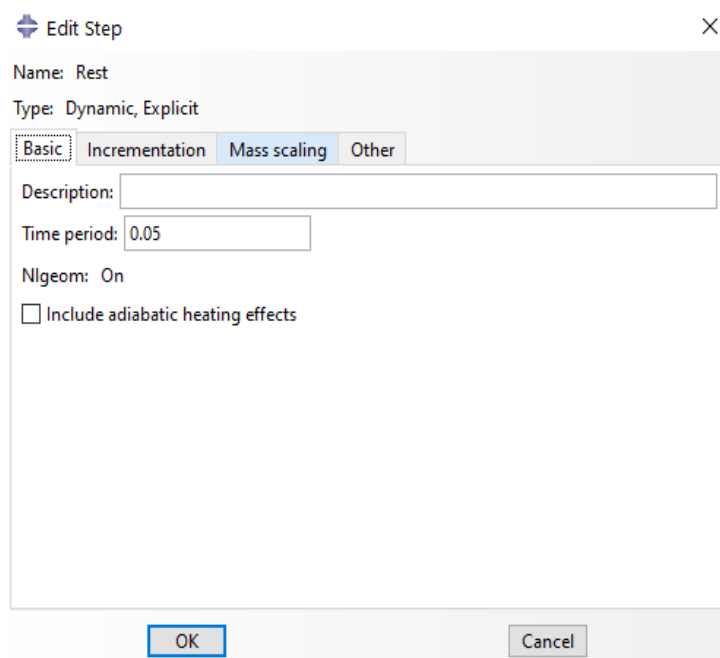
### Βήματα της ανάλυσης-σημαντικό εγχείρημα

Τα φορτία οι δευσεμύσεις και το είδος των αποτελεσμάτων ορίζονται σε κάθε βήμα ανάλυσης. Το Abaqus έχει την ιδιότητα να ορίζει ένα αρχικό βήμα ανάλυσης με το όνομα Initial, όπου καθορίζονται δευσεμύσεις, αλλά όχι φορτία επομένως κατά το βήμα αυτό δεν συμβαίνει τίποτε.

Το πρώτο μας βήμα το ονομάζουμε <<Rest>> και θα έχει πολύ μικρή διάρκεια έστω 0.05 sec. Για να το φτιάξουμε κάνουμε την εξής πορεία : Πατάμε διπλό κλικ στην επιλογή <<Steps>> το ορίζουμε ως Dynamic Explicit για την δυναμική ανάλυση του μοντέλου και ακολούθως το ονομάζουμε Rest και πατάμε <<Continue>>. Ορίζουμε την διάρκει στα 0.05 sec και πατάμε <<Nlgeom>>(Non linear Geometry) στην θέση <<On>>. Σχηματικά θα προκύψουν τα εξής αποτελέσματα :

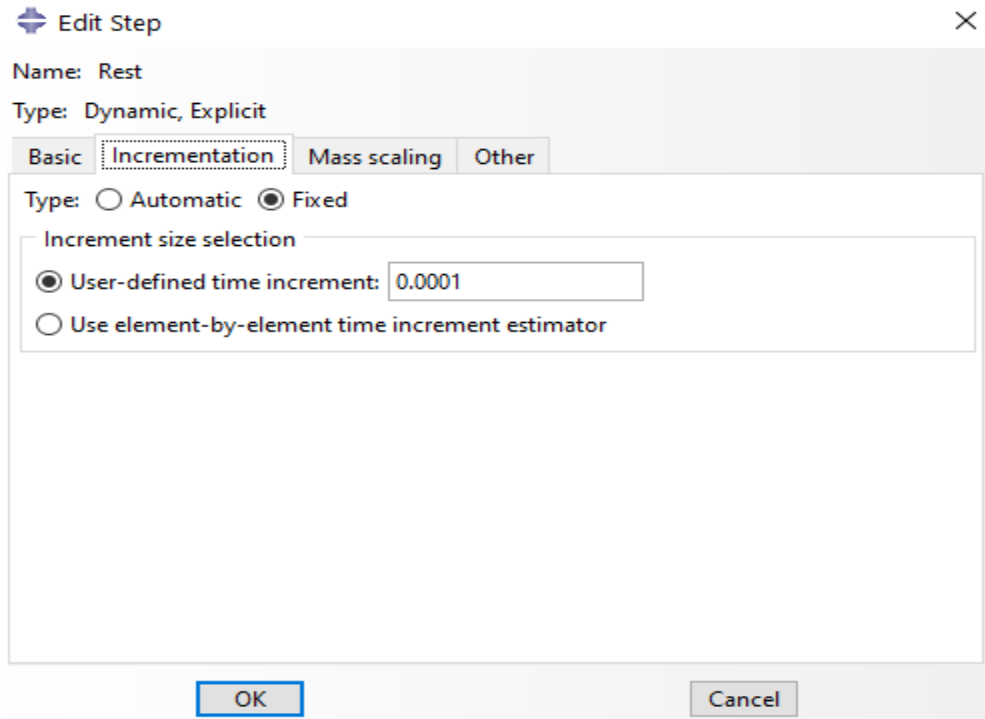


Εικόνα 110: Ορισμός βήματος Rest ως *Dynamic explicit*



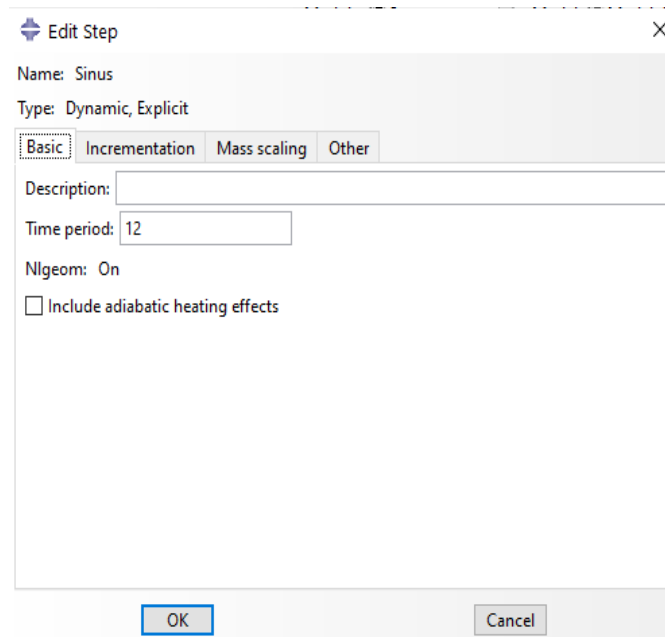
Εικόνα 111: Διάρκεια βήματος Rest ανάλυσης

Στην συνέχεια στην επιλογή Incrementation ορίζουμε το βήμα ολοκλήρωσης στα  $1e^{-4}sec$ , καθώς το βήμα αυτό δεν περιλαμβάνει φορτία η μετακινήσεις άρα είναι αρκετο.



Εικόνα 112:Χρονικό βήμα ολοκλήρωσης Rest

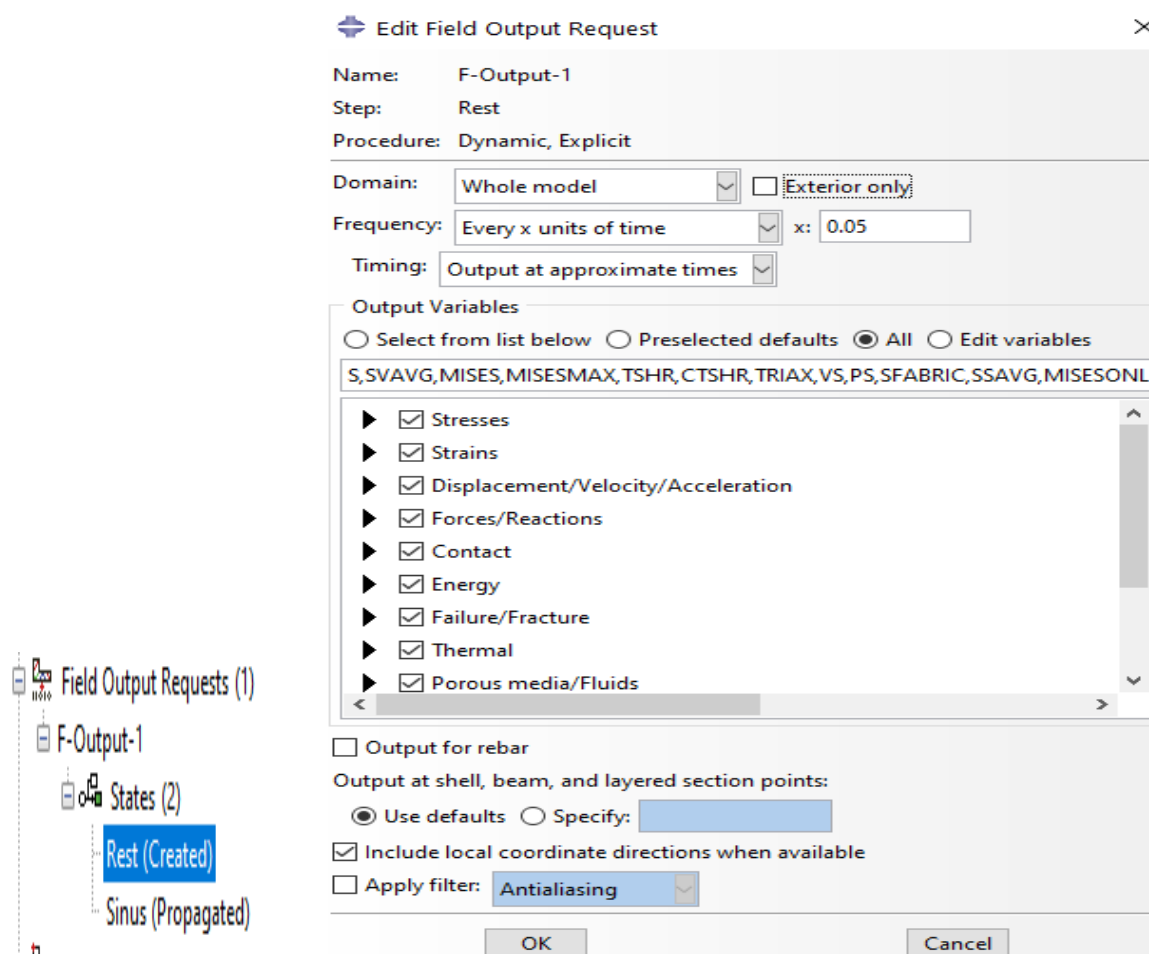
Με τον ίδιο τρόπο δημιουργήσαμε και το τελευταίο βήμα της ανάλυσης μας, το οποίο το ονομάσαμε <<Sinus>> το οποίο είχε διάρκεια τόσο 12 sec για τους παλμούς όσο και 40 sec για τους σεισμούς .Ενδεικτικά ήταν:



Εικόνα 113: Step sinus και στοιχεία του

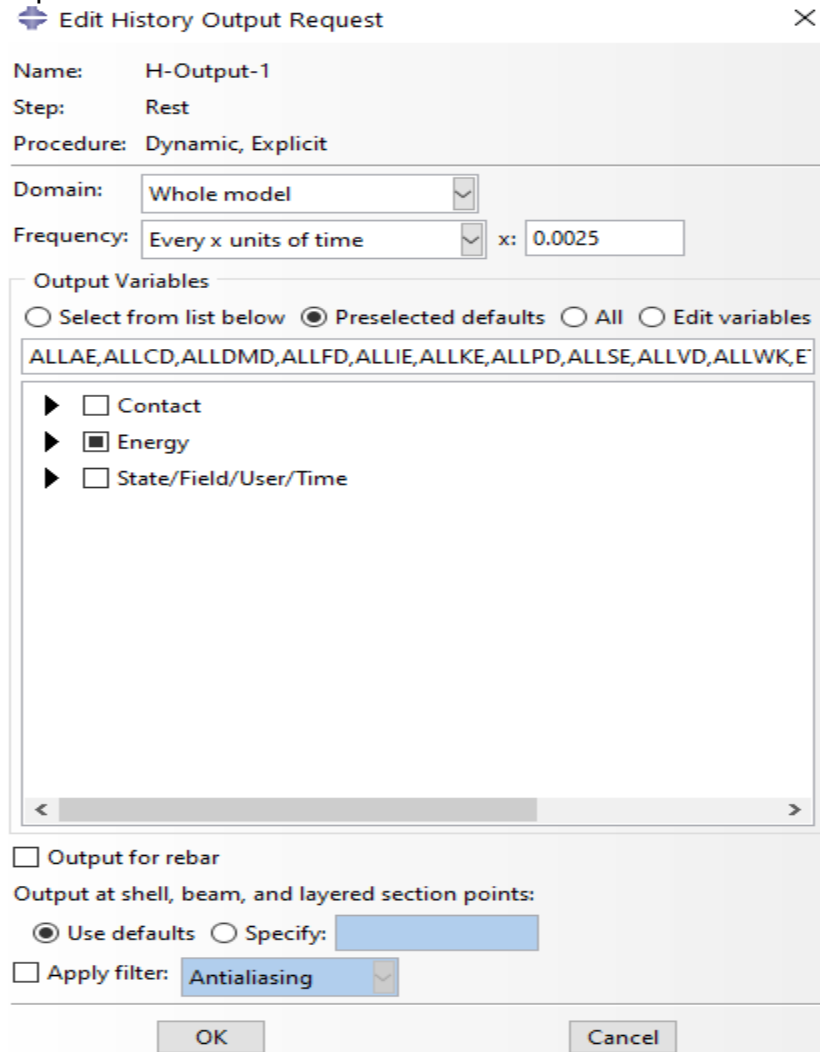
## Αποτελέσματα ανάλυσης

Σε επόμενο τόνο προσδιορίζουμε τα output ,τα αποτελέσματα που παίρνουμε δηλαδή από κάθε βήμα .Για τον σκοπό αυτό ανοίγουμε διαδοχικά το δέντρο επιλογών <<Field output Requests>>,<<F output 1>> και <<States>>.και κάνουμε διπλό κλικ στο Rest που υποδηλώνει τις αιτήσεις που έγιναν σε αυτό το βήμα της ανάλυσης.(Εικόνα 89).Παρατηρούμε πως δίπλα από κάθε βήμα υπάρχει μια παρένθεση η οποία δηλώνει εάν η αίτηση αποτελεσμάτων έγινε στο συγκεκριμένο βήμα (Propagated),αν τροποποιήθηκε σε αυτό το βήμα ( Modified),η αν δεν είναι ενεργή σε αυτό το βήμα (Inactive).Στο παράθυρο που εμφανίστηκε ορίζουμε τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται ανα 0.06 δευτερόλεπτα της ανάλυσης και γράφουμε ως επιθυμητό output όλες τις επιλογές που περιλαμβάνονται (δυνάμεις ,ροπές ,τάσεις,μετακινήσεις).Πιο παραστατικά θα είναι :



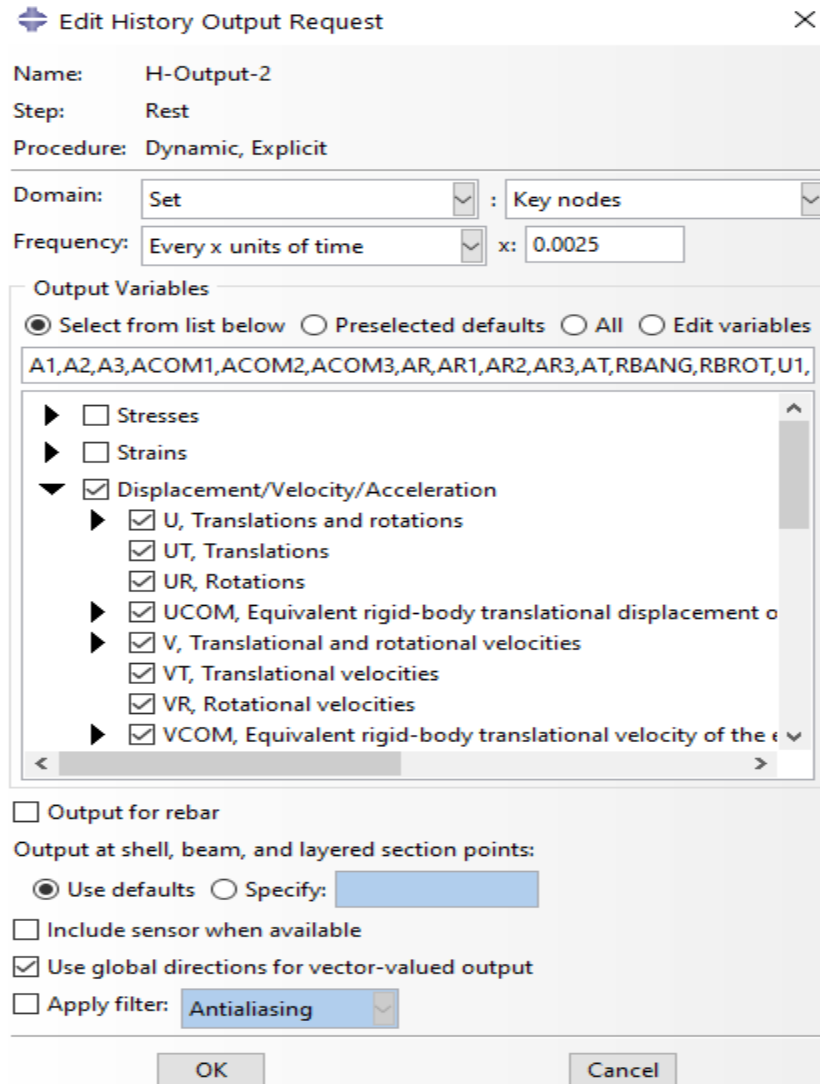
Εικόνα 114: Ορισμός αποτελεσμάτων στο βήμα Rest

Όπως διακρίνεται στην επιλογή των θεμιτών αποτελεσμάτων εμείς τα επιλέξαμε όλα για μια καλύτερη εποπτεία του θέματος. Κατόπιν ανοίγουμε διαδοχικά το δέντρο επιλογών <<History output Requests>> και προχωράμε στο <<States>> και με διπλό κλικ στην επιλογή <<Rest>> φαίνονται οι αιτήσεις που έχουν γίνει σε αυτό το βήμα της ανάλυσης, δηλαδή οι διάφορες ενέργειες (κινητική, δυναμική κ.ο.κ.). Ορίζουμε την συχνότητα εμφάνισης των αποτελεσμάτων σε 0.0025 και να βγαίνει σε κάθε <<x units of time >> και πατάμε εκ νέου Ok.



Εικόνα 115:History output 1

Για χάρη της ανάλυσης δημιουργούμε ένα νέο History output κάνοντας διπλό κλικ στην αρχική επιλογή Requests ορίζοντας ως πρώτο βήμα καταγραφής το βήμα <<Rest>>. Επιλέγουμε το Set <<Key nodes>> και ζητάμε εδώ όπως φαίνεται όλες τις μετακινήσεις και επιταχύνσεις κατά x y z

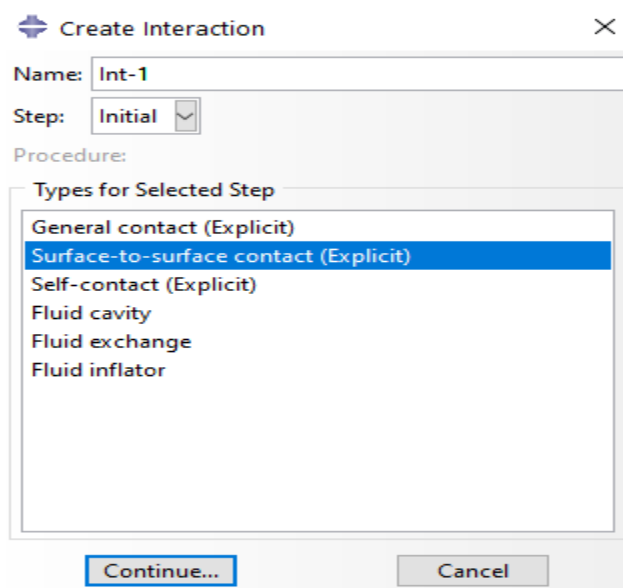


Εικόνα 116 Set Key nodes History output

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο δημιουργούμε ένα History output 3 για το Set base πάλι με αρχικό βήμα Rest και πάλι με επιλεγμένες όλη την μπάρα των μετακινήσεων.

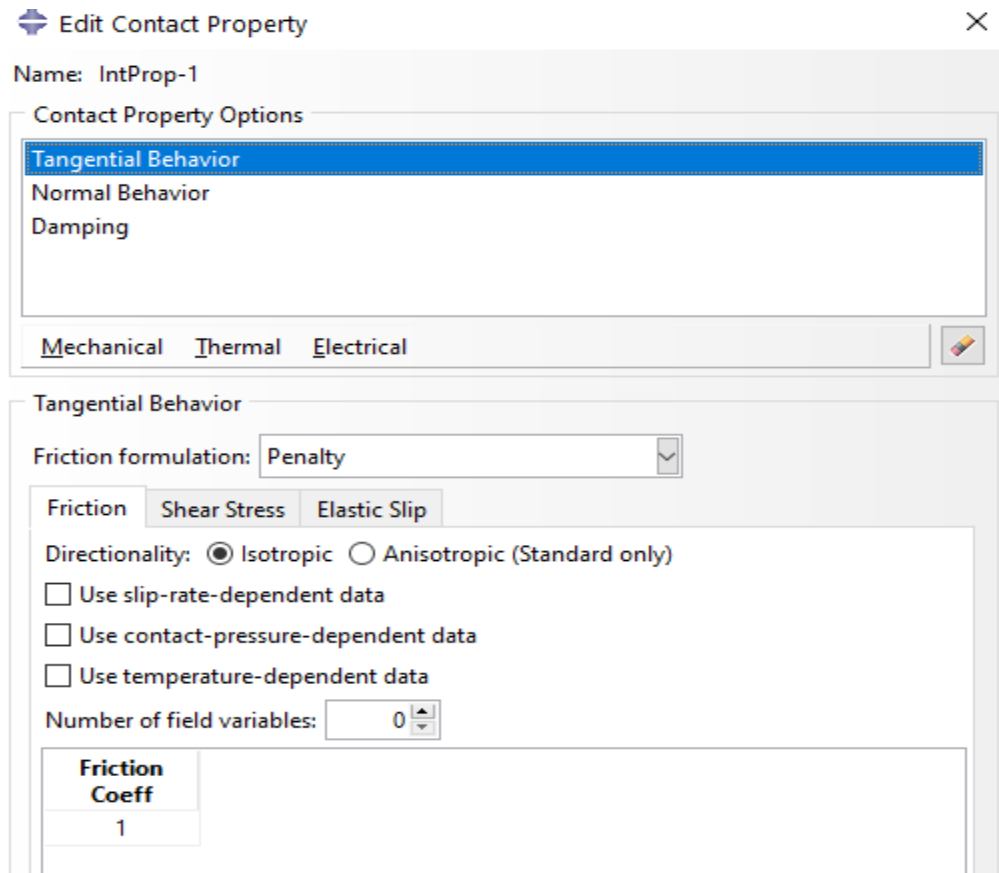




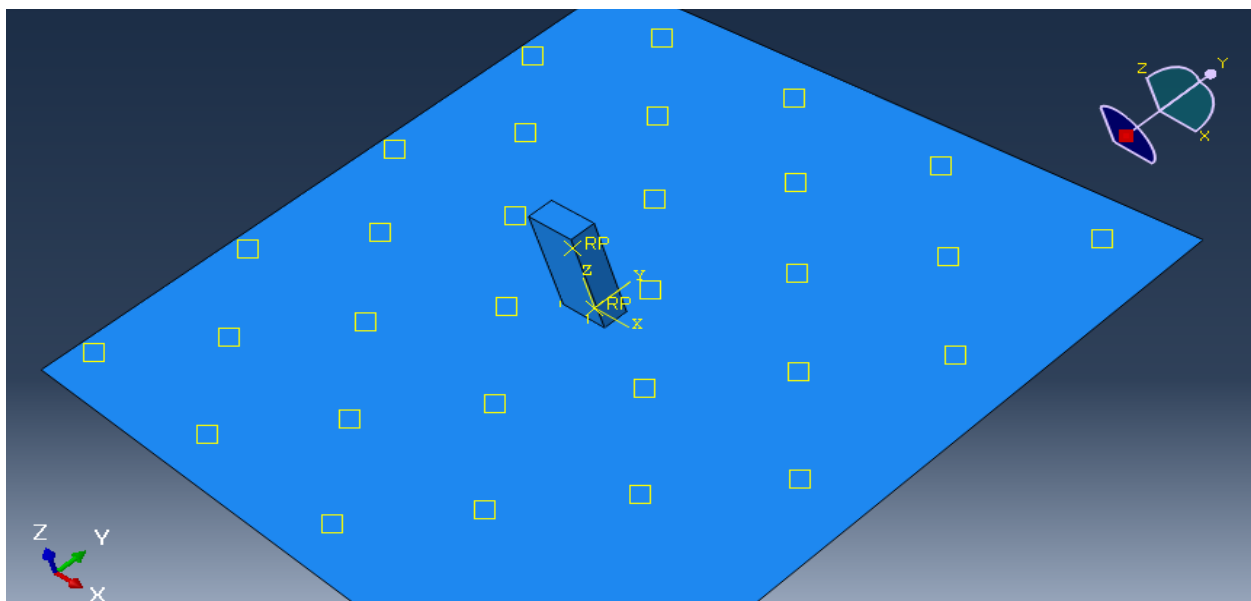


Εικόνα 118: Τύπος επαφής δοκιμίου και βάσης

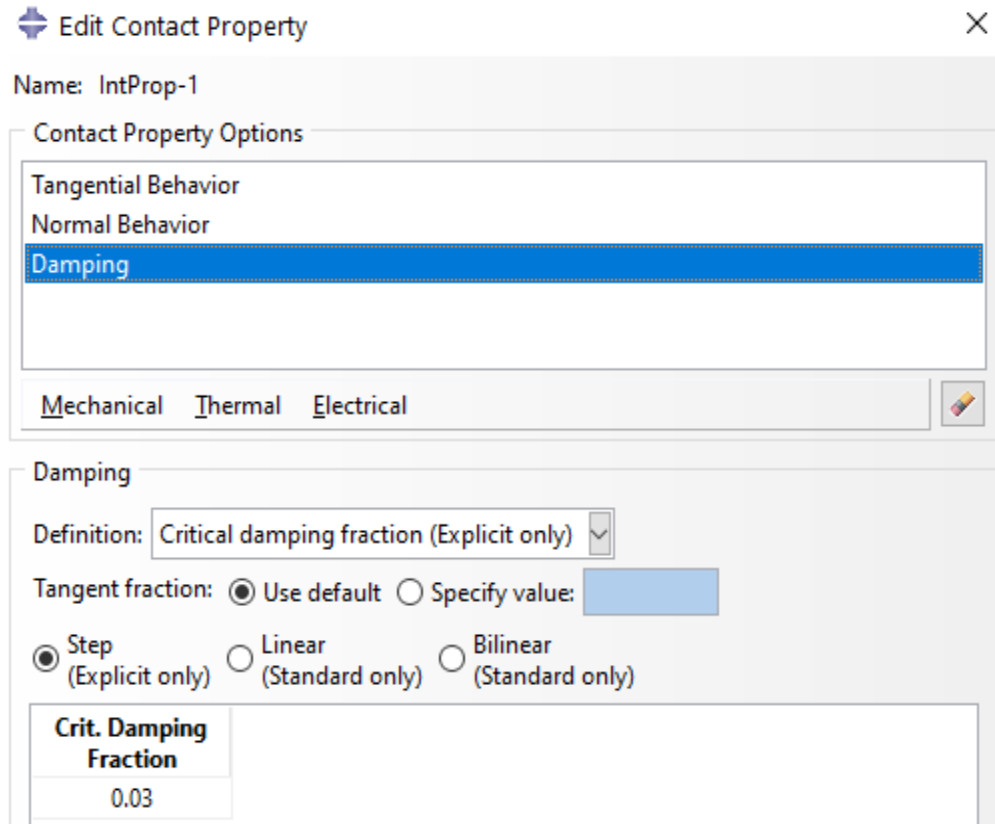
Όταν ανοίγει το επόμενο παράθυρο πατάμε δίπλα από την επιλογή <<Global Property Assignment>> το Create για να δημιουργηθούν τα χαρακτηριστικά της επαφής. Στην συνέχεια επιλέγουμε Continue και ορίζουμε τις ιδιότητες Tangential Behaviour με την επιλογή Penalty και εκεί επιλέγουμε συντελεστή αποκατάστασης  $\eta=1$  ή  $0.9$  όπως τον υπολογίσαμε επακριβώς από τους τύπους Housner. Ακολούθως πατάμε Normal Behaviour και Hard Contact και τέλος ανοίγουμε την επιλογή Damping δηλαδή απόσβεση και θέτουμε εκεί τους συντελεστές απόσβεσης  $\zeta$  από  $2.5-5\%$ . Πιο συγκεκριμένα είναι :



Εικόνα 119: Συντελεστής αποκατάστασης και συμπεριφορά κατά την φορά της διεύθυνσης -τριβή



Εικόνα 120: Αναπαράσταση σχηματικά της αλληλεπίδρασης

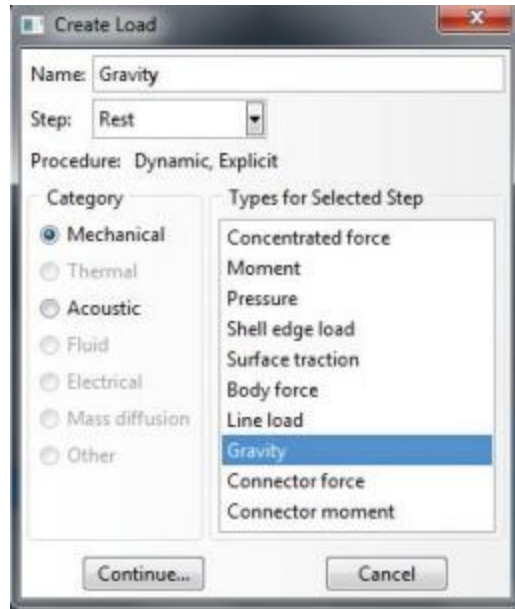


Εικόνα 121: Συντελεστής απόσβεσης κορμού βάσης – Feminille και Fanciulla

Πατάμε τώρα από τα διαθέσιμα properties το <<IntProp-1>> και στην συνέχεια <<Ok.>>

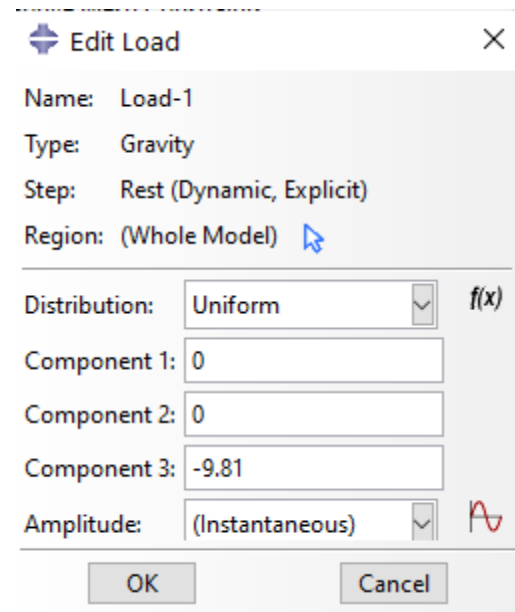
### Ορισμός των φορτίων και των επιθυμητών δευσμεύσεων

Σε αυτό το βήμα αρχικά πατάε διπλό κλικ στην επιλογή <<Loads>>(φορτία) της καρτέλλας εργασιών και ονομάζουμε το φορτίο Gravity και επιλέγουμε ως πρώτο βήμα το Rest και τον τύπο Gravity. Δηλαδή :



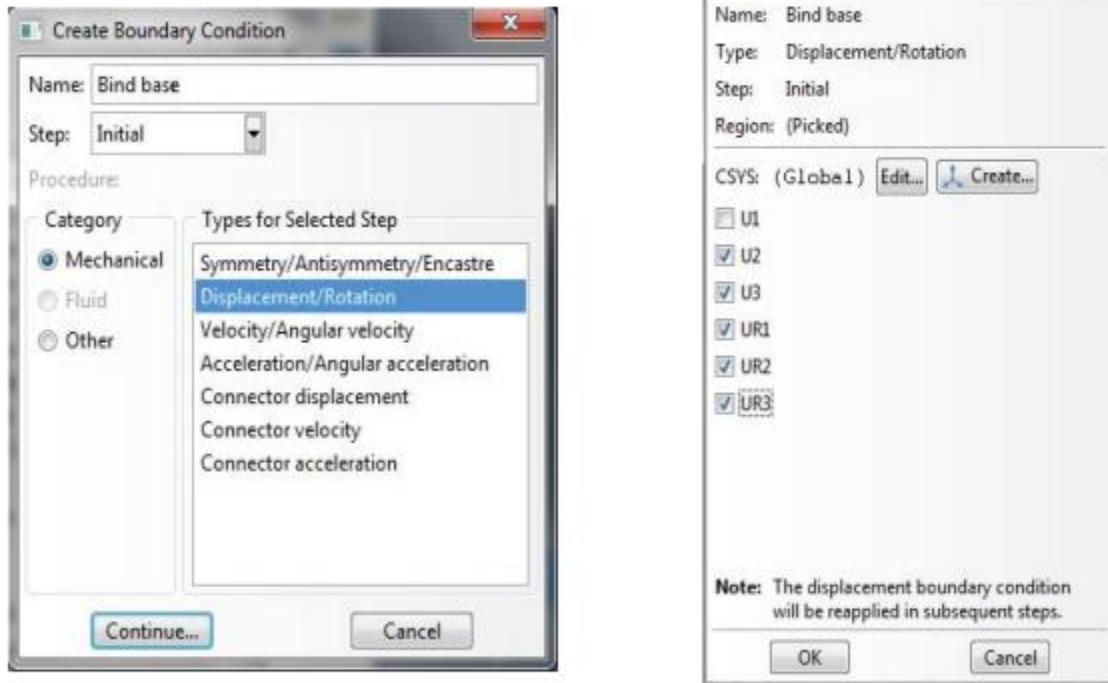
Εικόνα 122: Ορισμός Φορτίων

Αφου κλικάρουμε το <<Continue>> επιλέγουμε  $-9.81\text{m/s}^2$  στην διεύθυνση z-z' κατα την διεύθυνση δηλαδή της αδρανειακής μας δύναμης .Επεξηγηματικά :



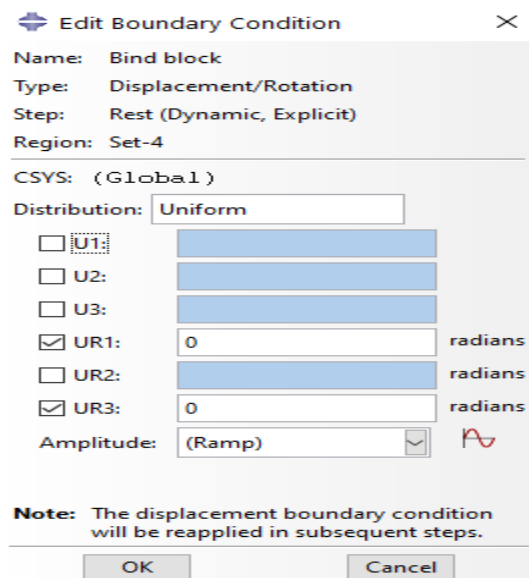
Εικόνα 123: Διεύθυνση φορτίου gravity

Προχωρώντας στην επιλογή των δεσμεύσεων κάνουμε διπλό κλικ στο <<B<sub>cs</sub>>> και ορίζουμε την πρώτη δέσμευση με όνομα Bind base ,βήμα Initial και τύπο Displacement/Rotation.Επιλέγουμε το σημείο αναφοράς της βάσης και πατάμε το μεσαίο κλικ του ποντικιού.Επιπροσθέτως δεσμεύουμε το Κ.Β της βάσης σε όλες τις μετακινήσεις εκτός από το U<sub>1</sub> ,όπου και θα εφαρμοστεί η επιτάχυνση εδάφους a<sub>g</sub>.



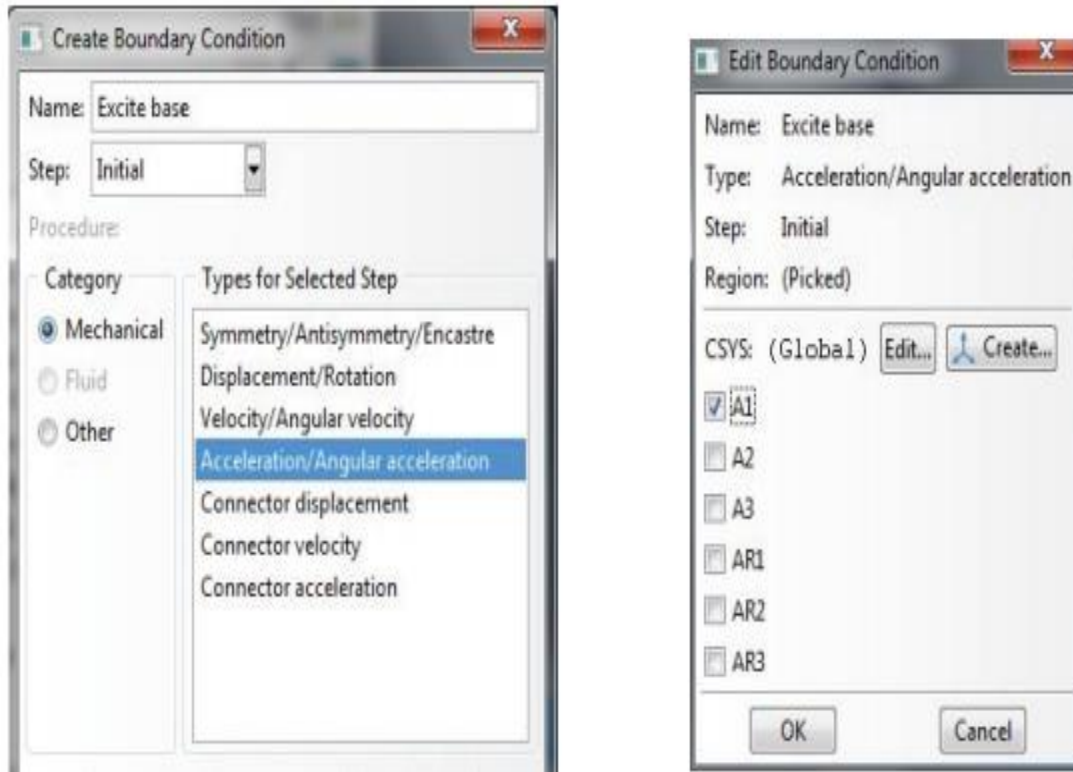
Εικόνα 124: Δέσμευση Bind base

Παρομοίως δημιουργούμε δέσμευση με το όνομα <<Bind Block>>-βήμα εφαρμογής Initial επιλέγουμε το Κ.Β. του κορμού και πατάμε μεσαίο κλικ.Εδώ θέλει προσοχή καθώς για παλμούς για την διεύθυνση x ,το δεσμεύουμε κατά UR1 και UR3 ,ενώ για παλμούς κατα την διεύθυνση y ,το δεσμεύουμε κατα UR2 και UR3 για να μην εμφανίζονται κινήσεις εκτός επιπέδου.



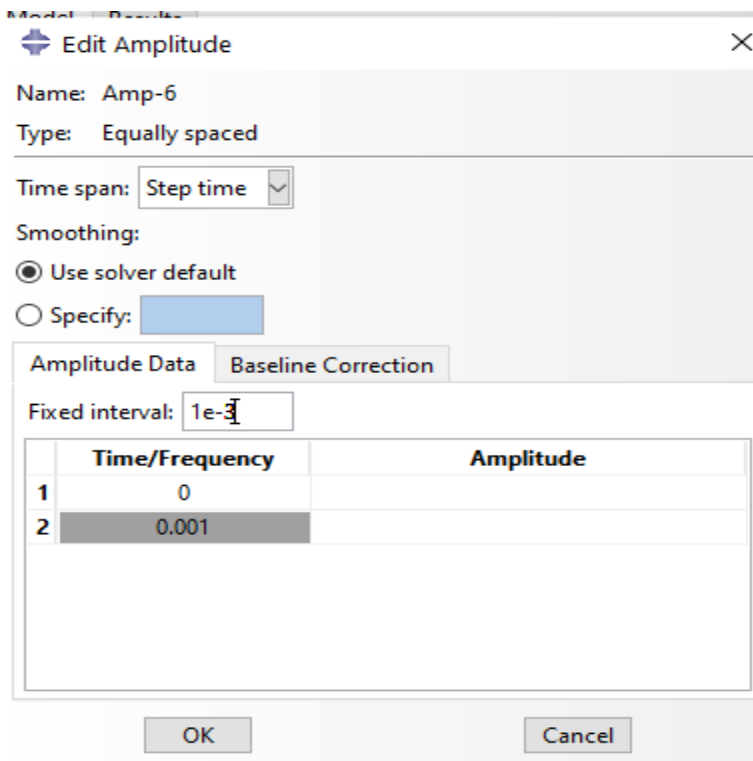
Εικόνα 125: Bind block για παλμό κατα x-x'

Τέλος δημιουργούμε μία Τρίτη δέσμευση με το όνομα <<Excite base>> και βήμα initial με τύπο Acceleration/Angular acceleration(επιτάχυνση) επιλέγουμε το σημείο αναφοράς της βάσης και στην συνέχεια το A1.



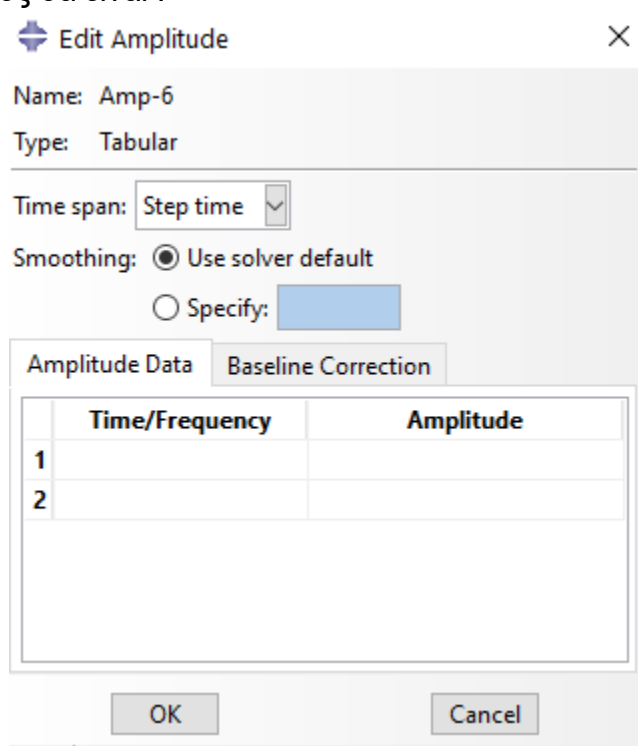
Εικόνα 126: Δέσμευση για εφαρμογή εδαφικής επιτάχυνσης

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε πως πρέπει να επιλέξουμε την επιτάχυνση που θα <<τρέξει>> στο σύστημα. Πατάμε διπλό κλικ στο **Amplitudes** και για παλμούς πατάμε την επιλογή <<Equally spaced>> ,ενώ για τους σεισμούς θα είναι <<Tabular>>. Πιο συγκεκριμένα στο Equally spaced μας ζητείται να τοποθήσουμε τιμή στο κουτάκι του Fixed interval όπου για τους παλμούς θα είναι  $e^{-3}$ . Σχηματικά για τους παλμούς είναι:



Εικόνα 127: Επιταχύνσεις για τους παλμούς

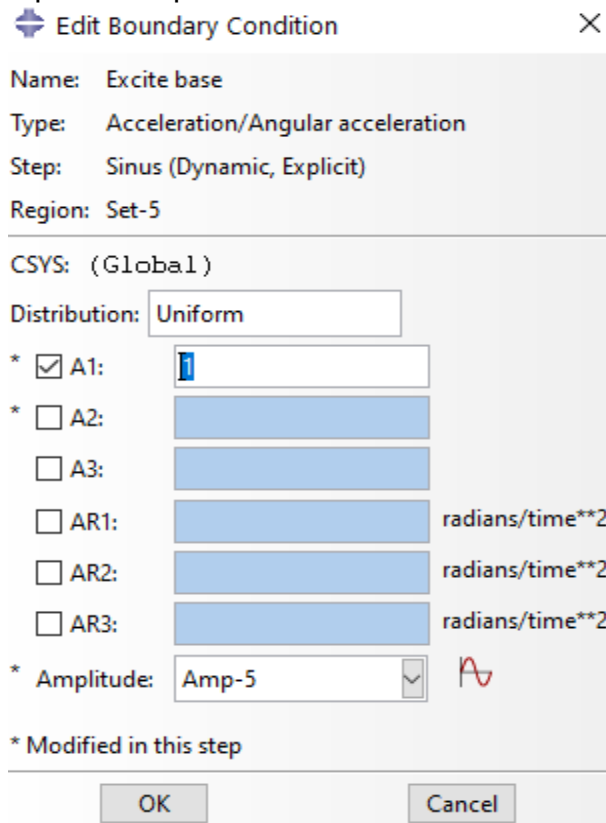
Ενώ για τους σεισμούς θα είναι :



Εικόνα 128: Αριστερή στήλη χρόνος δεξιά η χρονοιστορία σεισμού



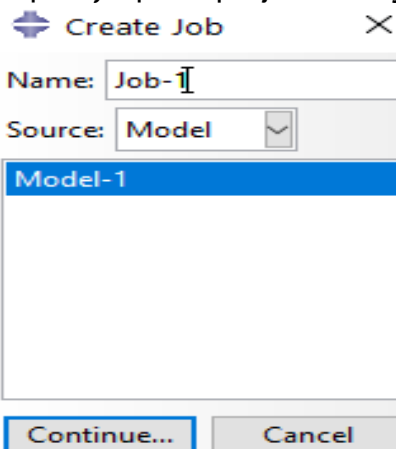
Για την εφαρμογή της κάθε επιτάχυνσης που ορίσαμε παμε στο κάτω κουτάκι της δέσμευσης Bind base της επιλογής του βήματος **Sinus** που τις εμπεριέχει όλες και ορίζουμε την επιτάχυνση και πατάμε το κουτί Ok.



Εικόνα 129: Κατω κουτί επιλογής επιτάχυνσης

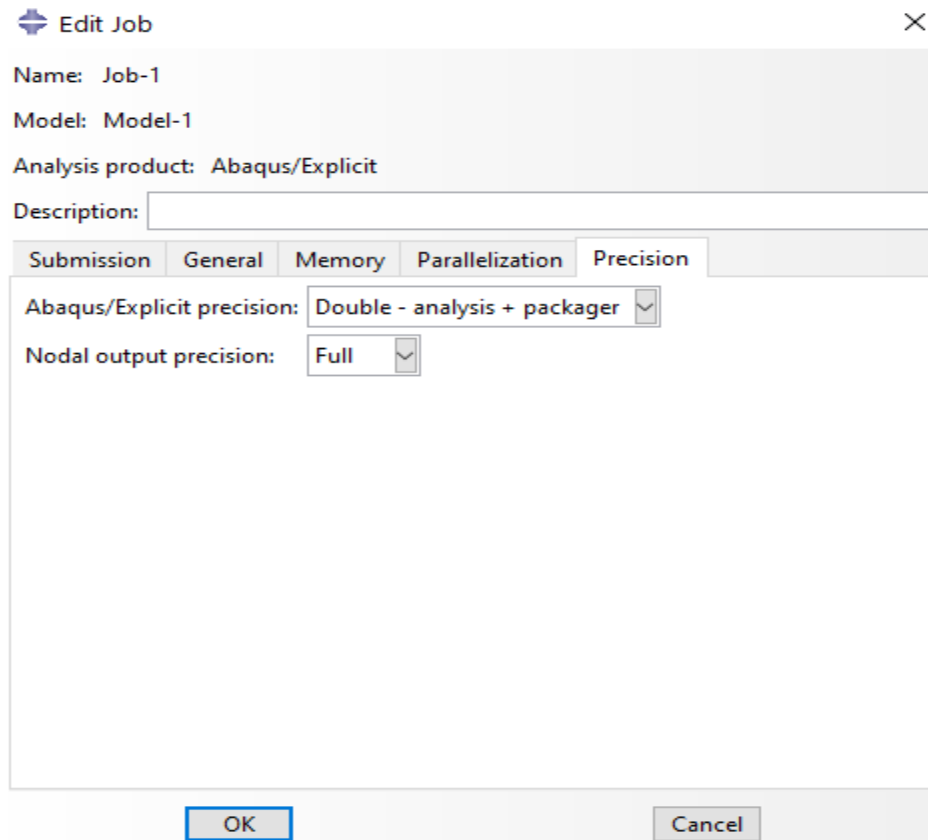
### Επίλυση μοντέλου

Έχουμε ορίσει τα απολύτως απαραίτητα και προχωράμε στην επίλυση .Πατάμε δύο φορές την επιλογή Jobs και ονοματίζουμε το project όπως εμείς επιθυμούμε .

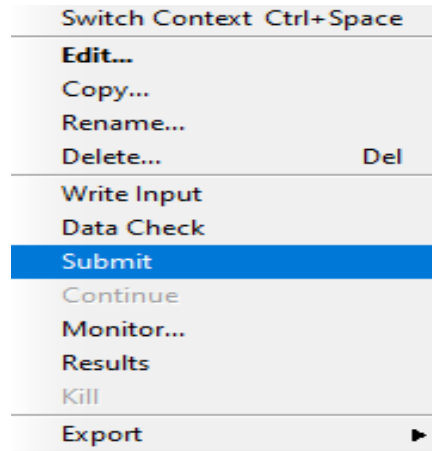


Εικόνα 130: Ονοματοδοσία Job

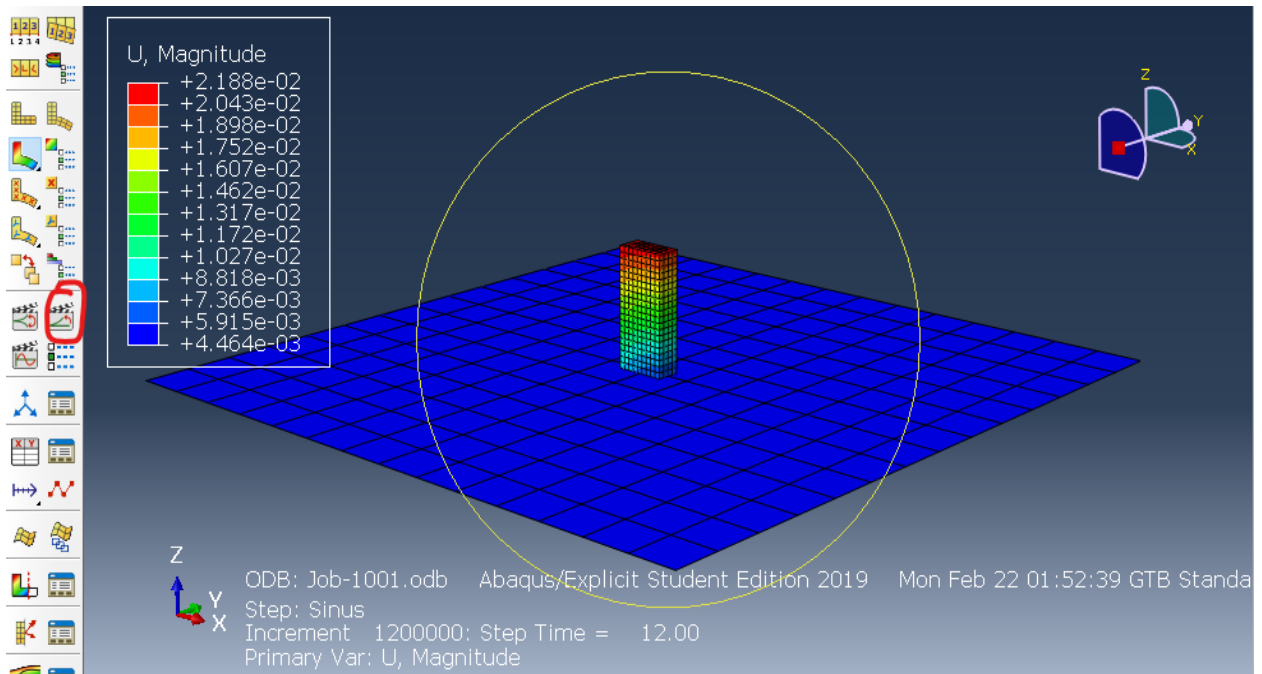
Σημαντικό είναι να ορίσουμε την ακρίβεια της ανάλυσης ως διπλή στην καρτέλα <<Precision>>, καθώς το θέμα μας περιλαμβάνει πολλές διαδοχικές κρούσεις. Πατάμε Ok και στην συνέχεια για να το υποβάλλουμε κάνουμε δεξί κλικ και <<Submit>>. Κάτω την καρτέλα αποτελεσμάτων θα φαίνεται αν υπάρχουν προβλήματα θα μας δείξει <<Error>>. Στην περίπτωση που εμφανιστούν προβλήματα θα πατήσουμε την επιλογή **Monitor** από το Jobs . Συνήθως εκεί θα φταίει κάποιο αδρανειακό θέμα. Τέλος κάνουμε δεξί κλικ και πατάμε <<Results>>. Εκεί μπορούμε είτε να δούμε την δυναμική κίνηση του σώματος με το <<Animate time history >> η το πιο σημαντικό να εκλάβουμε τις μετακινήσεις στα δύο σημεία του Key nodes η την επιτάχυνση του εδάφους από το <<History output database >> και εξαρτάται αν είναι η δόνηση κατά x και y . Τέλος έχουμε τις τέσσερις φωτογραφίες που αποτυπώνουν τις εντολές αυτές.



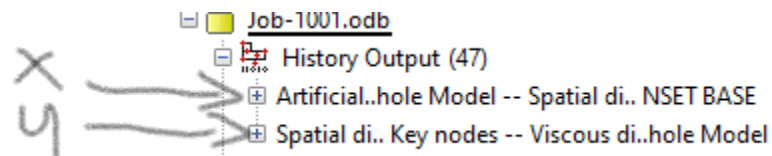
Εικόνα 131: 1η Εντολή -ορισμός ακρίβειας ανάλυσης



Εικόνα 132: Υποβολή project



Εικόνα 133: Animate time history με χαρακτηριστική κόκκινη κουκίδα



Εικόνα 134:History outputs

Όπου φαίνεται πως για παλμούς-σεισμούς κατα  $x$  θα χρειαζόμαστε αποτελέσματα της πρώτης κουκίδας ενώ για  $y$  από την δεύτερη. Τέλος να εκμυστηρευτούμε πως όλες οι φωτογραφίες του παραρτήματος προσφέρονται για αντικείμενο μελέτης και πως το Abaqus αποδεικνύει συνέχως τα όμορφα μονοπάτια του.