



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη αυξητικών μικροδομών για την ενίσχυση της μείωσης ταλαντώσεων μέσω πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων»



Υπό

Ονοματεπώνυμο: Αικατερίνη- Μαρία Μιχάλη

A.M: 2017010106

Επιβλέπων: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Μέλος εξεταστικής επιτροπής: Μαρία Μπακατσάκη

Μέλος εξεταστικής επιτροπής: Μαρία Σταυρουλάκη

Χανιά, 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με χαρά και ευγνωμοσύνη, έφτασε η στιγμή να εκφράσω τα θερμά μου ευχαριστώ σε όσους συνέβαλλαν με την ανεκτίμητη βοήθεια και υποστήριξη τους στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Σταυρουλάκη, ο οποίος με ενέπνευσε για το θέμα της εργασίας και με την πολύτιμη καθοδήγησή του στράφηκα προς νέες προοπτικές του αντικειμένου μου οι οποίες μέχρι πρότινος μου ήταν άγνωστες. Η σαφήνεια και η άριστη επικοινωνία, είναι λέξεις οι οποίες θα περιέγραφαν την άψογη συνεργασία μας όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω επίσης την κυρία Μαρία Στέλλα Δαράκη, για την εκτίμηση, την υποστήριξη και την αφοσίωσή της στο έργο. Η συνεργατικότητά της αποτέλεσε καίριο στοιχείο για την ολοκλήρωση αυτού του εγχειρήματος με επιτυχία καθώς και η προθυμία της να παρέχει όλες τις γνώσεις της οι οποίες ήταν ιδιαίτερα βοηθητικές και κατευθυντήριες για εμένα.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την αγάπη μου προς τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η αγάπη και η στήριξή τους με έκαναν να νιώθω πάντα ασφάλεια και αυτοπεποίθηση στο δρόμο προς την επίτευξη των στόχων μου. Αυτή η στήριξη ήταν η κινητήριος δύναμή μου όλα αυτά τα χρόνια και με έκανε να νιώθω ικανή να ξεπεράσω κάθε δυσκολία.

Είμαι ευγνώμων για κάθε στιγμή που μοιράστηκα με όλους τους φίλους και συναδέλφους μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης όλα αυτά τα χρόνια και για κάθε στιγμή που με καθοδήγησαν και με στήριξαν με κάθε δυνατό τρόπο. Οφείλω τις σπουδές μου από την αρχή μέχρι την ολοκλήρωση αυτής της πορείας σε όλους όσους με την συμβολή τους με έκαναν να αξιοποιήσω την ευκαιρία που μου δόθηκε να μάθω και να αναπτύξω τις γνώσεις μου γύρω από το συγκεκριμένο αντικείμενο και έκαναν τα φοιτητικά μου χρόνια αξέχαστα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη αυξητικών μικροδομών και πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για τη μείωση ταλαντώσεων αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας που αφορά την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης και της ασφάλειας σε διάφορες δομικές κατασκευές.

Οι αυξητικές μικροδομές αποτελούν σημαντικό κομμάτι της τεχνολογικής εξέλιξης, παρέχοντας νέες δυνατότητες για τον έλεγχο και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των υλικών και των δομών. Η χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων συμβάλλει στη δημιουργία ευέλικτων συστημάτων ελέγχου, τα οποία είναι σε θέση να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η βελτίωση των μικροδομών με στόχο τη μείωση των ταλαντώσεων απαιτεί προηγμένες μεθόδους μοντελοποίησης και ανάλυσης. Η χρήση πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει την αποτελεσματική προσέγγιση των δυναμικών χαρακτηριστικών των δομών, ενώ οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές ενσωματώνονται για τον έλεγχο και την προσαρμογή στις ταλαντώσεις.

Συγκεκριμένα στη παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίον αλληλεπιδρούν ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα το οποίο είναι τοποθετημένο κοντά στο άκρο μιας δοκού σε σχέση με την ταυτόχρονη ύπαρξη συγκεκριμένων αυξητικών μικροδομών, ενδιάμεσα του επιθέματος και της δοκού. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η απόσβεση ταλαντώσεων οι οποίες έχουν προκληθεί από εξωτερικά φορτία. Για την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου γίνεται χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και προγραμμάτων προσομοίωσης όπως είναι το Comsol Multiphysics καθώς και το πρόγραμμα Inventor της Autodesk για τον σχεδιασμό και την μοντελοποίηση σε τρισδιάστατο χώρο των μικροδομών αυτών.

Εφόσον ολοκληρωθούν τα στάδια της επεξεργασίας των δομών, βάσει των αποτελεσμάτων θα εξαγάγουμε συμπέρασμα για την βελτίωση των τρόπων παραγωγής δομικών υλικών και θα προταθούν λύσεις για την αποτελεσματικότητα των δομών και για μελλοντική χρήση της μεθόδου σε διάφορες δομικές κατασκευές.

ABSTRACT

The study of auxetic microstructures and piezoelectric patches using finite elements to reduce vibrations represents a significant research field aiming at developing advanced technologies to enhance performance and safety in various structural constructions.

Auxetic microstructures constitute a crucial part of technological advancement, offering new capabilities for controlling and improving material and structural characteristics. The use of piezoelectric elements contributes to the creation of flexible control systems capable of adapting to changing conditions. Improving microstructures to reduce vibrations requires advanced modeling and analysis methods. The utilization of finite elements allows for an efficient approach to the dynamic characteristics of structures, while piezoelectric sensors and actuators are integrated for vibration control and adaptation.

Specifically, this dissertation investigates how a piezoelectric patch positioned at the end of a beam interacts with concurrent augmentative microstructures located between the patch and the beam, with the aim of damping vibrations induced by external loads. To assess the effectiveness of the proposed method, finite element methods (FEM) and simulation software such as Comsol Multiphysics and Autodesk's Inventor are employed for design and modeling in two-dimensional and three-dimensional spaces.

Upon completing the structural processing stages, conclusions will be drawn based on the results to improve methods for producing structural materials, and solutions will be proposed for the effectiveness of these structures for future applications of the method in various structural constructions.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
Κεφάλαιο 1 Ταλαντώσεις	7
Κεφάλαιο 2 Πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.2 Βιβλιογραφία.....	9
2.3 Ορισμός πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.....	9
2.4 Χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών	10
2.5 Παραδιακλαδώμενα κυκλώματα	12
2.6 Μαθηματικό μοντέλο	13
Κεφάλαιο 3 Αυξητικά υλικά	15
3.1 Εισαγωγή	15
3.2 Βιβλιογραφία.....	15
3.3 Αυξητικά υλικά	15
3.4 Αστεροειδής Μικροδομή (star-shaper honeycomb).....	17
3.5 Μικροδομή με εγκοπές (cut-outs)	18
3.6 Λόγος Poisson.....	19
Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση μικροδομών.....	21
4.1 Πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis – FEA)	21
4.2 Παραμετρική ανάλυση	21
4.2.1 Ιδιοσυχνότητες (eigenfrequency).....	21
4.2.2 Τάση (stress)	22
4.2.3 Παραμόρφωση (strain)	22
4.2.4 Μετατόπιση (displacement).....	22
4.3 Μελέτη ιδιοσυχνοτήτων (Eigenfrequency Study)	23
4.4 Στατική Ανάλυση (Stationary Study)	29
Κεφάλαιο 5: Δυναμική μελέτη, Ιδιοτιμές και Ιδιομορφές	33
Κεφάλαιο 6: Γραφήματα απόκρισης σήματος εξόδου	39
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	45
Βιβλιογραφία	46
Κατάλογος Εικόνων	48

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δομική κατασκευή αποτελεί ένα από τα κυριότερα στοιχεία της σύγχρονης κοινωνίας, αλλά παράλληλα αντιμετωπίζει πολλά προβλήματα που απαιτούν καινοτόμες λύσεις. Ένα από τα βασικά αυτά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι δομικές κατασκευές είναι η φθορά λόγω των φυσικών φαινομένων, όπως ο χρόνος, οι καιρικές συνθήκες οι σεισμικές δονήσεις κλπ. Οι κατασκευές αυτές επιβαρύνονται επιπλέον από την ύπαρξη ταλαντώσεων με αποτέλεσμα η συχνή παρακολούθηση και συντήρηση τους να είναι επιτακτική ανάγκη

Όσον αφορά την ύπαρξη ταλαντώσεων, ένα σύστημα το οποίο μπορεί ιδανικά να τις εξαλείψει θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο. Ένα τέτοιο σύστημα θα χαρακτηρίζεται από υψηλή δυσκαμψία, μικρή πυκνότητα, υψηλή αντοχή και κατάλληλη γεωμετρία προκειμένου να προσαρμοστεί σε ένα εύρος κατασκευών. Αυτό όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, είναι πολύπλοκο και συχνά ασύμφορο οικονομικά.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, λάβαμε υπόψιν τα προβλήματα που προκύπτουν από την ταλάντωση μιας κατασκευής και προτείναμε τη ταυτόχρονη χρήση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων και αυξητικών μικροδομών ως μια από τις πιθανές λύσεις του προβλήματος.

Τόσο τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα (συνδεδεμένα σε παθητικό κύκλωμα παραδιακλάδωσης) όσο και οι μικροδομές (αυξητικές μικροδομές) είναι ικανά να παρέχουν μια εποπτεία όσον αφορά την ασφάλεια της κατασκευής. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί λύσεις οι οποίες περιλαμβάνουν ταυτόχρονη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και αυξητικών μικροδομών, επομένως στη παρούσα διπλωματική εξετάζεται η εύρεση κατάλληλης μικροδομής (αστεροειδής μικροδομή- μικροδομή με εγκοπές) η οποία θα προσκολληθεί στα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, θα συνδεθούν στο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα και θα διερευνηθεί η απόκριση του συστήματος.

Η εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων μπορεί να παρέχει πρόσθετη αντοχή στα υλικά, ενώ η ανίχνευση των ταλαντώσεων μπορεί να οδηγήσει στην πρόληψη των φθορών. Οι αυξητικές μικροδομές μπορούν να βελτιώσουν την αντίδραση των κατασκευών σε σεισμικές δονήσεις, προστατεύοντας τη ζωή και την περιουσία. Μια ταλάντωση μπορεί να οδηγήσει στην υπερβολική κατανάλωση ενέργειας και στην απότομη φθορά των δομικών υλικών όμως οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και η χρήση αυξητικών μικροδομών μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της διαχείρισης ενέργειας και να παρέχουν δεδομένα για την πρόληψη της φθοράς.

Συνοψίζοντας, τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και οι αυξητικές μικροδομές ανοίγουν νέες προοπτικές για την κατασκευή και τη συντήρηση δομικών κατασκευών στη σύγχρονη εποχή έχοντας ευρεία εφαρμογή στη μείωση ταλαντώσεων. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών μπορεί να βελτιώσει την αντοχή, την ασφάλεια και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα των δομικών κατασκευών, προσφέροντας ένα καινοτόμο μονοπάτι προς το μέλλον. Είναι σημαντικό να εξετάζουμε πάντοτε τις πιο προηγμένες τεχνολογικές λύσεις για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζουμε στον τομέα της δομικής κατασκευής.

Κεφάλαιο 1 Ταλαντώσεις

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την αναγκαιότητα της συγκεκριμένης εργασίας θα ήταν σκόπιμο να αναλυθούν βασικοί όροι που αφορούν της ταλαντώσεις.

Συγκεκριμένα ο συντονισμός των χαμηλών συχνοτήτων και η ταλάντωση μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά μιας δομικής κατασκευής. Ας εξετάσουμε τα βασικά σημεία που σχετίζονται με αυτήν την επίδραση:

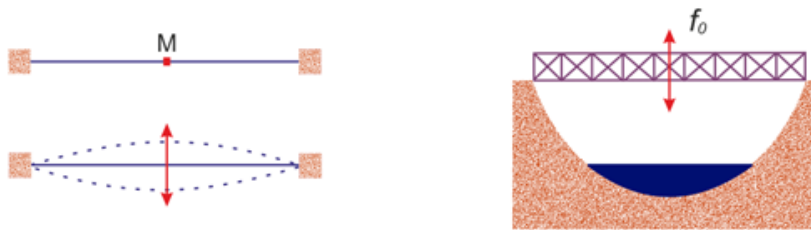
1. **Συχνότητες ταλάντωσης:** Κάθε δομικό σώμα, όπως ένα κτίριο, έχει δικές του φυσικές συχνότητες ταλάντωσης, που εξαρτώνται από τη μάζα, τη σκληρότητα και τον τρόπο που είναι συνδεδεμένα τα διάφορα στοιχεία της κατασκευής. Όταν εξασκούνται εξωτερικές δυνάμεις σε ένα κτίριο, μπορεί να προκαλέσουν ταλαντώσεις στον χαρακτηριστικό ρυθμό των φυσικών συχνοτήτων του. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες δονήσεις.
2. **Συντονισμός:** Ο συντονισμός συμβαίνει όταν οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε ένα κτίριο ταλαντώνεται με τις φυσικές συχνότητες του κτιρίου. Αν αυτό συμβεί, μπορεί να ενισχυθούν οι ταλαντώσεις, προκαλώντας πολλαπλασιασμό της κίνησης και αυξημένο κίνδυνο ζημιών στη δομή.
3. **Επιπτώσεις στη δομική ακεραιότητα:** Εάν οι δονήσεις και ο συντονισμός δεν διαχειριστούν σωστά, μπορεί να προκληθούν ζημιές στη δομή. Αυτές οι ζημιές μπορεί να περιλαμβάνουν σπασμένες κολόνες, ρωγμές στο κτίριο, κατάρρευση και άλλα προβλήματα που θέτουν σε κίνδυνο την ανθεκτικότητα της δομής στον χρόνο.
4. **Ενίσχυση κατασκευής:** Για να αντιμετωπίσουν αυτούς τους κινδύνους, οι μηχανικοί κατασκευής μπορούν να λάβουν μέτρα όπως την ενίσχυση της δομής, την προσθήκη απορροφητικών υλικών ή τη ρύθμιση της ελαστικότητας των υλικών για να μειώσουν τους κινδύνους συντονισμού και της ταλάντωσης.

Ο συντονισμός είναι ένα σημαντικό φαινόμενο που συμβαίνει όταν οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε μια δομική κατασκευή συντονίζονται με τις φυσικές συχνότητες της κατασκευής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες ταλαντώσεις και να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα [1]. Ας δούμε τα βασικά στοιχεία του συντονισμού:

1. **Φυσικές συχνότητες:** Κάθε δομική κατασκευή έχει τις δικές της φυσικές συχνότητες ταλάντωσης, που εξαρτώνται από παράγοντες όπως η μάζα της, η σκληρότητα των υλικών και η γεωμετρία της κατασκευής.
2. **Εξωτερικές δυνάμεις:** Κατά τη διάρκεια της ζωής μιας δομικής κατασκευής, όπως ένα κτίριο, υπάρχουν διάφορες εξωτερικές δυνάμεις που την επηρεάζουν. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν ανέμους, σεισμούς, κινήσεις ανθρώπων και φορτία που επιβαρύνουν τη δομή.
3. **Συντονισμός:** Ο συντονισμός συμβαίνει όταν οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε μια κατασκευή έχουν συχνότητες παρόμοιες ή κοντινές με τις φυσικές συχνότητες της δομής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον ενισχυμένο μηχανισμό της κατασκευής.
4. **Αρνητικές συνέπειες:** Ο συντονισμός μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες ταλαντώσεις, που μπορεί να προκαλέσουν στη δομή ζημιές όπως κραδασμούς, ρωγμές ή ακόμη και κατάρρευση, ανάλογα με την ένταση του συντονισμού και τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής.

Η ιδιοσυχνότητα, γνωστή και ως φυσική συχνότητα, αναφέρεται στις φυσικές ταλαντώσεις ενός δομικού συστήματος. Κάθε τέτοιο σύστημα έχει τις δικές του ιδιοσυχνότητες, που εξαρτώνται από τη γεωμετρία, τη μάζα και την ελαστικότητα των στοιχείων της κατασκευής. Οι ιδιοσυχνότητες καθορίζουν πώς το σύστημα θα αντιδρά σε εξωτερικές δυνάμεις και δονήσεις. Κάθε δομικό σύστημα έχει πολλές ιδιοσυχνότητες, και αντιστοιχεί μια σε κάθε διαφορετικό τύπο ταλάντωσης που μπορεί να συμβεί στο σύστημα. Αυτές οι ιδιοσυχνότητες μπορούν να είναι σχετικά χαμηλές για πολύ μεγάλα και σταθερά κτίρια ή πολύ υψηλές για ελαφρά και ελαστικά συστήματα. Κατά την ανάλυση και τον σχεδιασμό των κατασκευών, είναι σημαντικό οι μηχανικοί και οι κατασκευαστές να λαμβάνουν υπόψη τις ιδιοσυχνότητες, για να εξασφαλίσουν ότι η δομή είναι ανθεκτική σε ταλαντώσεις και εξωτερικές δυνάμεις, που μπορεί να υποστεί κατά τη διάρκεια της ζωής της.

Στη σύγχρονη βιομηχανία για την αντιμετώπιση των δυναμικών φαινομένων και της μείωσης των ταλαντώσεων, χρησιμοποιείται η ενσωμάτωση επιπλέον ηλεκτρομηχανικών στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά είναι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία με χρήση παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων καταναλώνουν την ενέργεια που παράγεται.



Εικόνα 1.1: Εξαναγκασμένη ταλάντωση γέφυρας λόγω εξωτερικών αιτιών

Κεφάλαιο 2 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

2.1 Εισαγωγή

Η χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών στην κατασκευή , μπορεί να επιτρέψει την παραγωγή ενέργειας από την πίεση και την αλλαγή θερμοκρασίας, την μετέπειτα διοχέτευσή της ενώ παράλληλα προστατεύει τη δομή από τη φθορά. Η συντήρηση και η επισκευή των δομικών κατασκευών είναι σημαντική για τη διατήρηση της ασφάλειας. Η εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων μπορεί να επιτρέψει την παρακολούθηση της κατάστασης των δομικών στοιχείων σε πραγματικό χρόνο καθώς όταν τα επιθέματα χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αισθητήρες, μπορούν να ανιχνεύσουν πρόωρες βλάβες και να επιτρέψουν την άμεση αντίδραση. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας από τις κινήσεις των κατασκευών, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για εξωτερικές πηγές ενέργειας.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εισάγουμε βασικές έννοιες που αφορούν τον πιεζοηλεκτρισμό και θα τις αναλύσουμε έτσι όπως έχουν προκύψει από την βιβλιογραφική έρευνα .

2.2 Βιβλιογραφία

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους αδελφούς Jacques και Pierre Curie στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα. Ήταν αποτέλεσμα από την διεξαγωγή πειραμάτων σε κρυσταλλικά υλικά όπου εφαρμόζοντας μηχανική πίεση παρατηρήθηκε πως πολώνονται ηλεκτρικά καθώς και ο βαθμός πόλωσης είναι ανάλογος με την εφαρμοζόμενη πίεση [2]. Πηγές οι οποίες αναφέρουν την χρήση του φαινομένου σε σχέση με την απόσβεση ταλαντώσεων αναφέρονται στο Hagood & von Flotow (1991) , στο οποίο μελετήθηκαν τα μαθηματικά μοντέλα για την απόσβεση ταλαντώσεων κατασκευών με πιεζοηλεκτρικά υλικά και παθητικά ηλεκτρικά δίκτυα. Έπειτα Οι Andreaus & Porfiri (2007) [3] επιχείρησαν την εύρεση βέλτιστου ηλεκτρικού δικτύου για την κατάσταση συντονισμού χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της συνάρτησης μεταφοράς. Στην εργασία των Thomas, et al. (2009) [4] έχουμε την εισαγωγή πεπερασμένων στοιχείων για την μείωση των ταλαντώσεων με τεχνικές ιδιομορφικής ανάλυσης σε μια δοκό. Τέλος παρουσιάζεται στο Berardengo, Cigada, Manzoni, & Vanali (2015) το παραδιακλαδωμένο σύστημα αντίστασης πηνίου L-R. [5]

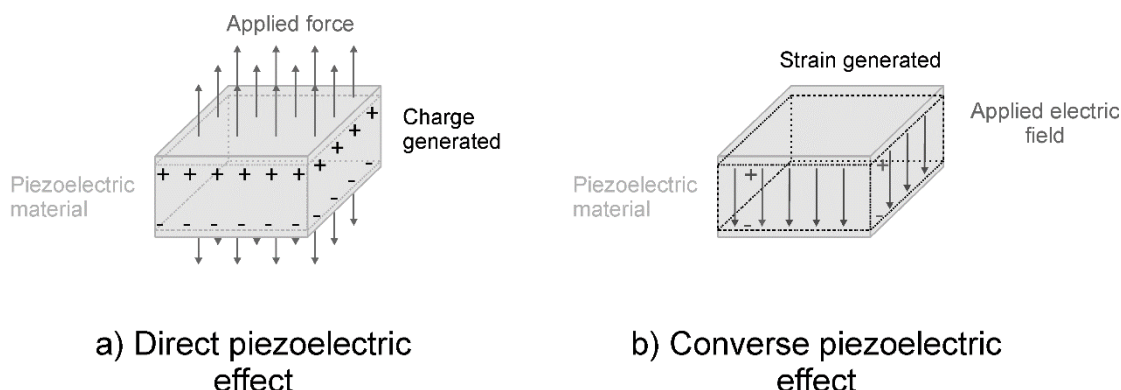
2.3 Ορισμός πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ή αλλιώς πιεζοηλεκτρισμός αναφέρεται στη δυνατότητα ορισμένων υλικών να δημιουργούν ηλεκτρική φόρτιση όταν υπόκεινται σε μηχανική πίεση, τάση ή ένταση καθώς και το αντίστροφο. Αυτή η ιδιότητα προκύπτει από την αλλαγή του σχήματος ή του όγκου του υλικού κατά την εφαρμογή μηχανικής δύναμης. Συγκεκριμένα, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει όταν τα φορτισμένα ιόντα εντός του υλικού μετακινούνται λόγω της μηχανικής πίεσης, προκαλώντας τη δημιουργία ηλεκτρικής τάσης.

Η ύπαρξη του φαινομένου αυτού οφείλεται στην δημιουργία ηλεκτρικού δίπολου στην κρυσταλλική δομή των στερεών. Οι κρύσταλλοι αυτοί δεν έχουν κέντρο συμμετρίας και από την μελέτη των μορίων τους έχει παρατηρηθεί ότι το ένα άκρο τους είναι αρνητικά φορτισμένο σε σχέση με το άλλο το οποίο είναι θετικά. Έτσι δημιουργείται ένα δίπολο εντός του κρυστάλλου.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο περιλαμβάνει τόσο το ευθύ όσο και το αντίστροφο. Στο ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο η μηχανική ενέργεια εφαρμόζεται σε ένα πιεζοηλεκτρικό

υλικό, κάνοντας το να δημιουργήσει μια ηλεκτρική τάση. Ως αντίστροφο θεωρούμε την διαδικασία κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια εφαρμοζόμενη σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό μετατρέπεται σε μηχανική.

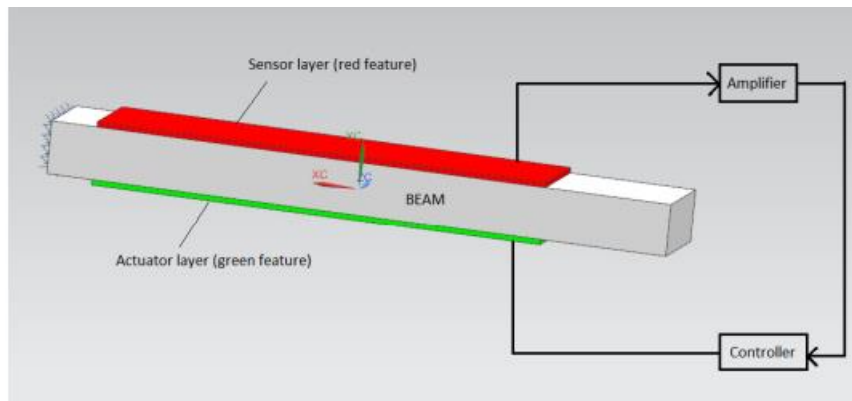


Εικόνα 2.1 ευθύ – αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Τα δύο αυτά φαινόμενα αποτελούν τη βάση για την τεχνολογία των πιεζοηλεκτρικών υλικών και έχουν ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη αισθητήρων, μετατροπέων, και πρωτοποριακών τεχνολογιών ενέργειας. Συγκεκριμένα, πολλά κρυσταλλικά υλικά, όπως κεραμικά (π.χ. πιεζοηλεκτρικά κεραμικά), πολυμερή υλικά (π.χ. πολυβινυλικλωρίδιο), και αλογόνα (π.χ. παραλογένιο) εκδηλώνουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εφαρμόζεται σε ειδικά διαμορφωμένα πεζοδρόμια τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την πίεση των πεζών ενώ το αντίστροφο βρίσκει εφαρμογή σε μικροσκόπια, ηχεία και κινητά τηλέφωνα [6]

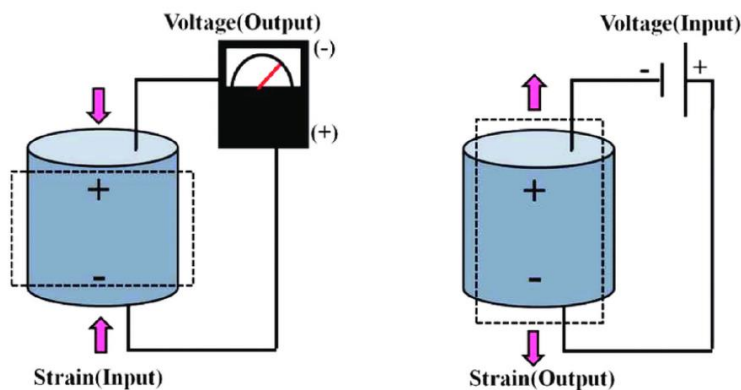
2.4 Χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών

Ως πιεζοηλεκτρικό υλικό θα μελετήσουμε το PZT. Το PZT (πλαδμίνη-ζirkόνιο-τιτανικό) αποτελεί ένα από τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα πιεζοηλεκτρικά υλικά και αποτελείται από ένα σύμπλοκο κεραμικό υλικό με αρκετές χρήσιμες προειδοποιητικές ιδιότητες. Ο συνδυασμός των στοιχείων πλαδμίνης, ζirkονίου και τιτανίου δίνει στο PZT τη δυνατότητα να αντιδρά σε μηχανική πίεση και να δημιουργεί ηλεκτρική τάση, αλλά και το αντίστροφο φαινόμενο. Αυτό το υλικό χρησιμοποιείται ευρέως σε πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και μετατροπείς, σε ηλεκτρονικές συσκευές όπως τα ηχεία, αλλά και στην παραγωγή ενέργειας από τη μηχανική πίεση. Η ευελιξία και η αποδοτικότητά του καθιστούν το PZT κρίσιμο υλικό σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. [7]



Εικόνες 2.2: πιεζοηλεκτρικό επιθέματα σε δοκό

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι εξαιρετικά χρήσιμα όχι μόνο ως αισθητήρες (sensors) αλλά και ως διεγέρτες (actuators) σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. Ως αισθητήρες, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να μετρήσουν μηχανικές παραμέτρους όπως πίεση, επιτάχυνση, δόνηση και ακόμα και θερμοκρασία. Αυτή η ικανότητα τους, τα καθιστά κρίσιμα για εφαρμογές σε πολλούς τομείς, από την αεροναυπηγική και την ιατρική τεχνολογία έως την αυτοκινητοβιομηχανία. Ως διεγέρτες, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική δόνηση ή κίνηση. Χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, στα ηχεία όπου η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε ήχο, αλλά επίσης σε μικροσκόπια όπου χρησιμοποιούνται για την ακριβή ρύθμιση των φακών. Επιπλέον, συνδυάζοντας τον ρόλο τους ως αισθητήρες και διεγέρτες, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά επιτρέπουν την ανάπτυξη εξαιρετικά αποδοτικών συστημάτων ελέγχου και ανταπόκρισης [8].



Εικόνα 2.3 πιεζοηλεκτρικό υλικό ως αισθητήρας

2.5 Παραδιακλαδώμενα κυκλώματα

Τις πιεζοηλεκτρικές στρώσεις μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για να τις συνδέσουμε και σε εξωτερικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης. Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα παραδιακλάδωσης είναι ηλεκτρικά κυκλώματα που συνδέονται με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα προκειμένου να μετατραπεί η μηχανική ενέργεια που έχει παραχθεί λόγω ταλάντωσης σε ηλεκτρική με σκοπό να καταναλωθεί εντός του αντίστοιχου κυκλώματος. Τα συστήματα αυτά είναι ως επί το πλείστον παθητικά και σπανιότερα ημι-παθητικά ή ενεργά [9].

Η απορρόφηση των κραδασμών σε ελαστικές κατασκευές είναι μια δημοφιλής τεχνική, γνωστή ως απόσβεση μέσω πιεζοηλεκτρικής διακλάδωσης. Σε αυτήν τη μέθοδο, ένα ηλεκτρικό στοιχείο, όπως μια ηλεκτρική αντίσταση, συνδέεται με ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα που είναι ενσωματωμένο σε μια ελαστική κατασκευή. Στην τεχνική αυτή, το δίκτυο που δημιουργείται, μαζί με τη χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού υλικού, συντονίζεται στη ιδιοσυχνότητα που απαιτείται για να αποσβεστεί.

Μια ειδική κατηγορία αυτής της τεχνικής είναι οι "παραδιακλαδώσεις συντονισμού" που χρησιμοποιούν πηνία, πυκνωτές και αντιστάσεις για την απόσβεση των ταλαντώσεων. Αυτά τα κυκλώματα είναι απλά στη σχεδιάσή τους και μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την απορρόφηση των κραδασμών σε ευέλικτες ελαστικές κατασκευές. Ωστόσο, το μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτούν υψηλές τιμές επαγωγής. Τα κυκλώματα ταξινομούνται σε παθητικά και ενεργά και έπειτα σε γραμμικά και μη γραμμικά. Τα κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιούνται για μια ιδιομορφή είναι τα κυκλώματα αντίστασης πηνίου "R-L" και για περισσότερες ιδιομορφές τα «ροής ρεύματος» ή διαφορετικά Hollkamp Current-flow [10].

Οι πιεζοηλεκτρικοί παραδιακλαδόμενοι μετατροπείς και συστήματα προσφέρουν μια ευρεία γκάμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς. Στην ιατρική, χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία υπερήχων στις ιατρικές συσκευές εικονικής απεικόνισης και την εκπομπή ακουστικών σημάτων σε ακουστικές εξετάσεις. Επίσης, χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική βιομηχανία για την αποστολή και λήψη σημάτων από δορυφόρους, καθώς και σε ρομποτικές εφαρμογές για τον έλεγχο της κίνησης και την ανίχνευση εμποδίων. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται στον τομέα της δομικής ανάλυσης και παρακολούθησης κτιρίων για την ανίχνευση πολλαπλών παραμορφώσεων και κραδασμών. Τέλος βρίσκουν εφαρμογή σε εξαρτήματα αυτοκινήτων, σε στροβιλομηχανές και σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα ακριβείας [11]

2.6 Μαθηματικό μοντέλο

Η μεθοδολογία είναι ίδια με αυτή που περιγράφεται στη δημοσίευση του Jeon, 2009 [12]. Οι γενικές ηλεκτρομηχανικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών καθορίζονται στο Πρότυπο IEEE για τον Πιεζοηλεκτρισμό (IEEE Standard on Piezoelectricity, 1987) [13]

Στη προκειμένη εργασία θα αναλυθεί το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιλαμβάνει το μηχανικό μοντέλο, τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και την επίδραση του ηλεκτρικού κυκλώματος αποτελούμενο από μία ωμική αντίσταση R και ένα πηνίο αυτεπαγωγής L .

$$M\ddot{X} + D\dot{X} + KX = \tilde{F}$$

$$X = \begin{pmatrix} u \\ q \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} M_m & 0 \\ 0^T & L \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0^T & R \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} \widehat{K}_m & (K_1 + K_2)/C \\ (K_1^T + K_2^T)/C & 2/C \end{pmatrix} \quad \tilde{F} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix}$$

Οι εξισώσεις αυτές αποτελούνται από μηχανικά και ηλεκτρικά στοιχεία

Τα ηλεκτρικά στοιχεία είναι τα εξής :

L =αυτεπαγωγή, R =ωμική αντίσταση

Q =διάνυσμα φορτίου

K_1 = μητρώο ηλεκτρομηχανικής σύζευξης 1^{ου} επιθέματος, K_2 = μητρώο ηλεκτρομηχανικής σύζευξης 2^{ου} επιθέματος, C =χωρητικότητα υλικού πιεζοηλεκτρικού.

Τα μηχανικά στοιχεία είναι τα εξής :

U = διάνυσμα μετατόπισης μηχανικού μοντέλου

M_m = μητρώο μάζας μηχανικού μοντέλου

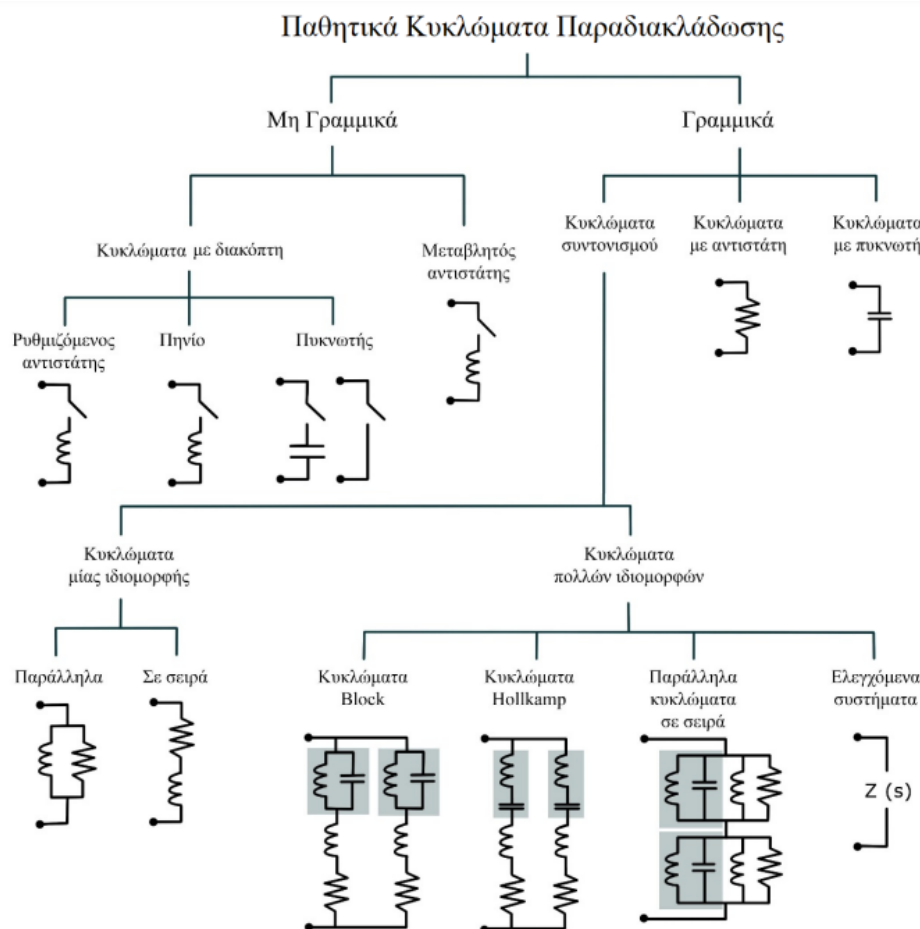
K_m = μητρώο δυσκαμψίας μηχανικού μοντέλου

F = διάνυσμα μηχανικής δύναμης

Ενώ στο συνολικό μοντέλο έχουμε:

M = μητρώο μάζας, X =μητρώο μετατόπισης, D =μητρώο απόσβεσης, K = μητρώο δυσκαμψίας.

Το παραπάνω διακριτικοποιημένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα μηχανικών κατασκευών που συνδέονται με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και είναι προσαρμοσμένο στην περίπτωση όπου τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα είναι συνδεδεμένα με ένα παθητικό ηλεκτρικό κύκλωμα .



Εικόνα 2.4: διάφοροι τύποι παραδιακλαδόμενων κυκλωμάτων

Κεφάλαιο 3 Αυξητικά υλικά

3.1 Εισαγωγή

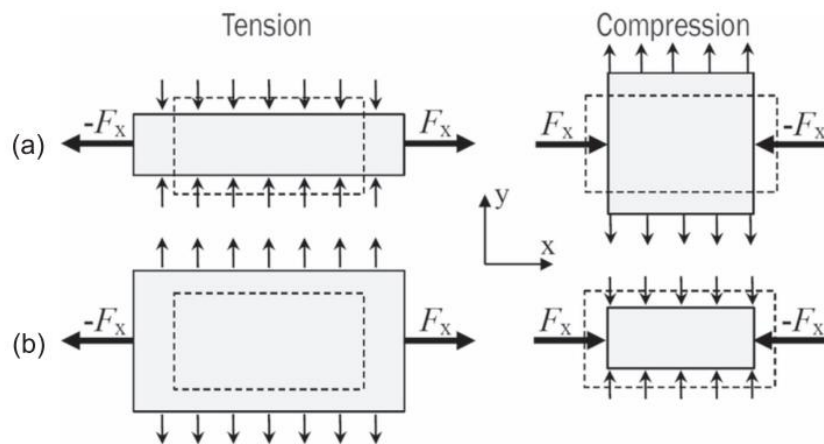
Τα αυξητικά υλικά αποτελούν σημαντική προσθήκη στον κλάδο των σύγχρονων δομικών κατασκευών, διότι βοηθούν στην επίλυση πολλών προβλημάτων. Ως αποτέλεσμα επιτευγμάτων νανοτεχνολογίας και υλικοτεχνολογίας είναι κατασκευασμένα από ανθεκτικά και εξελιγμένα υλικά, όπως ινοταινίες και πολυμερή. Τα αυξητικά υλικά προσδίδουν αντοχή και ευελιξία στις κατασκευές. Επιπλέον επιτρέπουν τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δομικών κατασκευών. Εν κατακλείδι, τα αυξητικά υλικά προσφέρουν αναβαθμισμένες λύσεις για την κατασκευή, παρέχοντας αντοχή, ευελιξία και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. [14]

3.2 Βιβλιογραφία

Έχουν διερευνηθεί διάφορες δημοσιεύσεις οι οποίες επικεντρώνονται στη χρήση αυξητικών υλικών. Αρχικά Οι B.R. Mace, E Manconi (2008) [15] και οι L. Jianbao, W. Yue-Sheng, Z. Chuanzeng (2010) [16] μελέτησαν τη διάδοση του κύματος για τη δημιουργία band gap σε διδιάστατες μικροδομές και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός διάδοσης του κύματος εξαρτάται από το σχήμα της μικροδομής. Οι W. Chen, X. Tian, R. Gao, S. Liu (2018) [17] μελετούν τη δημιουργία band gaps (περιοχές χάσματος) με χρήση αυξητικών υλικών, και πως επιδρά το γέμισμα τη κατασκευής από πολυμερές υλικό στις περιοχές αυτές. Τέλος οι W. Yifan, B. Ramirez, K. Carpenter, C. Naify, D. C. Hofmann, C. Daraio (2019) [18] μελέτησαν τη διαμόρφωση μικροδομών και πλεγμάτων με χρήση σύγχρονων μεθόδων, με βασική παράμετρο την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

3.3 Αυξητικά υλικά

Πρόκειται για υλικά τα οποία έχουν την δυνατότητα να αυξάνεται η διατομή στην κάθετη διεύθυνση όταν εφελκούνται και αντίστροφα. Ανήκουν στην κατηγορία των μεταϋλικών και η συμπεριφορά που επιδεικνύουν είναι γνωστή ως αρνητικός λόγος Poisson. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η συμπεριφορά αυτή των υλικών δεν οφείλεται στην φύση τους αλλά στον τρόπο κατασκευής τους. [19]



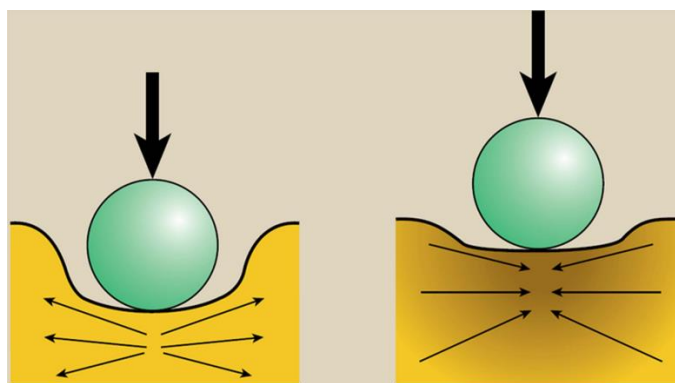
Εικόνα 3.1: Αυξητικά υλικά

Η διαμόρφωση μικροδομών και πλεγμάτων δίνουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Τα πλέγματα αποτελούνται από μία σειρά επαναλαμβανόμενων ιδίων κυψελών

οι οποίες εκτείνονται κατά μήκος της αξονικής και περιφερειακής κατεύθυνσης. Ο τρόπος με τον οποίο διαδίδονται τα κύματα και κατ' επέκταση οι ταλαντώσεις εντός αυτών των υλικών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τα εξωτερικά γεμίσματα της «κυψέλης» παρουσιάζουν καλύτερη αυξητικότητα σε σύγκριση με τις πλήρως γεμισμένες «κυψέλες» και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα απόσβεσης ταλαντώσεων καθώς και ακουστικών φίλτρων.

Στην σύγχρονη μηχανική με την ανάπτυξη των τρισδιάστατων εκτυπωτών έχουν γίνει ευρέως διαδεδομένες οι κατασκευές που αποτελούνται από μικροδομές, οι οποίες κατασκευές είναι εξίσου στιβαρές με μία κατασκευή γεμάτη με υλικό. Στόχος αυτόν τον κατασκευών είναι η μείωση υλικού και βάρους. Τα αυξητικά υλικά χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αντοχή (σκληρότητα) σε τοπική παραμόρφωση και μεγαλύτερη ακαμψία στη διάτμηση. Έχουν την ικανότητα να σχηματίζουν διπλές καμπύλες επιφάνειες και έχουν υψηλότερο συντελεστή δυσθραυστότητας. [20]

Η χρήση αυξητικών υλικών έχει επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε πολλούς τομείς της τεχνολογίας και της επιστήμης. Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι η εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης κραδασμών και μείωσης της μηχανικής καταπόνησης σε δομικά συστήματα, όπως κτίρια και γέφυρες. Αυτό έχει σημαντικές εφαρμογές στη μείωση των ζημιών από σεισμούς. Ωστόσο δεν είναι λίγες οι εφαρμογές και σε άλλους τομείς, όπως στη ιατρική με την χρήση αυξητικών υλικών ως εμφυτεύματα ή τεχνητά μέλη, στην βιοϊατρική στην δημιουργία ανθεκτικών εργαλείων αλλά και στον ρουχισμό με την δυνατότητα αυξομείωσης μεγέθους ανάλογα με τις απαιτούμενες ανάγκες. [21]

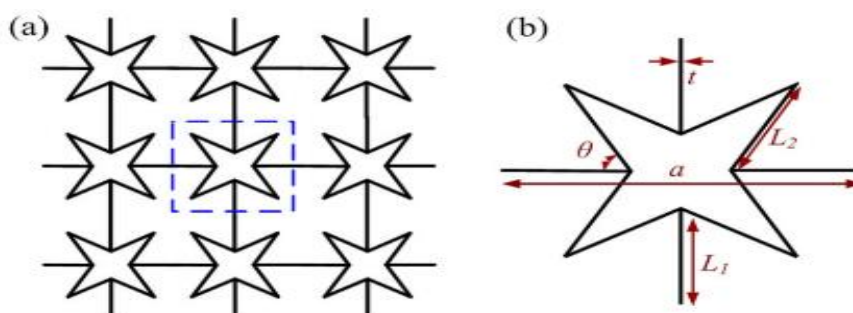


Εικόνα 3.2: Συμπεριφορά αυξητικού υλικού

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με 2 είδη μικροδομών, αστεροειδής μικροδομή (star-shaper honeycomb) και μικροδομή με εγκοπές (cut-out) οι οποίες ανήκουν στη ευρεία κατηγορία των μικροδομών με επανείσοδο (Re-entrance models) και των σύνθετων μικροδομών (Composite models). Παρακάτω θα δοθεί αναλυτική περιγραφή κάθε είδους.

3.4 Αστεροειδής Μικροδομή (star-shaper honeycomb)

Οι Gibson et al πρότειναν για πρώτη φορά την παραδοσιακή κυτταρική δομή με τη μορφή κηρήθρων επανεισόδου το 1982 [22] στις οποίες ιδανικά, οι εξωτερικές κάθετες διαγώνιες νευρώσεις μετακινούνται προς τα έξω όταν η κηρήθρα επανεισόδου τεντώνεται κατά μήκος της οριζόντιας κατεύθυνσης. Οι Larsen et al διεξήγαγαν την πρωτοποριακή εργασία του σχεδιασμού συμβατών μικρομηχανισμών και δομών με NPR χρησιμοποιώντας μια μέθοδο βελτιστοποίησης αριθμητικής τοπολογίας. Η μέθοδος επέτρεψε στον χρήστη να καθορίσει τις ελαστικές ιδιότητες των υλικών των συμβατών μηχανισμών και να αποκτήσει βέλτιστες δομές [23].



Εικόνα 3.2: Κυψελίδα αστεροειδής μικροδομής

Οι δομές κηρήθρας επανεισόδου που φαίνονται στο σχήμα θα μπορούσαν εύκολα να διαμορφωθούν σε τρισδιάστατες δομές με επαρκείς συνδέσεις κυψελών μονάδας και αυξητικές συμπεριφορές σε πολλαπλές κύριες κατευθύνσεις. Επεκτείνοντας την έννοια της δισδιάστατης αυξητικής δομής επανεισόδου, οι Schwerdtfeger et al [24] σχεδίασαν μια τρισδιάστατη δομή με ένα εξαγωνικό μοτίβο υπερπλέγματος που εμφανίζει NPR σε πολλαπλές κατευθύνσεις. Οι Yang et al [25] διεξήγαγαν μια περαιτέρω αναλυτική έρευνα και η τρισδιάστατη δομή επανεισόδου παρουσιάστηκε από το κελί μονάδας όπως φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 3.2: η πρώτη 3d απεικόνιση

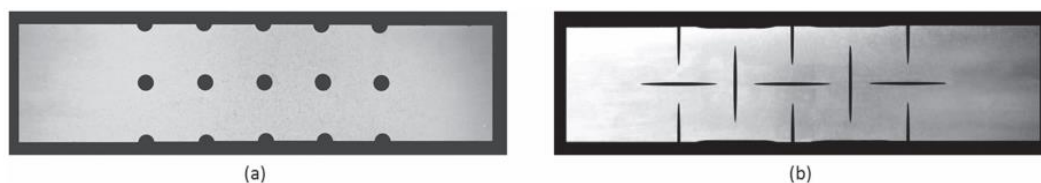
Οι Li et al [26] πρότειναν μια νέα 3D επαυξημένη κυτταρική δομή επανεισόδου. Η αναλογία Poisson του προτεινόμενου μοντέλου θα μπορούσε να προσαρμοστεί σε ένα ευρύ

φάσμα από αρνητικό σε θετικό και οι Grima et al [27] πρότειναν εξαγωνικές κηρήθρες με μηδενικούς λόγους Poisson και ενισχυμένη ακαμψία.

Η σχέση του συγκεκριμένου τύπου μικροδομής είναι εκτεταμένη και αποτελεί συνεχές αντικείμενο μελέτης μέχρι και σήμερα. Στη παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε τόσο σε επίπεδο μονάδας αστεριού όσο και σε συστοιχία.

3.5 Μικροδομή με εγκοπές (cut-outs)

Ο κύριος σκοπός της έρευνας για τα σύνθετα αυξητικά είναι να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών και των αυξητικών για να επεκτείνουν τις πιθανές εφαρμογές. Οι υπάρχουσες έρευνες για τα σύνθετα αυξητικά βασίζονται στις τέσσερις πτυχές [28]: (1) δημιουργία NPR μέσω διαδοχικής στοίβαξης ελασμάτων ενισχυμένων με γωνιακή πτυχή. (2) παραγωγή αυξητικών σύνθετων υλικών με την εισαγωγή αυξητικών εγκλεισμάτων ή με τη χρήση της αυξητικής μήτρας. (3) τη διερεύνηση και την αξιολόγηση των ιδιοτήτων των αυξητικών σύνθετων υλικών. και (4) κατασκευή αυξητικών σύνθετων υλικών.



Εικόνα 3.3 : Μικροδομές με τρύπες (a) , Ελλειπτικές οπές (b)

Υπάρχουν πολλών μορφών σύνθετες μικροδομές οι οποίες εξετάζονται καθημερινά και προσαρμόζονται ανάλογα με τις συνθήκες μοντέλου. Ο τρόπος με τον οποίο αυτά τα ποικίλα χαρακτηριστικά θα εφαρμοστούν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τον σχεδιασμό της δομής, και τις συνθήκες χρήσης.

3.6 Λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson είναι ένας μαθηματικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της μέσης τιμής και της διακύμανσης σε μια διακριτική τυχαία μεταβλητή. Ονομάζεται έτσι προς τιμήν του Γάλλου μαθηματικού Siméon Denis Poisson [29]. Στον τομέα των υλικών, ο λόγος Poisson εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο ένα υλικό αντιδρά σε μηχανικές τάσεις. Είναι ένας αριθμός που καθορίζει το πώς μια ύλη μεταβάλλει τη μορφή της όταν υπόκειται σε μηχανική πίεση.

Αν ένα υλικό έχει υψηλό λόγο Poisson, αυτό σημαίνει ότι όταν υποστεί συμπίεση σε μια κατεύθυνση, τείνει να αντιστρέψει το σχήμα του σε κάθε άλλη κατεύθυνση, μειώνοντας τη διάστασή του. Αντίθετα, όταν ένα υλικό έχει χαμηλό λόγο Poisson, διατηρεί το σχήμα του καλύτερα κατά τη συμπίεση. Αν ο λόγος Poisson είναι αρνητικός, αυτό υποδηλώνει ότι το υλικό διογκώνεται στις διαστάσεις του όταν υποστεί συμπίεση.

Ο λόγος Poisson (ν) ορίζεται μαθηματικά ως η αρνητική αναλογία της συμπιεστικής παραμόρφωσης (ϵ_{xx}) προς την επιμηκυντική παραμόρφωση (ϵ_{yy}). Αυτό μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

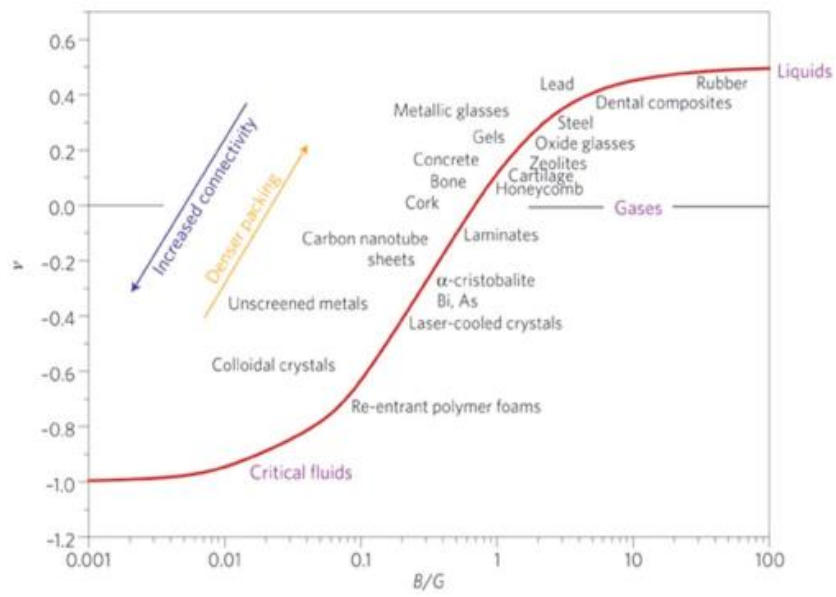
$$\nu = -\epsilon_{xx}/\epsilon_{yy}$$

$$\text{Όπου } \epsilon_{xx} = du_x/dx$$

$$\epsilon_{yy} = du_y/dy$$

Στην πράξη, ο λόγος Poisson είναι ένας αριθμός που βρίσκεται συνήθως στο εύρος μεταξύ -1 και 0, και μπορεί να πάρει τιμές συγκεκριμένα για κάθε υλικό. Οι υλικοτεχνικές ιδιότητες των υλικών καθορίζουν την ακριβή τιμή του λόγου Poisson για ένα συγκεκριμένο υλικό.

Σε μακροσκοπικό επίπεδο ο αρνητικός λόγος του Poisson και οι σχετικές ιδιότητες των αυξητικών υλικών προκύπτουν μέσα από μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους. Εφόσον η δράση των αυξητικών υλικών είναι αντίθετη από την συμβατική, είναι αναμενόμενη η αρνητική τιμή του.



Εικόνα 3.4: Αριθμητικό εύρος λόγου Poisson

Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση μικροδομών

Αρχικά θα κατασκευάσουμε στο COMSOL Multiphysics (πλατφόρμα προσομοίωσης πολυφυσικών φαινομένων) μια δοκό διαστάσεων 170x20x2 mm.

Έπειτα θα σχεδιάσουμε στο Autodesk Inventor (λογισμικό της Autodesk με δυνατότητα 3d σχεδίασης) τα 2 είδη μικροδομών που αναφέρθηκαν. Η παραμετρική ανάλυση θα προκύψει με χρήση πεπερασμένων στοιχείων αλλά πρώτα ας κάνουμε μια σύντομη αναφορά στους 2 αυτούς όρους.

4.1 Πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis – FEA)

Η παραμετρική ανάλυση της κάθε γεωμετρίας θα προκύψει μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μεταβολών στις φυσικές ιδιότητες ενός αντικειμένου κάτω από διάφορες συνθήκες φορτίσεων. Οι βασικές αρχές της FEA περιλαμβάνουν διαίρεση σε στοιχεία (Meshing), καθορισμός συνοριακών συνθηκών (Boundary Conditions), εφαρμογή φορτίων και υπολογισμός στατικής ισορροπίας.

Το αντικείμενο αρχικά υποδιαιρείται σε μικρότερα τμήματα, γνωστά ως στοιχεία, καθένα από αυτά τα στοιχεία περιγράφονται με μαθηματικές εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά του υλικού. Έπειτα καθορίζονται οι συνθήκες στα άκρα του μοντέλου δηλαδή από ποια μεριά είναι πακτωμένο και σε ποια υπόκειται το εξωτερικό φορτίο και έτσι εφαρμόζονται τα εξωτερικά φορτία που ασκούνται στο μοντέλο, όπως δυνάμεις, ροπές, θερμικές φορτίσεις, κ.λπ. Τέλος επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας για κάθε στοιχείο, λαμβάνοντας υπόψη τις συνοριακές συνθήκες μέσω ενός συστήματος γραμμικών ή μη γραμμικών εξισώσεων προκειμένου να προσδιοριστούν οι ζητούμενες μεταβολές όπως η μετατόπιση, η παραμόρφωση και η στρέψη.

Αυτές οι αρχές βασίζονται στην προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων, καθιστώντας το πρόβλημα πιο διαχειρίσιμο, αλλά απαιτώντας προσοχή στην επιλογή κατάλληλων στοιχείων, συνοριακών συνθηκών και τιμών υλικού για ακριβή αποτελέσματα.

4.2 Παραμετρική ανάλυση

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο πολυφυσικής προσομοίωσης που επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων σε διάφορες φυσικές διαδικασίες συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής. Η παραμετρική ανάλυση είναι η διαδικασία που επιτρέπει στον χρήστη να εξετάσει πώς οι αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησής του. Παρέχει δυνατότητα ανάλυσης τάσης, παραμόρφωσης και μετατόπισης στο πλαίσιο της οποίας καθορίζει την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος. Συγκεκριμένα στην παρούσα ανάλυση εξετάζεται πώς επηρεάζει την κάθε μικροδομή η επιβολή μίας εφελκιστικής δύναμης 100N στο άνω άκρο τους όταν το κάτω είναι πακτωμένο.

4.2.1 Ιδιοσυχνότητες (eigenfrequency)

Με τον όρο ιδιοσυχνότητες αναφερόμαστε στις "φυσικές συχνότητες" ενός δομικού συστήματος, δηλαδή στις συχνότητες στις οποίες το σύστημα θα ταλαντώνεται χωρίς

εξωτερική επιβολή δυνάμεων. Κατά την ανάλυση της ιδιοσυχνότητας, το σύστημα περιγράφεται με μια σειρά διαφορικών εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν τη δυναμική του, και ο στόχος είναι να βρεθούν οι συχνότητες όπου αυτές οι εξισώσεις έχουν λύση. Οι ιδιοσυχνότητες είναι συνήθως συνδεδεμένες με την κρίσιμη συμπεριφορά του συστήματος, όπως η ρύθμιση των ταλαντώσεων ή η απόδοση σε δυναμικά φορτία.

4.2.2 Τάση (stress)

Στη δομική μηχανική, η τάση αναδεικνύεται ως μία εξαιρετικά σημαντική παράμετρος, καθώς παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις εσωτερικές δυνάμεις που δρουν εντός μιας δομής. Η τάση ορίζεται ως η δύναμη που δρα σε μια μοναδιαία επιφάνεια εντός ενός υλικού, και η ανάλυση των τάσεων παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατανομή αυτών των δυνάμεων.

Η κατανομή των τάσεων σε μια δομή είναι κρίσιμη για τον μηχανικό, καθώς βοηθάει στον εντοπισμό των περιοχών με υψηλότερες φορτίσεις και, συνεπώς, μπορεί να οδηγήσει σε προληπτικά μέτρα για την ενίσχυση ή τη βελτίωση της δομικής απόδοσης. Σε πολλές περιπτώσεις, υψηλές τάσεις μπορεί να προκαλέσουν παραμόρφωση και καταστροφή υλικού.

4.2.3 Παραμόρφωση (strain)

Η παραμόρφωση αναφέρεται στην αλλαγή του σχήματος ενός αντικειμένου υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων ή φορτίων, είναι δηλαδή η απόκλιση από το αρχικό σχήμα.

Στη μηχανική, η παραμόρφωση ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υλικού μπορεί να είναι ελαστική (αν το υλικό επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα μετά την αφαίρεση της δύναμης) ή πλαστική (αν το υλικό παραμένει παραμορφωμένο ακόμη και μετά την αφαίρεση της δύναμης).

4.2.4 Μετατόπιση (displacement)

Στη μηχανική, η μετατόπιση αναφέρεται στη μεταβολή θέσης ενός σημείου, ενός σωματιδίου ή μιας δομικής στοιχειώδους μονάδας από την αρχική του θέση. Συνήθως, εκφράζεται σε μονάδες μήκους, όπως μέτρα ή χιλιοστά. Η μετατόπιση μπορεί να είναι διανυσματική, περιγράφοντας την μεταβολή θέσης σε όλες τις κατευθύνσεις του χώρου, ή μπορεί να αφορά μόνο μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος.

Η μετατόπιση είναι σημαντική καθώς χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, των τάσεων, και άλλων μηχανικών χαρακτηριστικών σε συστήματα και δομές. Κατά τη διάρκεια μηχανικών αναλύσεων, η μετατόπιση είναι συχνά ένα κρίσιμο μέγεθος για την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης ή επιβάρυνσης.

Πραγματοποιήσαμε για την αστεροειδής μικροδομή και την μικροδομή με εγκοπές ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων (eigenfrequency study), και στατική ανάλυση (stationary study) που περιλαμβάνει πληροφορίες και αντίστοιχα γραφήματα για την τάση, την παραμόρφωση και την μετατόπιση τους.

4.3 Μελέτη ιδιοσυχνοτήτων (Eigenfrequency Study)

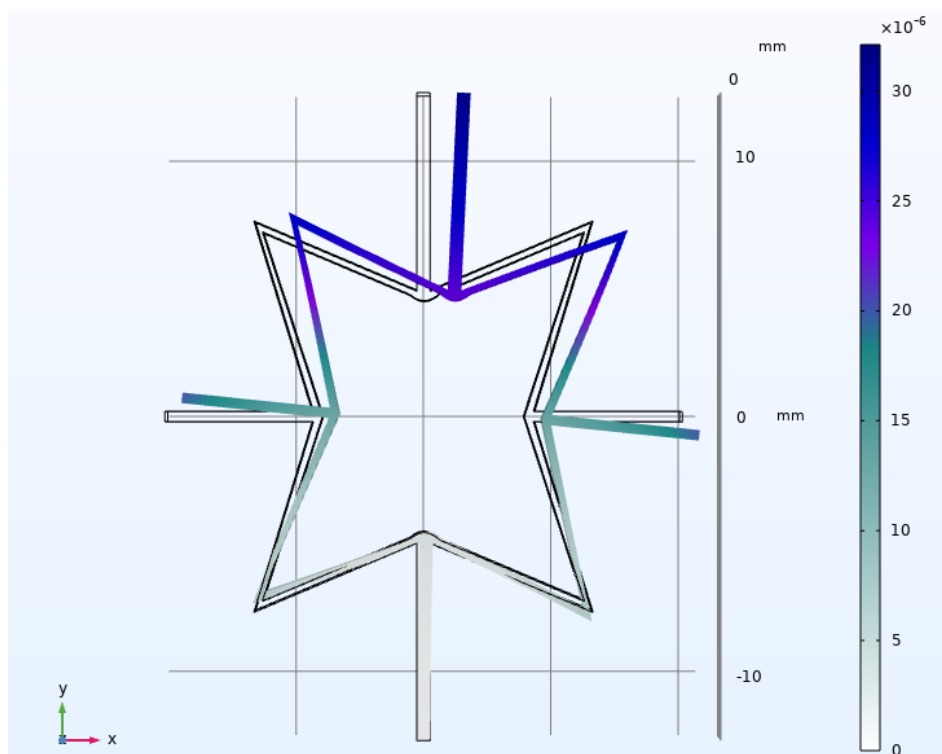
Στο περιβάλλον του COMSOL τα γραφήματα παραμόρφωσης που παράγονται από την ιδιομορφική ανάλυση μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του συστήματος κατά την ταλάντωση σε διαφορετικές ιδιοσυχνότητες. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων που απαιτούν σταθερή συμπεριφορά κατά τη λειτουργία τους.

Συγκεκριμένα για την αστεροειδής μικροδομή μεγέθους 25x20x0.5mm προέκυψαν 6 ιδιοσυχνότητες.

Eigenfrequency(Hz)
313,54 Hz
484 Hz
928,65 Hz
1386,1 Hz
1494 Hz
2667,1 Hz

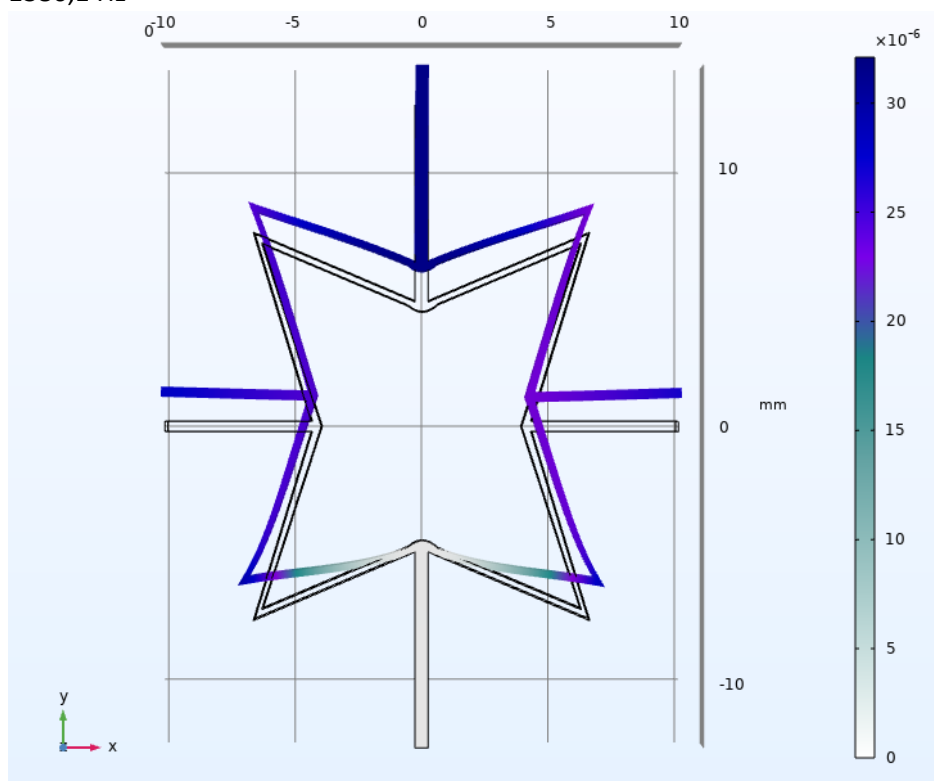
Από τις οποίες οι 2^η και η 3^η είναι στροφικές ιδιοσυχνότητες οπότε δεν θα συμπεριληφθούν τα γραφήματα αυτών των συχνοτήτων στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης ανάλυσης. Αντίστοιχα για τις υπόλοιπες συχνότητες έχουμε:

- 313,54 Hz



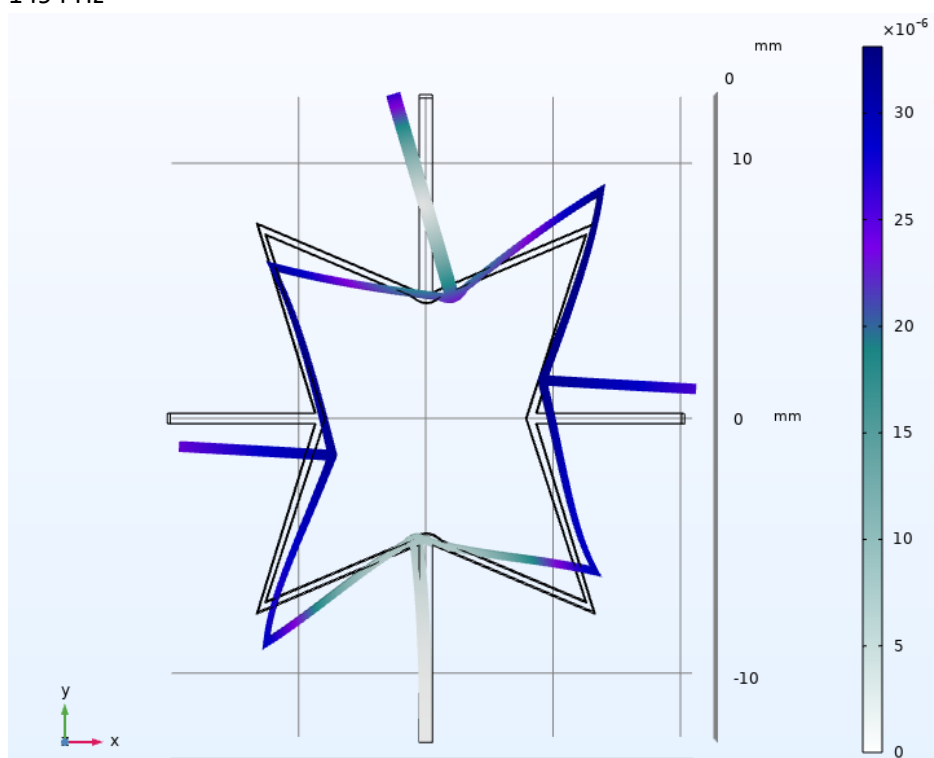
Εικόνα 4.3.1: 1^η καμπτική ιδιοσυχνότητα με ενδιάμεσο στρώμα αστεροειδής μικροδομής.

- 1386,1 Hz



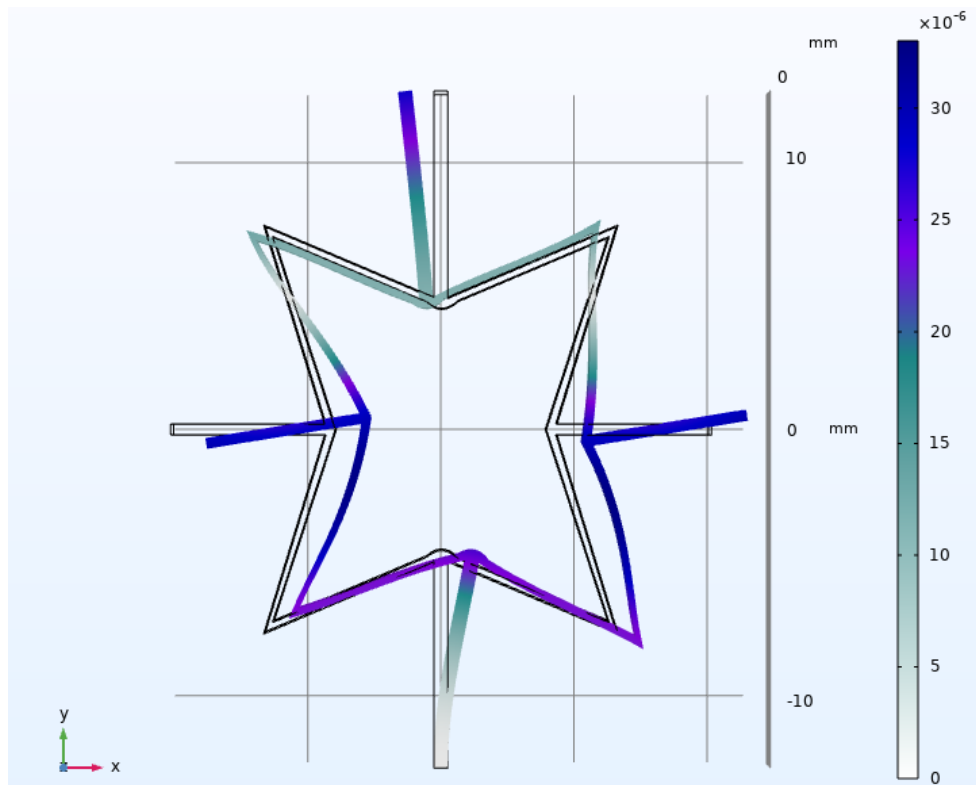
Εικόνα 4.3.2: 2^η καμπτική ιδιοσυχνότητα με ενδιάμεσο στρώμα αστεροειδής μικροδομής

- 1494 Hz



Εικόνα 4.3.3: 3^η καμπτική ιδιοσυχνότητα με ενδιάμεσο στρώμα αστεροειδής μικροδομή

- 2667,1 Hz



Εικόνα 4.3.4: 4^η καμπτική ιδιοσυχνότητα με ενδιάμεσο στρώμα αστεροειδής μικροδομής

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη δείχνουν το μέγεθος της μετατόπισης σε κάθε σημείο του μοντέλου κατά τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος (eigenfrequency). Η μετατόπιση αναφέρεται στην απόκλιση των σημείων του μοντέλου από τη θέση τους με σημείο αναφοράς την αρχική τους θέση, λόγω της κίνησης που προκαλείται από την ταλάντωση στις ιδιοσυχνότητες αυτές.

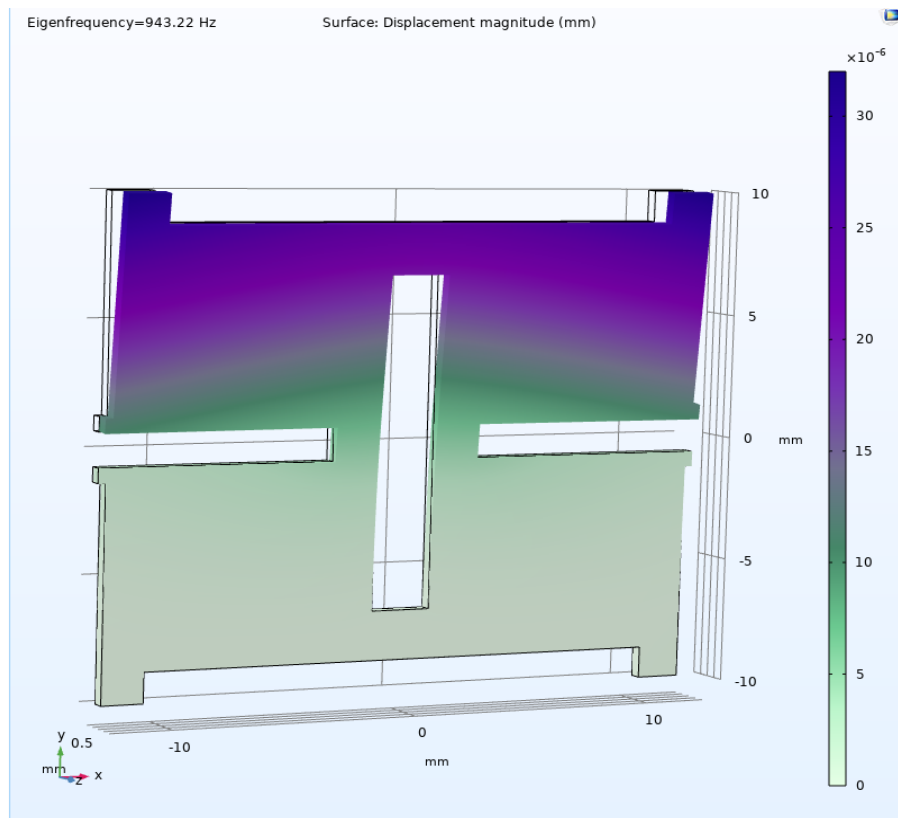
Η μπάρα δεξιά ορίζει το εύρος και την κλίμακα των τιμών χρησιμοποιώντας ενδεικτικούς χρωματισμούς. Με βάση τη μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε παρατηρούμε αλλαγή της θέσης του άνω άκρου του συστήματος κατά την εφαρμογή της εφελκυστικής αυτής δύναμης. Επίσης παρατηρείται γενικότερη μεταβολή του σχήματος της μικροδομής κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιβεβαιώνεται η αυξητικότητα της καθώς στον άξονα που ασκείται η εφελκυστική δύναμη (άξονας y) αντί να μειωθεί η διατομή όπως στα συμβατικά υλικά, εκείνη αυξάνεται. Για την αστεροειδής μικροδομή οι περιοχές κατά τις οποίες παρατηρείται η μεγαλύτερη μεταβολή είναι οι γωνίες του αστεριού και η δεξιά και η αριστερά λαβές του. Στην συχνότητα 1386,1 παρατηρήθηκε αύξηση του μεγέθους του στον άξονα y κατά 2mm.

Όσον αφορά την μικροδομή με εγκοπές (cut out) μεγέθους ομοίως 25x20x0,5mm προέκυψαν άλλες 6 ιδιοσυχνότητες:

Eigenfrequency(Hz)
943,22 Hz
1208,7 Hz
3366,3 Hz
5706,1 Hz
6409,9 Hz
7021 Hz

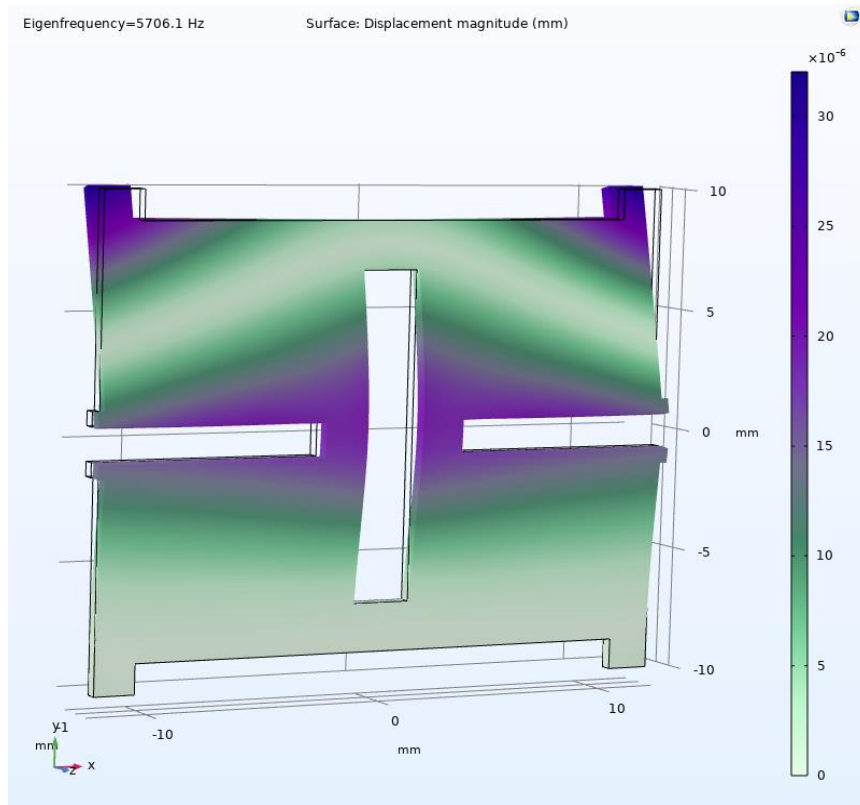
Από τις οποίες εξαιρούνται πάλι οι 2^η και η 3^η επειδή είναι στροφικές και πακτώνοντας τα κάτω άκρα της έχουμε:

- 943,22 Hz



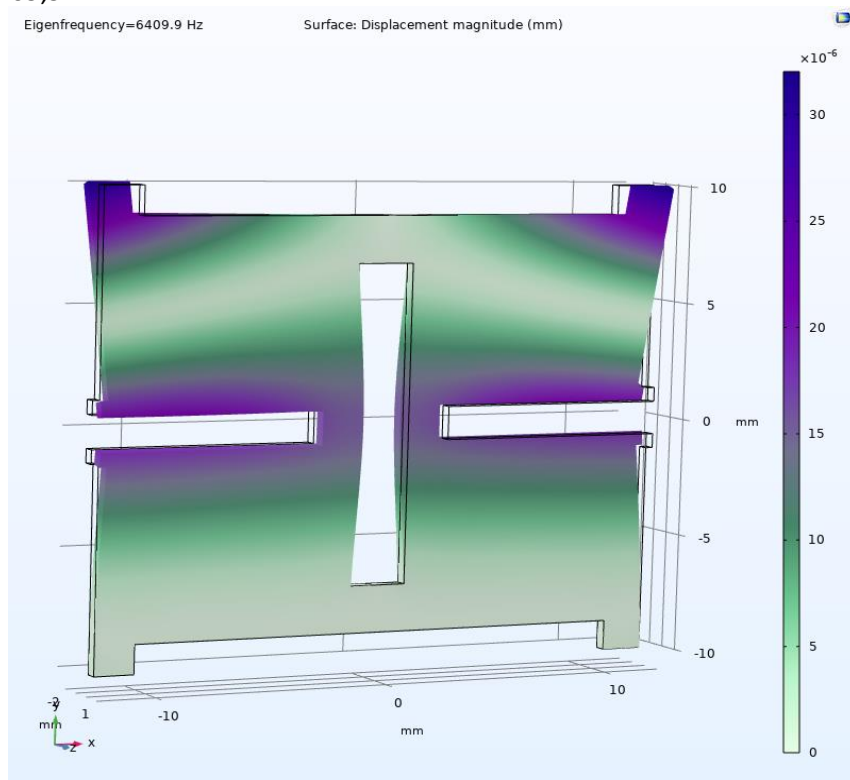
Εικόνα 4.3.5: 1^η καμπτική ιδιοσυχνότητα με ενδιάμεσο στρώμα μικροδομής με εγκοπές.

- 5706,1 Hz



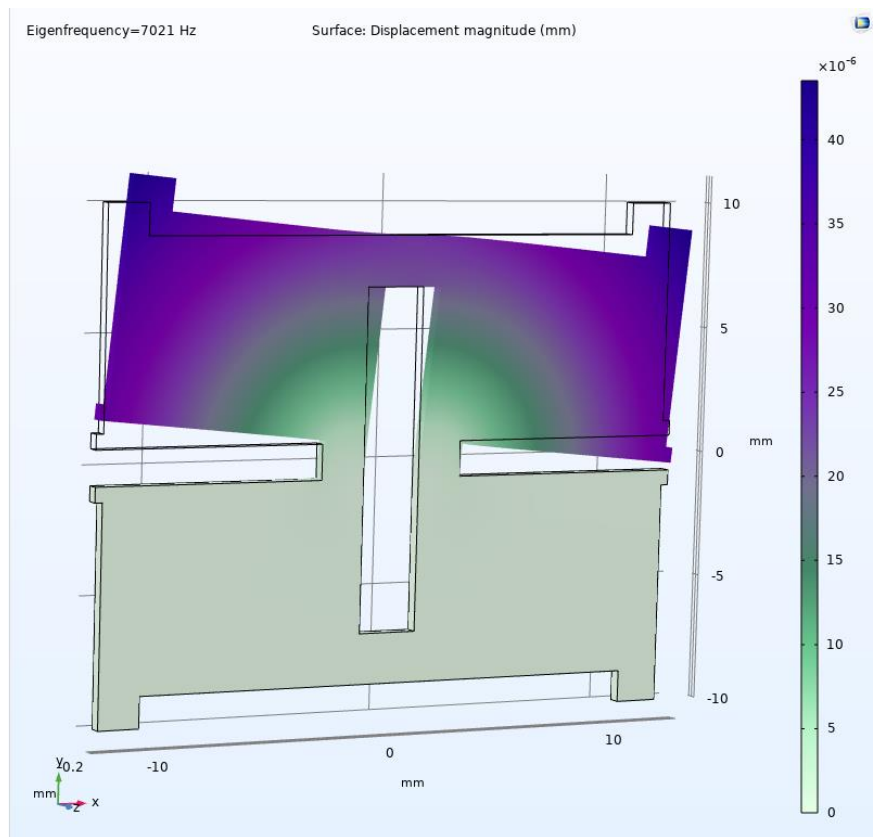
Εικόνα 4.3.6: 2^η καμπτική ιδιοσυχνότητα με ενδιάμεσο στρώμα μικροδομής με εγχοπές.

- 6409,9 Hz



Εικόνα 4.3.7: 3^η καμπτική ιδιοσυχνότητα με ενδιάμεσο στρώμα μικροδομής με εγχοπές

- 7021 Hz



Εικόνα 4.3.8: 4^η καμπτική ιδιοσυχνότητα με ενδιάμεσο στρώμα μικροδομής με εγχοπές.

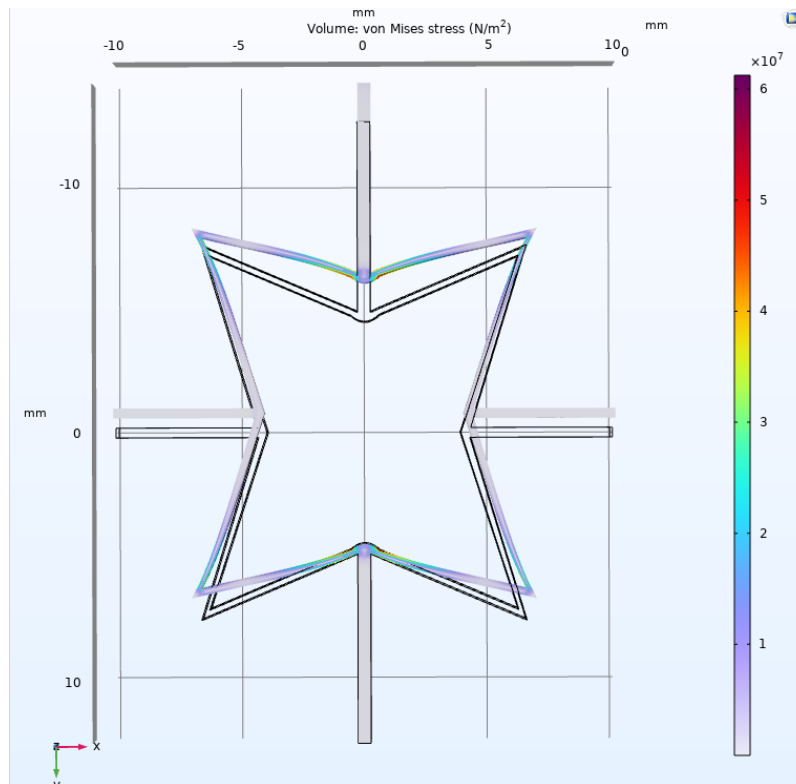
Ομοίως παρατηρούμε μετατόπιση των σημείων της μικροδομής από την αρχική τους θέση και σε αυτή την μικροδομή. Για την μικροδομή με εγχοπές οι περιοχές αυτές είναι κυρίως τα πάνω δεξιά και αριστερά άκρα της καθώς και τα σημεία γύρω από την κεντρική οπή.

Με τη χρήση της μπάρας χρωμάτων η οποία βρίσκεται στα δεξιά και για τις 2 μικροδομές, μπορούμε να οπτικοποιήσουμε τις περιοχές όπου υπάρχει η μεγαλύτερη ή η μικρότερη μεταβολή από την αρχική τους θέση και ταυτόχρονα τα σημεία στα οποία υπάρχει μεγαλύτερη ή μικρότερη καταπόνηση λόγω αυτής της μεταβολής. Όπως βλέπουμε από την κλίμακα μέτρησης, όσο πιο σκούρο χρώμα έχει μια περιοχή τόσο πιο έντονη είναι η καταπόνησή της. Η κλίμακα και για τις 2 μικροδομές είναι της τάξεως του $0-30 \cdot 10^{-6}$ και η μεγαλύτερη αλλαγή πραγματοποιείται στα σημεία που αναφέρθηκαν παραπάνω ξεχωριστά για την κάθε μικροδομή.

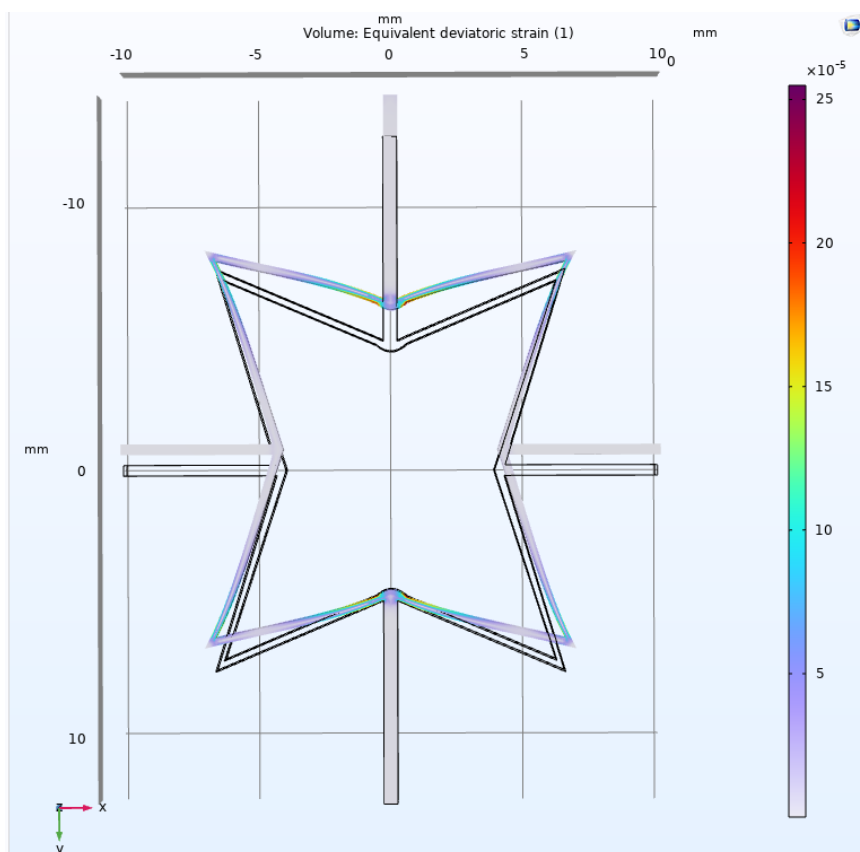
4.4 Στατική Ανάλυση (Stationary Study)

Σε αυτή την μελέτη εξήχθησαν ποιοτικά αποτελέσματα σχετικά με την τάση (stress) παραμόρφωση (strain) και μετατόπιση (displacement) των 2 μικροδομών.

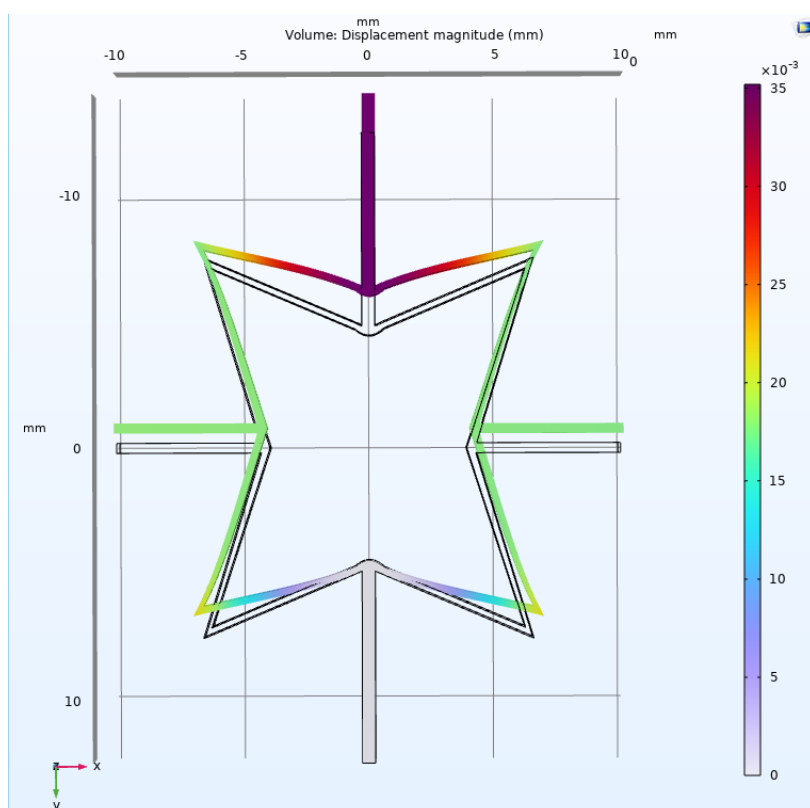
Πακτώνοντας το κάτω άκρο του αστεριού και ασκώντας εφελκυστική δύναμη 100N στο πάνω άκρο προέκυψαν οι συγκεκριμένες μεταβολές που παρουσιάστηκαν πιο κάτω για κάθε μικροδομή. Για την αστεροειδής μικροδομή για τάση, παραμόρφωση και μετατόπιση αντίστοιχα προέκυψαν τα εξής:



Εικόνα 4.3.9: Ανάλυση τάσης για το αστέρι.

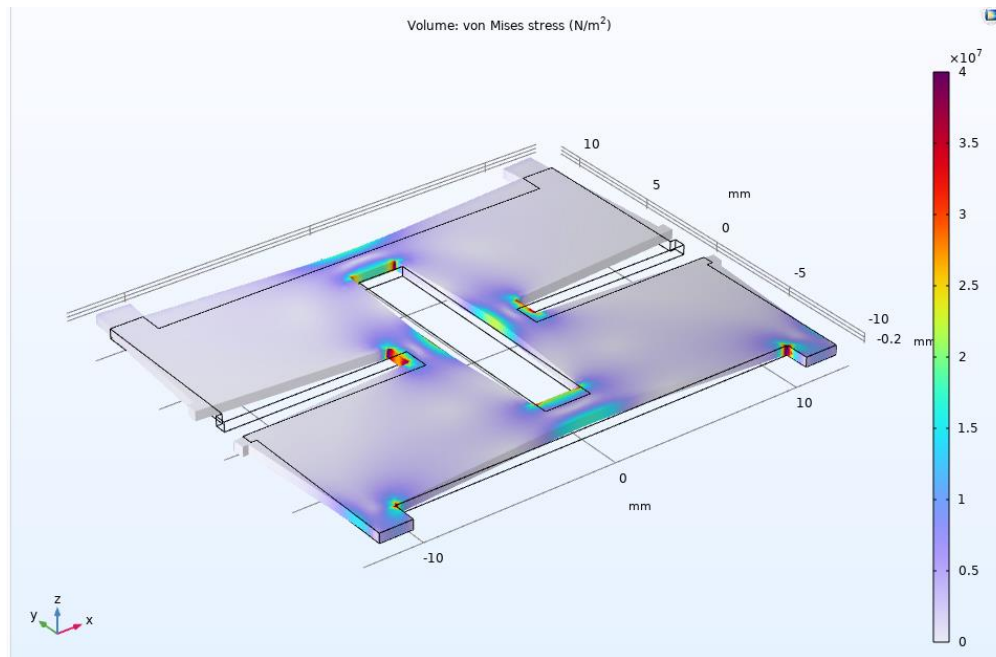


Εικόνα 4.3.10: Ανάλυση παραμόρφωσης για το αστέρι.

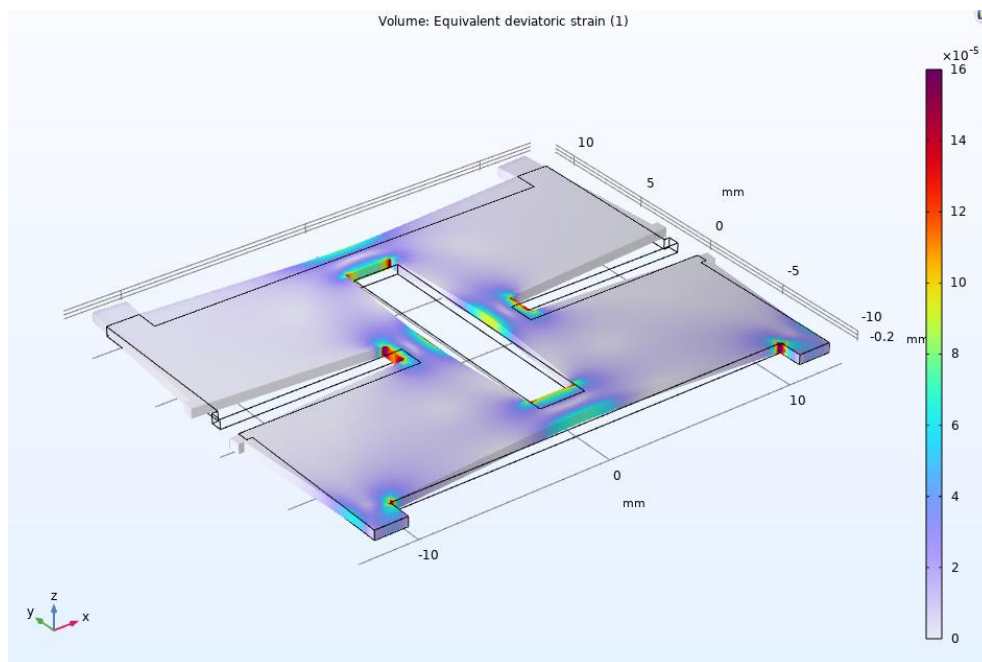


Εικόνα 4.3.11: Ανάλυση μετατόπισης για το αστέρι

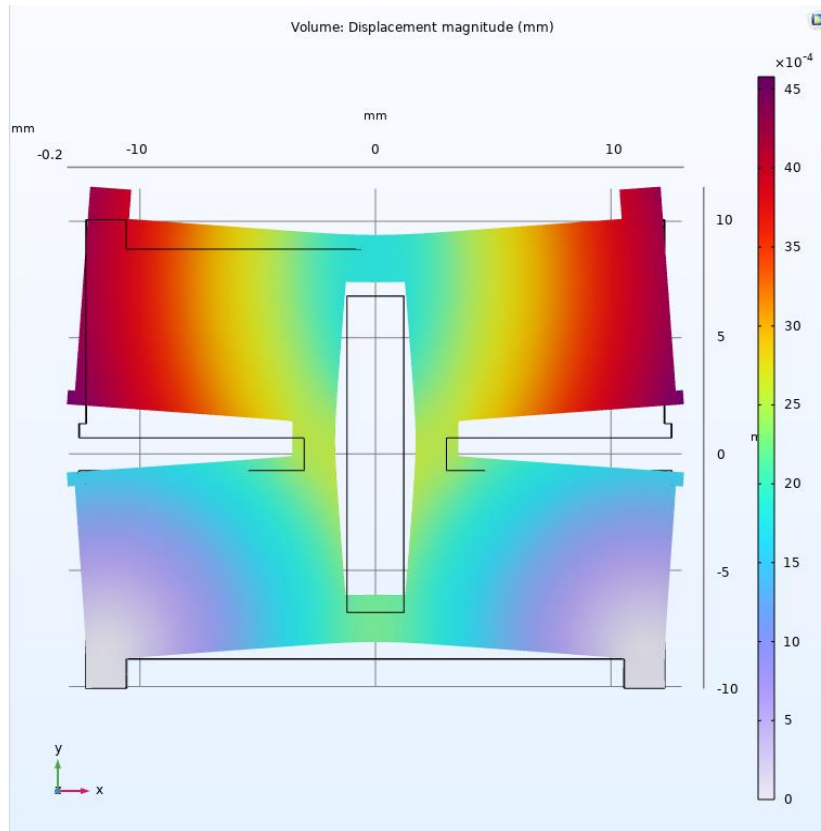
Πακτώνοντας όλο το κάτω άκρο της μικροδομής με εγχοπές και ασκώντας εφελκυστική δύναμη 100N σε όλο το πάνω άκρο προέκυψαν οι συγκεκριμένες μεταβολές που παρουσιάζονται πιο κάτω για την μικροδομή με εγχοπές αντίστοιχα :



Εικόνα 4.3.12: Ανάλυση τάσης για τις εγχοπές



Εικόνα 4.3.13: Ανάλυση παραμόρφωσης για τις εγχοπές.



Εικόνα 4.3.14: Ανάλυση μετατόπισης για τις εγκοπές.

Μετά τις αναλύσεις τάσης, παραμόρφωσης και μετατόπισης και με την χρήση της χρωματικής κλίμακας κατά τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω συμπεραίνουμε ότι:

- Για την αστεροειδής μικροδομή μεγαλύτερη καταπόνηση στη τάση και στην παραμόρφωση δέχονται όλες οι γωνίες του αστεριού και για την μετατόπιση το άκρο στο οποίο εφαρμόζεται η εφελκυστική δύναμη και οι 2 πάνω πλευρές του.
- Για την μικροδομή με εγκοπές, μεγαλύτερη καταπόνηση στη τάση και στην παραμόρφωση δέχονται όλες οι περιοχές κοντά στις γωνίες της κεντρικής οπής και οι εσωτερικές γωνίες στα 2 κάτω άκρα της και για την μετατόπιση ,το δεξί και αριστερό πάνω μέρος της.

Κεφάλαιο 5: Δυναμική μελέτη, Ιδιοτιμές και Ιδιομορφές

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε με την βοήθεια του λογισμικού COMSOL Multiphysics πως ανταποκρίνονται σε μια δοκό αλουμινίου διαστάσεων 170x20x2 mm με πιεζοηλεκτρικό επίθεμα στο πάνω αριστερό μέρος της διαστάσεων 25x20x0.5 mm τα εξής:

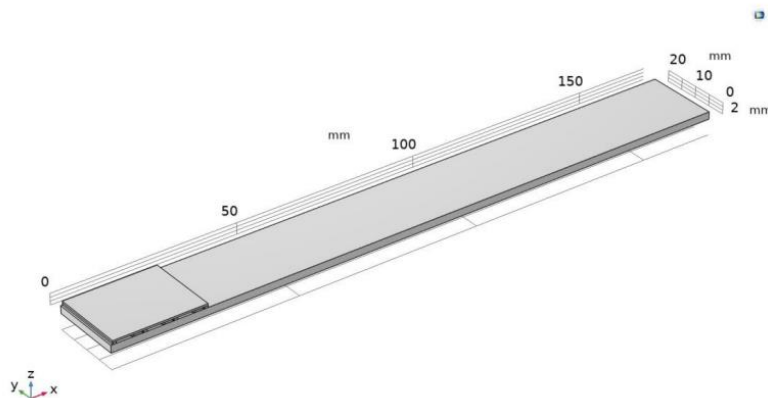
- **Περίπτωση 1:** Μια αστεροειδής μικροδομή διαστάσεων 25x20x0.5 mm.
- **Περίπτωση 2:** Μια μικροδομή με εγκοπές διαστάσεων 25x20x0.5 mm.
- **Περίπτωση 3:** Μια συστοιχία 9 ενωμένων αστεριών διαστάσεων 25x20x0.5 mm.
- **Περίπτωση 4:** Μια συστοιχία 4 ενωμένων εγκοπών διαστάσεων 25x20x0.5 mm.

Η συγκεκριμένη μελέτη έγινε με την σημαντική βοήθεια της Κυρίας Μαρίας Στέλλας Δαράκη και του Κυρίου Γεώργιου Σταυρουλάκη οι οποίοι μέσω των άρθρων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία παρείχαν τα δεδομένα τα οποία αξιοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη διπλωματική

Προτού παρουσιαστούν τα επιμέρους αποτελέσματα του συστήματος δοκός- μικροδομή-πιεζοηλεκτρικό επίθεμα να σημειωθεί ότι για τις 2 μικροδομές υπολογίστηκε ο λόγος Poisson από τις διαδοχικές μετατοπίσεις τους.

Βάσει των μέσων όρων των μετατοπίσεων στους άξονες x y z προέκυψε ότι ο λόγος Poisson για την αστεροειδής μικροδομή είναι **-0.05** και για την μικροδομή με εγκοπές **-0.09**. Συμπεραίνουμε λοιπόν τόσο αριθμητικά όσο και ποιοτικά όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι οι μικροδομές που σχεδιάσαμε παρουσιάζουν αυξητική συμπεριφορά.

Ως στοιχεία του συστήματος, το Μέτρο Ελαστικότητας E (Young Modulus) και η πυκνότητα ρ, βάσει του επιστημονικό άρθρο [30] για πολύ μικρό πάχος 0.5 mm έχουν αντίστοιχα τις τιμές **E=700Mpa** και **ρ= 188 kg/m³**.



Εικόνα 5.1: δοκός-μικροδομή-πιεζοηλεκτρικό επίθεμα

Στο πρόγραμμα προσομοίωσης εισάγεται το σύστημα δοκό - πιεζοηλεκτρικό επίθεμα με κάθε μια από τις 4 παραπάνω περιπτώσεις. Η ανάλυση έγινε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και όλο το σύστημα μελετήθηκε ως ένα ενιαίο σώμα. Αρχικά έγινε η ανάλυση ιδιομορφών του από την οποία προέκυψαν 6 ιδιοσυχνότητες συστήματος, τέσσερις καμπτικές και δύο στρωφικές για κάθε μία από τις 4 περιπτώσεις. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα εισαχθούν οι 4 καμπτικές οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν και

στις μετέπειτα αναλύσεις μας, έτσι για ανοιχτό κύκλωμα(open circuit) και για βραχυκύκλωμα (short circuit) αντίστοιχα έχουμε:

Περίπτωση 1:

Ανοιχτό Κύκλωμα	Βραχυκύκλωμα
63,334 Hz	63,178 Hz
381,59 Hz	380,88 Hz
1031,5 Hz	1030,3 Hz
1956,3 Hz	1955,7 Hz

Περίπτωση 2:

Ανοιχτό Κύκλωμα	Βραχυκύκλωμα
68,95 Hz	68,613 Hz
411,95 Hz	409,81 Hz
1096,4 Hz	1096,6 Hz
2035,8 Hz	2031,1 Hz

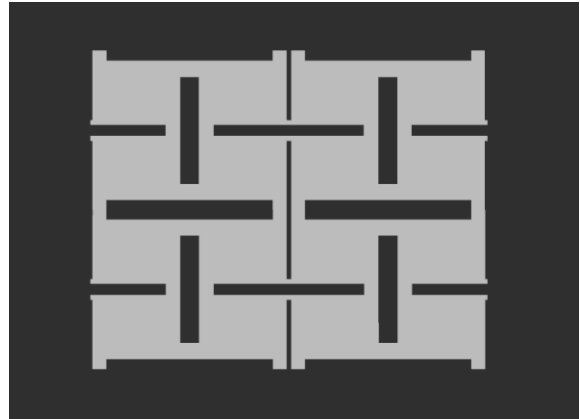
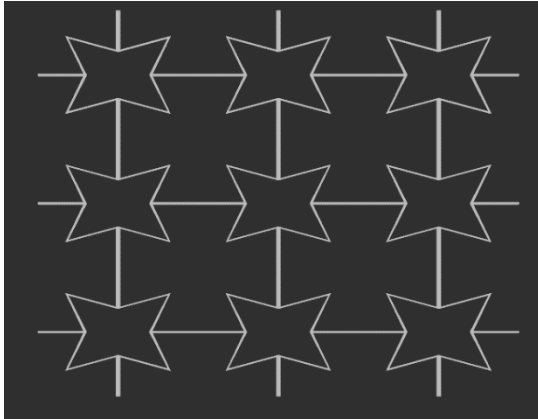
Περίπτωση 3:

Ανοιχτό Κύκλωμα	Βραχυκύκλωμα
65,698 Hz	65,393 Hz
392,65 Hz	391,06 Hz
1051,7 Hz	1048,9 Hz
1980,9 Hz	1979,2 Hz

Περίπτωση 4:

Ανοιχτό Κύκλωμα	Βραχυκύκλωμα
66,043 Hz	65,889 Hz
396,46 Hz	399,46 Hz
1073,1 Hz	1073,2 Hz
2045,9 Hz	2045,5 Hz

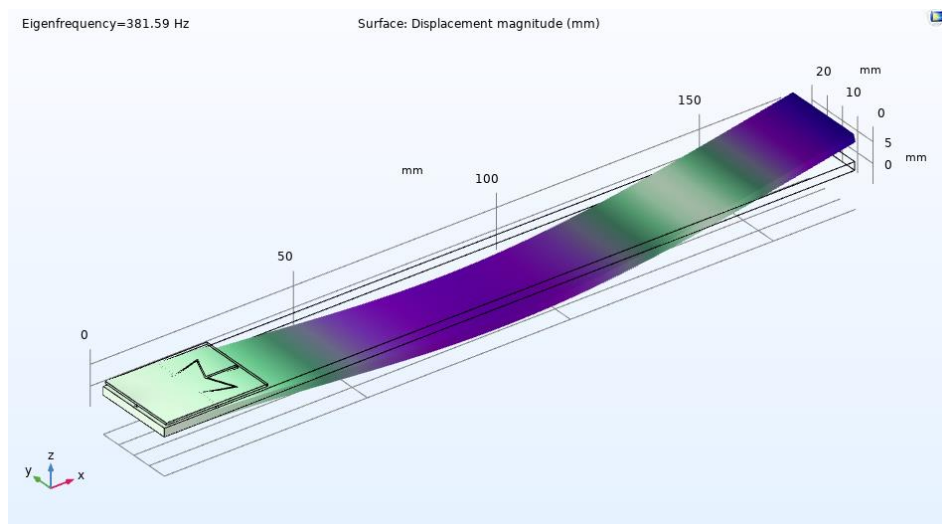
Λόγω αρκετών κοινών συνθηκών και στα δύο είδη κυκλωμάτων όπως η εφαρμοζόμενη δύναμη, οι συνοριακές συνθήκες και η μεγάλη ακρίβεια διακριτοποίησης μέσω πεπερασμένων στοιχείων, είναι αναμενόμενη αυτή η ομοιότητα που παρουσιάζουν οι ιδιοσυχνότητες κάθε μικροδομής σε ανοιχτό κύκλωμα και βραχυκύκλωμα.



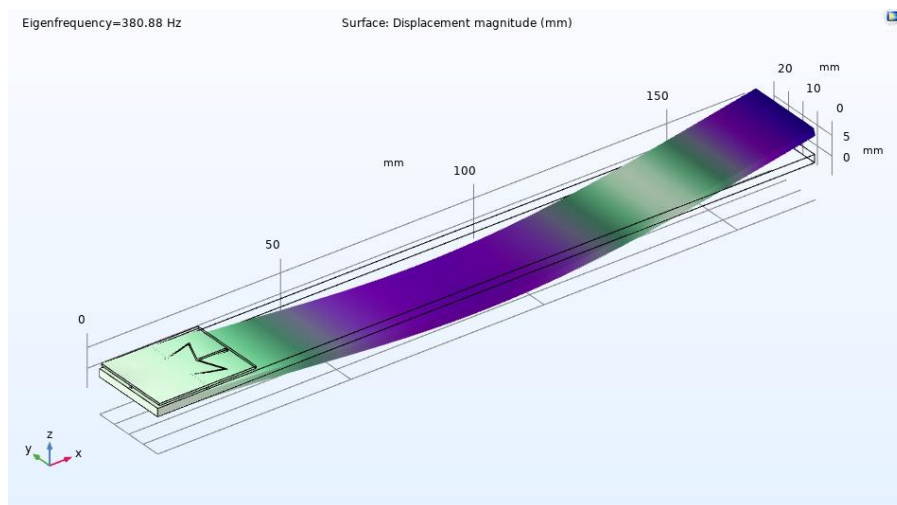
Προτού προχωρήσουμε στο γράφημα απόκρισης, θα παρουσιάσουμε και για τις 4 μικροδομές την ταλάντωση του συστήματος στην δεύτερη ιδιοσυχνότητα σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος.

Περίπτωση 1:

Ανοιχτό Κύκλωμα: 381,59 Hz

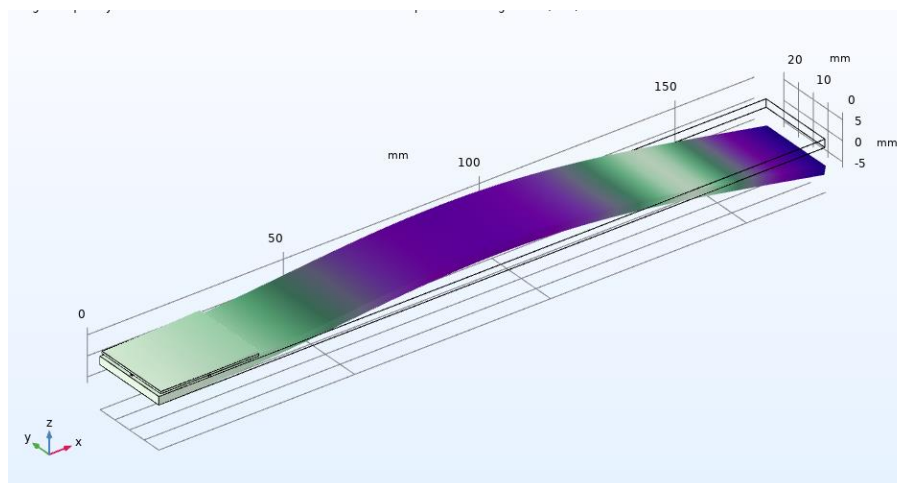


Βραχυκύκλωμα: 380,88 Hz

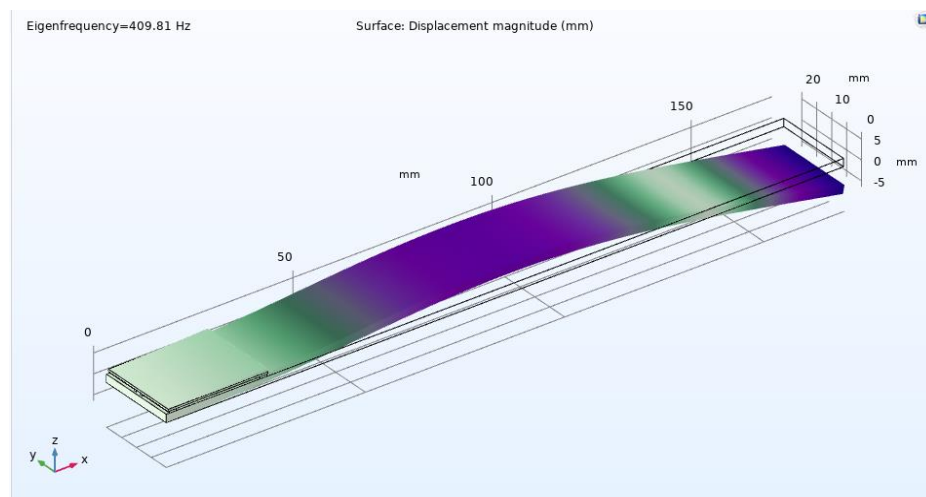


Περίπτωση 2:

Ανοιχτό Κύκλωμα: 411,95 Hz

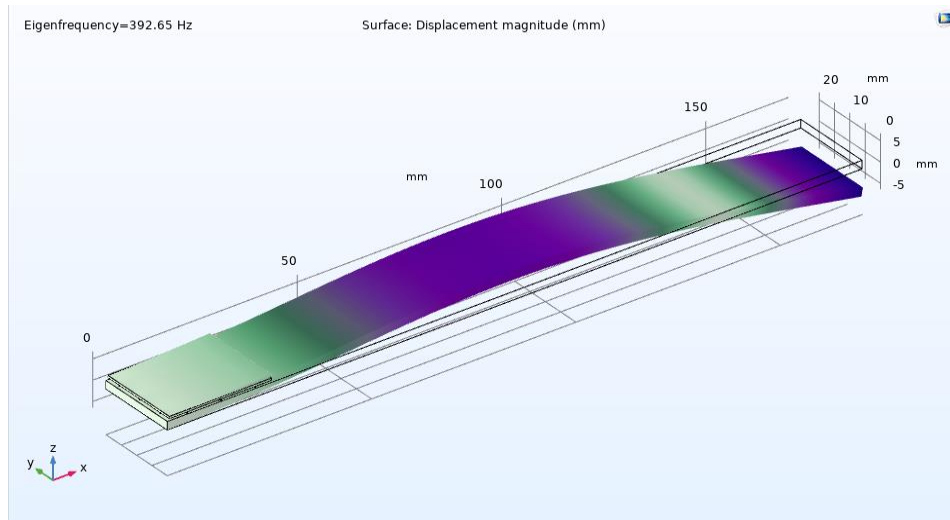


Βραχυκύκλωμα: 409,81 Hz

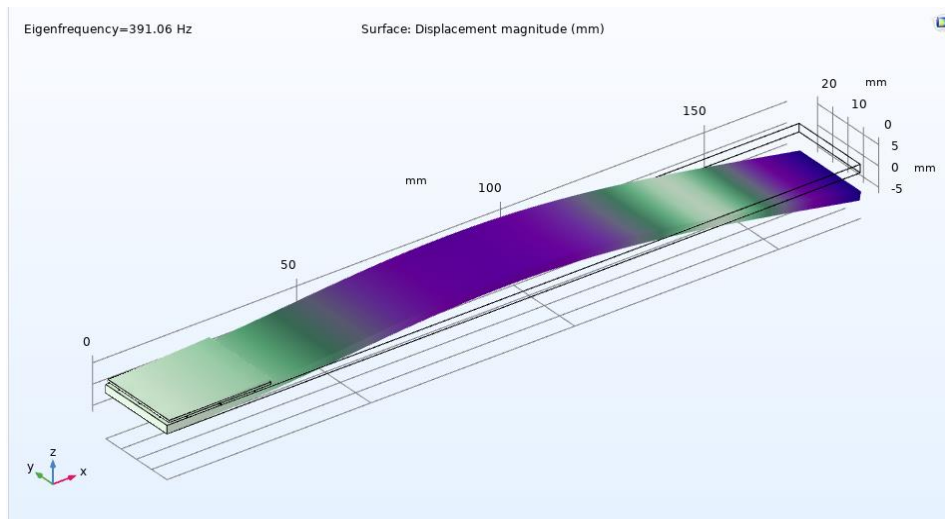


Περίπτωση 3:

Ανοιχτό Κύκλωμα: 392,65 Hz

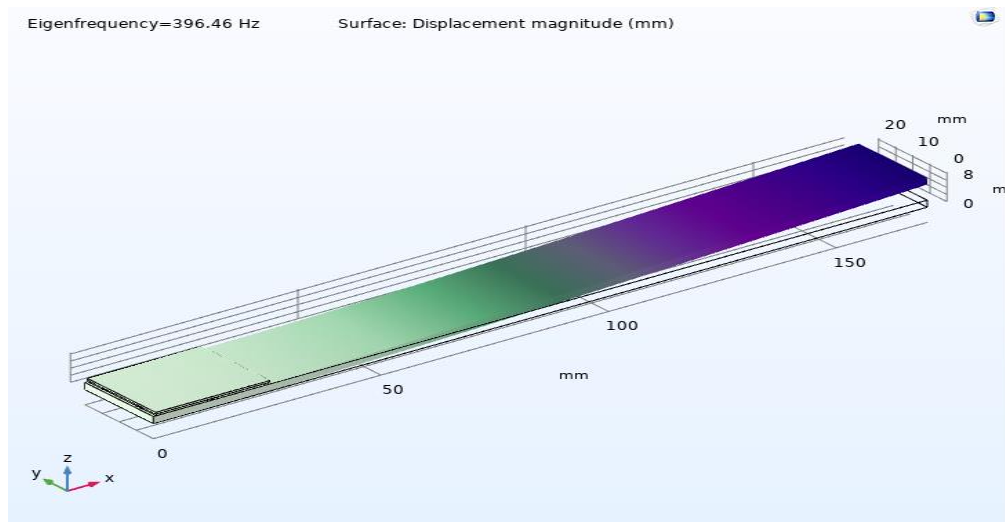


Βραχυκύκλωμα: 391,06

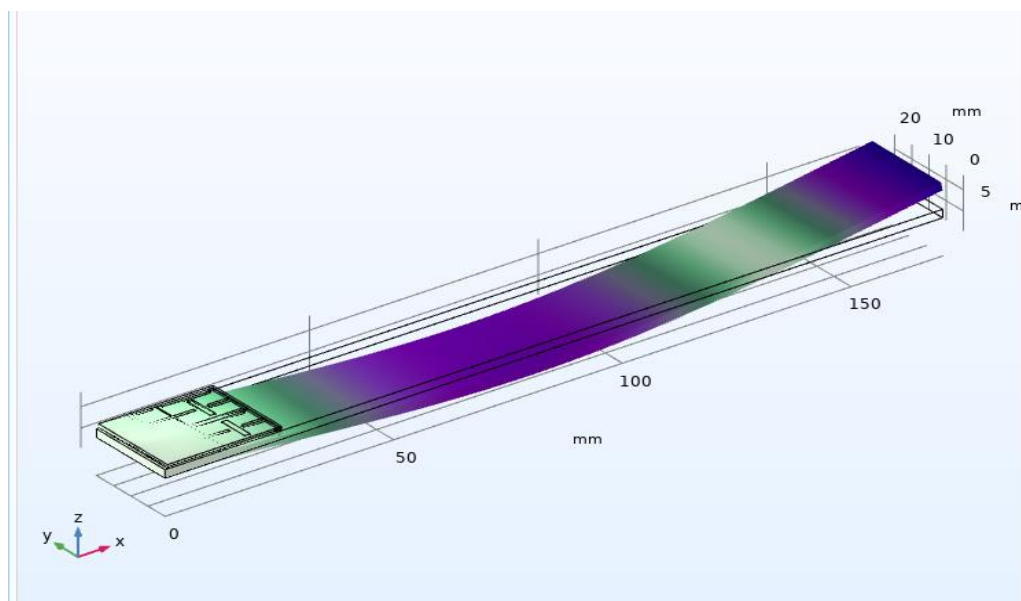


Περίπτωση 4:

Ανοιχτό Κύκλωμα: 396,46 Hz



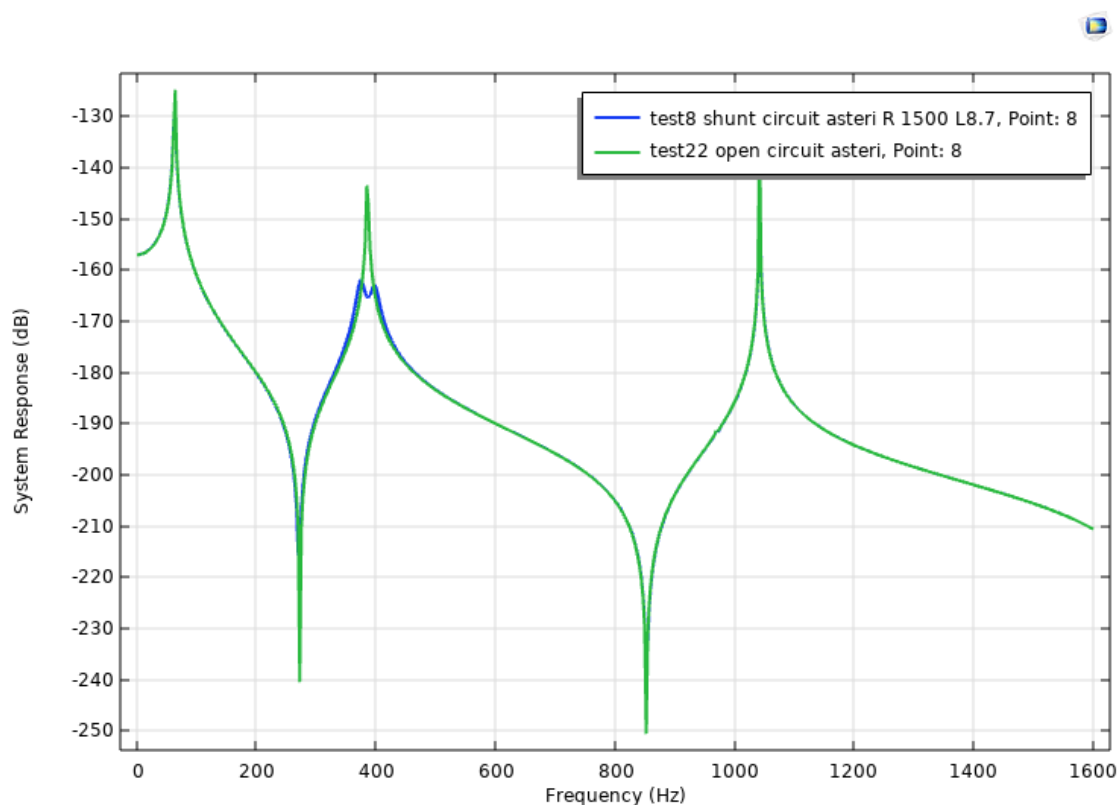
Βραχυκύκλωμα: 399,46 Hz



Κεφάλαιο 6: Γραφήματα απόκρισης σήματος εξόδου

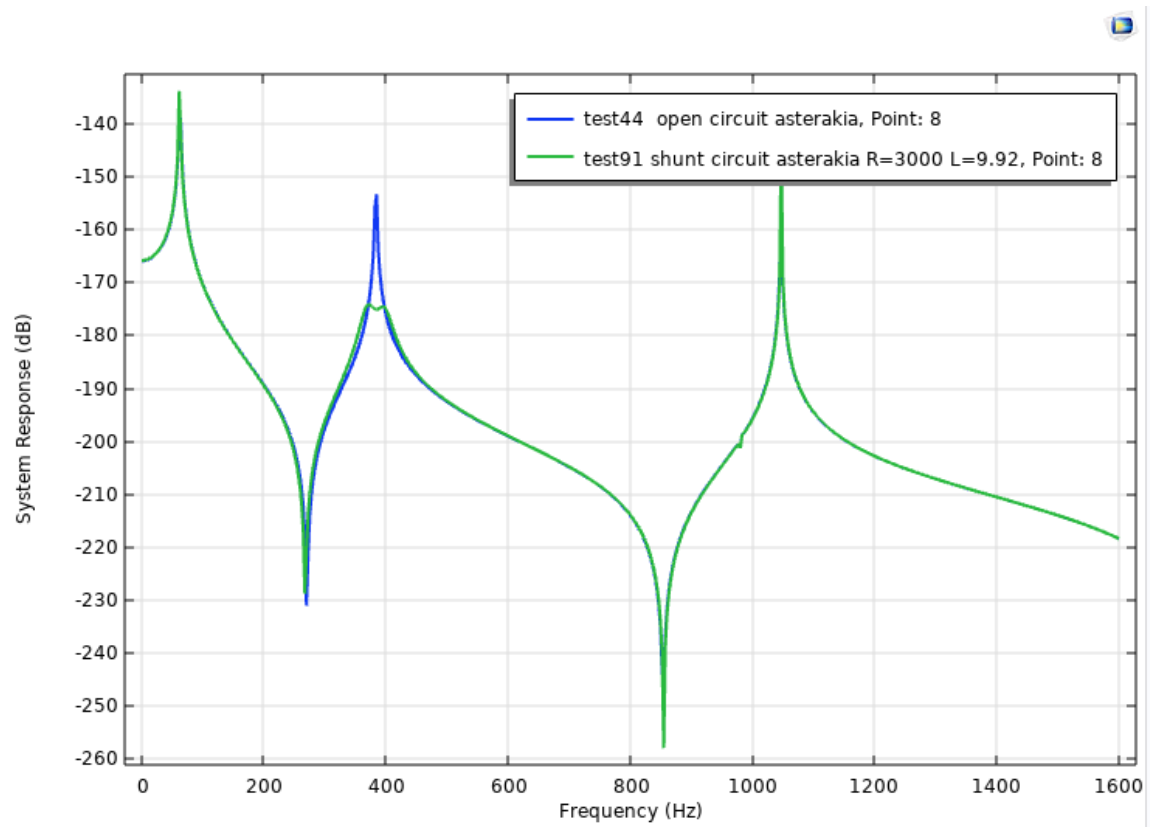
Για τις 4 περιπτώσεις που αναφέρθηκαν, εν συνεχεία μέσω του COMSOL Multyphysics και συγκεκριμένα μέσω της εργασίας 1 (Study 1: eigenfrequency domain) θα μελετήσουμε το γράφημα απόκρισης συχνότητας του σήματος εξόδου (FRF) για την απόσβεση της δεύτερης ιδιοσυχνότητας σε συνθήκες ανοιχτού και παραδιακλαδωμένου κυκλώματος. Αρχικά και για τις 4 μικροδομές, δημιουργήσαμε το γράφημα απόκρισης για συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, το οποίο περιλαμβάνει την δοκό, το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα και κάθε μία από τις 4 μικροδομές ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζουμε. Μετέπειτα δοκιμάζοντας διάφορους συνδυασμούς αντίστασης R πηνίου L καταφέραμε, μέσω του κατάλληλου αυτού ζευγαριού να αποσβέσουμε την δεύτερη ταλάντωση και για τις 4 περιπτώσεις.

Περίπτωση 1:



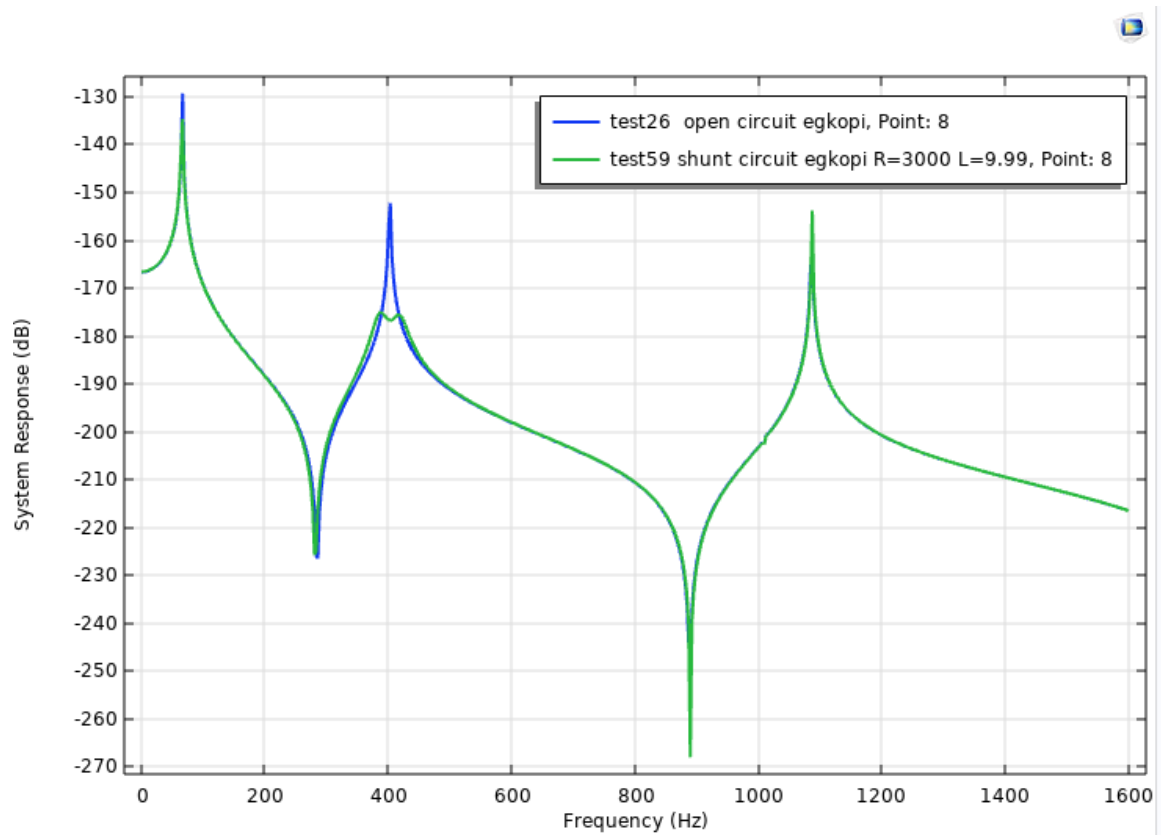
Εικόνα 6.1: γράφημα απόκρισης σήματος εξόδου για την 2^η ταλάντωση με χρήση αστεροειδούς μικροδομής.

Περίπτωση 2:



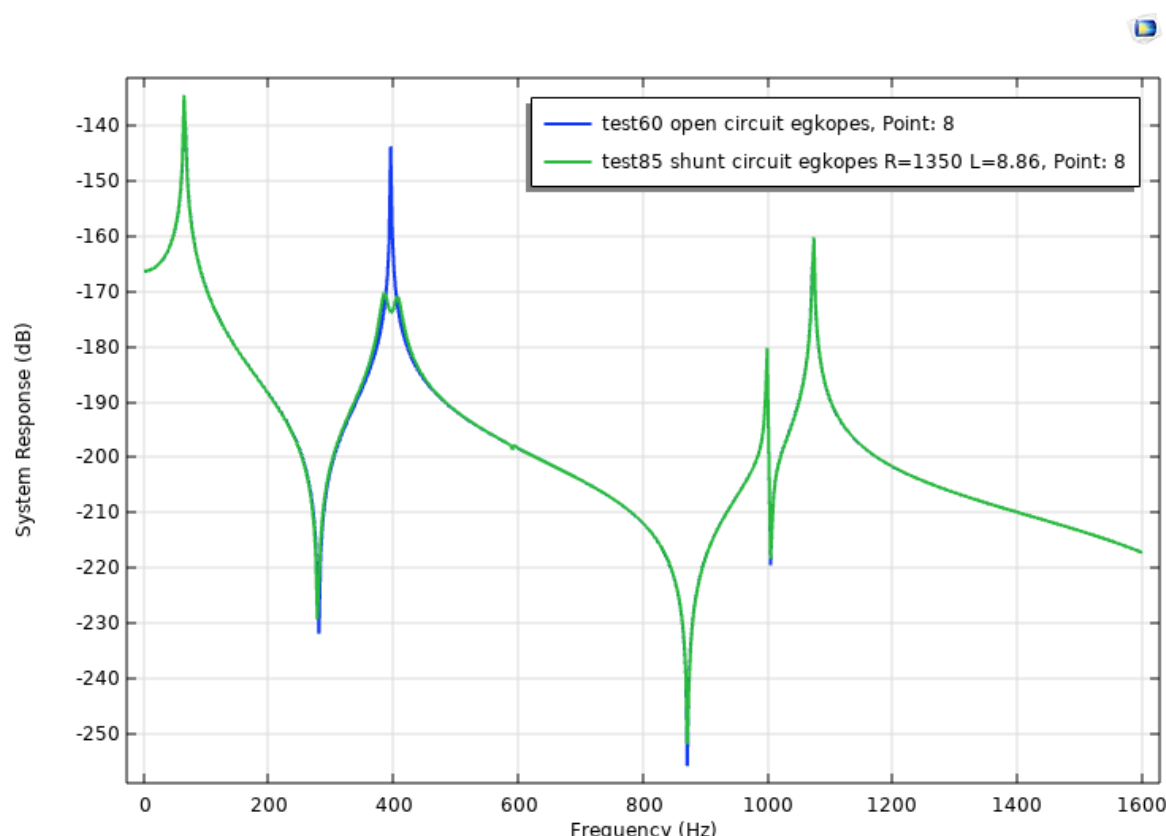
Εικόνα 6.2: γράφημα απόκρισης σήματος εξόδου για την 2^η ταλάντωση με χρήση μικροδομής με εγκοπές.

Περίπτωση 3:



Εικόνα 6.3: γράφημα απόκρισης σήματος εξόδου για την 2^η ταλάντωση με χρήση μικροδομής 9 αστεριών.

Περίπτωση 4:



Εικόνα 6.4: γράφημα απόκρισης σήματος εξόδου για την 2^η ταλάντωσης με χρήση μικροδομής 4 εγκοπών.

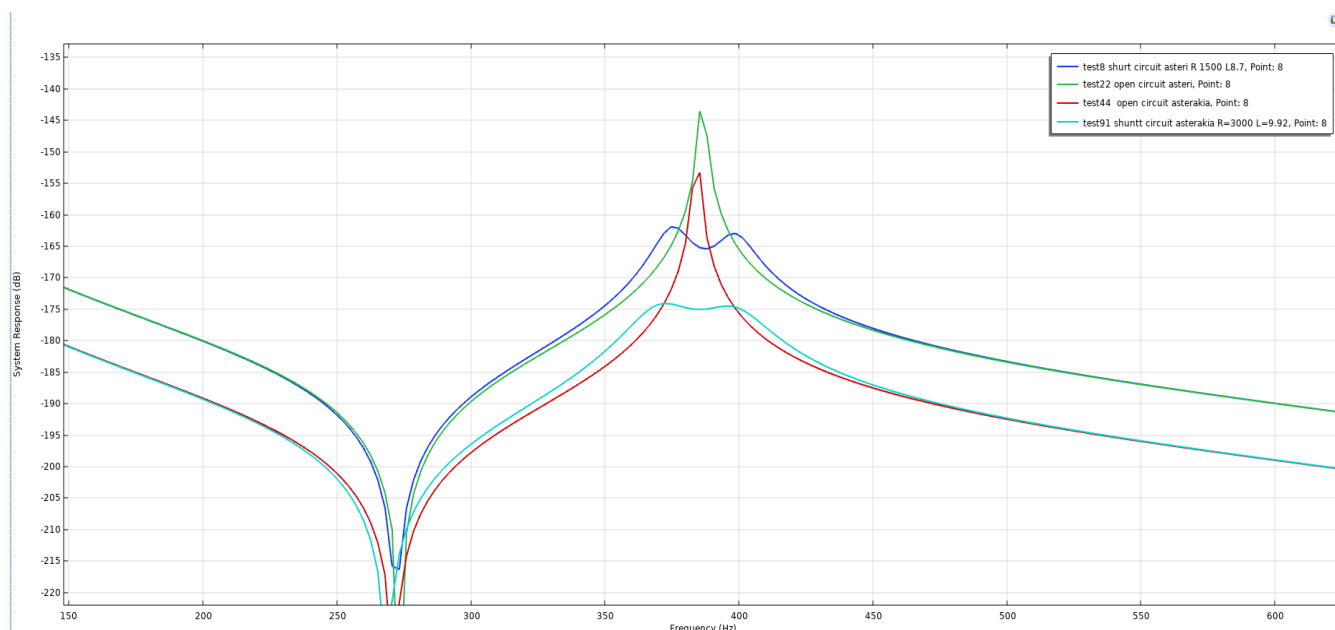
Οι συνδυασμοί λοιπόν που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- **Περίπτωση 1:** $R = 1500 \text{ Ohm}$ και $L = 8,7 \text{ H}$
- **Περίπτωση 2:** $R = 3000 \text{ Ohm}$ και $L = 9,9 \text{ H}$
- **Περίπτωση 3:** $R = 3000 \text{ Ohm}$ και $L = 9,92 \text{ H}$
- **Περίπτωση 4:** $R = 1350 \text{ Ohm}$ και $L = 8,86 \text{ H}$

Όπως φαίνεται και στις 4 περιπτώσεις με χρήση ενεργού παραδιακλαδωμένου κυκλώματος και ρυθμίζοντας κατάλληλα -ανάλογα την μικροδομή- τα στοιχεία αντίστασης R και πηνίο L μπορούμε να αποσβέσουμε ικανοποιητικά την δεύτερη ταλάντωση. Συγκεκριμένα υπάρχει διαφορά γύρω στα 30 dB και για τις 4 περιπτώσεις μεταξύ ανοιχτού και ενεργού κυκλώματος η οποία παρατηρείται μεταξύ των συχνοτήτων 380-410 Hz.

Παρατηρούμε ότι ανά 2 οι περιπτώσεις μοιάζουν στις τιμές του ζεύγους R - L παρότι αναφέρονται σε τελείως διαφορετικό σχήμα μικροδομής. Αυτό σημαίνει ότι η εγκοπή και τα 9 αστέρια χρειάστηκαν περισσότερη ενέργεια για την απόσβεση από ότι το αστέρι και οι 4 εγκοπές. Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται η σύγκριση των περιπτώσεων 1 και 3

και 2 και 4 προκειμένου μέσω της σύγκρισης αυτής να γίνει καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 6.5: γράφημα απόκρισης σήματος εξόδου για την 2^η ταλάντωσης με χρήση μικροδομών αστεριού και 9 αστεριών.

Η πράσινη και η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζουν τα γραφήματα για το ανοιχτό κύκλωμα του αστεριού και των 9 αστεριών αντίστοιχα ενώ η μπλε και η γαλάζια το αντίστοιχο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα. Θα μετρήσουμε την απόδοση των 2 μικροδομών για την απόσβεση της 2^{ης} ταλάντωσης με τον τύπο:

$$\text{απόδοση} = \frac{|\text{αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή}|}{|\text{αρχική τιμή}|} * 100\%$$

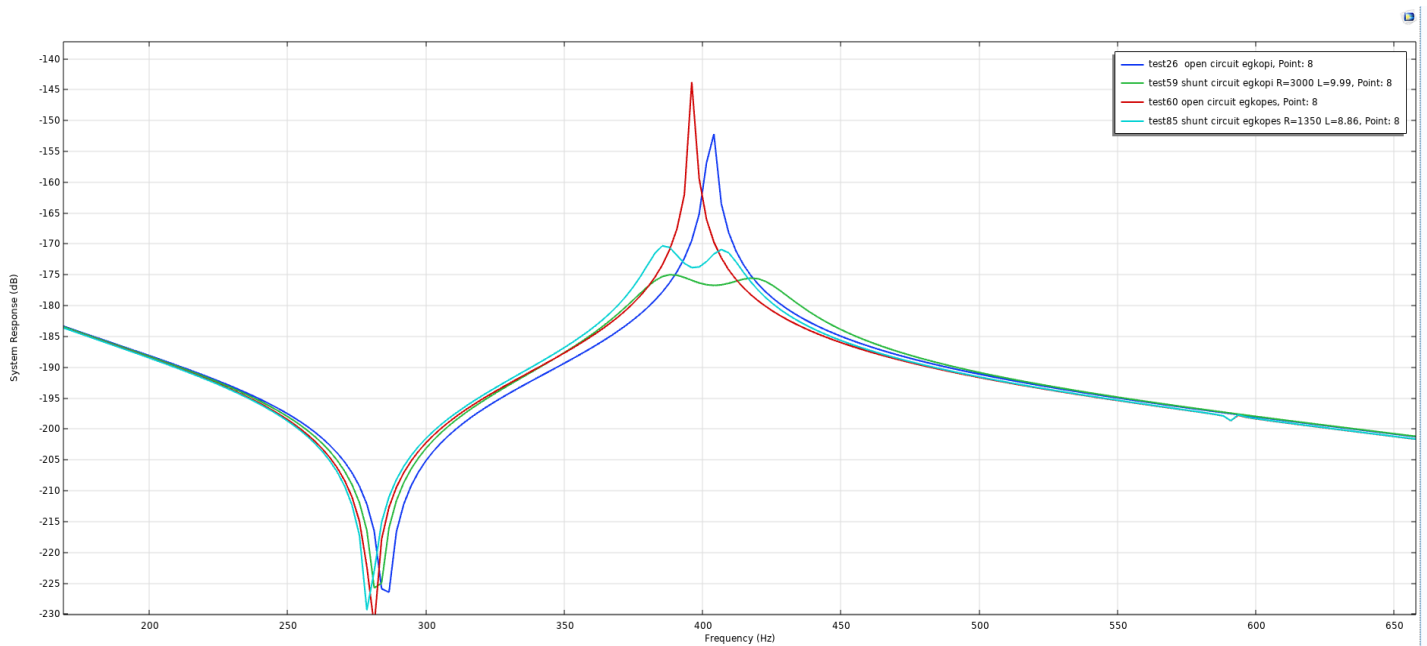
- Αστέρι :

$$\text{απόδοση} = \frac{|-144 - (-165)|}{|-144|} * 100\% = 14,58\%$$

- 9 αστέρια :

$$\text{απόδοση} = \frac{|-153 - (-175)|}{|-153|} * 100\% = 14,37\%$$

Ομοίως για την εγκοπή και τις 9 εγκοπές προκύπτει η εξής σύγκριση:



Εικόνα 6.6: γράφημα απόκρισης σήματος εξόδου για την 2^{ης} ταλάντωσης με χρήση μικροδομών εγκοπή και 4 εγκοπών.

Η μπλε και η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζουν τα γραφήματα για το ανοιχτό κύκλωμα της εγκοπής και των 4 εγκοπών αντίστοιχα ενώ η πράσινη και η γαλάζια το αντίστοιχο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα. Θα μετρήσουμε την απόδοση των 2 μικροδομών για την απόσβεση της 2^{ης} ταλάντωσης με τον παραπάνω τύπο:

- Εγκοπή:

$$\text{απόδοση} = \frac{|-144,5 - (-177)|}{|-144,5|} * 100\% = 22,49\%$$

- 4 εγκοπές:

$$\text{απόδοση} = \frac{|-147,5 - (-174)|}{|-147,5|} * 100\% = 17,96\%$$

Επομένως και οι 4 μικροδομές ενίσχυσαν και βελτίωσαν την απόσβεση της 2^{ης} ταλάντωσης της δοκού **με την μονή εγκοπή (Περίπτωση 2)** να επιτυγχάνει την καλύτερη συγκρίτικα απόδοση.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία εξετάσαμε την σύμπραξη πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και αυξητικής μικροδομής για την μείωση ταλαντώσεων. Αφού έγινε μια εισαγωγή στην έννοια της ταλάντωσης, του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και της αυξητικής μικροδομής, μελετήθηκαν 2 είδη μικροδομών -μία αστεροειδής και μία με εγκοπές- και 4 περιπτώσεις αλληλουχίας αυτών των μικροδομών.

Μέσω στατικής ανάλυσης, η οποία πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης ελέγχθηκε το κατά πόσο εμφανίζουν αυτές οι μικροδομές αυξητική συμπεριφορά (αρνητικός λόγος Poisson) και σε ποια σημεία παρουσιάζουν μικρότερη ή μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω της φόρτισής τους. Έτσι προτάθηκαν 2 ειδών δομές και 4 περιπτώσεις χρήσης τους, δηλαδή ένα μεμονωμένο αστέρι, μια μεμονωμένη εγκοπή, μια αλληλουχία 9 αστεριών και μια αλληλουχία 4 εγκοπών οι οποίες ανταποκρίθηκαν πλήρως στις απαιτήσεις της προσομοίωσης.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας μελετήθηκε η συμπεριφορά των μικροδομών που δημιουργήσαμε όταν τοποθετήθηκαν ανάμεσα σε μια δοκό αλουμινίου και ενός πιεζοηλεκτρικού επιθέματος PZT. Αποτέλεσμα αυτή της μελέτης, τόσο σε κλειστό όσο και σε ανοιχτό κύκλωμα ήταν ότι πράγματι η ταυτόχρονη παρουσία αυξητικής μικροδομής και πιεζοηλεκτρικού επιθέματος ενίσχυσε την απόσβεση της ταλάντωσης της δεύτερης ιδιομορφής της δοκού.

Το ζεύγος R-L για κάθε μικροδομή που αποσβένει την ταλάντωση είναι μια ένδειξη της αποτελεσματικότητας των μικροδομών. Συγκεκριμένα, μεγάλες τιμές R-L μπορεί να προσφέρουν ισχυρή απόσβεση των ταλαντώσεων, ειδικά σε υψηλές συχνότητες και μεγαλύτερη ενεργειακή αποθήκευση, που μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της ενέργειας ταλάντωσης για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Ενώ αντίθετα οι μικρές τιμές προσφέρουν μειωμένες απώλειες ενέργειας, που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση και την αποτελεσματικότητα του συστήματος, μικρότερο βάρος και μέγεθος, που μπορεί να είναι προτιμητέο σε φορητές εφαρμογές ή χώρους περιορισμένων διαστάσεων. Και οι 4 περιπτώσεις ανταποκρίθηκαν στη προσομοίωση και αφού τόσο οι μικρές όσο και οι μεγάλες τιμές R-L έχουν τα πλεονεκτήματα τους σημαντικό – σε επίπεδο εκτός της μοντελοποίησης -να επιλέγεται η μικροδομή ανάλογα την εργασία που έχουμε να επιτελέσουμε και σε συνδυασμό με τις άλλες συνθήκες.

Ένα επιπλέον βασικό κριτήριο της αποτελεσματικότητας τους είναι η μέτρηση της απόδοσής τους. Παρότι και οι 4 βελτίωσαν την απόκριση του σήματος με την παρουσία τους, η μονή εγκοπή είχε την μεγαλύτερη απόδοση και έπειτα οι 4 εγκοπές επομένως θα λέγαμε ότι η νέα αυτή μικροδομή που προτάθηκε υπό τις συνθήκες του μοντέλου μας παρέχει καλύτερα αποτελέσματα απόσβεσης από τη κλασσική αστεροειδής οι οποία έχει αναλυθεί σε αρκετές δημοσιεύσεις και εργασίες.

Συμπερασματικά λοιπόν, η παρούσα διπλωματική εργασία επιβεβαίωσε ότι η ύπαρξη αυξητικής μικροδομής ως ένα νέο στρώμα, είναι ικανή να συμβάλει στην περεταίρω εξασθένιση των ταλαντώσεων. Έτσι δημιουργείται μια νέα προοπτική στην χρήση αυξητικών μικροδομών η οποία θα αποτελέσει ένα νέο βήμα προς την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας μεταϋλικών και θα διευρύνει την χρήση τους σε δομικές κατασκευές.

Βιβλιογραφία

- [1]: Beards C. F. 'Engineering Vibration Analysis with Application to Control Systems' Edward Arnold 1995
- [2]: 'History of Piezoelectricity | PIEZO.COM'. <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity> (accessed Jun. 29,2022).
- [3]: Porfiri M, Maurini C, Pouget J. Identification of electromechanical modal parameters of linear piezoelectric structures. Smart Materials and Structures 2007
- [4]: Thomas O, Dè'u JF. Performance and optimization of piezoelectric shunts for vibration reduction. Journal of Sound and Vibration 2009
- [5]: M. Berardengo, A. Cigada, S. Manzoni and M. Vanali Vibration Control by Means of Piezoelectric Actuators Shunted with LR Impedances: Performance and Robustness Analysis 2015
- [6]: K. Marakakis, G. K. Tairidis, P. Koutsianitis, and G. E. Stavroulakis, 'Shunt Piezoelectric Systems for Noise and Vibration Control: A Review', Front. Built Environ., vol. 5, p. 64, May 2019, doi: 10.3389/fbuil.2019.00064
- [7]: R. G. Polcawich and J. S. Pulskamp, 'Chapter 5: Additive Processes for Piezoelectric Materials: Piezoelectric MEMS,' pp. 273–355 in MEMS Materials and Processes Handbook, Edited by R. Ghodssi and P. Lin. Springer, NY, 2011
- [8]: J. A. B. Gripp and D. A. Rade, 'Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review', Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 112, pp. 359–383, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.04.041
- [9]: L. R. Corr and W. W. Clark, 'A Novel Semi-Active Multi-Modal Vibration Control Law for a Piezoceramic Actuator', Journal of Vibration and Acoustics, vol. 125, no. 2, pp. 214–222, Apr. 2003, doi: 10.1115/1.1547682.
- [10]: Holzkamp, J. J. (1994). Multimodal passive vibration suppression with piezoelectric materials and resonant shunts. J Intel Mat Syst Str. 5, 49-57
- [11]: J. A. B. Gripp and D. A. Rade, 'Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review', Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 112, pp. 359–383, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.04.041
- [12]: J.-Y. Jeon, 'Passive acoustic radiation control for a vibrating panel with piezoelectric shunt damping circuit using particle swarm optimization algorithm', J Mech Sci Technol, vol. 23, no. 5, pp. 1446–1455, May 2009,
- [13]: IEEE Standard on Piezoelectricity', IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.1988.79638.
- [14]: Mirante Lorenzo (2015), "Auxetic structures: Towards bending-active architectural applications", Master Thesis, Icar/12 Tecnologia dell'architettura, Paoletti Ingrid
- [15]: B.R. Mace, E Manconi (2008) "Modelling wave propagation in two-dimensional structures using finite element analysis"
- [16]: L. Jianbao, W. Yue-Sheng, Z. Chuanzeng (2010) "Finite element method for analysis of band structures of 2D phononic crystals with archimedean-like tilings"

- [17]: W. Chen, X. Tian, R. Gao, S. Liu (2018) "Prediction of stable iron nitrides at ambient and high pressures with progressive formation of new polynitrogen species"
- [18]: W. Yifan, B. Ramirez, K. Carpenter, C. Naify, D. C. Hofmann, C. Daraio (2019) "Architected lattices with adaptive energy absorption"
- [19]: Xin Ren , Raj Das , Phuong Tran , Tuan Duc Ngo and Yi Min Xie, 'Auxetic metamaterials and structures : a review'
- [20]: M. Shirzad, A. Zolfagharian, M. Bodaghi, and S. Y. Nam, "Auxetic metamaterials for boneimplanted medical devices: Recent advances and new perspectives," *Eur. J. Mech. - ASolids*, vol. 98, p. 104905, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.euromechsol.2022.104905.
- [21]: M. F. Fardan, B. W. Lenggana, U. Ubaidillah, S.-B. Choi, D. D. Susilo, and S. Z. Khan, "Revolutionizing Prosthetic Design with Auxetic Metamaterials: A Review of Mechanical Properties and Limitations," *Engineering*, preprint, May 2023. doi: 10.20944/preprints202305.0146.v1.
- [22]: Gibson L J, Ashby M F, Schajer G S and Robertson C I 1982 The mechanics of two-dimensional cellular materials *Proc. R. Soc. A* 382 25–42
- [23]: Larsen U D, Sigmund O and Bouwstra S 1996 Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio *Micro Electro Mechanical Systems, 1996, MEMS '96, Proc. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems* vol 242 (Piscataway, NJ: IEEE) pp 365–71
- [24] : Schwerdtfeger J, Heini P, Singer R F and Körner C 2010 Auxetic cellular structures through selective electron-beam melting *Phys. Status Solidi b* 247 269–72
- [25]: Yang L, Harrysson O, West H and Cormier D 2015 Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing *Int. J. Solids Struct.* 69–70 475–90
- [26]: Li X, Lu Z, Yang Z and Yang C 2017 Directions dependence of the elastic properties of a 3D augmented re-entrant cellular structure *Mater. Des.* 134 151–62
- [27]: Grima J N, Oliveri L, Attard D, Ellul B, Gatt R, Cicala G and Recca G 2010 Hexagonal honeycombs with zero Poisson's ratios and enhanced stiffness *Adv. Eng. Mater.* 12 855–62
- [28]: Saxena K K, Das R and Calius E P 2016 Three decades of auxetics research—materials with negative Poisson's ratio: a review *Adv. Eng. Mater.* 18 201600053
- [29]: Poisson S D 1827 *Ann. Chim. Phys.* 36 384–5
- [30]: Novel 2D star-shaped honeycombs with enhanced effective Young's modulus and negative Poisson's ratio doi: 10.1016/j.eml.2020.101164

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Πέλλης Στέργιος ' PHYSIC LESSONS: ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ' Oct 2013.

Εικόνα 2.2: Κουτσιανίτης Παναγιώτης(2020), 'Σχεδιασμός μικροδομής ευφυών υλικών και κατασκευών με χρήση βελτιστοποίησης', Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμ. Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Διδακτορική διατριβή.

Εικόνα 2.3: Suvrajyoti Mishra, Lakshmi Unnikrishnan , Sanjay K. Nayak ,Smita Mohanty 'Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications: A Systematic Review' Nov 2018..

Εικόνα 2.4: Σφυράκη Λυδία (2018):' Διερεύνηση πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης σε κατασκευές'. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμ. Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Διπλωματική εργασία.

Εικόνα 3.1 : Novak N, Vesenjak M and Ren Z 2016 Auxetic cellular materials—a review *Strojniski Vestn./J. Mech. Eng.* 62 485–93.

Εικόνα 3.2: Alderson A 1999 A triumph of lateral thought *Chemistry & Industry* 17 May 1999 pp 384–91.

Εικόνα 3.3: Meng Chen, Heng Jiang, Han Zhang, Yuren Wang ' Design of an acoustic superlens using single-phase metamaterials with a star-shaped lattice structure' 2018.

Εικόνα 3.4: Yang L, Harrysson O, West H and Cormier D 2015 Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing *Int. J. Solids Struct.* 69–70 475–90 .

Εικόνα 3.5: Greaves G N, Greer A L, Lakes R S and Rouxel T 2011 Poisson's ratio and modern materials *Nat. Mater.* 10 823–3.