ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Δομοστατικής
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας
ΔΠΜΣ : «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών»

Διερεύνηση Σεισμικής Συμπεριφοράς Μουσειακών Εκθεμάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κανάκης Ν. Αλέξανδρος

Επιβλέπων : Φραγκιαδάκης Μιχαήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Διαμαντόπουλος Σπυρίδων, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2022

Περιεχόμενα Σχημάτων

Πίνακας περιεχομένων

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ
ΔΠΜΣ : «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση Σεισμικής Συμπεριφοράς Μουσειακών Εκθεμάτων

Κανάκης Α. Ν. (Επιβλέποντας: Φραγκιαδάκης Μιχαήλ)

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την μοντελοποίηση μουσειακών εκθεμάτων με τη χρήση προσομοιωμάτων που βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία θα προκύψουν, θα αξιολογηθούν με τη βοήθεια των δεδομένων τα οποία ελήφθησαν από τα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος SERA/SEREME (SEismic REsilience of Museum contEnts). Επομένως, η αντιμετώπιση ενός πολυσύνθετου προβλήματος όπως είναι ο λικνισμός, θα προσεγγιστεί μέσω πιστών αντιγράφων, των μουσειακών εκθεμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, με τη χρήση του λογισμικού ABAQUS/CAE. Τα διάφορα μοντέλα τα οποία δημιουργήθηκαν στο λογισμικό προέκυψαν έπειτα από διερεύνηση διαφόρων παραμέτρων όπως είναι η χρήση δύσκαμπτου (rigid) ή εύκαμπτου μοντέλου (deformable), η χρήση απλοποιητικού προσομοιώματος ή της ακριβούς γεωμετρίας του αγάλματος και οι τιμές τριβής, απόσβεσης και μεγέθους πεπερασμένων στοιχείων. Τελικός σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η λεπτομερείς προσομοίωση και η επιλογή των ορθότερων παραμέτρων έτσι ώστε να μπορούν να δοθούν ασφαλές εκτιμήσεις, σχετικά με το πρόβλημα του λικνισμού, μέσω ενός μοντέλου στο λογισμικό Abaqus, συγκρινόμενα με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τον λικνισμό ενός ελεύθερα εδραζόμενου στερεού σώματος υπό σεισμική διέγερση καθώς και οι εξισώσεις κίνησης αυτού. Αποδεικνύεται ότι ο συντελεστής αποκατάστασης R εξαρτάται καθαρά και μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση σώματος αλλά και ο λόγος για τον οποίο αμελείται η ολίσθηση στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύγκριση ενός δύσκαμπτου (rigid) μοντέλου το οποίο δημιουργήθηκε στο Abaqus με ένα εύκαμπτο (deformable) μοντέλο και γίνεται η διερεύνηση σχετικά με το πόσο, η παραπάνω πληροφορία η οποία «μπαίνει» στο μοντέλο με τη χρήση εύκαμπτου προσομοιώματος (δηλαδή ακριβής ιδιότητες του υλικού αλλά και η εσωτερική κάμψη που αναπτύσσεται στο μοντέλο), φαίνεται να αποτυπώνεται και στα αποτελέσματά τους. Παρατηρείται ότι η μικρή σχετικά βελτίωση είναι σε τέτοιο βαθμό όπου δεν δικαιολογεί τον σημαντικά αυξημένο υπολογιστικό χρόνο του προβλήματος επομένως χρησιμοποιήθηκαν δύσκαμπτα μοντέλα στη συνέχεια της έρευνας. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε ένα πρισματικό, γεωμετρικά μοντέλο με τιμές παρόμοιες με εκείνες του πραγματικού αγάλματος επομένως αντίστοιχες τιμές λυγηρότητας και με αντίστοιχες τιμές ροπών αδρανείας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, έπειτα από την εισαγωγή της ακριβούς γεωμετρίας του αγάλματος στο λογισμικό, μέσω την βοήθεια τρισδιάστατου σαρωτή, θα γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων ενός δύσκαμπτου απλοποιητικού προσωμοιώματος με ένα, επίσης δύσκαμπτο μοντέλο, αλλά, με τα ακριβή γεωμετρικά στοιχεία ώστε να φανεί στη πράξη το

κατά πόσο οι λεπτομέρειες στη μορφή του αγάλματος δίνουν καλύτερα αποτελέσματα. Φαίνεται ότι μια γενική εικόνα του αγάλματος με τις ακριβής τιμές σε λυγηρότητα και ροπές αδράνειας παρέχουν μειωμένη ακρίβεια χωρίς ιδιαίτερη διαφορά σε υπολογιστικό χρόνο κατά τη προσομοίωση σε Abaqus.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η καταλληλότερη μορφή απόσβεσης η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της βέλτιστης προσομοίωσης του μοντέλου στο Abaqus. Στη πραγματικότητα η απόσβεση σε ένα πρόβλημα λικνισμού πραγματοποιείται μέσω των διαδοχικών κρούσεων στις οποίες υπόκειται το δοκίμιο. Μια τέτοια προσομοίωση δεν είναι εφικτή μέσω του Abaqus επομένως ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να συγκρίνει τη συνηθέστερη μορφή απόσβεσης η οποία χρησιμοποιείται σε προβλήματα λικνισμού στο συγκεκριμένο πρόγραμμα (ιξώδης απόσβεση ζ) σε σχέση με μια διαφορετικής μορφής, χρονικά γραμμικής απόσβεσης, η οποία βρέθηκε με βάση την βιβλιογραφία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο φαίνεται η παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και η σύγκρισή τους με τα πειραματικά δεδομένα του προγράμματος SERA/SEREME και φαίνεται το κατά πόσο τα μοντέλα είναι σε θέση να δώσουν μια ασφαλή εκτίμηση του λικνιστικού φαινομένου και με ποιες παραμέτρους. Γίνεται η παρατήρηση πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Abaqus χρησιμοποιώντας ένα δύσκαμπτο προσομοίωμα της πραγματικής γεωμετρίας του αγάλματος και με τη χρήση της απόσβεσης με βάση το υλικό (Critical Damping) δίνει αποτελέσματα πολύ κοντινά σε εκείνα τα οποία δόθηκαν στο πλαίσιο των πειραμάτων και είναι σε θέση να δώσει μια αντιπροσωπευτική εικόνα της πραγματικής συμπεριφοράς του αγάλματος.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρατίθενται τα συμπεράσματα της μελέτης σχετικά τον τρόπο προσομοίωσης προβλημάτων λικνισμού στο Abaqus αλλά και στη γενικότερη ερώτηση εάν μπορεί ένα «ελαφρύ» μοντέλο μικρού υπολογιστικού χρόνου να δίνει αξιόπιστες απαντήσεις σε ένα τόσο σύνθετο και μη γραμμικό πρόβλημα. Στη συνέχεια προτείνονται ιδέες για μελλοντική μελέτη και έρευνα.

Τέλος, στις τελευταίες σελίδες γίνεται παράθεση των βιβλιογραφικών αναφορών για την καλύτερη καθοδήγηση και μελέτη του αναγνώστη, καθώς και ένα παράρτημα στο οποίο φαίνεται αναλυτικά ο τρόπος δημιουργίας των υπό εξέταση μοντέλων στο περιβάλλον του Abaqus/CAE όσον αφορά όλα τα μοντέλα τα οποία δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
LABORATORY OF STUCTURAL ANALYSIS AND ANTISEISMIC RESEARCH
MSc: «ANALYSIS AND DESIGN OF EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURES»

MASTER THESIS

Seismic Response Assessment of Museum Artifacts

Kanakis A. N. (supervised by Fragiadakis Michalis)

Abstract

This master thesis deals with the modeling of museum artifacts using simulations based on the finite element method. The numerical results will be evaluated with the help of experimental data performed through SERA/SEREME program (SEismic REsilience of Museum contEnts). Therefore, tackling a complex problem such as rocking will be approached through exact copies of the museum exhibits used in the experiments, using the ABAQUS / CAE software. The various models created in the software emerged after investigating various parameters such as the use of rigid or flexible model, the use of simplistic simulation of the statue or the exact geometry and the values of friction, damping and finite element size. The ultimate goal of this research is the detailed simulation and selection of the correct parameters so that safe estimates can be given about the rocking problem, through a model in Abaqus software, compared to the experimental data.

The first chapter of the paper presents the theoretical background on the rocking of a solitary free-standing solid body subjected to a seismic excitation as well as its equations of motion. It turns out that the coefficient of restoration R depends purely on the geometric characteristics of the body under consideration but also the reason why the slip is neglected in the present dissertation.

The second chapter compares a rigid model created in Abaqus with a deformable model and investigates how this extra information of using a flexible simulation (i.e. exact material properties but also the internal bending that develops in the model), seems to be reflected in their results. It is observed that the relatively small improvement in the results is to a point that does not justify the significantly increased computational time of the problem therefore rigid models were used in the continuation of the research. At this point it is worth mentioning that in both cases was used the same prismatic simplified model with slenderness and moments of inertia values similar to those of the real statue.

In the third chapter, after the introduction of the exact geometry of the statue in the software, through the help of a 3D scanner, the results of a rigid simplification model will be compared with a, also rigid, model but with the exact geometry in order to check in practice whether the details in the form of the statue give better results. It seems that a simplified model of the statue with accurate values in slenderness and moments of inertia provide reduced accuracy with almost the same computational time when simulated in Abaqus.

The fourth chapter analyzes the most appropriate form of damping that will be used in the context of the optimal model simulation in Abaqus. In fact, the damping in a rocking problem takes place through the successive impacts to which the specimen is subjected. Such a simulation is not possible through Abaqus therefore the purpose of this chapter is to compare the most common form of damping used in rocking problems in Abaqus (critical

damping) in relation to a different form of linear damping which was found based on the literature.

The fifth chapter shows the presentation of the final results of the simulations and their comparison with the experimental data of the SERA / SEREME program and shows whether the models are able to give a safe estimate of the rocking phenomenon and with what parameters this is achieved. It is observed that the results of the simulation in Abaqus using a rigid simulation of the real geometry of the statue and the use of material damping (Critical Damping) gives results very close to those given in the experiments and is able to give a representative picture of the actual behavior.

The sixth and final chapter of this paper presents the conclusions of the study on how to simulate rocking problems in Abaqus, but also if a light, low computational time model can give reliable answers to such a complex and non-linear problem. Then, ideas for future study and research are suggested.

Finally, in the last pages of the dissertation there is a list with the bibliographic references for better guidance and study of the reader, as well as an appendix that shows in detail how to create the models which was used in this research in Abaqus / CAE environment regarding the rigid and flexible model.

Ευχαριστίες

Φθάνοντας στη περάτωση του μεταπτυχιακού προγράμματος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Φραγκιαδάκη για όλη του την υποστήριξη καθώς υπήρξε υποστηρικτικός από την πρώτη στιγμή και ήταν πάντα διαθέσιμος σε ότι και εάν χρειάστηκα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ Σπυρίδων Διαμαντόπουλο ο οποίος ήταν δίπλα μου σε όλη αυτή τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας και όπου χωρίς εκείνον αυτή τη μελέτη δεν θα ήταν εφικτή.

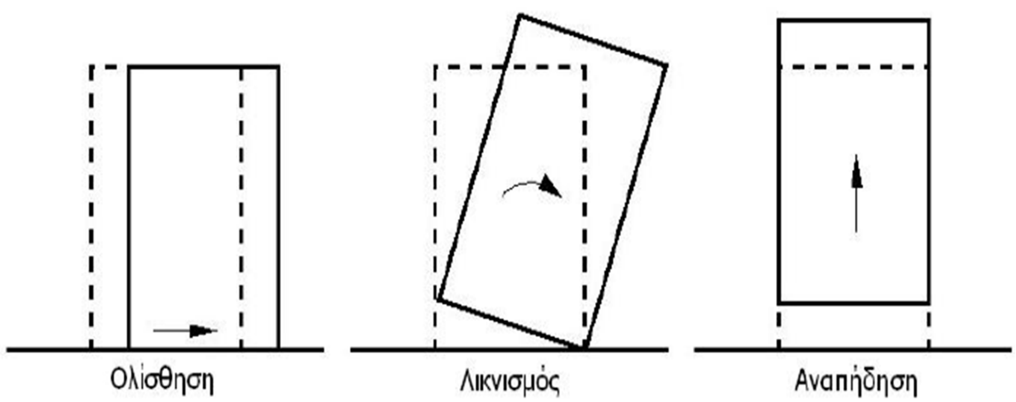
Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά μέσα από την καρδία μου την οικογένεια μου Νίκο, Στέλλα και Στέφανο οι οποίοι υπήρξαν στήριγμα μου σε όλη μου την σταδιοδρομία με αγνή ανιδιοτέλεια, ως ένα ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης.

1. ΛΙΚΝΙΣΜΟΣ ΑΚΑΜΠΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ

1.1 Εισαγωγή

Θεωρείται άκαμπτο σώμα το οποίο εδράζεται επί οριζόντιας, άκαμπτης επιφάνειας και υποβάλλεται σε εξωτερική (σεισμική) διέγερση. Το σώμα αυτό είτε θα παραμείνει στην ίδια απαραμόρφωτη κατάσταση όταν η διέγερση αυτή δεν είναι αρκετά μεγάλη, είτε, στην περίπτωση όπου η διέγερση είναι αρκετά μεγάλη μπορεί να λικνιστεί, να ολισθήσει, να αναπηδήσει ή να ξεκινήσει κάποιον συνδυασμό των παραπάνω και σε κάποιες περιπτώσεις να ανατραπεί.

Το φαινόμενο του λικνισμού αποτέλεσε αντικείμενο ενδελεχούς και αναλυτικής μελέτης και πειραματικής έρευνας καθώς αποδείχτηκε ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πρόβλημα αφού λόγω της μη γραμμικής φύσεως του εμφάνιζε αντιφατικές καταστάσεις. Κάποιες εξ αυτών είναι ότι η ανατροπή ενός δοκιμίου υπό συγκεκριμένο πλάτος επιτάχυνσης δεν συνεπάγεται απαραιτήτως και την ανατροπή του και υπό αυξημένο πλάτος επιτάχυνσης, επίσης, το εύρος της απόκρισης δεν μειώνεται πάντα με τη μείωση της τιμής του συντελεστή επαναφοράς, όπως και το ότι η ευστάθεια ενός δοκιμίου δεν εξαρτάται μονοτονικά από το μέγεθός του ή την λυγηρότητά του.



Σχήμα 1.1 Πιθανές Μορφές Απόκρισης Στερεού Ελεύθερα Εδραζόμενου σώματος υπό σεισμική διέγερση

Η αρχή για την αντιμετώπιση αυτού του μη γραμμικού φαινομένου έγινε από τον George W. Housner (California Institute of Technology) το 1963 μελετώντας τον λικνισμό ενός άκαμπτου σώματος στηριζόμενο σε επιφάνεια που υπόκειται οριζόντια μετακίνηση. Η επιτάχυνση της βάσης παρουσιαζόταν ως ένας ορθογωνικός ή μισός ημιτονικός παλμός και οι εξισώσεις που προέκυπταν αφορούσαν το ελάχιστο πλάτος της επιτάχυνσης που απαιτούνταν για την ανατροπή του σώματος.

1.2 Ολίσθηση Ελεύθερα Εδραζόμενου Σώματος – Συντελεστής Τριβής

Κατά τη διάρκεια της δυναμικής κίνησης ενός ελεύθερα εδραζόμενου σώματος εξαιτίας της διέγερσης της βάσης του αναπτύσσεται ολίσθηση η οποία συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι το σώμα δεν μπορεί να ακολουθήσει την κίνηση του εδάφους. Η τριβή αναπτύσσεται μεταξύ του υπό εξέταση σώματος και της βάσης, με διεύθυνση παράλληλη στη διεπιφάνειά τους και παράγεται από τη σχετική μετατόπιση των δυο αυτών επιφανειών όντας ανεξάρτητη από τις ταχύτητες αλίσθησής τους. Όταν η οριζόντια δύναμη υπερβαίνει μια οριακή τιμή η οποία ονομάζεται δύναμη στατικής τριβής $T_{στ}$, τότε το σώμα αρχίζει να ολισθαίνει, Ο λόγος της δυναμικής στατικής τριβής $T_{στ}$ ως προς την κατακόρυφη αντίσταση της βάσης N, καλείται συντελεστής στατικής τριβής $μ_{στ}$.

$$\mu_{\sigma\tau} = \frac{T_{\sigma\tau}}{N} \tag{1.1}$$

Το χρονικό διάστημα που συμβαίνει η ολίσθηση το σώμα συνεχίζει να υφίσταται τη δύναμη τριβής. Η οριζόντια δύναμη που απαιτείται για να συνεχίσει το σώμα να ολισθαίνει με σταθερή ταχύτητα ονομάζεται δύναμη τριβής ολίσθησης $T_{ολ}$ και ο λόγος αυτής ως προς την κατακόρυφη αντίσταση της βάσης ονομάζεται συντελεστης τριβής ολίσθησης $μ_{ολ}$ και γενικά ισχύει πως η τιμή του συντελεστή αυτού, τριβής ολίσθησης, είναι μικρότερη του συντελεστή στατικής τριβής.

$$\mu_{o\lambda} = \frac{T_{o\lambda}}{N} \quad , \quad \mu\varepsilon \ \mu_{o\lambda} < \mu_{\sigma\tau} \tag{1.2}$$

Είναι γενικώς αποδεκτό πως παρά την οποιαδήποτε αύξηση της οριζόντιας δύναμης κατά την ολίσθηση ενός στερεού σώματος, η δύναμη τριβής ολίσθησης παραμένει σταθερή. Γενικά, οι συντελεστές στατικής τριβής και τριβής ολίσθησης εξαρτώνται μόνο από τη φύση, τη γεωμετρία και τη μορφή των επιφανειών που εφάπτονται και είναι παντελώς ανεξάρτητοι με τη μάζα του σώματος και του εμβαδού της επιφάνειας επαφής μεταξύ σώματος και βάσης.

Ορίζονται ως $\ddot{U}$, $\ddot{V}$ οι οριζόντια και η κατακόρυφη επιτάχυνση στη βάση. Αντίστοιχα ορίζονται ως X και Y η οριζόντια και η κατακόρυφη μετακίνηση του στερεού σώματος, ως $\dot{X}, \dot{Y}$ οι αντίστοιχες ταχύτητες και τέλος ως $\ddot{X}$ και $\ddot{Y}$ η οριζόντια και κατακόρυφη επιτάχυνση. Έτσι, στη περίπτωση όπου το σώμα ακολουθεί τη κίνηση της βάσης όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχει ολίσθηση επομένως θα ισχύει :

$$\dot{X} = \dot{U} \tag{1.3}$$

Και

$$\dot{Y} = \dot{V} \tag{1.4}$$

Επίσης, ισχύει ότι :

$$\ddot{X} = \ddot{U} \tag{1.5}$$

$$\ddot{Y} = \ddot{V} \tag{1.6}$$

Ωστόσο, σύμφωνα με την αρχή του D'Alembert οι εξισώσεις κίνησης του στερεού σώματος για τις διευθύνσεις Χ και Υ αντίστοιχα, θα είναι :

$$m\ddot{X} = T \tag{1.7}$$

$$m\ddot{Y} = N - mg \tag{1.8}$$

όπου, η μάζα του σώματος έχει συμβολιστεί με m και με Ν ορίζεται η κατακόρυφη αντίδραση που ασκείται από τη βάση έδρασης στο υπό εξέταση σώμα. Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις προκύπτει εύκολα ότι :

$$T \; = m\ddot{U} \tag{1.9}$$

$$N = mg\,\left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) \tag{1.10}$$

Επομένως, για να ολισθήσει ένα στερεό σώμα θα πρέπει η αδρανειακή δύναμη $m\ddot{X}$ να γίνει τουλάχιστον ίση (ή μεγαλύτερη) της δύναμης στατικής τριβής $T_{στ}$, δηλαδή :

$$m\ddot{X} \;\geq\; T_{\sigma\tau} \tag{1.11}$$

Γνωρίζοντας όμως ότι ο συντελεστής στατικής τριβής είναι ίσος με τον λόγο της οριζόντιας δύναμης τριβής ως προς την κατακόρυφη αντίδραση και ενώνοντας τις σχέσεις προκύπτει ότι :

$$\mu_{\sigma\tau} = \frac{T_{\sigma\tau}}{N} \;\Leftrightarrow\; \mu_{\sigma\tau}N \;=\; T_{\sigma\tau} \tag{1.12}$$

Οπότε :

$$m\ddot{X} \;\geq m\mu_{\sigma\tau}g\left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) \tag{1.13}$$

Όμως, δεδομένου του ότι ισχύει $\ddot{X} = \ddot{U}$, συμπεραίνουμε πως όταν αρχίσει η ολίσθηση, για την οριζόντια επιτάχυνση η οποία αναπτύσσεται κατά τη διέγερση της βάσης θα ισχύει:

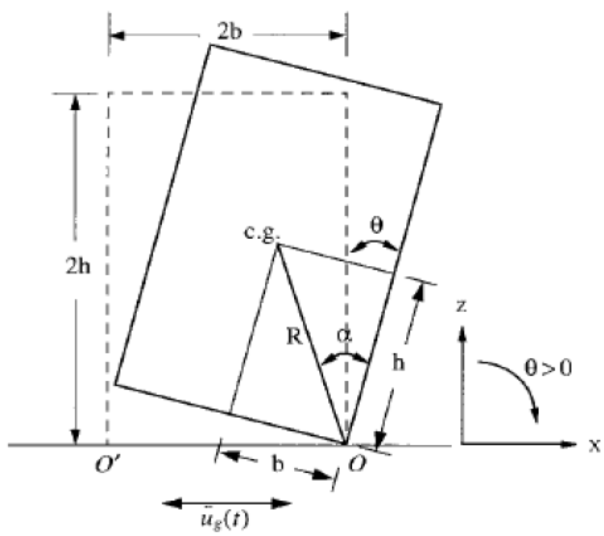
$$\ddot{U} \geq \mu_{\sigma\tau}g\left(1 + \frac{\ddot{V}}{g}\right) \tag{1.14}$$

Τελικά, γίνεται φανερό ότι αν αγνοήσουμε την ύπαρξη της κατακόρυφης διέγερσης, η ολίσθηση εμφανίζεται όταν η οριζόντια διέγερση ξεπεράσει την οριακή τιμή του γινομένου του στατικού συντελεστή τριβής με την επιτάχυνση της βαρύτητας, δηλαδή :

$$\ddot{U} \geq \mu_{\sigma\tau} g \qquad (1.15)$$

1.3 Εξισώσεις Housner

Έστω, ένα στερεό άκαμπτο σώμα με διαστάσεις $2b \times 2h$, δηλαδή με ακτινική απόσταση $R = \sqrt{b^2 + h^2}$, με λυγηρότητα $\lambda = h/b$ και με ραδινότητα $1/\lambda = b/h = \tan a$, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το σώμα αυτό εδράζεται σε οριζόντια βάση και εφόσον ο συντελεστής τριβής είναι αρκετά μεγάλος ώστε να αποφευχθεί η ολίσθηση, ταλαντεύεται περί το των σημείων Ο και Ο΄ τα οποία ονομάζονται πόλοι περιστροφής.



Σχήμα 1.2 Ελεύθερα εδραζόμενο άκαμπτο σώμα διαστάσεων 2b x 2h υπό λικνισμό

Με τη θεώρηση πως το σώμα χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια αλλά και είναι συμμετρικό και ως προς τους δύο άξονες X, Z τότε το κέντρο βάρους του βρίσκεται σε ύψος h και σε απόσταση b από κάθε πόλο περιστροφής Ο,Ο΄. Σημαντικά χαρακτηριστικά του σώματος για την μελέτη της λικνιστικής του συμπεριφοράς είναι το βάρος του W και η ροπή αδρανείας του περί τον πόλο περιστροφής του Ο, I_o.

Στην κατάσταση όπου το σώμα βρίσκεται σε ηρεμία (αρχική θέση), η διεύθυνση της ακτινικής απόστασης R φαίνεται από το παραπάνω σχήμα πως σχηματίζει γωνία α με την κατακόρυφο. Στην περίπτωση του μουσειακού εκθέματος της παρούσας εργασίας, η μελέτη γίνεται σε άγαλμα το οποίο χαρακτηρίζεται από μικρή ραδινότητα, δηλαδή έχουμε ένα υψηλό και λυγηρό μοντέλο το οποίο αποτελεί περίπτωση ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Η γωνία περιστροφής του ή γωνία απόκλισης από τη κατακόρυφο, εκφρασμένη στο σχήμα ως γωνία θ, αποτελεί το μοναδικό βαθμό ελευθερίας κίνησης του σώματος (περιστροφή περί τον πόλο περιστροφής).

Θεωρώντας ότι στη βάση του σώματος ασκείται μια αργά αυξανόμενη επιτάχυνση $\ddot{u}g$ η οποία δημιουργεί μια ροπή ανατροπής ίση με $m\ddot{u}gh$ και εφαρμόζοντας, τη στιγμή την επικείμενης ανύψωσης, στατική ισορροπία, φαίνεται πως όταν η ροπή αυτή ανατροπής φθάσει την τιμή της σεισμικής αντοχής mgb , τότε θα πραγματοποιηθεί ανύψωση του δοκιμίου και προκύπτει η σχέση :

$$m\ddot{u}_g h = mgb \tag{1.16}$$

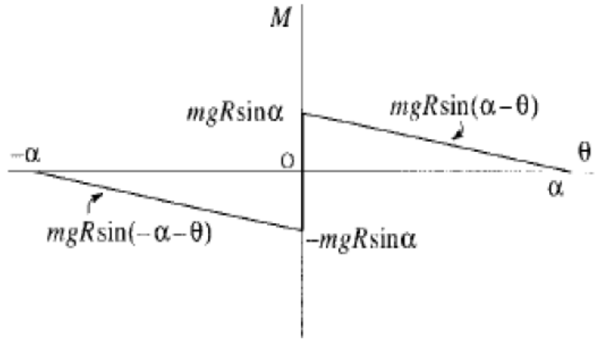
Δηλαδή,

$$\ddot{u}_g = g\ \frac{b}{h} = g\ \tan a \tag{1.17}$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως η εξίσωση του West και εξηγεί πως ένα στερεό σώμα διαστάσεων $2b\ \times 2h$ θα εμφανίσει ανύψωση τη στιγμή όπου η επιτάχυνση θα φθάσει μια οριακή τιμή συναρτήσει της ραδινότητας α. Πιο αναλυτικά, ισχύει :

$$\ddot{u}_g\ \geq\ \ g\ \tan a \tag{1.18}$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα Ροπής – Γωνίας Περιστροφής (Μ – θ), σύμφωνα με το οποίο μπορεί να εξηγήθει καλύτερα ο μηχανισμός με τον οποίο δουλεύει το φαινόμενο του λικνισμού. Μπορεί εύκολα να γίνει η διαπίστωση ότι το σώμα έχει θεωρητικά άπειρη δυσκαμψία μέχρι τη χρονική στιγμή της ανύψωσης, από εκείνη τη στιγμή και έπειτα ξεκινάει το φαινόμενο του λικνισμού κατά το οποίο η δύναμη επαναφοράς επομένως κατ' αντιστοιχία η ροπή επαναφοράς μειώνονται μονοτονικά και με γραμμικό τρόπο μέχρι εν τέλη τον μηδενισμό της τη στιγμή που θα ισχύει : $\theta = \alpha = \ \tan^{-1} b/h$.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα Ροπής – Γωνίας Περιστροφής (Μ – θ)

Σύμφωνα με τον Housner, όταν $\ddot{u_g} \geq g \tan a$, τότε η εξίσωση κίνησης του σώματος θα είναι :

$$I_o\, \ddot{\theta}(t) + mgR\sin[asgn\theta(t) - \theta(t)] = -m\ddot{u_g}(t)R\cos[asgn\theta(t) - \theta(t)] \qquad (1.19)$$

Η συνάρτηση (sgn) είναι μια συνάρτηση προσήμου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να βρεθεί ο πόλος περιστροφής Ο ή Ο΄ ,ανάλογα το πρόσημο της γωνίας απόκλισης θ, δηλαδή στις περιπτώσεις όπου έχουμε αρνητικές τιμές για την γωνία θ τότε ως πόλος περιστροφής λειτουργεί το σημείο Ο΄.

Στην περίπτωση όπου το μπλοκ που εξετάζεται είναι ορθογονικό, τότε γνωρίζουμε πως η ροπή αδράνειάς του είναι ίση με $I_o = 4/3mR^2$, επομένως η παραπάνω εξίσωση κίνησης του Housner μπορεί να γραφτεί ως :

$$\ddot{\theta}(t) = p^2\left[-asgn\big(\theta(t)\big) + \theta(t) - u_g(\ddot{t})/g\right] \qquad (1.20)$$

Όπου ως p ορίζεται η χαρακτηριστική συχνότητα (ιδιοσυχνότητα) του λικνιζόμενου σώματος η οποία ισούται και με τη συχνότητα ταλάντωσης του εα, αυτό θεωρηθεί ως ένα εκκρεμές. Δηλαδή :

$$p = \sqrt{\frac{WR}{I_o}} = \sqrt{\frac{3g}{4R}} \tag{1.21}$$

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η απόσβεση στο φαινόμενο του λικνισμού. Κατά τη διάρκεια του λικνισμού πραγματοποιείται πρόσκρουση του δοκιμίου με τη βάση και με αυτό τον τρόπο εκτονώνεται ενέργεια, αυτής της μορφής η απόσβεση συμβαίνει όταν η γωνία περιστριφής θ αντιστρέφεται, δηλαδή όταν αλλάζει πρόσημο. Σύμφωνα με τη διατήρηση της στροφορμής, λαμβάνοντας υπόψη τη στιγμή πριν και μετά τη πρόσκρουση, λαμβάνουμε τον συντελεστή αποκατάστασης η.

Δηλαδή, ισχύει : $\theta^{+} = \eta\theta^{-}$

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό γίνεται εύκολα εμφανές πως ο συντελεστής αποκατάστασης είναι η παράμετρος η οποία ελέγχει την απόσβεση του λικνισμού, επίσης σύνηθες τιμές αυτού του συντελεστή αυτού κυμαίνονται μεταξύ $0{,}6 \div 0{,}9$ υπό κανονικές συνθήκες ενώ αν κατά τον λικνισμό του σώματος χάνεται ενέργεια και μέσω άλλων μηχανισμών διεπαφής, η τιμή του συντελεστή αποκατάστασης θα είναι μικρότερη από το παραπάνω εύρος τιμών.

Η θεωρητική τιμή του συντελεστή αποκατάστασης σύμφωνα με την εξίσωση Housner και με την παραδοχή πως το υπό εξέταση σώμα έχει μεγάλη λυγηρότητα ενώ ταυτόχρονα ο συντελεστής τριβής είναι αρκετά μεγάλος ώστε να αποτρέπονται άλλα φαινόμενα όπως η ολίσθηση και η αναπήδηση, είναι :

$$\eta = \left(1 - \frac{3}{2}sin^2 a\right)^2 \tag{1.22}$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί μια θεωρητική προσέγγιση εφόσον αναφέρεται στη περίπτωση του αμιγούς λικνισμού και γνωρίζοντας πως ο συντελεστής αποκατάστασης δεν αποτελεί συνάρτηση καθαρά της γεωμετρίας του εξεταζόμενου σώματος.

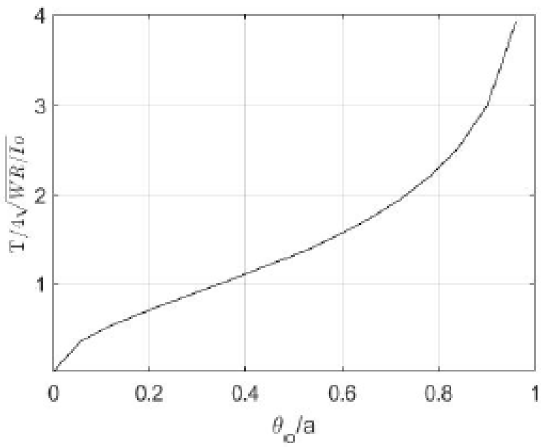
Αν θ_o είναι η αρχική γωνία περιστροφής του σώματος, για την περίοδο του λικνισμού ισχύει η σχέση :

$$\cosh\left(\frac{pT}{4}\right) = \frac{1}{1-\frac{\theta_0}{\alpha}} \quad \Longrightarrow T = \frac{4}{p}cosh^{-1}\left(\frac{1}{1-\frac{\theta_o}{\alpha}}\right) \tag{1.23}$$

Όπου :

α – ραδινότητα του εξεταζόμενου σώματος
p – η χαρακτηριστική συχνότητα του σώματος

Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης φαίνεται παρακάτω



Σχήμα 1.4 Γραφική παράσταση της περιόδου λικνισμού του σώματος συναρτήσει της γωνίας θ_o

1.4 Τρόποι Ανατροπής – Φάσμα Επιτάχυνσης Ανατροπής

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόπου με τους οποίους μπορεί να ανατραπεί ένα στερεό σώμα ελεύθερα εδραζόμενο υπό την διέγερση ενός αρμονικού παλμού, είτε παρουσιάζοντας μια ή και περισσότερες προσκρούσεις, είτε δεν παρουσιάζει καμία πρόσκρουση. Οι δύο παραπάνω τρόποι ανατροπής ονομάζονται $1^{ος}$ και $2^{ος}$ τρόπος ανατροπής αντίστοιχα.΄

Λόγω της ύπαρξης του δεύτερου τρόπου ανατροπής του σώματος γίνεται η συνεπαγωγή της ύπαρξης μιας ασφαλούς περιοχής, η οποία βρίσκεται πάνω από το φάσμα της ελάχιστης επιτάχυνσης. Γραφικά, το σχήμα και το μέγεθος αυτής της περιοχής έχει άμεση συσχέτιση με τον συντελεστή αποκατάστασης η και δεν μένει ανεπηρέαστο από τη μη γραμμική φύση του προβλήματος του λικνισμού. Η μετάβαση από τον $2^{ο}$ τρόπο ανατροπής στον $1^{ο}$ συμβαίνει απότομα το οποίο γραφικά αποτυπώνεται σαν ένα «σκαλοπάτι» στο φάσμα της επιτάχυνσης. Τα παραπάνω ισχύουν στις περιπτώσεις όπου η τιμή του κλάσματος ω_p / p είναι σχετικά μικρή.

Όσο αυξάνεται ο λόγος ω_p /p , τόσο εξαφανίζεται ο $1^{ος}$ τρόπος ανατροπής και το σώμα τείνει να ανατραπεί με βάσει τον $2^{ο}$ τρόπο, χωρίς δηλαδή να έχει προηγηθεί καμία πρόσκρουση.

- Πρώτος τρόπος ανατροπής (μία ή περισσότερες προσκρούσεις)

Ορίζουμε τη χρονική στιγμή κατά την οποία ένα στερεό σώμα ελεύθερα εδραζόμενο ξεκινάει μια ελεύθερη δόνηση ως t_{fv}. Δεδομένου του ότι σε αυτόν τον τρόπο ανατροπής θα συμβεί τουλάχιστον μια πρόσκρουση, για να συμβεί εν τέλη ανατροπή του δοκιμίου θα πρέπει να ισχύει :

$$\ddot{\theta}(t_{fv}) + p[\theta(t_{fv}) - \alpha] = 0 \tag{1.24}$$

Όμως, σε αυτό το σημείο δεν είναι γνωστό το εάν η πρόσκρουση λαμβάνει χώρα πριν εκπνεύσει η διέγερση την οποία δέχεται το σώμα ή εάν η πρόσκρουση πραγματοποιείται μετά το τέλος της διέγερσης γι’ αυτό ορίζονται δύο υποπεριπτώσεις :

Α) Στην πρώτη περίπτωση γίνεται η θεώρηση πως το σώμα προσκρούει με τη βάση του πριν εκπνεύσει η διέγερση, δηλαδή $t_i < T_{ex}$.

Ισχύει ότι :

$$t_{fv} = T_{ex} = \frac{2\pi-\psi}{\omega_p} \tag{1.25}$$

Μετά την επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων οι οποίες προκύπτουν, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ελάχιστης επιτάχυνσης ανατροπής. Λαμβάνοντας μια σύνηθες τιμή του συντελεστή επαναφοράς της τάξεως του 0,9 καταλήγει πως βάσει της γραμμικής προσέγγισης αυτό συμβαίνει για :

$$0 \leq \frac{\omega_p}{p} \leq 4{,}8 \tag{1.26}$$

Β) Στη δεύτερη περίπτωση όπου η πρόσκρουση λαμβάνει χώρα μετά το τέλος της διέγερση, δηλαδή ισχύει $t_i > T_{ex}$, τότε η επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων μας δίνει την ελάχιστη επιτάχυνση ανατροπής του σώματος.

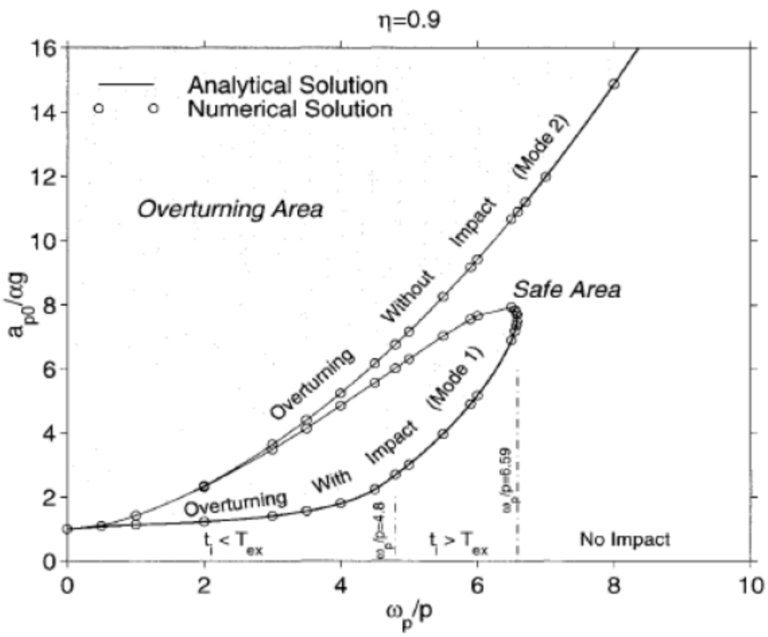
- <u>Δεύτερος τρόπος ανατροπής (δεν παρουσιάζεται καμία πρόσκρουση)</u>

Είναι γνωστό ότι σε αυτόν τον τρόπο ανατροπής το στερεό σώμα δεν θα παρουσιάσει καμία πρόσκρουση με τη βάση του, λαμβάνοντας ως T_{ex} τη χρονική στιγμή κατά την οποία θα εκπνεύσει η διέγερση, τότε η συνθήκη για την ανατροπή του σώματος θα είναι :

$$\frac{\theta(T_{ex})}{p} + [\theta(T_{ex}) + a] = 0 \tag{1.27}$$

Κατ’ αντιστοιχία με την προηγούμενη περίπτωση του πρώτου τρόπου ανατροπής και σε αυτή τη περίπτωση η επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων οι οποίες θα προκύψουν από τη παραπάνω σχέση θα οδηγήσει στην εύρεση του ελάχιστου πλάτους της επιτάχυνσης η οποία είναι ικανή να ανατρέψει το υπό εξέταση στερεό σώμα, αυτή τη φορά βέβαια χωρίς να έχει προηγηθεί απολύτως καμία πρόσκρουση.

Στο παρακάτω σχήμα μπορεί να φανεί η επίλυση όλων των εξισώσεων οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως, από την έρευνα των Zhang και Μακρής (2001), λαμβάνοντας υπόψη και τους δύο διαφορετικούς τρόπους ανατροπής ,λαμβάνοντας την τιμή του συντελεστή επαναφοράς ίση με $\eta = 0{,}9$ και δεδομένου του ότι το σώμα έχει υποβληθεί σε έναν ημιτονικό παλμό συχνότητας ω_p.



Σχήμα 1.5 Φάσμα επιτάχυνσης ανατροπής ελεύθερου εδραζόμενου σώματος

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονισθεί ιδιαίτερα η ερμηνεία του παραπάνω φάσματος, η κλειστή περιοχή όπου στο σχήμα περιγράφεται ως «ανατροπή με πρόσκρουση – 1^{ο} τρόπος» αποτελεί τον 1^{ο} τρόπο ανατροπής όπως περιεγράφηκε προηγουμένως και σχηματίζεται από τη γραφική παράσταση της πρώτης υποπερίπτωσης και της δεύτερης, ανάλογα τη χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει η πρόσκρουση (πριν ή μετά την εκπνοή της διέγερσης).

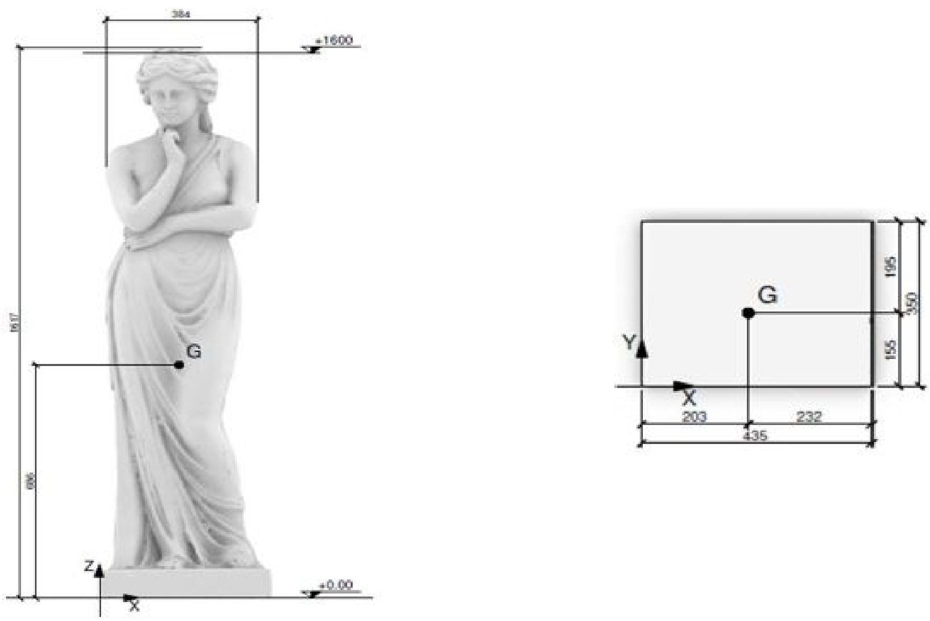
Η περιοχή πάνω από την καμπύλη που χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα ως « ανατροπή χωρίς πρόσκρουση» αναφέρεται στον 2^{ο} τρόπο ανατροπής όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Τέλος, στην εναπομείνουσα περιοχή την οποία το γράφημα χαρακτηρίζει ως «ασφαλής περιοχή» περιλαμβάνεται και η περίπτωση κατά την οποία η πρόσκρουση συμβαίνει πριν από το πέρας της διέγερσης και την περίπτωση όπου η πρόσκρουση προηγείται του πέρατος της διέγερσης.

Επίσης, αξιοσημείωτη παρατήρηση σχετικά με το παραπάνω γράφημα είναι πως για μικρές τιμές του λόγου ω_p/p το σώμα τείνει να ακολουθήσει τον 1^{ο} τρόπο ανατροπής ενώ, για να πραγματοποιηθεί ο 2^{ο} τρόπος ανατροπής θα πρέπει να υπάρχει αρκούντος μεγάλο πλάτος επιτάχυνσης στη διέγερση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στη περιοχή του γραφήματος ανάμεσα στους δύο τρόπους ανατροπής, παρατηρείται η ύπαρξη ενός εύρους τιμών επιταχύνσεων κάνοντας την μετάβαση από τον ένα τρόπο ανατροπής στον άλλο να μην είναι άμεση. Για αυτές τις τιμές των επιταχύνσεων είναι αδύνατη η ανατροπή του σώματος.

1.5 Παρουσίαση του προβλήματος

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν μέσα στο πλαίσιο SERA/SEREME για ένα συγκεκριμένο άγαλμα σε σχέση με εκείνα τα οποία ελήφθησαν με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Abaqus/CAE.

Πιο συγκεκριμένα, το άγαλμα το οποίο μελετήθηκε σε αυτήν την μελέτη είναι εκείνο το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα σαν όψη καθώς και η γεωμετρία της κάτοψής του και του κεντροβαρικού του άξονα :



Σχήμα 1.6 Άγαλμα Fanciulla, όψη και γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Για το συγκεκριμένο άγαλμα, στα πλαίσια του λογισμικού στο οποίο μελετήθηκε χρησιμοποιήθηκαν απλοποιητικά προσομοιώματα με αντίστοιχα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά αλλά και μοντέλα της ακριβούς γεωμετρίας του αγάλματος. Τα γεωμετρικά και τα αδρανειακά στοιχεία τα οποία είναι γνωστά για το παραπάνω άγαλμα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

Βάρος	P	**259.8**	kg
Θέση Κεντροβαρικού Άξονα	X	**203.1**	mm
	Y	**155.2**	mm
	Z	**686**	mm
	b - X	**266.9**	mm
	b - Y	**224.8**	mm

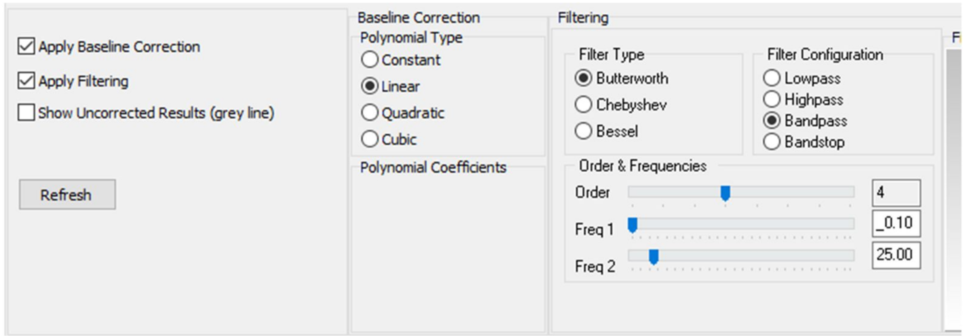
Πίνακας 1.1 Γεωμετρικά/αδρανειακά χαρακτηριστικά αγάλματος

Στην συνέχεια έπρεπε να βρεθεί η καταλληλότερη διέγερση η οποία θα ασκηθεί στο μοντέλο στα πλαίσια της καλύτερης και πιο σωστής προσομοίωσης. Σε πειραματικό επίπεδο, στο συγκεκριμένο άγαλμα ασκήθηκε η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης του σεισμού ο οποίος πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Emilia – Romagna το 2012. Πραγματοποιήθηκε ένας αριθμός δοκιμών με διαφορετικές διεγέρσεις αλλά πάντα συναρτήσει του προαναφερθέντα σεισμού, δηλαδή, σε μερικά πειράματα η διέγερση ήταν με βάση μόνο την συνισταμένη του σεισμού στη μία διεύθυνση (διεύθυνση X) ενώ σε άλλα ήταν με βάση μόνο την συνισταμένη στην άλλη διεύθυνση (διεύθυνση Y). Σαφώς υπήρχαν και πειράματα όπου όλες οι συνισταμένες δρούσαν ταυτόχρονα αλλά πάντα η διέγερση αυτή συνέβαινε αυξάνοντας σταδιακά το πλάτος της επιτάχυνσης. Για παράδειγμα κατά το πρώτο πείραμα γινόταν η δοκιμή με το 45% της έντασης του σεισμού του 2012 στην Ιταλία, κατά το δεύτερο ανέβαινε στο 76% , στην συνέχεια σε 106% και τελικώς έφτανε στο 121%.

Λαμβάνοντας τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα από την αντίστοιχη βάση δεδομένων του προγράμματος και έχοντας υπόψη πως πάνω στην σεισμική τράπεζα στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα υπήρχαν σε διάφορα σημεία επιταχυνσιογράφοι έγινε η παρατήρηση πως η διέγερση με την οποία προγραμματίστηκε η σεισμική τράπεζα να δονηθεί και οι καταγραφές των επιταχυνσιογράφων εμφάνιζαν μια απόκλιση. Οι επιταχύνσεις με τις οποίες τελικά δονήθηκε το άγαλμα δεν ήταν ακριβώς οι ίδιες με εκείνες που θα ληφθούν από στον σεισμό της Emilia (προσαρμοσμένο πάντα με τον αντίστοιχο συντελεστή).Το γεγονός αυτό εξηγείται ίσως λόγω κάποιας μηχανικής ανακρίβειας ή κάποιας αμελητέας κλίσης της σεισμικής τράπεζας και θεωρείται λογικό δεδομένου του ότι αναφερόμαστε σε ένα τόσο περίπλοκο και ευαίσθητο φαινόμενο όπως ο λικνισμός. Προκειμένου όμως να ληφθεί ακριβώς η διέγερση η οποία ασκήθηκε στο άγαλμα σε πειραματικό επίπεδο για λόγους καλύτερης προσομοίωσης, έτσι και στο περιβάλλον του Abaqus η διέγερση η οποία τοποθετήθηκε ήταν εκείνη την οποία κατέγραψε ο επιταχυνσιογράφος πάνω στην σεισμική τράπεζα και για τις τρεις διευθύνσεις X, Y, Z. Το γεγονός πως η ακριβής θέση του αγάλματος επάνω στην σεισμική τράπεζα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν γνωστή (ήταν στη Βόρειο – Ανατολική γωνία της σεισμικής τράπεζας) , ήταν μια σημαντική πληροφορία μέσω της οποίας έγινε η επιλογή του αντίστοιχου επιταχυνσιογράφου από τον οποίο λήφθηκαν τα δεδομένα αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Από τις πρώτες κιόλας προσομοιώσεις έγινε η παρατήρηση πως οι παραπάνω επιταχύνσεις είχαν την ανάγκη επεξεργασίας αφού κατά την διπλή ολοκλήρωσή τους οι τιμές των μετακινήσεων ήταν υπέρ του δέοντος μεγάλες. Επομένως, τα γραφήματα των επιταχύνσεων όλων των πειραμάτων και στις τρείς διευθύνσεις επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού SeismoSignal προκειμένου να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Ο λόγος όπου οι επιταχύνσεις έδιναν τόσο μεγάλες μετατοπίσεις ήταν μια μικρή κλίση την οποία είχε η χρονοιστορία των επιταχύνσεων όπου κατά τη διπλή ολοκλήρωσή της σε μετακινήσεις κατέληγε να δίνει πολύ μεγάλες τιμές, πρόβλημα το οποίο είναι αρκετά συνηθισμένο και μάλιστα υπάρχει ειδική εντολή του SeismoSignal ώστε να διορθώνει τέτοιου είδους προβλήματα (Baseline Correction).

Μέσα στο πλαίσιο της επεξεργασίας την οποία έπρεπε να υποβληθούν τα πειραματικά δεδομένα έτσι ώστε να είναι κατάλληλα για να τοποθετηθούν στην προσομοίωση ήταν και το φιλτράρισμα των επιταχύνσεων. Οι παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στο SeismoSignal προκειμένου να γίνει το Filtering και το Baseline Correction φαίνονται παρακάτω :

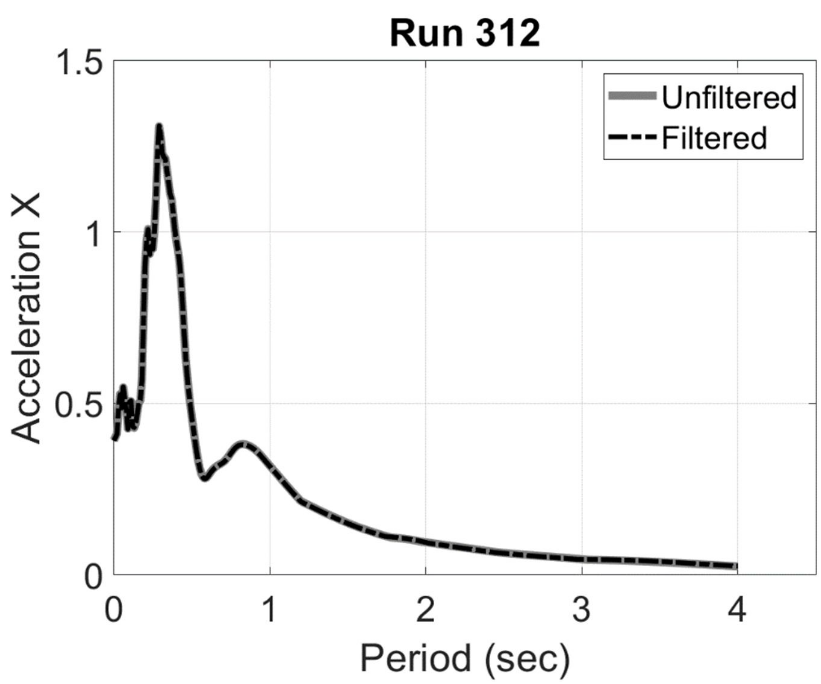


Σχήμα 1.7 Παράμετροι για Filtering και Baseline Correction στο SeismoSignal

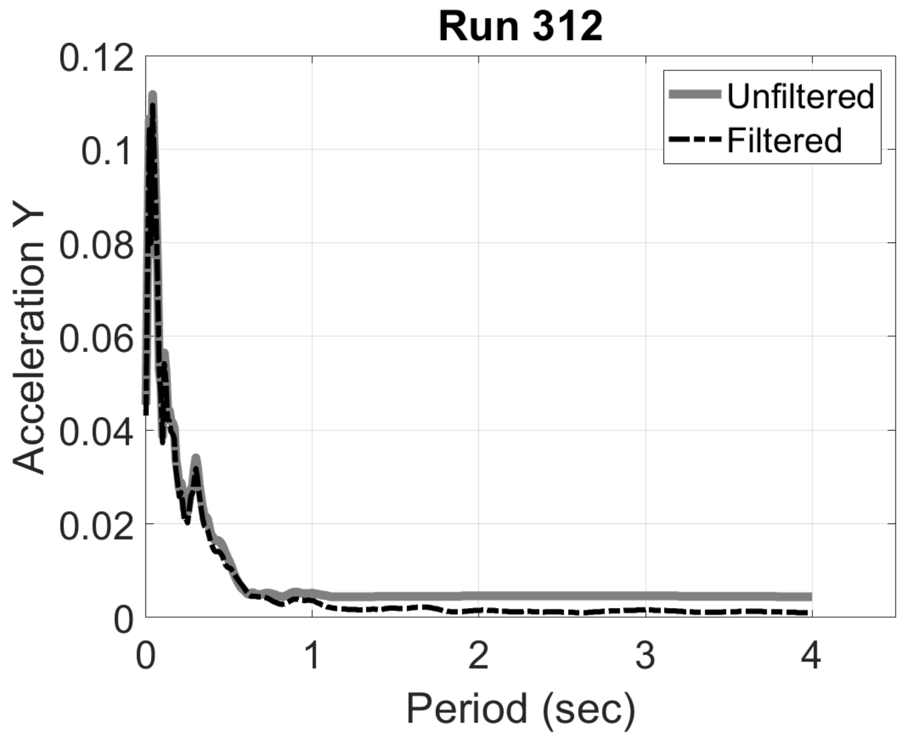
Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα έγινε γραμμικής μορφής Baseline Correction και όσον αφορά το Filtering έγινε χρήση της μεθόδου Butterworth Bandpass.

Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των χρονοιστοριών των επιταχύνσεων έπρεπε να διαπιστωθεί εάν μέσω του φιλτραρίσματος και του Baselince Correction, τα τελικά αποτελέσματα των επιταχύνσεων έχουν μεταβληθεί πολύ σε σχέση με τα αρχικά. Για να γίνει αυτή η σύγκριση δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα φάσματα για όλα τα πειράματα και για όλες τις διευθύνσεις έτσι ώστε να συγκριθούν πριν και μετά την επεξεργασία. Μερικές συγκρίσεις τέτοιων φασμάτων παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.

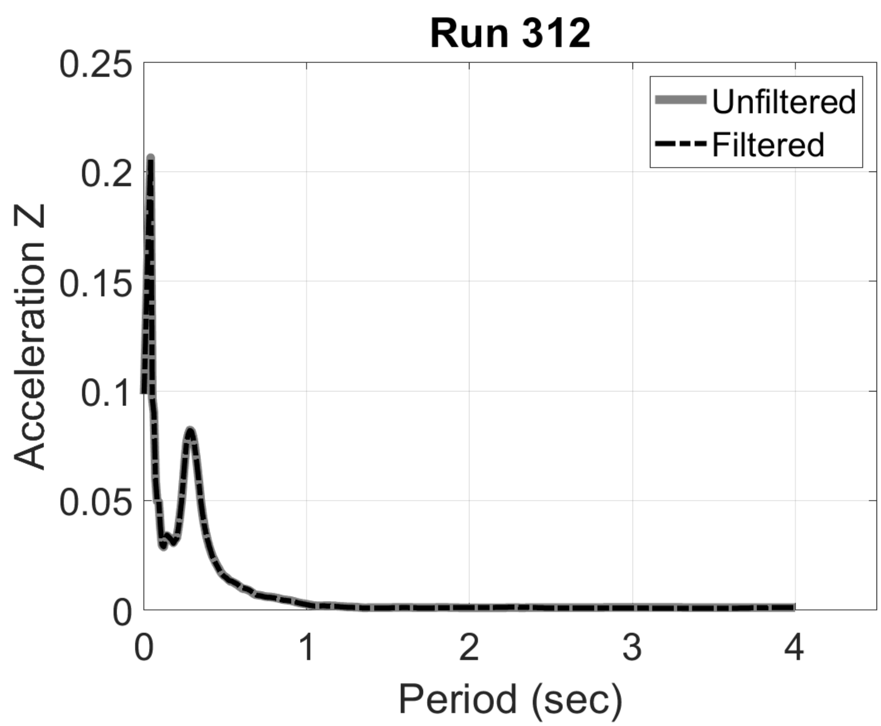
- <u>Πείραμα 312 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)</u>



Σχήμα 1.8 Σύγκριση φασμάτων επιτάχυνσης κατά X πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων, για το πείραμα 312



Σχήμα 1.9 Σύγκριση φασμάτων επιτάχυνσης κατά Y πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων, για το πείραμα 312

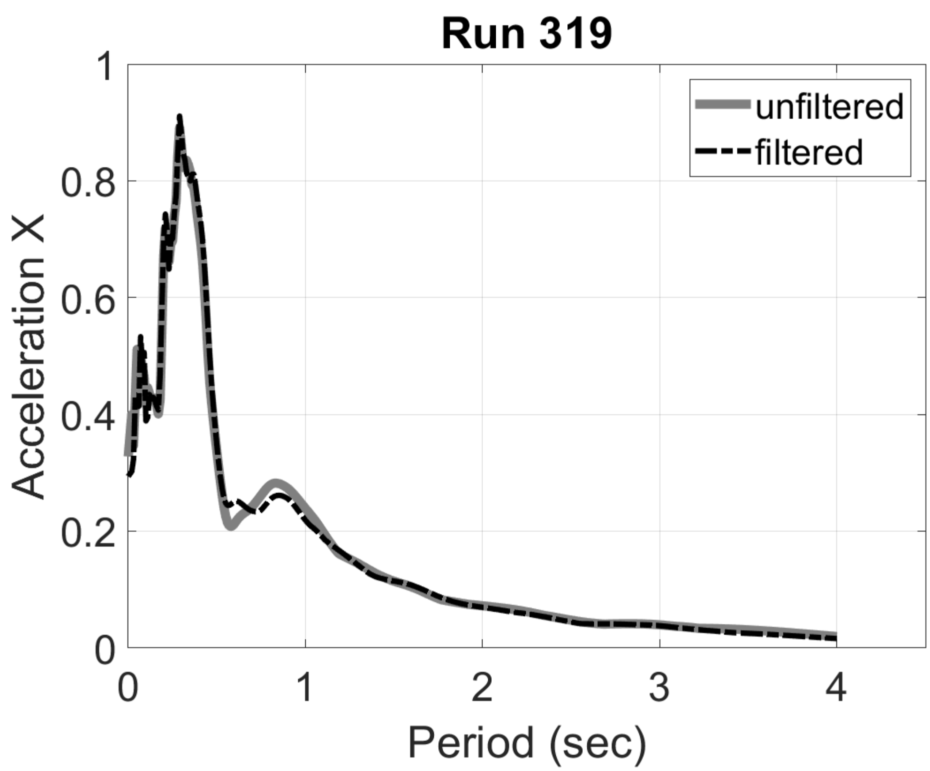


Σχήμα 1.10 Σύγκριση φασμάτων επιτάχυνσης κατά Z πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων, για το πείραμα 312

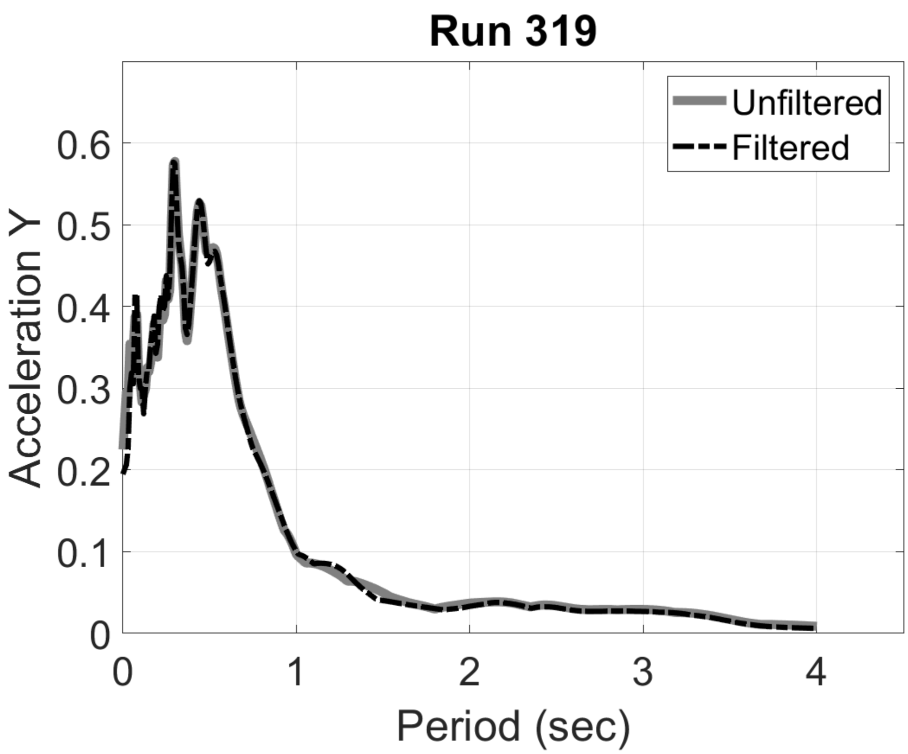
Από τα παραπάνω γραφήματα εξάγεται το συμπέρασμα πως στην περίπτωση του πειράματος 312, όπως φαίνεται, τα φάσματα πριν και μετά την επεξεργασία έχουν τις ίδιες τιμές ειδικά στο εύρος τιμών ιδιοπεριόδου κοντά στο μηδέν όπου εκεί ανήκει και η περίπτωση του λικνισμού ενός ελεύθερα εδραζόμενου στερεού σώματος αφού όπως έχει προαναφερθεί από το διάγραμμα ροπής – γωνίας στροφής, μέχρι τη στιγμή της ανύψωσης η δυσκαμψία είναι άπειρη επομένως η αντίστοιχη περίοδος είναι ίση με 0.

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ στο συγκεκριμένο πείραμα 312 η φόρτιση ήταν κατά τη διεύθυνση X, παρατηρείται πως υπάρχουν επιταχύνσεις και στις 3 διευθύνσεις από τα πειραματικά αποτελέσματα των επιταχυνσιογράφων στη βάση της σεισμικής τράπεζας με σαφώς μικρότερες τιμές στις άλλες 2 διευθύνσεις, επομένως για την καλύτερη προσομοίωση λήφθηκαν οι επιταχύνσεις και τα φάσματα όλων των διευθύνσεων. Αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται και στα υπόλοιπα πειράματα τα οποία θα εμφανιστούν στην συνέχεια.

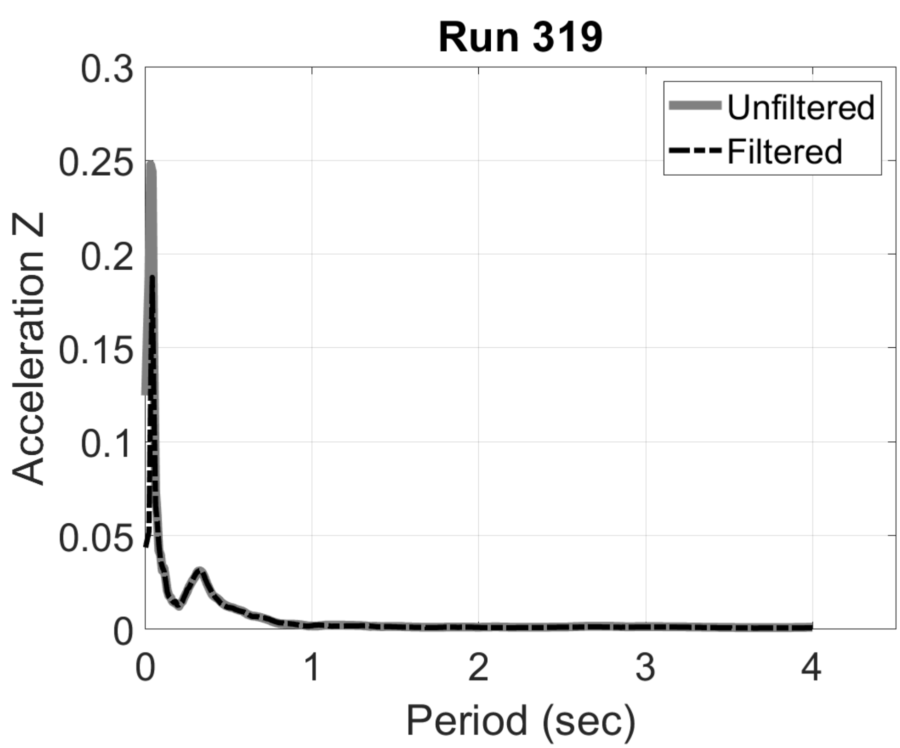
- <u>Πείραμα 319 (Φόρτιση στο 76% του σεισμού Emilia στις διευθύνσεις X,Y)</u>



Σχήμα 4.11 Σύγκριση φασμάτων επιτάχυνσης κατά X πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων, για το πείραμα 319



Σχήμα 1.12 Σύγκριση φασμάτων επιτάχυνσης κατά Υ πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων, για το πείραμα 319



Σχήμα 1.13 Σύγκριση φασμάτων επιτάχυνσης κατά Z πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων, για το πείραμα 319

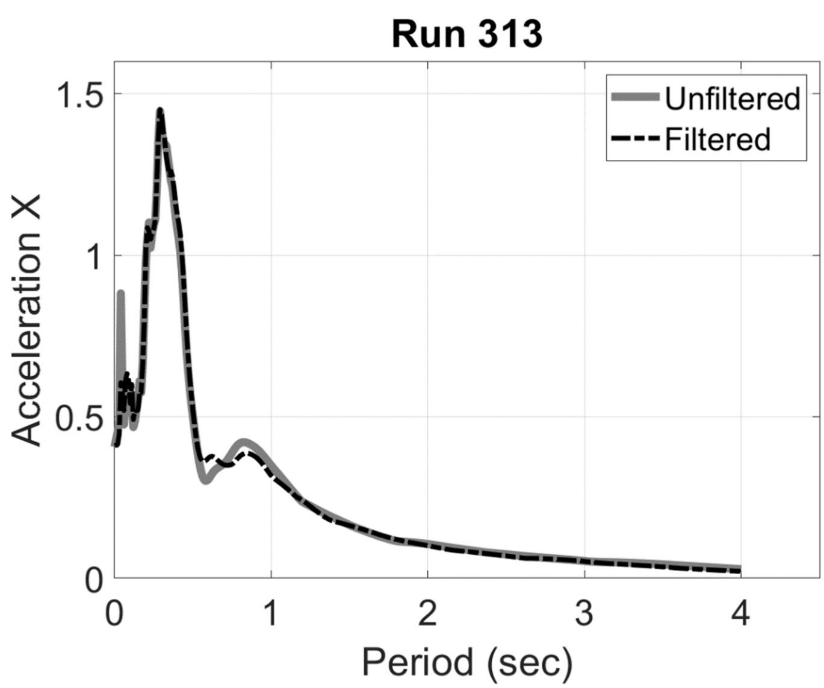
Αντίστοιχη εικόνα παρατηρείται και στο πείραμα 319 όπου η φόρτιση είναι στις δύο διευθύνσεις X και Y με ένταση ίση με το 76% του πραγματικού σεισμού. Και σε αυτή την περίπτωση οι διαφορές πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων δεν φαίνεται να αλλάζουν και πιο συγκεκριμένα στις τιμές των χαμηλών περιόδων όπου απασχολεί την περίπτωση του λικνισμού.

Τα παραπάνω φάσματα δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού SeismoSignal και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB.

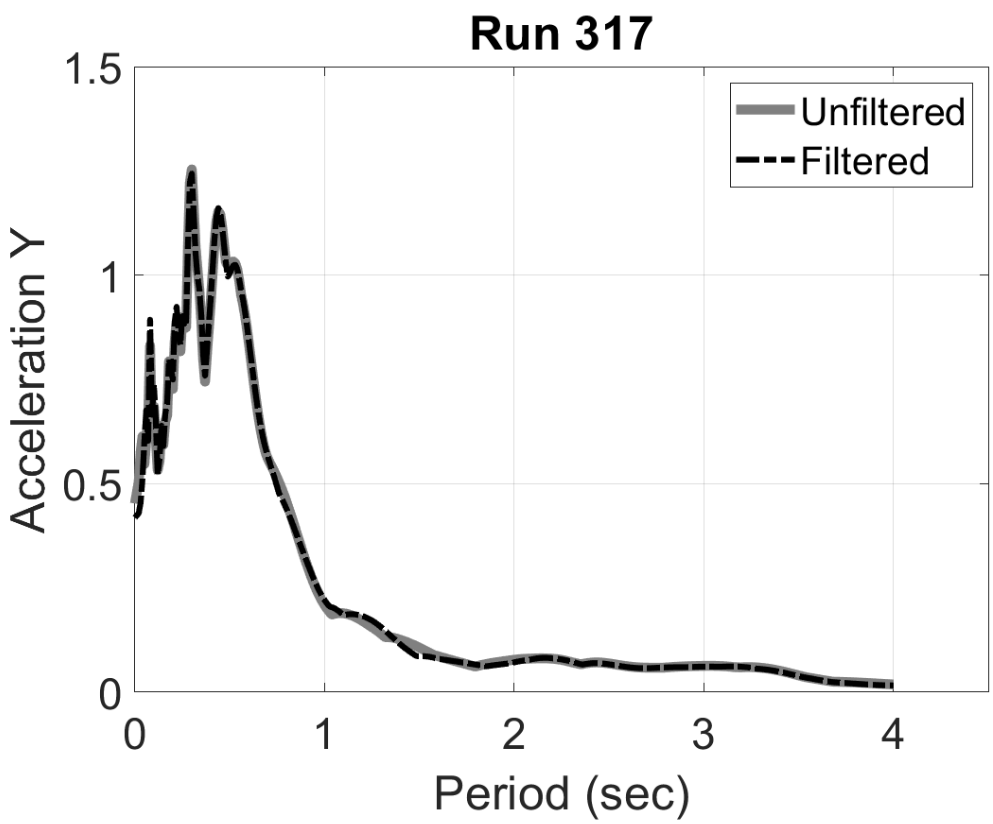
Στα πειράματα των οποίων τα φάσματα πριν και μετά είχαν παρόμοια εικόνα είναι εκείνα τα οποία εν τέλη λήφθηκαν υπόψη ως πιο αξιόπιστα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του αγάλματος στο Abaqus/CAE ενώ εκείνα των οποίων τα φάσματα πριν και μετά την επεξεργασία εμφάνιζαν διαφορετικές τιμές στην περιοχή περί του $T \approx 0$ αποκλείστηκαν με σκοπό την όσο δυνατό καλύτερη και πιο πιστή προσομοίωση της πραγματικότητας στα πλαίσια της μελέτης.

Παρακάτω εμφανίζονται μερικά από τα φάσματα των πειραμάτων των οποίων εν τέλη λήφθηκαν υπόψη ως προς τη κύρια διεύθυνση φόρτισής τους.

- <u>Πείραμα 313 (Φόρτιση στο 121% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)</u>



Σχήμα 1.14 Σύγκριση φασμάτων επιτάχυνσης κατά X πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων, για το πείραμα 313



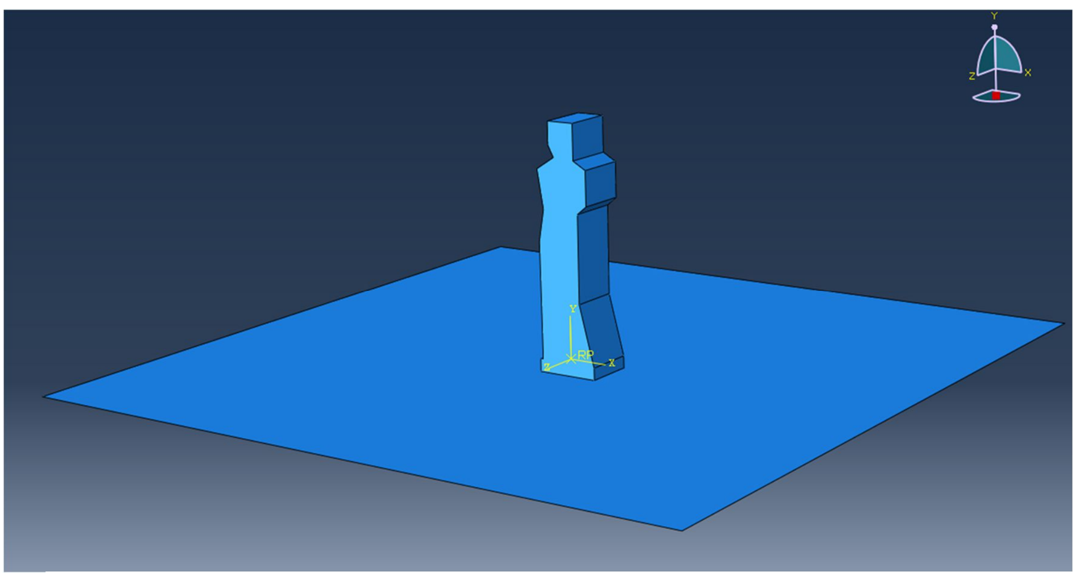
Σχήμα 1.15 Σύγκριση φασμάτων επιτάχυνσης κατά Z πριν και μετά την επεξεργασία των δεδομένων, για το πείραμα 317

Επομένως, πλέον έχοντας μια ξεκάθαρη εικόνα της μορφής του αγάλματος, των γεωμετρικών και αδρανειακών χαρακτηριστικών του καθώς και της διέγερσης που θα του ασκηθεί είμαστε σε θέση να συνθέσουμε τα μοντέλα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και να γίνουν οι κατάλληλες προσομοιώσεις.

2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΣΚΑΜΠΤΟΥ – ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στα πλαίσια της όσο το δυνατόν καλύτερης προσομοίωσης του μουσειακού εκθέματος το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα SERA/SEREME έπρεπε να γίνει η επιλογή του κατάλληλου τύπου μοντέλου το οποίο θα χρησιμοποιούταν στο λογισμικό Abaqus/CAE. Σχετικά με τη δυσκαμψία του μοντέλου οι επιλογές ήταν δύο, είτε ένα δύσκαμπτο μοντέλο (άπειρης φαινομενικά δυσκαμψίας – Rigid), είτε ένα εύκαμπτο μοντέλο πεπερασμένης δυσκαμψίας με τις ακριβής ιδιότητες του μαρμάρου όπου αποτελούταν το άγαλμα.

Φαινομενικά η επιλογή ήταν ξεκάθαρη με τη χρήση ενός εύκαμπτου μοντέλου το οποίο λόγω αυξημένης και πιο ακριβής πληροφορίας θα είναι σε θέση να δώσει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το αντίστοιχο δύσκαμπτο μοντέλο. Ωστόσο η επιλογή δεν είναι τόσο σαφής καθώς με την χρήση ενός εύκαμπτου μοντέλου αυξάνεται δραματικά ο υπολογιστικός χρόνος ο οποίος απαιτείται για την πραγματοποίηση ενός πειράματος στο Abaqus. Επί προσθέτως, η όλη εσωτερική κάμψη η οποία θα εμφανιζόταν στο σώμα του αγάλματος στην περίπτωση του εύκαμπτου μοντέλου έπρεπε να ελεγχθεί εάν είναι αρκετά μικρή λόγω της δυσκαμψίας του εκθέματος επομένως δεν θα έπαιζε κάποιο ρόλο ή εάν είναι σημαντική δεδομένου της λυγηρότητας του αγάλματος αφού, όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα, αναφερόμαστε σε ένα υψίκορμο μοντέλο.



Σχήμα 2.1 Μοντέλο απλοποιημένης γεωμετρίας αγάλματος Fanciulla στο περιβάλλον του λογισμικού Abaqus/CAE.

Επομένως, προκειμένου να απαντηθεί το παραπάνω ερώτημα έγινε η δημιουργία δυο διαφορετικών μοντέλων με τα ίδια ακριβώς γεωμετρικά χαρακτηριστικά αλλά στο πρώτο έγινε η θεώρηση ότι πρόκειται για ένα καθαρά δύσκαμπτο (rigid) μοντέλο ενώ στη δεύτερη περίπτωση στο μοντέλο τοποθετήθηκαν οι τιμές για τις ιδιότητες του μαρμάρου. Και τα δύο μοντέλα ως προς τη μορφή ήταν πανομοιότυπα και ίδια με εκείνα στο Σχήμα 2.1.

2.1 Περιγραφή δύσκαμπτου μοντέλου

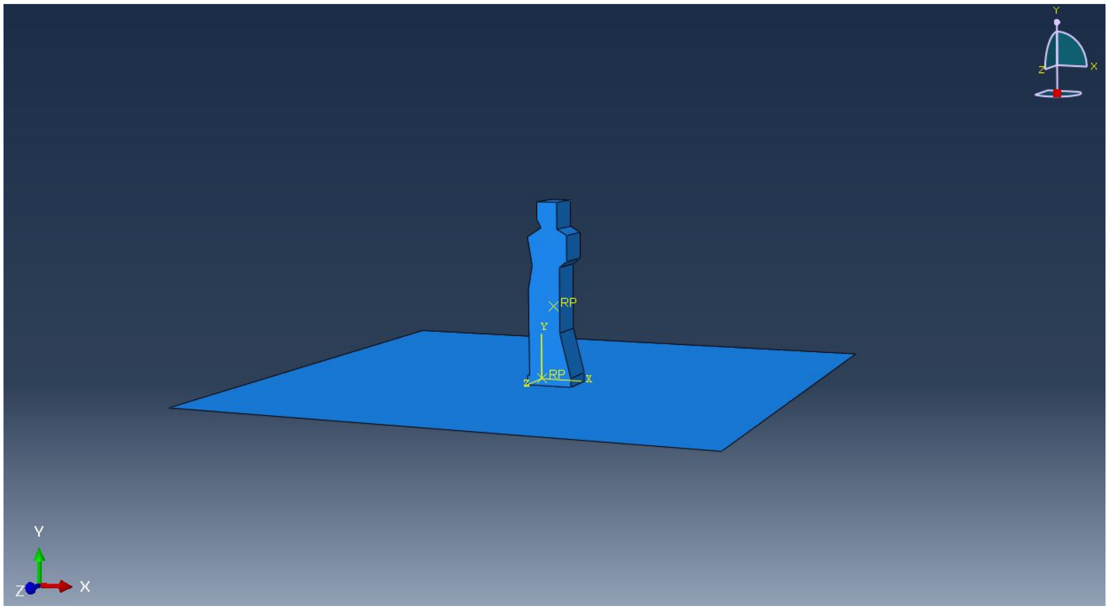
Αναλυτική παρουσίαση σχετικά με τη δημιουργία και του δύσκαμπτου και του εύκαμπτου μοντέλου στο περιβάλλον του Abaqus/CAE έχει δοθεί στις τελευταίες σελίδες της παρούσας διατριβής στο αντίστοιχο παράρτημα, σε αυτό το σημείο θα δοθούν κάποιες γενικές πληροφορίες σχετικά με το δύσκαμπτο μοντέλο καθώς και το ποιες οι διαφορές του σε σχέση με το εύκαμπτο.

Γενικά σαν άκαμπτο σώμα στο Abaqus ορίζεται ένα σώμα το οποίο είναι μια συλλογή από κόμβους, ή επιφανειακά στοιχεία των οποίων η κίνηση διέπεται μόνο από την κίνηση του ενός εκείνου σημείο το οποίο ορίζει ο χρήστης ως σημείο αναφοράς άκαμπτου σώματος και στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει επιλεχθεί να είναι το κέντρο βάρους του. Οι σχετικές θέσεις των κόμβων και των στοιχείων που αποτελούν κομμάτι του άκαμπτου σώματος παραμένουν σταθερές καθ΄ όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επομένως, τα συστατικά στοιχεία δεν παραμορφώνονται αλλά μπορούν να δεχθούν μεγάλες παραμορφώσεις σας κίνηση ολόκληρου του στερεού άκαμπτου σώματος. Η μάζα και οι ροπές αδράνειας στην περίπτωση του άκαμπτου μοντέλου αποδίδονται από τον χρήστη και ενώ η μάζα είναι ήδη γνωστή από τα δεδομένα των πειραμάτων, οι αντίστοιχες ροπές αδράνειας υπολογίστηκαν από το Abaqus, βάζοντας την ακριβή γεωμετρία του αγάλματος στο πρόγραμμα, διαδικασία η οποία θα εξηγηθεί αναλυτικότερα παρακάτω.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως και στη περίπτωση του άκαμπτου μοντέλου και στη περίπτωση του εύκαμπτου μοντέλου, η βάση ορίστηκε ως αμιγώς άκαμπτο κέλυφος (discrete rigid planar shell) όντας πιο πιστή προσομοίωση της αντίστοιχης σεισμικής τράπεζας. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το αντίστοιχο πρισματικό μοντέλο με γεωμετρικά στοιχεία πολύ κοντά σε εκείνα του πραγματικού αγάλματος, μορφώνοντας έτσι ένα αξιόπιστο απλοιητικό δύσκαμπτο μοντέλο το οποίο διέπεται από χαμηλούς υπολογιστικούς χρόνους.

Στο παραπάνω μοντέλο, ως αποτελέσματα ζητήθηκαν οι μετατοπίσεις στη γωνία της βάσης του αγάλματος, δεδομένα τα οποία ήταν γνωστά από την βάση δεδομένων των πειραμάτων (η κάτω γωνία του αγάλματος ήταν ένα από τα σημεία στα οποία είχαν τοποθετηθεί αντίστοιχοι μετρητές). Με τη χρήση αυτών των μετατοπίσεων θα είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε άμεσα τα αποτελέσματα των δύο αυτών μοντέλων και το πόσο κοντά τείνουν στις τιμές του πειράματος. Για να γίνει αυτή η σύγκριση λήφθηκαν διάφορες τιμές συντελεστή τριβής και απόσβεσης και γινόταν η σύγκριση στα πειράματα με κοινές τέτοιες τιμές. Επίσης, ως βαθμοί ελευθερίας σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν και οι τρεις διευθύνσεις και ασκώντας στο δοκίμιο την αντίστοιχη διέγερση κατά X,Y και Z έχοντας έτσι πιο πιστή προσομοίωση στο πλαίσιο του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Η τελική μορφή του δύσκαμπτου μοντέλου το οποίο μορφώθηκε είναι η παρακάτω :

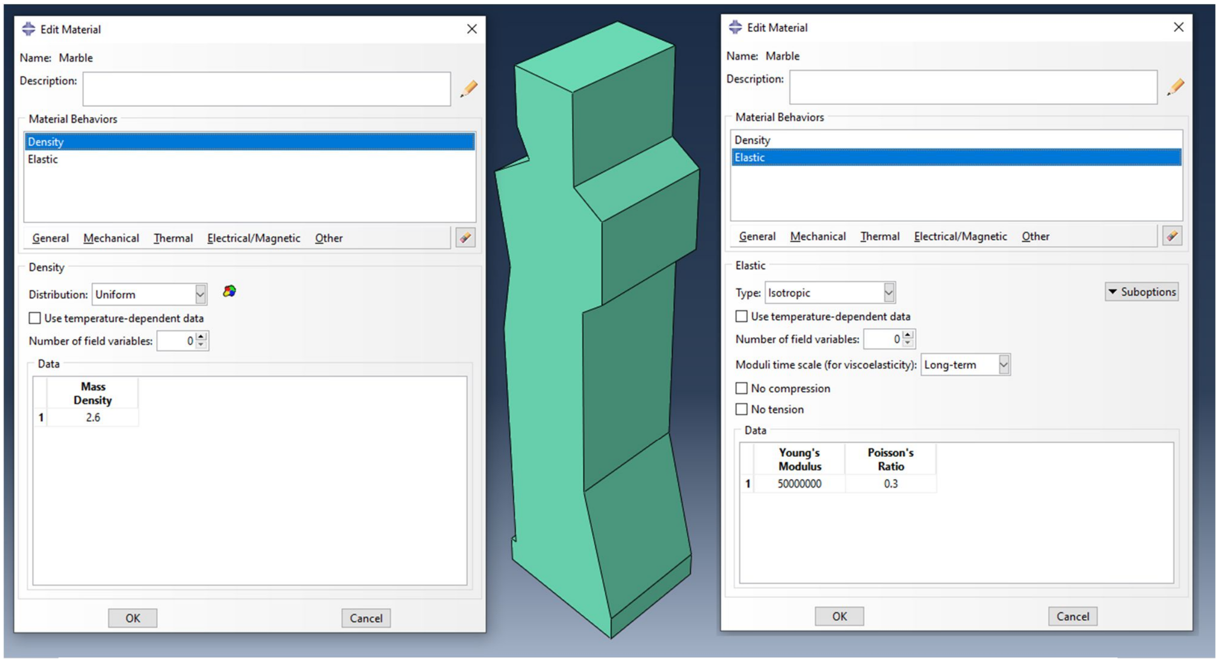


Σχήμα 2.2 Τελική μορφή απλοποιητικού δύσκαμπτου μοντέλου

2.2 Περιγραφή εύκαμπτου μοντέλου

Στη περίπτωση του εύκαμπτου μοντέλου όσον αφορά το Abaqus, οποιοδήποτε αυθαίρετο σχήμα ανεξαρτήτου συμμετρίας ή διαστάσεων (δύο ή και τριών διαστάσεων) που έχει κάποιο παραμορφώσιμο μέρος θεωρείται εύκαμπτο. Ένα τέτοιο εύκαμπτο μοντέλο μπορεί να παραμορφωθεί από εξωτερικό φορτίο, μηχανικό φορτίο, θερμικό φορτίο ή ηλεκτρικό φορτίο και στο οποίο πρέπει ο χρήστης να ορίσει τις αντίστοιχες ιδιότητες υλικού και διατομής.

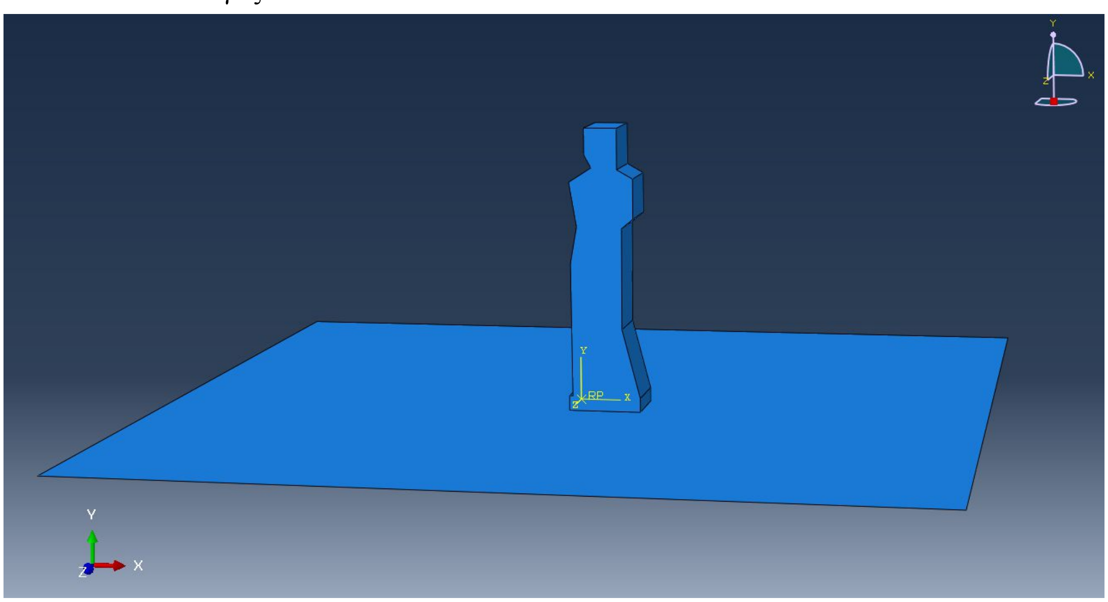
Επομένως, γνωρίζοντας πως το άγαλμα το οποίο συμμετείχε στα πειράματα ήταν κατασκευασμένο από μάρμαρο, λήφθηκαν οι τιμές των ιδιοτήτων του αντίστοιχου υλικού και εισήχθησαν στη προσομοίωση όπως φαίνεται και παρακάτω:



Σχήμα 2.3 Χαρακτηριστικές τιμές ιδιοτήτων του μαρμάρου στο Abaqus/CAE

Όπως φαίνεται και στη παραπάνω εικόνα, για τη δημιουργία του υλικού του μαρμάρου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές:

- Πυκνότητα : 2,6 t/m^3
- Μέτρο Ελαστικότητας : 5 * 10^{10} N/m^2
- Λόγος Poisson : 0.3



Σχήμα 2.4 Τελική μορφή απλοποιητικού εύκαμπτου μοντέλου

Εν κατακλείδι, το τελικό αποτέλεσμα του εύκαμπτου μοντέλου, για το οποίο χρησιμοποιήθηκε και πάλι ένα απλοποιητικό πρίσμα με παρόμοια γεωμετρία του αγάλματος φαίνεται στη παραπάνω εικόνα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονισθεί ιδιαίτερα ότι στα πρώτα μοντέλα τα οποία δημιουργηθήκαν, η αρχή έγινε με αντίστοιχης γεωμετρίας και αδρανειακών στοιχείων μοντέλα τα οποία ωστόσο είχαν μια πιο απλή μορφή και μείωναν σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο κάθε πειράματος. Στην συνέχεια ασφαλώς δημιουργήθηκαν και μοντέλα ακριβούς γεωμετρίας και σε εύκαμπτη και σε δύσκαμπτη περίπτωση έτσι ώστε να η μελέτη αυτή να παρέχει μια καθαρή γενική εικόνα σχετικά τις βέλτιστες παραμετροποιήσεις στο Abaqus όσον αφορά το φαινόμενο του λικνισμού.

Τέλος, μια ακόμα παρατήρηση σχετικά με τη διαφορά των δυο παραπάνω μοντέλων είναι πως βλέποντας την εικόνα του εύκαμπτου μοντέλου φαίνεται να λείπει το χαρακτηριστικό σημείο «RP» το οποίο φαινόταν στην εικόνα του δύσκαμπτου. Το σημείο αυτό αποτελεί το σημείο αναφοράς του σώματος του αγάλματος (Reference Point) το οποίο στην περίπτωση του άκαμπτου ορίστηκε από τον χρήστη (και τοποθετήθηκε στο σημείο του κέντρου βάρους του εκθέματος) ενώ στην περίπτωση του εύκαμπτου μοντέλου το λογισμικό με βάση τα αδρανειακά και γεωμετρικά στοιχεία του σώματος που έχει εισαχθεί υπολογίζει μόνο του το κεντροβαρικό του σημείο.

2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων δύσκαμπτου – εύκαμπτου μοντέλου

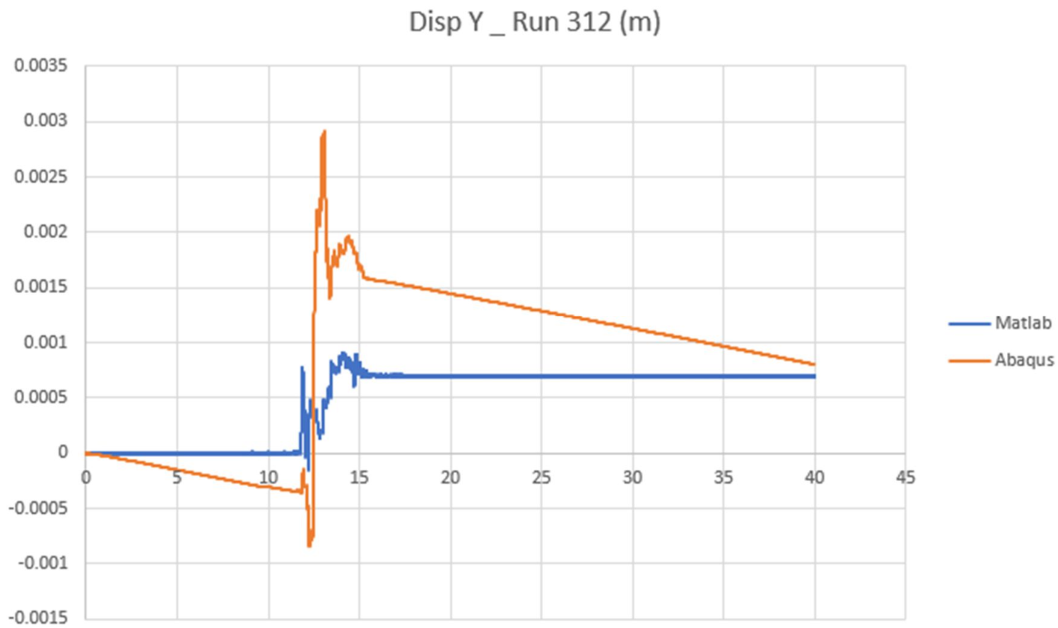
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μετατοπίσεων στη κάτω γωνία του αγάλματος όσον αφορά το δύσκαμπτο και το εύκαμπτο μοντέλο και τη σχέση τους με τα πειραματικά αποτελέσματα του προγράμματος SERA/SEREME.

Τα αποτελέσματα αυτά εμφανίζονται ανά πείραμα δεδομένου του ότι σε κάθε πείραμα η διέγερση ήταν διαφορετικής έντασης και επίσης οι συγκρίσεις γίνονται κατά τις διευθύνσεις Y και Z δεδομένου του ότι αυτές οι μετακινήσεις ήταν γνωστές από τα αποτελέσματα του πειραματικού σταδίου (όπου Y η διεύθυνση όπως ορίζεται στο Σχήμα 1.6 και Z η διεύθυνση καθ' ύψος του αγάλματος).

- Πείραμα 312 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)

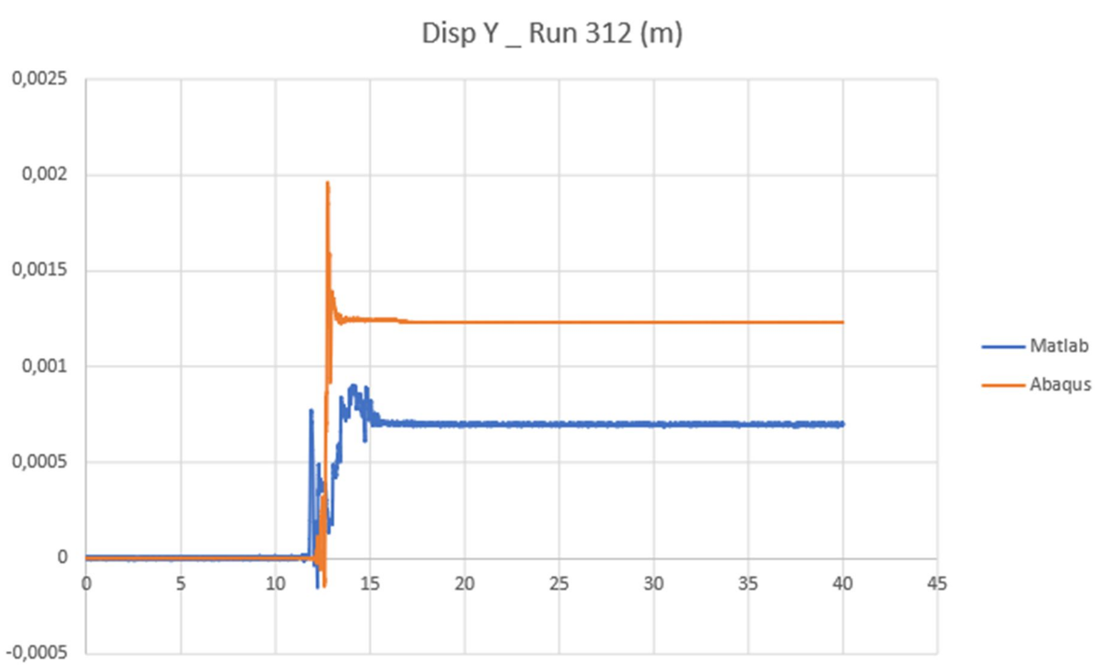
Εάν ασκηθεί σαν εξωτερική διέγερση μέσω της βάσης στο απλοποιητικό μοντέλο του αγάλματος στα πλαίσια του Abaqus/CAE τα αποτελέσματα τα οποία λαμβάνουμε είναι τα παρακάτω :

- *Μετακίνηση ως προς τη διεύθυνση Y στο δύσκαμπτο μοντέλο*



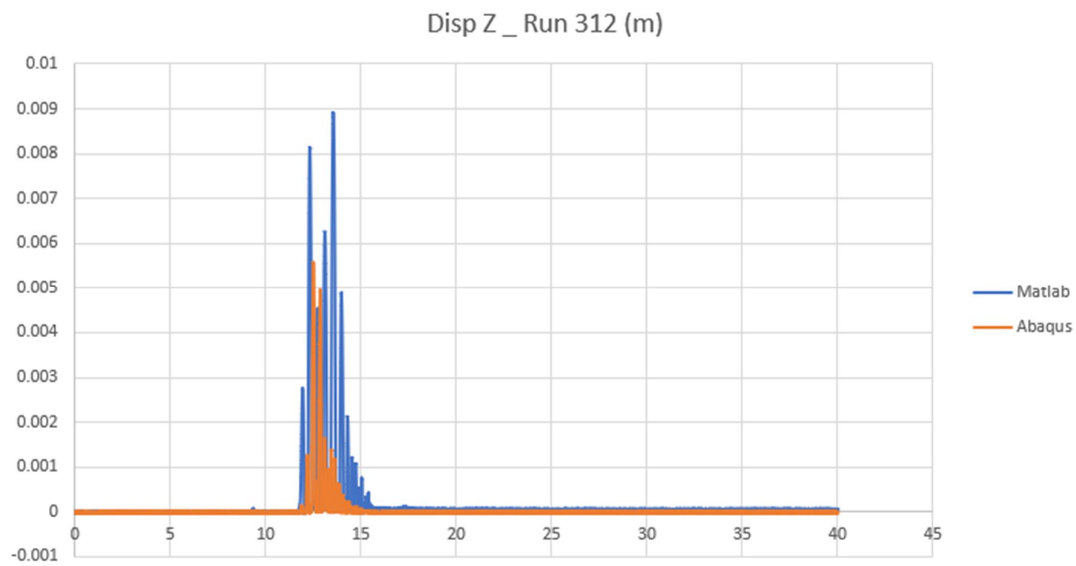
Σχήμα 2.5 Σύγκριση μετακίνησης κατά Y μεταξύ δύσκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς τη διεύθυνση Y στο εύκαμπτο μοντέλο*



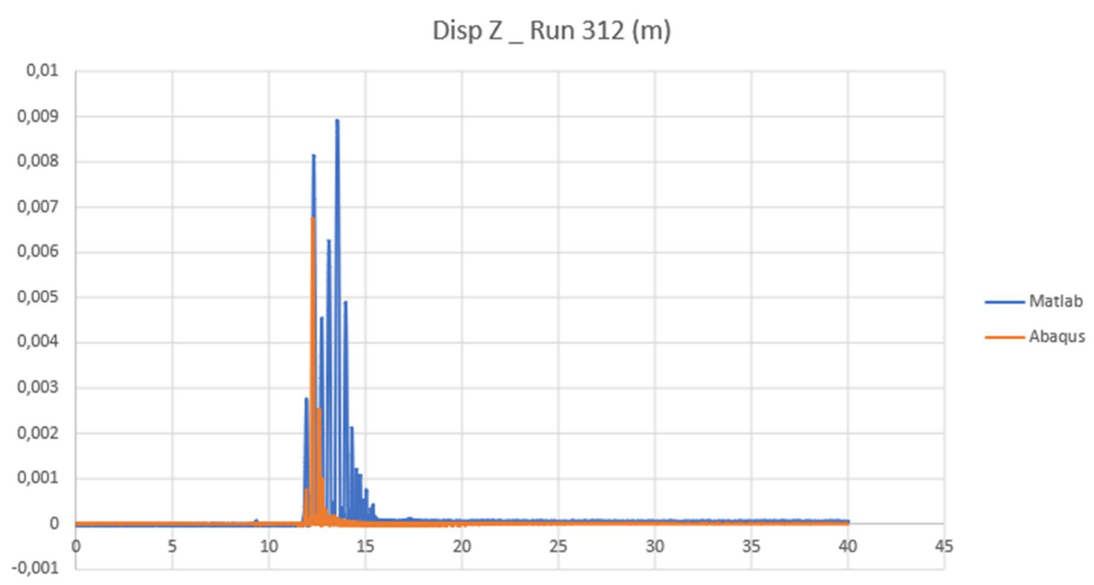
Σχήμα 2.6 Σύγκριση μετακίνησης κατά Y μεταξύ εύκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς τη διεύθυνση Z στο δύσκαμπτο μοντέλο*



Σχήμα 2.7 Σύγκριση μετακίνησης κατά Z μεταξύ δύσκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς τη διεύθυνση Z στο εύκαμπτο μοντέλο*



Σχήμα 2.8 Σύγκριση μετακίνησης κατά Z μεταξύ εύκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

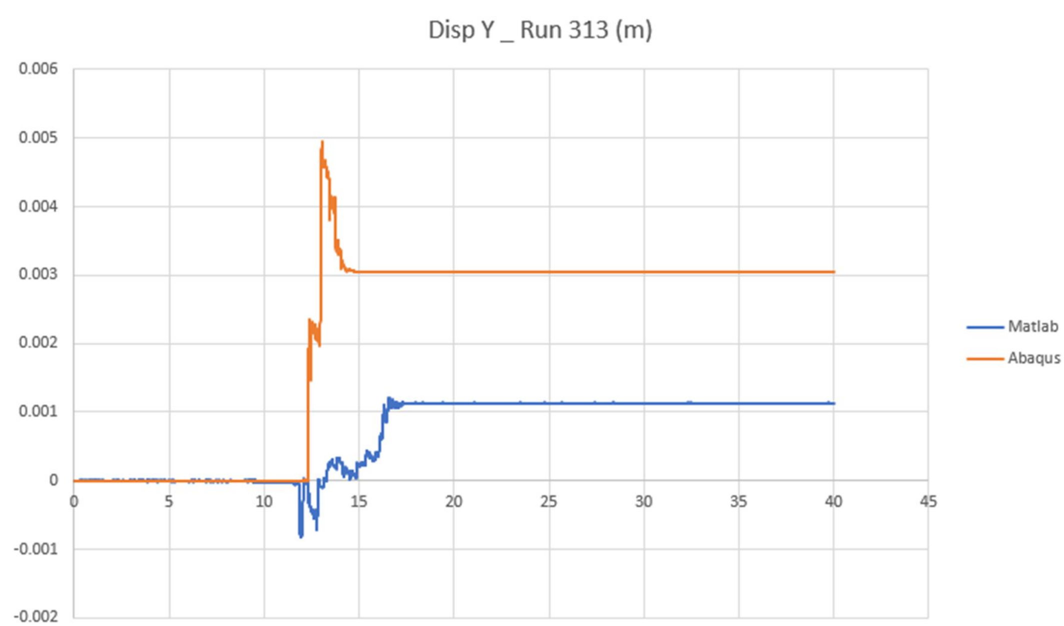
Από την παραπάνω σύγκριση εύκολα γίνεται αντιληπτό πως δεν υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά στη μορφή του κάθε γραφήματος του δύσκαμπτου σε σχέση με το εύκαμπτο. Και στις 2 περιπτώσεις οι τιμές και των μετακινήσεων κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα και στις μέγιστες τιμές μετακίνησης τις οποίες εμφανίζουν και στη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονισθεί ιδιαίτερα πως η άμεση σύγκριση μετακινήσεων δεν είναι ο συνηθέστερος τρόπος για την κατανόηση της συμπεριφοράς του δοκιμίου σε λικνισμό. Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος είναι με σύγκριση των στροφικών μετακινήσεων, ωστόσο σε αυτό το στάδιο της εργασίας το κύριο ενδιαφέρον ήταν το εάν ένα εύκαμπτο μοντέλο είναι σε θέση να δώσει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με ένα αντίστοιχο δύσκαμπτο ή όχι.

Επίσης, να σημειωθεί πως όπως αναφέρεται και στους τίτλους των γραφημάτων σύγκρισης των αποτελεσμάτων έτσι και στο σύνολο του παρόντος κεφαλαίου εργασίας τα αποτελέσματα τα οποία λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων των πειραμάτων SERA/SEREME θα συμβολίζονται με μπλε χρώμα ενώ τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο περιβάλλον του λογισμικού Abaqus/CAE θα συμβολίζονται με πορτοκαλί, για την καλύτερη ομοιογένεια της εργασίας αλλά και ευκολότερη κατανόηση από την πλευρά του αναγνώστη.

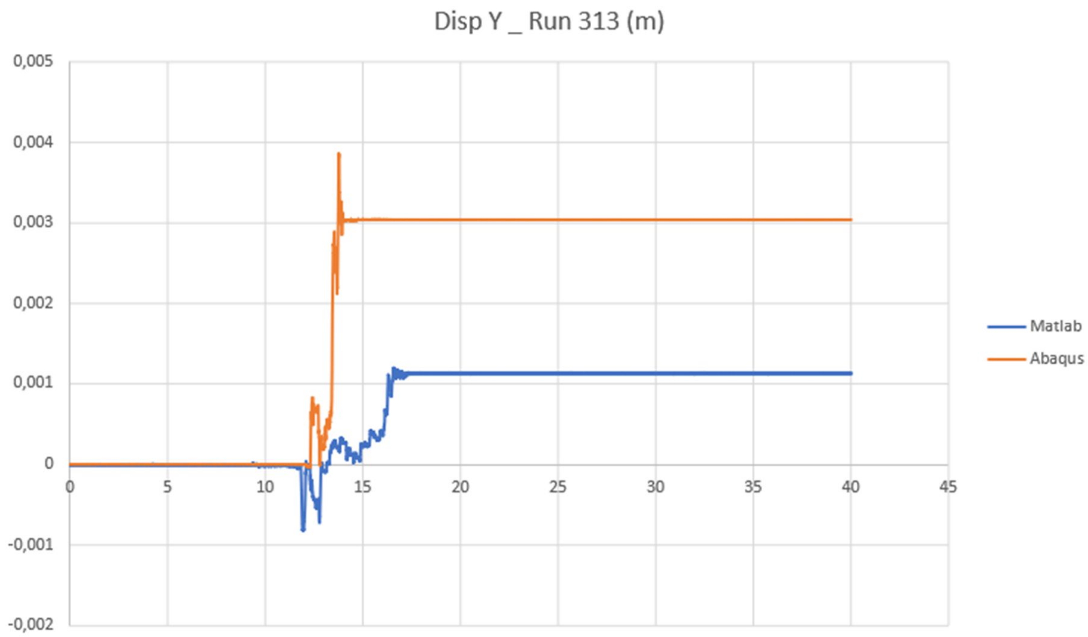
- Πείραμα 313 (Φόρτιση στο 121% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)

- *Μετακίνηση ως προς Y στο δύσκαμπτο μοντέλο*



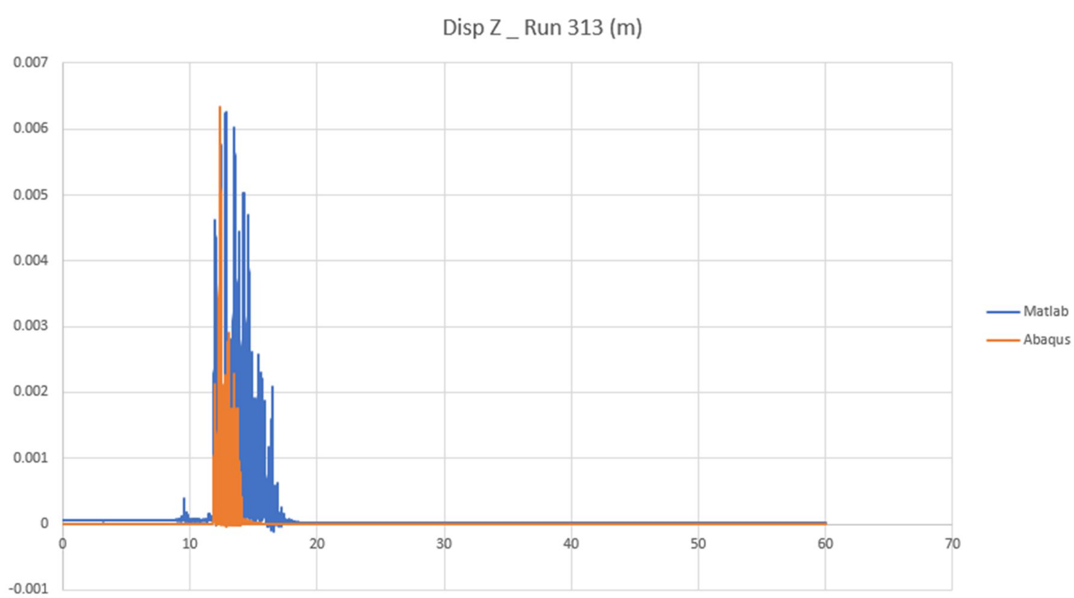
Σχήμα 2.9 Σύγκριση μετακίνησης κατά Y μεταξύ δύσκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς Y στο εύκαμπτο μοντέλο*



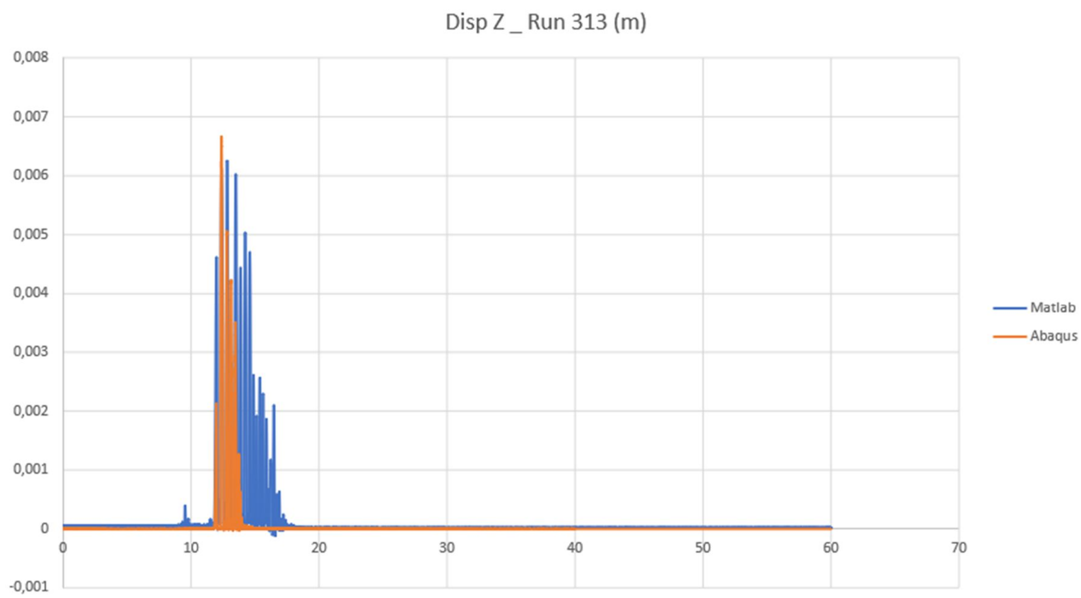
Σχήμα 2.10 Σύγκριση μετακίνησης κατά Y μεταξύ εύκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς Z στο δύσκαμπτο μοντέλο*



Σχήμα 2.11 Σύγκριση μετακίνησης κατά Z μεταξύ δύσκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς Z στο εύκαμπτο μοντέλο*



Σχήμα 2.12 Σύγκριση μετακίνησης κατά Z μεταξύ εύκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

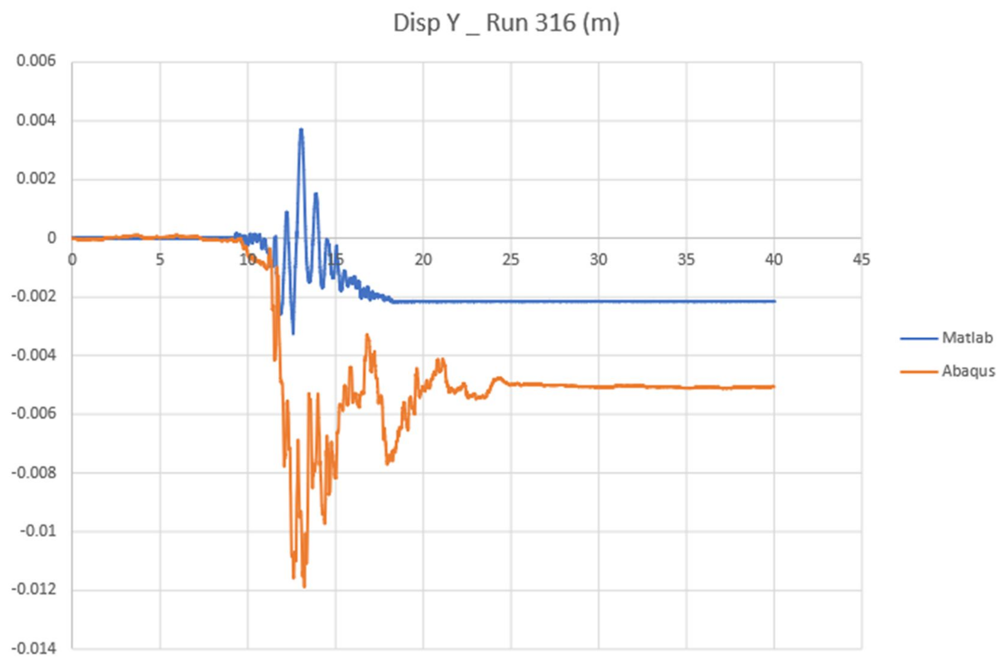
Και σε αυτήν την περίπτωση του πειράματος 313 οι σύγκριση των μετατοπίσεων ως προς Y και Z δεν φαίνεται να έχει κάποια σημαντική διαφορά, και στην περίπτωση του εύκαμπτου και στη περίπτωση του άκαμπτου το δοκίμιο έχει μετατοπιστεί για περίπου την ίδια χρονική περίοδο με μέγιστη τιμή η οποία απέχει μόλις 1 χιλιοστό στην περίπτωση των μετατοπίσεων κατά Y, ενώ κατά Z να είναι ακριβώς η ίδια.

Για το συγκεκριμένο πείραμα δόθηκαν δύο σταθερές τιμές τριβής και απόσβεσης στα μοντέλα ώστε η σύγκριση να γίνει με κοινές τιμές. Σαφώς έγινε έλεγχος για πολλούς συνδυασμούς τιμών των δύο αυτών παραμέτρων αλλά η σύγκριση μεταξύ τους συνέβαινε πάντα χρησιμοποιώντας ίδιες τιμές στο πλαίσιο του προσδιορισμού του κατάλληλου τύπου μοντέλου το οποίο θα χρησιμοποιούταν στην εργασία.

Οι παραπάνω τιμές στο πείραμα 313 έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας συντελεστή τριβής ίσο με 0,62 και απόσβεση (critical damping) ίση με 2%.

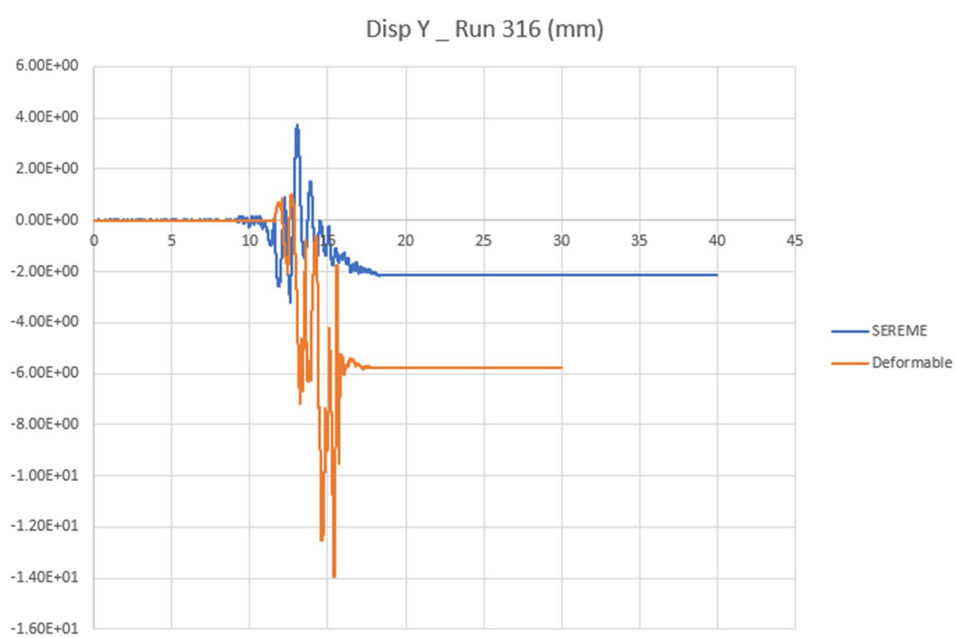
- <u>Πείραμα 316 (Φόρτιση στο 140% του σεισμού Emilia μόνο κατά Y)</u>

- *Μετακίνηση ως προς Υ στο δύσκαμπτο μοντέλο*



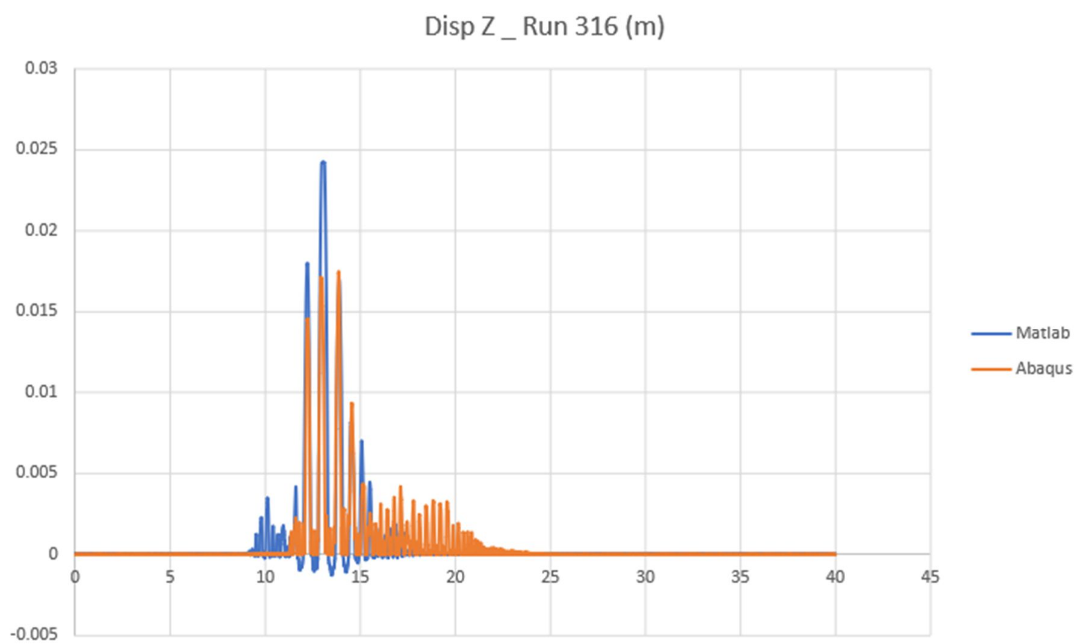
Σχήμα 2.13 Σύγκριση μετακίνησης κατά Υ μεταξύ δύσκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς Υ στο εύκαμπτο μοντέλο*



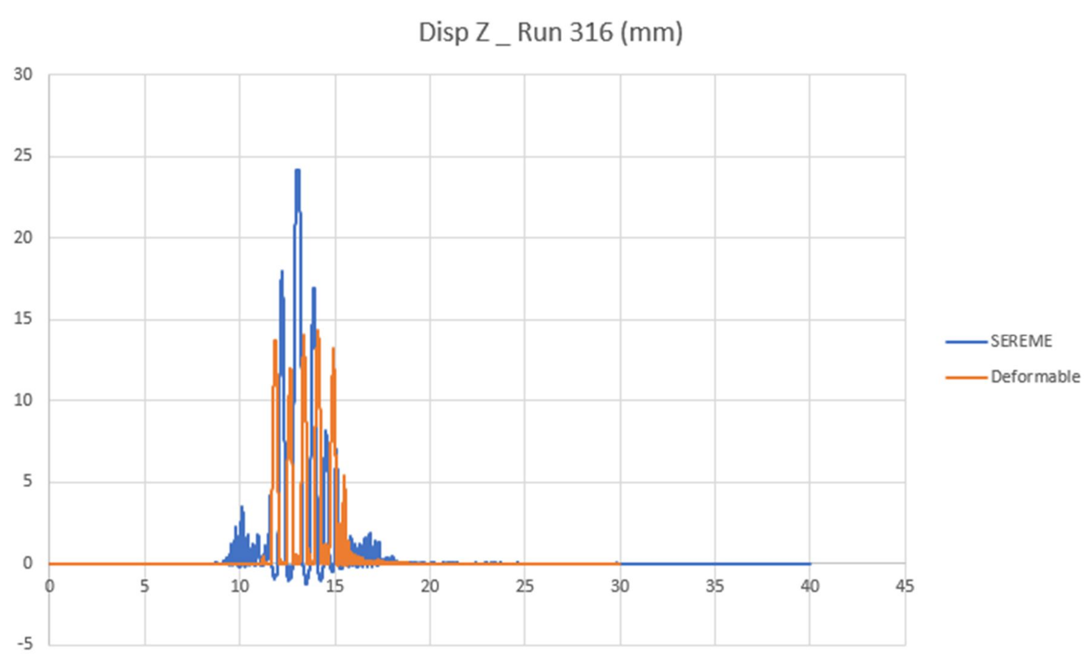
Σχήμα 2.14 Σύγκριση μετακίνησης κατά Υ μεταξύ εύκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς Z στο δύσκαμπτο μοντέλο*



Σχήμα 2.15 Σύγκριση μετακίνησης κατά Z μεταξύ δύσκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

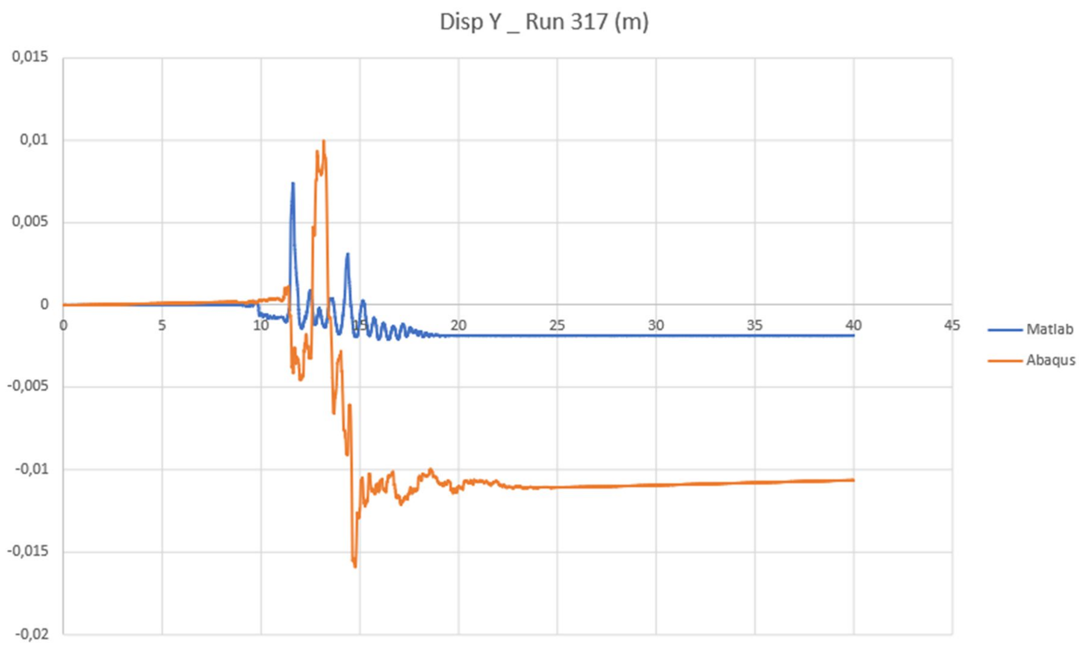
- *Μετακίνηση ως προς Z στο εύκαμπτο μοντέλο*



Σχήμα 2.16 Σύγκριση μετακίνησης κατά Z μεταξύ εύκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

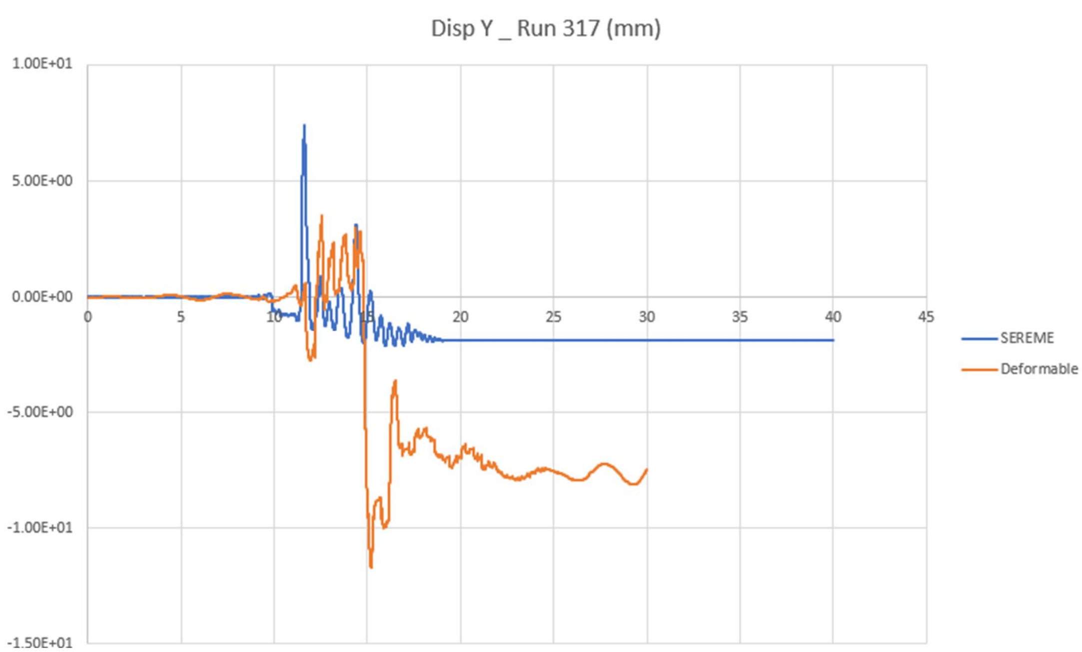
- <u>Πείραμα 317 (Φόρτιση στο 160% του σεισμού Emilia μόνο κατά Y)</u>

- *Μετακίνηση ως προς Y στο δύσκαμπτο μοντέλο*



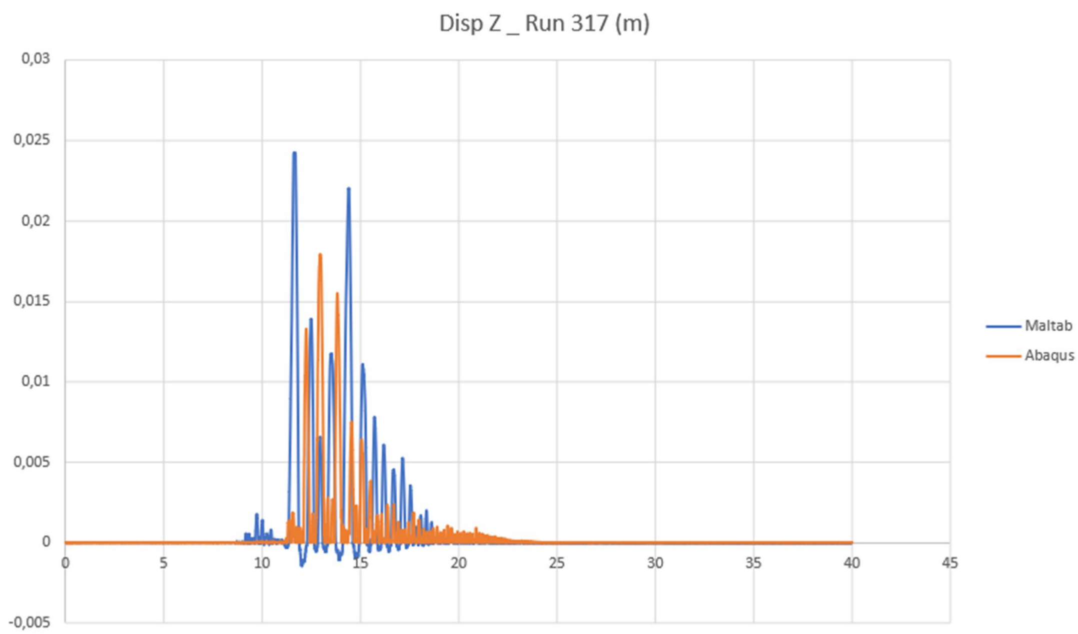
Σχήμα 2.17 Σύγκριση μετακίνησης κατά Y μεταξύ δύσκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς Y στο εύκαμπτο μοντέλο*



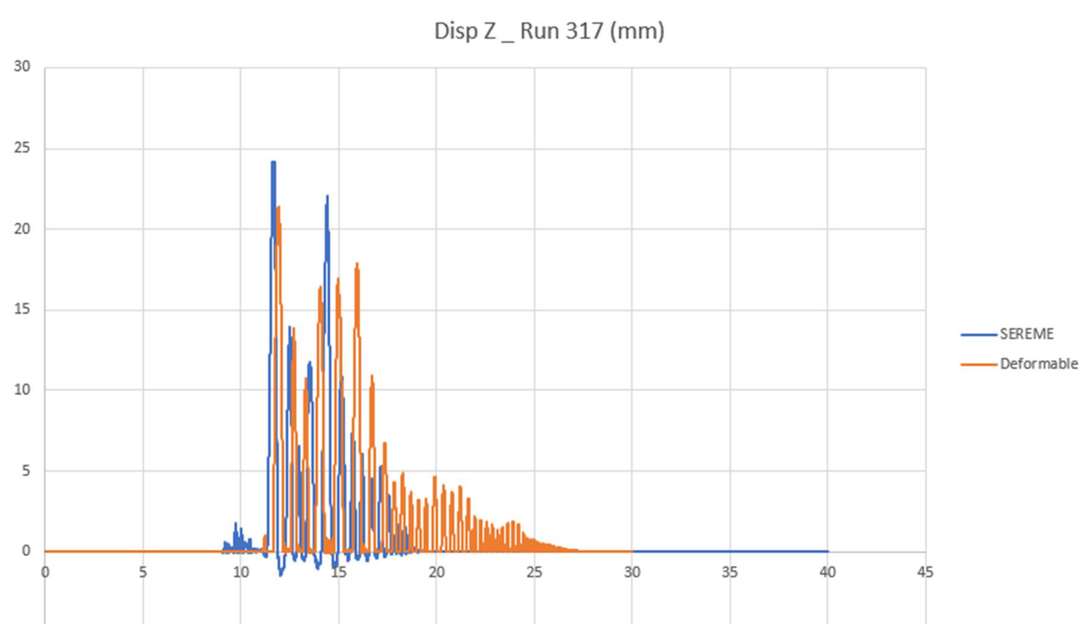
Σχήμα 2.18 Σύγκριση μετακίνησης κατά Y μεταξύ εύκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς Z στο δύσκαμπτο μοντέλο*



Σχήμα 2.19 Σύγκριση μετακίνησης κατά Z μεταξύ δύσκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

- *Μετακίνηση ως προς Z στο εύκαμπτο μοντέλο*



Σχήμα 2.20 Σύγκριση μετακίνησης κατά Z μεταξύ εύκαμπτου μοντέλου (πορτοκαλί) και πειραματικών δεδομένων (μπλε)

Παρόμοια κατάσταση με τα 2 πρώτα πειράματα παρατηρείται και στα 2 επόμενα, η γενική συμπεριφορά καθώς και το εύρος τιμών των γραφημάτων είναι πάρα πολύ κοντινά. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως για τα παραπάνω αποτελέσματα στο πείραμα 316 χρησιμοποιήθηκαν : $\mu = 0{,}58$ και $\zeta = 2\%$ ενώ για το πείραμα 317 οι τιμές ήταν 0,60 και 5% αντίστοιχα.

2.4 Συμπεράσματα

Όπως φάνηκε και από τα παραπάνω γραφήματα τα αποτελέσματα μεταξύ δύσκαμπτου και εύκαμπτου μοντέλου είναι παρόμοια χωρίς να παρουσιάζεται κάποια σημαντική διαφορά.

Μέσω των αποτελεσμάτων του παρόντος κεφαλαίου μπορεί να μην έχει δημιουργηθεί μια σαφή εικόνα σχετικά με το πόσο ακριβή μπορεί να είναι τα αποτελέσματα γενικότερα της προσομοίωσης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε σχέση με την πραγματική και πολύπλοκη συμπεριφορά του λικνισμού αφού συγκρίνοντας μόνο αυτές τις δύο μετατοπίσεις δεν δημιουργείται εικόνα της συμπεριφοράς του δοκιμίου. Ωστόσο γίνεται εύκολα αντιληπτό πως είτε με τη χρήση εύκαμπτου μοντέλου, είτε με τη χρήση δύσκαμπτου μοντέλου έχουμε παρόμοια συμπεριφορά του δοκιμίου στο πλαίσιο του Abaqus με δραματική αλλαγή όμως στους υπολογιστικούς χρόνους. Για την ακρίβεια, το ίδιο μοντέλο, με το ίδιο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων και ίδια βήματα ανάλυσης καθώς και συνολικό χρόνο ανάλυσης με μόνη διαφορά από πλήρως δύσκαμπτο (rigid) σε παραμορφώσιμο (deformable) παρουσίαζε 30 φορές παραπάνω υπολογιστικό χρόνο.

Δεδομένου της πολύ μεγάλης διαφοράς στους υπολογιστικούς χρόνους και της αντίστοιχης μικρής διαφοράς στα αποτελέσματα καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως κατά τη συνέχεια της παρούσας μελέτης οι περισσότερες προσομοιώσεις θα πραγματοποιούνταν με τη χρήση πλήρως δύσκαμπτων μοντέλων. Ασφαλώς μορφώθηκαν και άλλα παραμορφώσιμα όπως θα φανεί παρακάτω ωστόσο η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων και της διερευνητικής εργασίας η οποία πραγματοποιήθηκε έγινε με τη χρήση rigid.

Το γεγονός πως το άγαλμα στην παρούσα εργασία χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη γεωμετρία δεδομένου του πόσο υψίκορμο είναι, μια ξεκάθαρη απάντηση σχετικά με το εάν είναι ορθότερο να ληφθεί πλήρως δύσκαμπτο ή παραμορφώσιμο μοντέλο είναι δύσκολο να δοθεί. Από την μια είναι σύνηθες μελετώντας το φαινόμενο του λικνισμού τα προσομοιώματα τα οποία λαμβάνονται να είναι πλήρως άκαμπτα δεδομένου του ότι τα περισσότερα αγάλματα χαρακτηρίζονται λόγω υλικού και λόγω γεωμετρίας από πολύ μεγάλη στιβαρότητα και σε πολλές των περιπτώσεων μια ορθογωνική μορφή. Ωστόσο δεν είναι τόσο ξεκάθαρα το όρια σχετικά με το εάν υπάρχει κάποιο όριο λυγηρότητας πέρα από το οποίο να είναι πιο αντιπροσωπευτική η προσομοίωση με παραμορφώσιμο μοντέλο και εάν υπάρχει κάποιο τέτοιο όριο τότε ποιο είναι αυτό.

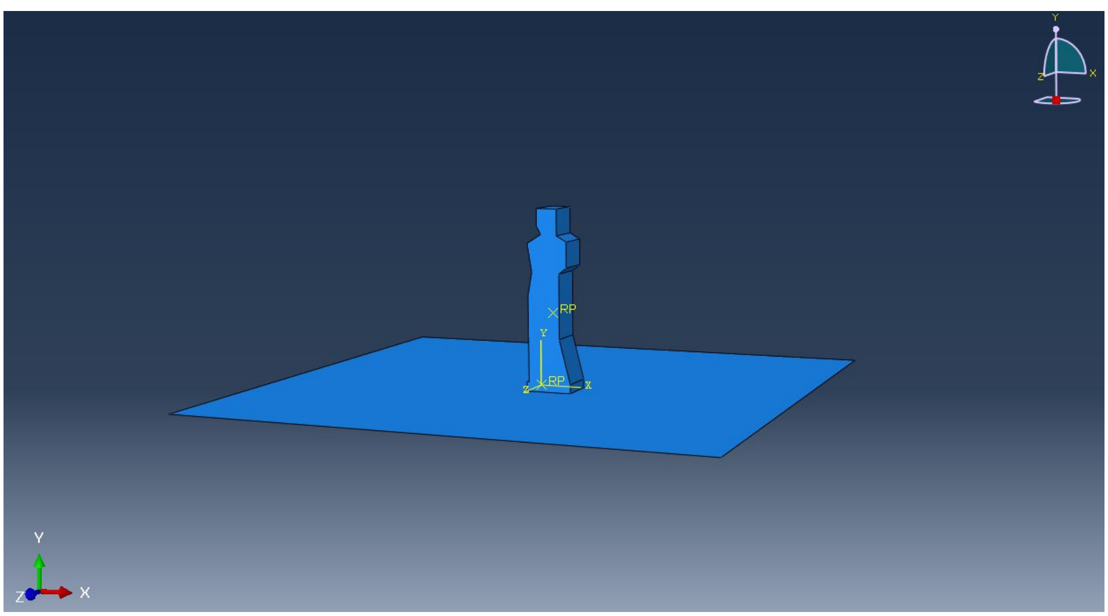
Ωστόσο, μετά την παραπάνω διερεύνηση στην περίπτωση του συγκεκριμένου αγάλματος, κατέστη πλέον σαφές πως, λόγω του ότι τα αποτελέσματα ήταν αντίστοιχα ως προς την ακρίβειά τους σε σχέση με τα πειραματικά, η καλύτερη επιλογή ήταν εκείνη του πλήρους δύσκαμπτου μοντέλου το οποίο εμφάνιζε πολύ μικρούς υπολογιστικούς χρόνους και για αυτό στα παρακάτω κεφάλαια οι επόμενες συγκρίσεις γίνονται μέσω εκείνου.

3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΠΛΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ – ΜΟΝΤΕΛΟΥ FANCIULLA

3.1 Περιγραφή γεωμετρικά απλοποιητικού μοντέλου

Όπως έχει φανεί από το προηγούμενο κεφάλαιο, κατά τις πρώτες προσομοιώσεις του αγάλματος έναντι λικνισμού στο πλαίσιο του Abaqus/CAE η αρχή έγινε με τη χρήση ενός γεωμετρικά απλοποιητικού μοντέλου το οποίο έχει ίδια λυγηρότητα και αδρανειακά χαρακτηριστικά με το πραγματικό άγαλμα χωρίς να έχουν προστεθεί στο μοντέλο οι λεπτομέρειες της μορφής του αγάλματος. Επρόκειτο για ένα πολύ γρήγορο μοντέλο όπου με ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο και κόστος τέθηκε υπό εξέταση το πόσο ακριβή αποτελέσματα μπορεί να δώσει. Ήδη έχει γίνει φανερό πως με τη χρήση αυτού του απλοποιητικού μοντέλου μέσω μιας θεώρησης πλήρους δυσκαμψίας τα αποτελέσματα είναι παρόμοια σε σχέση με τη θεώρηση παραμορφώσιμου υλικού με τις ακριβής τιμές του μαρμάρου. Επομένως, κατά τη συνέχεια της μελέτης η θεώρηση πλήρους δυσκαμψίας στα μοντέλα που ακολουθούν γίνεται δεδομένη, ωστόσο μορφώθηκαν και άλλα εύκαμπτα μοντέλα τα οποία όπως θα περιγραφεί παρακάτω δεν ήταν σε θέση και πάλι να δώσουν σημαντικές παραπάνω πληροφορίες.

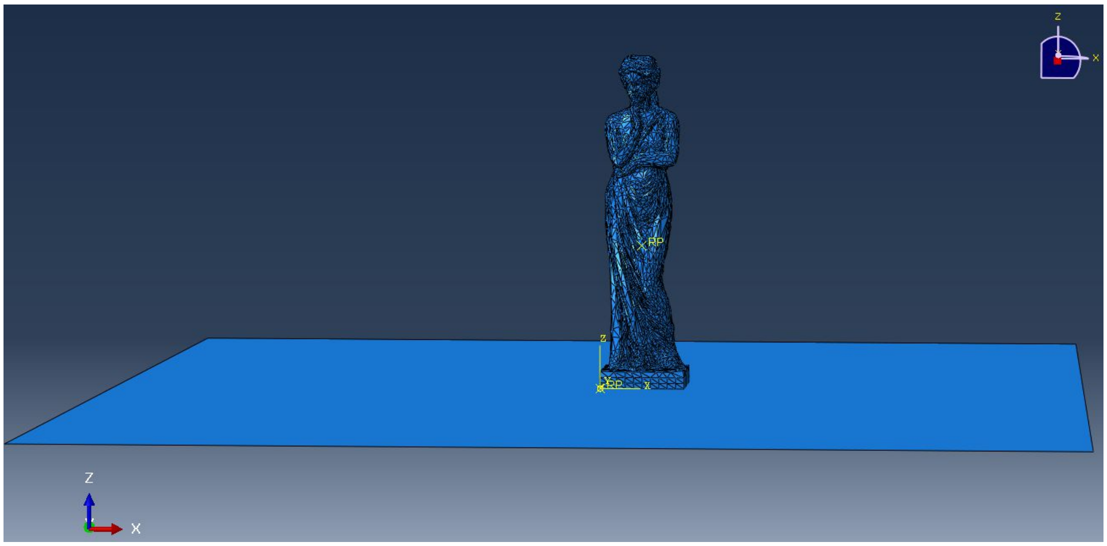
Τελικά, και στη σύγκριση αυτού του κεφαλαίου το πρώτο μοντέλο το οποίο θα εξεταστεί είναι αυτό το οποίο φάνηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή ένα πλήρως άκαμπτο (rigid) γεωμετρικά απλοποιητικό μοντέλο, όπως φαίνεται και σε περιβάλλον του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο προσομοιώθηκε, στην παρακάτω εικόνα :



Σχήμα 3.1 Πλήρως δύσκαμπτο, απλοποιητικό γεωμετρικά μοντέλο

3.2 Περιγραφή μοντέλου της Fanciulla

Το μοντέλο με το οποίο θα συγκρίνουμε το προαναφερθέν μοντέλο θα είναι ένα αντίστοιχα πλήρως δύκαμπτο μοντέλο το οποίο όμως διαφέρει ως προς τη μορφή του, αφού πλέον δεν γίνεται η χρήση απλοποιητικής γεωμετρίας αλλά έχει εισαχθεί στο πλαίσιο του Abaqus η πραγματική ακριβής γεωμετρία του αγάλματος όπως φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 3.2 Πλήρως δύσκαμπτο μοντέλο με τη χρήση της πραγματικής μορφής του αγάπλματος Fanciulla

Το παραπάνω μοντέλο εισήχθη στο περιβάλλον του συγκεκριμένου λογισμικού με τη βοήθεια τρισδιάστατου σαρωτή ο οποίος ήταν σε θέση να εξάγει τη πραγματική του γεωμετρία και ακριβή μορφή σε αρχείο CAD. Το ερώτημα το οποίο πλέον γεννάτε είναι το πόσο καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με αυτήν την παραπάνω πληροφορία η οποία έχει εισαχθεί στο μοντέλο και ακόμα και στην περίπτωση των καλύτερων αποτελεσμάτων, πόσο μεγάλη ή μικρή θα είναι η αντίστοιχη αύξηση υπολογιστικού χρόνου.

Και πάλι, όπως και στη περίπτωση του προηγούμενο κεφαλαίου, ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να απαντηθεί το παραπάνω ερώτημα είναι με άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μοντέλων. Επομένως, διενεργήθηκαν μια σειρά από δοκιμές στις προσομοιώσεις, δοκιμάζοντας διαφορετικούς συνδυασμούς τριβής και απόσβεσης και για τα δυο μοντέλα και τελικά πραγματοποιώντας σύγκριση των αποτελεσμάτων τα οποία έδινε κάθε τέτοιος συνδυασμός.

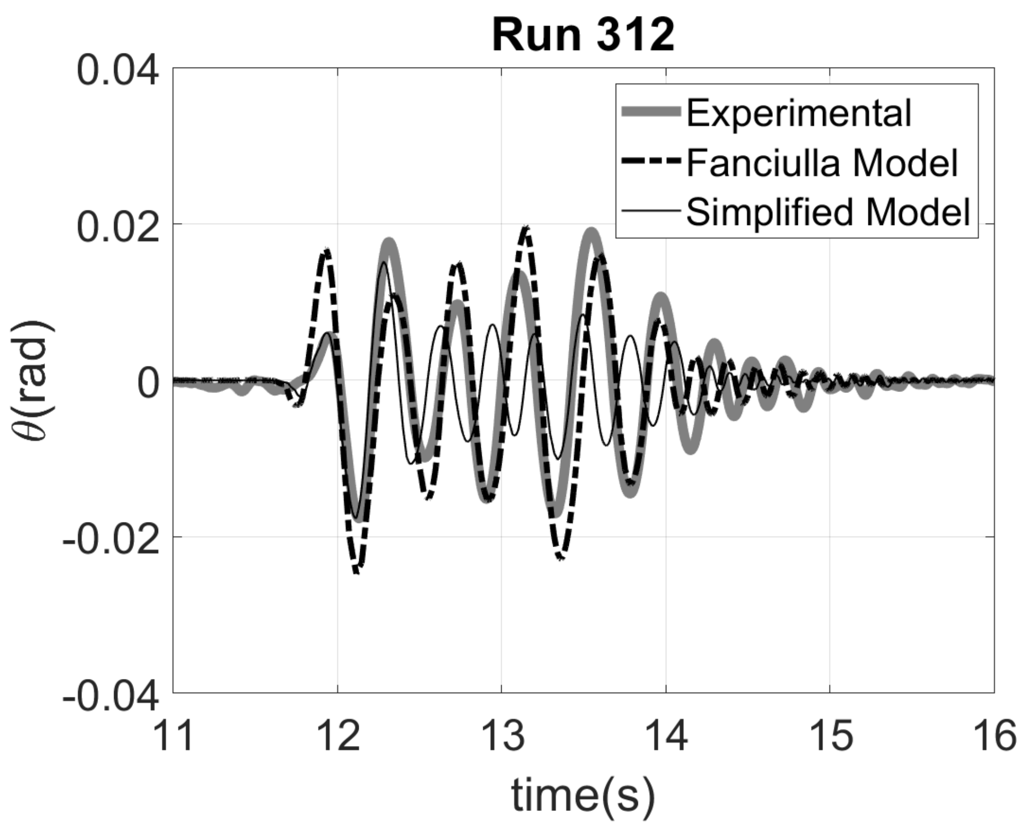
Αξίζει να αναφερθεί πως τα αδρανειακά χαρακτηριστικά καθώς και τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου (μέγεθος και μορφή πεπερασμένων στοιχείων, χρόνοι και βήματα ανάλυσης καθώς και η εξωτερική διέγερση) ήταν κοινά και στις δύο των περιπτώσεων.

3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της σύγκρισης των στροφικών μετατοπίσεων στο κέντρο βάρους του αγάλματος ανάμεσα στα δυο παραπάνω μοντέλα. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως σύμφωνα με τα δεδομένα τα οποία μετρήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος SERA/SEREME ήταν γνωστές οι γωνιακές ταχύτητες σε αυτό το σημείο επομένως με τη χρήση κατάλληλου κώδικα σε MATLAB είμασταν σε θέση να λάβουμε τις αντίστοιχες γωνιακές μετατοπίσεις (στροφές) στο συγκεκριμένο σημείο και να πραγματοποιηθεί η σύγκριση με τις αντίστοιχες στροφές αυτού του σημείου μέσω του Abaqus/CAE. Η σύγκριση μέσω γωνιακών μετατοπίσεων προτιμήθηκε στη παρούσα περίπτωση αλλά και στην συνέχεια της μελέτης λόγω του ότι είναι σε θέση να δώσει μια καλύτερη εικόνα σχετικά με τη συνολική συμπεριφορά του δοκιμίου έναντι λικνισμού αλλά ακόμα και στη περίπτωση παρόμοιας λικνιστικής συμπεριφοράς μπορεί να φανεί εάν το δοκίμιο είχε προβλήματα ολίσθησης είτε στη περίπτωση των πειραμάτων είτε στη περίπτωση της προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα τα οποία θα εμφανιστούν παρακάτω θα ταξινομηθούν ανά πείραμα δεδομένου του ότι σε κάθε πείραμα η διέγερση ήταν διαφορετικής έντασης.

- <u>Πείραμα 312 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)</u>

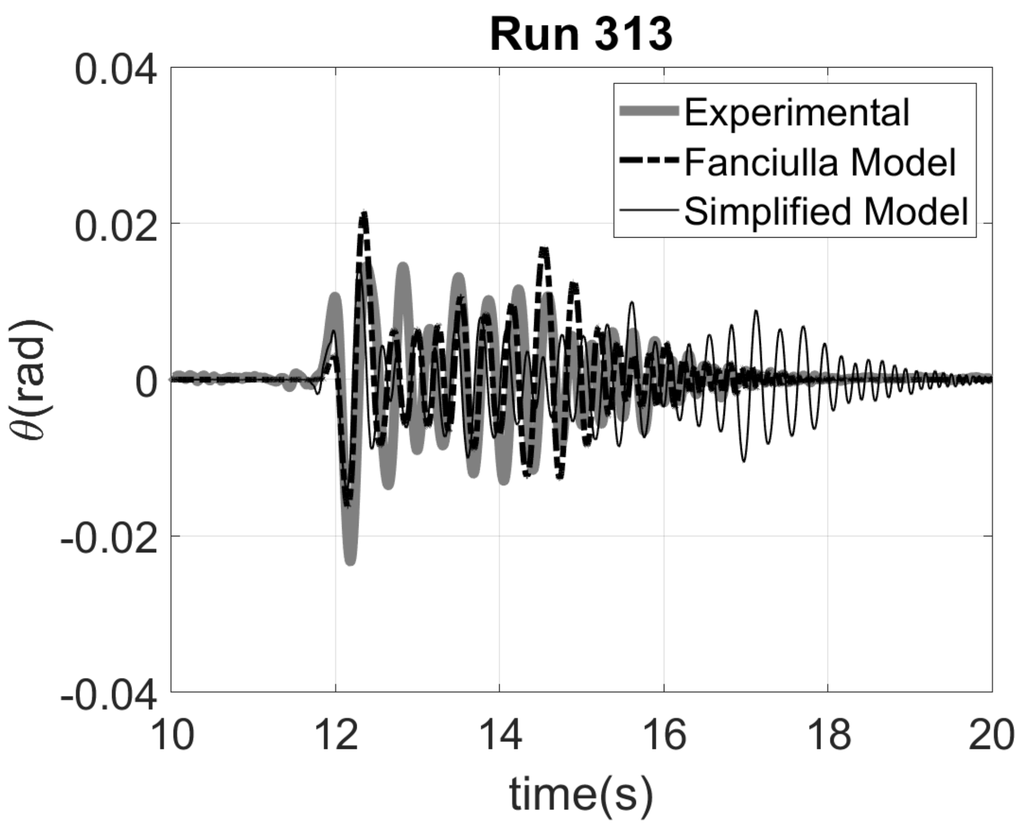


Σχήμα 3.3 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και του μοντέλου της Fanciulla σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως καθ' όλη τη διάρκεια του κεφαλαίου τα αποτελέσματα του απλοποιητικού μοντέλου θα συμβολίζονται με λεπτή μαύρη συνεχή γραμμή ενώ εκείνα του μοντέλου ακριβούς μορφής του αγάλματος θα συμβολίζονται με διακεκομμένη. Και τα δύο αυτά αποτελέσματα αξιολογούνται σχετικά με το πόσο ακριβή είναι σε σχέση με τη πραγματική συμπεριφορά του αγάλματος κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

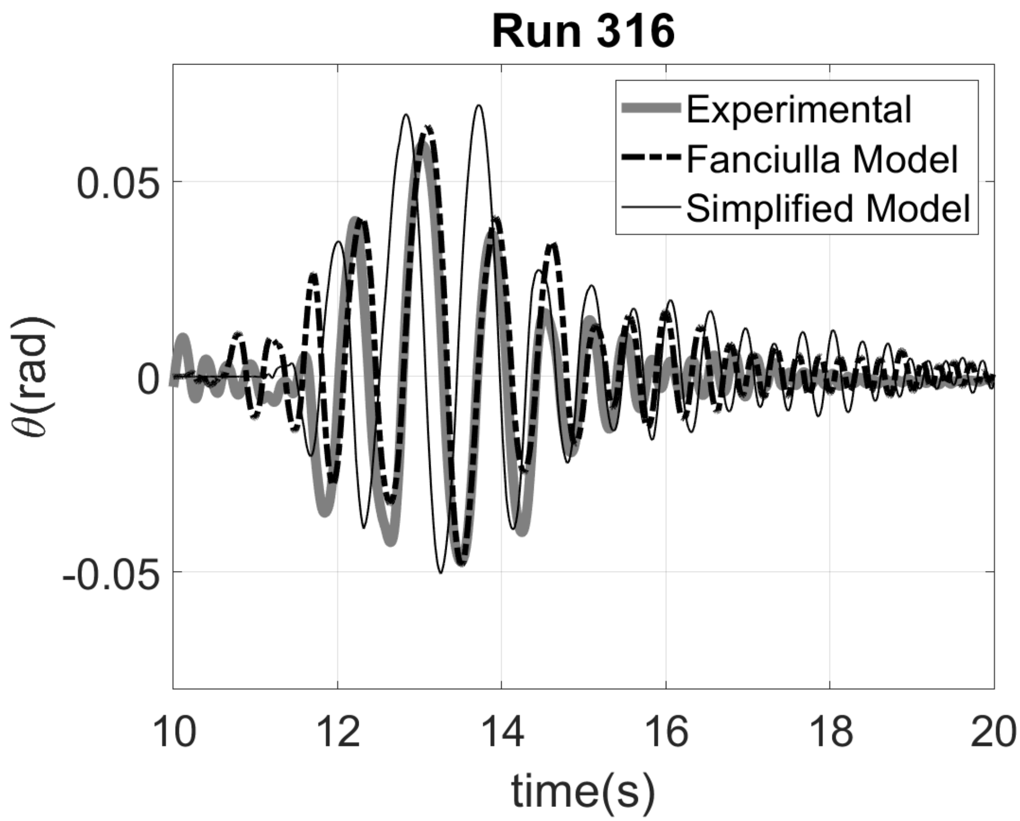
Επίσης να τονισθεί πως η συνολική διάρκεια του πειράματος διήρκησε 60 δευτερόλεπτα ωστόσο για λόγους καλύτερης απεικόνισης η εικόνα πάντα θα μεγεθύνεται στη διάρκεια της διέγερσης του δοκιμίου ώστε να είναι ποιοτικότερη η σύγκριση από τη πλευρά του αναγνώστη αφού πριν και μετά του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος οι τιμές και των τριών γραφημάτων είναι μηδενικές.

- Πείραμα 313 (Φόρτιση στο 121% του σεισμού Emilia μόνο κατά Χ)



Σχήμα 3.4 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και του μοντέλου της Fanciulla σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

- <u>Πείραμα 316 (Φόρτιση στο 140% του σεισμού Emilia μόνο κατά Y)</u>



Σχήμα 3.5 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και του μοντέλου της Fanciulla σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

Σχετικά με τα παραπάνω πειράματα, οι τιμές συντελεστή τριβής και απόσβεση οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ήταν :

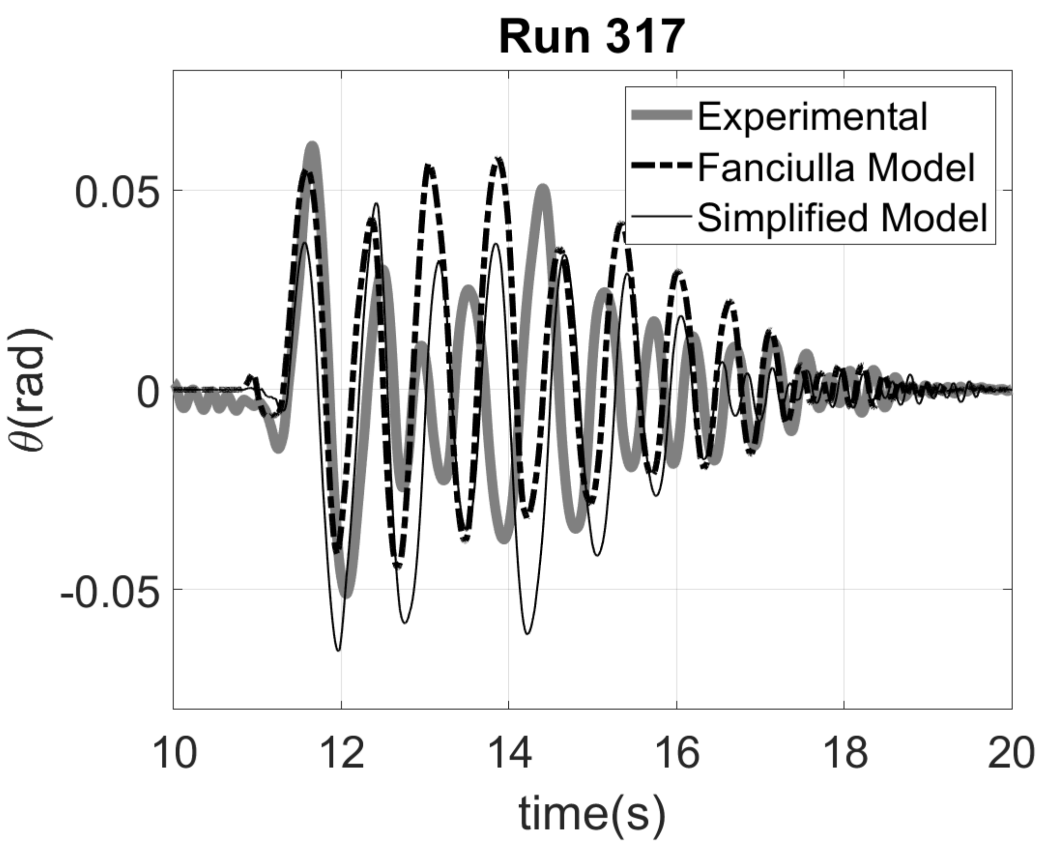
- <u>Πείραμα 312</u> : Συντελεστής Τριβής $\mu = 0{,}57$ και απόσβεση $\zeta = 2\%$

- <u>Πείραμα 313</u> : Συντελεστής Τριβής $\mu = 0{,}55$ και απόσβεση $\zeta = 2\%$

- <u>Πείραμα 316</u> : Συντελεστής Τριβής $\mu = 0{,}56$ και απόσβεση $\zeta = 2\%$

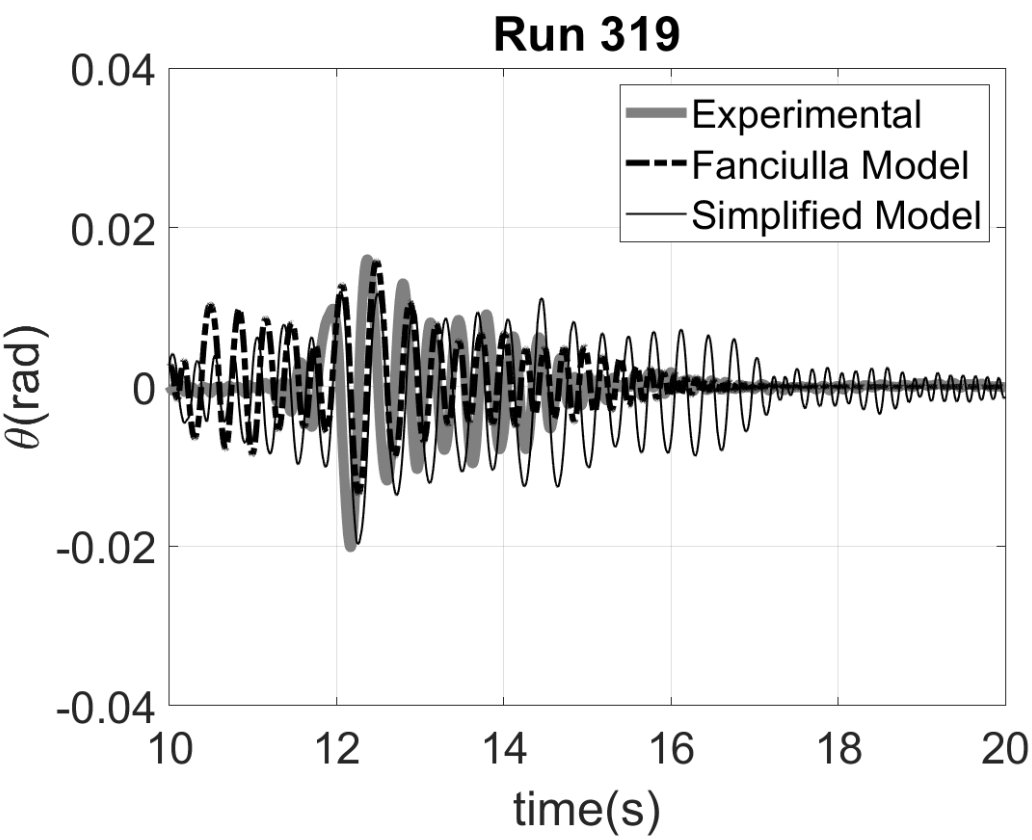
καθώς, από όλους τους συνδυασμούς τριβής και απόσβεσης οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν αυτά τα αποτελέσματα κρίθηκαν ως πιο αντιπροσωπευτικά και κοντινότερα στη πραγματική συμπεριφορά του πειραματικού σταδίου.

- Πείραμα 317 (Φόρτιση στο 160% του σεισμού Emilia μόνο κατά Y)



Σχήμα 3.6 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και του μοντέλου της Fanciulla σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

- <u>Πείραμα 319 (Φόρτιση στο 76% του σεισμού Emilia κατά XY)</u>



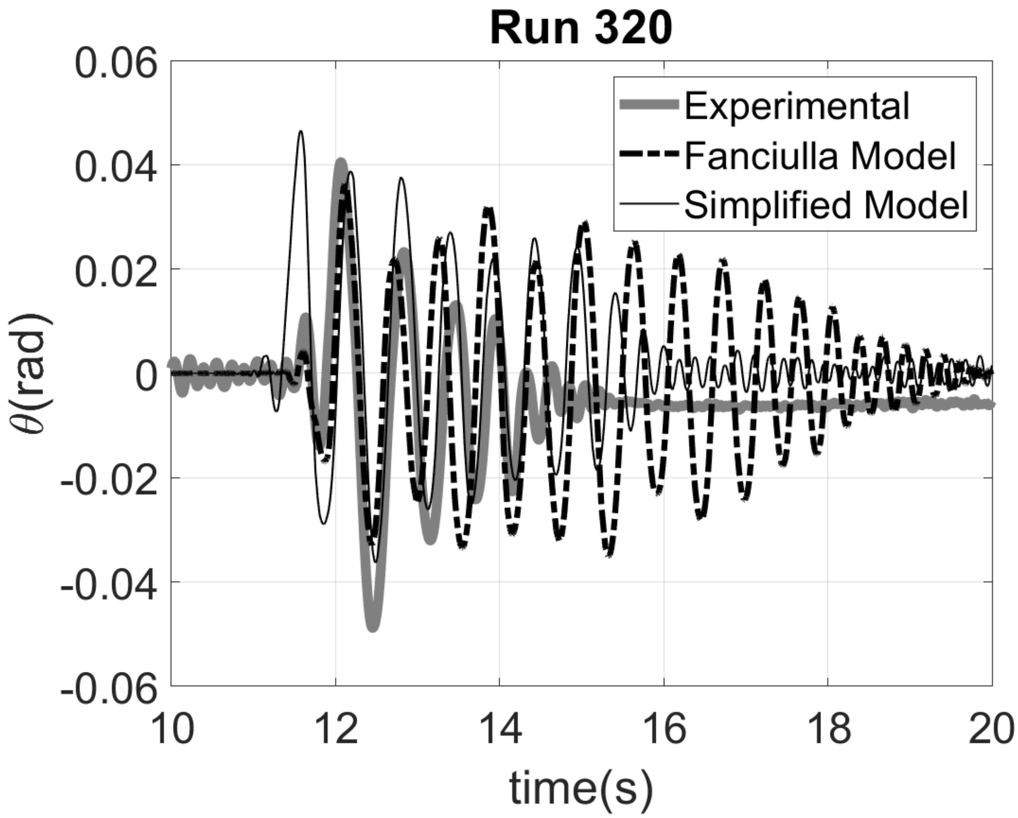
Σχήμα 3.7 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και του μοντέλου της Fanciulla σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

Στο πείραμα 319 ελήφθησαν οι εξής τιμές :

$\mu = 0{,}71$

$\zeta = 2\%$

- <u>Πείραμα 320 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia κατά XY)</u>



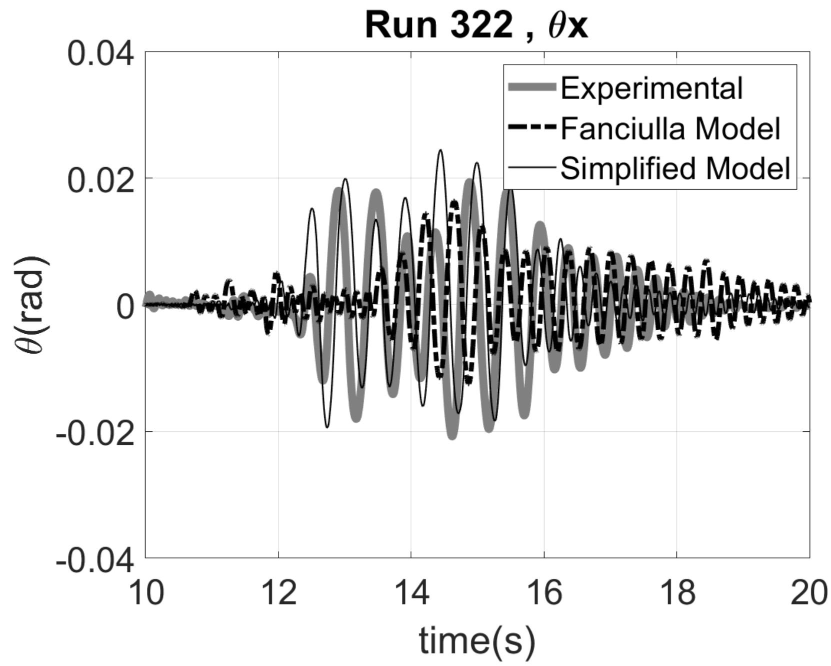
Σχήμα 3.8 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και ακριβούς μοντέλου σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

Για το πείραμα 320 οι αντίστοιχες τιμές ήταν :

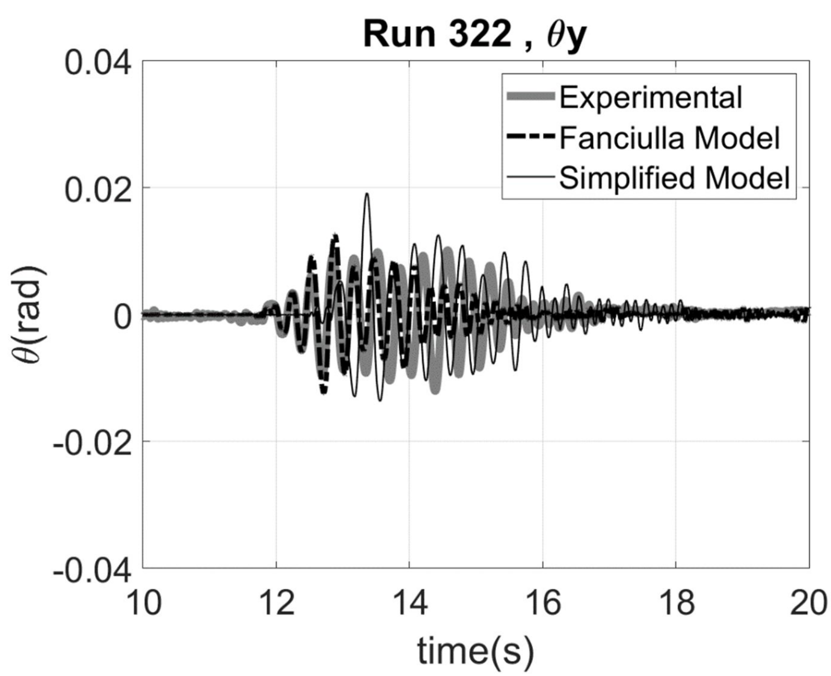
$\mu = 0{,}55$

$\zeta = 2\%$

- Πείραμα 322 (Φόρτιση στο 76% του σεισμού Emilia κατά XYZ)

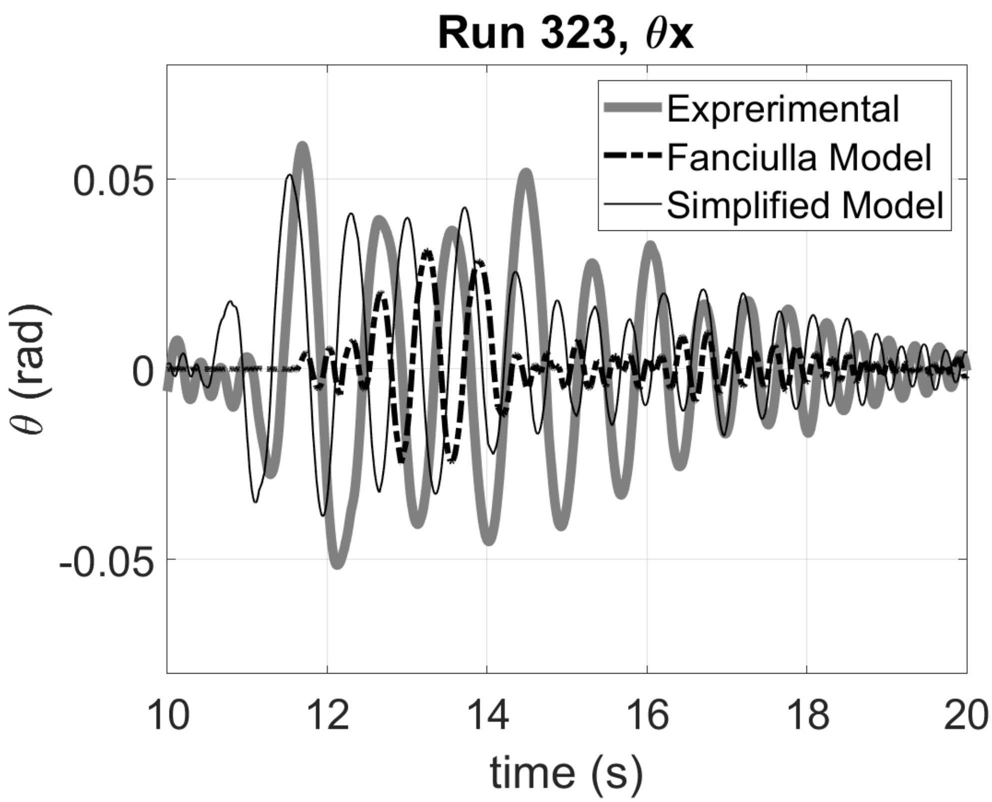


Σχήμα 3.9 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και ακριβούς μοντέλου σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME



Σχήμα 3.10 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και ακριβούς μοντέλου σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

- Πείραμα 323 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia κατά XYZ)



Σχήμα 3.11 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και ακριβούς μοντέλου σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

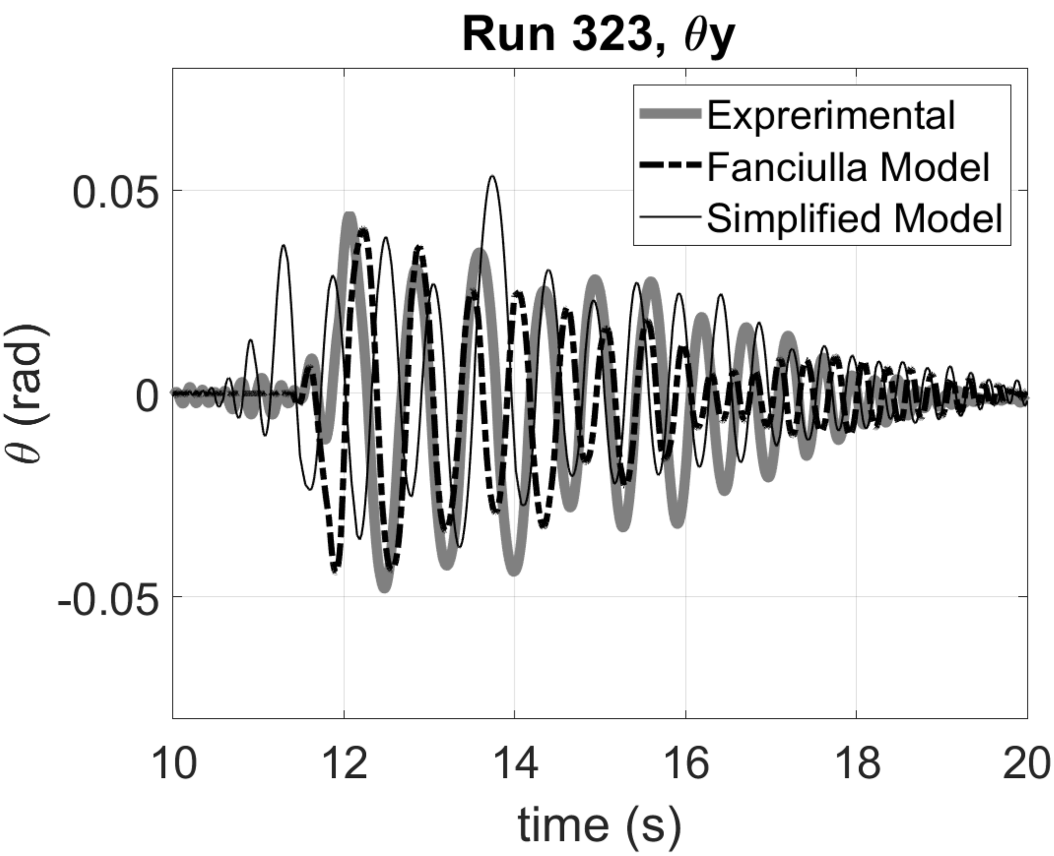
Όσον αφορά τα πειράματα 322 και 323 οι τιμές των παραμέτρων της τριβής και της απόσβεσης ήταν :

Πείραμα 322 : $\mu = 0{,}60$

$\zeta = 2{,}7\ \%$

Πείραμα 323 : $\mu = 0{,}58$

$\zeta = 2{,}3\ \%$



Σχήμα 3.12 Σύγκριση στροφικών μετακινήσεων μεταξύ απλοποιητικού μοντέλου και ακριβούς μοντέλου σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του SEREME

Επίσης, σημαντική παρατήρηση σχετικά με τα αποτελέσματα των πειραμάτων 322 και 323 είναι πως η σύγκριση των στροφικών αυτών μετακινήσεων έχει γίνει και στις δύο διευθύνσεις πιθανού λικνισμού του δοκιμίου, λόγω του ότι τα πειράματα αυτά διενεργήθηκαν σε τρείς διευθύνσεις υπήρχε σοβαρότερος κίνδυνος λικνισμού ή και ανατροπής σε οποιαδήποτε από τις δυο διευθύνσεις (εκτός δηλαδή της διεύθυνσης καθ' ύψος του αγάλματος με την οποία μετράτε η περιστροφή του αγάλματος και όχι ο λικνισμός αυτός καθαυτός).

3.4 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια αυτού του κεφαλαίου, η συμπεριφορά μεταξύ των δυο παραπάνω μοντέλων είναι γενικώς παρόμοια ωστόσο το μοντέλο με το άγαλμα της Fanciulla φαίνεται να ανταποκρίνεται καλύτερα αφού είναι σε θέση να αναπαράγει πιο πιστά την πραγματική συμπεριφορά.

Γενικώς, οι μέγιστες τιμές στροφών ανά πείραμα είναι παρόμοιες στα δύο μοντέλα και πολύ κοντά στις πραγματικές, όμως το μοντέλο με τη πραγματική μορφή το αγάλματος φάνηκε να έχει πιο πολύ ευαισθησία από ότι το απλοποιητικό προσομοίωμα. Όπως φαίνεται σε αρκετές περιπτώσεις των πειραμάτων παραπάνω (π.χ. πείραμα 313, 319) το πρισματικό μοντέλο φαίνεται να μην ανταπροκρίνεται τόσο άμεσα στην ευαισθησία που παρουσίαζει το άγαλμα κατά το πέρας του λικνισμού του ή και κατά τη διάρκεια, όπως στο πείραμα 319 σε σημείο περί των 14 δευτερολέπτων (Σχήμα 3.7) που ενώ τα πειραματικά δεδομένα και το μοντέλο του αγάλματος τείνουν προς τον τερματισμό του λικνισμού, στο απλοποιητικό προσομοίωμα φαίνεται να αυξάνεται.

Αναφορικά με το υπολογιστικό κόστος των παραπάνω προσομοιώσεων, να αναφερθεί πως τα δύο αυτά μοντέλα εμφάνισαν πολύ κοντινούς υπολογιστικούς χρόνους και οι προσομοιώσεις δεν απείχαν πολύ μεταξύ τους. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο στη παρούσα εργασία επιλέγεται το μοντέλο του αγάλματος της Fanciulla έναντι του απλοιητικού μοντέλου λόγω του ότι εμφάνισε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα με καλύτερη ανταπόκριση στην ευαισθησία του πολύπλοκου και μη γραμμικού φαινομένου του λικνισμού.

Συνοψίζοντας, η παραπάνω πληροφορία η οποία εισήχθη στο μοντέλο με τη χρήση της ακριβούς γεωμετρίας φάνηκε να δίνει καλύτερα αποτελέσματα, με μικρή διαφορά στον υπολογιστικό χρόνο, δηλαδή το αναμενόμενο αποτέλεσμα δεδομένου του ότι η μορφή του αγάλματος δεν είναι εκείνη η πληροφορία η οποία θα έκανε την προσομοίωση πιο χρονοβόρα, σε αντίθεση με τη χρήση παραμορφώσιμου μοντέλου που η διαφορά ήταν σημαντική.

Ωστόσο, μπορεί γενικώς να ήταν αναμενόμενη η βελτίωση, σε κάποιο βαθμό, των αποτελεσμάτων με τη χρήση του ακριβούς αγάλματος, όμως εξήχθη μια πολύτιμη πληροφορία μέσω των παραπάνω συγκρίσεων, πως οι τιμές των αδρανειακών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών δεν αποτελεί αποκλειστικό παράγοντα για τη τελική συμπεριφορά του εκθέματος στα πλαίσια της προσομοίωσης, αλλά οι λεπτομέρειες στη μορφή του αγάλματος παίζουν σημαντικό ρόλο.

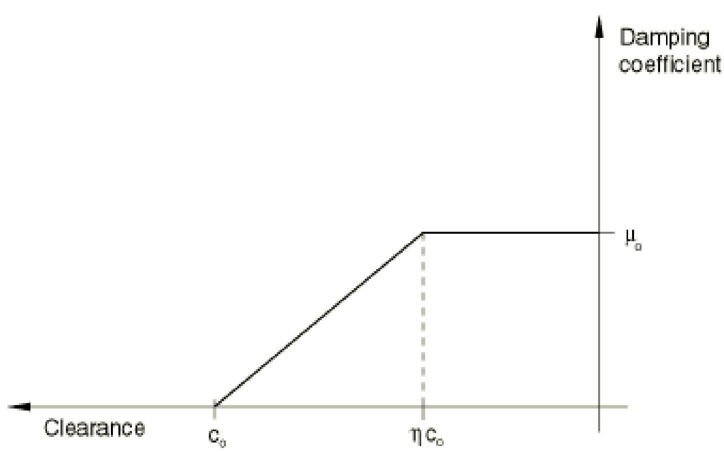
4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

4.1 Κατάλληλη μορφή απόσβεσης στο πλαίσιο της προσομοίωσης

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο ένα στερεό σώμα απελευθερώνει ενέργεια κατά τη διάρκεια της λικνιστικής του κίνησης είναι μέσω διαδοχικών κρούσεων με τη βάση έδρασης του. Μια τέτοια μοντελοποίηση στο λογισμικό Abaqus δεν είναι εφικτή επομένως θα πρέπει να δοκιμαστούν οι διαφορετικές μορφές απόσβεσης τις οποίες προσφέρει το συγκεκριμένο λογισμικό ώστε να ελεγχθεί εάν υπάρχει κάποια από αυτές η οποία να μπορεί να είναι σε θέση να αποσβένει την ενέργεια του μοντέλου με παρόμοιο τρόπο με εκείνο του αγάλματος.

Κατά τη δημιουργία της κατάλληλης επαφής του δοκιμίου με τη βάση έδρασης (ελεύθερα εδραζόμενο σώμα), ορίζεται και ο κατάλληλος τύπος της απόσβεσης. Οι επιλογές τις οποίες δίνει το πρόγραμμα σαν ορισμό της απόσβεσης είναι δύο, η επιλογή 'Damping Coefficient' και η επιλογή 'Critical Damping Fraction (Explicit Only)'.

Γενικά, στο λογισμικό Abaqus ο συντελεστής απόσβεσης είτε είναι μια συνάρτηση της επιφάνειας της οποίας έχει ορισθεί και αποτελεί μια αναλογική σταθερά μονάδας πίεσης διαιρεμένη με την ταχύτητα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα είτε ως ένα κλάσμα κρίσιμης απόσβεσης η οποία είναι αδιάστατη.



Σχήμα 4.1 Σχέση μεταξύ απόσβεσης και γεωμετρίας μοντέλου στο Abaqus

Κατά τη διάρκεια του πειράματος ο συντελεστής απόσβεσης θα παραμένει σε μία καθορισμένη τιμή όσο οι δύο επιφάνειες είναι σε επαφή, ενώ σε άλλη περίπτωση θα μηδενίζει. Για να ορισθεί η ιξώδης απόσβεση πρέπει να συμπεριληφθεί στον ορισμό της επαφής των δύο υπό εξέταση σωμάτων.

Αναφορικά με την επιλογή Critical Damping Fraction να τονισθεί πως ορίζεται ένας αδιάστατος συντελεστής απόσβεσης ο οποίος σχετίζεται με την δυσκαμψία της επαφής. Οι δυνάμεις απόσβεσης σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζονται βάση της σχέσης :

$$f_{vd} = \mu_0 \sqrt{4mk_c} u_{rel}^{el} \tag{4.1}$$

Όπου :

$m = κομβική\ μάζα$
$k_c = κομβική\ δυσκμαψία\ της\ επαφής$
$u_{rel}^{el} = ρυθμός\ σχετικής\ κίνησης\ μεταξύ\ επιφανειών$

Πάντως γενικά, στο Abaqus η κατάλληλη τιμή για τον συντελεστή απόσβεσης μιας επαφής εξαρτάται από το ίδιο το πρόβλημα και συνίσταται η μέθοδος ‘trial & error’ για τον καθορισμό της κατάλληλης προσομοίωσης.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η επιλογή της απόσβεσης Critical Damping ζ στα πλαίσια του λογισμικού αποτελεί πιο πιστή προσομοίωση για το φαινόμενο του λικνισμού. Ωστόσο σύμφωνα με τη μελέτη των M. Vassiliou, K. Mackie & B. Stojadinovic 2014 [14] προτείνεται ένας ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης c, συναρτήσει της μάζας, του μεγέθους και της λυγηρότητας και ίσος με:

$$c = 0.02 \left(\frac{a}{0.1}\right)^2 mg^{0.5} R^{1.5} \tag{4.2}$$

Ο παραπάνω συντελεστής ορίζεται ως ένας ισοδύναμος συντελεστής απώλειας ενέργειας ανά λικνιστικό κύκλο για έναν θεωρητικό στροφικό αποσβεστήρα. Ωστόσο θεωρήθηκε άξιο μελέτης σχετικά με το εάν θα μπορούσε και να λειτουργήσει και στα πλαίσια του παρόντος προσομοίωματος. Γνωρίζοντας όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά και αδρανειακά στοιχεία του υπό εξέταση αγάλματος ήταν εύκολος ο προσδιορισμός του αντίστοιχου ισοδύναμου συντελεστή απόσβεσης c ο οποίος υπολογίστηκε ίσος με 2.8%.

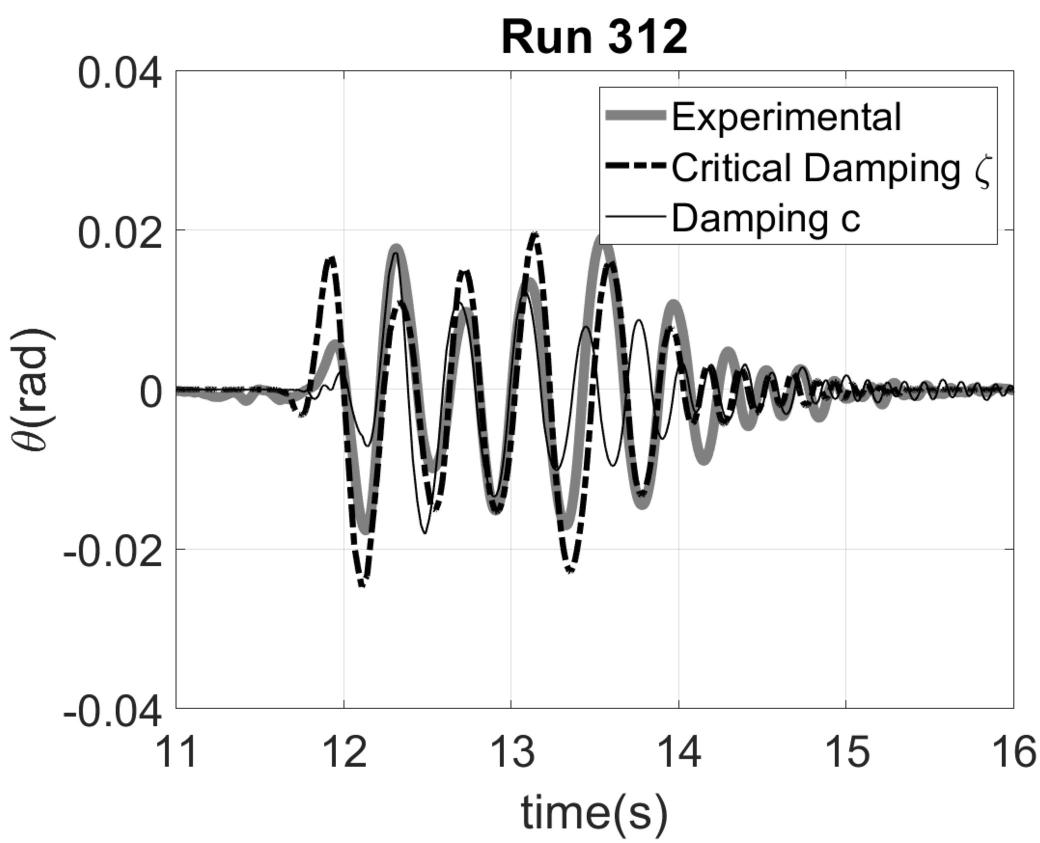
Επομένως, στα πειράματα των οποίων τα αποτελέσματα ακολουθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ ενός μοντέλου με τη χρήση της απόσβεσης Critical Damping ζ σε διάφορες τιμές και της απόσβεσης Damping με τιμή ίση με 2.8%. Πραγματοποιήθηκε μια σειρά από πειράματα λαμβάνοντας μια τιμή για τον συντελεστή τριβής και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ της χρήσης του συντελεστή απόσβεσης c στην παραπάνω τιμή και ένα εύρος τιμών για την ιξώδη απόσβεση ζ. Έπειτα αλλάζοντας την τιμή του συντελεστή τριβής πραγματοποιούνταν και πάλι οι παραπάνω συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων.

Τέλος, μετά που πραγματοποιήθηκαν όλες οι συγκρίσεις για κάθε πιθανή τιμή τριβής και απόσβεσης (αναφορικά με την ιξώδη απόσβεση αφού η τιμή του c ήταν σταθερή) είμασταν σε θέση να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα μέσω της σύγκλισής τους με εκείνα του πειραματικού σταδίου και αποφανθούμε σχετικά με το ποιο είδος απόσβεσης προσομοιάζει καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά.

4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

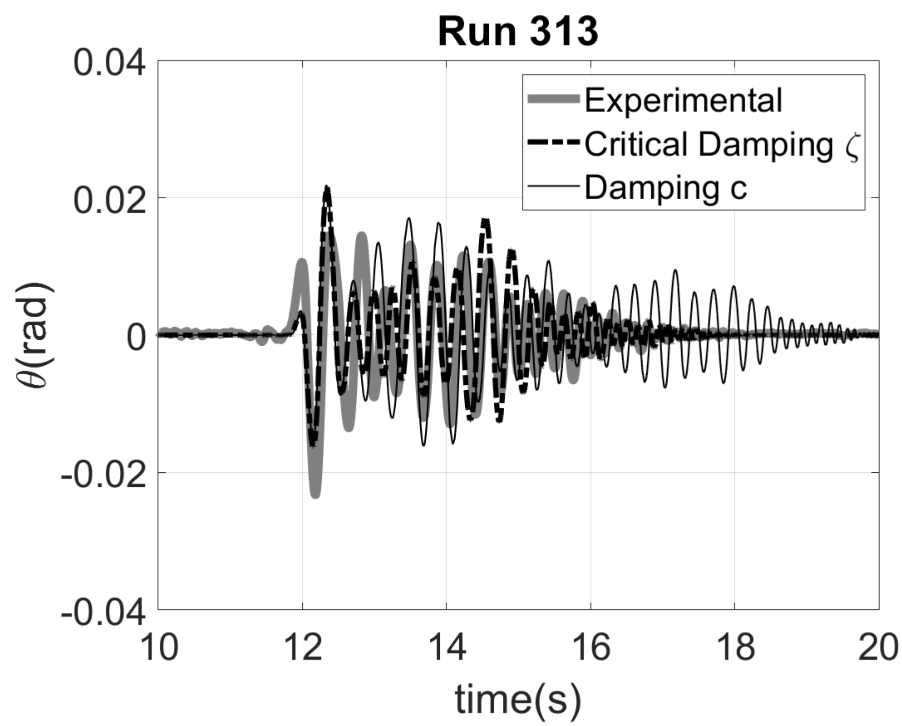
Και πάλι τα αποτελέσματα θα εμφανιστούν ανά πείραμα, συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με εκείνα τα οποία έδωσαν οι προσομοιώσεις με τους δύο διαφορετικούς τρόπους απόσβεσης του μοντέλου. Η ιξώδης απόσβεση αναφέρεται ως ‘Critical Damping’ καθώς έτσι ονομάζεται και η αντίστοιχη επιλογή στο πρόγραμμα Abaqus/CAE και αντίστοιχα το μοντέλο με τη χρήση του συντελεστή απόσβεσης c καλείται ‘Damping’.

- <u>Πείραμα 312 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)</u>



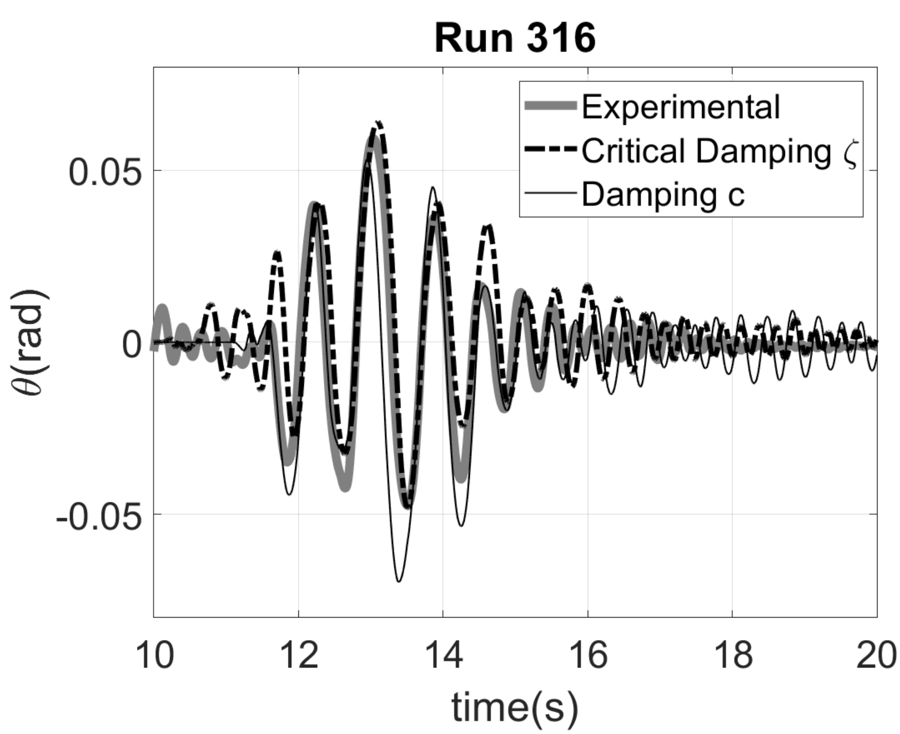
Σχήμα 4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό τρόπο απόσβεσης στο Abaqus, πάνω στο μοντέλο του αγάλματος Fanciulla

- <u>Πείραμα 313 (Φόρτιση στο 121% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)</u>



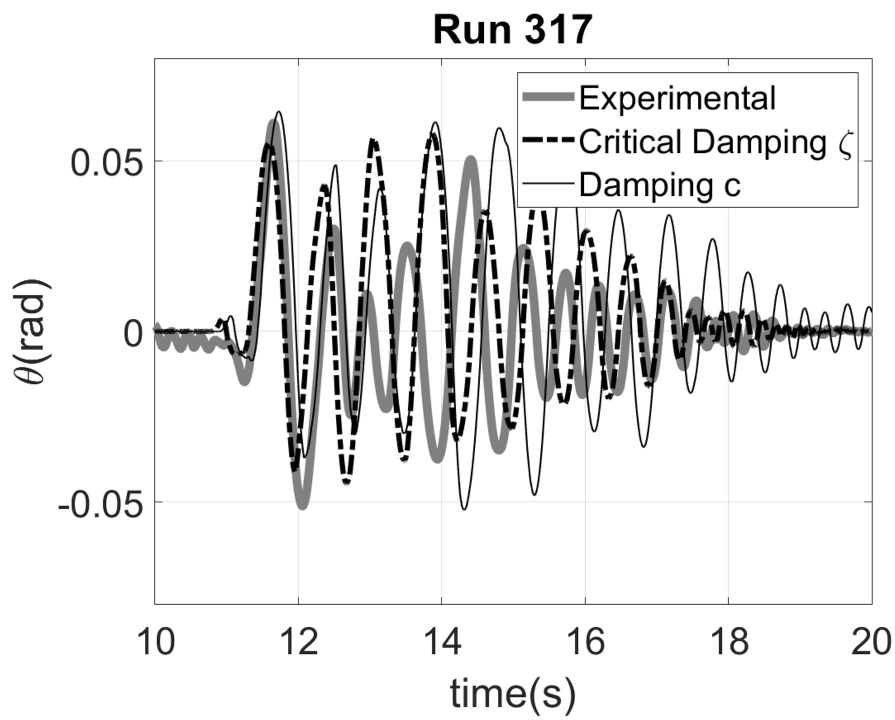
Σχήμα 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό τρόπο απόσβεσης στο Abaqus, πάνω στο μοντέλο του αγάλματος Fanciulla

- <u>Πείραμα 316 (Φόρτιση στο 140% του σεισμού Emilia μόνο κατά Y)</u>



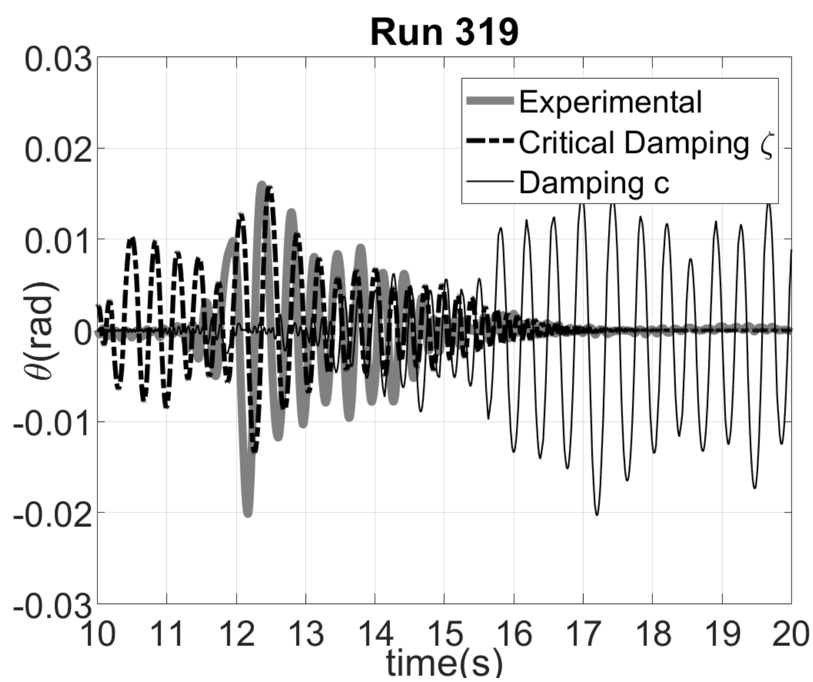
Σχήμα 4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό τρόπο απόσβεσης στο Abaqus, πάνω στο μοντέλο του αγάλματος Fanciulla

- <u>Πείραμα 317 (Φόρτιση στο 160% του σεισμού Emilia μόνο κατά Υ)</u>



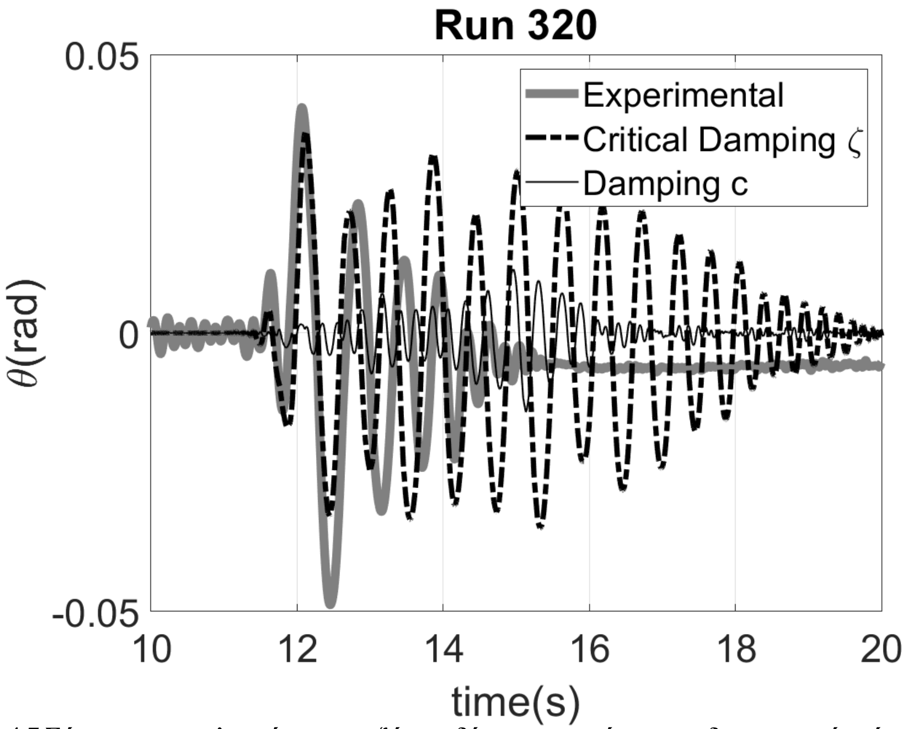
Σχήμα 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό τρόπο απόσβεσης στο Abaqus, πάνω στο μοντέλο του αγάλματος Fanciulla

- <u>Πείραμα 319 (Φόρτιση στο 76% του σεισμού Emilia μόνο κατά ΧΥ)</u>



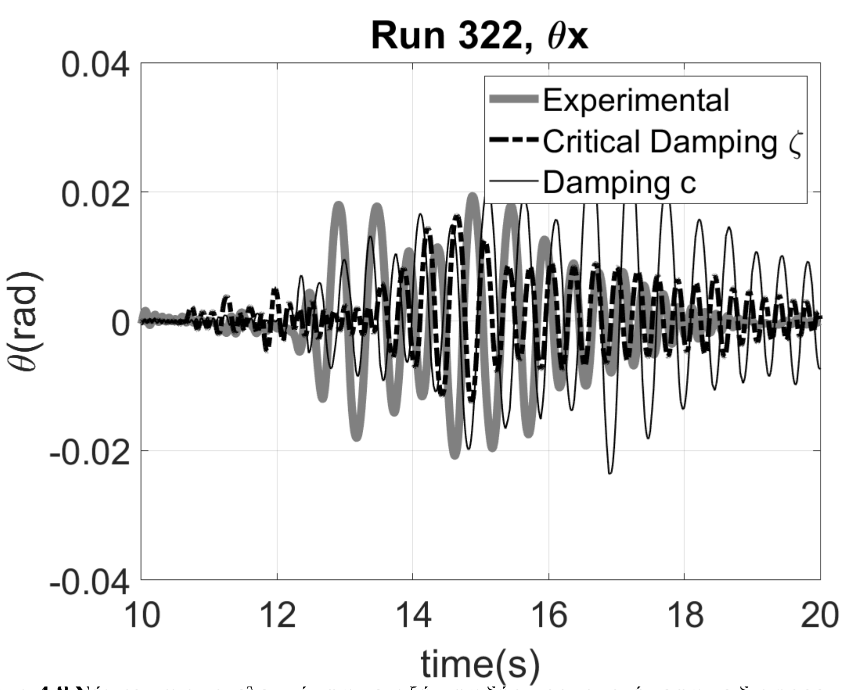
Σχήμα 4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό τρόπο απόσβεσης στο Abaqus, πάνω στο μοντέλο του αγάλματος Fanciulla

- Πείραμα 320 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia μόνο κατά XY)

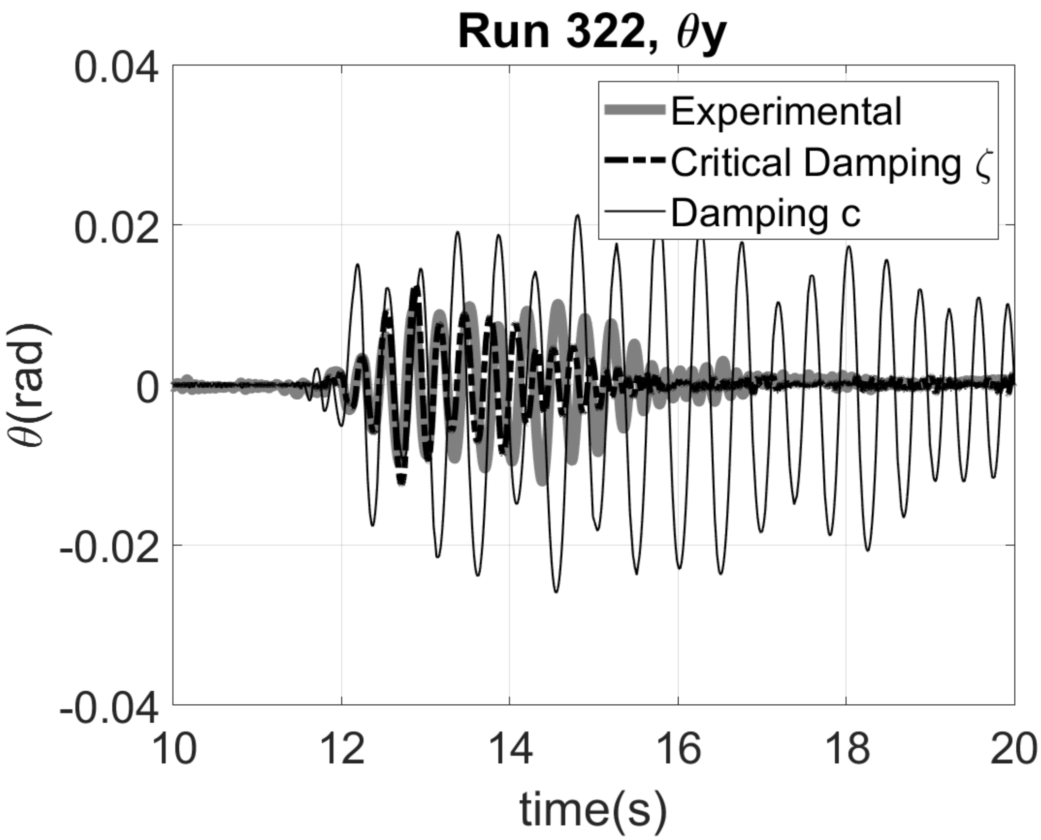


Σχήμα 4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό τρόπο απόσβεσης στο Abaqus, πάνω στο μοντέλο του αγάλματος Fanciulla

- Πείραμα 322 (Φόρτιση στο 76% του σεισμού Emilia μόνο κατά XYZ)



Σχήμα 4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό τρόπο απόσβεσης στο Abaqus, πάνω στο μοντέλο του αγάλματος Fanciulla στη μία διεύθυνση



Σχήμα 4.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό τρόπο απόσβεσης στο Abaqus, πάνω στο μοντέλο του αγάλματος Fanciulla στη δεύτερη διεύθυνση λικνισμού

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούν οι τιμές του συνδυασμού συντελεστή τριβής και ποσοστού απόσβεσης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω προσομοιώσεις. Σχετικά με την ιξώδη απόσβεση οι τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν είναι περί του 2% (έως 2.5%) ενώ για τον συντελεστή απόσβεσης c λήφθηκε τιμή ίση με 2.8% η οποία υπολογίστηκε με βάση τη σχέση 4.2. Αναφορικά με την τριβή έχει γίνει χρήση συντελεστή τριβής με τιμές περί του 0.55 με 0.60.

4.3 Συμπεράσματα

Μέσω των παραπάνω συγκρίσεων εύκολα προκύπτει η διαπίστωση πως μέσω της ιξώδους απόσβεσης ζ (critical damping) τα αποτελέσματα είναι αισθητά βελτιωμένα. Παρόλο που η χρήση του συντελεστή απόσβεσης c σε μερικές περιπτώσεις, ειδικά στα πρώτα χρονικά στάδια του πειράματος, φαίνεται να προσεγγίζει αρκετά καλά τα πειραματικά δεδομένα, όσο συνεχίζει το πείραμα τα αποτελέσματα αποκλίνουν όλο και περισσότερο. Η παραπάνω συμπεριφορά επεκτείνεται σε τέτοιο βαθμό όπου σε πολλά πειράματα, ενώ τα πειραματικά δεδομένα και το μοντέλο με τη χρήση ιξώδους απόσβεσης ζ έχουν πλήρως σβήσει το φαινόμενο του λικνισμού τους, το μοντέλο με τον συντελεστή απόσβεσης c συνεχίζει τον λικνισμό και μάλιστα σε παραδείγματα όπως στις περιπτώσεις πειραμάτων 319 και 322, φαίνεται να ανέρχεται σε μέγιστες τιμές με ολοένα και μεγαλύτερο πλάτος λικνισμού.

Πιο συγκεκριμένα, από τα πειράματα 312, 313, 317, 319 γίνεται εμφανές πως το μοντέλο με τη χρήση του συντελεστή απόσβεσης c εμφανίζει από μια μερικώς αποδεκτή συμπεριφορά (π.χ. στο πείραμα 313) έως μια αρκετά καλή σύγκλιση (π.χ. κατά το πείραμα 312) στα πρώτα στάδια κατά τα οποία το δοκίμιο αρχίζει να λικνίζεται. Η συμπεριφορά αυτή δεν συνεχίζεται και κατά την υπόλοιπη διάρκεια του πειράματος, μετά το πέρας των πρώτων διαδοχικών κρούσεων, το μοντέλο αυτό αρχίζει να αποκλίνει σε πολύ μεγάλο βαθμό και από τα πειραματικά αποτελέσματα και από τα αποτελέσματα του μοντέλου στο οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ιξώδης απόσβεση. Ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτής της συμπεριφοράς αποτελούν τα πειράματα 313 και 319 (Σχήματα 4.2, 4.5) κατά τα οποία η συμπεριφορά αυτού του είδους προσομοίωσης δεν παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα μέχρι περίπου τη χρονική στιγμή των 15.5-16 δευτερολέπτων όμως μετά η εικόνα χαλάει απότομα και τα αποτελέσματα αποκλίνουν σημαντικά.

Στην περίπτωση του πειράματος 316 (Σχήμα 4.3) η εικόνα εμφανίζεται σαφώς βελτιωμένη και παρατηρούμε πως τα 2 μοντέλα δίνουν πολύ κοντινά αποτελέσματα και μάλιστα αρκετά κοντά και στα πειραματικά, ωστόσο και σε αυτήν την περίπτωση η προσομοίωση του ίδιου μοντέλου υπό την ίδια διέγερση αλλά με τη χρήση ιξώδους απόσβεσης ζ εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα.

Τέλος, κατά το πείραμα 322 για το οποίο εμφανίζονται τα αποτελέσματα και για τις δύο πιθανές διευθύνσεις λικνισμού (Σχήματα 4.7, 4.8) παρατηρούμε πως αναφορικά με το γράφημα της στροφής κατά X (Σχήμα 4.7) η συμπεριφορά είναι παρόμοια με εκείνη που περιγράφηκε παραπάνω. Τα τρία γραφήματα έχουν παρόμοια συμπεριφορά με συνεχώς αυξανόμενο πλάτος λικνισμού μέχρι περίπου τη χρονική στιγμή των 14,5 δευτερολέπτων, κατά τη μέση δηλαδή του φαινομένου, από όπου τα πειραματικά δεδομένα και το μοντέλο με τη χρήση ιξώδους απόσβεσης αρχίζουν να σβήνουν την λικνιστική τους συμπεριφορά ενώ, εν αντιθέσει, το μοντέλο με τη χρήση της απόσβεσης c συνεχίζει και αυξάνει συνεχώς το πλάτος του λικνισμού του οδηγώντας σε πολύ υψηλές τιμές έως και 2 φορές της μέγιστης στροφής την οποία εμφάνισε το δοκίμιο κατά το πείραμα.

Επομένως, συνολικά οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως το μοντέλο με τη χρήση του συντελεστή απόσβεσης c δεν είναι σε θέση να προσομοιώσει σε ικανοποιητικό βαθμό τη συμπεριφορά του παρόντος πλήρως άκαμπτου ελεύθερα εδραζόμενου μοντέλου του αγάλματος Fanciulla έναντι λικνισμού.

Με βάση τη πραγματική φύση του προβλήματος του λικνισμού η ακριβής του προσομοίωση στο πλαίσιο του λογισμικού Abaqus/CAE καθώς και τον περισσότερων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων της αγοράς καθίσταται αδύνατη. Ο λόγος είναι πως στην πραγματικότητα η απώλεια ενέργειας κατά τη διάρκεια του λικνισμού μέχρι την εν τέλει ανατροπή του ή ισορροπία του στην αρχική θέση, πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών αλλεπάλληλων κρούσεων της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου με τη βάση έδρασής του. Μια τέτοια επιλογή απώλειας ενέργειας ή ισοδύναμης απόσβεσης μέσω κρούσεων δεν είναι δυνατή μέσω των εμπορικών λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων καθώς κατά την πλειοψηφία τους δεν έχουν σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του λικνισμού.

Επομένως, έχοντας αυτό σαν δεδομένο, έγινε προσπάθεια να διαπιστωθεί το ποια μορφή απόσβεσης είναι εκείνη η οποία μπορεί να προσομοιάσει καλύτερα την απώλεια ενέργειας η οποία συμβαίνει κατά τη διάρκεια αυτού του φαινομένου. Επίσης, εκτός τη μορφή της απόσβεσης έπρεπε να οριστεί και ένα κατάλληλο και αξιόπιστο εύρος τιμών της εκάστοτε απόσβεσης με βάση την οποία το μοντέλο θα συμπεριφερόταν πολύ κοντά στην πραγματική συμπεριφορά του αγάλματος κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αναφορικά με τον συντελεστή απόσβεσης c, υπολογίστηκε με βάση τη σχέση που αναφέρθηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου και βρέθηκε ίσος με 2,8 % ωστόσο αυτή η τιμή μετά από πολλά πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό Abaqus, δεν φάνηκε να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, με βάση τις παραμέτρους οι οποίες έχουν ληφθεί για την συγκεκριμένη προσομοίωση και πάντα με βάση το συγκεκριμένο δοκίμιο.

Εν αντιθέσει, με τη χρήση της ιξώδους απόσβεσης ζ, το μοντέλο γενικώς φαίνεται να μπορεί να αναπαράγει μια πολύ πιστή και αντιπροσωπευτική εικόνα της πραγματικότητας. Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες στροφές οι οποίες εμφανίζει, ο αριθμός των κρούσεων καθώς και το ποια χρονική στιγμή ξεκινάει να λικνίζεται το μοντέλο και ποια ξεκινάει να φθίνει, έως ότου σταματήσει τελείως, φαίνεται να είναι πολύ κοντινά σε σχέση με το πραγματικό πείραμα του αγάλματος.

Τελικά, με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, όπου κατά κύριο λόγο η μελέτη μιας λικνιστικής συμπεριφοράς ενός στερεού σώματος ελεύθερα εδραζόμενου στο πλαίσιο του Abaqus/CAE προσομοιάζεται με τη χρήση ιξώδους απόσβεσης ζ, έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται να είναι σε θέση να δώσει αισθητά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την άλλης μορφής απόσβεση, αλλά και να παράξει αποτελέσματα πολύ κοντινά ακόμα και σε εκείνα του πραγματικού αγάλματος, υπό σεισμική φόρτιση (υπαρκτού σεισμού το 2012 στην περιοχή Emilia Romagna) υπό πραγματικές πειραματικές συνθήκες. Ασφαλώς κάτι τέτοιο, αναφερόμενοι σε ένα τόσο πολύπλοκο πρόβλημα όπως εκείνο του λικνισμού το οποίο εκ φύσεώς του χαρακτηρίζεται από μη γραμμική συμπεριφορά, αποτελεί σημαντικό βήμα για την εν τέλει μελλοντική κατάλληλη προσομοίωση η οποία θα είναι σε θέση είτε να «προβλέψει» με ακρίβεια την τη συμπεριφορά του εκάστοτε δοκιμίου είτε να μπορεί να δίνει μια γενική ποιοτική και σαφή εικόνα μέγιστων στροφών, διάρκεια λικνισμου κλπ ώστε ο μηχανικός να είναι σε θέση να προστατέψει κατάλληλα τα μουσειακά εκθέματα.

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

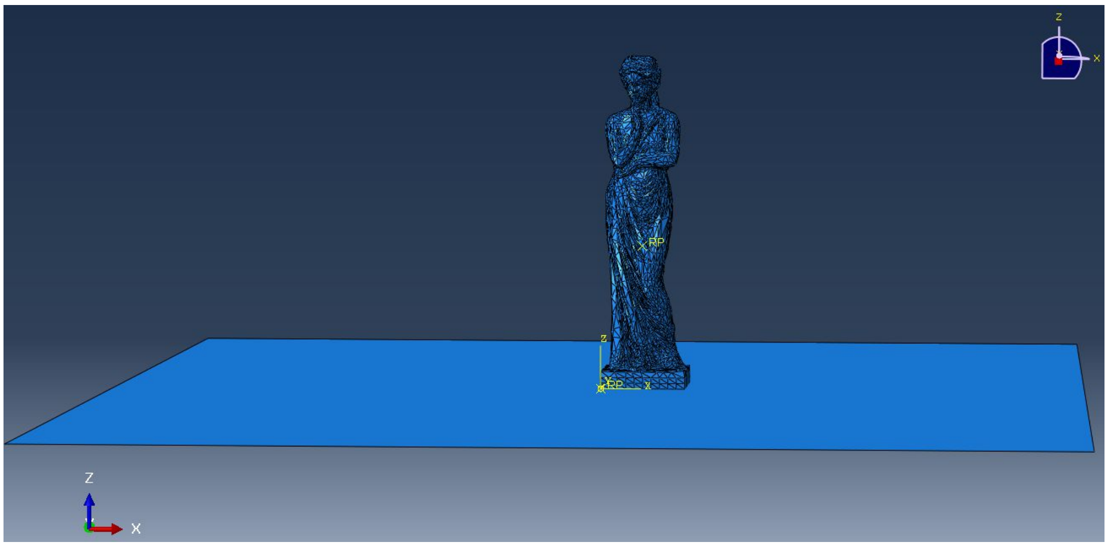
5.1 Περιγραφή τελικού μοντέλου

Επομένως, πλέον είμαστε σε θέση να συνθέσουμε το τελικό μοντέλο με βάση το οποίο θα πραγματοποιηθούν οι συγκρίσεις ανάμεσα στη προσομοίωση του λογισμικού Abaqus και στα πειραματικά δεδομένα του προγράμματος SERA/SEREME λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων της μελέτης. Αρχικά, ως κατάλληλος τύπος μοντέλου στα πλαίσια της προσομοίωσης λαμβάνεται το πλήρως άκαμπτο (rigid) μοντέλο αφού όπως έγινε γνωστό ήδη από το δεύτερο κεφάλαιο είναι σε θέση να αναπαράγει αντίστοιχης ακρίβειας αποτελέσματα με δραματική μείωση στον υπολογιστικό χρόνο.

Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως εκτός από το εύκαμπτο παραμορφώσιμο μοντέλο με τη χρήση απλοποιητικής γεωμετρίας το οποίο παρουσιάστηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας, κατασκευάστηκε και άλλο ένα εύκαμπτο παραμορφώσιμο μοντέλο με τη χρήση της ακριβούς μορφής του αγάλματος της Fanciulla. Μετά τις συγκρίσεις του τρίτου κεφαλαίου και την διαπίστωση πως το μοντέλο της Fanciulla είναι σε θέση να δώσει αρκετά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το αντίστοιχο πριματικό μοντέλο, έπρεπε να ελεγχθεί το πόσο καλά αποτελέσματα θα είναι σε θέση να δώσει ένα εύκαμπτο παραμορφώσιμο μοντέλο αλλά με τη χρήση της πραγματικής γεωμετρίας του μουσειακού εκθέματος. Όμως το μοντέλο δεν έφτασε σε σημείο να παράξει κάποια αποτελεσμάτα τα οποία να εμφανιστούν στη παρούσα εργασία λόγω του ότι ο υπολογιστικός χρόνος εν τέλει ήταν τόσο πολύ δραματικά αυξημένος σε σχέση με το άλλο εύκαμπτο παραμορφώσιμο μοντέλο, όπου δεν πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω πειράματα στο συγκεκριμένο μοντέλο. Τονίζεται ωστόσο άξιο μελλοντικής έρευνας και μελέτης η χρήση ενός τέτοιου μοντέλου το οποίο με την τόση αυξημένη πληροφορία η οποία το διέπει, εάν θα είναι σε θέση να δώσει ακόμα πιο ακριβή αποτελέσματα. Για την επίτευξη ενός τέτοιο εγχειρήματος βέβαια κρίνεται βοηθητικό το να παρέχεται στο χρήστη κάποιο σύστημα αυξημένης υπολογιστικής ισχύος λόγω του όπως προαναφέρθηκε ο υπολογιστικός χρόνος με τη χρήση ατομικού υπολογιστή κρίθηκε απαγορευτικός.

Έχοντας πλέον δεδομένη τη χρήση ενός πλήρως δύσκαμπτου μοντέλου έπρεπε να γίνει η κατάλληλη επιλογή για τη γεωμετρία και τη μορφή του μοντέλου στα πλαίσια της προσομοίωσης, αντικείμενο το οποίο σύμφωνα με το τρίτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας η επίλογη του αγάλματος της Fanciulla αποτελεί σαφώς καλύτερη επιλογή λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως λόγω του προγράμματος SERA/SEREME είμασταν σε θέση να έχουμε το αρχείο σε CAD την πραγματική μορφή του αγάλματος μέσω τρισδιάστατου σαρωτή. Στις περισσότερες των περιπτώσεων όπου κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, ένα αντίστοιχο πρισματικό μοντέλο, όσο πιο πιστής απεικόνισης του αγάλματος γίνεται, με τα κατάλληλα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά, θα είναι σε θέση να δώσει αρκετά καλά αποτελέσματα ωστόσο θα χάνει σημαντικό τμήμα της πληροφορίας της πραγματικής του συμπεριφοράς.

Τέλος, ως τελευταία παραμετρική διερεύνηση αποτελούσε η κατάλληλη μορφή του τύπου της απόσβεσης με βάση την οποία η προσομοίωση θα ήταν σε θέση να αναπαράγει καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά του δοκιμίου δεδομένου, του όπως έχει προαναφερθεί, η απώλεια ενέργειας μέσω διαδοχικών αλλεπάλληλων κρούσεων δεν αποτελεί επιλογή. Η επιλογή ήταν ανάμεσα στη χρήση μιας αντίστοιχης ιξώδους απόσβεσης ζ (critical damping) ή στη χρήση ενός συντελεστή τριβής c (damping). Στα πλαίσια της καλύτερης και πιο πιστής προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων και με τους δύο διαφορετικούς τύπους απόσβεσης χρησιμοποιώντας στο καθένα διαφορετικές τιμές τριβής και με βάση τα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάστηκαν στο 4.3, έγινε η διαπίστωση πως η χρήση ιξώδους απόσβεσης θεωρείται ορθότερος τρόπος προσομοίωσης και με βάση τη βιβλιογραφία αλλά και με βάση τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τη παρούσα μελέτη στο άγαλμα της Fanciulla.



Σχήμα 5.1 Προσομοίωση αγάλματος Fanciulla στα πλαίσια του λογισμικού Abaqus/CAE μέσω πλήρως δύσκαμπτου (rigid) μοντέλου

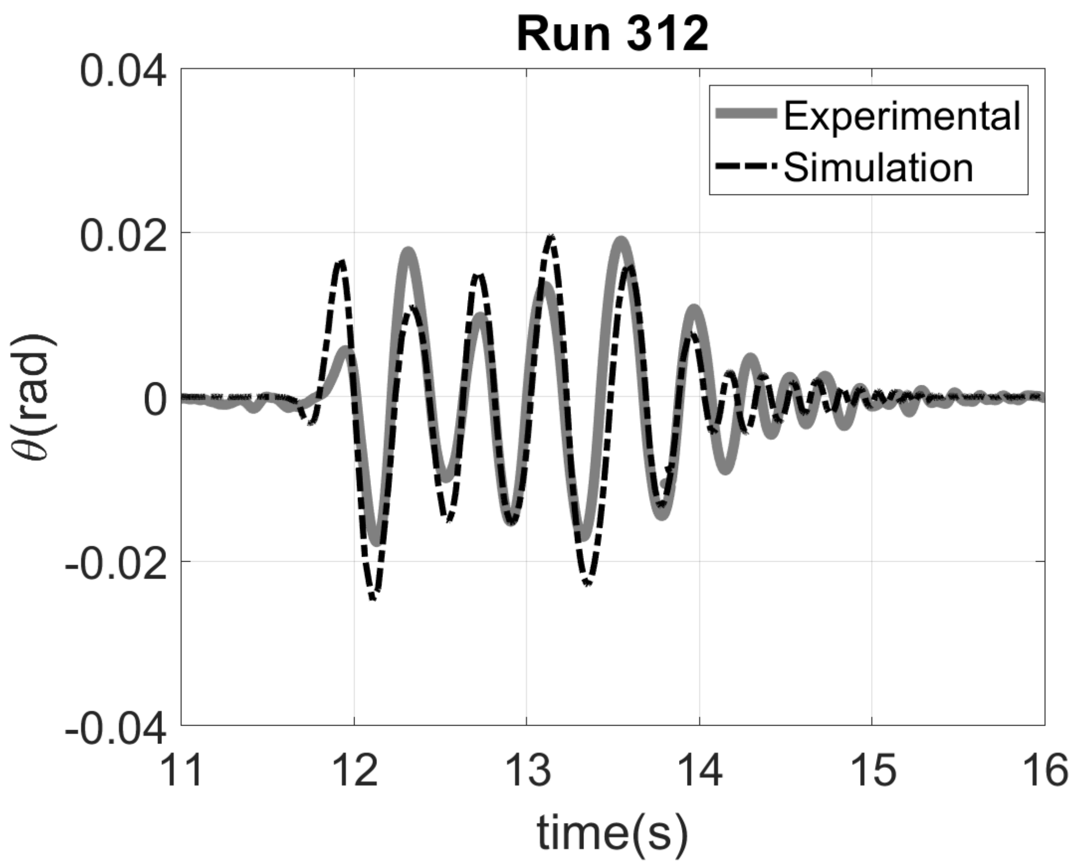
Γνωρίζοντας πλέον τις ορθότερες παραμέτρους με βάσει τις οποίες ορίζεται καλύτερα το πλαίσιο της προσομοίωσης του αγάλματος της παρούσας μελέτης σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα , είμαστε πλέον σε θέση να διαπιστώσουμε τα τελικά αποτελέσματα σε σχέση με εκείνα τα οποία έδωσε το πραγματικό άγαλμα στη σειρά πειραματικών μετρήσεων η οποία έχει πραγματοποιηθεί.

Τελικά το μοντέλο του αγάλματος Fanciulla το οποίο μορφώθηκε με τη θεώρηση πλήρους δυσκαμψίας και με τη χρήση ιξώδους απόσβεσης ζ είναι εκείνο το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Στο μοντέλο αυτό και πάλι έγινε μια σειρά δοκιμών με διαφορετικές τιμές και είδη τριβής καθώς και μέγεθος και είδος πεπερασμένων στοιχείων. Πλήρης περιγραφή της κατασκευής του μοντέλου παρουσιάζεται στο παράρτημα στο οποίο ακολουθεί στις τελευταίες σελίδες της παρούσας εργασίας.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά πείραμα και η σύγκριση της συμπεριφοράς της κάθε διέγερσης σε σχέση με την πραγματικότητα ακολουθεί παρακάτω.

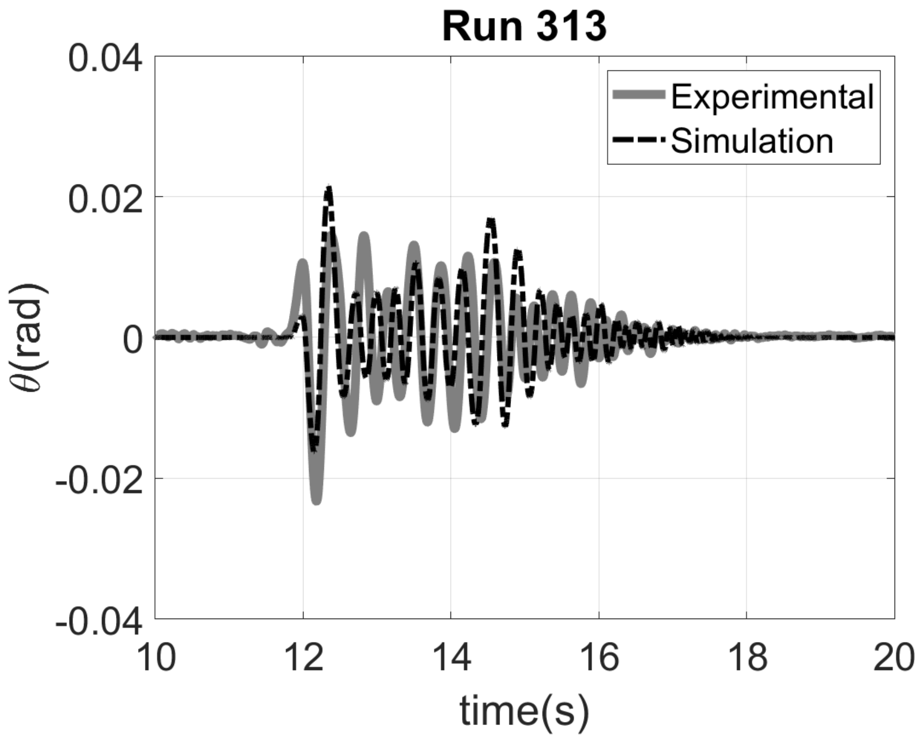
5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

- Πείραμα 312 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)



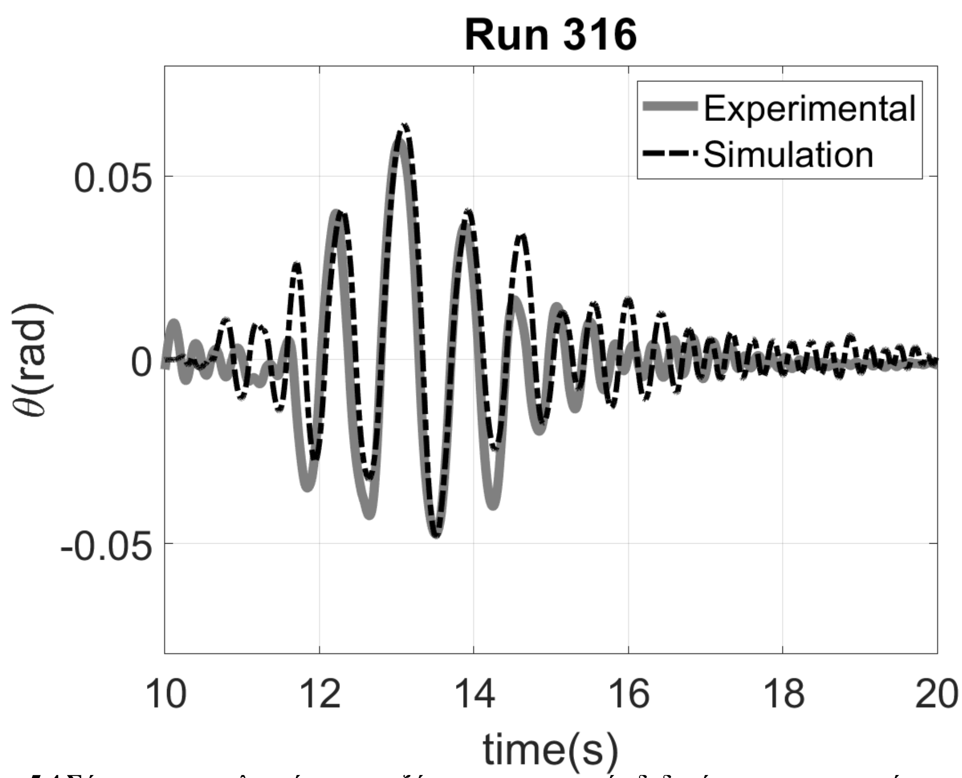
Σχήμα 5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

- Πείραμα 313 (Φόρτιση στο 121% του σεισμού Emilia μόνο κατά X)



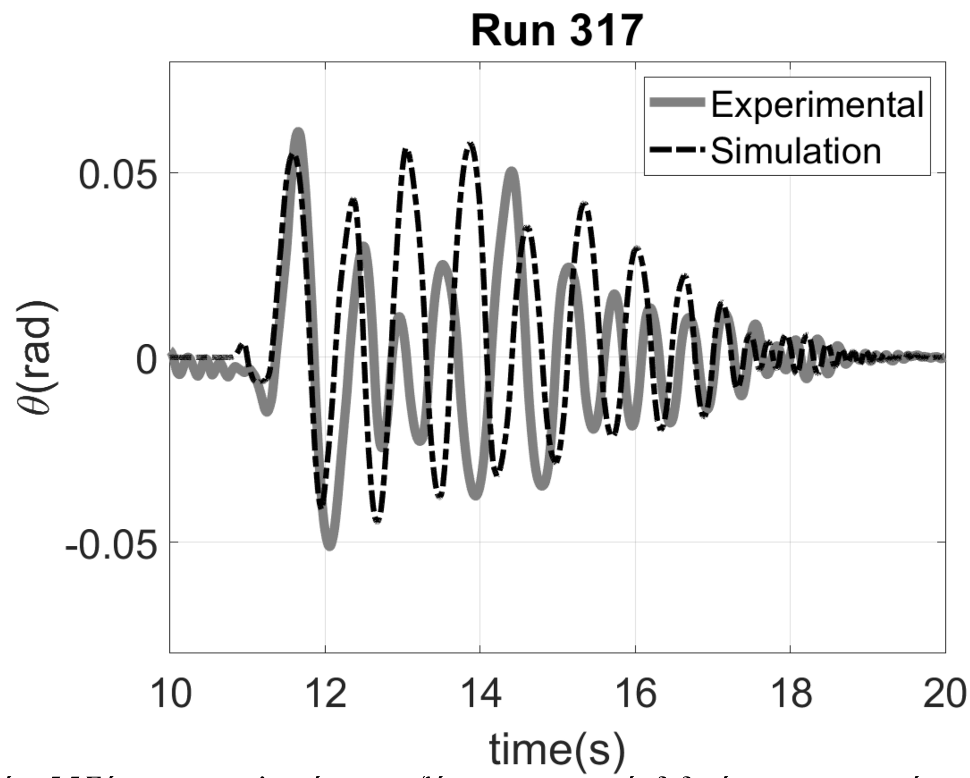
Σχήμα 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

- <u>Πείραμα 316 (Φόρτιση στο 140% του σεισμού Emilia μόνο κατά Υ)</u>



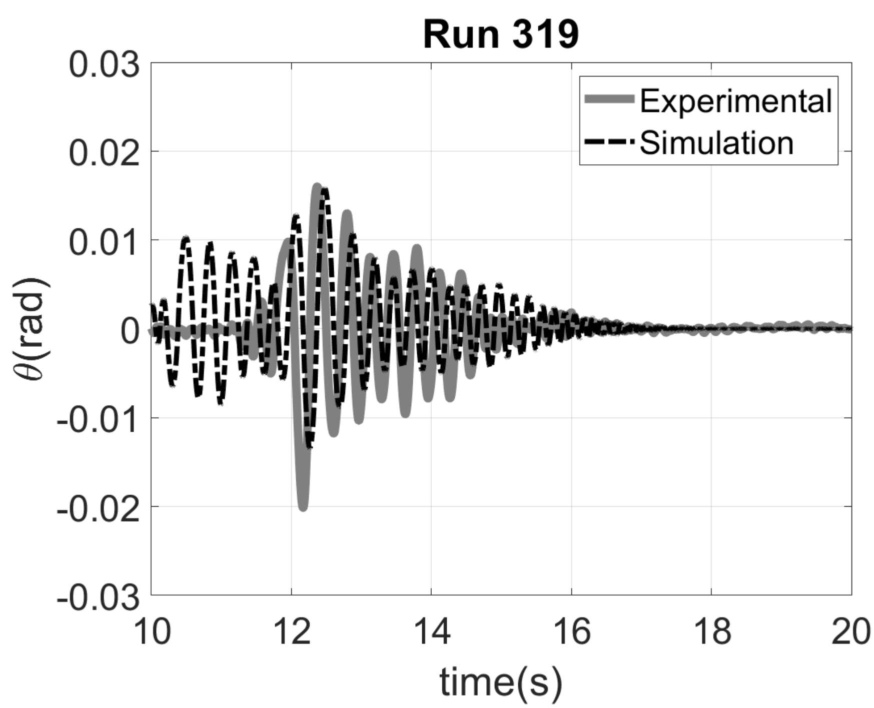
Σχήμα 5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

- <u>Πείραμα 317 (Φόρτιση στο 160% του σεισμού Emilia μόνο κατά Y)</u>



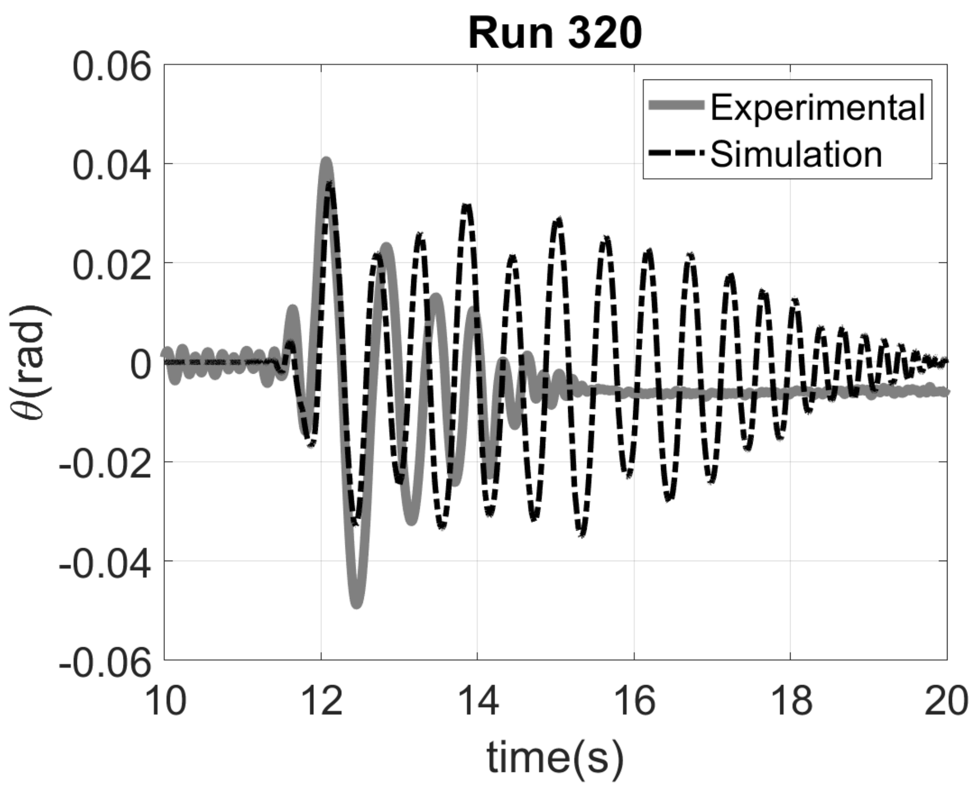
Σχήμα 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

- <u>Πείραμα 319 (Φόρτιση στο 76% του σεισμού Emilia μόνο κατά XY)</u>



Σχήμα 5.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

- <u>Πείραμα 320 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia μόνο κατά XY)</u>

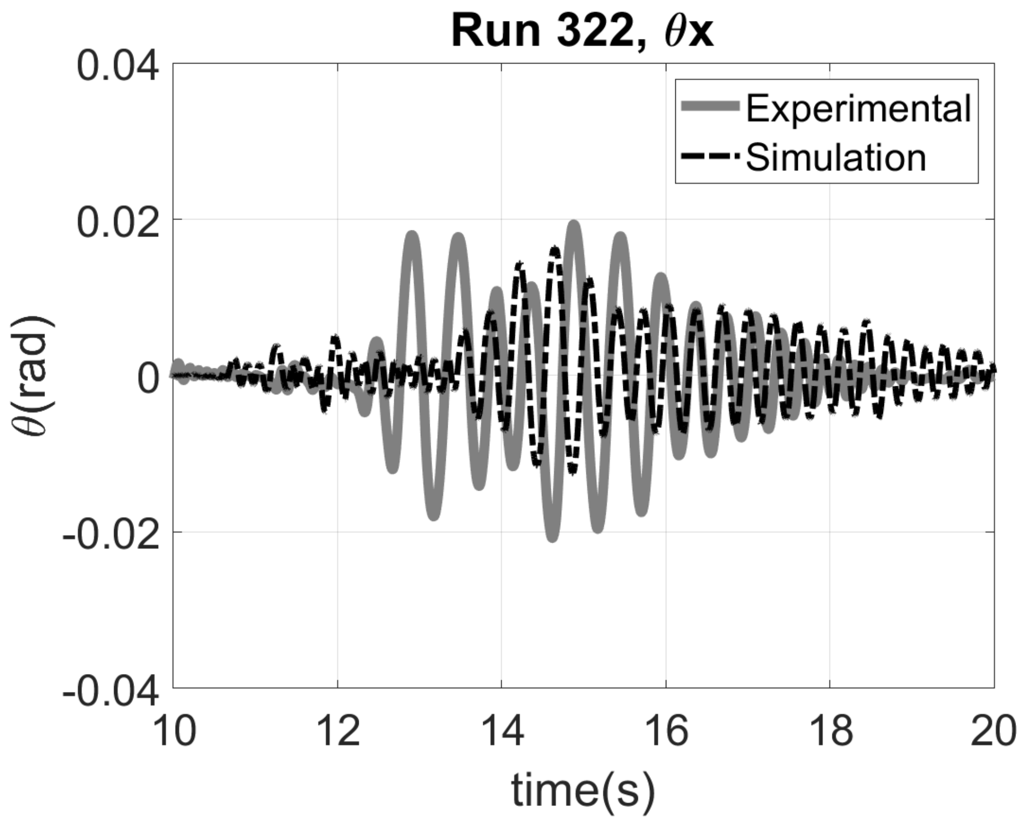


Σχήμα 5.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

- <u>Πείραμα 322 (Φόρτιση στο 76% του σεισμού Emilia μόνο κατά XYZ)</u>

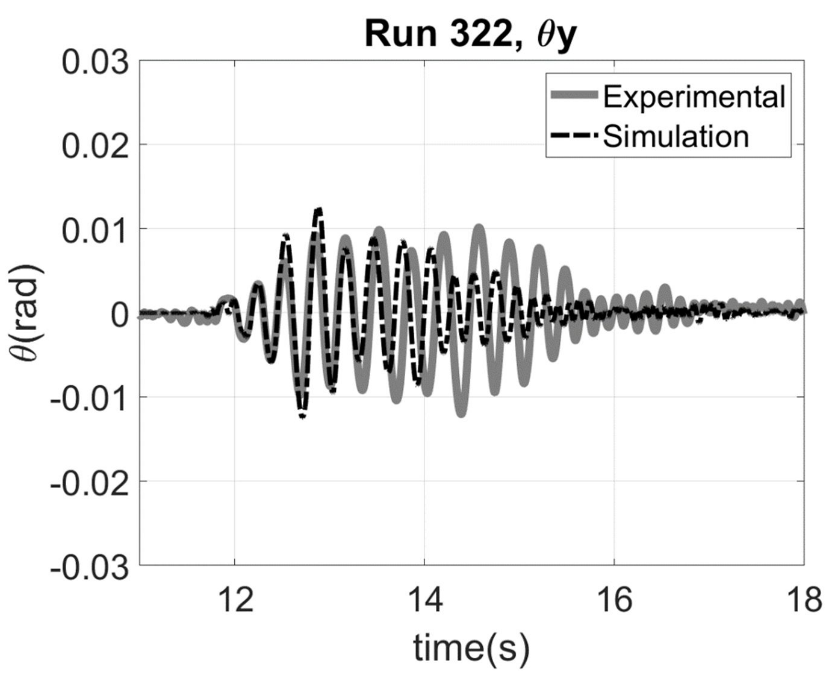
Και πάλι, δεδομένου του ότι το πείραμα 322 διενεργείται και στις 3 διευθύνσεις, η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί και στις δυο πιθανές διευθύνσεις λικνισμού.

Στην πρώτη :



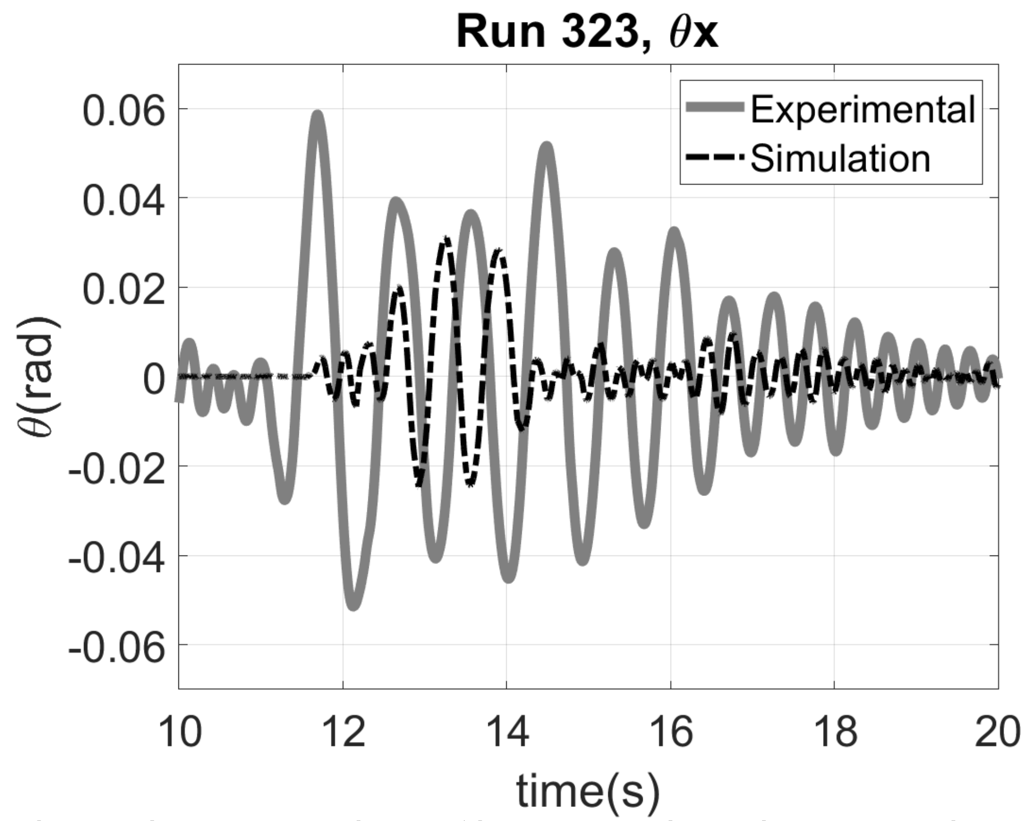
Σχήμα 5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

αντίστοιχα στη δεύτερη :

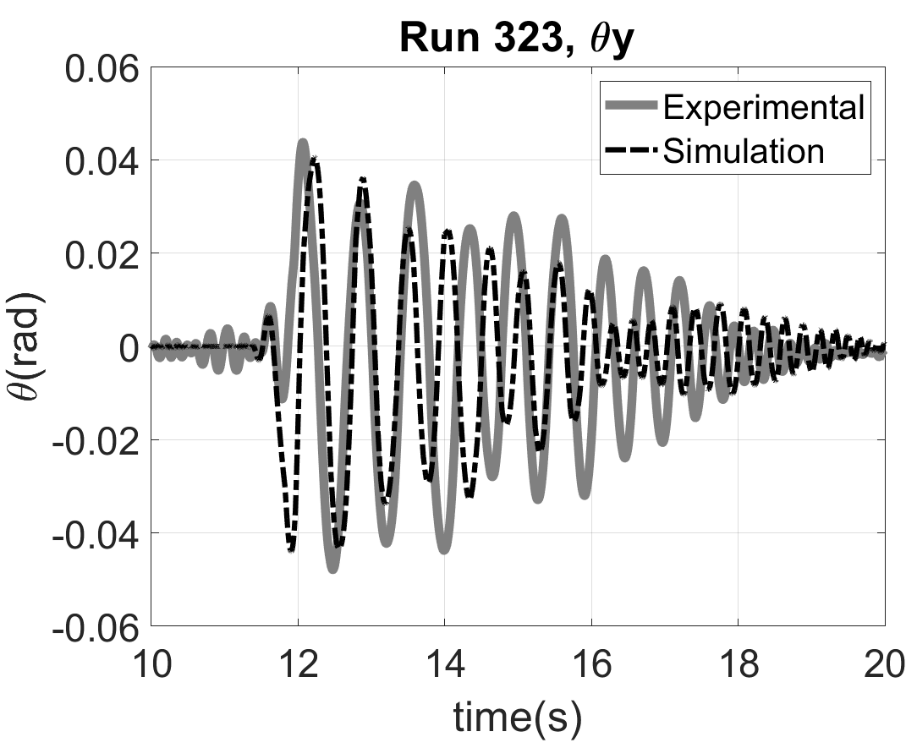


Σχήμα 5.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

- <u>Πείραμα 323 (Φόρτιση στο 106% του σεισμού Emilia μόνο κατά XYZ)</u>



Σχήμα 5.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus



Σχήμα 5.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και προσομοίωσης στο Abaqus

5.3 Συμπεράσματα

Αξιολογώντας τις παραπάνω συγκρίσεις είμαστε σε θέση να έχουμε μια εικόνα σχετικά με την αξιοπιστία του τελικού μοντέλου σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Προκύπτει ότι τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση είναι ικανά να δώσουν μια πιστή και αντιπροσωπευτική εικόνα των πειραμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη ασφαλώς την πολυπλοκότητα του φαινομένου του λικνισμού καθώς και την δυσκολία προσομοίωσης τόσων πολλών πειραμάτων τα οποία διενεργήθηκαν σε πραγματικό άγαλμα υπό σεισμική φόρτιση. Εκτός από την ίδια πολυπλοκότητα του φαινομένου και τη δυσκολία λόγω πραγματικών συνθηκών, λαμβάνεται υπόψη, επίσης, και η όποια απόκλιση λόγω πειραματικών ή μηχανικών αβεβαιοτήτων.

Σαν γενική εικόνα πάραυτα εξάγεται η παρατήρηση πως το μοντέλο στο Abaqus/CAE είναι σε θέση να δώσει ικανά και αξιόπιστα αποτελέσματα και να αναπαράγει μια εικόνα της πραγματικής συμπεριφοράς των πειραμάτων. Σε αυτό το σημείο να τονισθεί πως εκτός από τη σύγκριση διαμέσου των παραπάνω γραφημάτων από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, έχει πραγματοποιηθεί και οπτική σύγκριση δεδομένου του ότι υπάρχει μαγνητοσκοπημένο υλικό από όλα τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του SERA/SEREME και επίσης το λογισμικό Abaqus μας δίνει τη δυνατότητα της οπτικής παρακολούθησης του δοκιμίου έτσι ώστε να διαπιστωθούν συμπεριφορές όπως περιστροφή του αγάλματος (στροφή περί των άξονα καθ'ύψος του αγάλματος), ολίσθηση ή αναπήδηση.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε κατά το πείραμα 312 πως το μοντέλο το οποίο μορφώθηκε είναι ικανό να έρθει πολύ κοντά στη πραγματική συμπεριφορά του αγάλματος καθώς παρατηρείται ταυτόχρονη έναρξη και λήψη του λικνισμού και κατά τη διάρκεια μπορεί να φανεί και γραφικά πως ο αριθμός των κρούσεων καθώς και οι μέγιστες τιμές στροφής έρχονται σε συμφωνία με εκείνα του πειράματος.

Αντίστοιχη εικόνα παρατηρείται και στο πείραμα 313 , πρόκειται για μια πιστή προσομοίωση η οποία είναι σε θέση να αναπαράγει τη συμπεριφορά του δοκιμίου, ακόμα και να υπολογίσει με πλέον ικανοποιητική ακρίβεια τις μέγιστες τιμές τις οποίες θα ανέπτυσσε το παρόν άγαλμα κατά τη διέγερση του υπό την συγκεκριμένη φόρτιση (περί των 0,02 ακτινίων) καθώς επίσης και να σταματήσει τον λικνισμό του στα περίπου 17 δευτερόλεπτα όπως και στη πραγματικότητα με παρόμοιο ρυθμό απόσβεσης των κρούσεων. Επίσης, ο αριθμός των κρούσεων, σαφώς αυξημένος σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα αποτελεί συμπεριφορά την οποία το μοντέλο προσομοίωσης κατάφερε επίσης να αναπαράξει, κάνοντάς το έτσι ένα επιτυχημένο μοντέλο στα πλαίσια της παρούσας σύγκρισης.

Επομένως παρατηρούμε πως και στις δύο διεγέρσεις οι οποίες ασκούνται κατά τη διεύθυνση X του αγάλματος το Abaqus δίνει ακριβή αποτελέσματα για τη συμπεριφορά του δοκιμίου και φαίνεται να μπορεί να «προβλέψει» τη λικνιστική συμπεριφορά πραγματικών συνθηκών με ένα μικρού υπολογιστικού κόστους και χρόνου, πλήρως δύσκαμπτο μοντέλο.

Ίδια διαπίστωση παρατηρείται και κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων κατά τα οποία η φόρτιση στη διάρκεια του πραγματικού πειράματος ασκήθηκε κυρίως κατά τη διεύθυνση Y, δηλαδή για τα πειράματα 316 και 317 της μελέτης.

Κατά το πείραμα 316 μπορεί να γίνει εμφανές πως το μοντέλο καταφέρνει να ακολουθήσει και πάλι την έναρξη του λικνισμού, τις μέγιστες στροφές τις οποίες εμφανίζει το δοκίμιο καθώς και τον αριθμό των impacts τα οποία εμφανίζει σε όλη τη διάρκεια του πειράματος, κλείνοντας, από τη χρονική στιγμή των 16 με 17 δευτερολέπτων παρατηρείται ένας μικρός «θόρυβος» στο μοντέλο της προσομοίωσης. Αυτό δεν παρατηρείται στη περίπτωση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που απλά σβήνει, ωστόσο συμβαίνει σε τόσο μικρό βαθμό όπου η ύπαρξή του κρίνεται ως λεπτομέρεια (περί των 0.002 ακτινίων).

Και στη συμπεριφορά του πειράματος 317 η κατάσταση φαίνεται αισιόδοξη αφού αναφερόμαστε σε ένα μοντέλο το οποίο χωρίς να έχει εικόνα απόλυτης ταύτισης με τα αποτελέσματα, ωστόσο και πάλι καταφέρνει να δώσει τις απαραίτητες πληροφορίες για τις οποίες έχει δημιουργηθεί. Η επιτυχία του μοντέλου κρίνεται στο γεγονός πως έχοντας ένα υπό εξέταση πραγματικό άγαλμα και κάποιους υπαρκτούς σεισμούς σχεδιασμού, θα είμαστε σε θέση, μορφώνοντας ένα απλό μοντέλο, ελάχιστου υπολογιστικού χρόνου, σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, να γνωρίζουμε τα κυριότερα στοιχεία της λικνιστικής του συμπεριφοράς και το εάν, εν τέλει κινδυνεύει ή όχι, μέσα σε ελάχιστο χρονικό διάστημα.

Σε αυτό το στάδιο αυξάνεται η δυσκολία του προβλήματος περνώντας στα πειράματα 319 και 320, όπου πλέον κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η διέγερση του αγάλματος έγινε και κατά τις 2 διευθύνσεις πιθανού λικνισμού. Αυτό είχε ως συνέπεια, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από την μια πλευρά να εμφανίζονται με μια ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τα πειραματικά αλλά από την άλλη να παρέχουν και πάλι ικανοποιητική σύγκλιση και να αποτελούν μια πιστή απεικόνιση της πραγματικής συμπεριφοράς του αγάλματος.

Η αντίθεση η οποία παρατηρείται είναι πως κατά το πείραμα 319 η απόκλιση αυτή εμφανίζεται μόνο κατά την αρχή του πειράματος ενώ μετά συνεχίζει σε όλη τη διάρκεια και εν τέλει σβήνει με μια πιστή προσομοίωση της συμπεριφοράς του πραγματικού πειραματικού μοντέλου, ενώ στο πείραμα 320 η ίδια απόκλιση εμφανίζεται κατά το πέρας του λικνισμού των πειραμάτων όπου αργεί να σβήσει και να επέλθει σε ισορροπία.

Συνεχίζοντας, το παραπάνω πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο σύνθετο στην προσπάθεια προσομοίωσης της συμπεριφοράς του πραγματικού αγάλματος όπου πλέον κατά τη διάρκεια του πειραματικού σταδίου στο δοκίμιο ασκείται διέγερση και κατά τις 3 διευθύνσεις του. Έτσι αναφερόμενοι στα πειράματα 322 και 323 οι συγκρίσεις θα πραγματοποιηθούν και στις 2 πιθανές διευθύνσεις λικνισμού του δοκιμίου ως θ_x και θ_y για τους άξονες Χ και Υ αντίστοιχα, όπως έχουν οριστεί καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Συνοπτικά και στα δύο παραπάνω πειράματα παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα τα γραφήματα της γωνίας στροφής θ_y παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά και στις δύο περιπτώσεις από εκείνα των θ_x. Σχετικά με το 322 το γράφημα ως προς Υ φαίνεται να ακολουθεί πιστά τους χρόνους έναρξης και λήξης του φαινομένου του λικνισμού, ενώ κατά τα αρχικά στάδια του πειράματος παρουσιάζει ίδιες τιμές στροφών με ίδιο αριθμό κρούσεων, με εξαίρεση στο διάστημα μεταξύ του 15ου και 16ου δευτερολέπτου του πειράματος όπου αποσβένει γρηγορότερα.

Όσον αφορά το γράφημα της γωνίας θ_y του πειράματος 323 και πάλι από την μορφή του γραφήματος γίνεται φανερό πως η λικνιστική συμπεριφορά του πραγματικού αγάλματος και του δοκιμίου στα πλαίσια της προσομοίωσης είναι παρόμοιες.

Αναφορικά με τα γραφήματα στροφών θ_x η εικόνα δεν είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικής συμπεριφοράς των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς δεν μπορεί να ακολουθήσει την έναρξη και την περάτωση του λικνιστικού φαινομένου, ούτε και το πλάτος ή τον αριθμό των impacts. Σχετικά καλύτερα είναι τα αποτελέσματα εκείνα του πειράματος 322 αλλά και πάλι και τα δύο αυτά γραφήματα δεν αγγίζουν το επίπεδο της αξιοπιστίας όπου παρείχαν τα προηγούμενα αποτελέσματα σε σχέση με τα πραγματικά.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως για την πραγματοποίηση των παραπάνω συγκρίσεων διενεργήθηκε μια σειρά από δοκιμές με μεγάλο εύρος τιμών σχετικά με τον συντελεστή απόσβεσης και τον συντελεστή τριβής, ακόμα και ακραίες περιπτώσεις όπως μηδενική απόσβεση, άπειρη τριβή κλπ. Ωστόσο, από τα πειράματα αυτά φάνηκε πως με τη χρήση μιας ιξώδους απόσβεσης ζ (critical damping) με τιμή περί του 2,5% και με συντελεστή τριβής περί του 0,55 τα αποτελέσματα εμφάνιζαν μεγαλύτερη σύγκλιση και είναι αυτά τα οποία παρουσιάστηκαν εν τέλει στο συγκεκριμένο κεφάλαιο. Οι δύο αυτές παραπάνω τιμές ήταν κοντά στις αναμενόμενες δεδομένου του ότι σύμφωνα με τη φύση των υλικών γνωρίζαμε πως ο αντίστοιχος συντελεστής τριβής θα ήταν μεταξύ των τιμών 0,5 και 0,6, ενώ με βάση τη βιβλιογραφία η απόσβεση η οποία χρησιμοποιείται για τις περισσότερες προσομοιώσεις σε προβλήματα λικνισμού είναι η ιξώδης απόσβεση ζ με τιμές περί του 2%.

6. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διαμόρφωση ενός προσομοίωματος στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE το οποίο θα είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τη μελέτη της λικνιστικής συμπεριφοράς και κίνησης στερεών σωμάτων ελεύθερα εδραζόμενων υπό δυναμική διέγερση. Τέτοια σώματα συνήθως είναι μουσειακά εκθέματα τα οποία διατρέχουν τον κίνδυνο αστοχίας λόγω μεγάλων στροφών κατά τη λικνιστική τους κίνηση ενώ αποτελούν αντικείμενα τεράστιας ιστορικής και πολιτιστικής κληρονομίας για αυτό και η προστασία τους αποτελεί σημαντικό ζήτημα καθώς μια αστοχία ενός τέτοιου αγάλματος θα έχει ανυπολόγιστες συνέπειες.

Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένας αριθμός προσομοιωμάτων καθένα από τα οποία λάμβανε υπόψη του μια διαφορετική παράμετρο, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μέσω συγκρίσεων των αποτελεσμάτων τους, η κατάλληλη παραμετρική διερεύνηση η οποία θα είναι ικανή να εμφανίσει τη μεγαλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα του προγράμματος SERA/SEREME. Το γεγονός του ότι η ακριβής λικνιστική κίνηση και συμπεριφορά του συγκεκριμένου αγάλματος υπό πραγματικές συνθήκες ήταν γνωστά αποτέλεσε χρήσιμο εργαλείο για τον καθορισμό αυτών των κατάλληλων παραμέτρων και σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση του εκάστοτε μοντέλου μέσω των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του.

Μελετήθηκε εκτενώς το φαινόμενο του λικνισμού ενός ελεύθερα εδραζόμενου άκαμπτου σώματος υπό τη σεισμική διέγερσή της βάσης του με τον σεισμό ο οποίος πραγματοποιήθηκε στη περιοχή της Emilia-Romagna to 2012. Αυτή η παραμετρική διερεύνηση έγινε, σχετικά με την προεργασία η οποία ήταν απαραίτητη για τις χρονοιστορίες των επιταχύνσεων, το είδος του μοντέλου, της απόσβεσης, της τριβής, των πεπερασμένων στοιχείων του, της μορφής του, έτσι ώστε το μοντέλο να είναι ικανό να προσομοιάσει την πραγματική λικνιστική κίνηση του υπό μελέτη αγάλματος.

Πιο συγκεκριμένα, σχετικά την απαραίτητη προεργασία η οποία έπρεπε να πραγματοποιηθεί ώστε να είναι οι διεγέρσεις σε θέση να προσομοιώσουν εκείνες τις οποίες ασκήθηκαν στο πειραματικό στάδιο, έπρεπε να γίνει φιλτράρισμα των επιταχυνσιογραφημάτων ώστε να εξαλειφθεί ο θόρυβος και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε baseline correction καθώς παρατηρήθηκε πως ο οριζόντιος άξονας των γραφημάτων παρουσίαζε ελάχιστη κλίση με σκοπό κατά τη διπλή ολοκλήρωσή του σε μετακινήσεις να προκύπτουν μη ρεαλιστικά μεγέθη. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση των φασμάτων των επιταχύνσεων πριν και μετά αυτής της προεργασίας έτσι ώστε να φανεί εάν το γράφημα είχε επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό αλλάζοντας έτσι τη φύση της ίδιας της διέγερσης. Τα γραφήματα τα οποία εν τέλη δεν παρουσίαζαν αλλαγή στο φάσμα τους, ειδικά στη περιοχή κοντά στη μηδενική ιδιοπερίοδο δεδομένου ότι μέχρι τη στιγμή του λικνισμού θεωρείται πως το σώμα έχει άπειρη δυσκαμψία, είναι εκείνα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Πραγματοποιώντας την πρώτη σύγκριση μεταξύ ενός δύσκαμπτου αγάλματος και ενός παραμορφώσιμου εύκαμπτου προέκυψε το συμπέρασμα πως ένα δύσκαμπτο είναι σε θέση να παρέχει αρκετά αξιόπιστες πληροφορίες, πολύ κοντινές σε εκείνες του παραμορφώσιμου, έχοντας όμως δραματικά μειωμένο υπολογιστικό χρόνο. Δεδομένου ότι στη παρούσα εργασία η μελέτη πραγματοποιείται σε ένα τόσο υψίκορμο άγαλμα, η αξία της χρήσης εύκαμπτου προσομοιώματος φαίνεται να αυξάνεται, ωστόσο ο υπερβολικός υπολογιστικός χρόνος σε συνδυασμό με την όχι τόσο αισθητή βελτίωση των αποτελεσμάτων οδήγησαν στο να ληφθούν πλήρως δύσκαμπτα (rigid) μοντέλα κατά τη συνέχεια της παρούσας έρευνας.

Στη συνέχεια, η επόμενη σύγκριση πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αντιμετωπιστεί η επιλογή ανάμεσα στο εάν αξίζει να χρησιμοποιηθεί η ακριβής γεωμετρία του αγάλματος μέσω της χρήσης τρισδιάστατου σαρωτή ή ένα απλοποιημένο γεωμετρικά πρίσμα με τα ίδια γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά. Δεδομένου του ότι η χρήση ενός τρισδιάστατου σαρωτή για τη μελέτη της λικνιστικής συμπεριφοράς κάποιου δοκιμίου δεν είναι πάντοτε δυνατή έπρεπε να αποφανθεί εάν αυτή η παραπάνω πληροφορία είναι θέση να παράγει αισθητά βελτιωμένα αποτελέσματα χωρίς ιδιαίτερη αύξηση στο υπολογιστικό κόστος. Μετά το πέρας το συγκρίσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω φάνηκε το μοντέλο με τη χρήση της ακριβούς μορφής του αγάλματος της Fanciulla να είναι σε θέση να δώσει αρκετά βελτιωμένα αποτελέσματα με πολύ μικρή αύξηση στο χρόνο ο οποίος απαιτείται για την περάτωση της προσομοίωσης.

Η τελευταία παράμετρος η οποία έπρεπε να ορισθεί για τη δημιουργία του τελικού μοντέλου είναι ο κατάλληλος τύπος απόσβεσης ο οποίος θα είναι σε θέση να αναπαράγει καλύτερα και πιο πιστά τη συμπεριφορά του πραγματικού αγάλματος. Οι επιλογές στη παρούσα φάση, μέσω του λογισμικού το οποίο επιλέχθηκε για προσομοίωση είναι δύο, η χρήση ενός συντελεστή απόσβεσης (damping) c ή η χρήση ιξώδους απόσβεσης ζ (critical damping). Έπειτα από κατάλληλη διερεύνηση σε μια σειρά από πειράματα έγινε η παρατήρηση πως η χρήση της ιξώδους απόσβεσης ζ με τιμές περί του 2% - 2,5% ήταν εκείνη η οποία ήταν σε θέση να αναπαράγει πιο πιστά το πείραμα.

Επομένως, γνωρίζοντας πλέον όλες εκείνες τις κατάλληλες παραμέτρους για τη μόρφωση του τελικού μοντέλου, πραγματοποιήθηκε η τελική σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE και της πραγματικής συμπεριφοράς του αγάλματος υπό το πρίσμα του πειραματικού προγράμματος SERA/SEREME. Το μοντέλο του Abaqus ήταν σε θέση να προσομοιάσει πολύ πιστά την πραγματική συμπεριφορά του μοντέλου και να υπολογίσει με ικανοποιητική ακρίβεια κύρια μεγέθη της λικνιστικής κίνησης όπως οι μέγιστες στροφές οι οποίες θα αναπτυχθούν στο δοκίμιο, η χρονική στιγμή της έναρξης και λήξης της λικνιστικής συμπεριφοράς, όπως και ο αριθμό των κρούσεών του.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ευρύ και συνεπώς απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την ορθή και πιο αποτελεσματική προσέγγιση του θέματος . Η αξία των αγαλμάτων είναι ανυπολόγιστη και γι’ αυτό απαιτείται η διερεύνηση της απόκρισης των αγαλμάτων συγκρινόμενη με τη πραγματικής του απόκριση σε πρόσφατους σεισμούς. Επίσης, για τον λόγο αυτό, κρίνεται άξιο περεταίρω μελέτης η απόκριση του παραμορφώσιμου εύκαμπτου δοκιμίου, όπου στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ο υπολογιστικός χρόνος για την προσομοίωση ενός πειράματος ήταν τόσο μεγάλος, ειδικά στη περίπτωση χρήσης της πραγματικής μορφής του δοκιμίου, όπου τη καθιστούσε αδύνατη. Ωστόσο σαν μελλοντική έρευνα προτείνεται η μελέτη ενός εύκαμπτου μοντέλου με τη χρήση της πραγματικής μορφής του αγάλματος όπου με κάποιο υπολογιστικό σύστημα αυξημένης ισχύος να μπορεί να μελετηθεί επαρκώς.

Τέλος, σημαντικό είναι να μελετηθούν σε μεγαλύτερο βαθμό πειράματα και προσομοιώσεις στις οποίες έχει γίνει η χρήση σεισμικής μόνωσης για τα αγάλματα, προκειμένου να προστατευτούν από τους σεισμούς πρέπει να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη εμβάθυνση στο κομμάτι των μονώσεων με απώτερο σκοπό τη βέλτιστη προσομοίωσή τους στο επίπεδο των λογισμικών αλλά και την ανάπτυξή τους ώστε να είναι σε θέση να παρέχουν αυξημένη προστασία στα μουσειακά εκθέματα.

Βιβλιογραφία

1. Diamantopoulos S. Seismic Response Assessment of Rigid and Flexible Rocking Bodies using Simple Finite Element Models. MSc Dissertation, National Technical University of Athens, 2017.
2. Diamantopoulos S. Fragiadakis M. Seismic response assessment of rocking systems using signle degree-of-freedom oscillators. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2019; 48(7):689-708.
3. Vlachos N., Diamantopoulos S., Fragiadakis M. (2019). Seismic response assessment of artefacts freestanding on a solid pedestal, 4th Panhellenic Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 5-7 September 2019
4. Diamantopoulos S., Fragiadakis M., Modeling of rocking frames under seismic loading, Earthquake Engineering & Structural Dynamics 51 (1) (2022) 108-128.
5. Fragiadakis M. Diamantopoulos S., Fragility and risk assessment of free-standing building contents, Earthquake Engineering & Structural Dynamics 49 (10) (2020) 1028-1048.
6. Πεταλάς Α. Αριθμητική διερεύνηση της λικνιστικής απόκρισης συμπαγών σωμάτων, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012.
7. Zhang J., Makris N. Rocking response of free-standing blocks under cycloidal pulses. Journal of Engineering, Vol 127, No 5, 2001.
8. Vassiliou M., Makris N. Analysis of the rocking response of rigid blocks standing free on a seismically isolated base. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 41, 177-196, 2012.
9. Spyrakos C. et al. Application of predictive models to assess failure of museum artifacts under seismic loads. Journal of Cultural Heritage, 2016.
10. Dimitrakopoulos E., DeJong M. Revisiting the rocking block: closed-form solutions similarity laws. Proceedings of Royal Society 468, 2294, 2012
11. Fragiadakis M. Papadrakakis M. Performance- based optimum seismic design of reinforced convrete structures. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 37:825-844, 2008.
12. Fragiadakis M., Psycharis I., Cao Y., Mavroeidis G. Parametric investigation of the dynamic response of rigid blocks subjected to synthetic near-source ground motion records. ECCOMAS Congress 2016, VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete Island, Greece, 2016.
13. Housner G. The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, No. 2, pp 403-417, 1963.
14. Makris N., Vassiliou M. The dynamics of the rocking frame. Psycharis et al. Seismic assessment behaviour and retrofit of the heritage buildings and monuments, Computational methods in applied sciences 37, DOI 10.1007/978-3-31901613903_2. Springer International Publishing Switzerland, 2015.
15. Psycharis I., Fragiadakis M., Stefanou I. Seismic reliability assessment of classical columns subjected to near-fault ground motions. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 10.1002/2312. 2013.
16. Psycharis I. Dynamic behaviour of rocking two-block assemblies. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Vol. 19, 555-575, 1990.
17. Anil K. Chopra, Δυναμική των Κατασκευών Θεωρία και Εφαρμογές στη Σεισμική Μηχανική, 2007

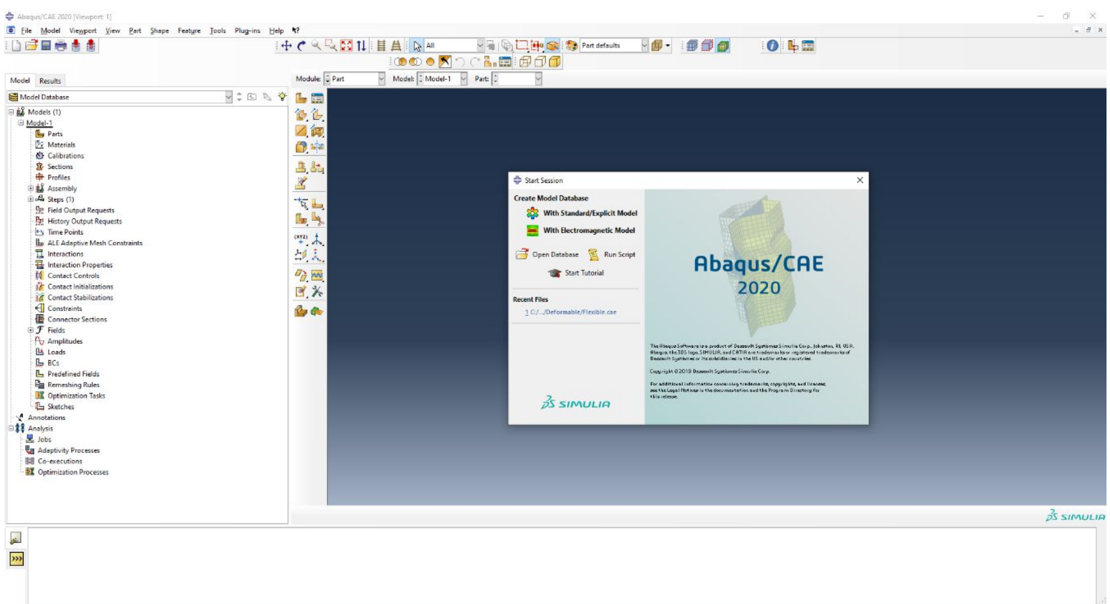
18. Vassiliou M., Mackie K., Stojadinovic B., Dynamic response analysis of solitary flexible rocking bodies: modeling and behavior under pulse-like ground excitation. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 43:1463-1481, 2014.
19. Κολοκύθα Μ.Ε. Προσομοίωση της συμπεριφοράς αγαλμάτων σε σεισμική φόρτιση, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.
20. Λέκας Άγγελος, Μελέτη της σεισμικής απόκρισης μουσειακών εκθεμάτων, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2020.
21. Ψύρρας Γεώργιος, Παραμετρική διερεύνηση φαινομένων ολίσθησης και λικνισμού στερεών συμπαγών σωμάτων στο Abaqus/CAE με χρήση Python Scripting, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσαλλονίκης, 2019.
22. Abaqus Unified FEA, Computer Software, Dassault Systemes.
23. MATLAB, version R2018a, Computer Software, Natick, MA, MathWorks.
24. ABAQUS DOCUMENTATION, sections 2.4.1, 6.3.3., 33.1.5,1.3.15
25. SeismoSignal Support, SeismoSoft.

Παράρτημα Α. Δημιουργία Προσομοιωμάτων στο Abaqus

<u>*ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ*</u>

Στο παράρτημα αυτό θα παρουσιαστεί βήμα προς βήμα η δημιουργία των μοντέλων τα οποία δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστεί η πορεία η οποία ακολουθήθηκε για τη κατασκευή ενός πλήρως δύσκαμπτου και ενός παραμορφώσιμου εύκαμπτου μοντέλου τα οποία αποτελούν τα δύο είδη προσομοιώσεων όπου χρησιμοποιήθηκαν.

Ανοίγοντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus/CAE εμφανίζεται η αρχική οθόνη του προγράμματος όπως φαίνεται παρακάτω :

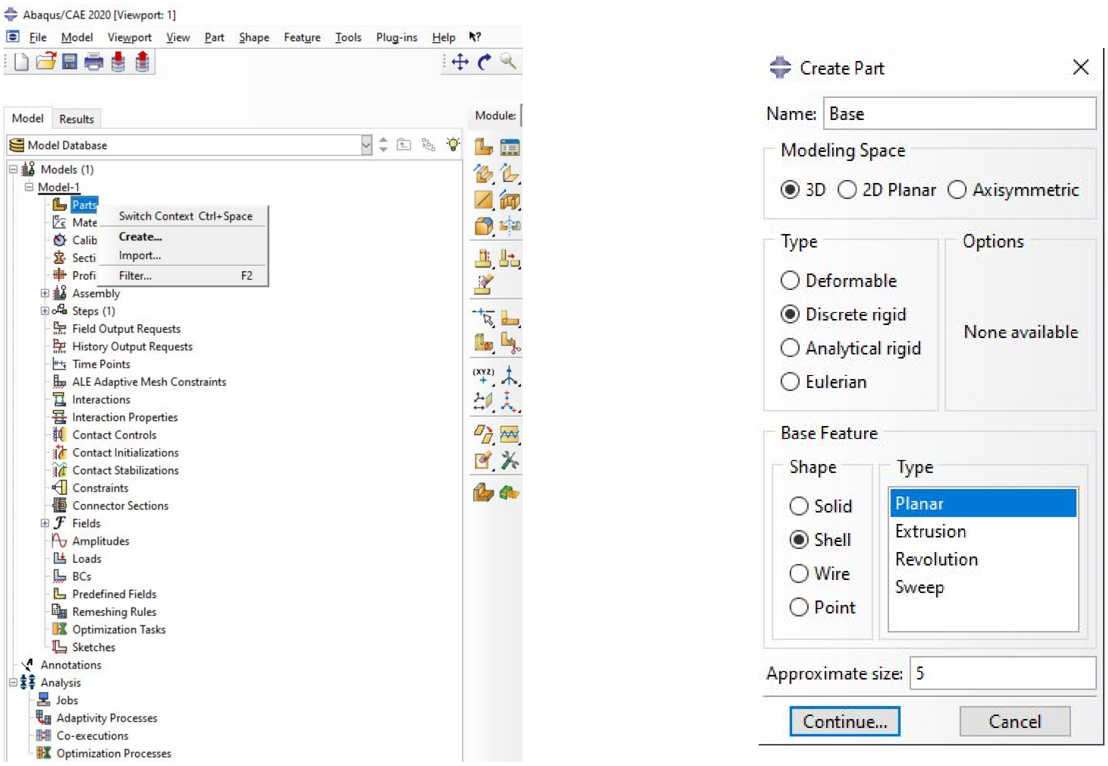


Εικόνα Α.1 Περιβάλλον προγράμματος Abaqus/CAE

Η αρχική αυτή οθόνη χωρίζεται σε δύο μέρη, στα αριστερά της οθόνης βρίσκεται το δένδρο εργασιών από το οποίο είναι δυνατόν να ελεγχθούν όλες οι παράμετροι του κάθε μοντέλου, ενώ δεξιά βρίσκεται η περιοχή σχεδίασης στην οποία φαίνεται το μοντέλο το μοντέλο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Επίσης, πρέπει να τονισθεί πως ο χρήστης πρέπει να έχει υπόψιν του το γεγονός πως στο Abaqus δεν υπάρχουν μονάδες μέτρησης των μεγεθών, ως εκ τούτου θα πρέπει να εισάγει στο πρόγραμμα τιμές οι οποίες είναι συμβατές μεταξύ τους ώστε να προκύψουν τα σωστά αποτελέσματα.

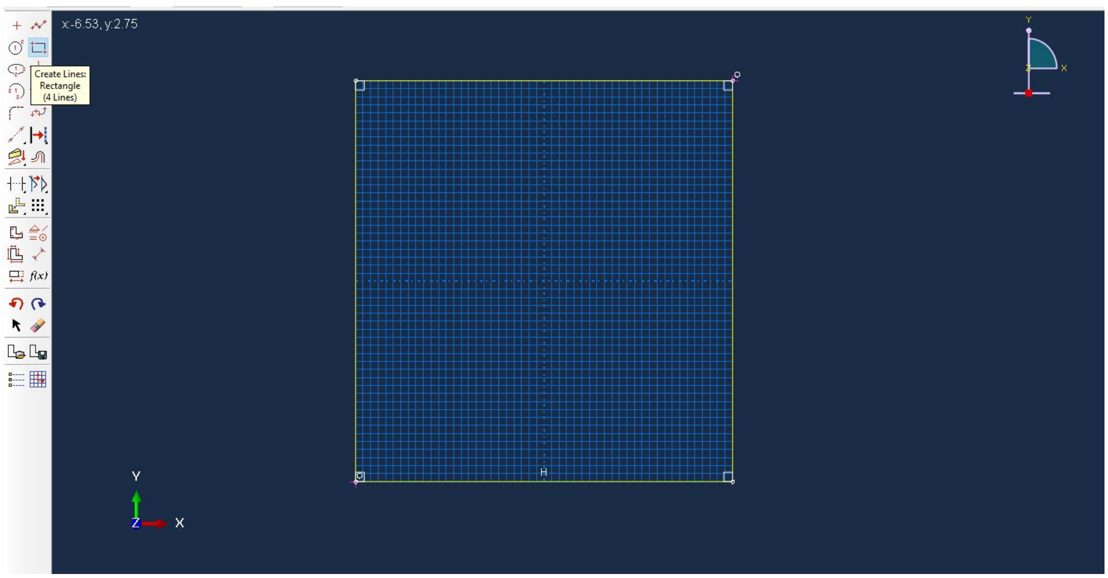
Στη συνέχεια πραγματοποιείται η δημιουργία των σωμάτων, δηλαδή εκείνο της βάσης και εκείνο του μοντέλου το οποίο θα υποβληθεί σε λικνισμό. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας δεξί κλίκ στο δένδρο εργασιών, στην επιλογή “Parts” και στη συνέχεια “Create…”. Αρχικά θα δημιουργηθεί η βάση έδρασης του σώματος, η οποία ανεξαρτήτως του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί, εκείνη θα είναι εντελώς άκαμπτη (discrete rigid), τρισδιάστατη εφόσον αναφερόμαστε σε τρισδιάστο πρόβλημα και με τη θεώρηση επιφανειακού κέλυφους (3D Planar Shell) όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα Α.2 Επιλογή δημιουργίας σώματος (αριστερά) και δημιουργία τρισδιάστατης δύσκαμπτης βάσης (δεξιά)

Στη συνέχεια, πατάμε την επιλογή Continue και επιστρέφουμε στη περιοχή σχεδίασης του προγράμματος και επιλέγουμε τις διαστάσεις της βάσης έχοντας υπόψιν την ιδιαιτερότητα του Abaqus με τις μονάδες μέτρησης, στη παρούσα διπλωματική εργασία για παράδειγμα έγινε χρήση μέτρων και δημιουργήθηκε τετραγωνική βάση μήκους πλευράς 5 μέτρων μέσω της επιλογής ‘Create Line : Rectangle’ όπως φαίνεται και στην εικόνα Α.3, ορίζοντας ένα τετράγωνο μέσω των σημείων με συντεταγμένες 2.5,2.5 και -2.5,-2.5.

Κάθε απολύτως στερεό σώμα στο Abaqus είναι απαραίτητο να έχει ένα σημείο αναφοράς, ‘reference point’ RP, στο οποίο εφαρμόζονται οι τυχούσες δυνάμεις ή δεσμεύσεις. Για τη δημιουργία του κάνουμε κλικ στην επιλογή ‘Tools’ και πατώντας στην επιλογή ‘Reference Point” από το βασικό μενού του προγράμματος συμπληρώνουμε τις συντεταγμένες του σημείου. Στη περίπτωση του αγάλματος της παρούσας εργασίας, γνωρίζοντας λόγω του πειραματικού υπόβαθρου, το κέντρο βάρους του, ορίσθηκε αυτό ως σημείο αναφοράς, δηλαδή το σημείο (0 , 0.686 , 0.195) λαμβάνοντας ως αρχή των αξόνων (0 , 0) το σημείο στο κέντρο της πλευράς της βάσης του αγάλματος κατά την πρόσωψή του. Ενώ στη περίπτωση της βάσης το σημείο αναφοράς (0, 0) ορίστηκε στο κέντρο ακριβώς της τετραγωνικής βάσης.

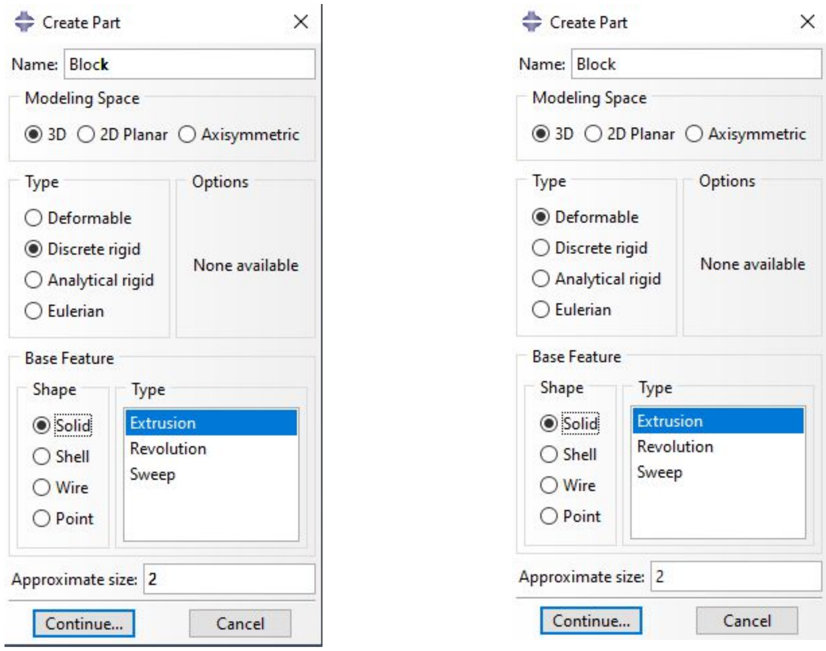


Εικόνα A.3 Σχεδίαση δύσκαμπτης τετραγωνικής βάσης δοκιμίου μέσω της επιλογής Create Line : Rectangle (4 lines)

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του μοντέλου το οποίο εν τέλη θα τεθεί υπό σεισμική διέγερση μελετώντας έτσι την λικνιστική του συμπεριφορά. Το μοντέλο αυτό θα μπορεί να δημιουργηθεί ως απολύτως δύσκαμπτο όπως και η βάση του ή ως εύκαμπτο παραμορφώσιμο μοντέλο. Στο παράρτημα θα δειχθεί ο τρόπος και για τα δύο ώστε ο αναγνώστης να είναι σε θέση να δημιουργήσει όποιο μοντέλο θεωρεί καταλληλότερο στα πλαίσια της εκάστοτε προσομοίωσης.

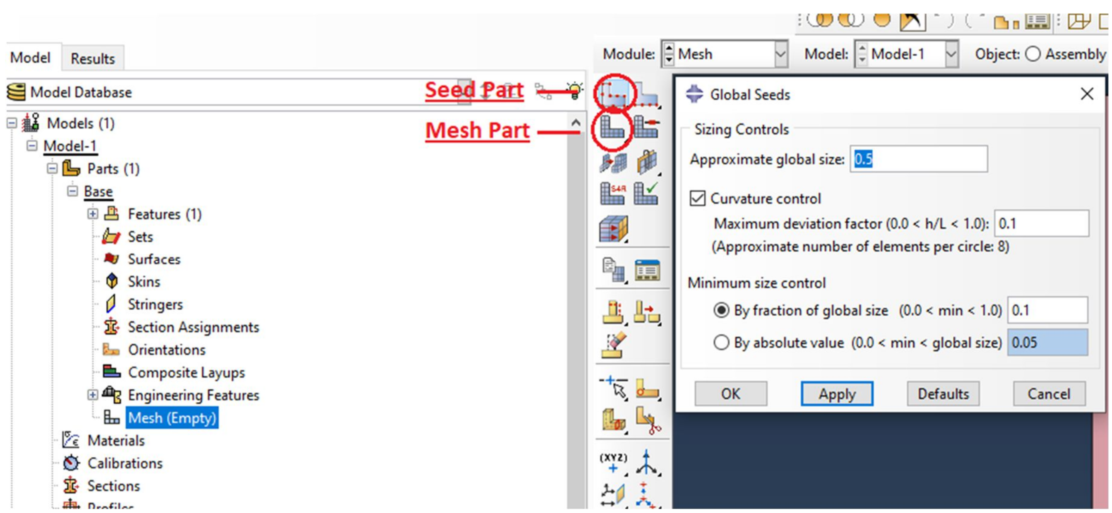
Και στις δύο περιπτώσεις, και πάλι θα πρέπει να πάμε στο δένδρο εργασιών και να επαναλάβουμε δεξί κλικ στο ‘Parts’ στην επιλογή ‘Create...’. Αυτή τη στιγμή, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει εάν θέλει να δημιουργήσει ένα πλήρως δύσκαμπτο μοντέλο (discrete rigid) ή ένα παραμορφώσιμο μοντέλο (Deformable) όπως στην Εικόνα A.4.

Αντίστοιχα με τη δύσκαμπτη βάση και στη περίπτωση του δύσκαμπτου μοντέλου και πάλι πρέπει να ορισθεί σημείο αναφοράς για το σώμα με τον ίδιο τρόπο που περιεγράφηκε προηγουμένως.



Εικόνα Α.4 Κατασκευή πλήρως δύσκαμπτου μοντέλου (αριστερά) και παραμορφώσιμου μοντέλου (δεξιά)

Στην συνέχεια πρέπει να ορισθούν τα πεπερασμένα στοιχεία για κάθε σώμα είτε είναι εύκαμπτο είτε δύσκαμπτο αλλά ακόμα και για τη βάση, αυτό πραγματοποιείται κάνοντας διπλό κλικ στην επιλογή ‘Mesh (Empty)’ του κλάδου ‘Base’ και ‘Block” για τα δύο σώματα από το δένδρο εργασιών. Ώστε να ορισθεί η κατάλληλη διακριτοποίηση των σωμάτων κάνουμε κλικ στο εργαλείο ‘Seed Part’ για να ορίσουμε το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων. Επιλέγουμε τα κατάλληλα μεγέθη για τη προσομοίωση την οποία θα εξετάσουμε και στη συνέχεια επιλέγουμε το εργαλείο ‘Mesh Part’ οπότε εν τέλη πατώντας ‘Yes’ ή μεσαίο κλικ έχει πραγματοποιηθεί η διακριτοποίηση του σώματος.



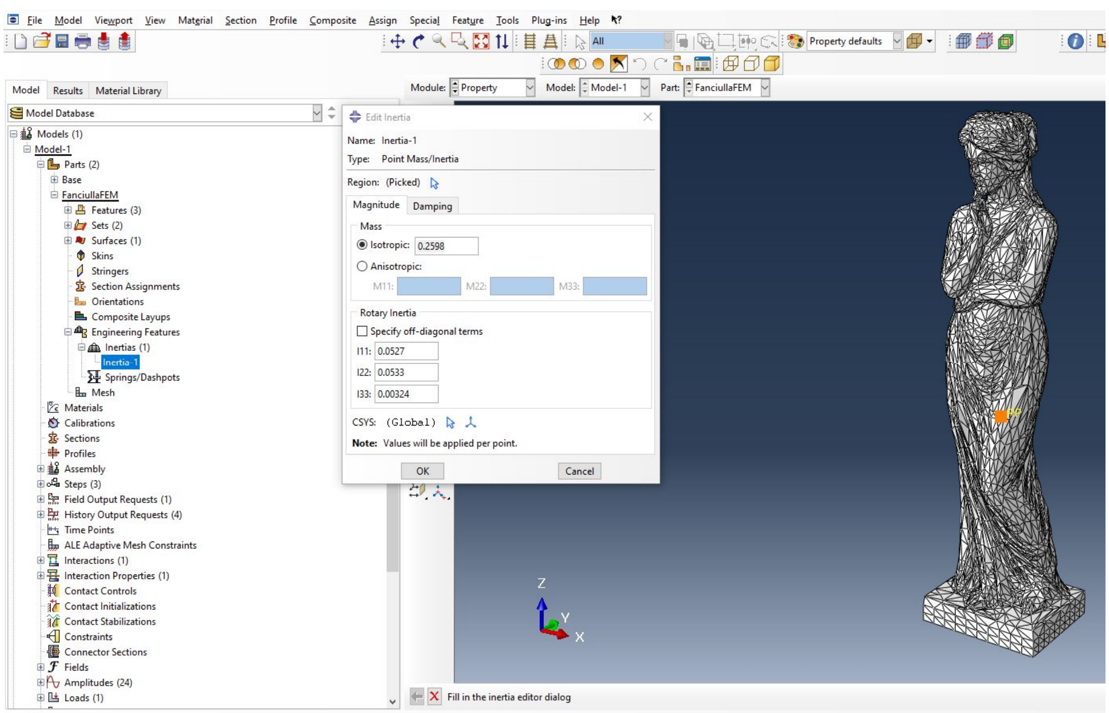
Εικόνα Α.5 Διακριτοποίηση σώματος

Στη περίπτωση του απλοποιημένου πρισματικού δοκιμίου η διαδικασία για την μόρφωση του μοντέλου είναι εκείνη η οποία περιεγράφηκε παραπάνω ενώ στη περίπτωση του κανονικού αγάλματος η γεωμετρία από το σχέδιο CAD το οποίο περιείχε το άγαλμα εισήχθη στο πρόγραμμα μέσω των εντολών ‘File – Import – Part’ και επιλέγοντας το αντίστοιχο CAD σχέδιο.

Επίσης, να αναφερθεί μια ιδιαιτερότητα στη περίπτωση του πλήρως δύσκαμπτου σώματος, δεδομένου ότι ένα τρισδιάστατο άκαμπτο σώμα δεν μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο, πρέπει πρώτα να αντικατασταθεί από ένα κέλυφος, να γίνει δηλαδή «κούφιο» και οι εξωτερικές του επιφάνειες να θεωρηθούν ως κέλυφος. Για να γίνει αυτό επιλέγουμε από το βασικό μενού την αλληλουχία επιλογών Shape – Shell – From Solid , επιλέγουμε το σώμα και κάνουμε μεσαίο κλικ επιβεβαιώνοντας έτσι την εντολή.

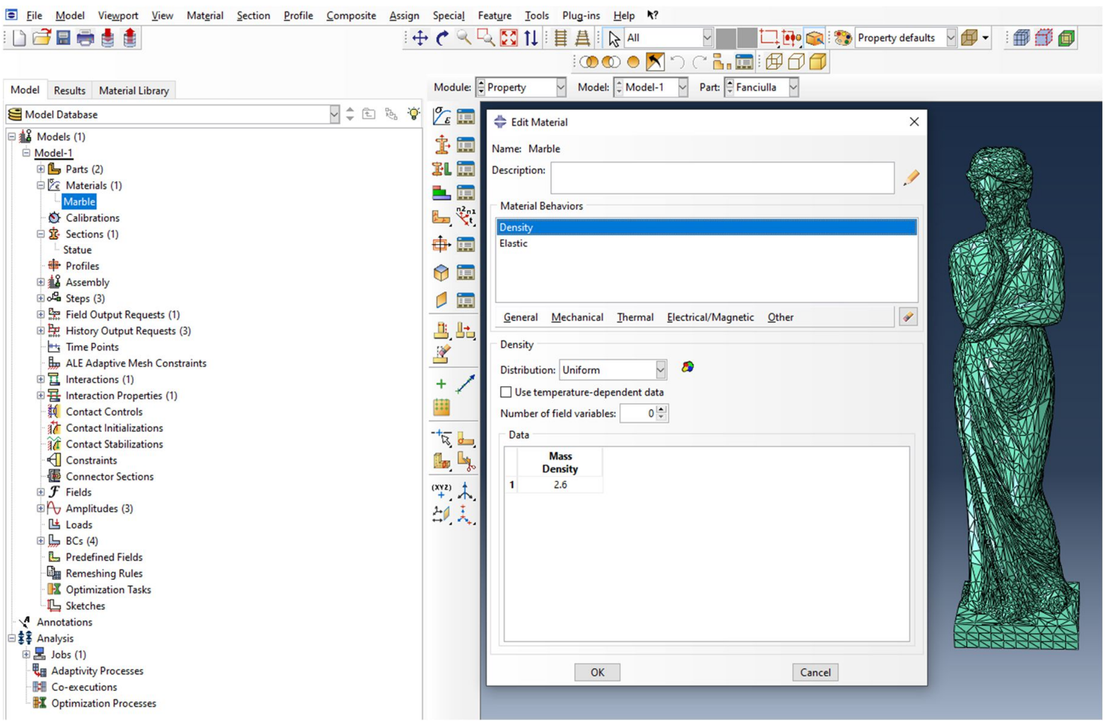
ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Σε αυτό το σημείο έχει πραγματοποιηθεί η διαμόρφωση του μοντέλου ως προς τη μορφή του και σειρά παίρνει ο ορισμός των κατάλληλων εκείνων υλικών και διατομών έτσι ώστε να ορισθούν οι κατάλληλες ιδιότητες στο μοντέλο. Αναφορικά με το ανελαστικό μοντέλο, ορισμός για τα υλικά και τις διατομές δεν είναι απαραίτητος, καθώς όλα τα σώματα είναι άκαμπτα. Αντί αυτού θα γίνει προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του δοκιμίου απευθείας μέσω εισαγωγής από τον χρήστη. Ανοίγοντας στο δένδρο εργασιών την επιλογή ‘Engineering Features’ του part ‘Block’ και επιλέγοντας το ‘Inertia’ είμαστε σε θέση να προσδώσουμε τα απαραίτητα αδρανειακά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δοκιμίου, όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα Α.6 Ορισμός αδρανειακών χαρακτηριστικών στη περίπτωση του δύσκμαπτου μοντέλου

Ωστόσο, στο παραμορφώσιμο ελαστικό μοντέλο πρέπει να ορισθεί το υλικό του δοκιμίου και πιο συγκεκριμένα στη παρούσα περίπτωση του μαρμάρου. Κάνοντας διπλό κλικ στην επιλογή ‘Materials’ του δένδρου εργασιών ορίζουμε το υλικό με όνομα ‘Marble’ ορίζοντας κατάλληλα τις αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση. Οι τιμές της πυκνότητας, του μέτρου ελαστικότητας αλλά και του συντελεστή Poisson είναι εκείνες οι οποίες αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.2 όπου περιγράφηκε το εύκαμπτο μοντέλο (Σχήμα 2.3).



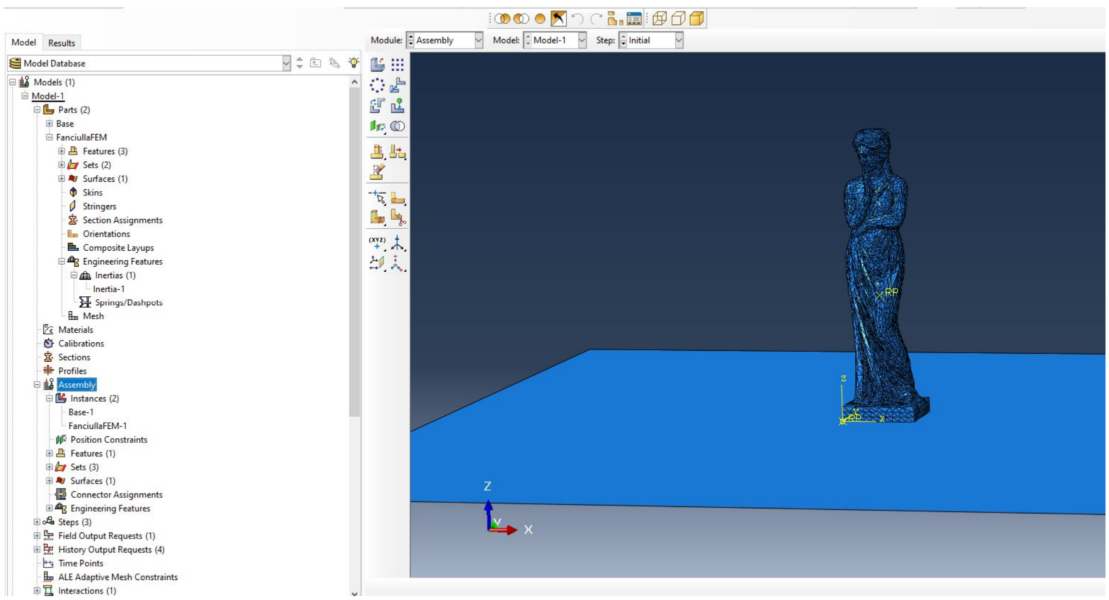
Εικόνα Α.7 Ορισμός υλικού μαρμάρου στο εύκαμπτο μοντέλο

Στα σώματα όμως δεν αντιστοιχίζονται απευθείας τα υλικά τα οποία έχουν δημιουργηθεί, για να ορισθεί θα πρέπει πηγαίνοντας στην επιλογή ‘Sections’ να δημιουργήσουμε τη διατομή του δοκιμίου. Την ονομάζουμε Statue και πατάμε ‘Continue’ και στη συνέχεια πηγαίνοντας στο δένδρο εργασιών στο part του δοκιμίου, στην επιλογή ‘Section Assignments’, επιλέγουμε το σώμα από τη περιοχή σχεδίασης και πατάμε μεσαίο κλικ ορίζοντας έτσι το υλικό και τη διατομή η οποία έχει δημιουργηθεί στο εκάστοτε part (εδώ στο άγαλμα).

ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

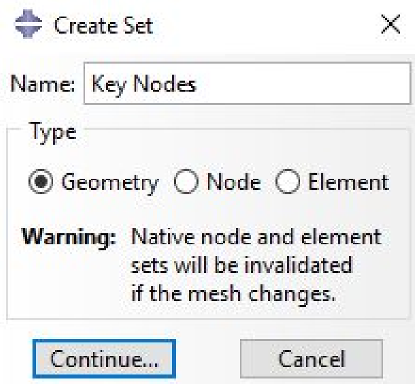
Για τη διαμόρφωση του μοντέλου και τη σύνθεση των δύο σωμάτων (βάσης και δοκιμίου) σε μία αδιάσπαστη προσομοίωση, ο χρήστης θα πρέπει να ανοίξει από το δένδρο εργασιών την επιλογή 'Assembly' και έπειτα από διπλό κλικ στην επιλογή 'Instances' εμφανίζεται στο Abaqus η λίστα με τα σώματα τα οποία έχουν ήδη δημιουργηθεί. Επιλέγοντας τη βάση και το άγαλμα, το πρόγραμμα τα τοποθετεί μαζί ώστε να ολοκληρωθεί η σύνθεση του πειράματος.

Στη προκειμένη περίπτωση η βάση είχε λάθος προσανατολισμό αλλά με την κατακόρυφη μπάρα εργασιών ανάμεσα στην περιοχή σχεδίασης και του δένδρου εργασιών, ο χρήστης είναι σε θέση να μετακινήσει ή να περιστρέψει όποιο στοιχείο χρειάζεται για το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα Α.8 Σύνθεση βάσης και αγάλματος για την τελική μορφή της προσομοίωσης

Η παραπάνω διαδικασία είναι κοινή και για τις δύο μορφές μοντελοποίησης, για τη σύνθεση του τελικού μοντέλου. Πλέον, πηγαίνοντας στην επιλογή 'Assembly' και εκτελώντας διπλό κλικ στο 'Sets' είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε ένα σετ όπου το Abaqus ονομάζει έτσι ένα σύνολο σημείων, των οποίων θα αιτηθούμε αργότερα τα αποτελέσμα, στη περίπτωση του αγάλματος της Fanciulla τέτοια σημεία αποτέλεσαν η κάτω δεξιά γωνία της βάσης (όπου έγινε η αρχική σύγκριση στο κεφάλαιο 2 ανάμεσα σε μετακινήσεις) και στο σημείο αναφοράς (RP – reference point) όπου αποτελεί και κέντρο βάρους του σώματος (εκεί πραγματοποιήθηκαν οι υπόλοιπες συγκρίσεις της εργασίας).

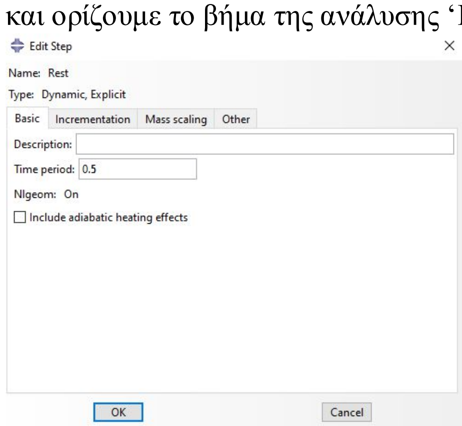


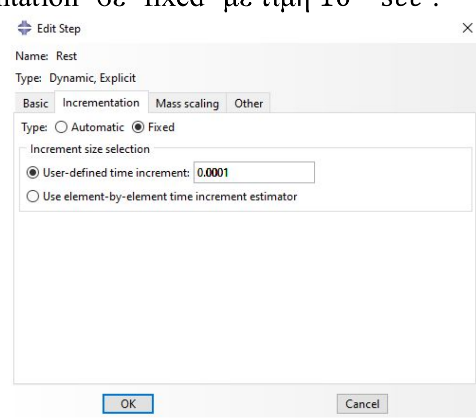
Εικόνα Α.9 Δημιουργία σετ κυριότερων σημείων μοντέλου

<u>ΟΡΙΣΜΟΣ ΒΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ</u>

Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί ορισμός των βημάτων της ανάλυσης, όπου σε κάθε βήμα ορίζονται τα κατάλληλα φορτία, δεσμεύσεις και το επιθυμητό είδος των αποτελεσμάτων (outputs) που θα θέλουμε να ισχύσουν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το Abaqus ορίζει αυτόματα ένα αρχικό βήμα με το όνομα 'Initial' κατά το οποίο μπορούν να καθοριστούν μόνο δεσμεύσεις, όχι φορτία.

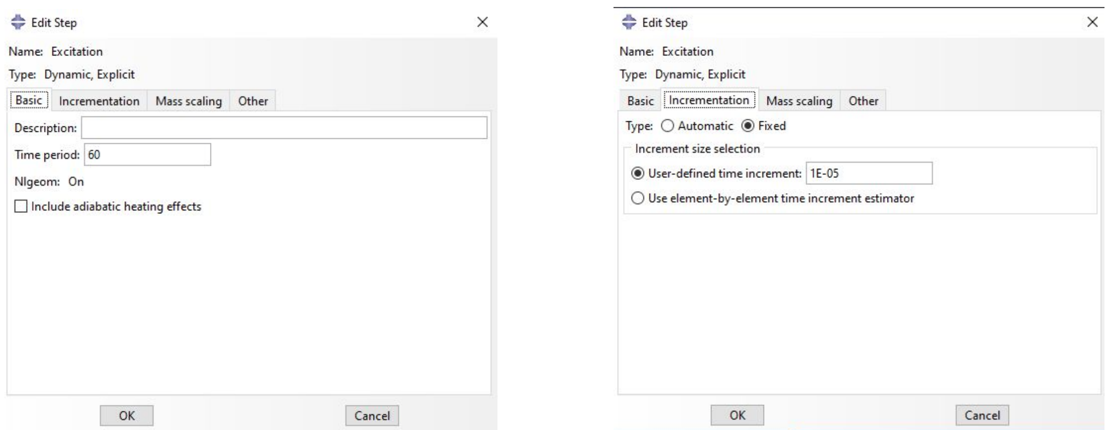
Αρχικά γίνεται δημιουργία ενός πρώιμου σταδίου του πειράματος με όνομα 'Rest' έτσι ώστε κατά την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών αλλά και του φορτίου βαρύτητας από το πρόγραμμα στο μοντέλο να υπάρχει ένα μικρό χρονικό διάστημα ασφαλείας με σκοπό, όταν ξεκινήσει η διέγερση το σώμα να βρίσκεται σε πλήρη ηρεμία. Αυτό το βήμα θα έχει μικρή διάρκεια μισού δευτερολέπτου και τοποθετείται χρονικά αμέσως μετά το πέρας του Initial. Για τη δημιουργία του κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Steps' του δένδρου εργασιών, ορίζουμε το καινούργιο βήμα ως 'Dynamic, Explicit' (δεδομένου ότι το πείραμα του λικνισμού είναι ένα δυναμικό πρόβλημα βαθιάς μη γραμμικότητας). Επίσης, ορίζουμε τη διάρκεια και θέτουμε σε ισχύ την λειτουργία 'Nlgeom' (Non-linear geometry) καθώς και ορίζουμε το βήμα της ανάλυσης 'Incrementation' σε 'fixed' με τιμή $10^{-4} sec$.





Εικόνα Α.10 Δημιουργία βήματος Rest

Στη συνέχεια θα οριστεί το επόμενο βήμα της ανάλυσης το οποίο θα είναι και το τελευταίο, με το όνομα ‘Excitation’ και κατά το οποίο θα εφαρμοστεί η διέγερση στη βάση του δοκιμίου. Αντίστοιχα με πριν δημιουργείται το step από το δένδρο εργασιών με χρονική διάρκεια τα 60 δευτερόλεπτα τα οποία αποτελούν και τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών και ως βήμα ανάλυσης θα ορισθεί σαν fixed η τιμή $10^{-5} sec$ αυξάνοντας έτσι ακόμα παραπάνω την ακρίβεια σε αυτό το βήμα της προσομοίωσης από το οποίο αργότερα θα αιτηθούμε τα αποτελέσματα.

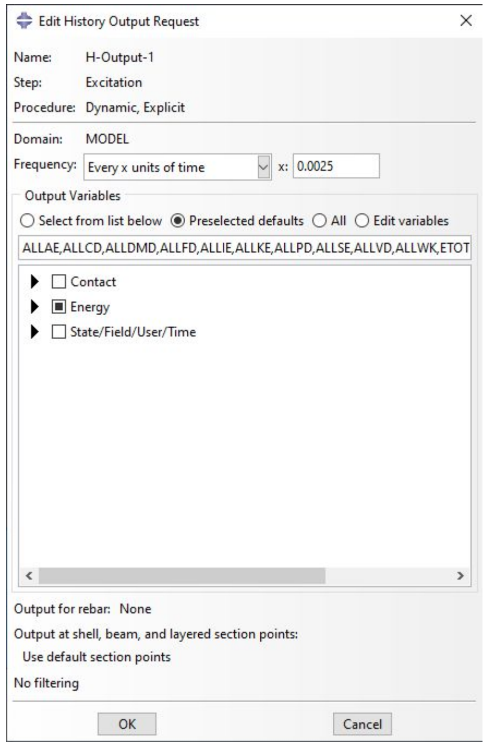


Εικόνα Α.11 Δημιουργία βήματος Excitation

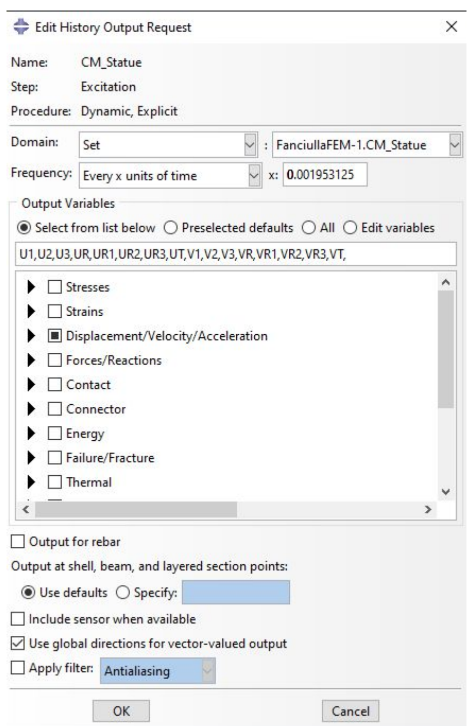
<u>*ΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ*</u>

Επόμενο βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός των ‘outputs’, δηλαδή των αποτελεσμάτων εκείνων τα οποία ο χρήστης επιθυμεί να λάβει από κάθε βήμα της ανάλυσης. Στο πλαίσιο του λογισμικού Abaqus υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι outputs, το ‘Field Output’ το οποίο μας δίνει αποτελέσματα γραφικά επάνω στο μοντέλο και το ‘History Output’ το οποίο μας δίνει αποτελέσματα με τη μορφή γραφικής παράστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο. Τα outputs τα οποία θα ζητηθούν από το πρόγραμμα στη παρούσα μελέτη θα είναι ένα History Output για το σύνολο του μοντέλου το οποίο θα υπολογίζει τις ενέργειες ανά πάσα στιγμή και άλλο ένα (ίδιας μορφής) το οποίο θα υπολογίζει μετακινήσεις, στροφές, ταχύτητες και επιταχύνσεις για τα σημεία τα οποία εμείς επιλέξαμε προηγουμένως κατά τη σύνθεση του μοντέλου ως ‘Key Nodes’.

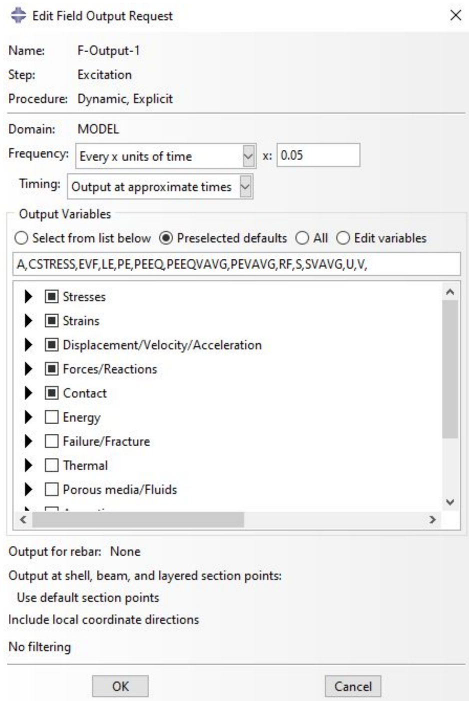
Επίσης, δημιουργήθηκε και ένα Field Output ανοίγοντας διαδοχικά το δένδρο των επιλογών ‘Field Output Requests’, ‘F-Output-1’, ‘States’ και κάνοντας διπλό κλικ στο Rest ζητείται από το πρόγραμμα ο υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων του μοντέλου καθώς και άλλα δεδομένα σχετικά με την τριβή, τις μετακινήσεις, τις ταχύτητες κλπ.



Εικόνα Α.12 Αίτηση αποτελεσμάτων στο Abaqus



Εικόνα Α.13 Αίτηση αποτελεσμάτων στο Abaqus

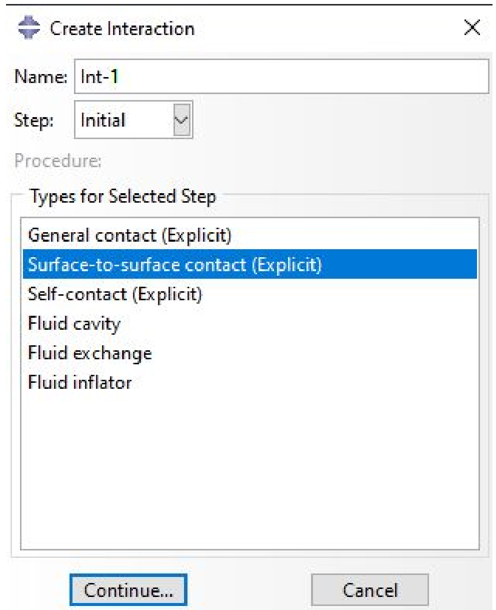


Εικόνα Α.14 Αίτηση αποτελεσμάτων στο Abaqus

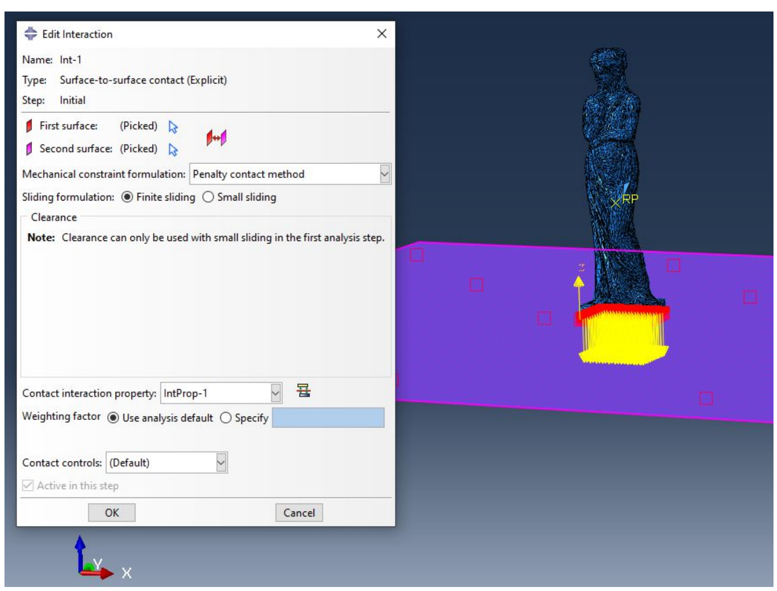
Εδώ να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα στροφών και μετακινήσεων ζητήθηκαν με βήμα 0,001953125 δευτερολέπτων (frequency : every x units of time) το οποίο αποτελούσε και το βήμα μέτρησης κατά το πειραματικό στάδιο του SERA/SEREME για λόγους ευκολίας της σύγκρισης, επίσης σημαντικό είναι ο χρήστης να δώσει ιδιαίτερη προσοχή σε ποιο βήμα της ανάλυσης αιτούνται ποια αποτελέσματα. Αυτό φαίνεται και στο δένδρο εργασιών όπου στο αντίστοιχο βήμα θα έχει δίπλα παρένθεση με το σχόλιο ‘Created’ ενώ από αυτό το βήμα και έπειτα τα υπόλοιπα θα ορίζονται ως ‘Propagated’.

<u>ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΩΝ</u>

Εάν δεν ορισθεί καταλλήλως από τον χρήστη, το δοκίμιο και η βάση δεν θα αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους κατά τη διάρκεια του πειράματος. Για τον σκοπό αυτό πρέπει να ορισθεί ο κατάλληλος τύπος επαφής μεταξύ τους κάνοντας διπλό κλικ στο δένδρο εργασιών στην επιλογή ‘Interactions’, το πρόγραμμα ζητάει σε ποιο από τα βήματα θα ξεκινήσει να εφαρμόζεται η επαφή η οποία θα ορισθεί. Επιλέγουμε το Initial εφόσον θέλουμε να ισχύει σε όλη τη διάρκεια του πειράματος και στη συνέχεια επιλέγουμε τον τύπο επαφής όπου γνωρίζοντας τη φύση του προβλήματος του λικνισμού επιλέγουμε τον τύπο ‘Surface-to-surface (Explicit)’ αφού πρόκειται για ένα ελεύθερα εδραζόμενο σώμα επάνω σε μια δύσκαμπτη βάση. Στη συνέχεια ζητείται από τον χρήστη να ορίσει τις δυο επιφάνειες τις οποίες τις ονομάζει ως καφέ και μωβ, για τις οποίες ορίζουμε την επαφή. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή σχετικά με τον ορισμό των επαφών καθώς το Abaqus λαμβάνει τις επιλογές που του ορίζει ο χρήστης με συγκεκριμένο τρόπο, έχει δηλαδή σημασία ποια επιφάνεια θα ορισθεί ως καφέ ή μωβ και επίσης από ποια μεριά της επιφάνειας την επιλέξαμε. Έπειτα από την ανάγνωση του εγχειριδίου του Abaqus καθώς και κάποιες δοκιμές δημιουργήθηκε η ζητούμενη επαφή απλής έδρασης η οποία προοριζόταν. Στις περιπτώσεις όπου η επιλογή των επιφανειών δεν γινόταν σωστά το δοκίμιο διαπερνούσε την βάση και εκτελούσε ελεύθερη πτώση, έτσι αντιλαμβανόμασταν πως χρειαζόταν επαναπροσδιορισμός των αντίστοιχων επιφανειών.



Εικόνα Α.15 Ορισμός επαφής

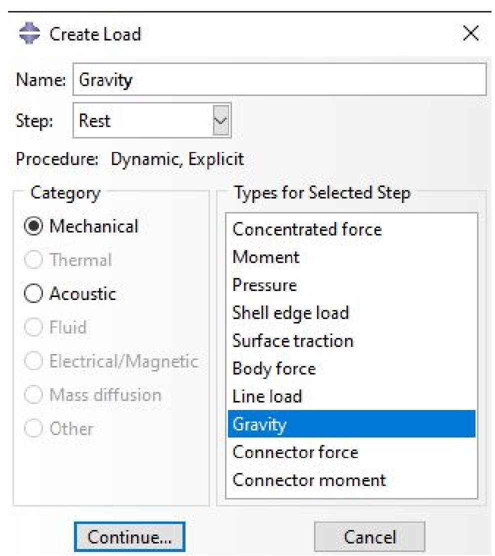


Εικόνα Α.16 Δημιουργία επαφής Surface-to-Surface

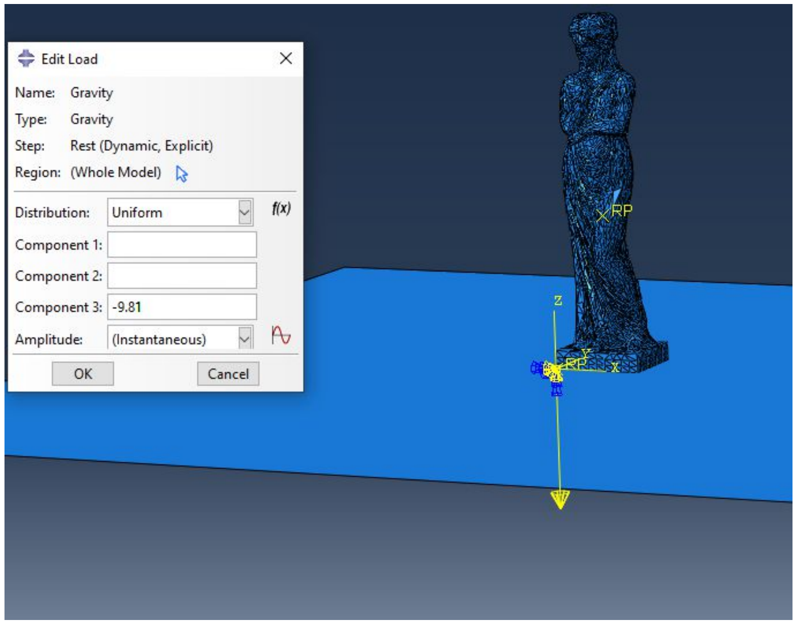
Στο παράθυρο που εμφανίζεται, επιλέγοντας την επιλογή Continue ορίζονται οι ιδιότητες της επαφής, στην προκειμένη περίπτωση ο συντελεστής τριβής καθώς και η απόσβεση. Πραγματοποιήθηκαν πολλά πειράματα με πολλούς συνδυασμούς τριβής και απόσβεσης ωστόσο στο παρόν παράρτημα θα φανεί ο τρόπος με τον οποίο ο χρήστης μπορεί να προσδώσει όποια τιμή επιθυμεί. Πηγαίνοντας στο Create Interaction Properties (το εικονίδιο του εμφανίζεται στο παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα Α.16) ορίζουμε καινούργια επαφή ‘Contact’ και στη συνέχεια μέσω των επιλογών ‘Mechanical’, ‘Tangential Behavior’ ορίζουμε τριβή στο μοντέλο ενώ μέσω των επιλογών ‘Mechanical’, ‘Damping’ ορίζεται η απόσβεση. Στη παρούσα διπλωματική για τα τελικά αποτελέσματα έχει γίνει χρήση συντελεστή τριβής ίσο με 0,55 και σαν απόσβεση έχει χρησιμοποιηθεί η απόσβεση ‘Critical Damping’ με τιμή 2%. Πατάμε ΟΚ και επιλέγουμε τον τρόπο επαφής τον οποίο μόλις δημιουργήσαμε (εδώ IntProp-1) ώστε να εφαρμοστεί στη προσομοίωση.

<u>ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΔΕΣΜΕΥΣΕΩΝ</u>

Επόμενο βήμα αποτελεί ο ορισμός των φορτίων και των δεσμεύσεων οι οποίες θέλουμε να εφαρμοστούν σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Πηγαίνοντας στην επιλογή ‘Loads’ του δένδρου εργασιών δημιουργούμε ένα φορτίο με το όνομα ‘Gravity’ το οποίο αναπαριστά το φορτίο βαρύτητας του μοντέλου και επιλέγουμε το βήμα Rest ως πρώτο βήμα εφαρμογής του φορτίου αυτού.



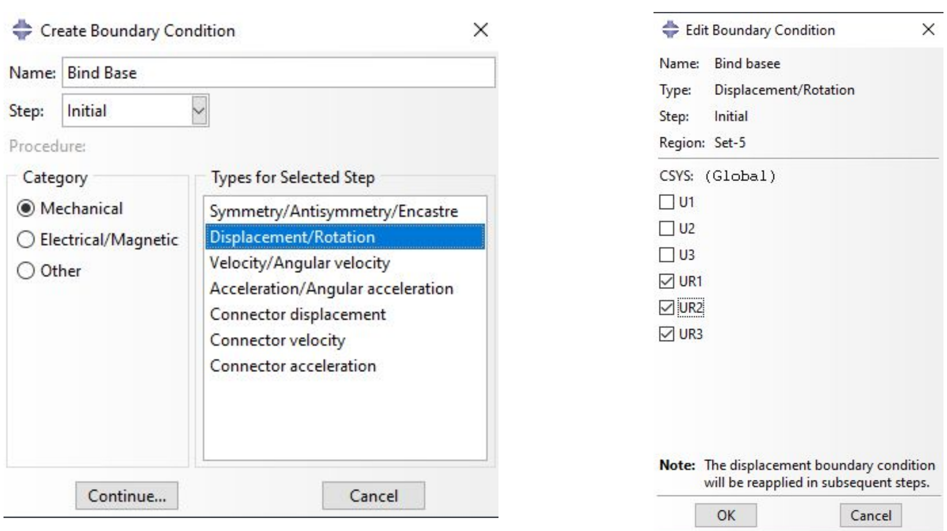
Εικόνα Α.17 Ορισμός φορτίου βαρύτητας



Εικόνα A.18 Δημιουργία φορτίου βαρύτητας

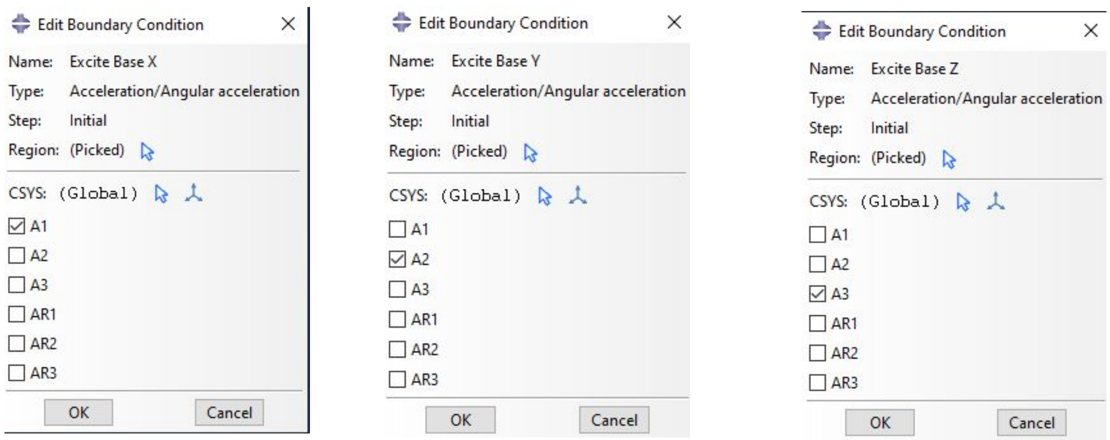
Να αναφερθεί πως σαν τύπος του φορτίου ορίσθηκε ως φορτίο βαρύτητας και σαν τιμή έλαβε την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας 9,81 $m/_{s^2}$ στον κατακόρυφο άξονα.

Για τη δημιουργία των συνοριακών συνθηκών πρέπει να γίνει διπλό κλικ στην επιλογή 'BCs' του δένδρου εργασιών και σαν πρώτη δέσμευση δημιουργείται μια με το όνομα 'Bind Base' με βήμα εφαρμογής το Initial (δηλαδή σε όλο το πείραμα) και τύπο 'Displacement/Rotation'. Επιλέχθηκαν σαν δέσμευση οι 3 στροφές καθώς η βάση μπορεί να μετακινείται ελεύθερα και στις 3 διευθύνσεις όπου εξετάζεται το πείραμα. Το σημείο στο οποίο εφαρμόστηκε η δέσμευση είναι το σημείο αναφοράς της βάσης (δηλαδή το κέντρο της).



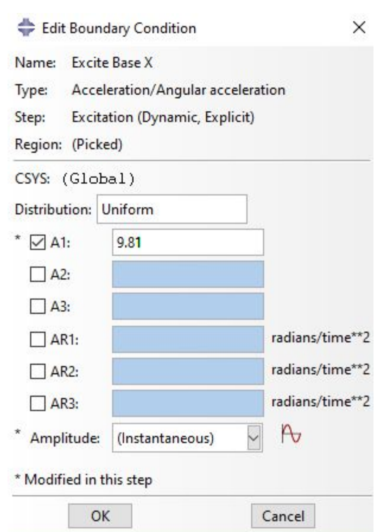
Εικόνα A.19 Δημιουργία συνοριακών συνθηκών

Παρομοίως θα δημιουργηθεί μια δέσμευση με την ονομασία 'Excite Base X' και βήμα εφαρμογής Initial με τύπο 'Acceleration/Angular acceleration' και με σημείο αναφοράς εκείνο της βάσης. Με αυτήν την συνοριακή συνθήκη θα είμαστε σε θέση να ασκήσουμε την διέγερση στη βάση του δοκιμίου ώστε να μελετηθεί το φαινόμενο του λικνισμού. Στο Excite Base X θα ασκείται επιτάχυνση στη διεύθυνση X, επομένως μορφώνοντας τα κατάλληλα εκείνα Bountary Conditions (δηλαδή και κατά Y και κατά Z) θα είμαστε σε θέση να μελετήσουμε το πρόβλημα με τρισδιάστατη προσέγγιση.



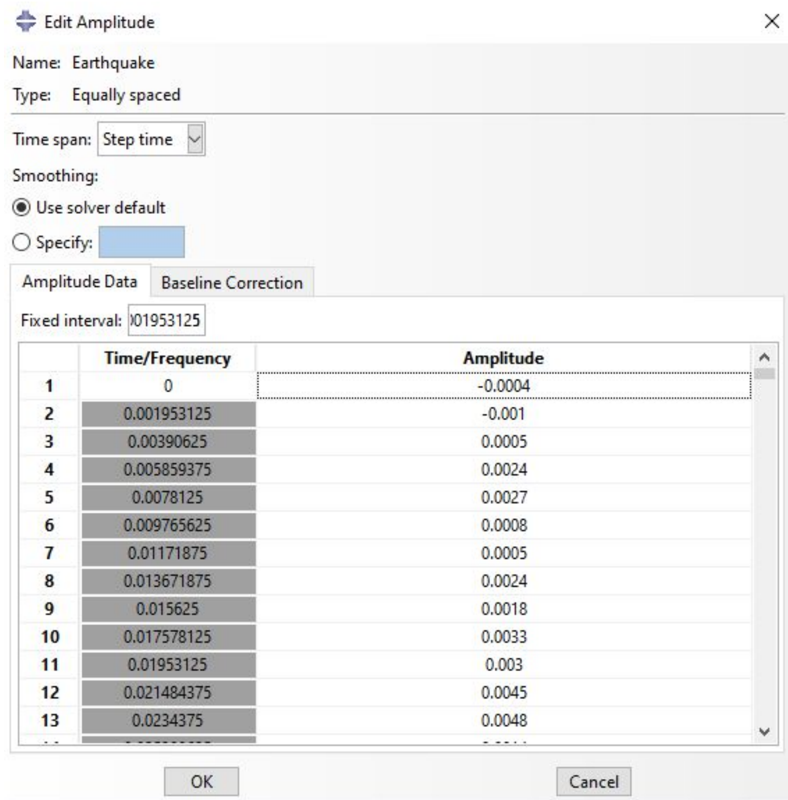
Εικόνα Α.20 Δημιουργία συνοριακών συνθηκών

Το τελευταίο βήμα για την κατασκευή του μοντέλου είναι το να ασκηθεί η κατάλληλη διέγερση στη βάση του σώματος. Έχοντας την χρονοϊστορία της επιτάχυνσης την οποία θέλουμε να ασκηθεί (π.χ. κάποιου σεισμού ή κάποιου ημιτονοειδή παλμού), ανοίγουμε διαδοχικά τα δένδρα 'BCs', 'Excite base', 'States' και κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή 'Excitation'.



Εικόνα Α.21 Ορισμός διέγερσης δοκιμίου

Πατώντας στο εικονίδιο δίπλα από το σημείο που αναγράφει 'Amplitude (Instantaneous)' είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε τη διέγερση, επιλέγουμε 'Equally Spaced' και προχωράει στο επόμενο παράθυρο. Εκεί πρέπει να επιλέξουμε το χρονικό βήμα όπου στη παρούσα διπλωματική όπως έχει προαναφερθεί έχουμε επιλέξει την τιμη 0,001953125 sec. Επίσης, στη κενή στήλη του Amplitudes μπορούμε να επικολλήσουμε τη χρονοιστορία της φόρτισης που θέλουμε να ασκηθεί όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα :



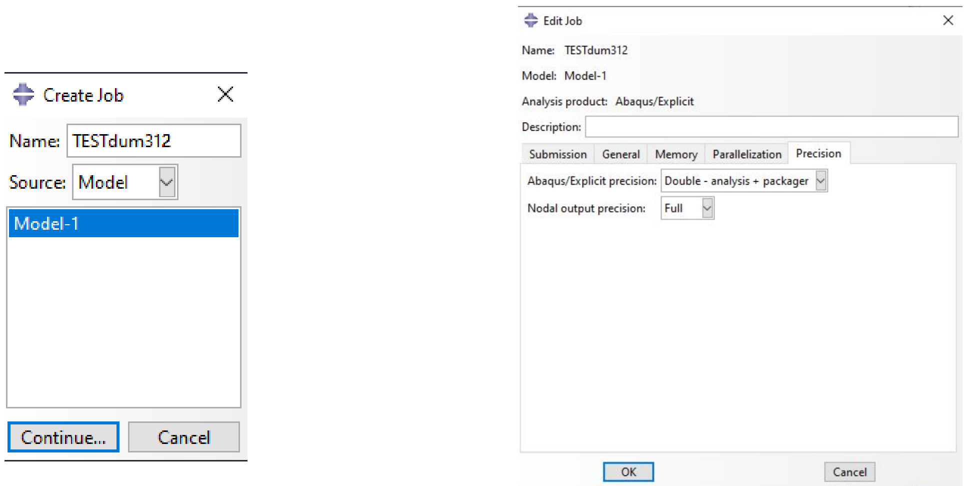
Εικόνα Α.22 Ορισμός διέγερσης δοκιμίου

Τέλος, αφού πατήσουμε ΟΚ επιστρέφουμε στο BC (Εικόνα Α.20) όπου θέλουμε να ασκηθεί αυτή η διέγερση και την επιλέγουμε στο 'Amplitude' αφού πλέον το πρόγραμμα θα μας δίνει την επιλογή.

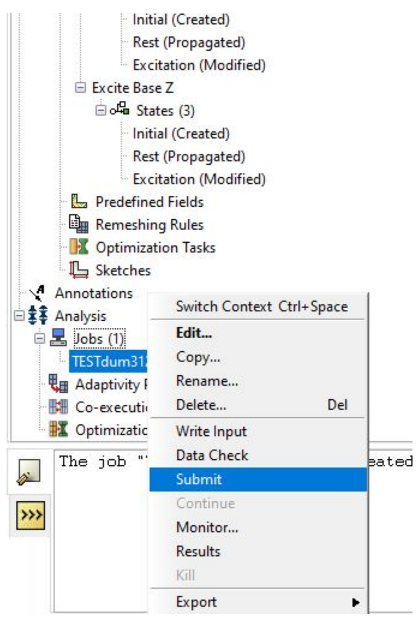
ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αυτό το σημείο το μοντέλο της προσομοίωσης είναι έτοιμο και το μόνο που απομένει είναι να ξεκινήσει η εκτέλεσή του από τον χρήστη. Αυτό πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός 'Job' από το δένδρο εργασιών, στο κομμάτι 'Analysis'.

Κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή Jobs και ονομάζουμε την εργασία ως 'TESTdum312' και πατάμε Continue. Στο παράθυρο που εμφανίζεται είναι απαραίτητο να ορισθεί η σωστή ακρίβεια για τους υπολογισμούς που θα πραγματοποιήσει το πρόγραμμα. Δεδομένου ότι ο λικνισμός είναι ένα έντονα μη γραμμικό φαινόμενο με υψηλή πολυπλοκότητα θα δωθεί στο μοντέλο η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στο πλαίσιο του υπολογισμού έτσι ώστε η προσομοίωση να έχει τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Αυτό πραγματοποιείται μέσω των επιλογών 'Double -analysis + packager' και 'Full' στην καρτέλα 'Precision'. Έπειτα πατάμε OK και το job έχει δημιουργηθεί όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα Α.23 Δημιουργία job στο Abaqus



Εικόνα Α.24 Έναρξη προσομοίωσης

Μετά από αυτό το job το οποίο ο χρήστης δημιούργησε θα υπάρχει στη λίστα των jobs στο δένδρο εργασιών (Analysis). Ο χρήστης θα πρέπει να κάνει δεξί κλικ στο job και να πατήσει την επιλογή Submit έτσι ώστε να ξεκινήσει η προσομοίωση, το οποίο φαίνεται καθώς δίπλα από το job αναγράφεται 'Running'. Όταν η προσομοίωση ολοκληρωθεί, η ένδειξη θα μετατραπεί σε 'Completed' και ο χρήστης θα επαναλάβει δεξί κλικ στην επιλογή Results ώστε να εμφανιστούν τα αποτελέσματα του πειράματος.