



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικής διάταξης με εξωτερικό
κύκλωμα συνδυασμένης εμπέδησης για ημιενεργό
αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας**

Γαλαζούλας Χρήστος

1064508

Επιβλέπων Καθηγητής:

Σαραβάνος Α. Δημήτριος

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών
του Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, [06/2024]

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών
Μηχανικών

Γαλαζούλας Χρήστος

© 2024 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

Γαλαζούλα Χρήστο

1064508

την 8 Ιουλίου 2024

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά την οικογένεια μου και τους φίλους μου, που με υποστήριξαν στην εκπλήρωση των φοιτητικών μου υποχρεώσεων, και τη πίστη τους στους προσωπικούς μου στόχους. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω το εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής και Ταλαντώσεων, τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Σαραβάνο Δημήτριο, για την εξαιρετική καθοδήγησή του και τη βοήθεια του, και τον διδάκτωρ Χατζηαθανασίου Γρήγορη, ο οποίος ήταν κρίσιμο μέλος στη συγγραφή της συγκεκριμένης εργασίας και κύριο στήριγμα της προσπάθειάς μου.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Περίληψη Εργασίας:

Αυτή η εργασία αναλύει τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης του πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή APA-1500L από την Cedrat Technologies. Η πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρονικών συστημάτων, αλλά και η ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, φέρουν στο προσκήνιο προσπάθειες για ανάκτηση ενέργειας από πολλές πιθανές πηγές. Μία πηγή με μεγάλο περιθώριο αξιοποίησης είναι οι κραδασμοί σε δυναμικά συστήματα. Μέσω μιας πιεζοηλεκτρικής συσκευής, είναι δυνατόν να επιτευχθεί απόσβεση κραδασμών σε συστήματα σε συνδυασμό με ανάκτηση ενέργειας, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί στη λειτουργία δευτερευόντων συστημάτων.

Ο στόχος είναι να μοντελοποιηθεί μια πιεζοηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιείται σε ένα ημι-ενεργό σύστημα απόσβεσης κραδασμών. Το σύστημα έχει παρουσιάσει σημαντικές δυνατότητες στη μείωση των δονήσεων από πολλαπλές δομικές μορφές στο εύρος χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιώντας μια μικρή βοηθητική μάζα. Τα αρχικά αναλυτικά μοντέλα θα συγκριθούν με σύνθετα τρισδιάστατα μοντέλα τα οποία βελτιώνουν τις προβλέψεις των αναλυτικών. Το εύρος της εργασίας είναι ο λεπτομερής σχεδιασμός της συσκευής σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο χώρο, να αξιολογηθούν οι δυνατές μέθοδοι διακριτοποίησης σε κάθε περίπτωση και να ενσωματωθούν οι ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στη συσκευή.

Δισδιάστατα μοντέλα δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τα λογισμικά Abaqus και MATLAB. Τα μοντέλα χρησιμοποιώντας στοιχεία πλαισίου και δικτυώματος συγκρίνονται σε στατικές και δυναμικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα στοιχεία. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών με πολλά στοιχεία επιτυγχάνεται σύγκλιση διακριτοποίησης καθορίζοντας έτσι τον αριθμό των στοιχείων που είναι απαραίτητα για να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα δισδιάστατα μοντέλα ήταν επιτυχή στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πραγματικής συσκευής στο φάσμα συχνοτήτων της πρώτης ιδιοσυχνότητας της συσκευής.

Τρισδιάστατα μοντέλα προετοιμάστηκαν στο Abaqus και χρειάστηκαν λεπτομερή μελέτη της γεωμετρίας της συσκευής και πολλές συγκρίσεις διακριτοποίησης πριν καταλήξουμε στην βέλτιστη τεχνική. Τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν σε σύγκριση με τα δισδιάστατα μοντέλα προβλέποντας μια δεύτερη συχνότητα συντονισμού όπως μετρήθηκε στην πειραματική εκστρατεία. Για αυτούς τους λόγους η ηλεκτρομηχανική ενσωμάτωση εξετάζεται χρησιμοποιώντας αυτά τα μοντέλα.

Προκειμένου να αποκτηθούν οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού για χρήση ως είσοδο για το μοντέλο, πραγματοποιούνται πειραματικές μετρήσεις στη συσκευή και οι καταστατικές εξισώσεις για το μονό πιεζοηλεκτρικό στρώμα μετατρέπονται για να

εκφραστούν οι εξισώσεις κίνησης των στοιβάδων πολλαπλών στρώσεων. Για πιο ρεαλιστική προσομοίωση, η συστοιχία της συσκευής μοντελοποιείται ως πολλαπλά πιεζοηλεκτρικά στρώματα συνδεδεμένα ηλεκτρικά παράλληλα χρησιμοποιώντας κατάλληλους περιορισμούς εξισώσεων. Τα αποτελέσματα με τους κατάλληλους διορθωτικούς συντελεστές που χρησιμοποιούνται στις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ικανοποιητικά με τη συσκευή να δείχνει συμπεριφορά πολύ κοντά στις μηχανικές και ηλεκτρικές πειραματικές μετρήσεις.

Το αποτέλεσμα είναι ο σχεδιασμός και η επαλήθευση ενός μοντέλου για την ειδική πιεζοηλεκτρική συσκευή η οποία με γεωμετρικές βελτιστοποιήσεις είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί σε μοντέλα με σύνθετες δομές για την πρόβλεψη των ικανοτήτων ελέγχου δονήσεων της συσκευής.

Λέξεις-κλειδιά: Ενεργειακή Συγκομιδή, Έλεγχος Κραδασμών, Πιεζοηλεκτρικοί Αποσβεστήρες, Μοντελοποίηση Πεπερασμένων Στοιχείων, Abaqus, MATLAB, Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση

Abstract

Modeling of a piezoelectric device with an external combined impedance circuit for a semi-active tuned mass damper

Galazoulas Christos

This work analyzes the procedure followed to create simulation models of the APA-1500L piezoelectric actuator, from Cedrat Technologies. Advances in the field of electronic systems, as well as the need to reduce energy consumption, bring to the fore efforts to recover energy from many possible sources. The structural vibrations of dynamic systems could stand as a source with a large scope for energy harvesting. Through a piezoelectric device, it is possible to achieve vibration damping in systems combined with energy recovery, which can be exploited in the operation of secondary systems.

The goal is to model a piezoelectric device that is used in a semi-active vibration suppression system. The system has shown significant potential in reducing vibrations from multiple structural modes in the low-frequency range using a small auxiliary mass. The initial analytical models are going to be compared to complex 3D models, which improve the predictions of the analytical ones. The scope of work is the detailed design of the device in 2D and 3D space, to evaluate the possible meshing methods in each case, and to integrate the electromechanical properties of the piezoelectric arrays to the device.

2D models are created using Abaqus and MATLAB software suites. Models using truss and frame elements are compared in static and dynamic simulations, using one or more elements. During the multi-element tests, meshing convergence is achieved, thus determining the number of elements necessary to have satisfactory results. The 2D models were successful in predicting the behavior of the real device in the frequency spectrum of the first eigenfrequency of the device.

3D models were prepared in Abaqus and needed a thorough study of the device's geometry, and a lot of meshing comparisons before settling for the optimal meshing technique. Results were improved in comparison to 2D models, predicting a second resonance frequency, as measured in the experimental campaign. For these reasons, the electromechanical integration is explored using these models.

In order to obtain the piezoelectric properties of the material to use as input for the model, experimental measurements are made in the device, and the constitutive equations for the single piezoelectric layer are manipulated to express the equations of motion for multi-layer stacks. For a more realistic simulation, the stack device is modeled as multiple piezoelectric layers, electrically connected in parallel, using

appropriate equation constraints. The results, with some corrective constants used in the piezoelectric properties, are satisfactory, with the device showing behavior very close to the mechanical and electrical experimental measurements.

The result is the design and verification of a model for the specialty piezoelectric device, which with some corrections in its geometry is able to be used in models with complex host structures, for predicting the device vibration control capabilities.

Keywords:

Energy Harvesting, Vibration Control, Piezoelectric Dampers ,Finite Element Modeling, Abaqus, MATLAB, 3D Modeling

Περιεχόμενα

.....	4
1. Εισαγωγή:	11
Περιγραφή του Προβλήματος.....	11
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
Σκοπός της Εργασίας	17
2. Στήσιμο του Προβλήματος	20
Χαρακτηριστικά Διάταξης	20
Δίκτομο Στοιχείο επίπεδου δικτυώματος:.....	26
Δίκτομο επίπεδο στοιχείο πλαισίου (Euler):	27
Δίκτομο επίπεδο στοιχείο πλαισίου με διάτμηση (Timoshenko)	28
Ιδιότητες Πιεζοηλεκτρικού Υλικού	30
Πιεζοηλεκτρικές σταθερές στα αναλυτικά μητρώα.....	34
3. 2D Μοντέλα σε υπολογιστικά Πακέτα:.....	37
2D Models	37
Μοντέλα w/ Truss Elements:.....	37
Μοντέλα w/ Beam Elements:.....	38
Διορθωμένα μοντέλα:	40
4. 3D Μοντέλα σε υπολογιστικά Πακέτα:.....	50
3D Models	50
5. Πιεζοηλεκτρικά Μοντέλα σε υπολογιστικά Πακέτα:	59
2D Πιεζοηλεκτρικά Μοντέλα.....	59
3D Πιεζοηλεκτρικά Μοντέλα.....	62
Απλοποιημένη πιεζοηλεκτρική διάταξη	62
Λεπτομερής πιεζοηλεκτρική διάταξη.....	70
6. Συμπεράσματα.....	79
Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	81
Βιβλιογραφία	82
Appendix.....	84
Matlab Model	84

Εικόνα 1.1 Πόλωση πιεζοηλεκτρικού υλικού	12
Εικόνα 1.2- Απεικόνιση πιεζοηλεκτρικού φαινομένου	12
Εικόνα 1.3 Τυπικές Πιεζοηλεκτρικές διατάξεις (Mohith, S., & et al. (2021).	13
Εικόνα 1.4 Διάφοροι πιεζοηλεκτρικοί actuators της Cedrat Technologies	15
Εικόνα 1.5 Amplified Piezoelectric Actuator	15
Εικόνα 1.6 Διάταξη απόσβεσης κραδασμών σε περιστρεφόμενο δίσκο	16
Εικόνα 1.7 Διάταξη απόσβεσης κραδασμών περιστρεφόμενου άξονα	16
Εικόνα 1.8 Υβριδική μαγνητική-πιεζοηλεκτρική διάταξη απόσβεσης (Yongqi Zhang et al, 2023)..	16
Εικόνα 1.9 Στιγμιότυπο της πειραματικής διάταξης	17
Εικόνα 1.10 Στιγμιότυπο της πειραματικής διάταξης (1)	18
Εικόνα 2.1 Διαστασιολογικό σχέδιο του APA 1500L	20
Εικόνα 2.2- Σκαρίφημα 2D Μοντέλου	22
Εικόνα 2.3- Σχηματική περιγραφή συστήματος	24
Εικόνα 2.4- Κινηματικές Εξισώσεις συστήματος (στοιχεία δικτυώματος)	25
Εικόνα 2.5-Στοιχείο πλαισίου.....	27
Εικόνα 2.6-Στοιχείο Πλαισίου με διάτμηση	28
Εικόνα 3.1- Απεικόνιση Μοντέλου Abaqus.....	38
Εικόνα 3.2-Διάγραμμα FRF 2D Μοντέλου- Truss Elements.....	38
Εικόνα 3.3- Απεικόνιση Μοντέλου Abaqus (Π.Σ. Πλαισίου)	38
Εικόνα 3.4- Διάγραμμα FRF 2D Μοντέλου- Beam Elements	39
Εικόνα 3.5- Σύγκριση αρχικών και τροποποιημένων διαστάσεων	40
Εικόνα 3.6- Διάγραμμα FRF Διορθωμένου Μοντέλου- Truss Elements.....	41
Εικόνα 3.7 Διάγραμμα FRF Διορθωμένου Μοντέλου- Beam Elements	41
Εικόνα 3.8- Απεικόνιση τροποποιημένου Μοντέλου (Abaqus Truss)	41
Εικόνα 3.9- Απεικόνιση τροποποιημένου Μοντέλου (Abaqus Beam)	42
Εικόνα 3.10- 1η Ιδιομορφή 2D Μοντέλου	42
Εικόνα 3.11- 2η Ιδιομορφή 2D Μοντέλου	43
Εικόνα 3.12- Σύγκριση διακριτοποίησης (1η Ιδιοσυχνότητα)	44
Εικόνα 3.13- Σύγκριση διακριτοποίησης (Μετατόπιση σε mm).....	44
Εικόνα 3.14- Συγκεντρωτικά διαγράμματα FRF (Truss)	46
Εικόνα 3.15- Συγκεντρωτικά διαγράμματα FRF (Beam)	46
Εικόνα 3.16- Σύγκριση Damping (2D)	47
Εικόνα 3.17- Σύγκριση Damping (1).....	48
Εικόνα 3.18-Τελική σύγκριση 2D Μοντέλων.....	48
Εικόνα 4.1- Απεικόνιση 3D Μοντέλου.....	50
Εικόνα 4.2-- Απεικόνιση 3D Μοντέλου (1)	51
Εικόνα 4.3- Απεικόνιση Πιεζοηλεκτρικής συσκευής	51
Εικόνα 4.4- Πλαίσιο 3D Μοντέλου	52
Εικόνα 4.5- Πιεζοηλεκτρική συστοιχία 3D Μοντέλου	52
Εικόνα 4.6- Medial Axis Coarse Model (3D).....	53
Εικόνα 4.7- Medial Axis Coarse Model (3D) (1)	53
Εικόνα 4.8-1η Ιδιομορφή 3D Μοντέλου	55
Εικόνα 4.9- 2η Ιδιομορφή 3D Μοντέλου	56
Εικόνα 4.10- Συγκριτικό διάγραμμα FRF (3D vs 2D)	58
Εικόνα 5.1-Διάγραμμα FRF 2D Μοντέλου (Short Circuit).....	59
Εικόνα 5.2- Διάγραμμα FRF Πιεζοηλεκτρικού 2D Μοντέλου	60
Εικόνα 5.3- Διάγραμμα Διαφοράς δυναμικού 2D Μοντέλου	61
Εικόνα 5.4- Τελικά διαγράμματα 2D Μοντέλων	61
Εικόνα 5.5- Στιγμιότυπο επιλογής τύπου στοιχείου (Abaqus)	63
Εικόνα 5.6-Επιλογή πιεζοηλεκτρικών σταθερών (Abaqus).....	63
Εικόνα 5.7- Πόλωση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου	64
Εικόνα 5.8- Περιορισμοί μελών 3D μοντέλου	64
Εικόνα 5.9- Συνοριακές συνθήκες 3D μοντέλου	65

Εικόνα 5.10-Συνοριακές συνθήκες 3D μοντέλου (1).....	65
Εικόνα 5.11- Ηλεκτρικές συνοριακές συνθήκες.....	66
Εικόνα 5.12-Επιλογή ασκούμενου φορτίου	66
Εικόνα 5.13-Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού (3D μοντέλο)	67
Εικόνα 5.14- Μετατόπιση λόγω στατικής φόρτισης (3D μοντέλο)	68
Εικόνα 5.15- Διάγραμμα FRF πιεζοηλεκτρικού 3D μοντέλου	68
Εικόνα 5.16- Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού 3D μοντέλου	69
Εικόνα 5.17-Διαγράμματα FRF απλοποιημένου πιεζοηλεκτρικού 3D μοντέλου	70
Εικόνα 5.18-Στοιχεία λεπτομερούς πιεζοηλεκτρικής συστοιχίας	71
Εικόνα 5.19-Σημεία σύνδεσης στοιχείων 3D μοντέλου	72
Εικόνα 5.20-Στιγμιότυπο ολοκληρωμένου 3D μοντέλου	72
Εικόνα 5.21-Διαμόρφωση ηλεκτρικής συνδεσμολογίας.....	73
Εικόνα 5.22-Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού λεπτομερούς 3D μοντέλου	74
Εικόνα 5.23-Μετατόπιση σε στατική καταπόνηση- 3D λεπτομερές μοντέλο.....	74
Εικόνα 5.24- Διάγραμμα FRF λεπτομερούς 3D μοντέλου	75
Εικόνα 5.25- Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού λεπτομερούς 3D μοντέλου	76
Εικόνα 5.26- Διάγραμμα FRF λεπτομερούς 3D μοντέλου	76
Εικόνα 5.27- Συγκριτικά διαγράμματα 3D μοντέλων.....	77
Εικόνα 6.1-Συγκριτικά διαγράμματα FRF	79
Εικόνα 6.2-Συγκριτικό διάγραμμα διαφοράς δυναμικού	80
Εικόνα 6.3-Τελικό Συγκριτικό Διάγραμμα FRF	81

Πίνακας 1- Ιδιότητες υλικών του APA 1500L	23
Πίνακας 2- Διαστασιολογικές ιδιότητες του APA 1500L.....	23
Πίνακας 3 Περιγραφή συμβόλων μητρώων	25
Πίνακας 4- Πιεζοηλεκτρικές ποσότητες.....	31
Πίνακας 5- Πίνακας Ιδιοτήτων αρχικών μοντέλων	39
Πίνακας 6- Ιδιότητες Διορθωμένων μοντέλων	42
Πίνακας 7- Πίνακας Αρχικών 3D Model.....	54
Πίνακας 8- Πίνακας δεδομένων προσομοιώσεων (3D Models)	54
Πίνακας 9-Σύγκριση 1ης ιδιοσυχνότητας	62
Πίνακας 10-Επαλήθευση ηλεκτρικών αποτελεσμάτων	67
Πίνακας 11-Επαλήθευση ηλεκτρικών αποτελεσμάτων (1)	74
Πίνακας 12-Συγκριτικά ηλεκτρικά αποτελέσματα	78

1. Εισαγωγή:

Περιγραφή του Προβλήματος

Στη μηχανική, ιδιαιτέρως στους τομείς των οχημάτων και της αεροναυπηγικής, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για απόσβεση κραδασμών που προέρχονται από εξωτερικούς παράγοντες. Για την μείωση αυτών των κραδασμών έχουν αξιοποιηθεί πολλές κατηγορίες αποσβεστήρων, από υλικά με υψηλό συντελεστή απόσβεσης, σε περίπλοκους μηχανισμούς ανάρτησης με μεταβαλλόμενη απόσβεση ή ενεργό έλεγχο απόσβεσης, μέσω ηλεκτρικών κινητήρων. Η κατεύθυνση που υπάρχει αυτή τη στιγμή στη βιομηχανία είναι η βελτίωση συστημάτων ενεργών και ημι-ενεργών διατάξεων με στόχο τη βελτίωση του εύρους λειτουργίας των διατάξεων αλλά και τη μείωση της πολυπλοκότητας αλλά και του βάρους.

Με βάση αυτή τη κατεύθυνση αλλά και λόγω της ανάπτυξης των εφαρμογών που έχουν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, γίνεται προσπάθεια για ανάπτυξη διατάξεων απόσβεσης κραδασμών με πιεζοηλεκτρικές συσκευές

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των καινοτόμων λύσεων μπορεί να γίνει μέσω πειραματικών διατάξεων, οι οποίες δοκιμάζουν την εκάστοτε εφαρμογή στις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας.

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα όμως, για την αξιολόγηση πρωτότυπων λύσεων, ο τομέας της μηχανικής στηρίζεται όλο και περισσότερο σε μεθόδους προσομοίωσης με σκοπό το σχεδιασμό εξαρτημάτων.

Μέσω της προσομοίωσης οι μηχανικοί μπορούν να λύσουν προβλήματα σχεδιασμού τα οποία θα προκαλούσαν αστοχία ή προβλήματα διαστασιολόγησης, χωρίς να κατασκευαστεί το εξάρτημα. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται κατά κόρον για την διακριτοποίηση των κατασκευών σε πολλές εφαρμογές του μηχανολόγου μηχανικού, και θα χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα εργασία. Στη συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων.

Επίσης, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία θα χρησιμοποιηθούν με τη μορφή ηλεκτρικών εξισώσεων, ή ως στερεά στοιχεία με ενσωματωμένες τις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες.

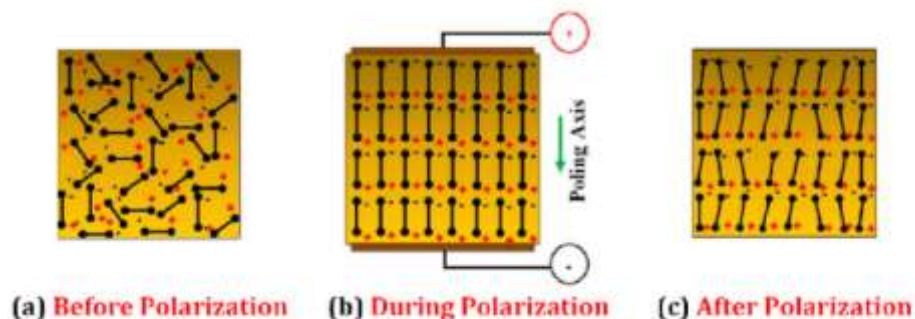
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μία εισαγωγή στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και στις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται για μείωση κραδασμών.

Αρχή λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών υλικών

Το κύριο χαρακτηριστικό των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι οι ιδιαίτερες ηλεκτρομηχανικές τους ιδιότητες. Συγκεκριμένα, ορισμένα υλικά αποτελούνται από

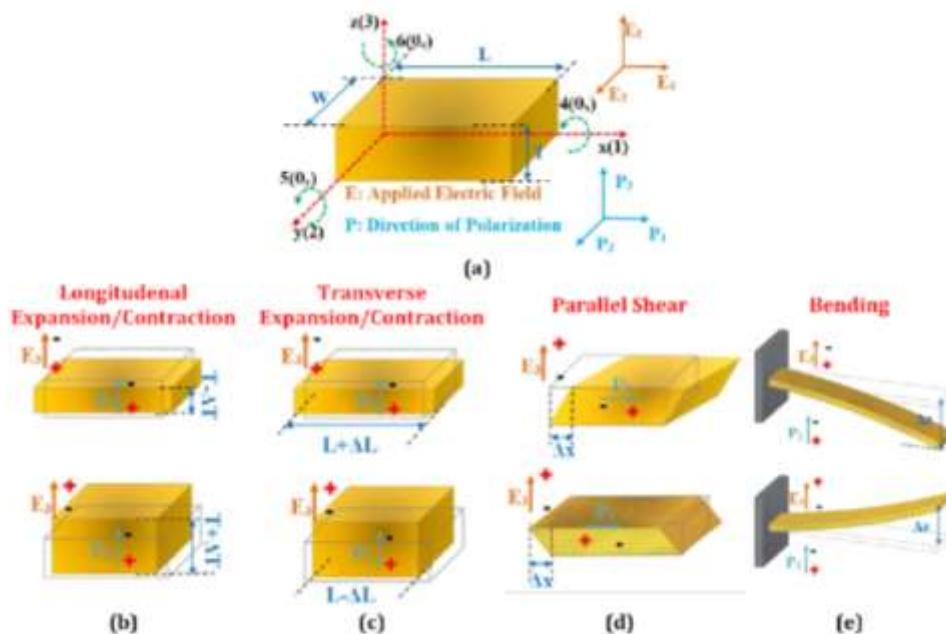
τυχαία προσανατολισμένα δίπολα στη δομή τους. Μετά από τη διαδικασία της πόλωσης, η οποία εκθέτει το υλικό σε υψηλή θερμοκρασία και τους ασκούνται έντονα ηλεκτρικά φορτία, γίνεται προσανατολισμός αυτών των διπόλων, ο οποίος τους επιτρέπει αυτή τη συμπεριφορά.



Εικόνα 1.1 Πόλωση πιεζοηλεκτρικού υλικού

Η εφαρμογή εξωτερικού ερεθίσματος σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό είτε με τη μορφή μηχανικής τάσης (που ως αποτέλεσμα θα έχει τη παραμόρφωση του υλικού) είτε με τη μορφή ηλεκτρικού δυναμικού, θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου ή μηχανικής τάσης αντίστοιχα, λόγω της προσανατολισμένης διάταξης των ηλεκτρικών διπόλων που έχει το υλικό.

Στη παρακάτω εικόνα, απεικονίζονται οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να μεταφραστούν μηχανικά οι ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών.



Εικόνα 1.2- Απεικόνιση πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Ιστορική αναδρομή

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία είναι γνωστά από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα με την ανακάλυψη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου από τους αδελφούς Curie. Μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα έχουν δημιουργηθεί πολυμερή πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, αλλά η χρήση τους έχει περιοριστεί σε εφαρμογές εκπομπών σημάτων. Η έρευνα για χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών για χρήση σε μηχανικές εφαρμογές ξεκινάει το 1970 και το 1980 άρχισε η ανάπτυξη των πιεζοηλεκτρικών stacks.

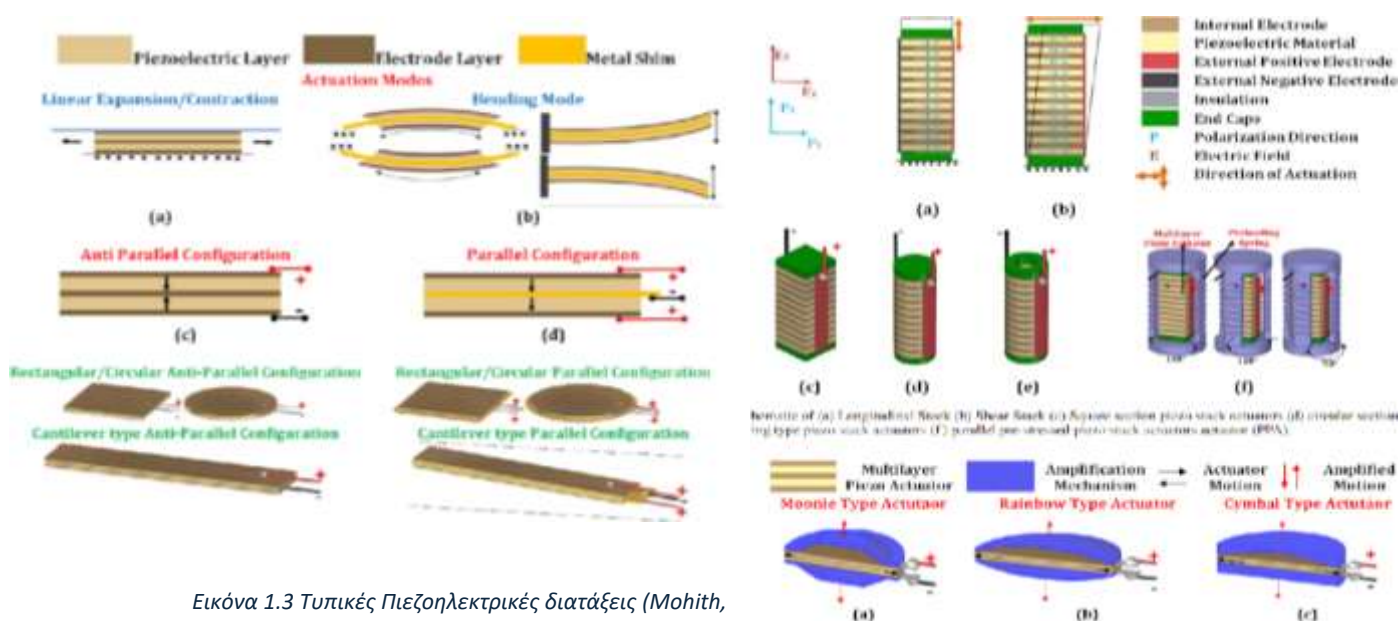
Στη συνέχεια της αξιοποίησής τους ως υλικό για εφαρμογές απόσβεσης, άρχισε η ανάπτυξη συνδυασμένων μοντέλων κυκλωμάτων (H.H. Luo, 1993), μελετώντας τη συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών σε ένα εύρος μοντέλων κυκλωμάτων, τα οποία αποτέλεσαν βάση για μελλοντικές εφαρμογές.

Παραδείγματα πιεζοηλεκτρικών διατάξεων

Οι πιεζοηλεκτρικές διατάξεις στελεχώνονται κυρίως από 2 μορφές.

Η 1η είναι η χρήση πιεζοηλεκτρικού patch απευθείας στο αντικείμενο ενδιαφέροντος, με άμεση αλληλεπίδραση του πιεζοηλεκτρικού με αυτό. Κυρίως εφαρμόζεται σε εφαρμογές καμπτικής απόσβεσης λόγω του μικρού εύρους παραμόρφωσης που έχει ένα υλικό μικρού πάχους όπως ένα πιεζοηλεκτρικό patch.

Η 2η είναι η δημιουργία σ από στρώσεις πιεζοηλεκτρικού, τα οποία δημιουργούνται βάζοντας πολλαπλές στρώσεις μαζί ώστε να πολλαπλασιάζεται η παραμόρφωσή τους και να είναι δυνατή η χρήση τους σε εφαρμογές αξονικής απόσβεσης.



Εικόνα 1.3 Τυπικές Πιεζοηλεκτρικές διατάξεις (Mohith, S., & et al. (2021).

Σήμερα, υπάρχουν διατάξεις που εξειδικεύονται στην ενεργητική λειτουργία, δηλαδή την επιβολή μετατοπίσεων, και διατάξεις που εξειδικεύονται στη παθητική λειτουργία, δηλαδή τη προσπάθεια εξουδετέρωσης εξωτερικών μετατοπίσεων (κυρίως ανεπιθύμητων ταλαντώσεων).

Παθητικός έλεγχος κραδασμών μέσω πιεζοηλεκτρικών διατάξεων (Patches, stacks), γίνεται μέσω τοποθέτησης κυκλωμάτων (RC, RLC), όπου η ηλεκτρική ενέργεια που

δημιουργείται κατά τη παραμόρφωση των στοιχείων διαχέεται μέσω του κυκλώματος.

Στις σύγχρονες διατάξεις, όπως και αυτή που περιλαμβάνεται το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας, είναι συνηθισμένη η παρουσία μεταβλητού κυκλώματος το οποίο θα προσδίδει στη διάταξη ημι-ενεργή λειτουργία.

Ο ημιενεργός έλεγχος ταλαντώσεων γίνεται μέσω κυκλωμάτων που έχουν μεταβλητά στοιχεία ηλεκτρικής εμπίδησης. Με αυτό τον τρόπο, το κύκλωμα έχει τη δυνατότητα να μεταβληθεί (π.χ. η τιμή της αντίστασης R) ανάλογα με τις ιδιότητες του κραδασμού που δέχεται η κατασκευή ενδιαφέροντος. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η απόσβεση κραδασμών σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων.

Ο ενεργός έλεγχος κραδασμών εκτελείται με την εφαρμογή δύναμης στην υπό ταλάντωση κατασκευή. Στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών διατάξεων, αυτό επιτυγχάνεται μέσω εφαρμογής διαφοράς δυναμικού στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, το οποίο μέσω της παραμόρφωσής του ασκεί δύναμη, είτε άμεσα, είτε μέσω διάταξης μηχανικού ενισχυτή στη κατασκευή ενδιαφέροντος.

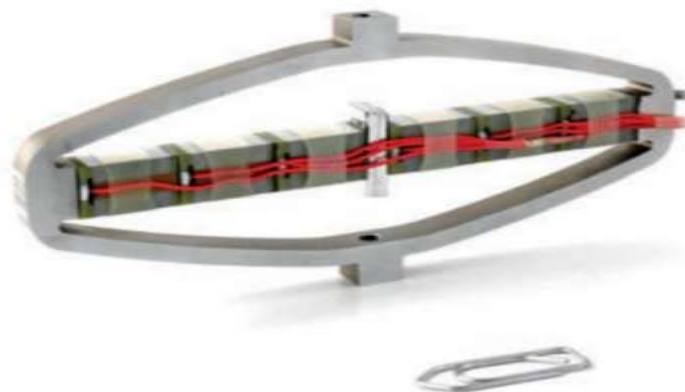
Υπάρχουν πολλοί τύποι πιεζοηλεκτρικών διατάξεων, κατάλληλες για εφαρμογές σε πολλούς τομείς και διάφορους τύπους ταλαντώσεων. Οι τύποι μπορούν να κατηγοριοποιούνται σε παθητικής ή ενεργητικής απόσβεσης. Οι εφαρμογές ημιενεργής απόσβεσης υπάγονται και στα 2 πεδία. Οι ημιενεργές διατάξεις δεν απαιτούν εξωτερική παροχή ενέργειας, όμως το μεταβλητό κύκλωμα έχει ενεργητική λειτουργία, έτσι δεν είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός της διάταξης ως παθητική.

Εφαρμογές ενεργού ελέγχου:

Ένα μεγάλο κομμάτι των εφαρμογών ενεργού ελέγχου συναντάται στους τομείς της μικρομηχανικής, λόγω της μεγάλης ακρίβειας μεταξύ ηλεκτρικών ερεθισμάτων και μηχανικής απόκρισης που προσφέρουν οι πιεζοηλεκτρικές διατάξεις και το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε διατάξεις μικροενεργοποιητών. Με τη δημιουργία ενισχυόμενων πιεζοηλεκτρικών διατάξεων, έγινε δυνατή η δημιουργία πολλαπλασιασμού της μηχανικής επιμήκυνσης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων αλλά και τη βελτίωση της απόκρισής τους, καθιστώντας δυνατή τη χρήση τους σε εφαρμογές πέρα από το μικρόκοσμο της μικρομηχανικής, όπως τον έλεγχο ταλαντώσεων ή για τη μεταβολή γεωμετρικών στοιχείων, π.χ. σε εφαρμογές ενεργών αεροδυναμικών στοιχείων στην αεροναυπηγική [REF]. Μεγάλο αριθμό λύσεων προσφέρει σε αυτόν τον τομέα η Cedrat Technologies, με την ανάπτυξη εμπορικών ενεργοποιητών με μεγάλο εύρος εφαρμογών.



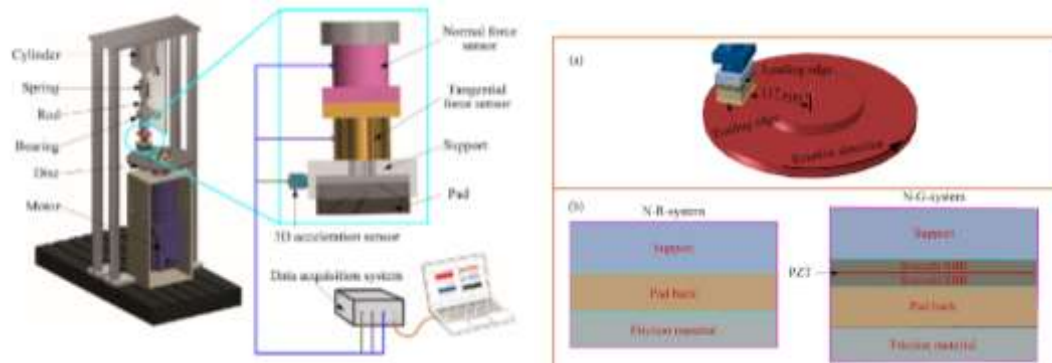
Εικόνα 1.4 Διάφοροι πιεζοηλεκτρικοί actuators της Cedrat Technologies



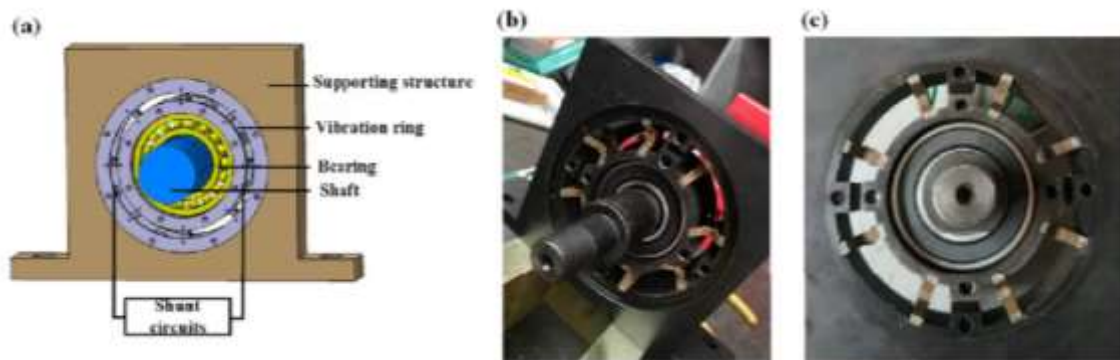
Εικόνα 1.5 Amplified Piezoelectric Actuator

Εφαρμογές παθητικού ελέγχου:

Επίσης, έχουν γίνει έρευνες για δημιουργία διατάξεων απόσβεσης σε περιστροφικά συστήματα, είτε σε αξονικές (W. Chen et al, 2020) είτε σε ακτινικές (Huan He et al, 2020) ταλαντώσεις.

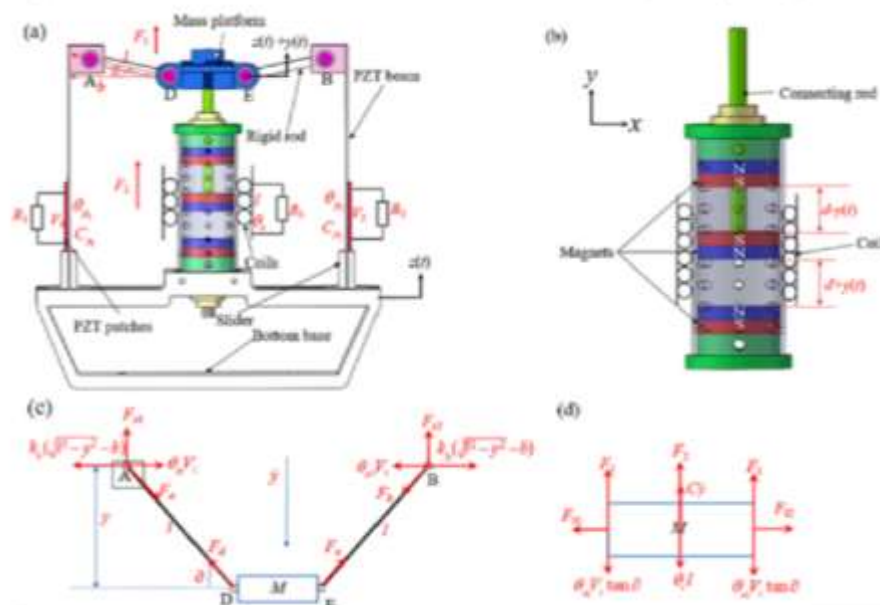


Εικόνα 1.6 Διάταξη απόσβεσης κραδασμών σε περιστρεφόμενο δίσκο



Εικόνα 1.7 Διάταξη απόσβεσης κραδασμών περιστρεφόμενου άξονα

Άλλες αξιοσημείωτες προσπάθειες είναι η σύνθεση μαγνητικών με πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για τη δημιουργία αποσβεστήρων μεγάλου εύρος λειτουργίας με υψηλής απόδοσης ανάκτηση ενέργειας (Yongqi Zhang et al, 2023).



Εικόνα 1.8 Υβριδική μαγνητική-πιεζοηλεκτρική διάταξη απόσβεσης (Yongqi Zhang et al, 2023).

Ο τύπος διάταξης που θα αναλυθεί στη συγκεκριμένη εργασία είναι ενισχυμένος πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής, ο οποίος χρησιμοποιείται στο εργαστήριο ως ημιενεργός αποσβεστήρας.

Το εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής και Ταλαντώσεων έχει αναπτύξει μία διάταξη με ενισχυμένο πιεζοηλεκτρικό αποσβεστήρα και συνδεδεμένο κύκλωμα, με σκοπό τη δημιουργία μιας ημιενεργής διάταξης για απόσβεση ταλαντώσεων και ανάκτηση ενέργειας. Χρειάζεται η ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης 3D το οποίο θα είναι πιστό στη γεωμετρία και τη συμπεριφορά της διάταξης. Αυτό θα εξασφαλιστεί με σύγκριση του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα της πραγματικής διάταξης, έτσι ώστε να μελετηθούν οι περαιτέρω δυνατότητές του. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών της διάταξης περιλαμβάνουν την απόσβεση κραδασμών σε αεροπορικές κατασκευές (Grigoris Chatziathanasiou, 2021) και την απόσβεση κραδασμών ευρύ φάσματος σε μεγάλες κατασκευές (Grigorios M. Chatziathanasiou, 2022)



Εικόνα 1.9 Στιγμιότυπο της πειραματικής διάταξης

Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας είναι η μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικής διάταξης αποσβεστήρα ταλαντώσεων, με στόχο τη χρήση του σε προσομοιώσεις σχετικές με το αντικείμενο.

Το αντικείμενο μελέτης είναι ο πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης APA-1500L της Cedrat Technologies, ο οποίος είναι κατασκευασμένος για χρήση σε εφαρμογές ενεργητικής απόσβεσης ταλαντώσεων. Η υψηλή πιεζοηλεκτρική σύζευξη και αρκετά χαμηλή δυσκαμψία της συγκεκριμένης διάταξης την κάνει κατάλληλη ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποσβεστήρας σε ημι-ενεργή διάταξη Tuned Mass Damper. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από τη συσκευή συνδεδεμένη με το εξωτερικό κύκλωμα σε συνδυασμό με αναρτώμενη μάζα. Στη συγκεκριμένη εργασία θα

μελετηθεί η συμπεριφορά της διάταξης παθητικά, ώστε να είναι δυνατή η χρήση των μοντέλων για προσομοιώσεις ημι-ενεργής απόσβεσης.



Εικόνα 1.10 Στιγμιότυπο της πειραματικής διάταξης (1)

Ο τελικός σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η δημιουργία 3D μοντέλου προσομοίωσης του αποσβεστήρα με πιστή γεωμετρία αλλά και πιστές μηχανικές ιδιότητες (π.χ. Δυσκαμψία, ιδιοσυχνότητες)

Για τη συγκεκριμένη διάταξη, δεν βρέθηκε κάποιο διαθέσιμο εργαλείο προσομοίωσης στον 3D χώρο, αλλά μόνο στον 2D και αυτό μόνο σε περιβάλλον Matlab, με απλοποιημένα στοιχεία δικτυώματος. Αυτή η μορφή δεν επιτρέπει τη προσομοίωση σε εύχρηστο περιβάλλον, ούτε είναι δυνατή η άμεση προσάρτηση της διάταξης σε ένα μοντέλο κάποιας κατασκευής για πειραματικές δοκιμές προσομοίωσης.

Επίσης, δεν έχει μελετηθεί πλήρως η συμπεριφορά της διάταξης με πιο πολύπλοκα εργαλεία και δεν έχει οριοθετηθεί το εύρος λειτουργίας της. Στη συγκεκριμένη εργασία λοιπόν, θα αναλυθεί η γεωμετρία της διάταξης του πιεζοηλεκτρικού αποσβεστήρα και θα δημιουργηθούν μοντέλα προσομοίωσης με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων, στον 2D χώρο, σε περιβάλλον Matlab όπως και στο υπολογιστικό πακέτο Abaqus, στο οποίο θα σχεδιαστεί και πλήρες 3D μοντέλο.

Για να επαληθευτεί η ορθότητα και η ακρίβεια των μοντέλων, θα υποβληθούν σε προσομοιώσεις με στατική φόρτιση, ώστε να επαληθευτεί η πιστότητα της δυσκαμψίας, και σε έλεγχο εύρεσης ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών, ώστε να επαληθευτεί η πιστότητα της δυναμικής τους συμπεριφοράς. Με την εξασφάλιση της

ποιότητας αυτών των 2 ιδιοτήτων, θα είναι δυνατή η χρήση των μοντέλων σε προσομοιώσεις σε διατάξεις με απαιτήσεις για ακρίβεια στη συμπεριφορά αλλά και στη διαστασιολόγηση.

Μαζί με το μηχανικό κομμάτι, θα αναλυθούν οι εξισώσεις των πιεζοηλεκτρικών stack, και με βάση πειραματικά δεδομένα θα μοντελοποιηθεί η πιεζοηλεκτρική συστοιχία στα μοντέλα, με την κατάλληλη για το κάθε μοντέλο μέθοδο. Με τη σύγκριση των μοντέλων θα γίνει και η αξιολόγηση της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης που έχει μοντελοποιηθεί.

Για την εκπόνηση της εργασίας και την επιβεβαίωση της ορθότητας των μοντέλων που θα παρουσιαστούν στη συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθούν πειραματικά δεδομένα της διάταξης, όπως και δεδομένα από παλαιότερα 1D μοντέλα με επιβεβαιωμένη ταύτιση

Κατά τη πρόοδο της εργασίας θα αναλυθούν οι σχεδιαστικές αποφάσεις που πάρθηκαν για το σχεδιασμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κάθε μοντέλου.

2. Στήσιμο του Προβλήματος

Χαρακτηριστικά Διάταξης

Για τη δημιουργία των μοντέλων, χρειάζονται βασικά δεδομένα, όπως η πλήρης διαστασιολόγηση του εξαρτήματος, οι ιδιότητες των υλικών και η σύνθεση των μητρώων που ορίζουν το πρόβλημα, ανάλογα με τον τύπο του πεπερασμένου στοιχείου που χρησιμοποιείται.

Η διαδικασία δημιουργίας των μοντέλων περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

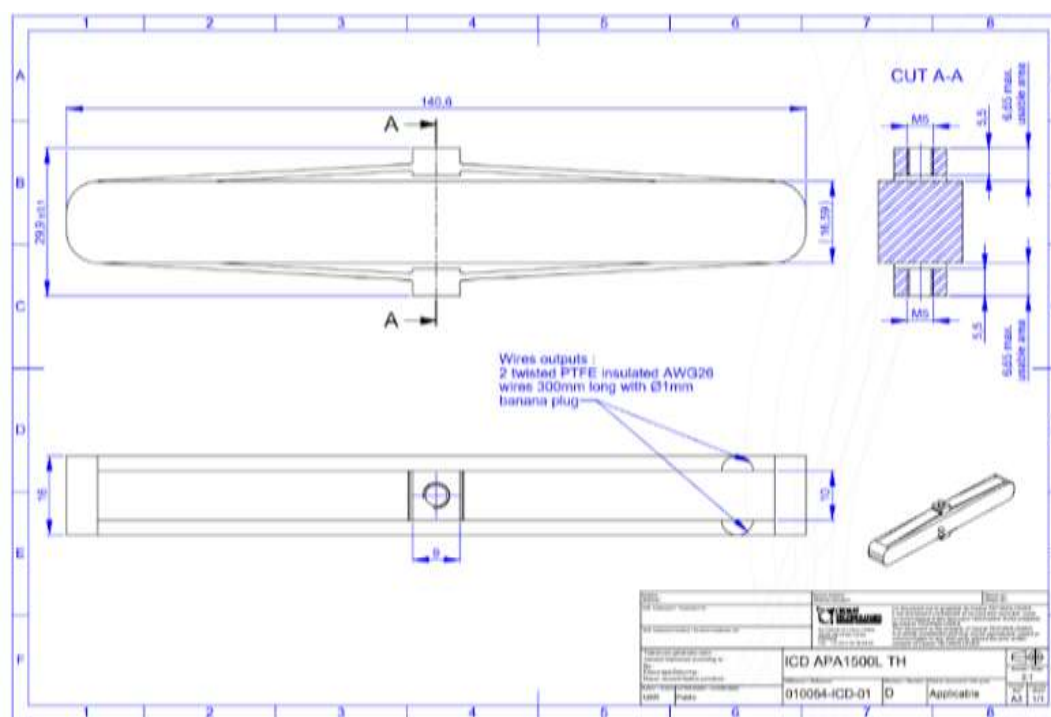
Αρχικά, είναι αναγκαίος ο ορισμός του προβλήματος των εξισώσεων του συστήματος.

Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή των τύπων των Πεπερασμένων Στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, και θα παρουσιαστούν τα τελικά μητρώα που εκφράζουν το πρόβλημα.

Στη συνέχεια ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών και οι διαστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν.

Το τελευταίο στάδιο για να λυθεί το πρόβλημα είναι η περιγραφή των δοκιμών που γίνονται στο μοντέλο, και τους σκοπούς αυτών.

Ο σχεδιασμός των μοντέλων προσομοίωσης του αποσβεστήρα θα ξεκινήσει με την μελέτη του αρχικού εξαρτήματος που θα σχεδιαστεί. Παρακάτω παρουσιάζεται φωτογραφία του αποσβεστήρα, όπως και το μηχανολογικό σχέδιο στους άξονες χ-ψ, οι οποίοι ορίζουν τις συντεταγμένες όπου θα γίνει αρχικά ο σχεδιασμός.



Εικόνα 2.1 Διαστασιολογικό σχέδιο του APA 1500L

Η συσκευή αποτελείται από 2 βασικά στελέχη, το στέλεχος του PZT Stack το οποίο σε συνεργασία με το εξωτερικό κύκλωμα είναι υπεύθυνο για την ημι-ενεργή συμπεριφορά της διάταξης. Το 2ο βασικό στέλεχος είναι το πλαίσιο, το οποίο επιτρέπει την ενίσχυση του εύρους κίνησης του stack και μειώνει τη δυσκαμψία του κατά τη φόρτιση.

Στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας, το Stack θα μοντελοποιηθεί σαν συμπαγές υλικό, και όχι σαν πολλαπλές πλάκες, λόγω της φύσης της μελέτης που θα γίνει στη συγκεκριμένη εργασία.

Η διάταξη μπορεί να συνδεθεί στο σώμα του αντίστοιχου μέλους που αποσβένεται η ταλάντωση μέσω κάποιας εκ των 2 βάσεων στη μικρή του διεύθυνση. Στα ίδια σημεία μπορεί να προσαρτηθεί και η αναρτώμενη μάζα του απόσβεστήρα, η οποία είναι απαραίτητη ώστε να λειτουργεί σωστά.

Παρατηρώντας τη μορφή του εξαρτήματος, είναι φανερό η πολύπλοκη γεωμετρία του στο επίπεδο x-ψ, αλλά η σταθερή τιμή στο πλάτος. Επίσης, υπάρχει συμμετρία σε όλους τους άξονες, κάτι που θα διευκολύνει στον σχεδιασμό του.

Με βάση το σχέδιο αλλά και μετρήσεις που έγιναν στον αποσβεστήρα, παρακάτω παρουσιάζεται διαστασιολογημένο σχέδιο του αποσβεστήρα, όπως και διαστασιολογικός πίνακας.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από ισοδύναμα μοντέλα της διάταξης τα οποία έχουν γίνει στο Matlab, όπως και πειραματικά δεδομένα. Για να γίνει αυτή η διαδικασία όσο πιο ομαλή γίνεται, θα γίνει αρχικά σχεδιασμός 2D μοντέλων, στο Matlab και στο Abaqus, ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή απόδοση των παραδοχών που γίνονται και στα 2 εργαλεία. Όταν εξασφαλιστεί αυτό, θα σχεδιαστεί το τελικό 3D μοντέλο στο Abaqus, το οποίο μετά θα βελτιστοποιηθεί ώστε η συμπεριφορά του να συμπίπτει με τα 2D μοντέλα.

Για τη κατασκευή των μοντέλων σε 2D περιβάλλον θα πρέπει να ξεκινήσουμε καταγράφοντας τις γεωμετρικές αλλά και τις ιδιότητες των υλικών του αποσβεστήρα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν τα 2 στελέχη (πλαίσιο, Stack) του αποσβεστήρα.

Στο 2D μοντέλο, για να γίνει με τον ίδιο τρόπο στο MATLAB και στο Abaqus, αλλά και χωρίς να απαιτηθεί αξιόλογη πολυπλοκότητα στον κώδικα MATLAB, θα χρησιμοποιηθούν πεπερασμένα στοιχεία 1D, εφόσον το σταθερό πάχος της συσκευής το επιτρέπει.

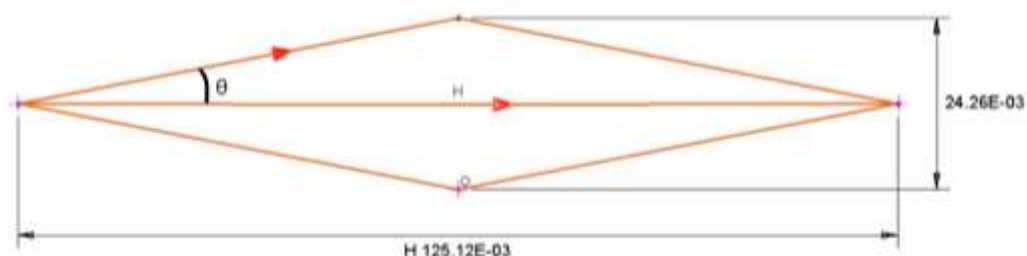
Για τα 2D μοντέλα θα χρησιμοποιηθούν 3 είδη πεπερασμένων στοιχείων (Truss, Euler Beam, Shear Beam) και θα κριθεί η καταλληλότητα του καθενός. Επίσης θα συγκριθεί η χρήση μητρώων συγκεντρωμένης ή συνεπούς μάζας (Lumped or Consistent Mass). Η καταλληλότητα τους θα αξιολογηθεί στο επόμενο κεφάλαιο συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Matlab αλλά και του Abaqus.

Στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, παρατηρείται ότι το Stack δεν εκτείνεται σε όλο το πλάτος, αλλά το πλαίσιο εκτός από το κομμάτι της γεωμετρίας ρόμβου έχει και 2 βραχίονες ώστε να υποστηρίξει το Stack. Αυτό σημαίνει όμως ότι για τη δημιουργία του εξαρτήματος θα πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές, ώστε παρόλο που η γεωμετρία είναι διαφορετική, το εξάρτημα να είναι πιστό στη δυσκαμψία και στη δυναμική συμπεριφορά.

Τα βασικά στοιχεία που θέλουμε να αποτυπωθούν στο εξάρτημα είναι η δυσκαμψία και η δυναμική του συμπεριφορά. Αυτά τα 2 εξαρτώνται κυρίως από τη δυσκαμψία του πλαισίου, και από το οριζόντιο στοιχείο. Επίσης, το οριζόντιο στοιχείο είναι κρίσιμο, επειδή οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ευαίσθητες ανάλογα με το μήκος του στοιχείου. Έτσι, το μήκος του κεντρικού στοιχείου (το πιεζοηλεκτρικό στέλεχος) πρέπει να μένει το ίδιο.

Αυτή η αλλαγή θα προκαλέσει μεταβολή στο συνολικό μήκος του εξαρτήματος, αλλά αυτό δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά, γιατί το επιπλέον μήκος είναι λόγω της αναγκαίας γεωμετρίας που χρειαζόμαστε στο πραγματικό εξάρτημα ώστε να γίνει η σύνδεση των στοιχείων του πλαισίου με το πιεζοηλεκτρικό stack, και δεν επιφέρει κάποια μεταβολή στη δυσκαμψία.

Παρακάτω απεικονίζεται το διαστασιολογημένο σχέδιο που θα βασιστούμε ώστε να κατασκευάσουμε το 2D μοντέλο:



Εικόνα 2.2- Σκαρίφημα 2D Μοντέλου

Επίσης, παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών της διάταξης (Cedrat Technologies, 2019) :

Πίνακας 1- Ιδιότητες υλικών του APA 1500L

Στέλεχος	Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας	Πυκνότητα	Λόγος Poisson
Πλαίσιο	Χάλυβας	210GPa	7800 g/m ³	0.3
PZT Stack	PZT	41.67GPa	8000 g/m ³	0.3

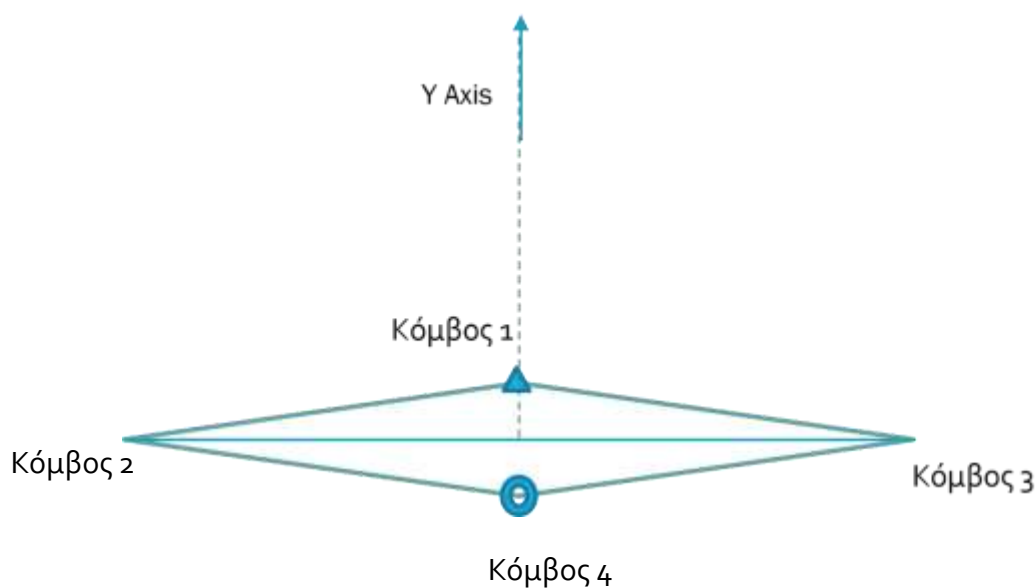
Πίνακας 2- Διαστασιολογικές ιδιότητες του APA 1500L

Γεωμετρικό Στοιχείο	Πλαίσιο	Stack
Εμβαδόν διατομής (A)	1.27e-5	8e-5
Ύψος διατομής (h)	1.27mm	8mm
Ροπή αδράνειας (I)	1.71e-12mm ³	4.27e-10 mm ³
Μήκος στοιχείου (L)	63.81mm	125.24mm
Γωνία πλαισίου (Θ)	10.983°	

Με τις ιδιότητες των υλικών και την αρχική γεωμετρία γνωστή, το επόμενο στάδιο είναι να ορίσουμε τις συνθήκες στις οποίες θα δοκιμαστεί ο αποσβεστήρας:

Στο συγκεκριμένο πείραμα, η συσκευή θα πακτωθεί στη κορυφή, ενώ στο κάτω μέρος θα αναρτηθεί η μάζα (380g). Η μορφή της εξωτερικής μάζας δε μας απασχολεί, έτσι θα προσομοιωθεί σαν σημειακή μάζα.

Για τους ελέγχους στατικής συμπεριφοράς ο αποσβεστήρας θα φορτιστεί με κατακόρυφη εφελκυστική δύναμη 10N, η οποία θα εφαρμοστεί στο κάτω σημείο πρόσδεσης.



Εικόνα 2.3- Σχηματική περιγραφή συστήματος

Για να δημιουργήσουμε το μοντέλο στο MATLAB, θα χρειαστεί να περιγραφούν οι εξισώσεις του συστήματος αναλυτικά.

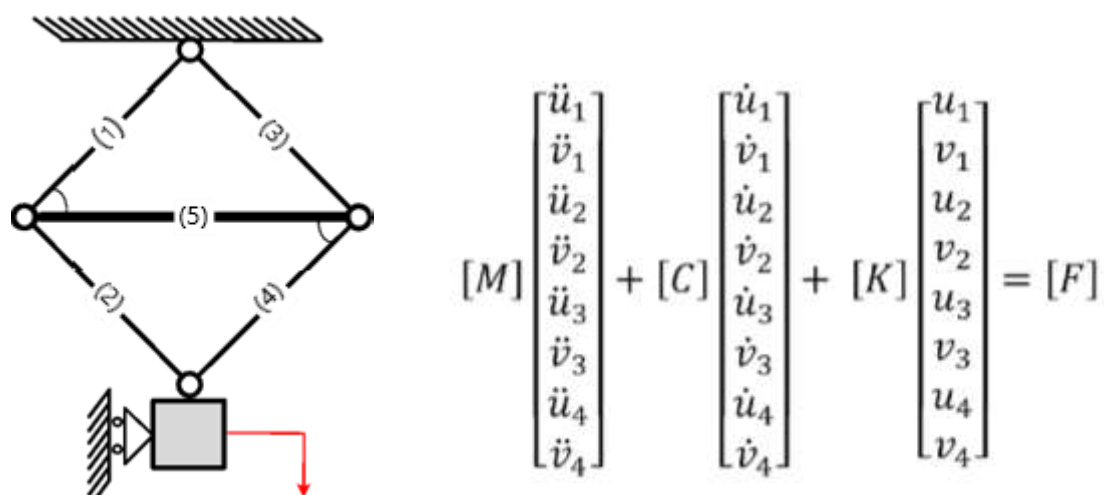
Το πλαίσιο, όπως και σε προηγούμενα σχετικά μοντέλα, θα προσομοιωθεί σε ένα πλαίσιο σχήματος ρόμβου, και το κεντρικό πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σαν ένα κεντρικό, στο σύνολο 5 στοιχεία. Τα στοιχεία θα ενώνονται με κόμβους, οι οποίοι στο σύνολο θα είναι 4.

Για επίπεδο πλαίσιο, αρχικά οι βαθμοί ελευθερίας περιορίζονται σε u και v , για τους άξονες x (οριζόντιος) και y (κατακόρυφος).

Ο τύπος των στοιχείων θα προσδιοριστεί ανάλογα με τα αποτελέσματα της σύγκρισης που θα γίνει.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχεδιάγραμμα του συστήματος με αριθμημένα τα στοιχεία και ορισμένους τους περιορισμούς των βαθμών ελευθερίας, οι οποίοι θα αντιμετωπιστούν αργότερα.

Επίσης, όπως σε κάθε πρόβλημα δυναμικής, οι εξισώσεις ισορροπίας κάθε βαθμού ελευθερίας ανήκουν στο παρακάτω σύστημα εξισώσεων:



Εικόνα 2.4- Κινηματικές Εξισώσεις συστήματος (στοιχεία δικτυώματος)

[M]: Μητρώο μάζας
 [C]: Μητρώο απόσβεσης
 [K]: Μητρώο Δυσκαμψίας

Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση των Μητρώων [M], [C], [K]:

Αρχικά, θα χρησιμοποιηθούν πεπερασμένα στοιχεία δικτυώματος 2 διαστάσεων, ώστε να υπάρχει μια αρχική βάση σύγκρισης, και στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν πεπερασμένα στοιχεία δοκού 2 διαστάσεων. Πριν παρουσιαστούν τα είδη πεπερασμένων στοιχείων, στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται όλες οι τιμές οι οποίες περιέχονται στα μητρώα δυσκαμψίας που θα περιγραφούν.

Πίνακας 3 Περιγραφή συμβόλων μητρώων

E: Μέτρο Δυσκαμψίας	φ: Γωνία μεταξύ του στοιχείου και του κεντρικού συστήματος συντεταγμένων
G: Μέτρο Διάτμησης	I: cosφ
ν: Λόγος Poisson	m: sinφ
A: Εμβαδό Διατομής	
h: Ύψος διατομής	
I: Ροπή Αδράνειας	
ρ: Πυκνότητα	
L: Μήκος Στοιχείου	

Δίκομβο Στοιχείο επίπεδου δικτυώματος:

Το στοιχείο επίπεδου δικτυώματος μοντελοποιεί τη διατομή σαν μία άκαμπτη κατασκευή, μη λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα κάμψης ή διάτμησης. Είναι επαρκές για στατικές μελέτες σε απλές γεωμετρίες που έχουν εφελκυστικά/θλιπτικά φορτία, αλλά όπως θα φανεί σε πολύπλοκες γεωμετρίες που υπάρχει κάμψη δεν είναι αρκετά ακριβή.

Οι αρχές όλων των επίπεδων στοιχείων βασίζονται πάνω στη θεωρία του δίκομβου αξονικού στοιχείου δικτυώματος. (Makvandi, 2019)

Για να είναι δυνατή η εφαρμογή του στοιχείου για διαφορετικές γωνίες σε ένα σύστημα συντεταγμένων, είναι απαραίτητη η παρουσία ενός μητρώου περιστροφής, το οποίο θα περιστρέφει το μητρώο του κάθε στοιχείου από το τοπικό του σύστημα στο ολικό σύστημα που έχουμε ορίσει κατά τη σχετική τους γωνία ϕ .

Μητρώο Μάζας:

Για το στοιχείο 2 Β.Ε. σε κάθε κόμβο (u,v), τα μητρώα μάζας είναι τα παρακάτω:

Μητρώο συνεπούς μάζας:

$$M_e = \rho AL * \begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 1/6 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 & 1/6 \\ 1/6 & 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 1/6 & 0 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^i \\ v^i \\ u^j \\ v^j \end{bmatrix} \quad (2)$$

Μητρώο συγκεντρωμένης μάζας:

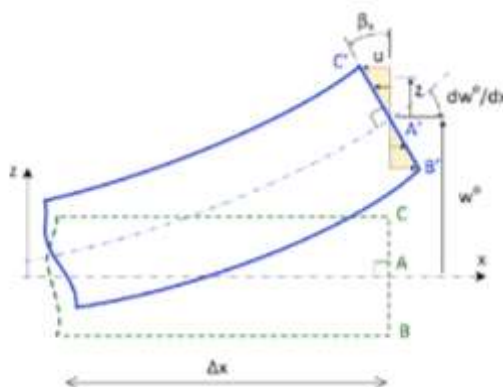
$$M_e = \frac{\rho AL}{2} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^i \\ v^i \\ u^j \\ v^j \end{bmatrix}$$

Μητρώο Δυσκαμψίας

$$K_e = \frac{EA}{L} * \begin{bmatrix} l^2 & lm & -l^2 & -lm \\ lm & m^2 & -lm & -m^2 \\ -l^2 & -lm & l^2 & lm \\ -lm & -m^2 & lm & m^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^i \\ v^i \\ u^j \\ v^j \end{bmatrix}$$

Δίκομβο επίπεδο στοιχείο πλαισίου (Euler):

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία τέλει κάμψης, το στοιχείο δοκού τύπου Euler μοντελοποιεί τη διατομή σαν μία παραμορφώσιμη δοκό, υπολογίζοντας και τα φαινόμενα κάμψης που εμφανίζονται κατά τη φόρτιση. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας και 3^ο βαθμό ελευθερίας ανα κόμβο, αυτόν της γωνίας περιστροφής, η οποία σχετίζεται με το αντίστοιχο βέλος κάμψης της διατομής. Είναι επαρκή για στατικές μελέτες σε πολλά είδη γεωμετρικών με διάφορα φορτία, αλλά αγνοεί τα φαινόμενα διάτμησης που εμφανίζονται σε διατομές μεγάλου πάχους.



Εικόνα 2.5-Στοιχείο πλαισίου

Μητρώο Μάζας

$$M_e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^i \\ v^i \\ \theta^i \\ u^j \\ v^j \\ \theta^j \end{bmatrix}$$

Μητρώο Δυσκαμψίας:

$$K_e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} EA & 0 & 0 & -EA & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^2 & 6EI/L & 0 & 12EI/L^2 & 6EI/L \\ 0 & 6EI/L & 4EI & 0 & -6EI/L & 2EI \\ -EA & 0 & 0 & EA & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^2 & -6EI/L & 0 & 12EI/L^2 & -6EI/L \\ 0 & 6EI/L & 2EI & 0 & -6EI/L & 4EI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^i \\ v^i \\ \theta^i \\ u^j \\ v^j \\ \theta^j \end{bmatrix}$$

Μητρώο Περιστροφής:

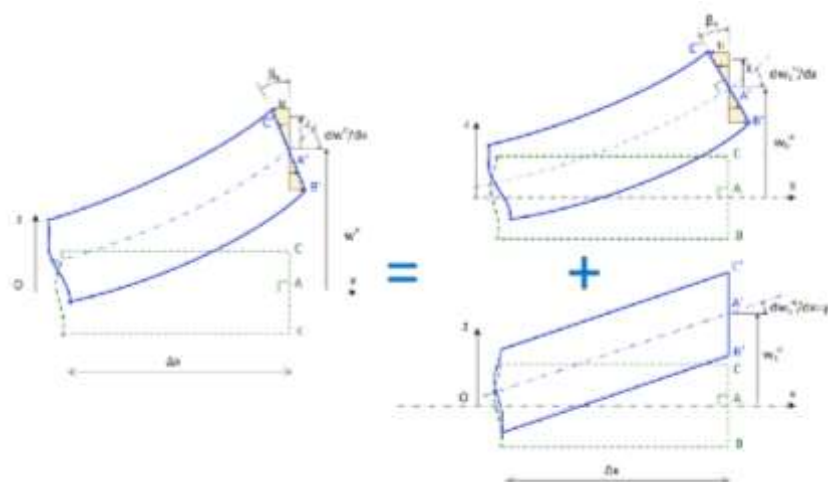
$$T_e = \begin{bmatrix} l & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m & l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -m & l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^i \\ v^i \\ \theta^i \\ u^j \\ v^j \\ \theta^j \end{bmatrix}$$

Το τελικό μητρώο κάθε στοιχείου βγαίνει από τον πολ/μο των 2 μητρώων:

$$K_e^{ij} = T_e^{-1} K_e^{i'j'} T_e$$

Δίκομβο επίπεδο στοιχείο πλαισίου με διάτμηση (Timoshenko)

Το στοιχείο δοκού με διάτμηση μοντελοποιεί τη διατομή σαν μία παραμορφώσιμη δοκό, υπολογίζοντας όμως εκτός από τη κάμψη και τη διάτμηση που υπάρχει στη διατομή κατά τη φόρτιση. Είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος για προσωμοιώσεις με μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, προσφέροντας επαρκή ακρίβεια για τα περισσότερα σενάρια φόρτισης σε μεγάλο εύρος γεωμετριών, δηλαδή δοκών με μεγαλύτερο πάχος. (Gan, 2018).



Εικόνα 2.6-Στοιχείο Πλαισίου με διάτμηση

Μητρώο Μάζας:

Για το στοιχείο δοκού με διάτμηση, το ολικό μητρώο μάζας του στοιχείου αποτελείται από τη πρόσθεση 2 μητρώων μάζας, το πρώτο σχετικό με τη μεταφραστική αδράνεια $[M_{CT}]$ του στοιχείου, και το 2^ο με τη περιστροφική αδράνεια $[M_{CE}]$ του στοιχείου, άρα το μητρώο βγαίνει από τη σχέση:

$$M = M_{CT} + M_{CR}$$

Τα επι μέρους μητρώα είναι τα:

Οπού το Φ , το οποίο είναι παράμετρος υπολογισμού του λόγου αντίστασης σε κάμψη και διάτμηση, υπολογίζεται από τη σχέση: $\Phi = 12EI / GA L^2$

$$\mathbf{M}_{CT}^e = \frac{\rho A \ell}{(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} \frac{13}{35} + \frac{7}{10}\Phi + \frac{1}{3}\Phi^2 & (\frac{11}{210} + \frac{11}{120}\Phi + \frac{1}{24}\Phi^2)\ell & \frac{9}{70} + \frac{3}{10}\Phi + \frac{1}{6}\Phi^2 & -(\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\Phi + \frac{1}{24}\Phi^2)\ell \\ \frac{1}{105} + \frac{1}{60}\Phi + \frac{1}{120}\Phi^2 & \ell^2 & (\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\Phi + \frac{1}{24}\Phi^2)\ell & -(\frac{1}{140} + \frac{1}{60}\Phi + \frac{1}{120}\Phi^2)\ell^2 \\ \frac{13}{35} + \frac{7}{10}\Phi + \frac{1}{3}\Phi^2 & (\frac{11}{210} + \frac{11}{120}\Phi + \frac{1}{24}\Phi^2)\ell & \frac{9}{70} + \frac{3}{10}\Phi + \frac{1}{6}\Phi^2 & -(\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\Phi + \frac{1}{24}\Phi^2)\ell \\ \frac{1}{105} + \frac{1}{60}\Phi + \frac{1}{120}\Phi^2 & \ell^2 & (\frac{13}{420} + \frac{3}{40}\Phi + \frac{1}{24}\Phi^2)\ell & -(\frac{1}{140} + \frac{1}{60}\Phi + \frac{1}{120}\Phi^2)\ell^2 \end{bmatrix}$$

symmetric

$$\mathbf{M}_{CR}^e = \frac{\rho I_R}{(1 + \Phi)^2 \ell} \begin{bmatrix} \frac{6}{5} & (\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\Phi)\ell & -\frac{6}{5} & (\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\Phi)\ell \\ (\frac{2}{15} + \frac{1}{6}\Phi + \frac{1}{3}\Phi^2)\ell^2 & (-\frac{1}{10} + \frac{1}{2}\Phi)\ell & -(\frac{1}{30} + \frac{1}{6}\Phi - \frac{1}{6}\Phi^2)\ell^2 & (-\frac{1}{10} + \frac{1}{2}\Phi)\ell \\ -\frac{6}{5} & (\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\Phi)\ell & \frac{6}{5} & (\frac{1}{10} - \frac{1}{2}\Phi)\ell \\ (\frac{2}{15} + \frac{1}{6}\Phi + \frac{1}{3}\Phi^2)\ell^2 & (-\frac{1}{10} + \frac{1}{2}\Phi)\ell & -(\frac{1}{30} + \frac{1}{6}\Phi - \frac{1}{6}\Phi^2)\ell^2 & (-\frac{1}{10} + \frac{1}{2}\Phi)\ell \end{bmatrix}$$

symmetric

Μητρώο Δυσκαμψίας:

(Το μητρώο δυσκαμψίας που θα χρησιμοποιηθεί είναι με μειωμένη ολοκλήρωση για τον υπολογισμό του, ώστε να μη παρουσιάζεται το πρόβλημα του διατμητικού κλειδώματος)

$$\mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} EA & 0 & 0 & -EA & 0 & 0 \\ 0 & Gh/L & -Gh/2 & 0 & -Gh/L & -Gh/2 \\ 0 & -Gh/2 & GhL/4 + EI/L & 0 & Gh/2 & GhL/4 - EI/L \\ -EA & 0 & 0 & EA & 0 & 0 \\ 0 & -Gh/L & Gh/2 & 0 & Gh/L & Gh/2 \\ 0 & -Gh/2 & GhL/4 - EI/L & 0 & Gh/2 & GhL/4 + EI/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^i \\ v^i \\ \theta^i \\ u^j \\ v^j \\ \theta^j \end{bmatrix}$$

Μητρώο Περιστροφής:

$$\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} l & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m & l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -m & l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^i \\ v^i \\ \theta^i \\ u^j \\ v^j \\ \theta^j \end{bmatrix}$$

Σχετικά με το μητρώο απόσβεσης [C], θα συνδεθεί μέσω αναλογικής απόσβεσης Rayleigh, ο τύπος της οποίας είναι: $[C] = \alpha [M] + b[K]$

Οι συντελεστές α , b υπολογίζονται πειραματικά και οι τιμές τους είναι:

$$\alpha = 25, b = 3.95 \cdot 10^{-6}$$

Με γνωστά τα μητρώα [M], [C], [K] για κάθε στοιχείο, το επόμενο βήμα είναι η σύνθεση των μητρώων ολόκληρου του προβλήματος, το οποίο θα γίνει μέσω επαναληπτικής διαδικασίας στο Matlab, όπου στο συνολικό μητρώο θα προστίθεται κάθε φορά το μητρώο του κάθε Π.Σ. στους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας που αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο.

Το επόμενο στάδιο είναι η επιβολή των συνοριακών συνθηκών που υπάρχουν στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Στον κόμβο 1 έχουν περιοριστεί όλοι οι βαθμοί ελευθερίας, ενώ στον κόμβο 4 είναι περιορισμένη η κίνηση στον οριζόντιο άξονα. Άρα, από την εξίσωση στο πεδίο του χρόνου θα απαλειφθούν, αφού η τιμή τους ισούται με 0.

Το μητρώο της δύναμης, [F], είναι διαφορετικό ανάλογα με το σενάριο που θα προσομοιωθεί. Για τον στατικό έλεγχο, θα εφαρμοστεί κατακόρυφη δύναμη -10N, δηλαδή με κατεύθυνση προς τα κάτω, στον κόμβο 4 της διάταξης. Για την εύρεση ιδιοσυχνοτήτων δεν εφαρμόζεται κάποια δύναμη στη διάταξη.

Με τα παραπάνω δεδομένα, τα τελικά σύστημα που θα λυθεί είναι το:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_2 \\ \ddot{v}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{v}_3 \\ \ddot{v}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_2 \\ \ddot{v}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{v}_3 \\ \ddot{v}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0(-1) \end{bmatrix}$$

Ιδιότητες Πιεζοηλεκτρικού Υλικού

Για το συγκεκριμένο κεφάλαιο, είναι απαραίτητος ο πίνακας συμβολισμών των ποσοτήτων που μελετώνται:

Πίνακας 4- Πιεζοηλεκτρικές ποσότητες

S_i	Μηχανική Παραμόρφωση	d_{ik}	Τανυστής πιεζοηλεκτρικών σταθερών (παραμόρφωση)
D_i	Ηλεκτρική Μετατόπιση	e_{ik}	Τανυστής πιεζοηλεκτρικών σταθερών (τάση)
σ_i	Μηχανικές τάσεις	ε^S_{ik}	Τανυστής διηλεκτρικών σταθερών (παραμόρφωση)
$S^{E_{ij}}$	Τανυστής συντελεστή ελαστικότητας	$\varepsilon^{\sigma}_{ik}$	Τανυστής διηλεκτρικών σταθερών (τάση)
E_k	Ηλεκτρικό πεδίο	C^E_{ij}	Τανυστής μέτρου ελαστικότητας

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καταστατικές εξισώσεις των πιεζοηλεκτρικών υλικών στο χώρο, στην αρχική μορφή τους: (Sirohi, J., Chopra, I., (2000),)

$$S_i = s_{ij}^E \sigma_j + d_{ik} E_k \quad (4.1a)$$

$$D_i = d_{ij} \sigma_j + \varepsilon_{ik}^{\sigma} E_k \quad (4.1b)$$

Οι συγκεκριμένες εξισώσεις μπορούν να γραφούν και σε παραπάνω μορφές, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος:

$$\sigma_i = C_{ij}^E S_j - e_{ik} E_k \quad (4.2a)$$

$$D_i = e_{ij} S_j + \varepsilon_{ik}^S E_k \quad (4.2b)$$

Όπου:

$$e_{ik} = C_{ij}^E d_{jk} \quad (4.3a)$$

$$\varepsilon_{ik}^S = \varepsilon_{ik}^{\sigma} - d_{li} e_{lk} \quad (4.3b)$$

Στην υπό μελέτη συσκευή, το ηλεκτρικό πεδίο και ως αποτέλεσμα η μεταβολή της μηχανικής τάσης του υλικού υπάρχουν στη διεύθυνση “3”.

Ο στόχος είναι η εύρεση σχέσεων που περιγράφουν πιεζοηλεκτρικές συστοιχίες N στρώσεων, και η εύρεση των εξισώσεων που περιγράφουν τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές d_{33} , e_{33} ($\bar{e}$) και τις διηλεκτρικές σταθερές $\varepsilon_{33}^{\sigma}$, C_p .

Στη διεύθυνση “3”, η εξίσωση (4.3a) γίνεται:

$$\sigma_3 = C_{33}^E S_3 - e_{33} E_3 \quad (4.4)$$

Πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδό του πιεζοηλεκτρικού A_{layer} και αντικαθιστώντας στην εξίσωση τις παρακάτω ισότητες:

$$S_3 = \frac{\Delta u_{layer}}{h_{layer}} \quad (4.5a)$$

$$E_3 = -\frac{\Delta \varphi}{h_{layer}} \quad (4.5b)$$

$$A_{layer} \sigma_3 = f_p \quad (4.5c)$$

Καταλήγουμε στην σχέση:

$$h_{layer} f_p = C_{33}^E A_{layer} \Delta u_{layer} + A_{layer} e_{33} \Delta \varphi \quad (4.6)$$

Για μια πιεζοηλεκτρική συστοιχία με αριθμό στρώσεων N_{layers} μηχανικά συνδεδεμένα σε σειρά, το συνολικό πάχος της συστοιχίας h_{stack} και η συνολική μετατόπιση της συστοιχίας εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$h_{stack} = \quad (4.7a)$$

$$= N_{layers} h_{layer}$$

$$\Delta u_d = N_{layers} \Delta u_{layer} \quad (4.7b)$$

Μέσω των παραπάνω εξισώσεων, η εξίσωση (4.6) γίνεται:

$$f_p = k_p^E \Delta u_d + \bar{e} \Delta \varphi \quad (4.8)$$

Όπου:

$$k_d^E = \frac{C_{33}^E A_{layer}}{h_{stack}} \quad (4.9a)$$

$$\bar{e} = \frac{A_{layer} e_{33}}{h_{layer}} \quad (4.9b)$$

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ζητούμενο είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά d_{33} , η οποία θα βρεθεί συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.3a, 4.9b):

$$d_{33} = \frac{\bar{e} * h_{layer}}{A_{layer} * C_{33}^E} \quad (4.10)$$

Συνεχίζοντας με την εξίσωση (4.2b), στη διεύθυνση "3" εκφράζεται ως:

$$D_3 = e_{33} S_3 + \varepsilon_{33}^S E_3 \quad (4.11)$$

Επίσης για το D_3 ισχύει:

$$D_3 = \frac{q_{layer}}{A_{layer}} \quad (4.12)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.5a, b, 4.12), η εξίσωση 4.11 γράφεται ως:

$$\frac{q_{layer}}{A_{layer}} = e_{33} \frac{\Delta u_{layer}}{h_{layer}} - \varepsilon_{33}^S \frac{\Delta \varphi}{h_{layer}} \quad (4.13)$$

Αντίστοιχα, για μια πιεζοηλεκτρική συστοιχία με αριθμό στρώσεων N_{layers} μηχανικά συνδεδεμένα σε σειρά, η οποία έχει συνολική δημιουργία ηλ. Φορτίου q_{out} , το οποίο ισούται με:

$$q_{out} = N_{layers} q_{layer} \quad (4.14)$$

Πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση (4.14) με τις N_{layers} στρώσεις της συστοιχίας, η εξίσωση (4.15) γράφεται ως:

$$q_{out} = \bar{e} \Delta u_d - C_p^S \Delta \varphi \quad (4.15)$$

Όπου:

$$C_p^S = \frac{\varepsilon_{33,tot}^S A_{layer}}{h_{stack}} \quad (4.16a)$$

$$\varepsilon_{33,tot}^S = N_{layers}^2 \varepsilon_{33}^S \quad (4.16b)$$

$$\varepsilon_{33}^S = \frac{C_p^S * h_{stack}}{A_{layer} * N_{layers}^2} \quad (4.16c)$$

Μέσω των εξισώσεων (4.16c, 4.3a,b), υπολογίζεται και η σχέση για την εύρεση του ε_{33}^σ :

$$\varepsilon_{33}^\sigma = \frac{C_p^S * h_{stack}}{A_{layer} * N_{layers}^2} + C_{33}^E * d_{33}^2 \quad (4.17)$$

Για πολλαπλές συστοιχίες, οι εξισώσεις (4.10,15) γράφονται ως εξής:

$$Nf_p = Nk_p^E \Delta u_d + N\bar{e} \Delta \varphi \rightarrow f_p = k_p^E \Delta u_{d,tot} + \bar{e} \Delta \varphi \rightarrow \quad (4.18)$$

$$Nq_{out} = N\bar{e} \Delta u_d - NC_p^S \Delta \varphi \rightarrow q_{out,tot} = \bar{e} \Delta u_{d,tot} - C_{p,tot}^S \Delta \varphi \rightarrow$$

$$C_{p,tot}^S = NC_p^S \quad (4.19)$$

Πιεζοηλεκτρικές σταθερές στα αναλυτικά μητρώα

Για τη πιεζοηλεκτρική συστοιχία της συσκευής η οποία δε συνδέεται με εξωτερικό κύκλωμα, ισχύουν οι εξισώσεις:

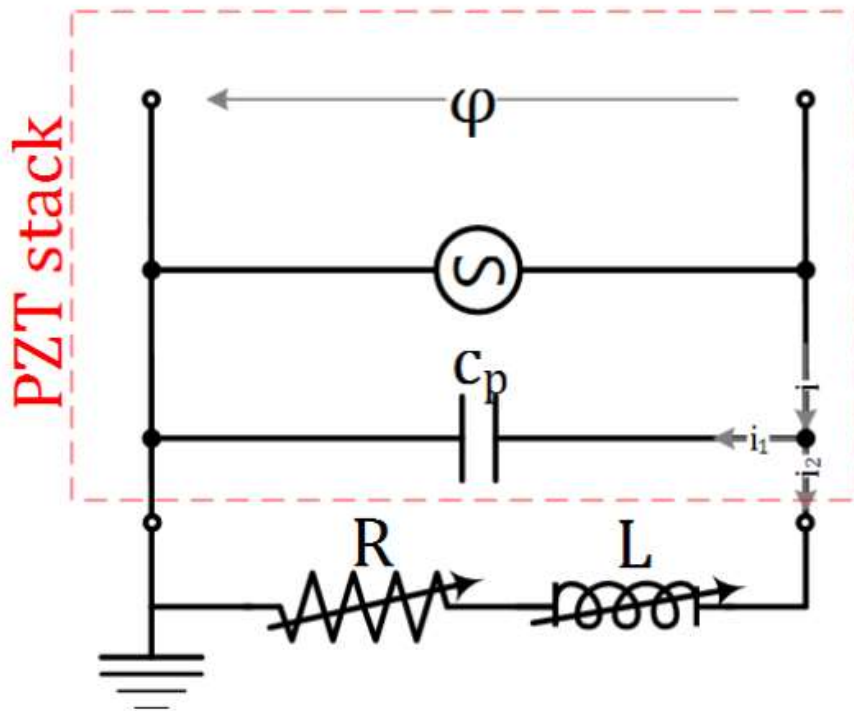
$$q_p = \bar{e}(u_2 - u_3)$$

$$\Delta \varphi = \frac{q_p}{C_p}$$

Επίσης, για ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, εκτός από τη δύναμη αντίδρασης λόγω της φυσικής δυσκαμψίας του υλικού ($k_p^E \Delta u_d$), η διαφορά δυναμικού $\Delta \varphi$ πολλαπλασιάζοντας με το $\bar{e}$ έχει επίσης ως αποτέλεσμα παραγωγή δύναμης αντίδρασης

$$f_p = k_p^E \Delta u_d + \bar{e} \Delta \varphi \quad (4.8)$$

Συνδέοντας στη συσκευή εξωτερικό κύκλωμα με αντίσταση και πηνίο (η τυπική διάταξη πιεζοηλεκτρικού αποσβεστήρα):



$$q_p = q_1 + q_2 = \bar{e}(u_2 - u_3)$$

$$\Delta\phi = \frac{q_1}{C_p} = R\dot{q}_2 + L\ddot{q}_2$$

Λύνοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις ως προς q_1 , και συνδυάζοντάς τες:

$$\bar{e}(u_2 - u_3) = C_p R \dot{q}_2 + C_p L \ddot{q}_2$$

$$L\ddot{q}_2 + R\dot{q}_2 = \frac{1}{C_p}q_2 - \frac{\bar{e}}{C_p}u_2 + \frac{\bar{e}}{C_p}u_3 = 0$$

Η παραπάνω εξίσωση, που εκφράζει τη συμπεριφορά του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, θα εισαχθεί στο μηχανικό σύστημα εξισώσεων που βρέθηκε παραπάνω, για στοιχεία δικτυώματος:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & M_{37} & 0 \\ M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & M_{47} & -\bar{e} \cdot L \\ M_{53} & M_{54} & M_{55} & M_{56} & M_{57} & 0 \\ M_{63} & M_{64} & M_{65} & M_{66} & M_{67} & \bar{e} \cdot L \\ M_{73} & M_{74} & M_{75} & M_{76} & M_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_2 \\ \ddot{v}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{v}_3 \\ \ddot{u}_4 \\ \ddot{q} \end{Bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} & C_{37} & 0 \\ C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} & C_{47} & -\bar{e} \cdot R \\ C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} & C_{57} & 0 \\ C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} & C_{67} & \bar{e} \cdot R \\ C_{73} & C_{74} & C_{75} & C_{76} & C_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_2 \\ \dot{v}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{v}_3 \\ \dot{u}_4 \\ \dot{q} \end{Bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} & K_{37} & 0 \\ K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} & K_{47} & 0 \\ K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} & K_{57} & 0 \\ K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} & K_{67} & 0 \\ K_{73} & K_{74} & K_{75} & K_{76} & K_{77} & 0 \\ 0 & \frac{e}{c_p} & 0 & -\frac{e}{c_p} & 0 & \frac{1}{c_p} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ q \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

3. 2D Μοντέλα σε υπολογιστικά Πακέτα:

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν με βάση το προηγούμενο κεφάλαιο, και θα εξεταστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους.

2D Models

Τα ζητούμενα δεδομένα από τα υπολογιστικά μοντέλα θα επιτρέψουν τη σύγκριση της συμπεριφοράς των μοντέλων με τα γνωστά δεδομένα που υπάρχουν για τη διάταξη, από πειράματα αλλά και τιμές του κατασκευαστή. Για την επαρκή σύγκριση των ιδιοτήτων αλλά και της συμπεριφοράς του αποσβεστήρα υπό φόρτιση στο επιθυμητό πεδίο συχνοτήτων (0-450Hz) χρειάζεται να βρεθούν τα παρακάτω: Ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές των μοντέλων, απόκριση σε εφαρμογή δύναμης στατικά αλλά και δυναμικά (FRF).

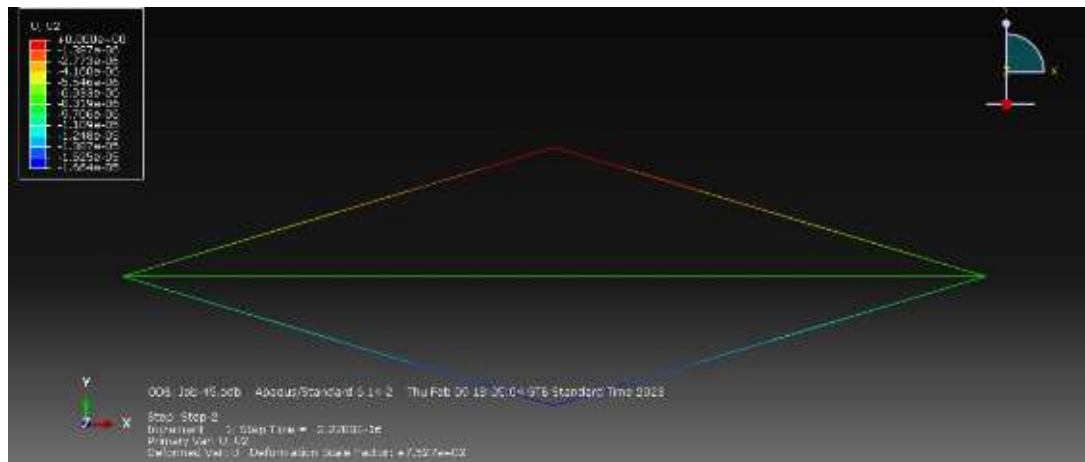
Τα μοντέλα 2D θα δημιουργηθούν αρχικά στο MATLAB, όπου θα συγκριθούν τα αποτελέσματά τους με πειραματικά δεδομένα του αποσβεστήρα, και στη συνέχεια θα δημιουργηθούν αντίστοιχα μοντέλα στο Abaqus ώστε να εξασφαλιστεί η ταύτιση μεταξύ των 2 υπολογιστικών πακέτων, πριν γίνει η κατασκευή του πλήρους μοντέλου 3D στο Abaqus.

Για την εύρεση ιδιοσυχνοτήτων και τον έλεγχο απόκρισης συχνότητας, έγινε έλεγχος στις συχνότητες 1-450Hz. Η φόρτιση στα μοντέλα της διάταξης είναι 1N.

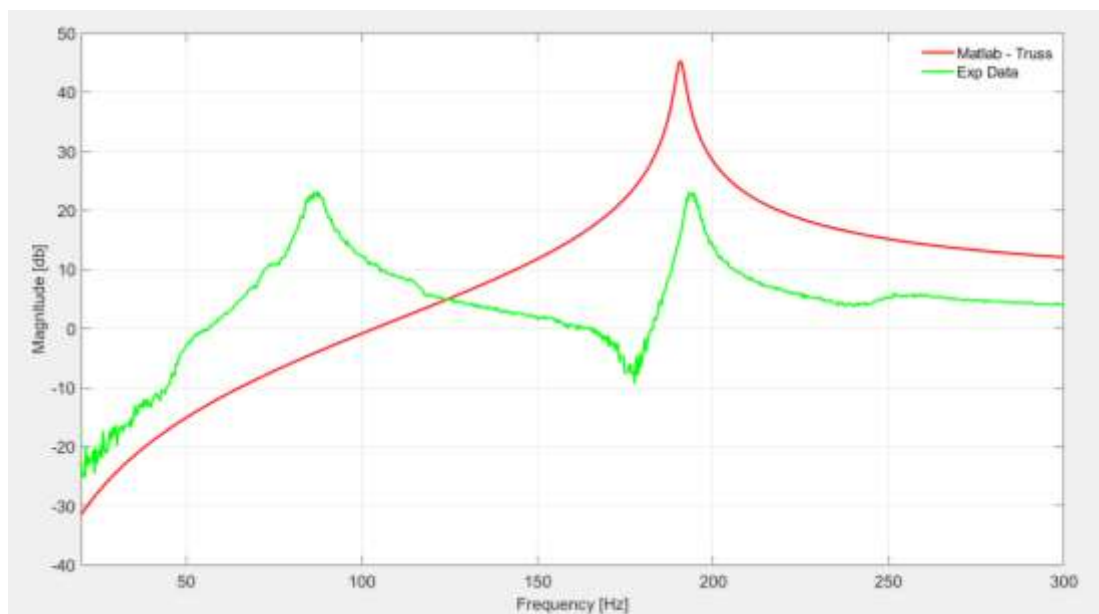
Οι ιδιοσυχνότητες ενδιαφέροντος είναι για ιδιομορφές που μεγιστοποιούν τη κάθετη μετατόπιση του κόμβου στον οποίο υπάρχει η προσαρτημένη μάζα.

Η διακριτοποίηση των μοντέλων είναι 1 π.σ. ανά στοιχείο της διάταξης.

Μοντέλα w/ Truss Elements:

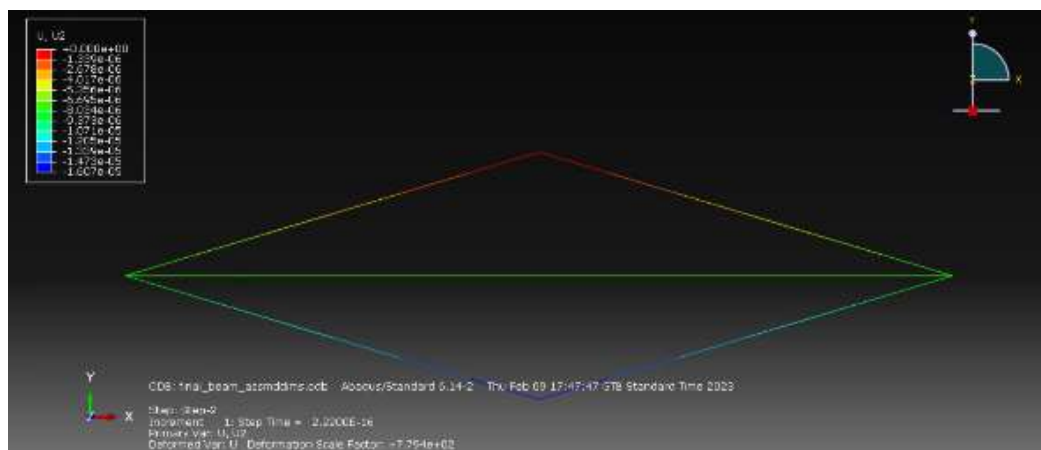


Εικόνα 3.1- Απεικόνιση Μοντέλου Abaqus

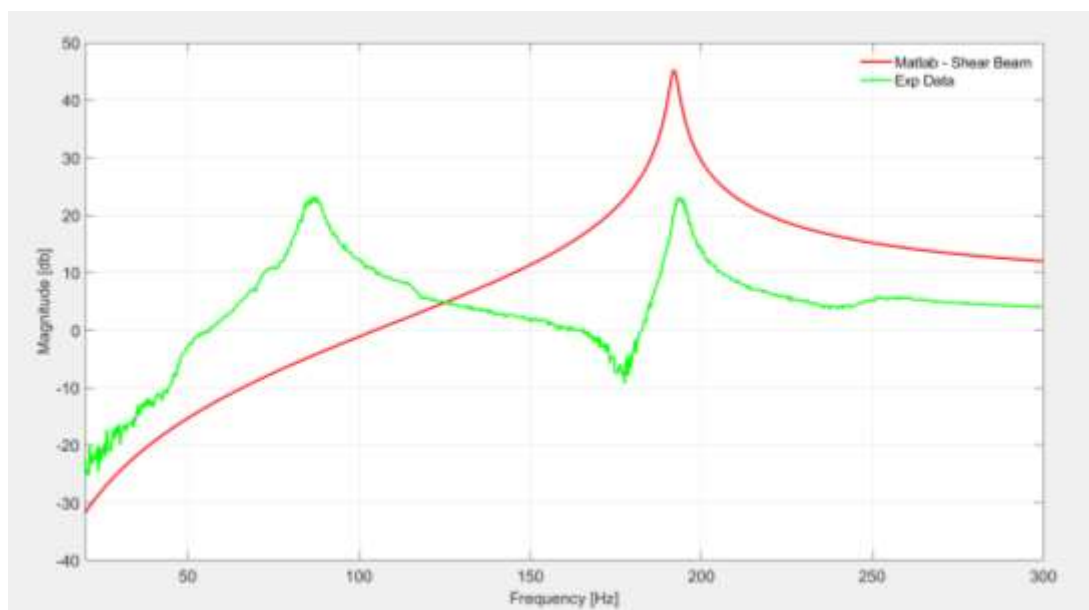


Εικόνα 3.2-Διάγραμμα FRF 2D Μοντέλου- Truss Elements

Μοντέλα w/ Beam Elements:



Εικόνα 3.3- Απεικόνιση Μοντέλου Abaqus (Π.Σ. Πλαισίου)



Εικόνα 3.4- Διάγραμμα FRF 2D Μοντέλου- Beam Elements

Πίνακας 5- Πίνακας Ιδιοτήτων αρχικών μοντέλων

Μοντέλο	1 ^η Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Δυσκαμψία (N/μm)
Truss	190.7	0.6010
Beam	194.3	0.6170
Real_experimental	89	-
Brochure	-	0.07

Τα αποτελέσματα δείχνουν πολύ καλή συνέπεια μεταξύ Abaqus και MATLAB για τον ίδιο τύπο πεπερασμένου στοιχείου, με προσεγγιστικά ίδιες ιδιοσυχνότητες και ίδια απόκριση στην στατική φόρτιση.

Μεταξύ την απόδοση των στοιχείων δικτύωματος και στοιχείων δοκού, παρατηρείται μικρότερη δυσκαμψία στα μοντέλα με στοιχεία δοκού, με βάση τη μεγαλύτερη παραμόρφωση της διάταξης στον έλεγχο στατικής φόρτισης.

Το φαινόμενο της μειωμένης δυσκαμψίας είναι αναμενόμενο. Τα στοιχεία δοκού υπολογίζουν τη ροπή αδράνειας της διατομής του πλαισίου, ενώ το στοιχείο δικτύωματος θεωρεί μία τετράγωνη δοκό. Η διατομή των στοιχείων του πλαισίου του αποσβεστήρα έχει μικρότερη ροπή αδράνειας από μια αντίστοιχη τετράγωνη με το ίδιο εμβαδό, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της φαινόμενης δυσκαμψίας του πλαισίου.

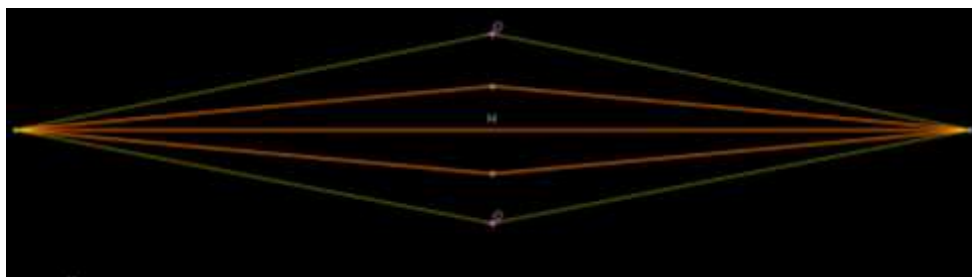
Το πρόβλημα που εμφανίζεται, είναι οι τιμές της 1ης ιδιοσυχνότητας. Με βάση τα πειραματικά δεδομένα αλλά και δεδομένα από το ισοδύναμο υπολογιστικό μοντέλο

που υπάρχει, η 1^η ιδιοσυχνότητα του αποσβεστήρα είναι κοντά στα 90Hz, ενώ η 1^η ιδιοσυχνότητα των μοντέλων είναι κοντά στα 200Hz.

Το σύστημα εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία της γωνίας των στοιχείων πλαισίου του αποσβεστήρα, και στα 2D μοντέλα η γωνία είναι κοντά στις 10°. Στον πραγματικό αποσβεστήρα, η γωνία είναι κοντά στις 5°. Η μεγάλη απόκλιση είναι λόγω των παραδοχών που έγιναν στη δημιουργία του 2D μοντέλου, και συγκεκριμένα στη σύνδεση των στοιχείων του πλαισίου με το πιεζοηλεκτρικό stack σε ένα κόμβο, ενώ στη πραγματικότητα το πλαίσιο συνδέεται με το κεντρικό στοιχείο στο άνω μέρος του stack και στο κάτω αντίστοιχα. Με το πάχος του στοιχείου του stack να είναι ένα μεγάλο ποσοστό του συνολικού ύψους του αποσβεστήρα, δημιουργείται ένα κρίσιμο πρόβλημα στη μοντελοποίηση του εξαρτήματος και δυσκολεύει τη δημιουργία ενός ακριβούς μοντέλου σε 2D περιβάλλον με μονοδιάστατα στοιχεία. Όμως τα 2D μοντέλα είναι απλά ένα βήμα στη προσπάθεια ενός 3D μοντέλου, άρα δεν είναι ανάγκη της εργασίας η απόλυτη ακρίβεια των μοντέλων μονοδιάστατα στοιχεία, εφόσον είναι επαρκή τα στοιχεία που θα δώσουν ώστε το τελικό 3D μοντέλο να είναι ακριβές.

Με γνώμονα το παραπάνω, θα γίνει αλλαγή της αντίστοιχης γωνίας του πλαισίου που έχει υπολογιστεί στη προηγούμενη ενότητα με τη πραγματική γωνία που έχει το πλαίσιο στον αποσβεστήρα, η οποία είναι 5.22° (0.0911 rad).

Διορθωμένα μοντέλα:

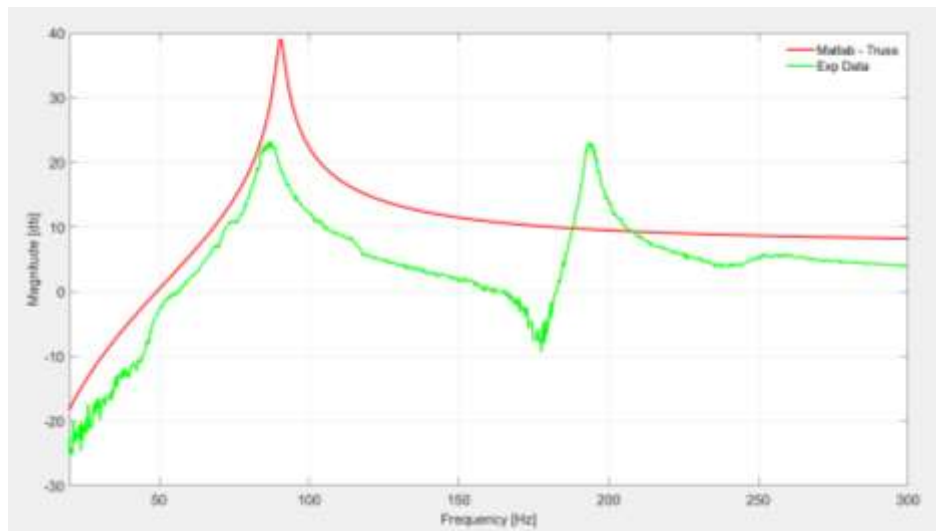


Εικόνα 3.5- Σύγκριση αρχικών και τροποποιημένων διαστάσεων

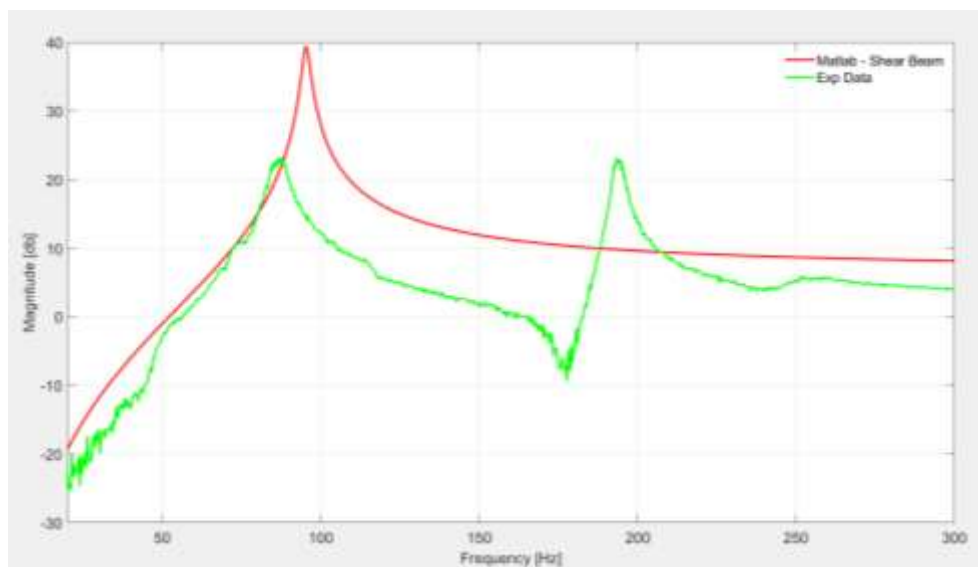
Έτσι, οι διαστάσεις των στοιχείων θα μείνουν σταθερές, κρατώντας τη δυσκαμψία και τη μάζα κάθε στοιχείου πιστή, αλλά με τη διαφορετική γωνία το πλαίσιο θα συνεισφέρει διαφορετικά στη συνολική δυσκαμψία.

Με τον 2^ο γύρο πειραμάτων θα αποδειχθεί εάν είναι σωστή αυτή η παραδοχή για τα μοντέλα.

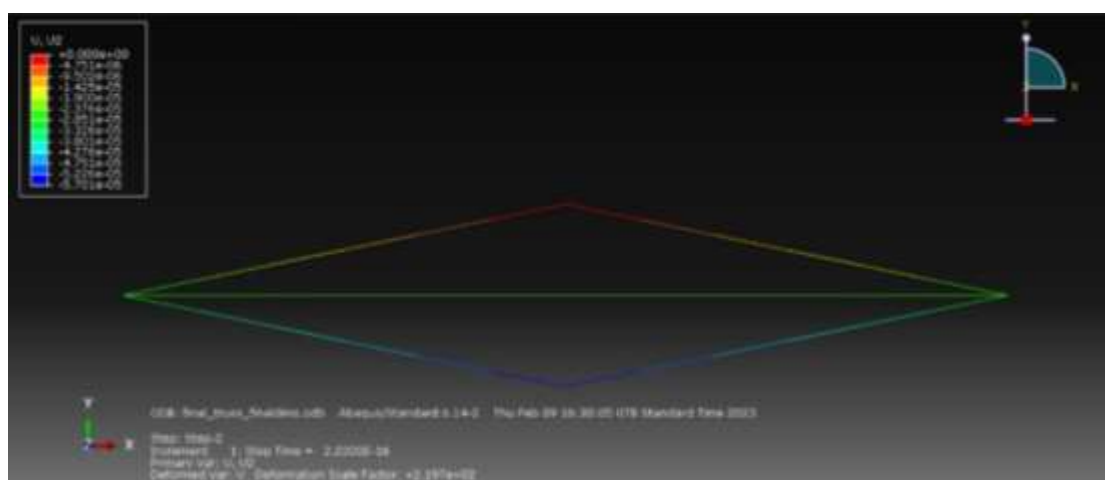
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα απόκρισης συχνότητας για δύναμη 1N, όπως και η 1^η ιδιοσυχνότητα των μοντέλων που δημιουργήθηκαν στο MATLAB.



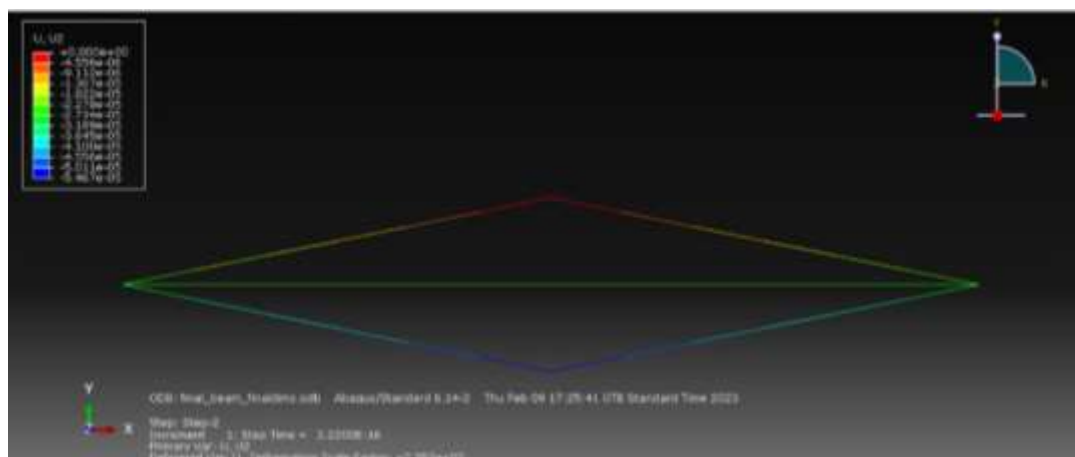
Εικόνα 3.6- Διάγραμμα FRF Διορθωμένου Μοντέλου- Truss Elements



Εικόνα 3.7 Διάγραμμα FRF Διορθωμένου Μοντέλου- Beam Elements



Εικόνα 3.8- Απεικόνιση τροποποιημένου Μοντέλου (Abaqus Truss)



Εικόνα 3.9- Απεικόνιση τροποποιημένου Μοντέλου (Abaqus Beam)

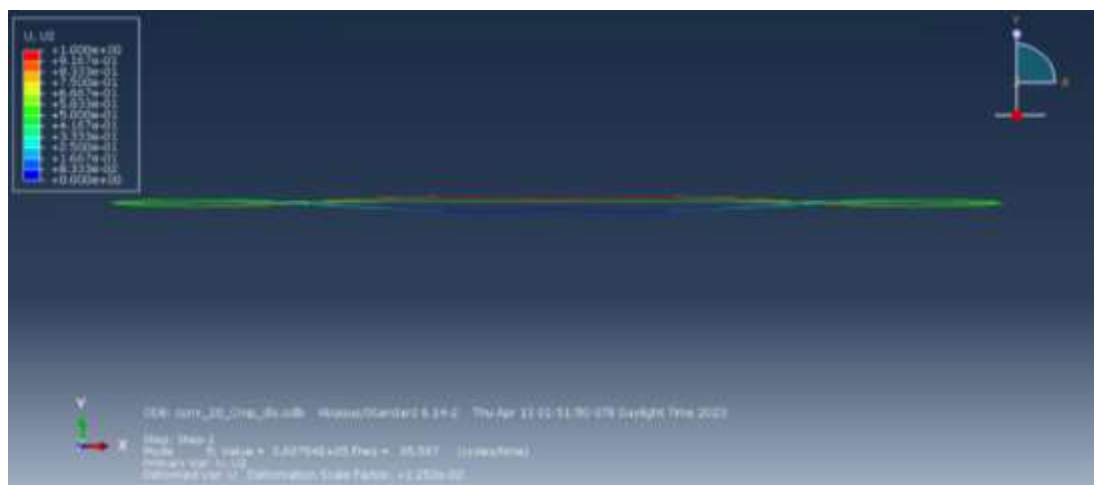
Πίνακας 6- Ιδιότητες Διορθωμένων μοντέλων

Μοντέλο	1 ^η Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Δυσκαμψία (N/μm)
Truss	89.97	0.135
Beam	95.26	0.158
Real_experimental	89	-
Brochure	90	0.07

Παρατηρείται ότι με τη διορθωμένη γωνία οι ιδιότητες των μοντέλων είναι πολύ κοντά σε αυτές των πειραματικών δεδομένων αλλά και στις προδιαγραφές που δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Στη συνέχεια, για τη μελέτη ιδιομορφών και τη μελέτη σύγκλισης, θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο με στοιχεία δοκού του Abaqus, λόγω της ευχρηστότητας του αλλά και της επιβεβαιωμένης συμφωνίας με αυτά του MATLAB.

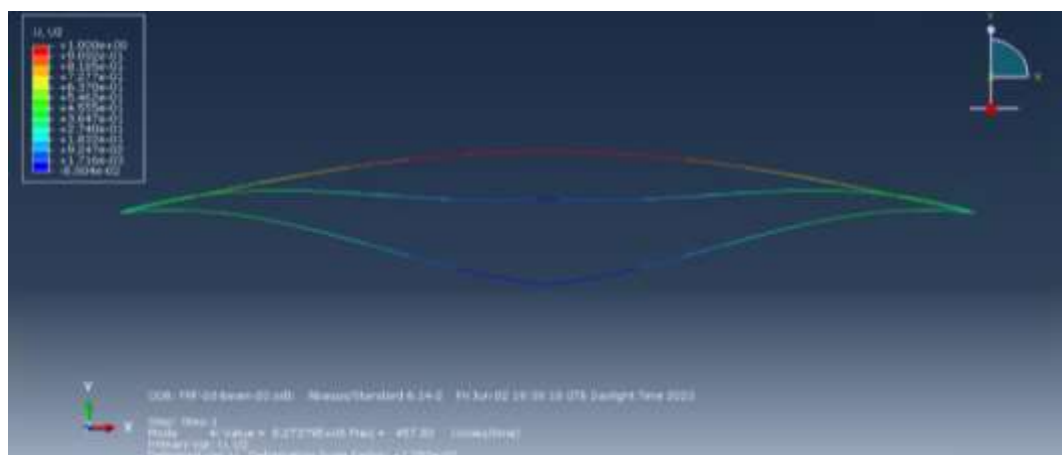
Παρακάτω παρουσιάζονται οι 2 πρώτες ιδιομορφές των μοντέλων:



Εικόνα 3.10- 1η Ιδιομορφή 2D Μοντέλου

Η 1^η ιδιομορφή είναι για τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση του κάτω άκρου της συσκευής, στην οποία αναρτάται και η βοηθητική μάζα του συστήματος. Είναι η κρίσιμη ιδιομορφή του συστήματος, και προσδιορίζει σε ποια συχνότητα μεγιστοποιείται το πλάτος της κατακόρυφης ταλάντωσης του συστήματος.

Είναι σημαντικό να υπάρχει μεγάλη συμφωνία της συγκεκριμένης τιμής μεταξύ των πειραμάτων και των υπολογιστικών μοντέλων.



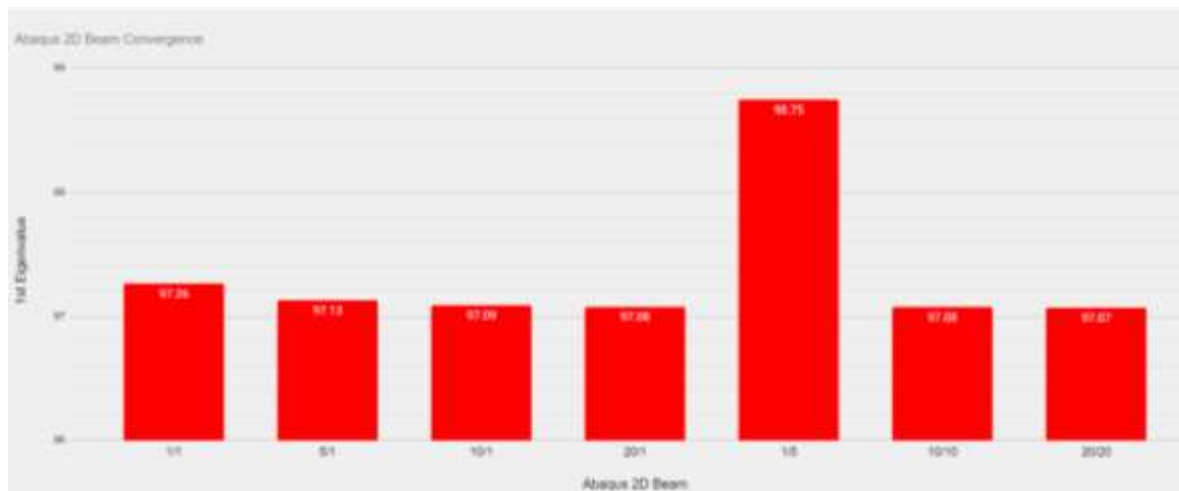
Εικόνα 3.11- 2η Ιδιομορφή 2D Μοντέλου

Η 2^η ιδιομορφή παρουσιάζει τη μέγιστη κάμψη του πιεζοηλεκτρικού stack, η οποία παρουσιάζει θλιπτικά φορτία κατά τη συμπίεση της συσκευής κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση.

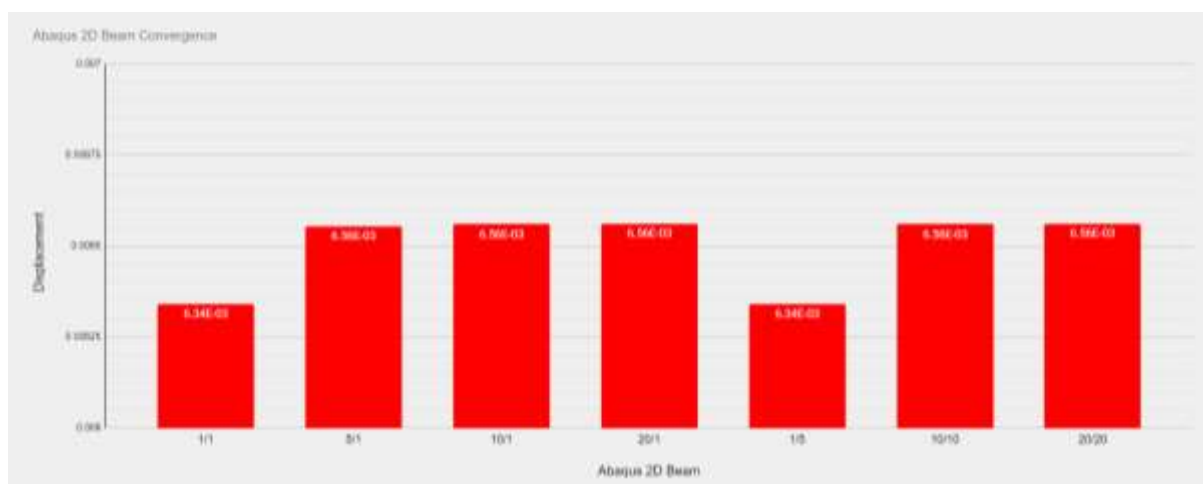
Με τη συμφωνία των μοντέλων μεταξύ Abaqus και MATLAB, στη συνέχεια θα εξεταστεί η επίδραση της διαφορετικής διακριτοποίησης στο Abaqus.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα για τη 1^η ιδιοσυχνότητα και τη δυσκαμψία του μοντέλου Abaqus Beam, για διάφορες διακριτοποιήσεις.

Στον αριθμό 5/1, το 1^ο νούμερο αντιστοιχεί στον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων ανά στέλεχος του πλαισίου και το 2^ο στον αριθμό των στοιχείων για το πιεζοηλεκτρικό stack.



Εικόνα 3.12- Σύγκριση διακριτοποίησης (1η Ιδιοσυχνότητα)



Εικόνα 3.13- Σύγκριση διακριτοποίησης (Μετατόπιση σε mm)

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα καταλήγουμε ότι οι τιμές του μοντέλου συγκλίνουν ικανοποιητικά για διακριτοποίηση 20 πεπερασμένων στοιχείων ανά στέλεχος του αποσβεστήρα.

Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων FRF, χρειάζεται να οριστεί και ο συντελεστής απόσβεσης των μοντέλων.

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα, οι λόγοι απόσβεσης ζ για τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες ω_1 και ω_2 :

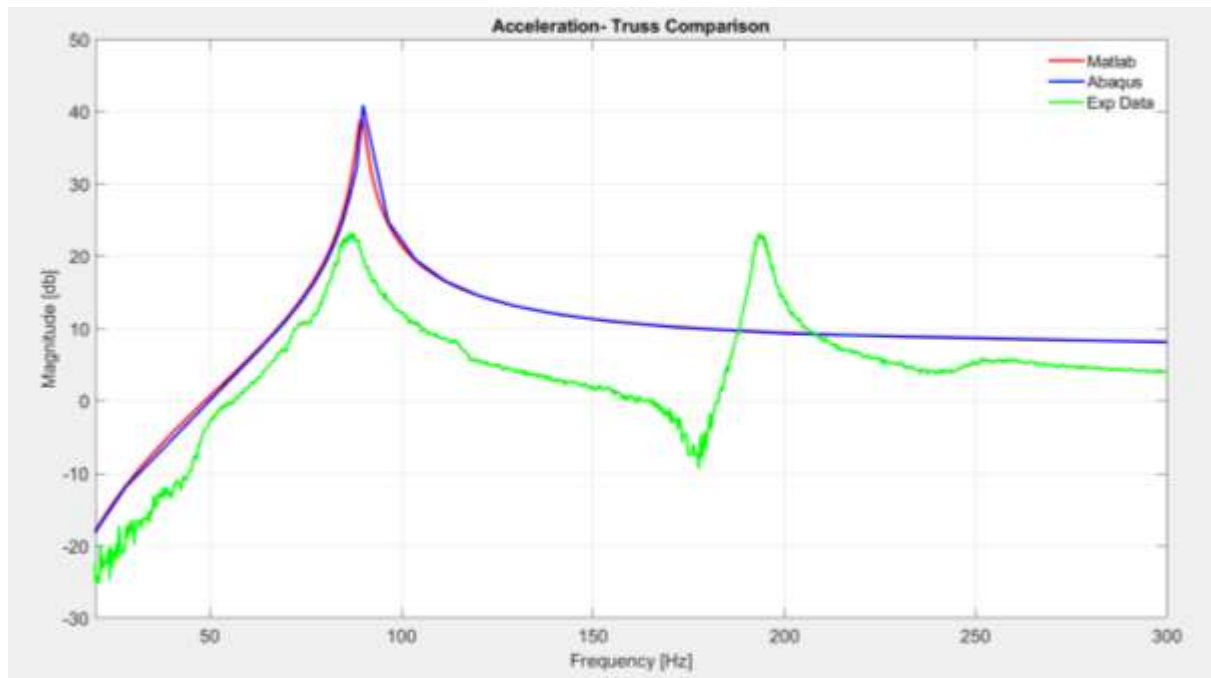
$$\zeta_1: 3.25\%, \zeta_2: 0.77\%$$

Με τις τιμές του λόγου απόσβεσης, μπορεί να υπολογιστεί και η ισοδύναμη αναλογική απόσβεση (Rayleigh Damping), οι συντελεστές της οποίας είναι:

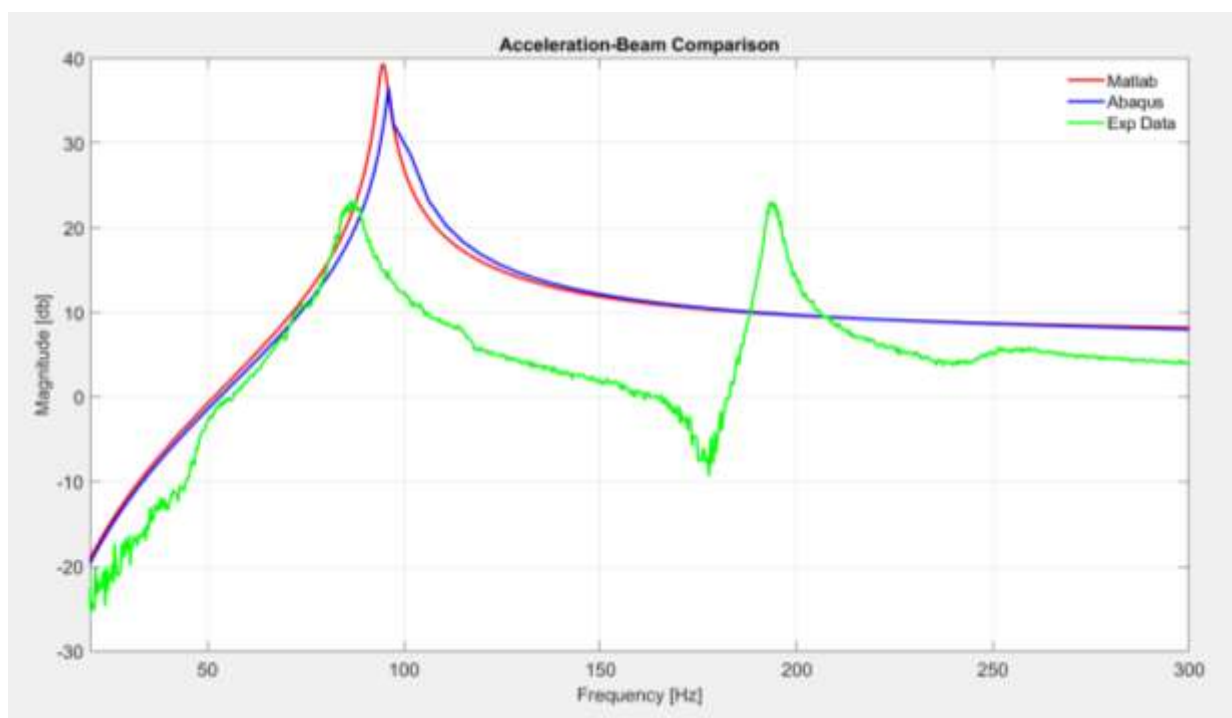
$$\alpha=25$$

$$\beta=1,95 \cdot 10^{-4}$$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα FRF από τα υπολογιστικά μοντέλα του MATLAB και του Abaqus για τους 2 τύπους πεπερασμένων στοιχείων:



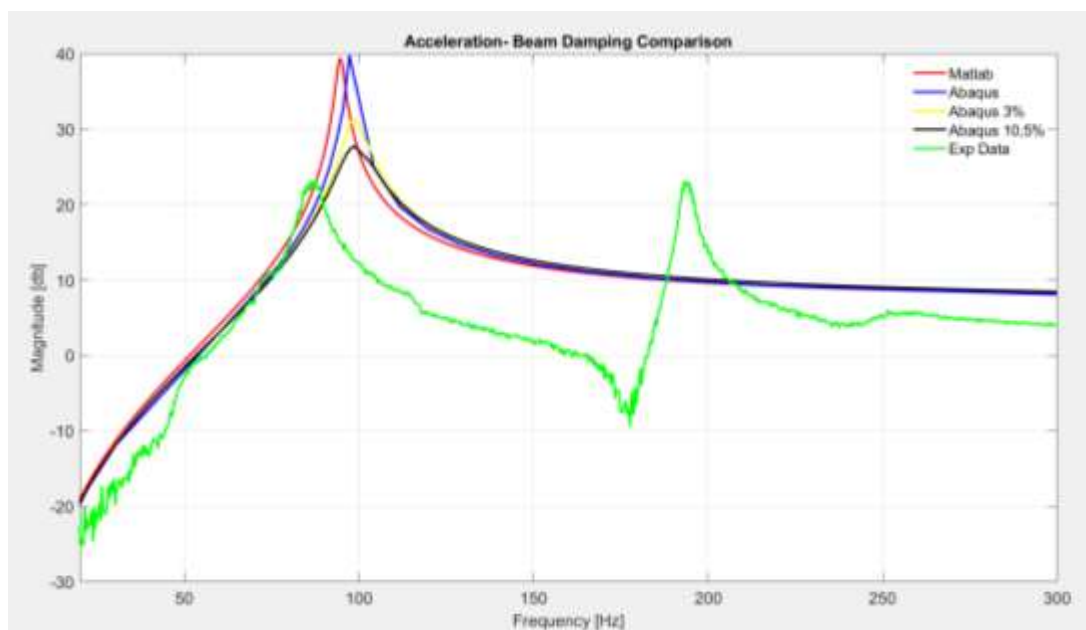
Εικόνα 3.14- Συγκεντρωτικά διαγράμματα FRF (Truss)



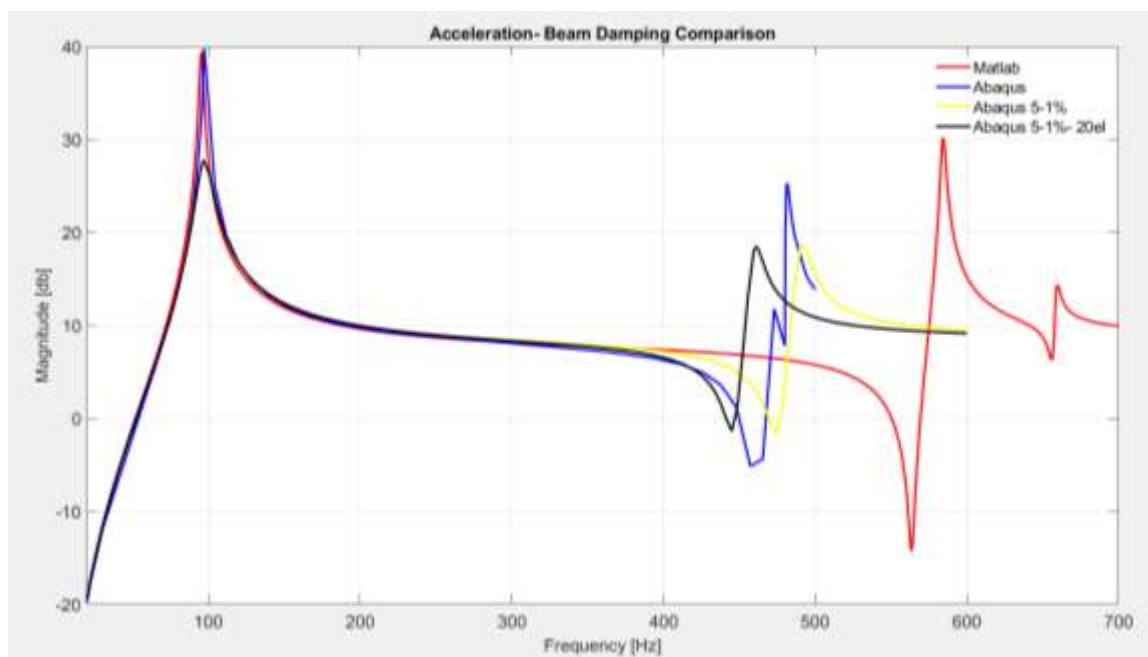
Εικόνα 3.15- Συγκεντρωτικά διαγράμματα FRF (Beam)

Με βάση τα συγκριτικά διαγράμματα, παρουσιάζεται πάλι καλή συμφωνία μεταξύ MATLAB και Abaqus, αλλά είναι προφανές ότι με τη συγκεκριμένη απόσβεση δεν υπάρχει συνέπεια στα πειραματικά δεδομένα με τα δεδομένα των υπολογιστικών μοντέλων. Για να βρεθεί η βέλτιστη τιμή απόσβεσης για τα υπολογιστικά μοντέλα θα γίνουν πειράματα για διάφορες τιμές του ζ στο μοντέλο με στοιχεία δοκού στο Abaqus, λόγω της ευελιξίας που προσφέρει σε πακέτο και της αποδεδειγμένης εγκυρότητάς του, λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα αποτελέσματα. Επίσης επιλέγεται το μοντέλο με τα στοιχεία δοκού, λόγω της δυνατότητας να γίνουν προσομοιώσεις με μεγαλύτερο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων ανά στέλεχος.

Στο παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα FRFs για διάφορες τιμές ζ , στη προσπάθεια να βρεθεί η κατάλληλη τιμή για να επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ πειραματικών δεδομένων και δεδομένων από τα υπολογιστικά μοντέλα.

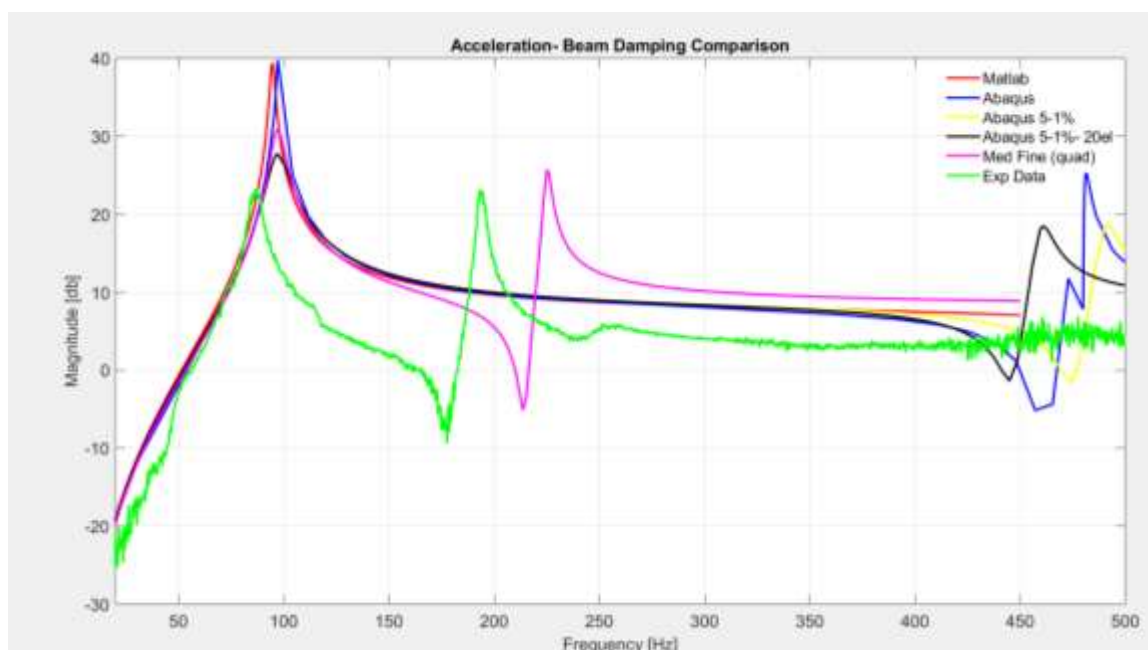


Εικόνα 3.16- Σύγκριση Damping (2D)



Εικόνα 3.17- Σύγκριση Damping (1)

Παρατηρείται ότι σε σχέση με το μοντέλο του Matlab, στο Abaqus η 2^η ιδιοτιμή είναι σε σημαντικά χαμηλότερη συχνότητα. Επίσης, παρατηρείται ότι η αύξηση της διακριτοποίησης έχει επίδραση στις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων, κυρίως της 2^{ης}, αλλά όχι τόσο μεγάλη ώστε να πλησιάσει τις τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων ή και τις τιμές που βγαίνουν από το 3D μοντέλο, το οποίο θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα όμως, είναι επιβεβαίωση της ύπαρξης της 2^{ης} ιδιοσυχνότητας, η ιδιομορφή της οποίας παρουσιάστηκε παραπάνω, ένα αποτέλεσμα που αρχικά είχε προβληματίσει κατά τη διάρκεια των πειραμάτων στη πραγματική συσκευή.



Εικόνα 3.18-Τελική σύγκριση 2D Μοντέλων

Σημαντικό να διευκυνθεί στο επόμενο κεφάλαιο, είναι η διαφορά στην 2^η ιδιοσυχνότητα μεταξύ των 2D και 3D μοντέλων, εφόσον επιβεβαιωθεί ότι αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή.

4. 3D Μοντέλα σε υπολογιστικά Πακέτα:

Με την δημιουργία των 2D μοντέλων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μεταξύ του MATLAB και του Abaqus, τώρα θα δημιουργηθούν στο Abaqus 3D μοντέλα που θα είναι πιστά στις διαστάσεις του πραγματικού αποσβεστήρα.

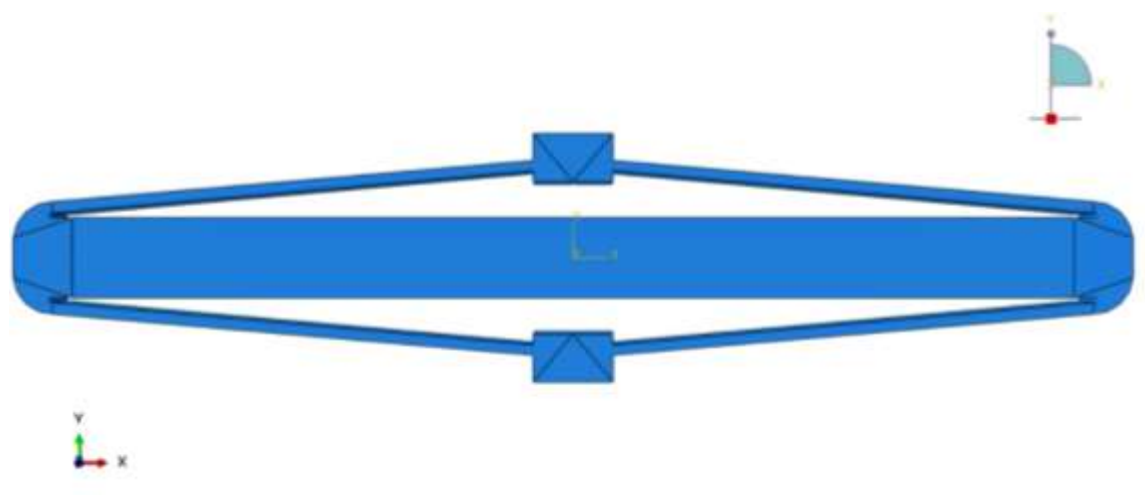
3D Models

Τα ζητούμενα δεδομένα από τα υπολογιστικά μοντέλα θα επιτρέψουν τη σύγκριση της συμπεριφοράς του νέου μοντέλου σε σύγκριση με τα 2D μοντέλα. Για την επαρκή σύγκριση των ιδιοτήτων αλλά και της συμπεριφοράς του αποσβεστήρα υπό φόρτιση στο επιθυμητό πεδίο συχνοτήτων (0-450 Hz) χρειάζεται να βρεθούν τα παρακάτω: Ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές των μοντέλων, απόκριση σε εφαρμογή δύναμης στατικά αλλά και δυναμικά (FRF).

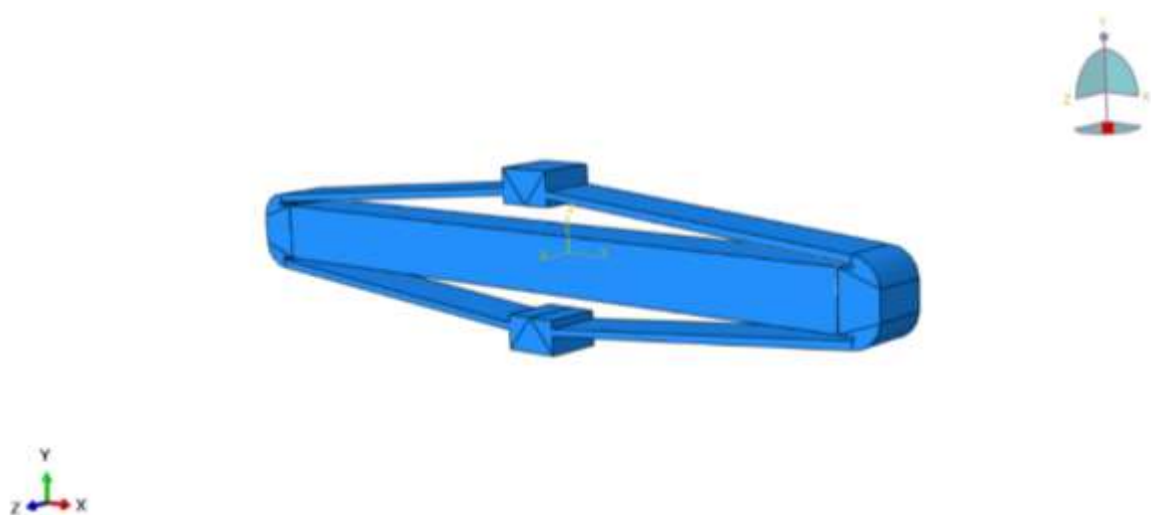
Για την εύρεση ιδιοσυχνοτήτων και τον έλεγχο απόκρισης συχνότητας, έγινε έλεγχος στις συχνότητες 1-450Hz. Η φόρτιση στα μοντέλα της διάταξης είναι 1N.

Οι ιδιοσυχνότητες ενδιαφέροντος είναι για ιδιομορφές που μεγιστοποιούν τη κάθετη μετατόπιση του κόμβου στον οποίο υπάρχει η προσαρτημένη μάζα.

Τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για το 3D μοντέλο είναι τρισδιάστατα δομικά στοιχεία παραμόρφωσης, τετράεδρα πυραμιδικά (4 κόμβων) και εξάπλευρα κυβικά (8 κόμβων).

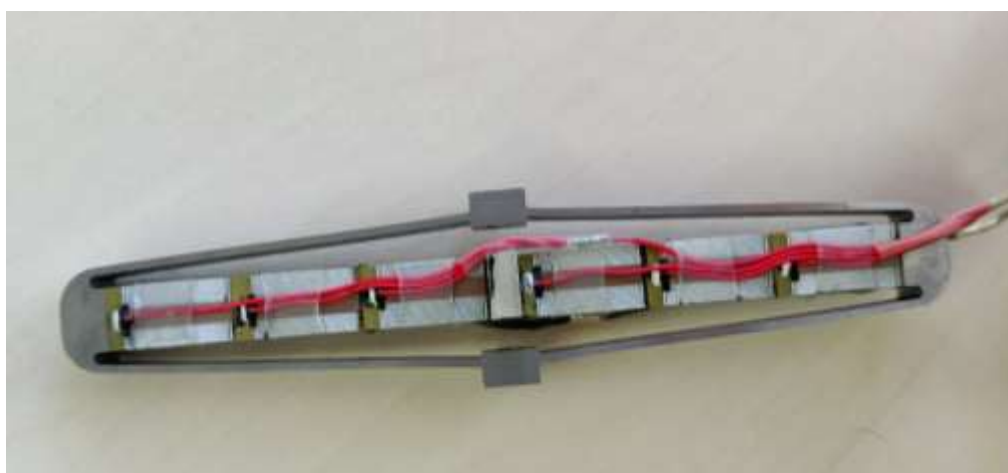


Εικόνα 4.1- Απεικόνιση 3D Μοντέλου



Εικόνα 4.2-- Απεικόνιση 3D Μοντέλου (1)

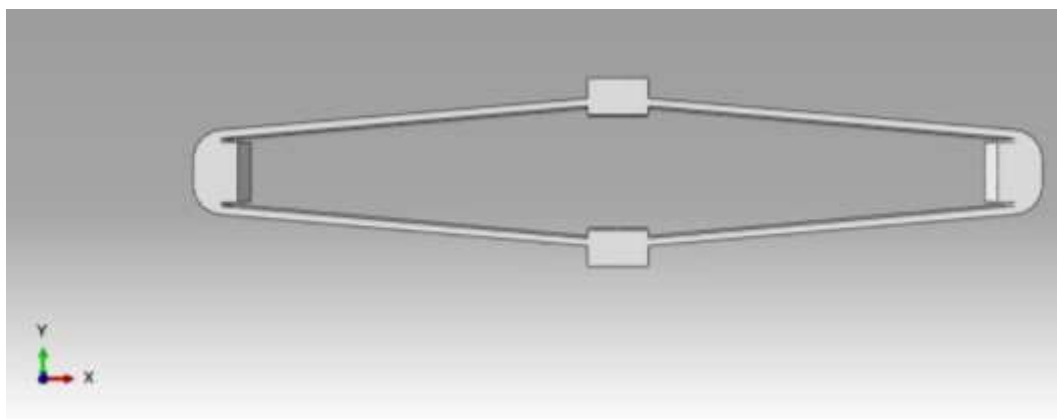
Στη παρακάτω απεικόνιση της συσκευής, παρατηρείται ότι η διάταξη των πιεζοηλεκτρικών stacks που απαρτίζουν το κεντρικό στοιχείο δεν έχει μοντελοποιηθεί με απόλυτη λεπτομέρεια. Αυτή η επιλογή έχει γίνει λόγω έλλειψης πληροφοριών σχετικά με τις διαστασιολογικές λεπτομέρειες της διάταξης. Η συγκεκριμένη σχεδιαστική διαφορά θα ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μοντέλου.



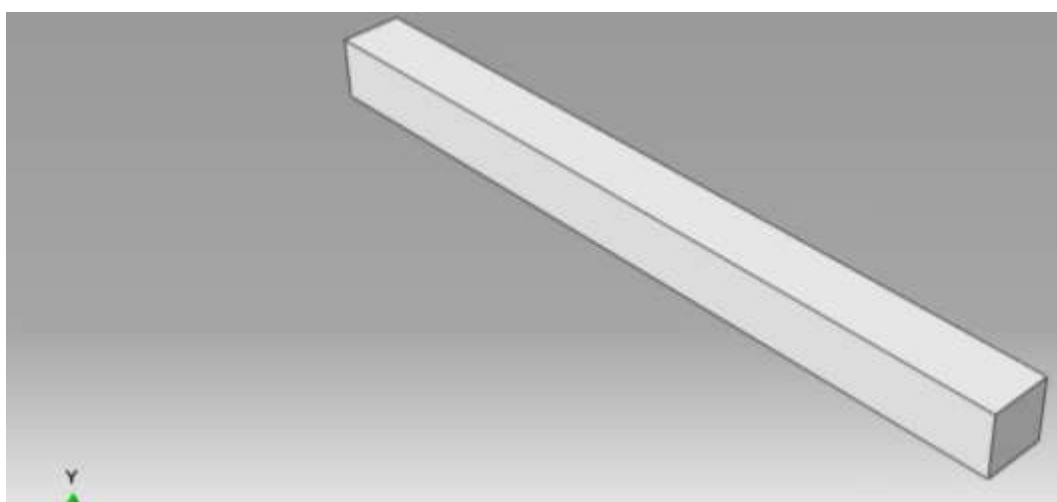
Εικόνα 4.3- Απεικόνιση Πιεζοηλεκτρικής συσκευής

Οι διαστάσεις είναι ίδιες με τα διαστασιολογικά σχέδια του εξαρτήματος, τα οποία παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.

Το μηχανικό μοντέλο, αποτελείται από 2 στοιχεία, το πλαίσιο και τη πιεζοηλεκτρική διάταξη:



Εικόνα 4.4- Πλαίσιο 3D Μοντέλου



Εικόνα 4.5- Πιεζοηλεκτρική συστοιχία 3D Μοντέλου

Στη περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου, είναι απαραίτητο να οριστούν τα σημεία στα οποία θα βρίσκονται οι κόμβοι των πεπερασμένων στοιχείων που θα συντεθεί το εξάρτημα.

Ο ορισμός των σημείων μπορεί να γίνει ανά ακμή του εξαρτήματος ξεχωριστά, ή καθολικά σε όλες τις ακμές.

Προφανώς αυτό δε γίνεται αυθαίρετα, αλλά ορίζονται παράμετροι απόστασης μεταξύ των σημείων ή ορίζεται ο αριθμός των σημείων. Λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας, θα προτιμηθεί η μέθοδος του καθολικού ορισμού σημείων (Global seed assignment), και θα οριστεί με την απόσταση μεταξύ των σημείων.

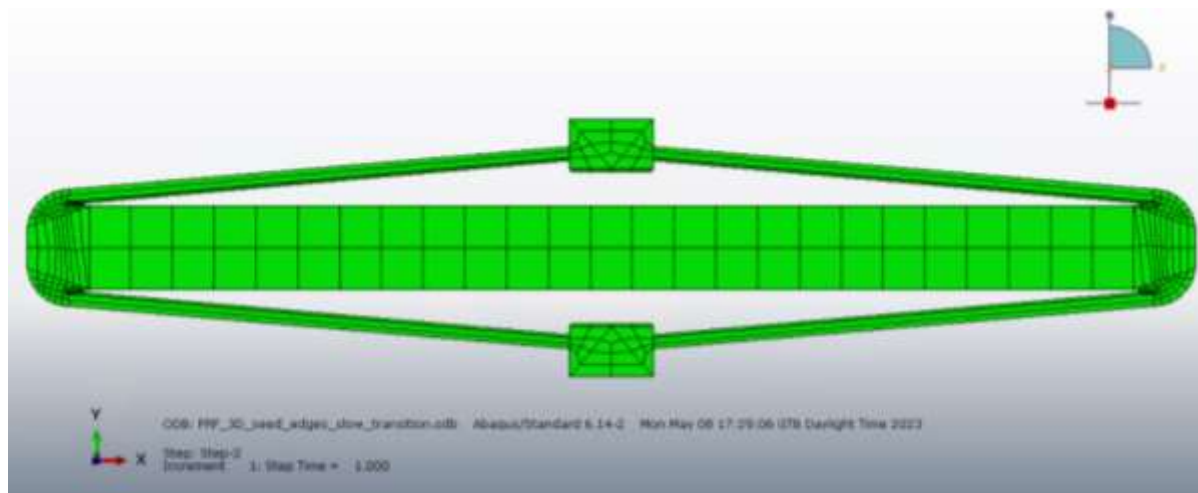
Αρχικά, ορίζεται σαν μεγάλη διακριτοποίηση (fine meshing), η απόσταση μεταξύ των κόμβων στα 1mm, και η μικρή διακριτοποίηση (coarse meshing) 5mm. Όσο πιο μεγάλη η διακριτοποίηση, τόσο πιο απαιτητικό υπολογιστικά είναι το μοντέλο, αλλά τόσο πιο ακριβής είναι η προσομοιώσεις που θα γίνουν μέσω του κάθε μοντέλου.

Οι ρίζες για τη διακριτοποίηση είναι ένας οδηγός που επιτρέπει στο υπολογιστικό πακέτο να ορίσει διακριτοποίηση, όμως για να γίνει αυτό χρειάζεται να οριστεί και η μέθοδος που θα χρησιμοποιήσει το Abaqus ώστε να κάνει τη διακριτοποίηση. Λόγω των περίπλοκων γεωμετριών του εξαρτήματος που θα διακριτοποιηθεί, η μέθοδος σάρωσης (sweep), είναι η μοναδική λειτουργική για χρήση κυβικών στοιχείων.

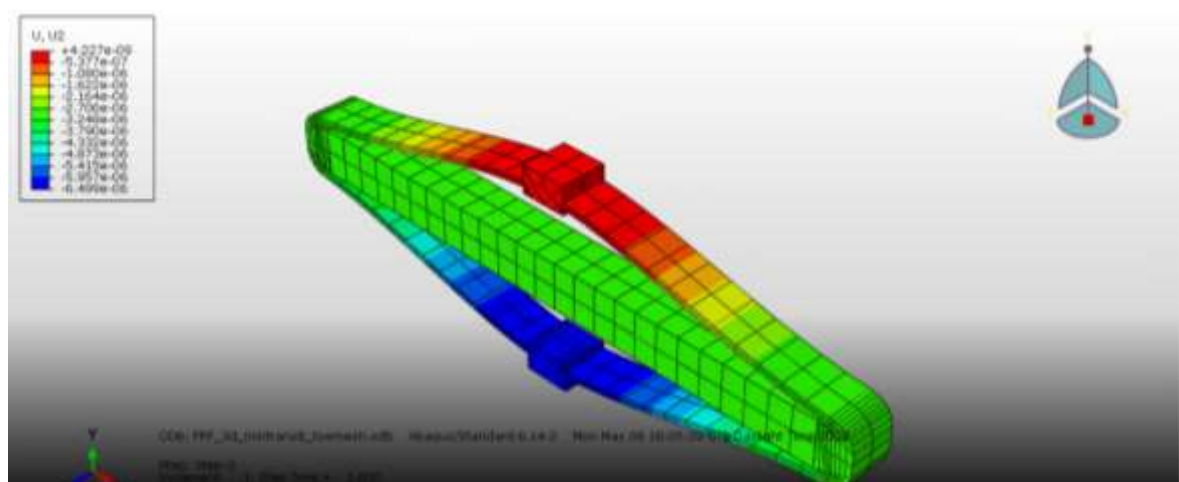
Για τη χρήση της μεθόδου sweep χρειάζεται να επιλεγεί και ο αλγόριθμος με τον οποίο θα γίνει η σάρωση του εξαρτήματος.

Αρχικά υπάρχει η μέθοδος κεντρικού άξονα (medial axis), αλλά και η μέθοδος εφόρμησης (advancing front), με την αποτελεσματικότητά τους να συγκρίνεται στη συνέχεια.

Σαν πρώτη σύγκριση, το μοντέλο θα διακριτοποιηθεί με τη μέθοδο κεντρικού άξονα, για απόσταση 5mm:



Εικόνα 4.6- Medial Axis Coarse Model (3D)



Εικόνα 4.7- Medial Axis Coarse Model (3D) (1)

Όπως φαίνεται από τις εικόνες, στις αλλαγές γεωμετρίας το πλέγμα πυκνώνει, κάτι που σημαίνει ότι το πρόγραμμα δουλεύει όπως είναι επιθυμητό.

Πίνακας 7- Πίνακας Αρχικών 3D Model

Μοντέλο	Αριθμός Π.Σ.	1 ^η Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Δυσκαμψία (N/μm)
Medial Axis 3D (Coarse)	3375	95	0.154
Beam 2D	100	97.07	0.152
Real_experimental	-	89	-

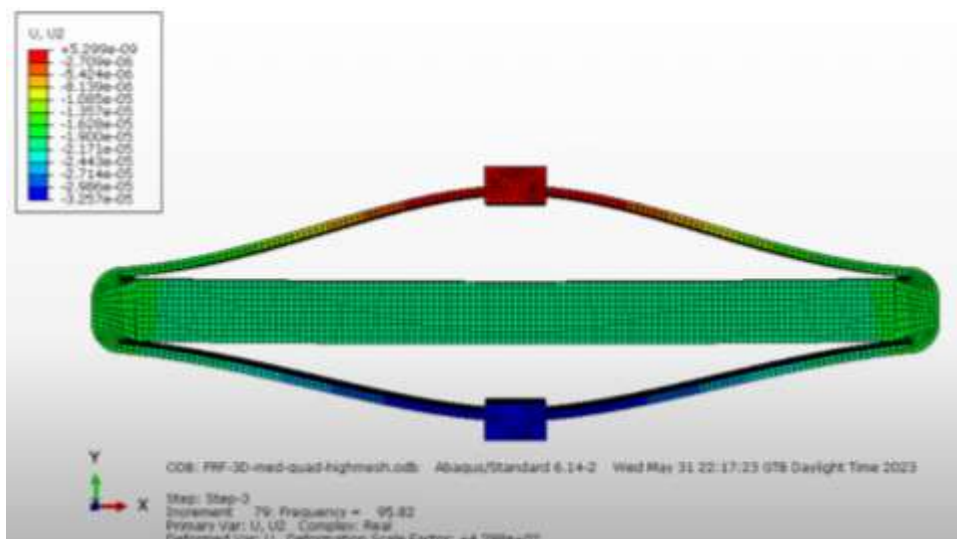
Τα αποτελέσματα που είχε το αρχικό μοντέλο είναι σχετικά κοντά στα αναμενόμενα, και πλησιάζουν πολύ σε αυτά των 2D μοντέλων.

Στη συνέχεια θα εξεταστούν τα αποτελέσματα για μεγαλύτερο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων αλλά και διαφορετικούς τύπους διακριτοποίησης, με τη μέθοδο εφόρμησης αλλά και τη χρήση τετράεδρων στοιχείων.

Πίνακας 8- Πίνακας δεδομένων προσομοιώσεων (3D Models)

Μοντέλο	Αριθμός Π.Σ.	1 ^η Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Δυσκαμψία (N/μm)
Medial Axis (Coarse)	3375	95	0.154
Medial Axis (Fine)	23640	95	0.153
Medial Axis (Ultra)	167882	96.03	0.156
Medial Axis (Fine) 20 node	22282	97.05	0.16
Advancing Front (Coarse)	4000	87.97	0.136
Advancing Front (Fine)	24430	90.865	0.142
Advancing Front (Ultra)	822584	96.1	0.156
Advancing Front (Fine)-20 node	23430	97.067	0.16
Tetra (Fine) 10 node	112062	97.177	0.16
Beam 2D	100	97.26	0.152
Real_experimental	-	89	-

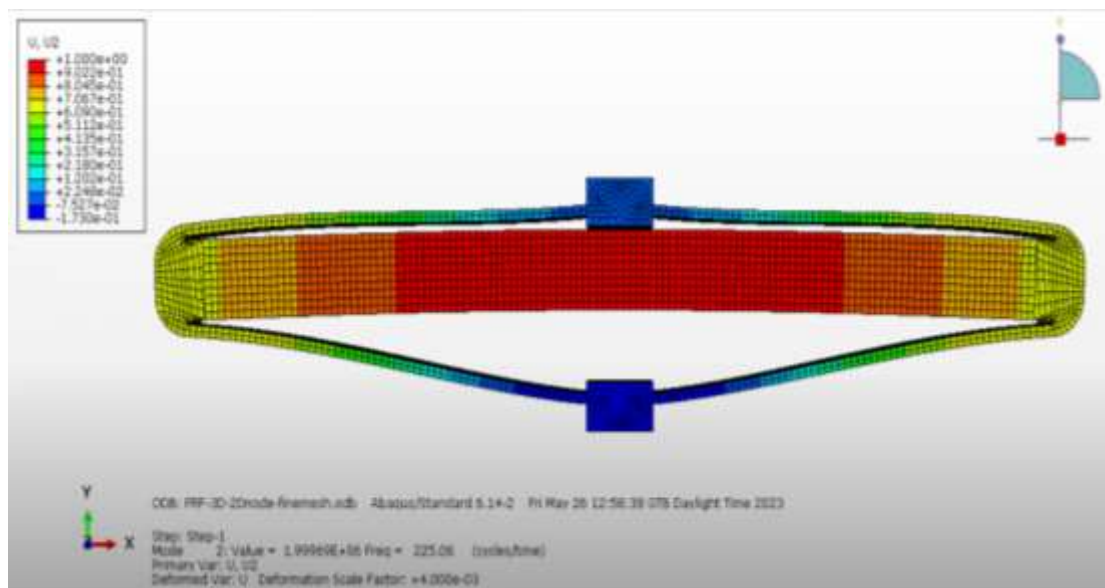
Όπως και στις τιμές της ιδιοσυχνότητας αλλά και της δυσκαμψίας, και στα διαγράμματα FRF παρατηρείται ότι η μέθοδος εφόρμησης είναι αρκετά πιο ασταθής από τη μέθοδο κεντρικού άξονα, αλλά με τη σωστή διακριτοποίηση έχει αποτελέσματα πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα, Έτσι, είναι η επικρατέστερη μέθοδος και τα αποτελέσματα των μοντέλων που έχει χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος θα χρησιμοποιηθούν σαν σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση του υπολογιστικού μοντέλου. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι 2 πρώτες ιδιομορφές του μοντέλου:



Εικόνα 4.8-1η Ιδιομορφή 3D Μοντέλου

Η 1^η ιδιομορφή είναι για τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση του κάτω άκρου της συσκευής, στην οποία αναρτάται και η βοηθητική μάζα του συστήματος. Είναι η κρίσιμη ιδιομορφή του συστήματος, και προσδιορίζει σε ποια συχνότητα μεγιστοποιείται το πλάτος της κατακόρυφης ταλάντωσης του συστήματος.

Είναι σημαντικό να υπάρχει μεγάλη συμφωνία της συγκεκριμένης τιμής μεταξύ των πειραμάτων και των υπολογιστικών μοντέλων.



Εικόνα 4.9- 2η Ιδιομορφή 3D Μοντέλου

Η 2^η ιδιομορφή παρουσιάζει τη μέγιστη κάμψη του πιεζοηλεκτρικού stack, η οποία παρουσιάζει θλιπτικά φορτία κατά τη συμπίεση της συσκευής κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση.

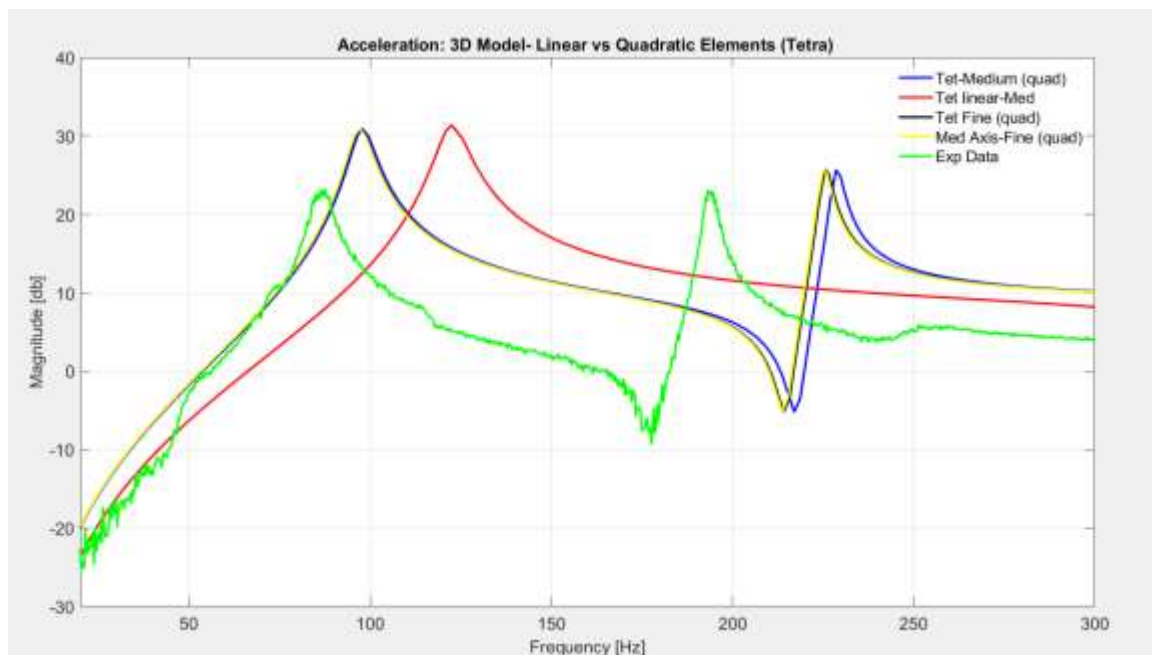
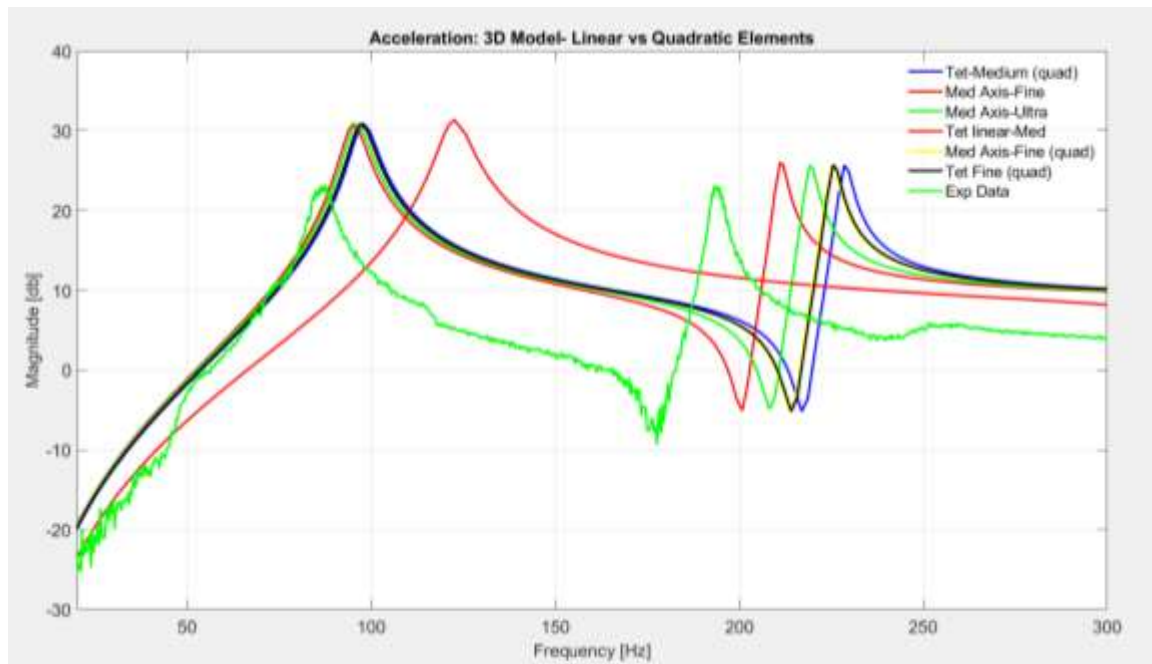
Οι 2 πρώτες ιδιομορφές, οι μόνες που είναι στο εύρος λειτουργίας της συσκευής (<500Hz), είναι πανομοιότυπες στα 3D και στα 2D μοντέλα. Αυτό σημαίνει ότι η κινηματική και η δυναμική τους συμπεριφορά μεταφράζεται σωστά στον 2D χώρο. Όμως, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συχνότητα της 2^{ης} ιδιομορφής έχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των 2 μοντέλων.

Στη συνέχεια, με τη χρήση των διαγραμμάτων FRF θα αξιολογηθεί η συμφωνία στις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων, αλλά και των κορυφών των επιταχύνσεων των κόμβων που παρουσιάζονται στις ιδιοσυχνότητες, με τις οποίες μπορεί να αξιολογηθεί η φυσική απόσβεση των μοντέλων.

Για την επιβολή της απόσβεσης του μοντέλου, όπως και στα 2D μοντέλα, θα χρησιμοποιηθεί Modal Damping.

$$\zeta_1: 3.25\%, \zeta_2: 0.77\%$$

Με βάση τα παρακάτω διαγράμματα FRF, παρατηρείται ότι το τρισδιάστατο μοντέλο είναι πολύ πιο εύστοχο στη προσομοίωση του αποσβεστήρα σχετικά με το 2D, χωρίς να γίνουν πειράματα με διαφορετικές τιμές απόσβεσης.

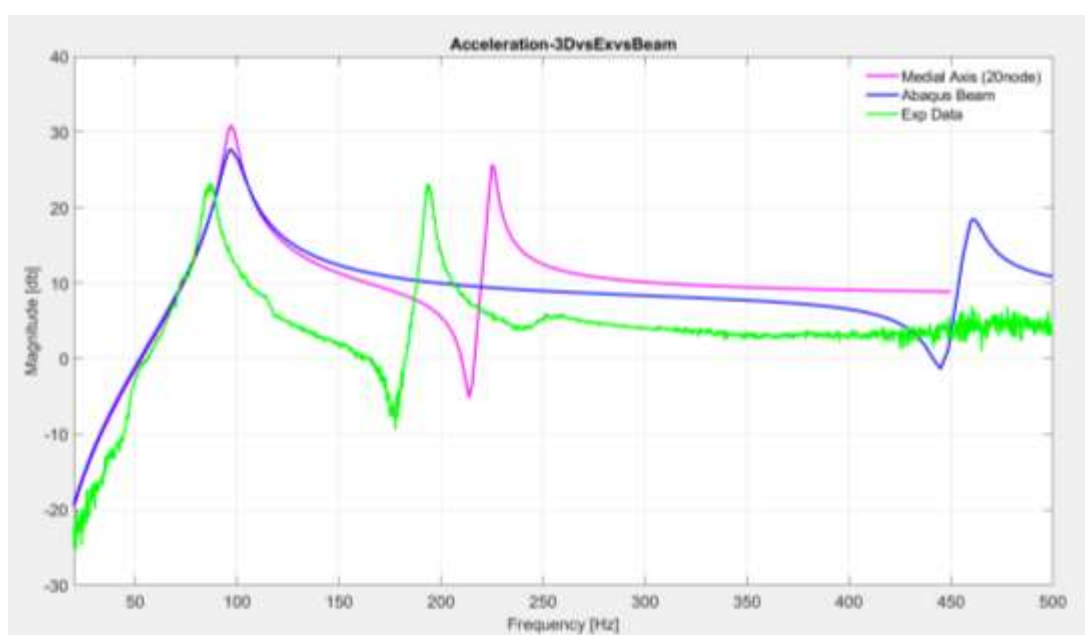


Για την επιλογή της βέλτιστης επιλογής στοιχείου/διακριτοποίησης, με βάση τα παραπάνω διαγράμματα αλλά και τον πίνακα δεδομένων, παρατηρείται ότι είτε τα κυβικά είτε τα τετράπλευρα γραμμικά στοιχεία είναι ακατάλληλα για σύγκλιση των αποτελεσμάτων με ένα ικανοποιητικά μικρό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, η επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν στοιχεία με τετραγωνική διαμόρφωση (quadratic formulation).

Λόγω του μικρότερου αριθμού στοιχείων που απαιτούνται, θα προτιμηθεί σαν πρότυπο μοντέλο αυτό με τα στοιχεία κύβου, και συγκεκριμένα με μέθοδο meshing κεντρικού άξονα, λόγω της μεγαλύτερης σταθερότητας που παρουσιάζει για διακριτοποιήσεις με λιγότερα στοιχεία.

Σαν μία υποσημείωση, η μεγάλη απόκλιση στη τιμή της 2ης ιδιοσυχνότητας σε σχέση με τη πραγματική συσκευή δικαιολογείται στην ύπαρξη αποστάτη, ο οποίος δεν έχει μοντελοποιηθεί στο υπολογιστικό μοντέλο και επηρεάζει τη κάμψη του stack (2^η ιδιομορφή).

Παρακάτω παρατίθεται συγκριτικό διάγραμμα με το βέλτιστο μοντέλο 2D. Η συμπεριφορά του βέλτιστου τρισδιάστατου μοντέλου είναι πολύ πιο κοντά στη πραγματική απόκριση του αποσβεστήρα, και επίσης παρουσιάζεται και η 2^η ιδιοσυχνότητα στο διάγραμμα FRF, η οποία υπάρχει και επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα.



Εικόνα 4.10- Συγκριτικό διάγραμμα FRF (3D vs 2D)

Το μοντέλο 3D, καταφέρνει να επιβεβαιώσει την ορθότητα των παραδοχών που έχουν γίνει στο μοντέλο 2D, αναπαριστώντας με καλύτερη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα.

Οι αποκλίσεις που παραμένουν είναι δύσκολο να χαρακτηριστούν και να εξαλειφθούν, λόγω της απώλειας παραπάνω δεδομένων για τη συσκευή. Επίσης, η παρουσία περισσότερων πειραματικών δεδομένων θα μπορούσαν να εξασφαλίσουν μια βάση στην οποία θα ήταν δυνατό τα υπολογιστικά μοντέλα της συσκευής να παραμετροποιηθούν με στόχο να αντιγράφουν τη συμπεριφορά της συσκευής από τα πειραματικά δεδομένα, και όχι να γίνεται η προσπάθεια με τις ίδιες προδιαγραφές να επιτευχθεί ίδια συμπεριφορά σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας.

5. Πιεζοηλεκτρικά Μοντέλα σε υπολογιστικά Πακέτα:

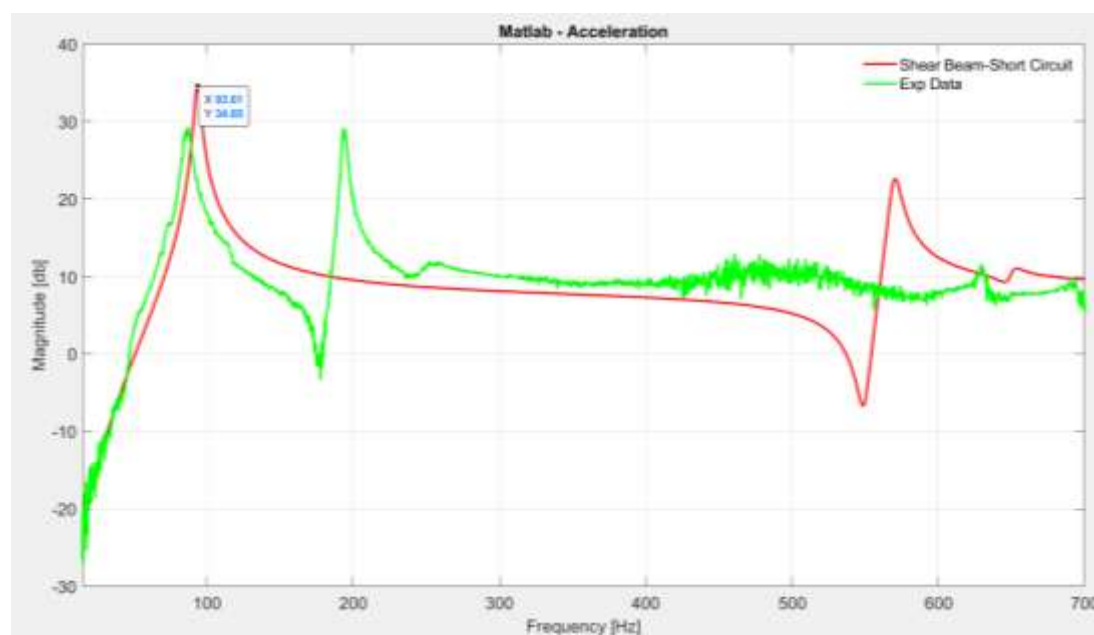
2D Πιεζοηλεκτρικά Μοντέλα

Με βάση τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2, θα συνεχιστεί η αξιοποίησή τους με την εισαγωγή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και των απαραίτητων στοιχείων στα αντίστοιχα μοντέλα, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

Στο 2^ο κεφάλαιο, έγινε η σύγκριση μοντέλων Abaqus και Matlab, με τον ίδιο τύπο δομικών πεπερασμένων στοιχείων (Truss, Beam, Shear Beam). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης έδειξαν πανομοιότυπα αποτελέσματα μεταξύ του Abaqus και του MATLAB, με προτιμότερο τύπο πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.) αυτό του στοιχείου δοκού με διάτμηση (Timoshenko Beam). Γι' αυτό τον λόγο, για επίπεδα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων της συσκευής, η μελέτη του πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος θα γίνει στο μοντέλο MATLAB, με πεπερασμένα στοιχεία δοκού με διάτμηση. Η διακριτοποίηση του μοντέλου είναι ένα Π.Σ. ανά στοιχείο της διάταξης.

Το μοντέλο που μελετήθηκε νωρίτερα, χωρίς τις πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις, περιγράφει τη συσκευή στη λειτουργία Short Circuit, στην οποία δεν υπάρχει παραγωγή διαφοράς δυναμικού $\Delta\phi$, μέσω της οποίας αλλάζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της συσκευής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου χωρίς την επίδραση του πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος (Short circuit):



Εικόνα 5.1-Διάγραμμα FRF 2D Μοντέλου (Short Circuit)

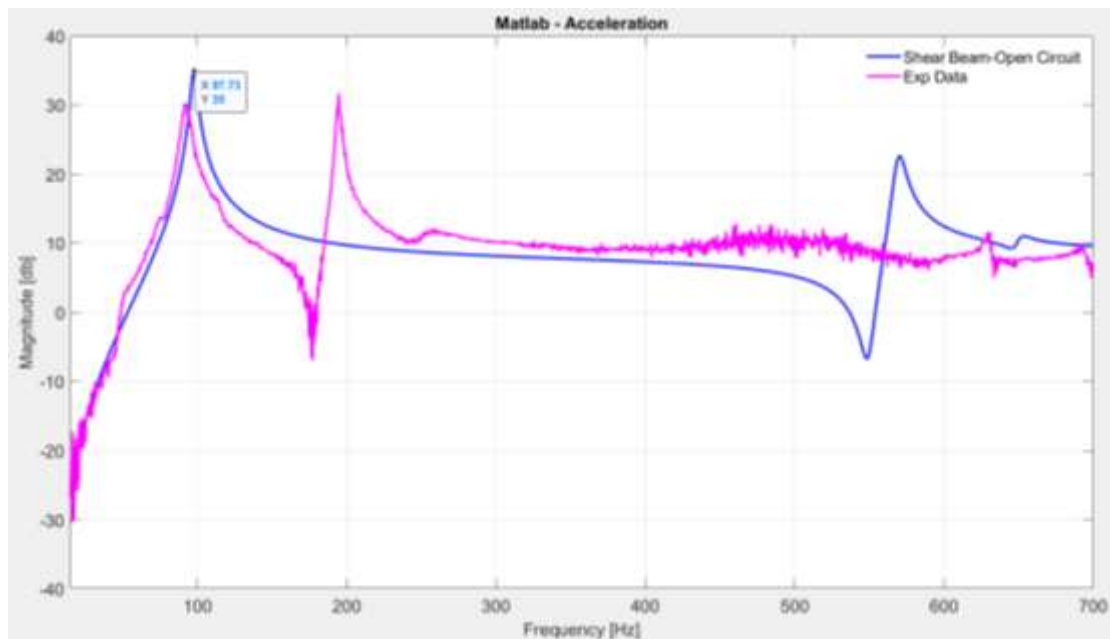
Οι πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις και η επίδραση του στοιχείου στη συσκευή αναλύονται στο 2^ο κεφάλαιο, παρακάτω παρουσιάζονται τα απαραίτητα στοιχεία που θα εισαχθούν στο Matlab:

$$Cp = 27 \cdot 10^{-6} \quad (\text{Farad})$$

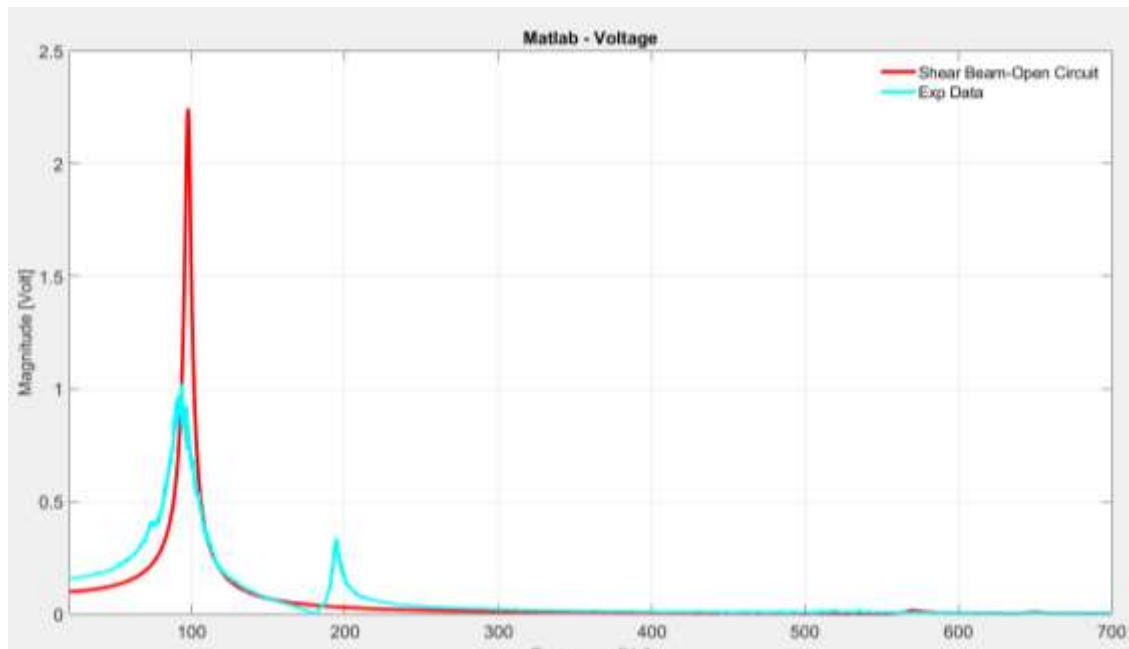
$$\bar{e} = 8 \quad (\text{Newton/Volt})$$

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναφέρεται στη πιεζοηλεκτρική συστοιχία σε κατάσταση (Open Circuit), δηλαδή χωρίς τη παρουσία εξωτερικού κυκλώματος ($R=0$, $L=1/0$).

Όπως και στο μοντέλο σε κατάσταση Short Circuit, θα βρεθούν οι ιδιοσυχνότητες του μοντέλου, η δυσκαμψία του και θα μελετηθεί και η απόκρισή του σε δυναμική φόρτιση στο εύρος συχνοτήτων 0-450 Hz.

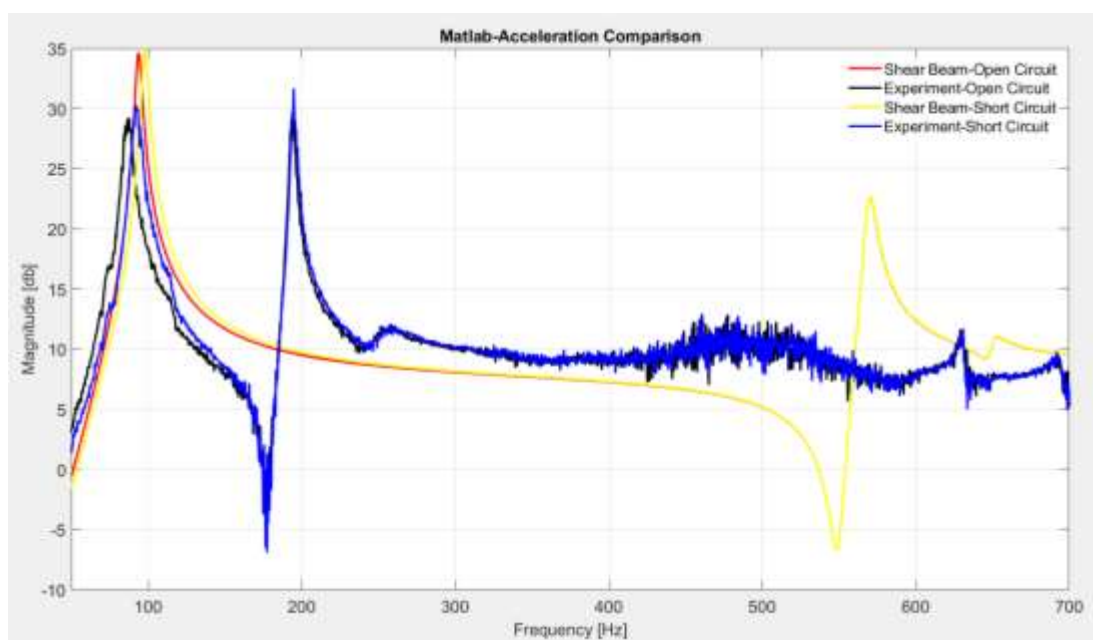


Εικόνα 5.2- Διάγραμμα FRF Πιεζοηλεκτρικού 2D Μοντέλου



Εικόνα 5.3- Διάγραμμα Διαφοράς δυναμικού 2D Μοντέλου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ του Short και Open Circuit, για το μοντέλο του Matlab και των πειραματικών δεδομένων:



Εικόνα 5.4- Τελικά διαγράμματα 2D Μοντέλων

Τα δύο χαρακτηριστικά που παρατηρούνται μεταξύ των διαγραμμάτων των πειραματικών δεδομένων είναι η αύξηση της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας για το Open Circuit σε σχέση με το Short, και αύξηση της τιμής της επιτάχυνσης.

Το μοντέλο Matlab ακολουθεί πιστά αυτές τις 2 τάσεις, και πιο συγκεκριμένα:

Πίνακας 9-Σύγκριση 1ης ιδιοσυχνότητας

Μοντέλο	1 ^η Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Magnitude (db)	Δυσκαμψία (N/μm)
Real (Short Circuit)	87.59	29.25	-
Shear Beam (SC)	93.61	34.64	0.146
Real (Open Circuit)	91.55	30.32	-
Shear Beam (OC)	97.73	34.98	0.159
Brochure	90		0.07

Από τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρείται επίσης η αύξηση του μέτρου της επιτάχυνσης κατά τη λειτουργία Open Circuit. Επίσης λόγω αυτής της συμπεριφοράς επιβεβαιώνεται και η αυξημένη τιμή της δυσκαμψίας της συσκευής για την ίδια λειτουργία.

Η διαφορά των τιμών της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας μεταξύ (SC) και (OC) είναι παρόμοιες (περίπου 4Hz), όπως και του μέτρου της επιτάχυνσης (περίπου 3,5 m/s²) .

Οι διαφορές των τιμών της μέγιστης επιτάχυνσης κατά το συντονισμό για το μοντέλο Matlab και τα πειραματικά δεδομένα δίνουν μια εξήγηση για τη μεγάλη απόκλιση στη παραγόμενη διαφορά δυναμικού (2.25/1 Volt).

3D Πιεζοηλεκτρικά Μοντέλα

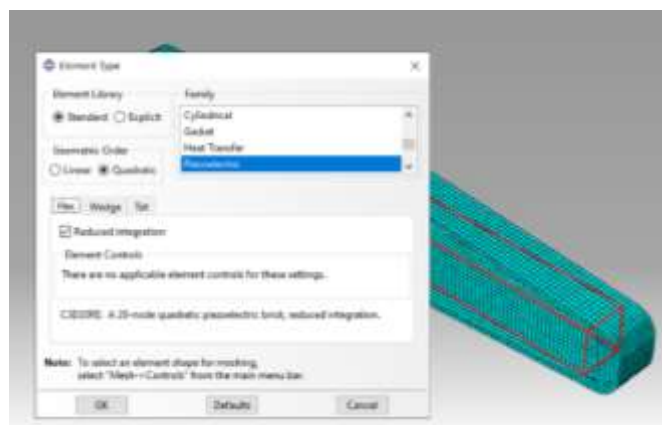
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν τα πιεζοηλεκτρικά μοντέλα που βασίζονται στα μηχανικά μοντέλα της συσκευής που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Τα μοντέλα αυτού του κεφαλαίου προσομοιώνουν τη συσκευή σε λειτουργία Open Circuit.

Η γεωμετρία του πλαισίου είναι ίδια με το μηχανικό μοντέλο, η πιεζοηλεκτρική συστολία θα μοντελοποιηθεί με δύο τρόπους, ώστε να συγκριθεί μια απλοποιημένη διάταξη που αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό stack με μία πιο λεπτομερής, παρόμοιας με αυτής που υπάρχει στη συσκευή.

Απλοποιημένη πιεζοηλεκτρική διάταξη

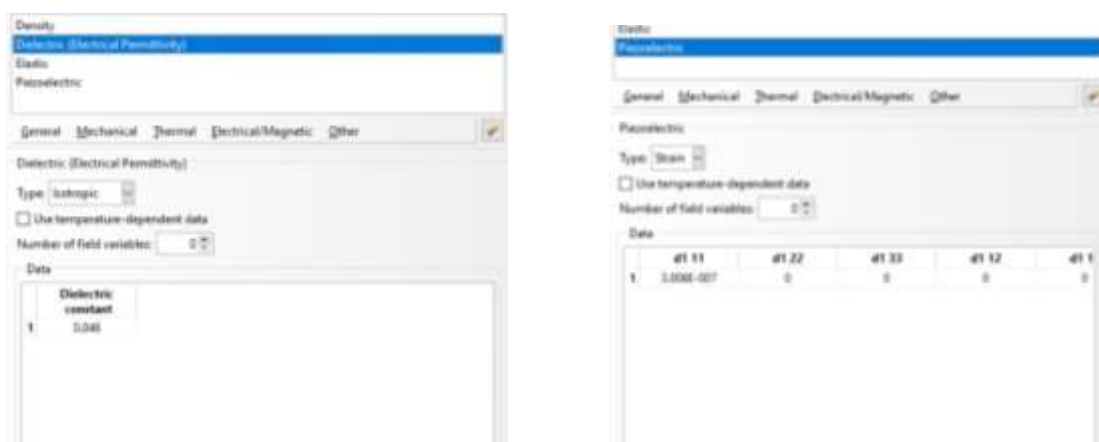
Στις παρακάτω εικόνες, τα δύο στοιχεία του απλοποιημένου μοντέλου, έχουν την ίδια γεωμετρία με τα στοιχεία του μηχανικού μοντέλου.

Η απλοποιημένη πιεζοηλεκτρική διάταξη αποτελείται από το κεντρικό στοιχείο, το οποίο σε αντίθεση με το μηχανικό μοντέλο, σε αυτή την περίπτωση θα διακριτοποιηθεί (mesh) με στοιχείο πιεζοηλεκτρικό (Piezoelectric), με τα υπόλοιπα στοιχεία να διακριτοποιούνται με στερεά στοιχεία (3D Stress)



Εικόνα 5.5- Στιγμιότυπο επιλογής τύπου στοιχείου (Abaqus)

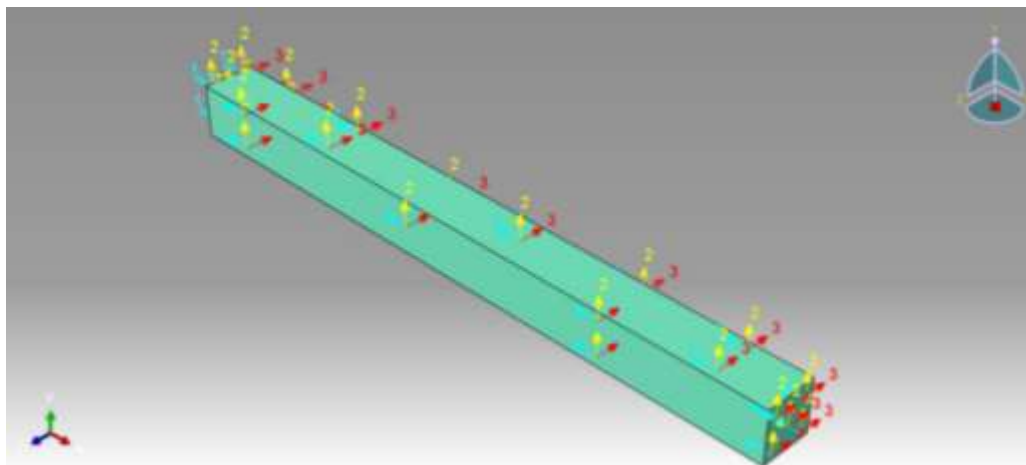
Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο θα έχει τις αντίστοιχες σταθερές (d_{11} , ϵ_{11}), που βρέθηκαν στο κεφάλαιο 2, για το ένα stack, και τις ίδιες μηχανικές σταθερές που είχε στο μηχανικό μοντέλο.



Εικόνα 5.6-Επιλογή πιεζοηλεκτρικών σταθερών (Abaqus)

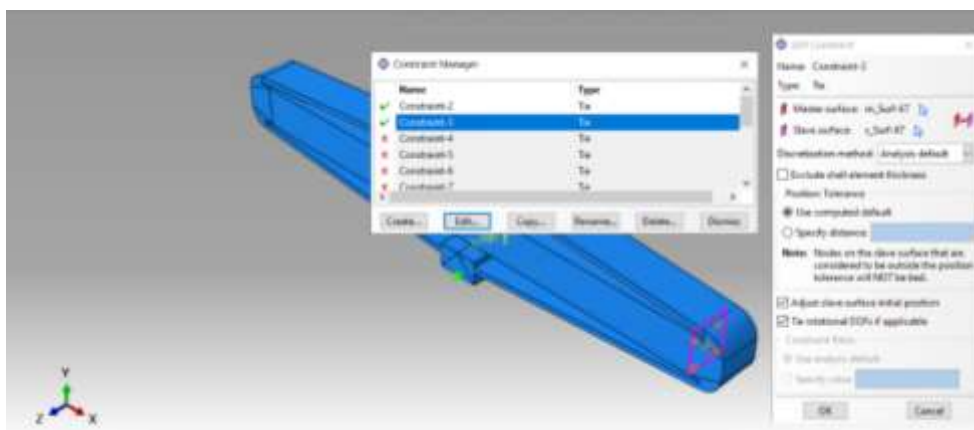
Ο χαρακτηρισμός του υλικού ως ισότροπου στην εισαγωγή της διηλεκτρικής σταθεράς και η εισαγωγή μόνο ενός όρου για είναι εφικτός λόγω ότι η κύρια διεύθυνση παραμόρφωσης του πιεζοηλεκτρικού στη συσκευή είναι στη διεύθυνση «1», όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.7, όπου απεικονίζεται ο προσανατολισμός (πολικότητα) του υλικού, η οποία είναι αντίστροφη του διανύσματος της «x» διεύθυνσης του κύριου συστήματος συντεταγμένων του χώρου στον οποίο σχεδιάστηκε η συσκευή. Στα 3D μοντέλα για τον ορισμό των ιδιοτήτων του

πιεζοηλεκτρικού έγινε μέσω τη συμβουλή των (Aslam, M., Nagarajan, P., Remanan, M. (2018)).



Εικόνα 5.7- Πόλωση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου

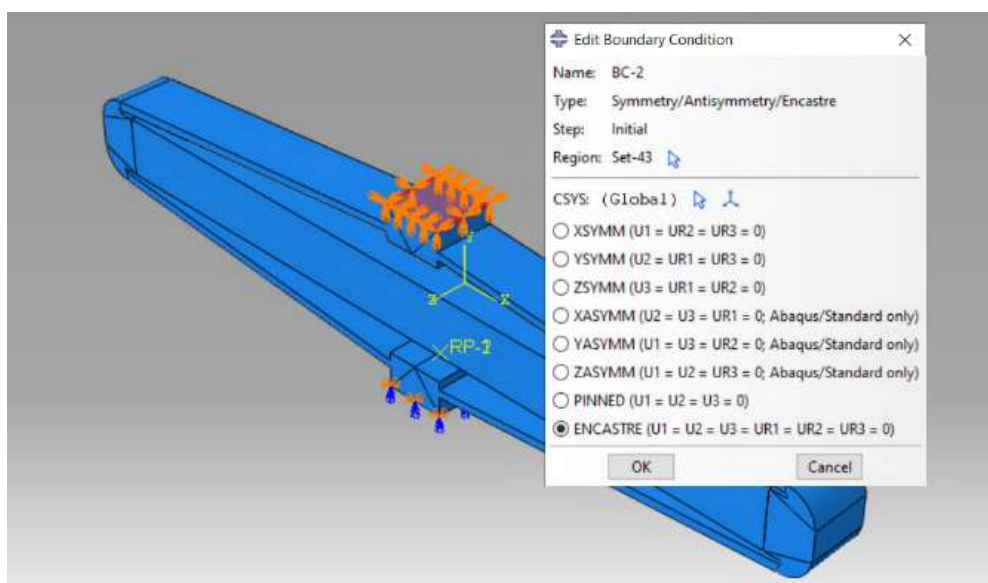
Σε συνδυασμό με το ίδιο πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε και στα μηχανικά μοντέλα, θα δημιουργηθεί το απλοποιημένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις της συσκευής. Για τη σύνδεση των δύο μελών, θα περιοριστούν μεταξύ τους στα δυο σημεία επαφής με τον περιορισμό «Tie Constraint», που περιορίζει στα δύο μέλη τη μεταξύ τους μετατόπιση, αλλά και περιστροφή. Στιγμιότυπο της επιλογής και της θέσης του απεικονίζεται στη παρακάτω εικόνα:



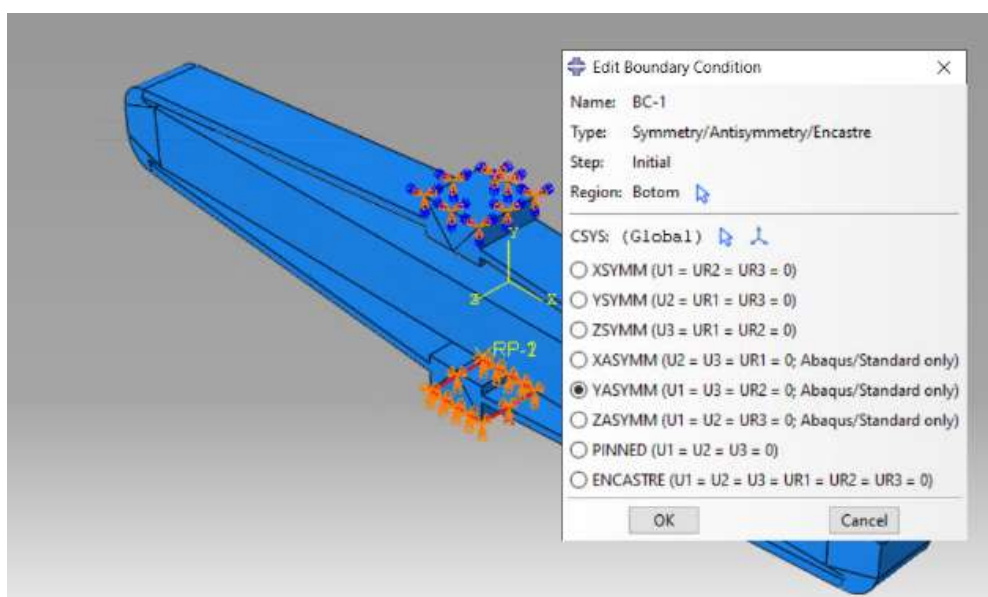
Εικόνα 5.8- Περιορισμοί μελών 3D μοντέλου

Στη συνέχεια, θα οριστούν οι περιορισμοί του μοντέλου και οι φορτίσεις που θα δεχθεί, ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες του πειράματος που έγινε στη πραγματική συσκευή.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μηχανικές συνοριακές συνθήκες του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, στην άνω βάση το μοντέλο είναι πακτωμένο, ενώ στην κάτω βάση του η συνοριακή συνθήκη επιτρέπει μόνο κίνηση στον κατακόρυφο άξονα «γ».



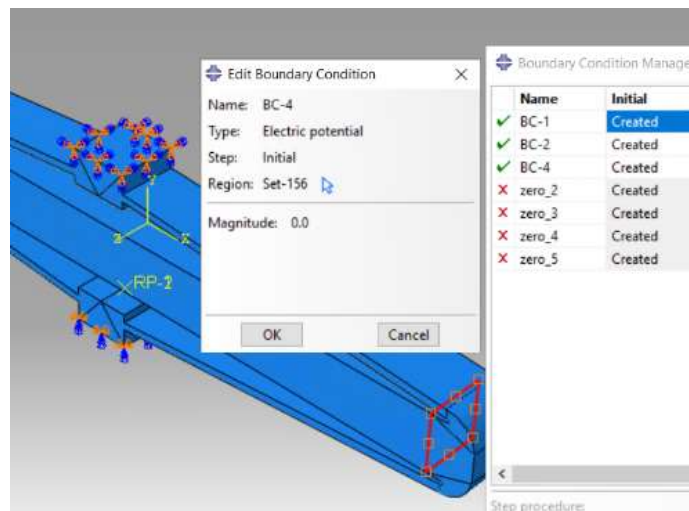
Εικόνα 5.9- Συνοριακές συνθήκες 3D μοντέλου



Εικόνα 5.10-Συνοριακές συνθήκες 3D μοντέλου (1)

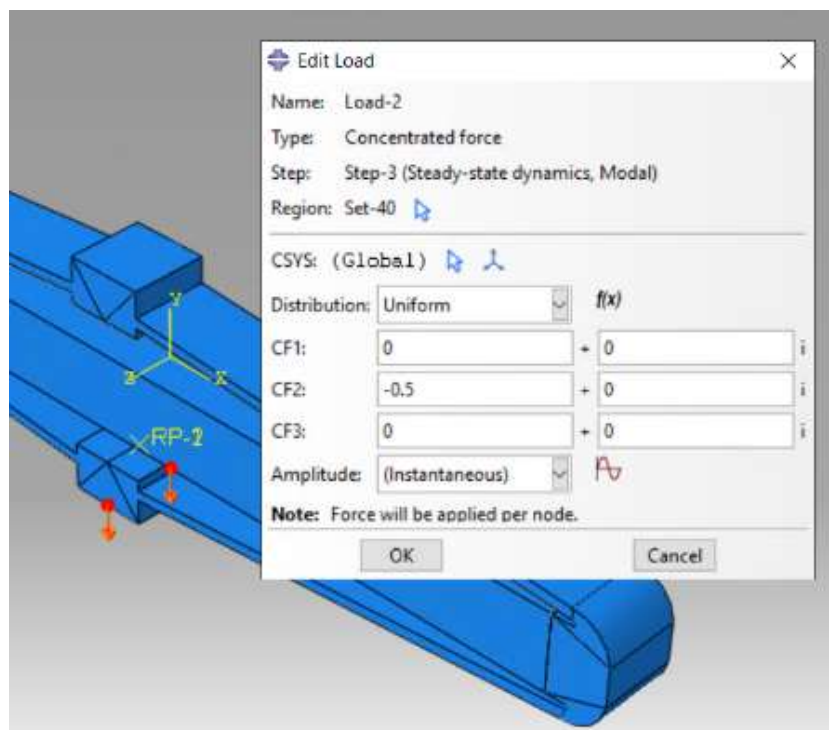
Στο Abaqus δεν είναι διαθέσιμη η μοντελοποίηση κυκλωμάτων (αυτός είναι και ο κύριος λόγος των δοκιμών μόνο σε λειτουργία Short, Open Circuit), έτσι είναι απαραίτητος ο ορισμός ηλεκτρικών συνοριακών συνθηκών για την εξασφάλιση σταθερών αποτελεσμάτων ανάμεσα στα συγκρινόμενα μοντέλα.

Για τη σταθεροποίηση του ηλεκτρικού δυναμικού, θα οριστεί συνοριακή συνθήκη μηδενισμού ηλεκτρικού δυναμικού στη δεξιά πλευρά του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (αντίθετα από τη πολικότητα του στοιχείου)



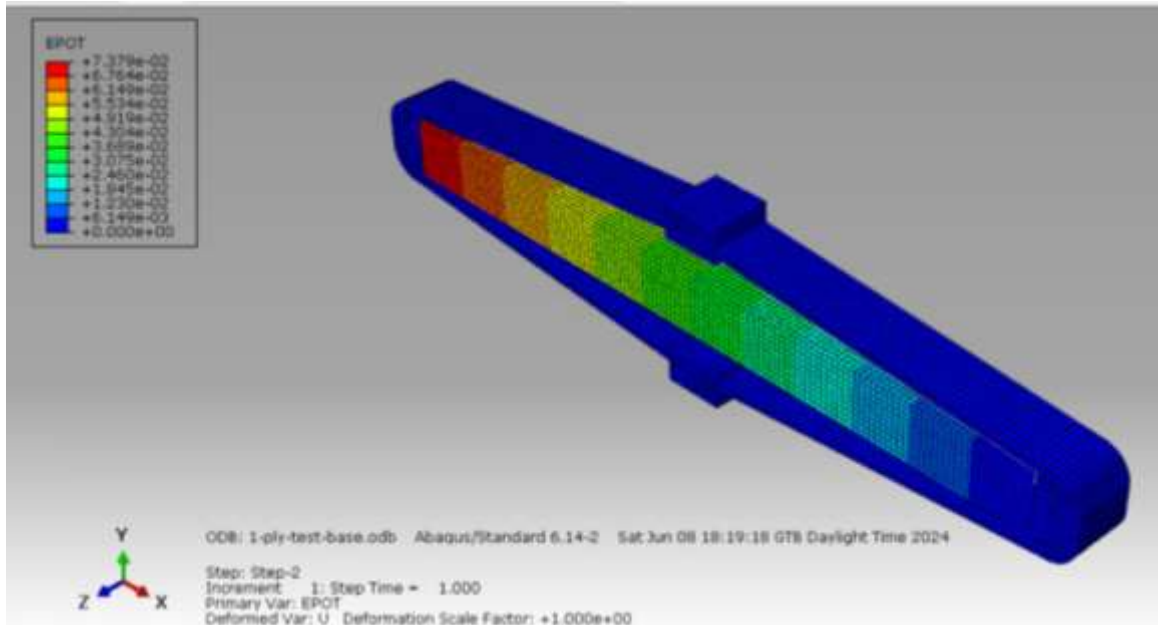
Εικόνα 5.11- Ηλεκτρικές συνοριακές συνθήκες

Για τη πραγματοποίηση των προσομοιώσεων, χρειάζεται να οριστεί η δύναμη που θα ασκηθεί στο μοντέλο της συσκευής, συγκεκριμένα κατακόρυφη δύναμη 1N στη κάτω βάση, η οποία θα ασκηθεί στις 2 άκρες της βάσης ανά 0.5N.



Εικόνα 5.12-Επιλογή ασκούμενου φορτίου

Στα αποτελέσματα, αρχικά θα παρουσιαστούν αποτελέσματα στατικής φόρτισης, ώστε να βρεθεί η στατική δυσκαμψία του μοντέλου και να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία της πιεζοηλεκτρικής συστοίχιας.



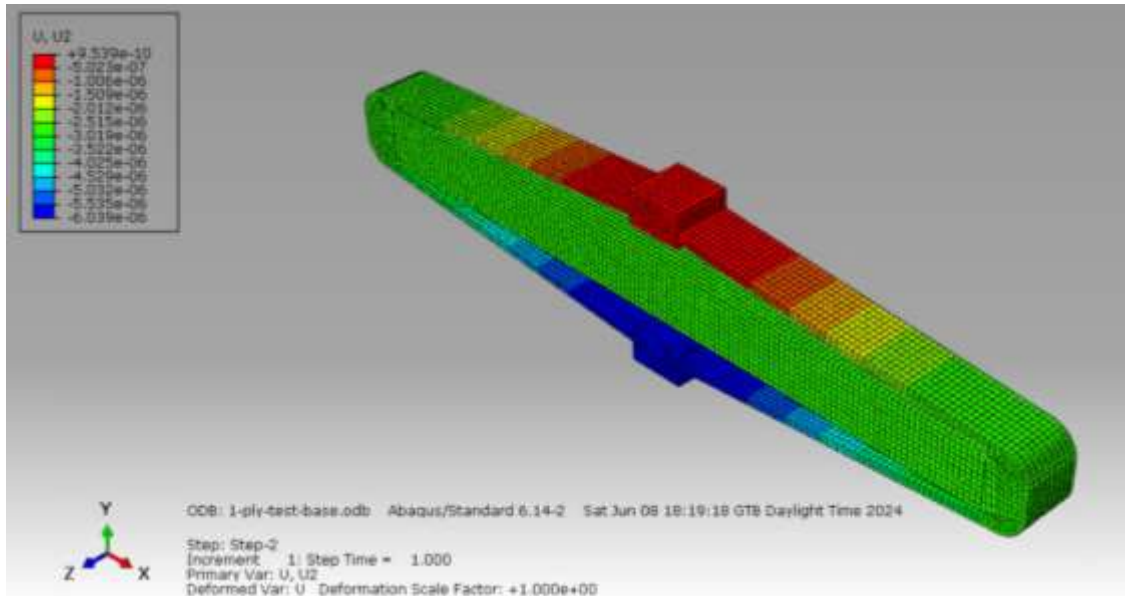
Εικόνα 5.13-Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού (3D μοντέλο)

Για να επαληθευτεί η σωστή λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού, θα γίνει χρήση των καταστατικών πιεζοηλεκτρικών εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στο 2^ο κεφάλαιο, ώστε να επιβεβαιώσουν οι αναλυτικές εξισώσεις τα αποτελέσματα του Abaqus.

Πίνακας 10-Επαλήθευση ηλεκτρικών αποτελεσμάτων

ϵ_{11}	d_{11}	s_{11}	E_1	S_1 (Abaqus)	S_1 (Eq)
$4.6e^{-2}$	$3.006e^{-7}$	$2.4e^{-11}$	0.50821	$-1.5e^{-6}$	$-1.6e^{-2}$

ϵ_{11}	d_{11}	s_{11}	E_1	D_1 (Abaqus)	D_1 (Eq)
$4.6e^{-2}$	$3.006e^{-7}$	$2.4e^{-11}$	0.50821	$8.9e^{-4}$	$3.3e^{-3}$

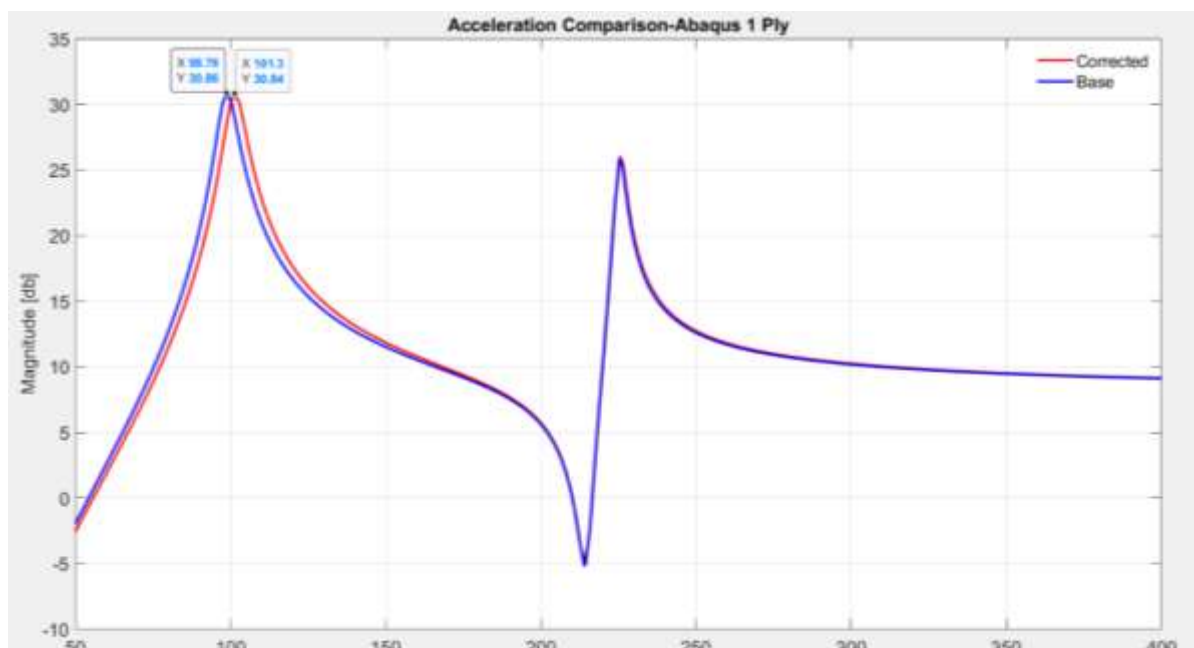


Εικόνα 5.14- Μετατόπιση λόγω στατικής φόρτισης (3D μοντέλο)

Με γνωστές τις τιμές της εφαρμοζόμενης δύναμης και της κατακόρυφης μετατόπισης, μπορεί να υπολογιστεί η δυσκαμψία του μοντέλου με τη σχέση:

$$k = \frac{F}{u} = 0.165 \text{ kN/mm}$$

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του μοντέλου για την απόκριση σε δυναμική φόρτιση στο εύρος 1-400Hz:

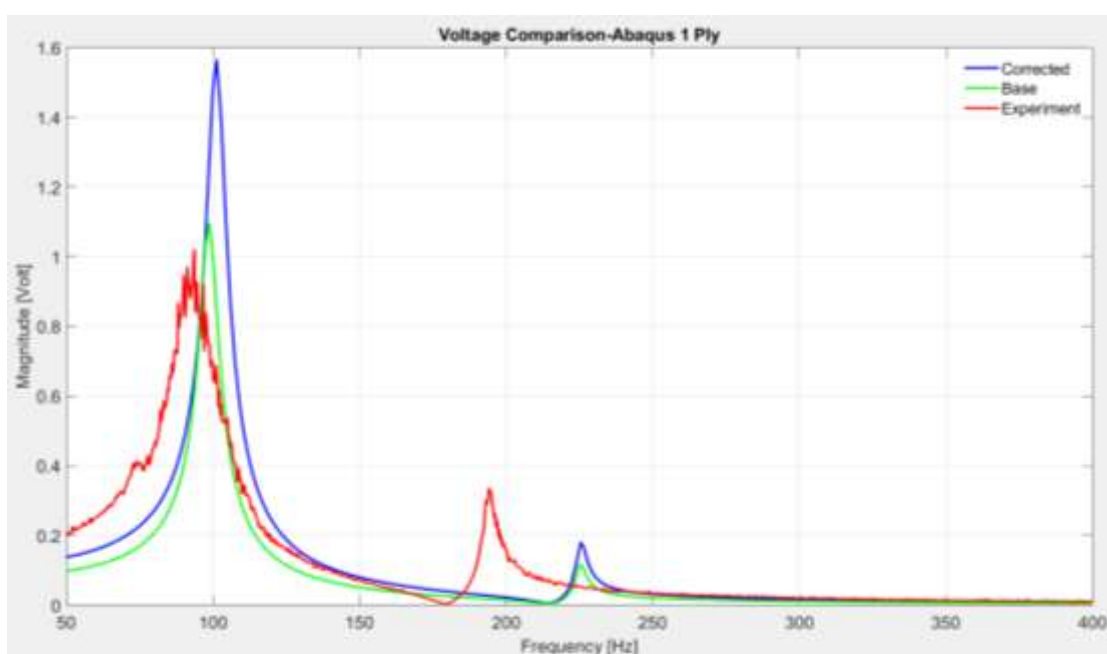


Εικόνα 5.15- Διάγραμμα FRF πιεζοηλεκτρικού 3D μοντέλου

Στα γραφήματα που παρουσιάζονται βρίσκονται δύο διαφορετικά σετ αποτελεσμάτων.

Για τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές που βρέθηκαν για τη συγκεκριμένη διάταξη, τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά (η 1^η ιδιοσυχνότητα είναι πιο χαμηλά από το αναμενόμενο), έτσι επιλέχθηκε μια «διορθωμένη» πιεζοηλεκτρική σταθερά d_{11} ($d_{11}'=5.006e-7$).

Με την ανανεωμένη σταθερά, τα αποτελέσματα είναι βελτιωμένα, με την 1^η ιδιοσυχνότητα του μοντέλου Open Circuit να απομακρύνεται από αυτή του μοντέλου Short Circuit.

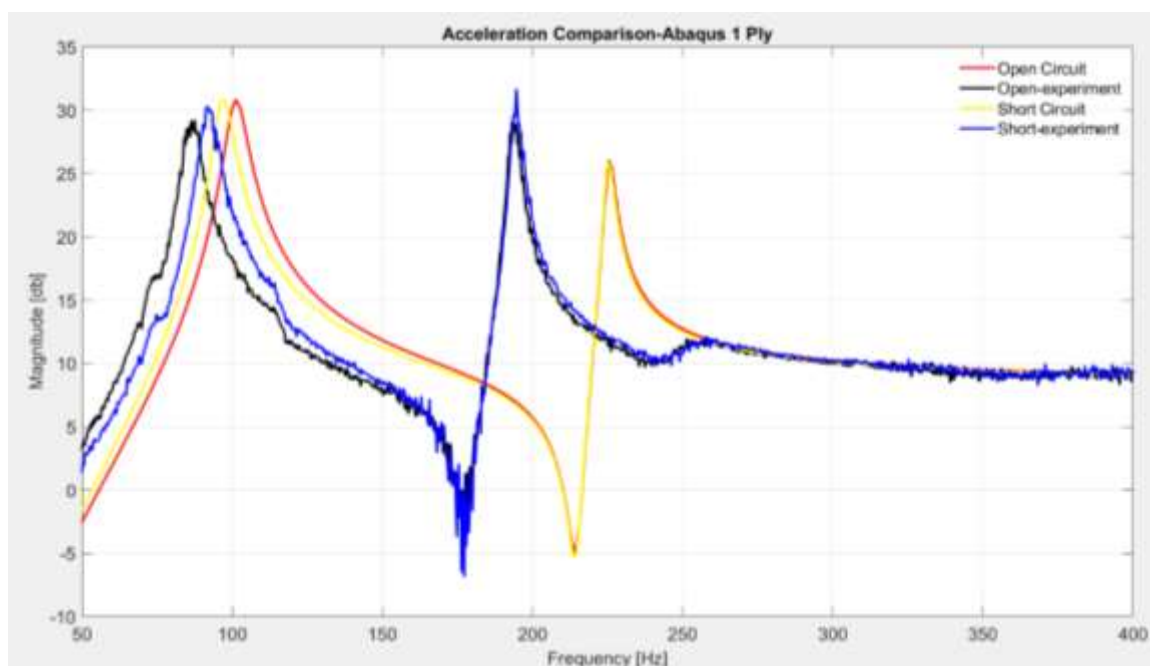


Εικόνα 5.16- Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού 3D μοντέλου

Ο στόχος δεν είναι η απόλυτη ταύτιση των ιδιοσυχνοτήτων, λόγω των παραδοχών που έγιναν κατά το σχεδιασμό των μηχανικών μοντέλων, σχετικά με την αποδεκτή ακρίβειά τους.

Με βάση τα συγκριτικά αποτελέσματα, στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο με τη διορθωμένη πιεζοηλεκτρική σταθερά, οι διαφορές των κορυφών μεταξύ των διαγραμμάτων Short και Open Circuit, είναι αντίστοιχες με αυτές στα πειραματικά δεδομένα της πραγματικής συσκευής.

Οι διαφορές στα αποτελέσματα των τιμών της διαφοράς δυναμικού, είναι η αιτία που κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός πιο λεπτομερούς πιεζοηλεκτρικής διάταξης.

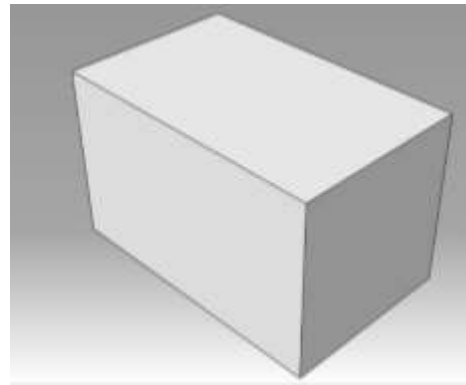
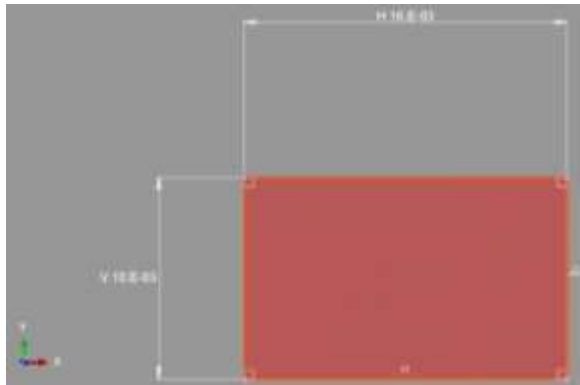


Εικόνα 5.17-Διαγράμματα FRF απλοποιημένου πιεζοηλεκτρικού 3D μοντέλου

Λεπτομερής πιεζοηλεκτρική διάταξη

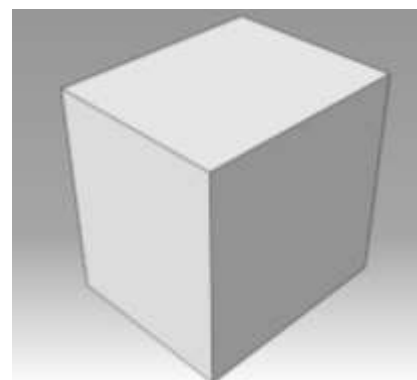
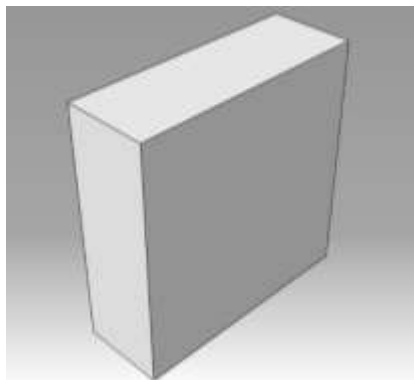
Το μεγαλύτερο μέρος της ενότητας απαρτίζεται από τη διαδικασία σχεδιασμού της νέας πιεζοηλεκτρικής συστοιχίας και τα αποτελέσματα του μοντέλου, η υπόλοιπη ερευνητική διαδικασία είναι ίδια με αυτή του μοντέλου με απλοποιημένη πιεζοηλεκτρική διάταξη.

Η συγκεκριμένη πιεζοηλεκτρική συστοιχία αποτελείται από έξι πιεζοηλεκτρικά μέλη, όπως και στη πραγματική συσκευή. Οι διαστάσεις του κάθε μέλους απεικονίζονται παρακάτω, και η εξάδα των συγκεκριμένων μελών είναι τα μόνα στοιχεία που απεικονίζονται ως πιεζοηλεκτρικά υλικά και θα διακριτοποιηθούν με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία του Abaqus.



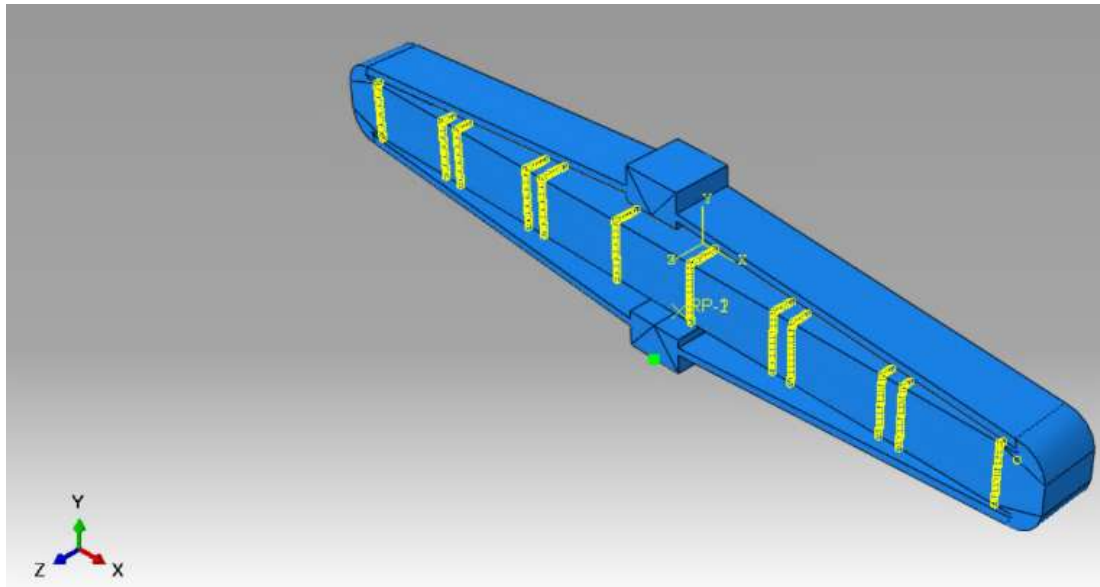
Τα παρακάτω μέλη είναι συνδετικά στοιχεία των πιεζοηλεκτρικών μελών.

Τα λεπτά μέλη (αριστερά), διαχωρίζουν τα πιεζοηλεκτρικά μέλη, και το πιο χοντρό μέλος (δεξιά), είναι το κεντρικό μέλος που βρίσκεται στη θέση της σφήνας που υπάρχει στη συσκευή.



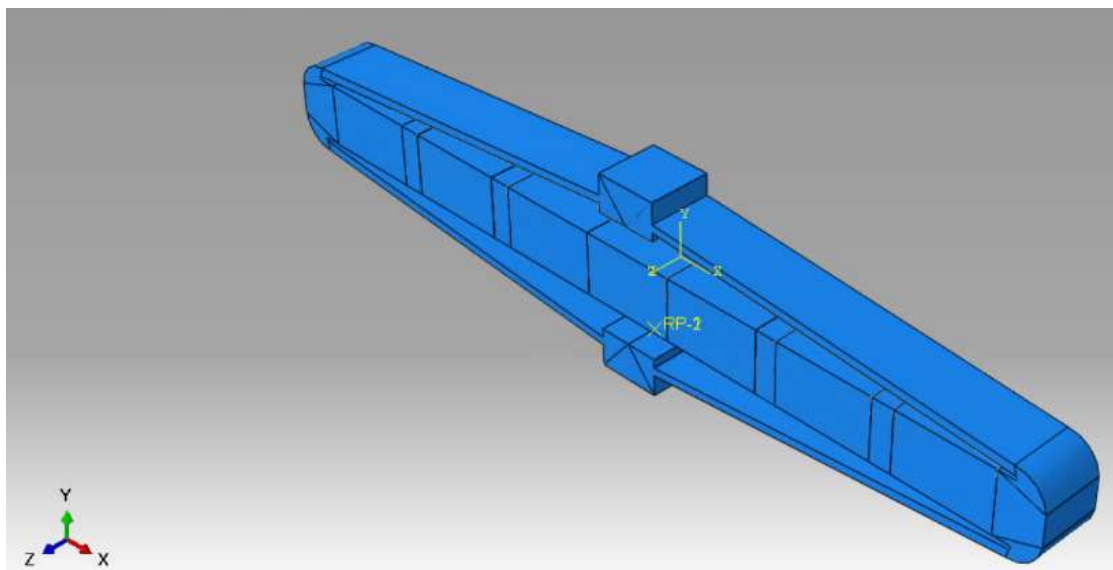
Εικόνα 5.18-Στοιχεία λεπτομερούς πιεζοηλεκτρικής συστοιχίας

Η συναρμολόγηση των μελών γίνεται με τον ίδιο τρόπο που έγινε και στο απλοποιημένο μοντέλο, με περιορισμούς «Tie Constraints».



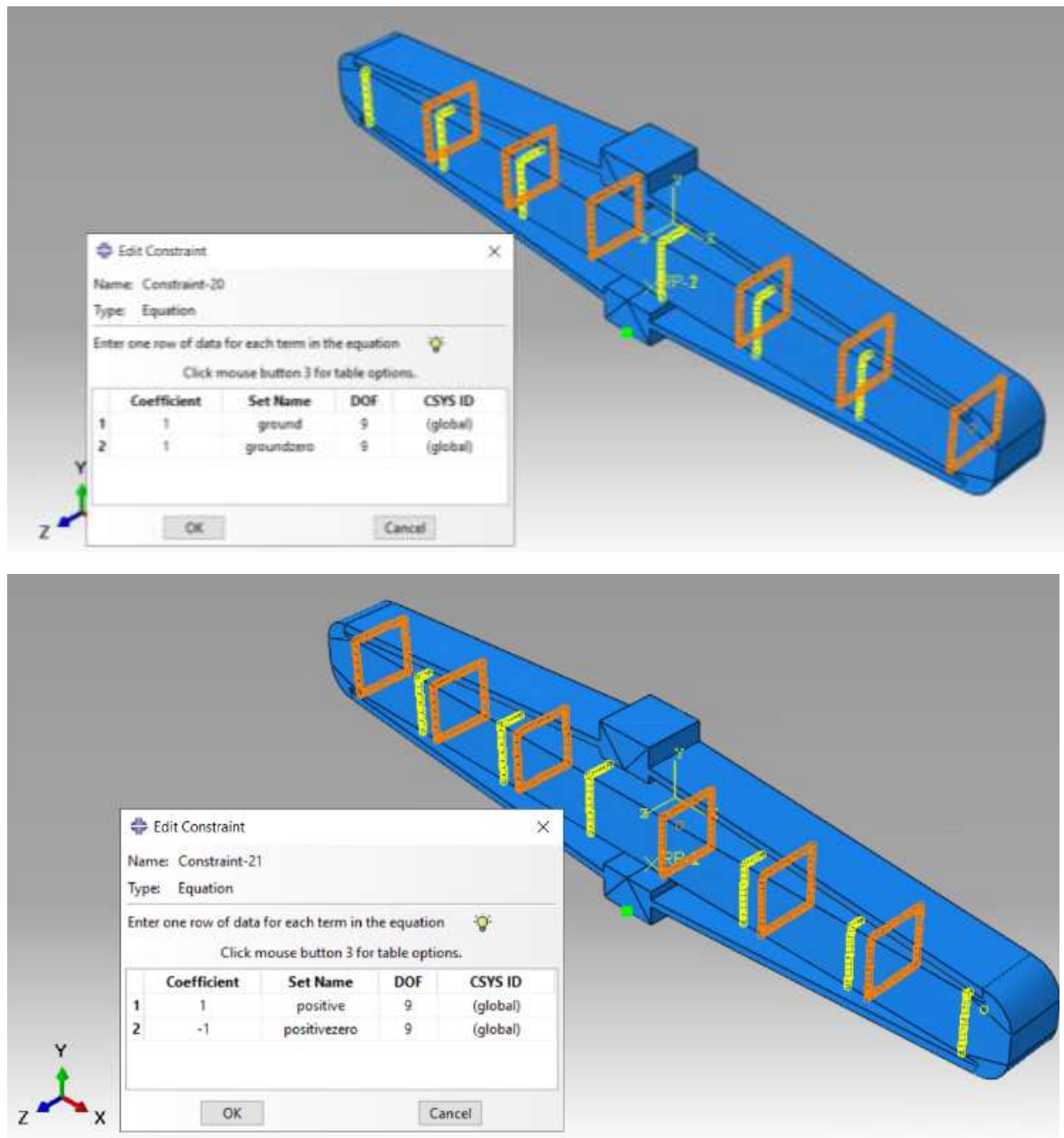
Εικόνα 5.19-Σημεία σύνδεσης στοιχείων 3D μοντέλου

Το συναρμολογημένο μοντέλο, όπως απεικονίζεται παρακάτω, είναι μηχανικά στατικό, όμως χρειάζονται επιπλέον ηλεκτρικοί περιορισμοί.



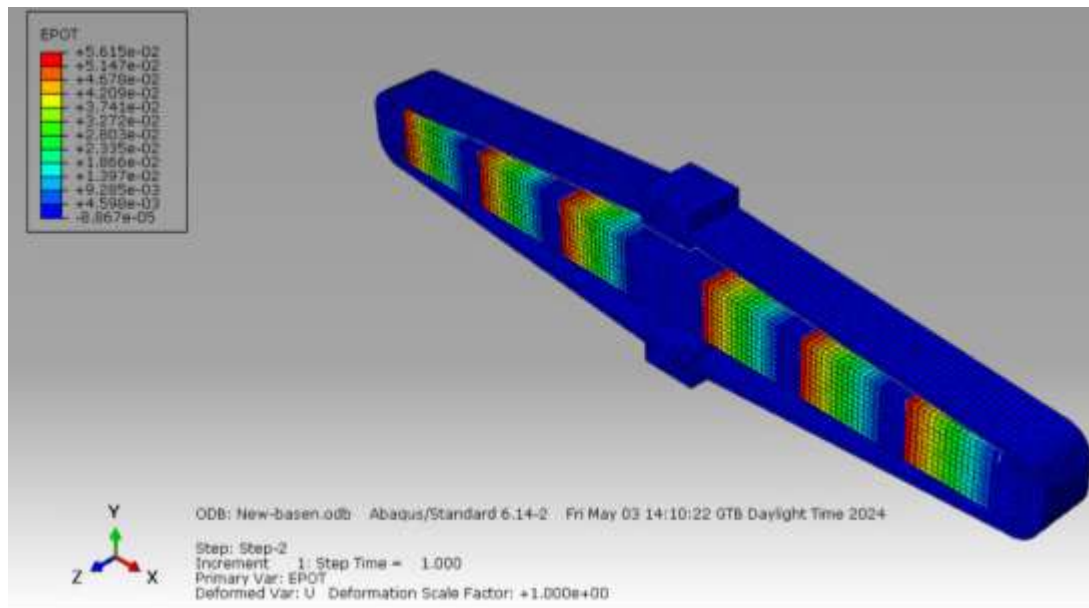
Εικόνα 5.20-Στιγμιότυπο ολοκληρωμένου 3D μοντέλου

Για την εξασφάλιση της ομοιομορφίας στη παραγόμενη διαφορά δυναμικού, θα χρειαστεί η χρήση συναρτησιακών περιορισμών, οι οποίοι μπορούν να εξισώσουν τιμές ορισμένων κόμβων μεταξύ τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα εξισωθούν οι «αρνητικοί πόλοι» των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων μεταξύ τους, όπως και οι «θετικοί». Ο βαθμός ελευθερίας που θα περιοριστεί είναι αυτός της διαφοράς δυναμικού, λόγω ότι αυτή είναι η συγκρινόμενη τιμή με τα δεδομένα της πραγματικής συσκευής.



Εικόνα 5.21-Διαμόρφωση ηλεκτρικής συνδεσμολογίας

Με τα υπόλοιπα στάδια της μοντελοποίησης τα ίδια με αυτό που περιέχει την απλοποιημένη πιεζοηλεκτρική διάταξη, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα:

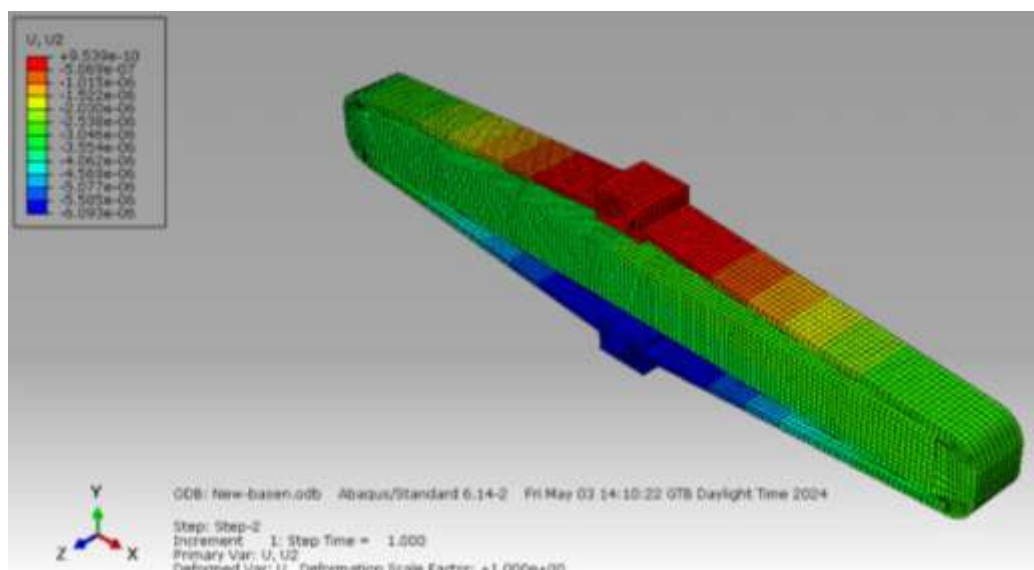


Εικόνα 5.22-Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού λεπτομερούς 3D μοντέλου

Πίνακας 11-Επαλήθευση ηλεκτρικών αποτελεσμάτων (1)

ϵ_{11}	d_{11}	s_{11}	E_1	S_1 (Abaqus)	S_1 (Eq)
$1.3e^{-3}$	$5.01e^{-8}$	$2.4e^{-11}$	3.48	$-2.2e^{-6}$	$-2.2e^{-2}$

ϵ_{11}	d_{11}	s_{11}	E_1	D_1 (Abaqus)	D_1 (Eq)
$1.3e^{-3}$	$5.01e^{-8}$	$2.4e^{-11}$	3.48	$2.28e^{-5}$	$4.67e^{-4}$



Εικόνα 5.23-Μετατόπιση σε στατική καταπόνηση- 3D λεπτομερές μοντέλο

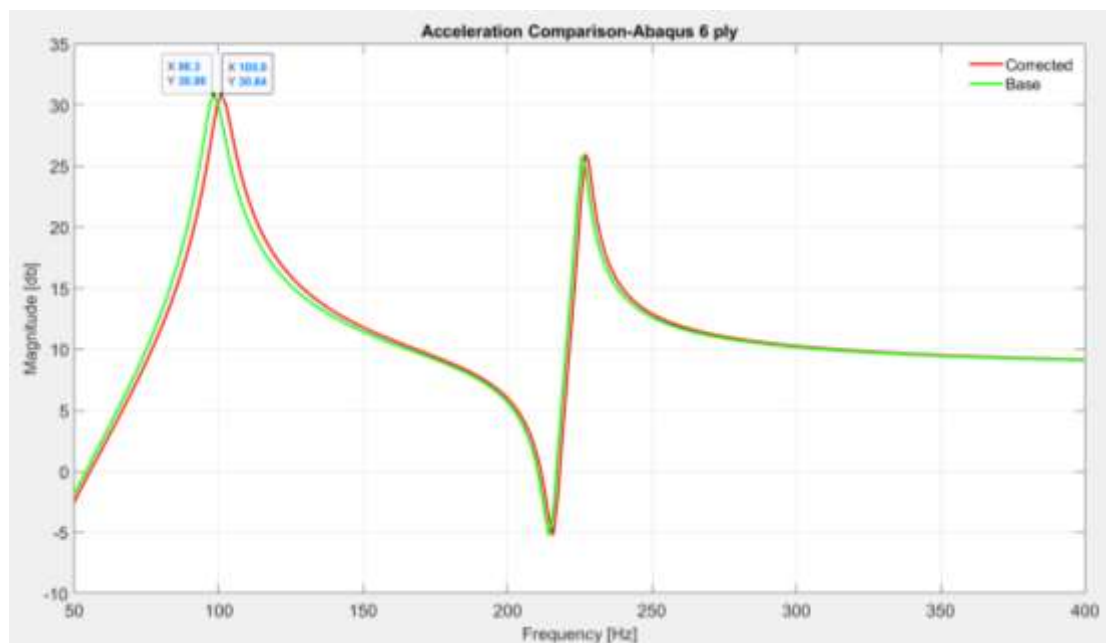
Η δυσκαμψία της συσκευής είναι:

$$k = \frac{F}{u} = 0.165 \text{ kN/mm}$$

Όπως και στο μοντέλο απλοποιημένης διάταξης, στα αποτελέσματα του μοντέλου για την απόκριση σε δυναμική φόρτιση βρίσκονται δύο διαφορετικά σετ αποτελεσμάτων.

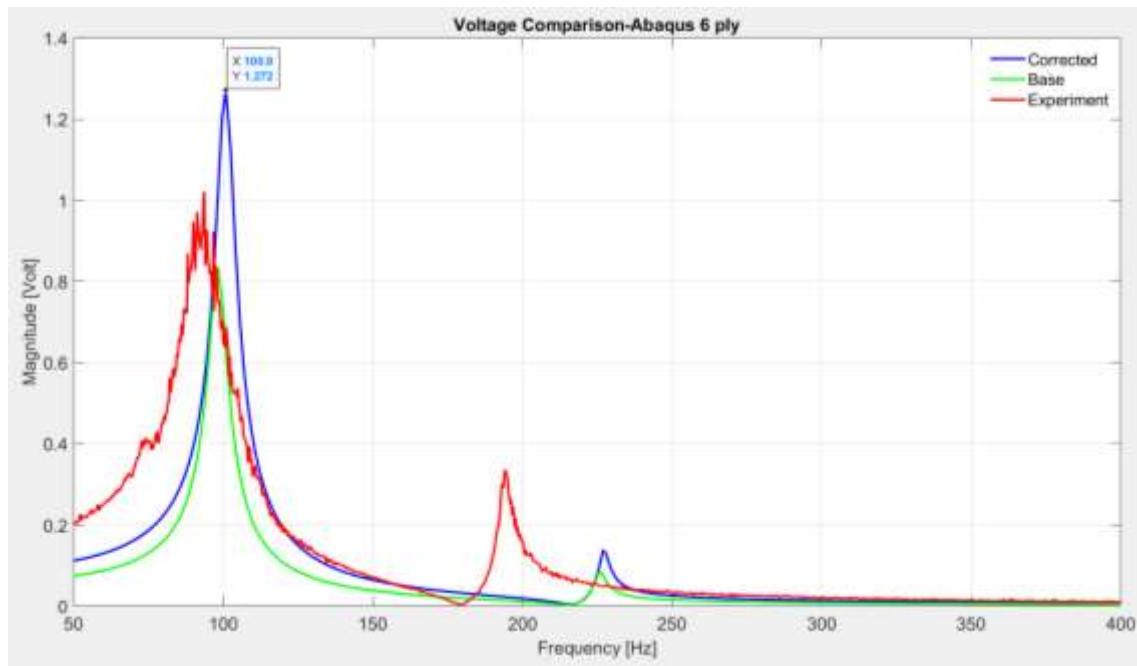
Η «διορθωμένη» πιεζοηλεκτρική σταθερά d_{11} για τη συγκεκριμένη διάταξη είναι η ($d_{11}'=9.01\text{e-}8$).

Με την ανανεωμένη σταθερά, τα αποτελέσματα είναι βελτιωμένα και πάλι, με την 1^η ιδιοσυχνότητα του μοντέλου Open Circuit να απομακρύνεται από αυτή του μοντέλου Short Circuit με την ίδια συνέπεια που έγινε και στο απλοποιημένο μοντέλο.



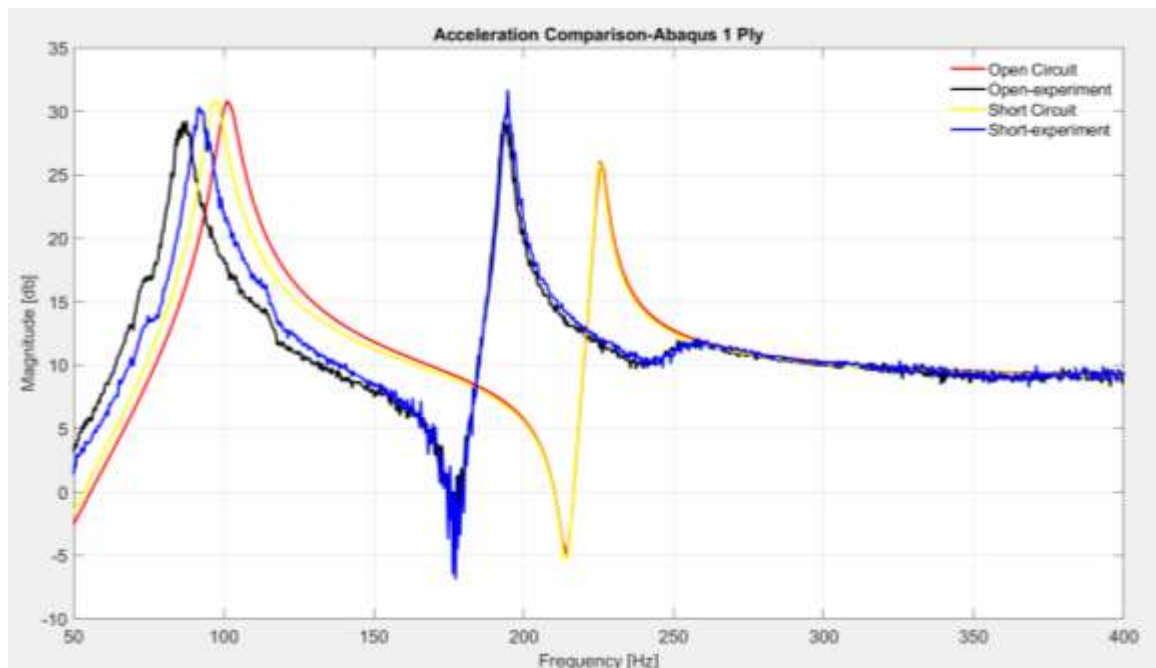
Εικόνα 5.24- Διάγραμμα FRF λεπτομερούς 3D μοντέλου

Τα αποτελέσματα του μοντέλου με τη λεπτομερή διάταξη πιεζοηλεκτρικών, για την απόκριση της επιτάχυνσης, είναι παρόμοια με αυτά του απλοποιημένου μοντέλου.



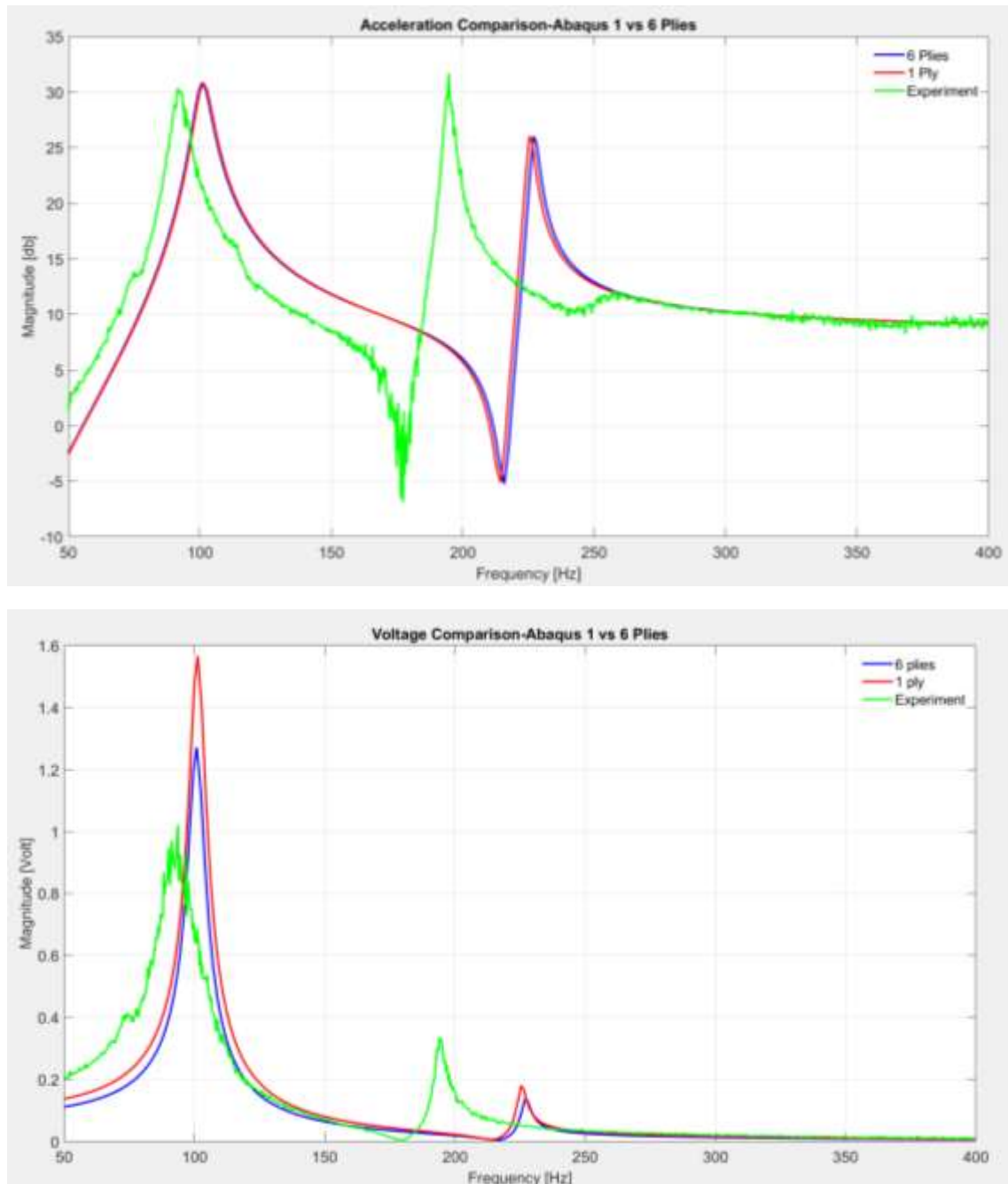
Εικόνα 5.25- Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού λεπτομερούς 3D μοντέλου

Η διαφορά βρίσκεται στα διαγράμματα διαφοράς δυναμικού, η οποία έχει χαμηλότερες τιμές για το ζευγάρι αποτελεσμάτων σε αντιστοιχία με αυτά του απλοποιημένου μοντέλου. Έτσι, τα αποτελέσματα της διαφοράς δυναμικού για το μοντέλο με λεπτομερή πιεζοηλεκτρική συστοιχία είναι πιο κοντά στα δεδομένα από τη πραγματική συσκευή.



Εικόνα 5.26- Διάγραμμα FRF λεπτομερούς 3D μοντέλου

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, το μοντέλο με λεπτομερή πιεζοηλεκτρική διάταξη και το διορθωμένο πιεζοηλεκτρικό συντελεστή έχει τα βέλτιστα αποτελέσματα, επιδεικνύοντας βέλτιστη συμπεριφορά σε λειτουργία Short Circuit στη διαφορά της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας σε σχέση με το μοντέλο Short Circuit, αλλά και εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα στη παραγωγή διαφοράς δυναμικού.



Εικόνα 5.27- Συγκριτικά διαγράμματα 3D μοντέλων

Στα συγκριτικά διαγράμματα των δυο μοντέλων (απλοποιημένης και λεπτομερούς πιεζοηλεκτρικής συστοιχίας), παρατηρείται μεγάλη συμφωνία στα διαγράμματα επιτάχυνσης, όπως και στη δυσκαμψία των μοντέλων.

Πίνακας 12-Συγκριτικά ηλεκτρικά αποτελέσματα

1 Ply	ϵ_{11}	d_{11}	s_{11}	E_1	S_1
	$4.6e^{-2}$	$3.006e^{-7}$	$2.4e^{-11}$	0.50821	$-1.5e^{-6}$

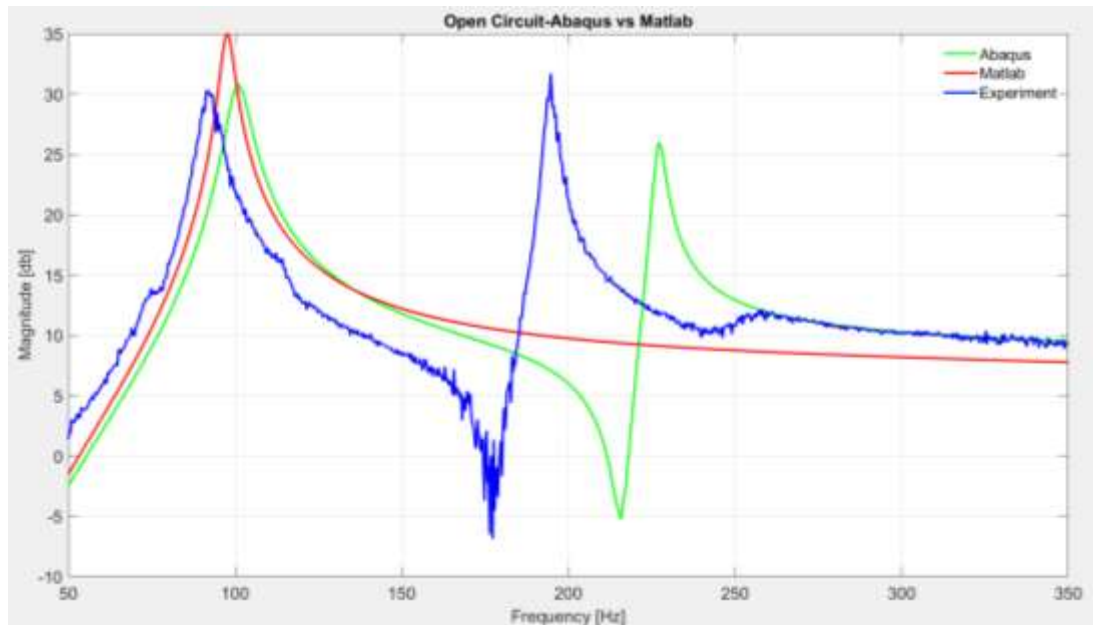
6 Plies	ϵ_{11}	d_{11}	s_{11}	E_1	S_1
	$1.3e^{-3}$	$5.01e^{-8}$	$2.4e^{-11}$	3.48	$-2.2e^{-6}$

Στα αποτελέσματα των ηλεκτρικών φαινομένων, το λεπτομερές μοντέλο αναπτύσσει μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο στα στοιχεία του, και μικρότερη διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες του (λόγω του μικρότερου πάχους h).

Λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας στο σχεδιασμό της λεπτομερούς συστοιχίας, αλλά και στα αποτελέσματα που είναι πιο κοντά στα επιθυμητά, το συγκεκριμένο μοντέλο θα επιλεγεί για τις τελικές συγκρίσεις των μοντέλων.

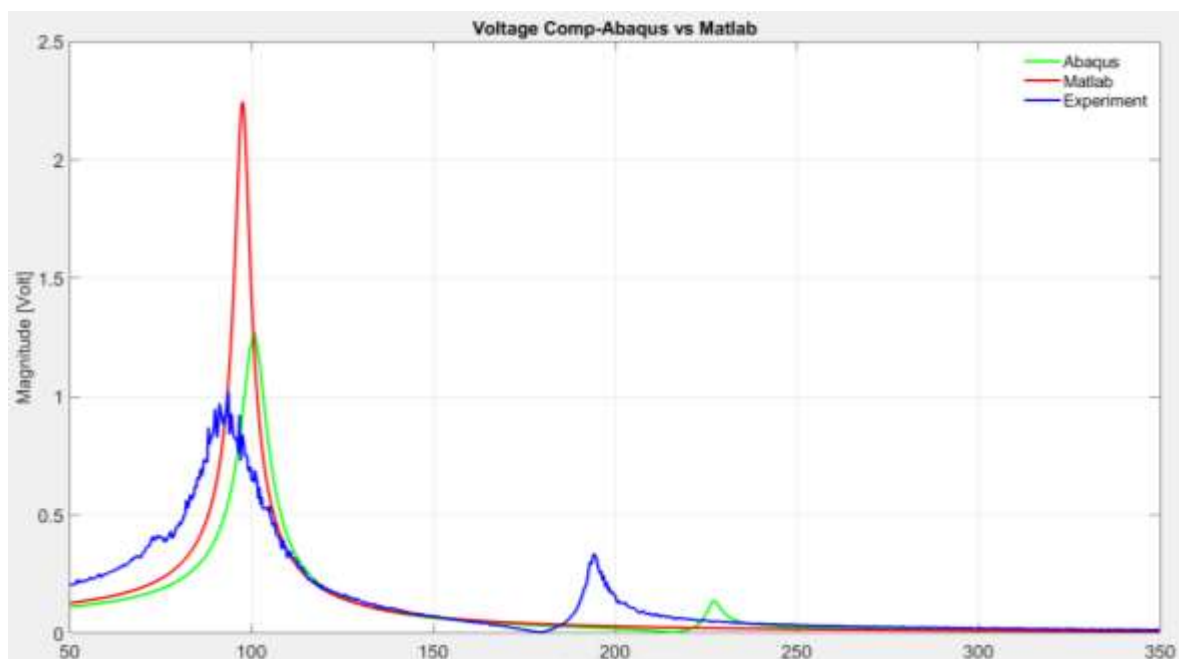
6. Συμπεράσματα

Με βάση την ερευνητική πορεία της συγκεκριμένης εργασίας και τα αποτελέσματα που βρέθηκαν, μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα:



Εικόνα 6.1-Συγκριτικά διαγράμματα FRF

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των επιλεγμένων μοντέλων MATLAB και Abaqus, τα οποία αξιολογήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι φανερή η παρουσία πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων και στα δυο.

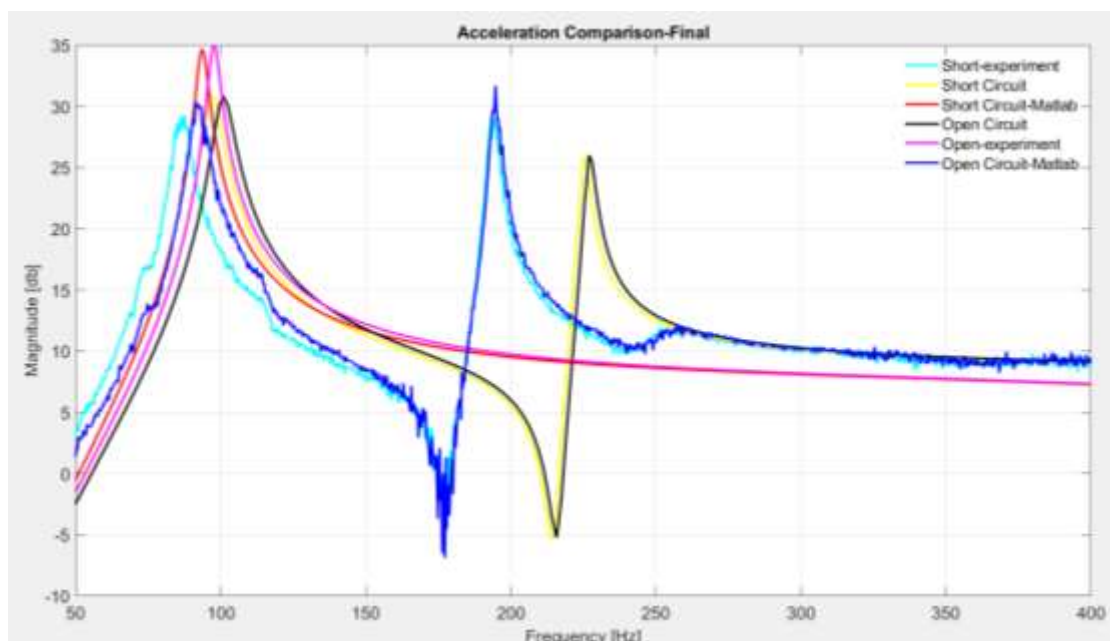


Εικόνα 6.2-Συγκριτικό διάγραμμα διαφοράς δυναμικού

Το μοντέλο MATLAB, λόγω της απλής γεωμετρίας του, ήταν πιο εύκολο να δεχθεί τις απαραίτητες διορθώσεις ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της τιμής της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας.

Στο Abaqus αυτό δεν ήταν δυνατό, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του λεπτομερούς μοντέλου.

Οι τομείς που το μοντέλο του Abaqus έχει πλεονεκτήματα, είναι στην αποτύπωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του στα αποτελέσματα των πειραμάτων. Για παράδειγμα, η εμφάνιση της 2^{ης} ιδιοσυχνότητας στο υπό μελέτη εύρος, είναι αποτέλεσμα της γεωμετρίας της πιεζοηλεκτρικής συστοιχίας, η οποία μοντελοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια στο 3D μοντέλο. Επίσης, η μεγαλύτερη ανάλυση των γεωμετριών στο 3D μοντέλο προκαλεί καλύτερα αποτελέσματα στην απόσβεση της συσκευής, έχοντας πιο ακριβή αποτελέσματα για τιμές της επιτάχυνσης στο διάγραμμα απόκρισης συχνότητας, όπως και καλύτερα αποτελέσματα στη παραγωγή διαφοράς δυναμικού.



Εικόνα 6.3-Τελικό Συγκριτικό Διάγραμμα FRF

Συγκρίνοντας τα παραπάνω μοντέλα, η αξιολόγηση του πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα, τόσο στο μοντέλο Abaqus όσο και στο MATLAB.

Οι πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις επαληθεύουν τα αποτελέσματά τους, και η επίδραση που έχουν στο κύκλωμα είναι η αναμενόμενη.

Τα κύρια σημεία που τα μοντέλα χρειάζονται περαιτέρω βελτίωση είναι στο κομμάτι της μηχανικής τους, κάτι που είναι φανερό στα αποτελέσματά των μοντέλων χωρίς τη πιεζοηλεκτρική διάταξη.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελλοντική έρευνα που πρέπει να γίνει με βάση τα μοντέλα της συγκεκριμένης εργασίας είναι σε 3 άξονες:

Ο πρώτος τομέας είναι για την αξιοποίηση του τρέχοντος μοντέλου, και προϋποθέτει τη μοντελοποίησή του σε συνδυασμό με διαφορετικά εξαρτήματα, σε διατάξεις που να μεταφράζουν πραγματικές πιθανές εφαρμογές που θα μπορούσε να τοποθετηθεί ο αποσβεστήρας. Έτσι, θα ήταν δυνατή η αξιολόγηση των δυνατοτήτων του σε μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών.

Ο δεύτερος τομέας που είναι δυνατή η ανάπτυξη της συγκεκριμένης διάταξης, είναι η ανάπτυξη μιας πιο λεπτομερούς πιεζοηλεκτρικής διάταξης, η οποία θα αντικατοπτρίζει τον πραγματικό αποσβεστήρα. Η συσκευή με τη τρέχουσα διάταξη έχει τη κατάλληλη συμπεριφορά, όμως με μια πιο λεπτομερή διάταξη η οποία θα έχει ρεαλιστικό αριθμό στρώσεων πιεζοηλεκτρικού ανά stack, θα έχει πιο ρεαλιστικές τιμές ως αποτέλεσμα της λειτουργίας του. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η δοκιμή

διαφορετικών υλικών, και η σύγκριση των αποτελεσμάτων σε κομμάτι ηλεκτρικής παραγωγής αλλά και μηχανικών καταπονήσεων.

Ο τελευταίος τομέας ανάπτυξης, είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του πλαισίου. Με την ευαισθησία των αποτελεσμάτων της συσκευής στη γεωμετρία να έχει γίνει φανερό, θα ήταν προσοδοφόρα η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας είτε στα specifications της συσκευής, είτε για προσπάθεια αλλαγής των χαρακτηριστικών της με μεταβολές της γεωμετρίας.

Βιβλιογραφία

- Aslam, M. N. (2018). Analysis of Piezoelectric Solids using Finite Element Method. *Materials Science and Engineering* 330.
- Cedrat Technologies. (2019). Products Catalogue Version 5.1.
- Chen, W., & et al. (2020). *Energy harvesting and vibration reduction by sandwiching piezoelectric elements into elastic damping components with parallel-grooved structures*. Composite Structures 241: ELSEVIER.
- Chrysochoidis, N. A., Chatziathanasiou, G. M., & Saravanos, D. A. (2021). *A semi-active shunted piezoelectric tuned mass damper for robust vibration control*. Journal of Vibration and Control: SAGE.
- Gan, B. S. (2018). *An Isogeometric Approach to Beam Structures*. DOI 10.1007/978-3-319-56493-7, ISBN 978-3-319-56492-0: Springer.
- Grigorios M. Chatziathanasiou, N. A. (2022). A semi-active shunted piezoelectric tuned-mass-damper for multi-modal vibration control of large flexible structures. *Journal of Sound and Vibration*.
- Grigoris Chatziathanasiou, N. C. (2021, Ιανουάριος 4). Semi-Active Vibration Control of Aircraft Structures. *AIAA Scitech 2021 Forum*.

- He, H., Xing , T., Jincheng , H., Fang , Z., & Guoping , C. (2020). *A novel ring-shaped vibration damper based on piezoelectric*. Journal of Sound and Vibration: ELSEVIER.
- Law, H. H. (1995). *Characterization of Mechanical Vibration Damping By Piezoelectric Materials*. Journal of Sound and Vibration (1996) 197(4), 489–513: Academic Press.
- Makvandi, A. Ö. (2019). *Finite Elements for Truss and Frame Structures*. ISBN 978-3-319-94940-6: Springer.
- Mohith, S., & et al. (2021). *Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review*. Smart Mater. Struct. 30 013002.
- Romanos, T. (2022). *Διερεύνηση της Επίδοσης Μάστευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας από Μηχανική μέσω Ειδικών Διατάξεων με Πιεζοηλεκτρικές Συστοιχίες*. Πάτρα.
- Saravanos, D. A. (2008). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Sirohi, J. C. (2000). Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, Vol. 11.
- Yongqi , Z., Yang, T., Du, H., & Zhou, S. (2023). *Wideband vibration isolation and energy harvesting based on a coupled piezoelectric-electromagnetic structure*. Mechanical Systems and Signal Processing 183: ELSEVIER.
- Zhou, H. H. (2006). Analysis of a diamond-shaped mechanical amplifier for a piezo actuator. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32.

Appendix

Matlab Model

```

%% στοιχεια πλαισιου (m)-3
Ract=30e-3; %Type of Actuator
EI=210e9; %Metro elastikotitas frame
AI=1.2e-5; %Distomi frame (kg/m^3)
a1=0.0012; % ipso frame
L1=63.81e-3; %Μήκος kathe stoixeiou tou frame
I1=AI*(a1^2)/12; %tropi adraneias
GI=EI/(2*1.31);
d1=7800;

mfr=d1*L1*AI;

%% στοιχεια pvt stack
E2=1/(24e-12); %Metro Elastikotitas PVT
a2=8e-3;
A2=10e-3*a2; %Distomi Piezoelektrikou (stoixeiou5)
I2=125.24e-3; %Μήκος stoixeiou 5
I2=A2*(a2^2)/12; %tropi adraneias
G2=E2/(2*1.4);
d2=8000; %Pyknothta PVT (kg/m^3)

V2=A2*I2; %Ογκος PVT stack
m5=d2*V2; %Μαζα PVT stack

Ma=0.384; %Attached Mass on the Actuator
%% στοιχεια pvt

%Stack Pmpo %PIC255
h=16e-3; %0.349e-3
ndisks=1;
d23=501e-12; %400pm/V
cp=27e-6; %Actuator Capacitance 27uF
sbar=0; %kbar=0

d23=(sbar*(L2/ndisks))/(A2*E2)

e13=s33 + (d23^2)*E2

theta=0.0911;
%theta=(asin((Ract/2)/L1)); %Gonia Actuator se radians
%% Electrical Circuit
% R=0;
% L=0;
R=5e10; % Antistasi
L=1e-10; % Finis

nel=5; % Number of Elements
dofs=3*(nel-1); % Degrees of Freedom

```

[illegible]

```

%% Katakhevi Mitroou Agostinis

s=20; %15
p=1.95e-6; %1.95e-7
C=(p*M)+(b^2*N)/s

%% Boundary Conditions
% Clamped-Clamped Beam

M(1:3,:)=[]; %delete rows
M(:,1:3)=[]; %delete columns

K(8,:)=[]; %delete rows
K(:,8)=[]; %delete columns

C(1:3,:)=[];
C(:,1:3)=[];
C(8,:)=[];
C(:,8)=[];

K(1:3,:)=[];
K(:,1:3)=[];
K(8,:)=[];
K(:,8)=[];

%% Mitroou Dinamis
F=zeros(8,1);
F(7)=1; % 1 Newton Dinami ston komvo 4 stin x dieuthinsi
p=1;

U=R\F;

% [eigvec,eigval]=eig(K,M);
%% Epilusi tis sxesis 1.6
num=10000; %arithmos simeiwu tou FRF
minfreq=5; %katotato orio sixnotitas
maxfreq=900; %anotato orio sixnotitas
omegaXHZ=linspace(minfreq,maxfreq,num); %dianisma sixnotitwn se HZ
omegaXrads=omegaXHZ*2*pi; %dianisma sixnotitwn se rad/s
omegaXHZ50=linspace(1,100,50);
omegaXrads50=omegaXHZ50*2*pi;

for i=1:length(omegaXHZ)
    s=1i*omegaXrads(i);
    S=M*s^2+C*s+K;
    Qf(:,i)=S\F; %to Qf exei 10 vathmous eleutherias 1:u2 2:v2 3:u3 4:v3 5:u4 6:v4 10:q(to fortio sto sundedemeno ilektriko kikloma)
    Af(:,i)=(s^2)*Qf(:,i);
end

%to Qf einai migadikos arithmos
Qfdb=mag2db(abs(Qf)); %metro se decibel
Qfpha=rad2deg(angle(Qf)); %fash se moires
Uf=db2mag(Qfdb);
Afdb=mag2db(abs(Af));
Afpha=rad2deg(angle(Af));
Af=db2mag(Afdb);

%% Q to V
V=((Uf(5,:)+Uf(2,:))*ebar)/cp;
E=V/h;

```