

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ (ΗΜΜΥ)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης πολλών ιδιομορφών

Επιμέλεια : Μαρίνα Ιωσηφίδου

Επιβλέπων καθηγητής : Σταυρακάκης Γεώργιος

Μέλη επιτροπής : Σταυρουλάκης Γεώργιος , Κανέλλος Φώτιος

ΧΑΝΙΑ

6/12/2020

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέποντα μου, καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρακάκη για την ανάθεση της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και για τη χρήσιμη καθοδήγηση του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή ΜΠΔ κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη, μέλος της τριμελούς επιτροπής, για την πολύ σημαντική βοήθειά του και επιστημονική του υποστήριξη, καθώς και τον Δρ. Γεώργιο Ταϊρίδη αλλά και τον Δρ. Παναγιώτη Κουτσιανίτη διδάκτορες του Πολυτεχνείου Κρήτης για την πολύτιμη βοήθεια τους, αλλά και για τον σημαντικό χρόνο που μου αφιέρωσαν για την επίλυση των αποριών μου ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Αναπλ. Καθηγητή ΗΜΜΥ κ. Φώτιο Κανέλλο, που δέχτηκε να είναι μέλος της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
1. Εισαγωγή.....	5
2. Πιεζοηλεκτρισμός.....	6
2.1 Ορισμός	6
2.2 Ιστορική Αναδρομή	6
2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά	7
2.4 Ευθύ και Αντίστροφο φαινόμενο	9
2.5 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών	11
2.6 Πιεζοηλεκτρισμός ως μέγεθος	13
2.7 Μαθηματικό μοντέλο	14
3. Πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης	15
3.1 Είδη κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης	16
3.2 Μέθοδος “Current-Block”	17
3.2.1 Υπολογισμός στοιχείων “Current-Block” κυκλώματος	20
3.3 Μέθοδος “Current-flow”	21
3.3.1 Υπολογισμός στοιχείων “Current-flow” κυκλώματος	22
4. Μοντελοποίηση και Αποτελέσματα	24
4.1 COMSOL Multiphysics	24
4.2 Σύστημα υπό μελέτη	25
4.3 Μια δοκός με δύο πιεζοηλεκτρικά	27
4.4 Μοντελοποίηση δοκαριού με δυο πιεζοηλεκτρικά	30
4.5 Απόκριση του συστήματος	36
4.6 Απόσβεση με “Current-flow” κύκλωμα.....	39
4.7 Απόσβεση με “Current-Block” κύκλωμα.....	41
4.8 Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων.....	43
4.8.1 Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος “Current-Block”	43
4.8.2 Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος “Current-flow”	45
4.9 Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων με αυξητικό υλικό	47
4.9.1 Μέθοδος “Current-Block” με αυξητικό υλικό	48
4.9.2 Μέθοδος “Current-flow” με αυξητικό υλικό	50
5. Μάστευση ενέργειας	52
6. Συμπεράσματα	54
Βιβλιογραφία.....	55

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η τεχνική παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών στοιχείων πολλών ιδιομορφών ως μέθοδος απόσβεσης για την καταστολή των ταλαντώσεων σε μια κατασκευή σύνθετης ευφυούς δοκού. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε ηλεκτρονικά στοιχεία (αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές) τα οποία λειτουργούν ως εμπέδηση. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια που παράγεται από τις ταλαντώσεις της κατασκευής μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και στη συνέχεια μεταφέρεται στο ηλεκτρονικό κύκλωμα όπου καταναλώνεται και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η απόσβεση. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η κατασκευή της δοκού με άνω και κάτω πιεζοηλεκτρικά επιθέματα θα μοντελοποιηθεί στο πρόγραμμα COMSOL Multiphysics και θα προσομοιωθεί σε επίπεδο ιδιομορφικής ανάλυσης. Για την μελέτη των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης πολλών ιδιομορφών, θα χρησιμοποιηθούν κυκλώματα ροής ρεύματος (current flow) και αποκοπής ρεύματος (current block). Στόχος είναι η σύγκριση των δύο αυτών τύπων κυκλωμάτων αλλά και η ανάλυση των αποτελεσμάτων ώστε να επιβεβαιωθεί η παραπάνω θεωρία.

Abstract

In the following thesis, we will analyze and study the techniques of the multi-mode resonant shunts as a method of damping, for the suppression of oscillations in a complex construction of smart beams. This method is based on electronic elements (resistors, inductors, and capacitors) that work as an impedance. Specifically, the energy that is produced from the oscillations of the device, is converted into electric energy through the piezoelectric elements is transferred to the electronic circuit, where it is consumed and as a result, vibration damping is achieved. In the present thesis, the construction of the beam with upper and lower piezoelectric patches will be modelled with the program COMSOL Multiphysics and will be simulated using modal analysis tools. For the study of the multi-mode resonant shunt, “Current-flow” and “Current-Block” circuits will be used. The objective is the comparison of the two different types of circuits but also the analysis of the results to confirm the aforementioned theory.

Εισαγωγή

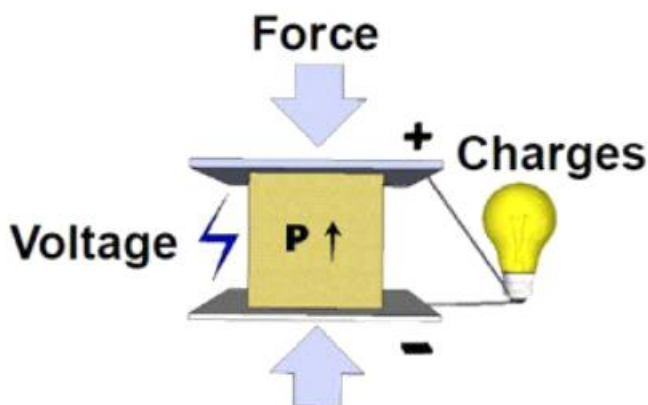
Χιλιάδες χρόνια τώρα ο άνθρωπος εκμεταλλευόταν νερό, αέρα αλλά και τον ήλιο για να πράξει ενέργεια. Ακόμα και σήμερα οι πιο γνωστές εναλλακτικές μορφές ενέργειας είναι αυτές που παράγονται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, νερόμυλους. Ενέργεια όμως παράγεται καθημερινά και από τον ίδιο τον άνθρωπο, από τις δραστηριότητες του, από τις κινήσεις του. Σήμερα προστίθεται και ένας άλλος εναλλακτικός τρόπος συλλογής και μετατροπής ενέργειας μέσω του πιεζοηλεκτρισμού.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά βρίσκουν πολλές εφαρμογές, όχι όμως μόνο στην μάζευση ενέργειας, αλλά κυρίως στις σύνθετες κατασκευές, καθώς χρησιμοποιούνται είτε ως αισθητήρες είτε ως διεγέρτες, είτε με εναλλασσόμενους ρόλους. Η ανάπτυξή τους στον τομέα αυτόν έχει να κάνει κυρίως με τον έλεγχο και την αίσθηση των ταλαντώσεων καθώς και με τη μείωση των κραδασμών.

Η ιδιότητα τους να μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική σε ευρύτερα φάσματα συχνότητας και θερμοκρασίας, εξηγεί τη χρήση τους σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

2.1 Ορισμός

Πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών (κυρίως κρυσταλλικών αλλά και μερικών κεραμικών), να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Επίσης, ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται, όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση



Εικόνα 1: Πιεζοηλεκτρισμός

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Πριν από αιώνες, σε περιοχές της Ινδίας και της Κεϋλάνης, είχε παρατηρηθεί ότι κάποια υλικά που βρίσκονταν ανάμεσα σε ζεστή στάχτη έλκυαν σωματίδια της στάχτης, ενώ λίγο αργότερα τα απωθούσαν. Τέτοια υλικά εμφανίστηκαν στην Ευρώπη γύρω στο 1703, όταν Ολλανδοί έμποροι τα έφεραν από τις Ασιατικές χώρες. Πολλά χρόνια το 1880 μετά οι αδερφοί Jacques και Pierre Curie ανακάλυψαν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, οι οποίοι παρατήρησαν ότι υποβάλλοντας σε μηχανική πίεση συγκεκριμένα κρυσταλλικά υλικά, αυτά πολώνονται ηλεκτρικά και ο βαθμός πόλωσης είναι ανάλογος με την εφαρμοσμένη πίεση (ευθύ φαινόμενο). Ένα χρόνο αργότερα ο Lippmann πρόβλεψε την ύπαρξη του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου [Lippmann 1881] βασιζόμενος σε θερμοδυναμικές μελέτες κάτι που επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους αδερφούς Curie τον ίδιο χρόνο.

Από την αρχική ανακάλυψη των αδελφών Κιουρί (Curies) χρειάστηκαν περισσότερα από εβδομήντα χρόνια προτού χρησιμοποιηθεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε βιομηχανικές μετρητικές εφαρμογές.

2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα σε κρυστάλλους που δεν έχουν κέντρο συμμετρίας. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τα επιμέρους μόρια. Κάθε ένα έχει μια πολικότητα καθώς το ένα άκρο του είναι περισσότερο αρνητικά φορτισμένο, δηλαδή είναι συσσωρευμένα σε αυτό περισσότερα ηλεκτρόνια. Το άλλο άκρο είναι θετικά φορτισμένο και έτσι δημιουργείται ένα δίπολο. Σε έναν πολυκρύσταλλο συγκροτούνται διαφορετικές περιοχές πολικότητας, οι περιοχές Weiss, και η κατανομή της συνολικής πολικότητας είναι αντισυμμετρική. Αυτή ακριβώς η έλλειψη συμμετρίας είναι η βασική αιτία εκπόρευσης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Σε μονοκρυσταλλικά υλικά στα οποία υπάρχει κέντρο συμμετρίας δεν μπορεί να προκύψει το φαινόμενο αυτό.[1]

ΦΥΣΙΚΟΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ
1. Χαλαζίας
2. Σακζαρόζη
3. Berlinite (AlPO_4)
4. Τοπάζι
5. Sodium pottasium
6. Τουρμαλίνη
7. Lead Titanate (PbTiO_3)

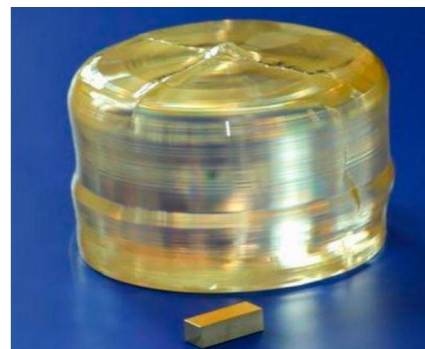
Πίνακας 1: Φυσικοί κρύσταλλοι.



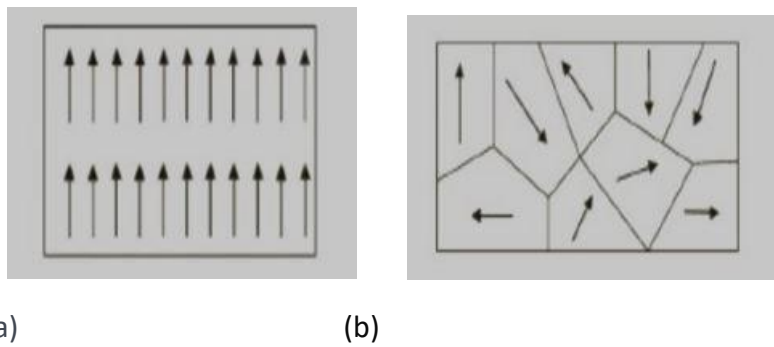
Εικόνα 2: Χαλαζία.

ΣΥΝΘΕΤΟΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ
1. Lanthanum gallium silicate
2. Gallium phosphate
3. Lithium niobate
4. Lithium tantalate

Πίνακας 2: Σύνθετοι κρύσταλλοι

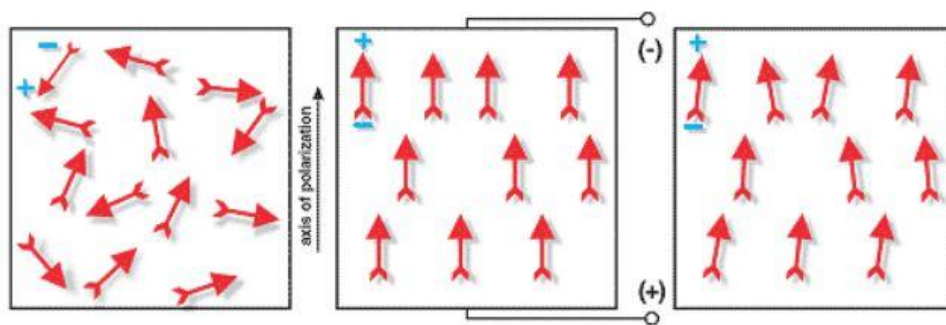


Εικόνα 3: Lithium niobate.



Εικόνα 4: Πολικότητα σε τυχαία κατάσταση ενός μονοκρυστάλλου (a) κι ενός πολυκρυστάλλου (b)

Προκειμένου να παραχθεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ένα πολυκρυσταλλικό υλικό θερμαίνεται υπό την επίδραση ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Η θερμότητα επιτρέπει την αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων και επιβάλλει σταδιακά ενιαία διεύθυνση για όλα τα δίπολα. Η διαίρεση σε περιοχές με διαφορετική πολικότητα παύει πλέον να υφίσταται και προκύπτει μια ενιαία περιοχή πολικότητας.[2]



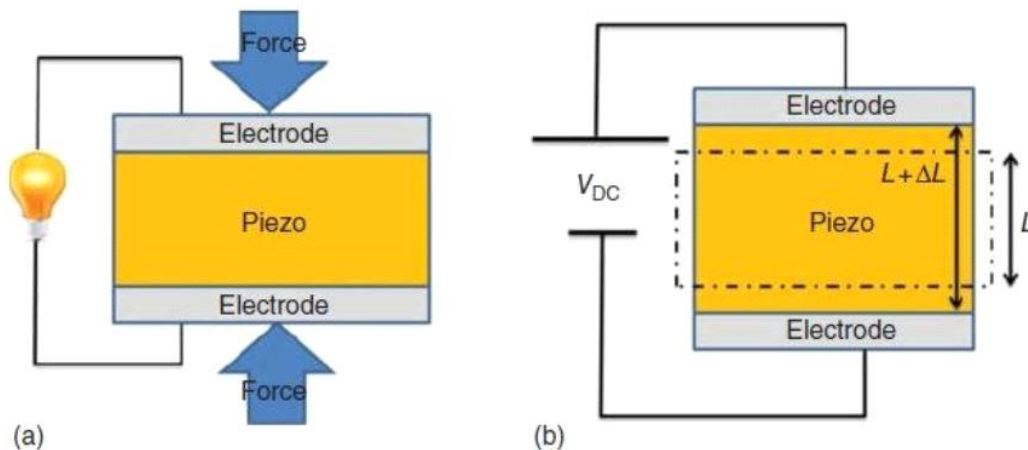
Εικόνα 5: Πόλωση μετά από θέρμανση του πολυκρυστάλλου

Υπάρχουν αρκετά υλικά που παρουσιάζουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και είτε προέρχονται από τη φύση είτε είναι τεχνητά. Οι πιο διαδομένοι κρύσταλλοι είναι ο χαλαζίας, το άλας Rochelle και ο τουρμαλίνης. Σήμερα τα πολυκρυσταλλικά κεραμικά σαν το BaTiO_3 και PZT, ανήκουν στα περισσότερο χρησιμοποιούμενα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Αυτό συμβαίνει λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής και των σχεδόν αυθαίρετων πιθανών μορφών που μπορούν να πάρουν, σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά πιεζοηλεκτρικά υλικά. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα υλικά έχουν

πολύ καλές πιεζοηλεκτρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμα στο πεδίο των πιεζοηλεκτρικών διεγερτών.

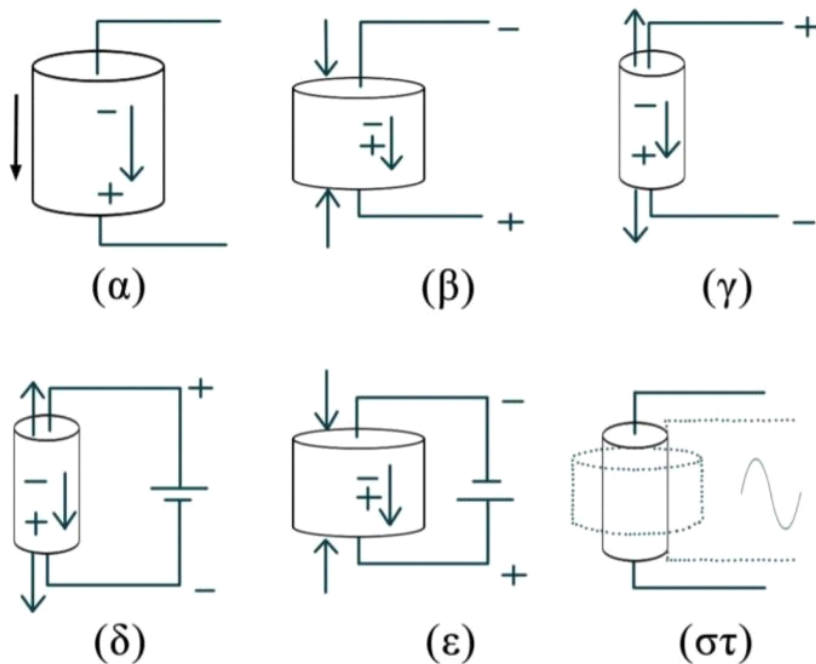
2.4 Ευθύ και αντίστροφο φαινόμενο

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ως τμήματα δομής σύνθετων κατασκευών μπορούν να λειτουργούν ως αισθητήρες (sensors) σύμφωνα με το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ή ως διεγέρτες (actuators), κάτι το οποίο περιγράφει το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Για να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι, ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό παράγει ηλεκτρικό ρεύμα όταν υποστεί μια μηχανική πίεση. Αντίστροφα προκύπτει μια μηχανική παραμόρφωση σε ένα τέτοιο υλικό όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο σε αυτό. Επιπλέον την χρήση τους ως αισθητήρες και διεγέρτες την δικαιολογεί ένα ακόμα χαρακτηριστικό το πυροηλεκτρικό φαινόμενο. Κατά το φαινόμενο αυτό, το πιεζοηλεκτρικό υλικό αποκρίνεται στις μεταβολές της θερμοκρασίας αναπτύσσοντας επιπλέον ηλεκτρικό φορτίο και ηλεκτρικό δυναμικό στην πιεζοηλεκτρική στρώση.



Εικόνα 6: Ευθύ φαινόμενο (α), Αντίστροφο φαινόμενο (β)

Παρακάτω παραθέτουμε μια εικόνα με τις πιθανές αντιδράσεις που μπορεί να έχει να έχει ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος ανάλογα με τη δράση που θα του επιβληθεί.



Εικόνα 7: Συμπεριφορά πιεζοηλεκτρικού υλικού σε διαφορετικά ερεθίσματα

Η εικόνα (α) δείχνει ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό προτού αυτό υποστεί κάποια δύναμη ή εφαρμοστεί ρεύμα. Αν το υλικό συμπιεστεί (b), τότε μια τάση ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης θα εμφανιστεί μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αν το υλικό επιμηκυνθεί (c) εμφανίζεται τάση ανάστροφη ως προς την πόλωση. Αντίστροφα αν εφαρμοστεί τάση το υλικό θα παραμορφωθεί. Μια τάση ανάστροφης πόλωσης ως προς την τάση πόλωσης θα προκαλέσει διαστολή του υλικού (d). Αντίθετα μια τάση ίδιας πολικότητας προκαλεί συστολή-συμπίεση (e) του υλικού. Αν εφαρμοστεί ένα εναλλασσόμενο σήμα τότε το υλικό θα δονείται σύμφωνα με την συχνότητα του σήματος (f). Δηλαδή για κάθε χρονική στιγμή το σώμα θα συστέλλεται ή θα διαστέλλεται ανάλογα προς την πολικότητα της τάσης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.[3]

2.5 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών

Η πολλαπλή λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι η αιτία του αυξημένου ενδιαφέροντος που επιδεικνύεται για αυτά την τελευταία 15ετία. Με την τοποθέτησή τους ως τμήματα δομικών στοιχείων σε ελαφρές κατασκευές, δίνεται η δυνατότητα στην κατασκευή να αντιλαμβάνεται εντατικές καταστάσεις, μέσω της λειτουργίας τους ως αισθητήρες, και να μεταβάλλει τη συμπεριφορά της ανάλογα με την εφαρμογή, μέσω της δράσης τους ως διεγέρτες. Η κατασκευή γίνεται δηλαδή αυτοπροσαρμοζόμενη ή αλλιώς "ευφυής". Πέρα από όμως από την χρήση τους σε "ευφυής" κατασκευές ο πιεζοηλεκτρισμός επεκτείνεται σε πάρα πολλές εφαρμογές και δεδομένης της ταχύτητας ανάπτυξης αυτών, στο μέλλον η χρήση του θα είναι ακόμη πιο διευρυμένη.

Μερικές χρήσεις του πιεζοηλεκτρισμού σήμερα είναι οι εξής:

1. Μετατροπείς ήχου
2. Ελεγκτές συχνοτήτων
3. Έλεγχος και συλλογή ενέργειας
4. Έλεγχος , αίσθηση και μείωση δονήσεων σε δομές
5. Αισθητήρες επιτάχυνσης και γυροσκόπια
6. Ταλαντωτές ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Αξίζει να σημειωθούν και τα παρακάτω παραδείγματα χρήσης πιεζοηλεκτρικών για τον έλεγχο και συλλογή ενέργειας.

1. Στο Ισραήλ γίνεται έρευνα έτσι ώστε χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά υλικά κάτω από το οδόστρωμα να μπορούν να μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό την ενέργεια από τα διερχόμενα αυτοκίνητα, πιέζοντάς το. Σύμφωνα με τον Αμπράμοβιτς καθηγητής του Πανεπιστημίου Technion της Χάιφας η ιδέα είναι ότι το στρώμα της ασφάλτου θα είναι διπλό και η «γέμιση» θα περιέχει ένα μίγμα από χαλαζία, άλατα, πιεζοηλεκτρικά μέταλλα και συσσωρευτές τα οποία θα συσσωρεύουν και θα μετατρέπουν την μηχανική πίεση επι της ασφάλτου σε ηλεκτρική ενέργεια. Ήδη έχουν τοποθετηθεί σε τμήμα δρόμου του Ισραήλ το οποίο πρόκειται να επεκταθεί σε μήκος ενός χιλιομέτρου και θα παράγουν περίπου 200 κιλοβατώρες για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας.[21]



Εικόνα 8: Τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών πλακών στο οδόστρωμα στο Ισραήλ

2. Μια ακόμα εφαρμογή υπάρχει σε μια αλυσίδα σούπερ μάρκετ Sainbary's στην Μεγάλη Βρετανία η οποία βρήκε τον τρόπο να εξασφαλίζει την ενέργεια για τη λειτουργία των ταμειακών της μηχανών από τους ίδιους τους πελάτες της. Μέσω μιας εγκατάστασης έχουν ενσωματώσει στο έδαφος τις πλάκες, πάνω από τις οποίες περνούν τα οχήματα, πιέζοντάς τις. Η πίεση αυτή ενεργοποιεί ένα υπόγειο υδραυλικό σύστημα το οποίο με τη σειρά του ενεργοποιεί τους ηλεκτροκινητήρες που βρίσκονται ακριβώς από κάτω, παράγοντας τελικά γύρω στα 30 KW/ώρα. Με αυτό λειτουργούν οι ταμιακές μηχανές του.[19]



Εικόνα 9: Πιεζοηλεκτρική εγκατάσταση στην είσοδο σούπερ μάρκετ στην Βρετανία.

3. Με την ίδια λογική στο Sustainable Dance Club στην Ολλανδία, κατασκευάστηκε πίστα χορού που χρησιμοποιεί την ενέργεια που παράγουν οι άνθρωποι που χορεύουν και το μετατρέπει σε ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα και με τον μηχανικό Eric van Duin της εγκατάστασης καθώς οι άνθρωποι χορεύουν στη πίστα πιέζουν το πάτωμα τόσο λίγο το οποίο χαμηλώνει περίπου μόνο 10 χιλιοστά και αυτό είναι αρκετό ώστε η μηχανική ενέργεια που παράγεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της εγκατάστασης και να ενεργοποιήσει την γεννήτρια, η οποία στη συνέχεια παράγει και αυτή ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο χρησιμοποιούν τα συστήματα ήχου, φώτων κ.ά. [20]

4. Αρκετή ενέργεια δαπανάται στη σύγχρονη εποχή για τη θέρμανση του νερού. Για τον λόγο αυτό, ομάδα επιστημόνων και σχεδιαστών από το Μεξικό, τη Φινλανδία και τη Γερμανία ανέπτυξαν στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Georgia στις Ηνωμένες Πολιτείες, το λεγόμενο «πιεζο-ντουζ». Πρόκειται για μια «συσκευή» που διαθέτει πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία παράγουν ηλεκτρισμό από το τρεχούμενο νερό που πέφτει πάνω τους. Η ιδέα βασίζεται στη νανοτεχνολογία και πιο συγκεκριμένα σε ένα κύκλωμα πιεζοηλεκτρικών νανοσυρμάτων, τα οποία έχουν την ιδιότητα να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν βρεθούν υπό μηχανική τάση η οποία με τη σειρά της προκαλείται από τη ροή του νερού. Για την μεγιστοποίηση της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με το νερό και να καταστήσουν το σύστημα πιο αποτελεσματικό, οι σχεδιαστές κατέληξαν σε ένα μοντέλο όπου το σώμα του ντους περιλαμβάνει διακλαδώσεις που θυμίζουν το κυκλοφορικό σύστημα του ανθρώπου, τόσο μακροσκοπικά, όσο και σε επίπεδο μικροδομής [22]. Ωστόσο, προς το παρόν υπάρχουν αρκετές επιφυλάξεις από την επιστημονική κοινότητα για τις δυνατότητες αυτόνομης θέρμανσης του νερού από ένα τέτοιο σύστημα.

2.6 Πιεζοηλεκτρισμός ως μέγεθος

Θεωρούμε μια πιεζοηλεκτρική κατασκευή που καταλαμβάνει ένα πεδίο Ωp στην ισορροπία. Η κατασκευή υπόκειται σε μια προκαθορισμένη μετατόπιση Ud , σε ένα κομμάτι Γu και σε μια προκαθορισμένη δύναμη επιφάνειας πυκνότητας t_{id} στο συμπληρωματικό μέρος Γt του εξωτερικού ορίου. Οι ηλεκτρικές οριακές συνθήκες καθορίζονται από ένα προκαθορισμένο ηλεκτρικό δυναμικό Ψd στο $\Gamma \psi$ και μια πυκνότητα επιφάνειας χωρίς ηλεκτρικές φορτίσεις $q d$ στο υπόλοιπο μέρος Γq . Επομένως το συνολικό όριο κατασκευής που ορίζουμε ως Ωp ισούται με $d\Omega p = \Gamma u \cup \Gamma t = \Gamma \psi \cup \Gamma q$ με $\Gamma u \cup \Gamma t = \Gamma \psi \cap \Gamma q = \emptyset$. Επιπροσθέτως το Ωp υπόκειται σε προδιαγεγραμμένες δυνάμεις και φυσικά θα παρουσιαστούν στη κατασκευή μας τα μεγέθη της τάσης και παραμόρφωσης. Επίσης λόγω της ύπαρξης ηλεκτρικού δυναμικού θα παρουσιαστεί και το ηλεκτρικό πεδίο

2.7 Μαθηματικό Μοντέλο

Υπό συνθήκες ασθενούς πεδίου, οι καταστατικές εξισώσεις για ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι (Σχέσεις 2.1-2.2)

$$D_i = e_{ij}^{\sigma} E_j + d_{im}^d \sigma_m \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_k = d_{jk}^c E_j + s_{km}^E \sigma_m \quad (2.2)$$

που γράφονται σε μορφή πινάκων (Σχέση 2.3) :

$$\begin{bmatrix} D \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\sigma} & d^d \\ d^c & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ \sigma \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Όπου το διάνυσμα D μεγέθους (3×1) είναι η ηλεκτρική μετατόπιση (Coulomb/m²), ε είναι το διάνυσμα τάνυσης (6×1) - (αδιάστατο), E είναι το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο (3×1) (Volt/m) και το σ_m είναι το διάνυσμα πίεσης ανά μονάδα επιφάνειας (stress vector) (6×1) (N/m²). Οι πιεζοηλεκτρικές σταθερές είναι η διηλεκτρική επιτρεπτότητα e_{ij}^{σ} μεγέθους (3×3) (Farad/m), οι πιεζοηλεκτρικοί συντελεστές d_{im}^d (3×6) και d_{jk}^c (6×3) (Coulomb/N ή m/Coulomb) και η ελαστική παραμόρφωση μεγέθους s_{km}^E (6×6) (m²/N). Ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής d_{jk}^c (m/Volt) προσδιορίζει την τάνυση ανά μονάδα πεδίου σε σταθερή καταπόνηση και ο d_{im}^d (Coulomb/N) προσδιορίζει την ηλεκτρική μετατόπιση ανά μονάδα δύναμης σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο. Οι δείκτες c και d έχουν προστεθεί για να διαφοροποιείται το ευθύ από το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, αν και στην πράξη είναι αριθμητικά ίσοι. Οι δείκτες σ και E υποδεικνύουν ότι το μέγεθος μετράται υπό σταθερή δύναμη και σταθερό ηλεκτρικό πεδίο αντίστοιχα. [4]

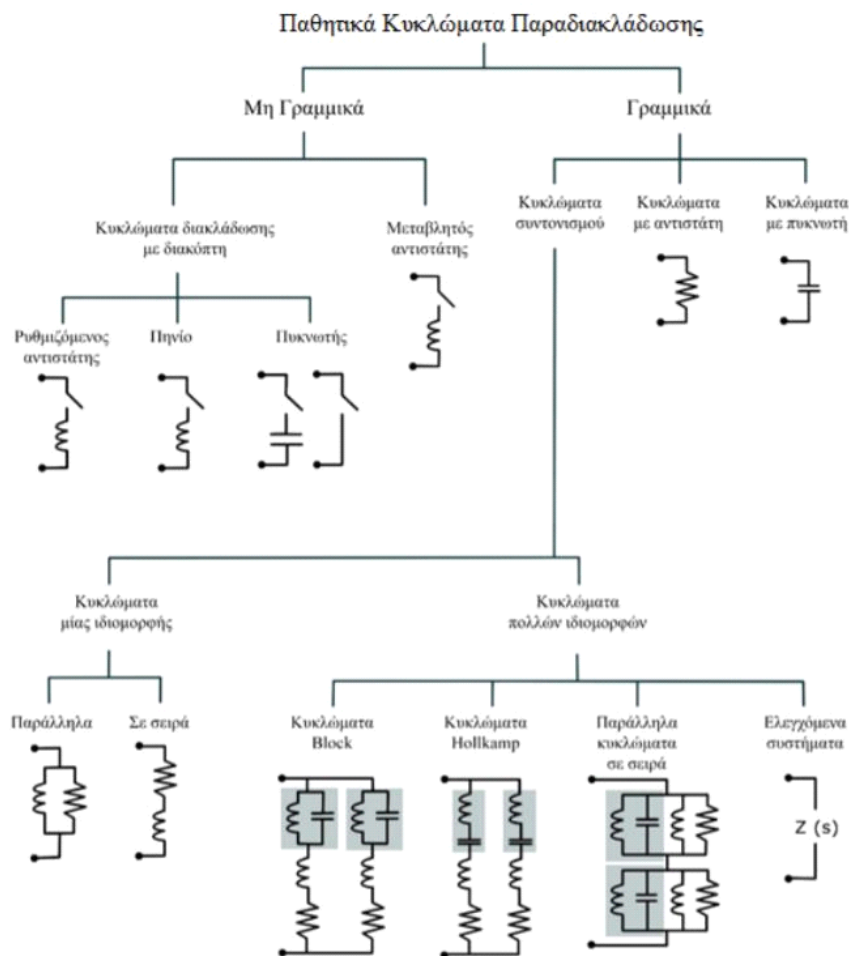
3. Πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης

Η απόσβεση μέσω πιεζοηλεκτρικής διακλάδωσης είναι μια δημοφιλής μέθοδος για την απορρόφηση των κραδασμών σε ελαστικές κατασκευές. Η τεχνική χαρακτηρίζεται από τη σύνδεση ενός ημι-παθητικού ηλεκτρικού κυκλώματος με ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα που βρίσκεται μονολιθικά τοποθετημένο σε μια ταλαντούμενη κατασκευή. Με τον όρο παθητικό ηλεκτρικό κύκλωμα εννοούμε εκείνο το κύκλωμα που αποτελείται μόνο από παθητικά στοιχεία, δηλαδή αντιστάτες, πηνία, πυκνωτές, διόδους. Σε αυτή την τεχνική το δίκτυο, μαζί με τη χωρητικότητα που εμπεριέχεται στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, συντονίζεται στην ιδιοσυχνότητα που πρέπει να αποσβεστεί. Μια συγκεκριμένη κατηγορία, οι αποκαλούμενες παραδιακλαδώσεις συντονισμού είναι κυκλώματα απόσβεσης συντονισμού ταλαντώσεων με χρήση πηνίων, πυκνωτών και αντιστάσεων. Είναι απλά σχεδιασμένα κυκλώματα που μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τις δυνατότητες απόσβεσης των εύκαμπτων ελαστικών κατασκευών. Ένα αρνητικό στοιχείο της στρατηγικής συντονισμού (resonant shunt strategy) είναι αφενός ότι απαιτούν υψηλές τιμές επαγωγής και αφετέρου ότι οι μικρές διαφορές στις τιμές επαγωγής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της απόδοσης του συστήματος.

Με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων και κυκλωμάτων απόσβεσης μπορούν να εφαρμοστούν αποσβέσεις μιας ιδιομορφής, για τη μείωση των κραδασμών σε διάφορα δομικά στοιχεία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρειάζονται τόσοι μετατροπείς όσες είναι και οι ιδιομορφές που απαιτείται να αποσβεστούν. Ωστόσο η λύση αυτή δεν είναι πρακτική καθώς σε πολλές εφαρμογές καθιστά αδύνατη την χρήση μεγάλου αριθμού πιεζοηλεκτρικών εάν απαιτείται απόσβεση μεγάλου αριθμού ιδιομορφών. Για παράδειγμα στην περίπτωση της αεροδιαστημικής δεν μπορεί να εφαρμοστεί αυτή η λύση καθώς οι κατασκευές πρέπει να είναι ελαφριές. Πολλές φορές ο αριθμός των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων που μπορούν να εγκατασταθούν σε μια κατασκευή περιορίζεται από τις φυσικές της διαστάσεις. Όμως ακόμα, και αν υπάρχει ο χώρος σε μια κατασκευή οι δομικές της ιδιότητες μπορεί να αλλάξουν με την προσθήκη μεγάλου αριθμού επιθεμάτων.[5]

3.1 Είδη κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης

Τα παθητικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης διακρίνονται στα μη γραμμικά και τα γραμμικά. Τα μη γραμμικά κατηγοριοποιούνται στα κυκλώματα διακλάδωσης με διακόπτη και σε αυτά με μεταβλητό αντιστάτη. Στα κυκλώματα με διακόπτη ανήκουν μάλιστα ο ρυθμιζόμενος αντιστάτης, το πηνίο και ο πυκνωτής. Αντίθετα, τα γραμμικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης αποτελούνται από τα κυκλώματα συντονισμού, τα κυκλώματα με αντιστάτη και τα κυκλώματα με πυκνωτή. Τα κυκλώματα με αντίσταση και τα κυκλώματα με πυκνωτή. Τα κυκλώματα συντονισμού κατηγοριοποιούνται τα κυκλώματα μιας ιδιομορφής και σε αυτά πολλών ιδιομορφών. Τα πρώτα χωρίζονται σε παράλληλα κυκλώματα και σε κυκλώματα εν σειρά, ενώ τα κυκλώματα συντονισμού με τις πολλές ιδιομορφές σε κυκλώματα Block, κυκλώματα Hollkamp, Flow, παράλληλα κυκλώματα σε σειρά και σε ελεγχόμενα συστήματα. [6] Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται όλα τα παραπάνω κυκλώματα.



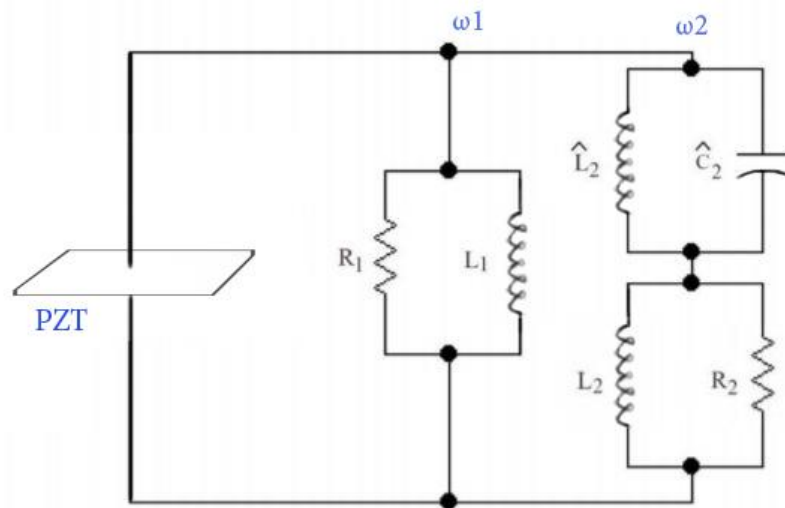
Εικόνα 10: Κατηγορίες διάφορων κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης

Στη παρούσα διπλωματική θα εξετάσουμε τη χρήση δύο τύπων παθητικών γραμμικών κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης τύπου πολλαπλών ιδιομορφών του Current-block και Current-flow.

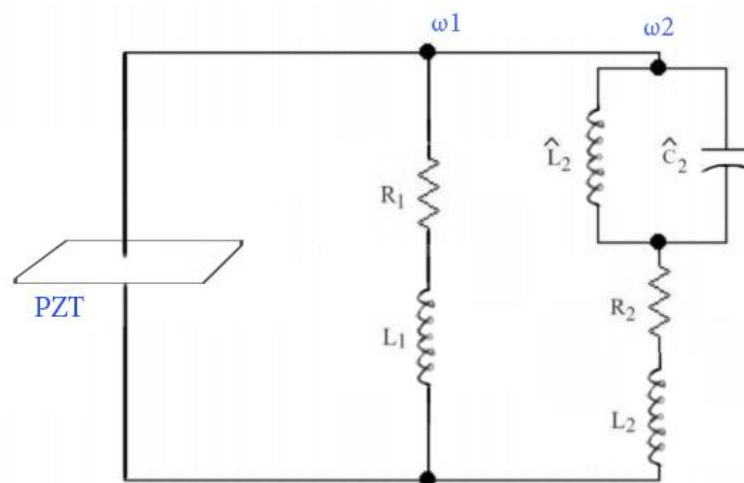
3.2 Μέθοδος “Current-Block”

Η επινόηση της μεθόδου Current-Block για την απόσβεση πολλών ιδιομορφών ταυτόχρονα ήταν μια πρακτική επιλογή, καθώς υπάρχει μόνο μια περιορισμένη ποσότητα επιφάνειας πάνω στην οποία μπορούν τα τοποθετηθούν οι μορφοτροπείς αφού με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται μόνο ένας ενιαίος πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας.

Οι πρώτες τεχνικές πολλαπλών λειτουργιών προτάθηκαν από τον Wu και τους συνεργάτες του [7,8,9]. Η ιδέα τους είναι η εισαγωγή κυκλωμάτων περιορισμού σε σειρά με κάθε ζευγάρι αντίστασης-πηνίου (RL). Τα ζευγάρια R-L, μπορεί να είναι συνδεδεμένα είτε παράλληλα (Εικόνα 11) είτε σε σειρά (Εικόνα 12) και είναι ρυθμισμένα κατάλληλα, ώστε κάθε ένα να αποσβένει μια συγκεκριμένη ιδιοσυχνότητα. Κάθε κύκλωμα έχει τόσα R-L ζευγάρια όσα και οι ιδιομορφές που θέλει να αποσβέσει [10].

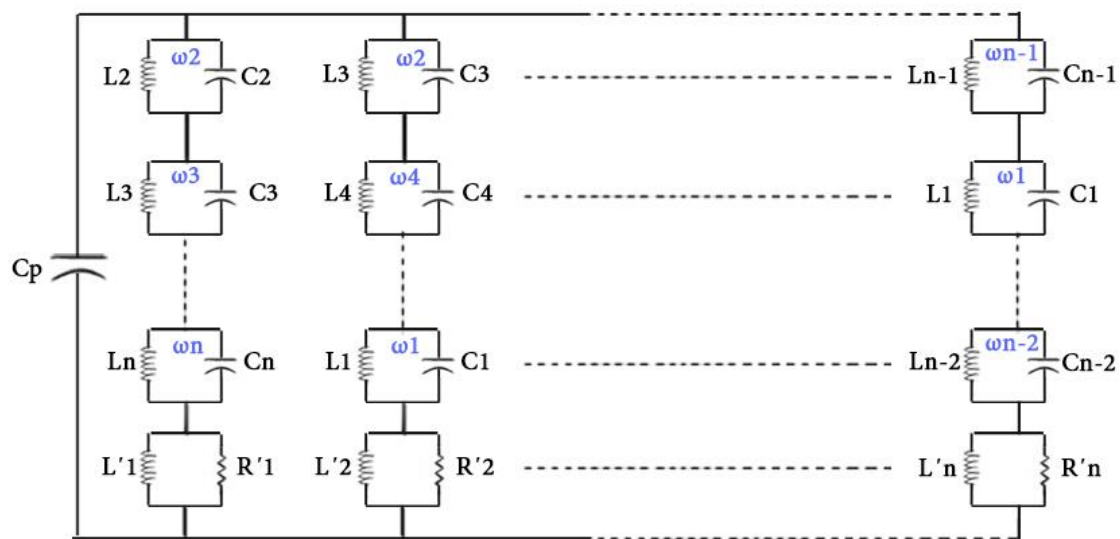


Εικόνα 11: Παράλληλο κύκλωμα “Current-Block”



Εικόνα 12: Σε σειρά κύκλωμα “Current-Block”.

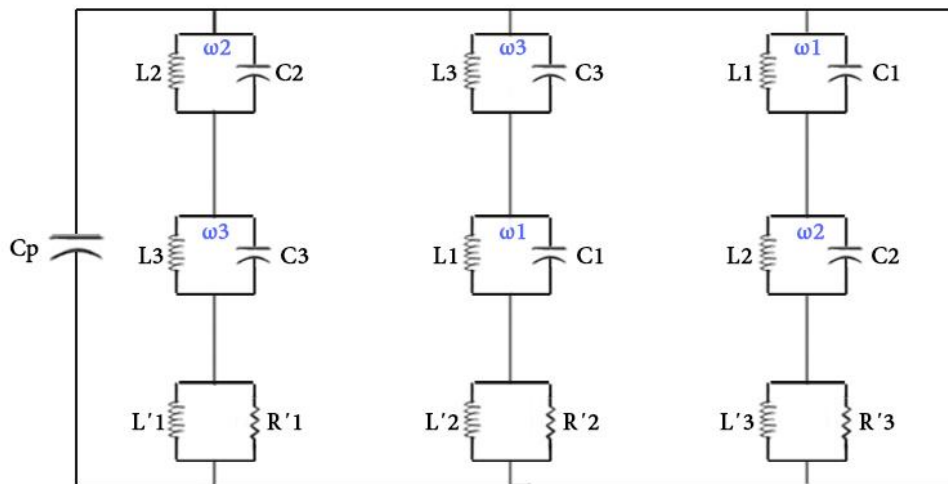
Το κύκλωμα αντισυντονισμού αποτελείται από ένα πηνίο και ένα πυκνωτή συνδεδεμένα παράλληλα (C-L). Τα κυκλώματα αυτά έχουν σχεδιαστεί ώστε να παράγουν αντισυντονισμό, στις φυσικές συχνότητες όλων των άλλων R-L κυκλωμάτων. Ο αριθμός των κυκλωμάτων αντισυντονισμού που τοποθετούνται σε κάθε βρόγχο εξαρτάται από τον αριθμό των ιδιοσυχνοτήτων που θέλουμε να αποσβέσουμε. Βλέποντας το κύκλωμα στην εικόνα 13 παρατηρούμε ότι είναι σχεδιασμένο ώστε να αποσβένει N ιδιομορφές με φυσικές συχνότητες $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$. Στον πρώτο βρόγχο, που είναι ρυθμισμένος να αποσβένει την συχνότητα ω_1 , εισάγονται N-1 κυκλώματα αντισυντονισμού ($L_2-C_2, L_3-C_3, \dots, L_N-C_N$), ένα για κάθε μια από τις υπόλοιπες συχνότητες. Στον δεύτερο βρόγχο, που είναι ρυθμισμένος για την απόσβεση της συχνότητας ω_2 εισάγονται N-1 κυκλώματα αντισυντονισμού ($L_1-C_1, L_3-C_3, \dots, L_N-C_N$), για τις συχνότητες $\omega_1, \omega_3, \dots, \omega_N$. Η ίδια συνδεσμολογία συνεχίζεται αντίστοιχα για όλους τους βρόγχους του κυκλώματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε βρόγχος του κυκλώματος να είναι λειτουργικός μόνο για μια συχνότητα και ανοιχτούκύκλωμα για όλες τις άλλες συχνότητες μηδενίζοντας ταυτόχρονα τις παρεμβολές μεταξύ των βρόγχων όταν συνδεθούν στο ίδιο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα [7].



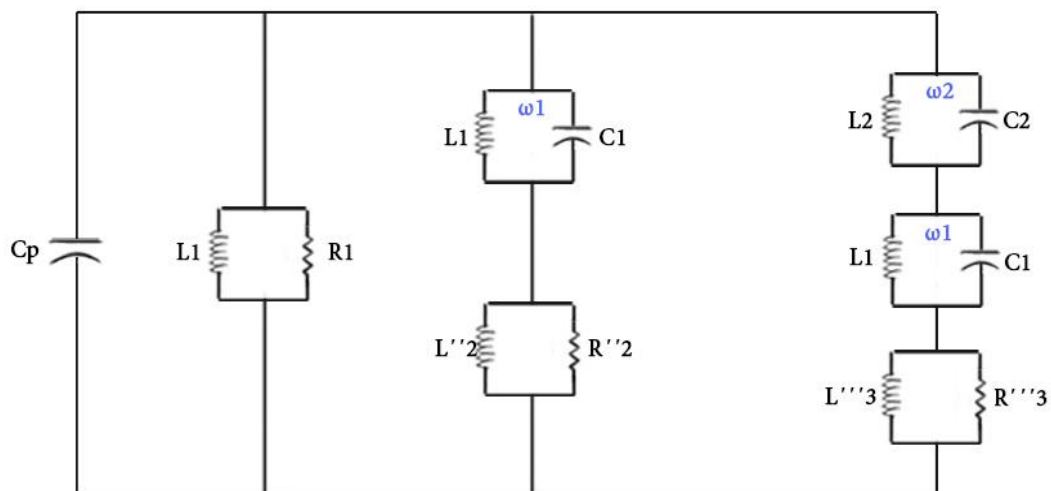
Εικόνα 13: Κύκλωμα παραδιακλάδωσης “Current-Block” για την απόσβεση n ιδιομορφών.

Με τη μέθοδο αυτή η τάξη του κυκλώματος αυξάνεται πολύ γρήγορα με τον αριθμό των λειτουργιών που πρέπει να αποσυνδεθούν ταυτόχρονα. Αυτό περιπλέκει σοβαρά το έργο της εφαρμογής των απαιτούμενων κυκλωμάτων.

Αυτό αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας την θεωρία ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Έτσι, το κύκλωμα για $N=3$ της εικόνας 14, υπό την υπόθεση ότι $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$ απλοποιείται σε εκείνο της εικόνας 15 με αποτέλεσμα ο αριθμός των εξαρτημάτων που απαιτούνται σε αυτό το κύκλωμα παραδιακλάδωσης πολλαπλών λειτουργιών να μειωθεί σχεδόν κατά το ήμισυ και να έχουμε ένα πιο μικρό, ελαφρύ αλλά και απλό κατά την κατασκευή του κύκλωμα.



Εικόνα 14: Κύκλωμα “Current-Block” τριών ιδιομορφών.



Εικόνα 15: Απλοποιημένο κύκλωμα “Current-Block” τριών ιδιομορφών.

3.2.1 Υπολογισμός στοιχείων “Current -block” κυκλώματος

Για την σωστή λειτουργία του απλοποιημένου κυκλώματος της εικόνας 14 και 15 σύμφωνα με το [11], τα εξαρτήματα του πρέπει να επιλέγονται σύμφωνα με τα παρακάτω.

Οι τύποι για τον υπολογισμό των πηγίων για το παράδειγμα της εικόνας 15 για την απόσβεση 2 ιδιομορφών είναι οι εξής :

$$L_1 = \frac{1}{\omega_1^2 C_p}$$

$$L_2 = \frac{(L_1 \tilde{L}_2 + \tilde{L}_2 \hat{L}_2 - L_1 \hat{L}_2 - \omega_2^2 L_1 \tilde{L}_2 \hat{L}_2 \hat{C}_2)}{(L_1 - \tilde{L}_2)(1 - \omega_2^2 \hat{L}_2 \hat{C}_2)}$$

και

$$\tilde{L}_2 = \frac{1}{\omega_2^2 C_p}$$

$$\hat{L}_2 = \frac{1}{\omega_1^2 \hat{C}_2}$$

Το C_p είναι η χωρητικότητα τού πιεζοηλεκτρικού και είναι διαφορετικό για κάθε μοντέλο. Αναγράφεται στον πίνακα προδιαγραφών του ή μετράται πειραματικά

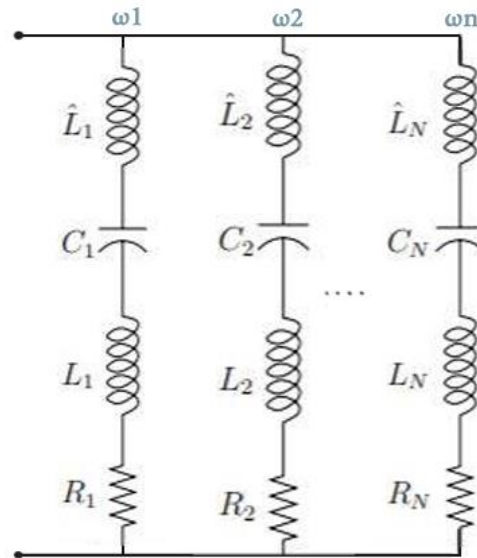
Το C_2 είναι ένας πυκνωτής που χρησιμοποιείται στο τρέχον δίκτυο αποκλεισμού. Είναι συνήθης πρακτική να τοποθετείται πυκνωτής με μεγάλη εμπορική διαθεσιμότητα όπως 100nF ή 10nF, αν και στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι για να έχουμε καλύτερη απόδοση επιλέγουμε πυκνωτή με χωρητικότητα γύρω στο 10% της χωρητικότητας C_p του πιεζοηλεκτρικού.

Σε κάθε περίπτωση, είτε δηλαδή στην παράλληλη σύνδεση είτε στην σειρά πρέπει να σημειωθεί ότι η σχεδίαση έγινε υποθέτοντας ότι $\omega_1 < \omega_2$.

Όσο αναφορά την εύρεση των κατάλληλων τιμών για τα R είναι μια διαδικασία που συχνά βασίζεται στη μεθοδολογία της δοκιμής και σφάλματος, κάνοντας τη βελτιστοποίηση των παραδιακλαδόμενων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων πολλαπλών ιδιομορφών εξαιρετικά χρονοβόρα και μη αποδοτική. Στο [10] εισάγεται μια νέα μεθοδολογία που αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα. Η νέα αυτή μεθοδολογία είναι βασισμένη στην βελτιστοποίηση της H_2 νόρμας και αποδεικνύεται πειραματικά στην παραπάνω αναφορά.

3.3 Μέθοδος “Current-flow”

Το ηλεκτρικό δυαδικό κύκλωμα ενός κυκλώματος current-flowing, το λεγόμενο σειριακό παράλληλο κύκλωμα που φαίνεται στην Εικόνα 16, προτάθηκε ως μέθοδος για τη μείωση των τιμών των επαγωγικών συνιστωσών στο [12] .



Εικόνα 16: Κύκλωμα παραδιακλάδωσης “Current-flow”

Επιπλέον η μέθοδος αυτή ήταν μια λύση στην πολυπλοκότητα του κυκλώματος που δημιουργούνταν για την ταυτόχρονη απόσβεση μεγάλου αριθμού ιδιοσυχνοτήτων με την χρήση μεθόδου “Current-Block”. Οι δύο παραπάνω μέθοδοι είναι παρόμοιες καθώς και οι δυο χρησιμοποιούν μόνο ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα για την απόσβεση πολλών ιδιομορφών. Παρολαυτά στον τρόπο με τον οποίο το επιτυγχάνουν διαφέρουν. Η μέθοδος “Current-flow” σε σχέση με την μέθοδο “Current-Block” επιτρέπει την κυκλοφορία του ρεύματος στους βρόγχους για συγκεκριμένες συχνότητες ω_i ($i=1,2,3,\dots,n$). Χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα πηγίου-πυκνωτή σε σειρά $C_i\text{-}\hat{L}_i$ όπως φαίνεται στη εικόνα 16 επιτυγχάνει τα παραπάνω καθώς το κύκλωμα $C_i\text{-}\hat{L}_i$ είναι ρυθμισμένο ως προς την συχνότητα συντονισμού του κάθε ω_i . Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα για την συχνότητα ω_i και σχεδόν ως ανοιχτοκύκλωμα ως προς τις υπόλοιπες συχνότητες. Επομένως, κάθε βρόγχος του κυκλώματος, $C_i\text{-}\hat{L}_i\text{-}L_i\text{-}R_i$, είναι λειτουργικός μόνο για μια συγκεκριμένη συχνότητα [12, 13].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα επίπεδο παρεμβολών ανάμεσα σε κοντινές ιδιομορφές είναι αναμενόμενη. Ωστόσο, για ιδιομορφές που βρίσκονται μακριά οι παρεμβολές είναι μηδαμινές [9].

3.3.1 Υπολογισμός στοιχείων “Current-flow” κυκλώματος

Για τον υπολογισμό των πηνίων του κυκλώματος της εικόνας 16 για η ιδιομορφές ισχύει :

$$L_1 = \frac{1}{\omega_1^2 C_p}, \dots, L_N = \frac{1}{\omega_N^2 C_p}$$

Το C_p όπως και στον υπολογισμό των στοιχείων της "Current-Block" μεθόδου είναι η χωρητικότητα τού πιεζοηλεκτρικού και είναι διαφορετικό για κάθε μοντέλο.

Αναγράφεται στον πίνακα προδιαγραφών του ή μετράται πειραματικά.

Το L_i είναι ρυθμισμένο στο C_p και το ω_i είναι οι ιδιοσυχνότητες που θέλουμε να αποσβέσουμε υποθέτοντας ότι $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$.

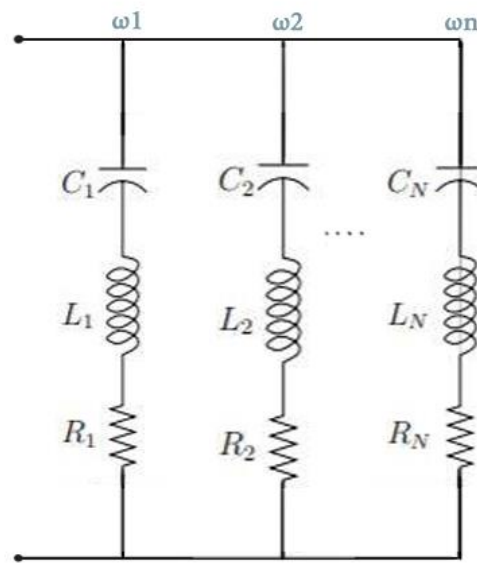
Για τον υπολογισμό του L_1 ισχύει :

$$\hat{L}_1 = \frac{1}{\omega_1^2 C_1}, \dots, \hat{L}_n = \frac{1}{\omega_n^2 C_n}$$

Το C_i είναι ένας αυθαίρετος πυκνωτής που χρησιμοποιείται στο τρέχον δίκτυο αποκλεισμού και είναι συνήθης πρακτική να τοποθετείται πυκνωτής με μεγάλη εμπορική διαθεσιμότητα όπως 100nF ή 10nF. Για να έχουμε καλύτερη απόδοση, επιλέγουμε πυκνωτή με χωρητικότητα γύρω στο 10% της χωρητικότητας C_p του πιεζοηλεκτρικού.

Στην περίπτωση που θέλουμε να συνενώσουμε τα πηνία του κάθε βρόγχου τα οποία είναι σε σειρά ώστε να απλοποιήσουμε την ολική εμπέδηση του κυκλώματος ισχύει :

$$L_1 = \frac{C_p + C_1}{\omega_1^2 C_1 C_p}, L_2 = \frac{C_p + C_2}{\omega_2^2 C_2 C_p}, \dots, L_n = \tilde{L}_n + \hat{L}_n = \frac{C_p + C_n}{\omega_n^2 C_n C_p}$$



Εικόνα 17: Απλοποιημένο κύκλωμα "Current-flow".

Όσον αναφορά τον υπολογισμό των αντιστάσεων ισχύει[14] :

$$R_i = \frac{\sqrt{1 - \kappa_{31}^2}}{(1 - \kappa_{31}^2)C_p\omega_i}$$

Ωστόσο όπως και στην περίπτωση της "Current-Block" μεθόδου ο υπολογισμός των τιμών των R μπορεί να ακολουθήσει την μεθοδολογία βελτιστοποίησης της νόρμας H_2 [10] .

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μοντελοποιήσαμε στο πρόγραμμα COMSOL Multiphysics μία εμφιέριστη δοκό με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η οποία καλύπτεται μερικώς από δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τα οποία συνδέονται με ένα παθητικό κύκλωμα απόσβεσης δυο ιδιομορφών.

4.1 COMSOL Multiphysics

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων πολλαπλών πλατφορμών για την επίλυση και προσομοίωση συστημάτων πολλών φυσικών ποσοτήτων. Μηχανικοί και επιστήμονες έπρεπε για καιρό να κάνουν υποθέσεις για να μπορέσουν να υλοποιήσουν τις ιδέες τους. Με τη χρήση του προγράμματος αυτού παρέχεται η δυνατότητα οι φυσικές εφαρμογές να περιλαμβάνουν όλους τους απαραίτητους παράγοντες για να έχουμε ένα πλήρες μοντέλο καθώς είναι ένα περιβάλλον προσομοίωσης σχεδιασμένο με πραγματικές εφαρμογές.

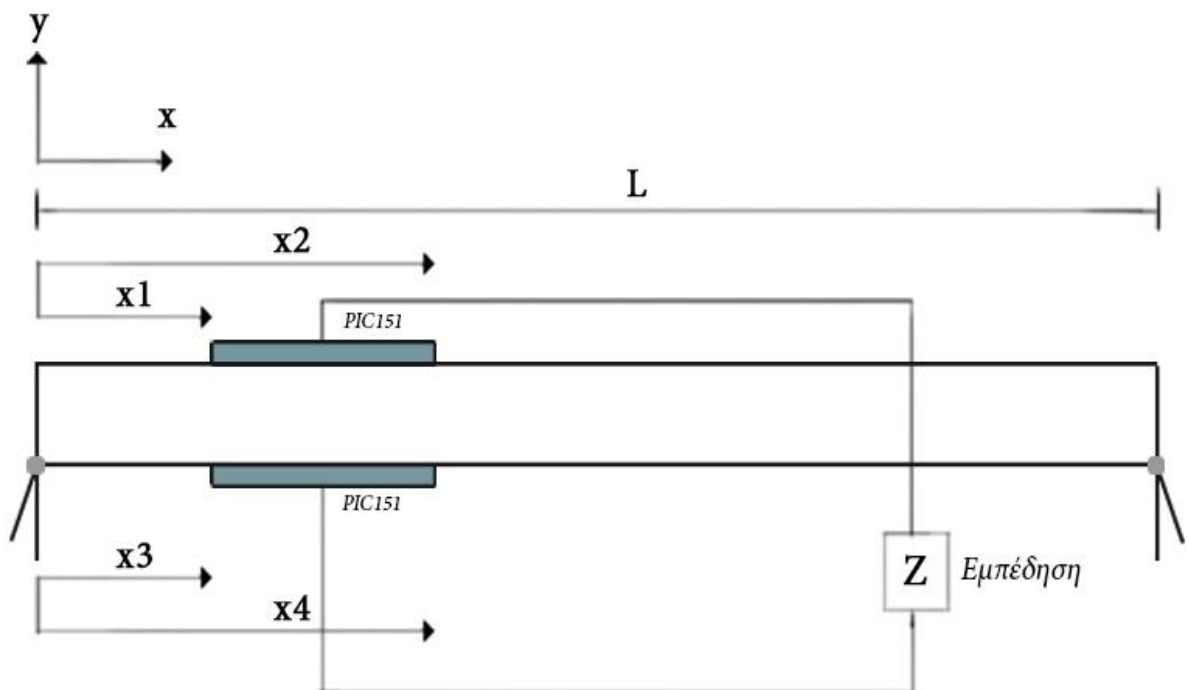
Το όλο νόημα της προσομοίωσης είναι φυσικά το να μιμηθεί όσο καλύτερα γίνεται τα φαινόμενα που παρατηρούμε στη πραγματικότητα είτε αυτά είναι φαινόμενα μηχανικής είτε καθαρά επιστημονικά. Το COMSOL Multiphysics παρέχει ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάλυσης (IDE) και ενοποιημένη ροή εργασίας για να μπορούμε να εργαστούμε σε τομείς φυσικής όπως Ηλεκτροστατική, Ημιαγωγοί, Ηλεκτρομηχανική, Μεταφορά Θερμότητας, Ροή Υγρού, Μηχανική, Ακουστική και άλλα πολλά.

Επιπλέον η συγκεκριμένη πλατφόρμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνη της είτε να επεκταθεί με τη χρήση διάφορων εργαλείων και σε συνδυασμό με τη χρήση Livelink (Livelink for Matlab , Livelink for Simulink , Livelink for Excel) ώστε να αναλάβει πιο περίπλοκα προβλήματα της πολυφυσικής. Είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται από ερευνητές και μηχανικούς που εργάζονται τεχνικές επιχειρήσεις, ερευνητικά εργαστήρια και πανεπιστήμια.

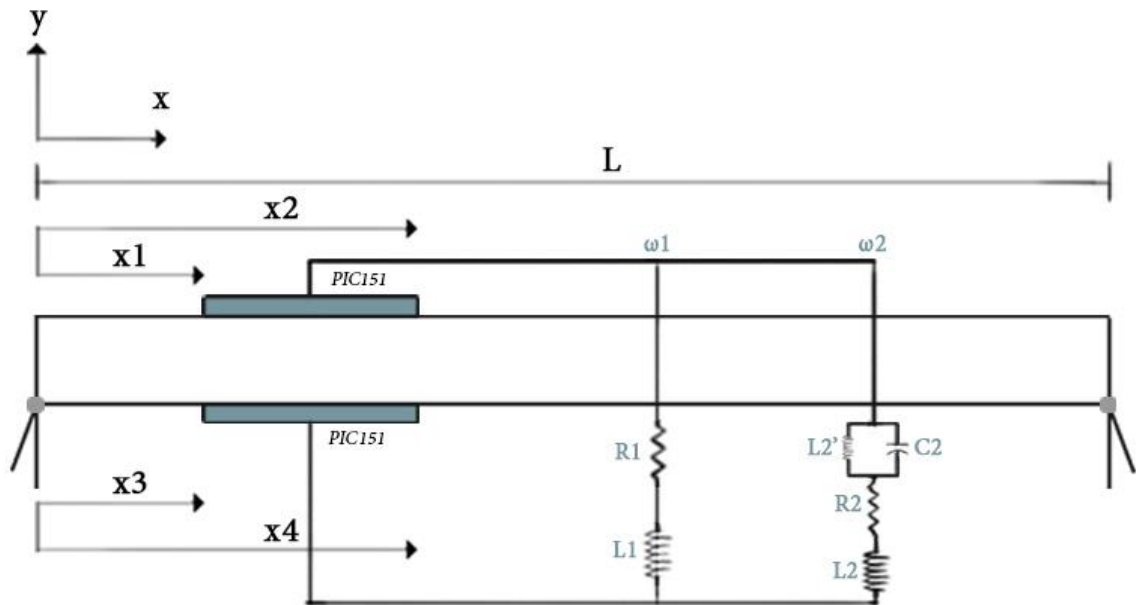
4.2 Σύστημα υπό μελέτη

Στη συγκεκριμένη ενότητα εφαρμόσαμε τα βήματα που αναφέραμε στις προηγούμενες ενότητες ώστε να μπορέσουμε να πετύχουμε μεγαλύτερη απόσβεση της δεύτερης και τρίτης ιδιοσυχνότητας ταυτόχρονα. Μοντελοποιήσαμε μία εμφιέριστη δοκό με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η οποία καλύπτεται μερικώς από δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τα οποία συνδέονται με ένα παθητικό κύκλωμα απόσβεσης δυο ιδιομορφών (εικόνα 18). Το κύκλωμα αυτό είναι στην μια περίπτωση τύπου "Current Block" (εικόνα 19) και στην άλλη "Current flow" (εικόνα 20).

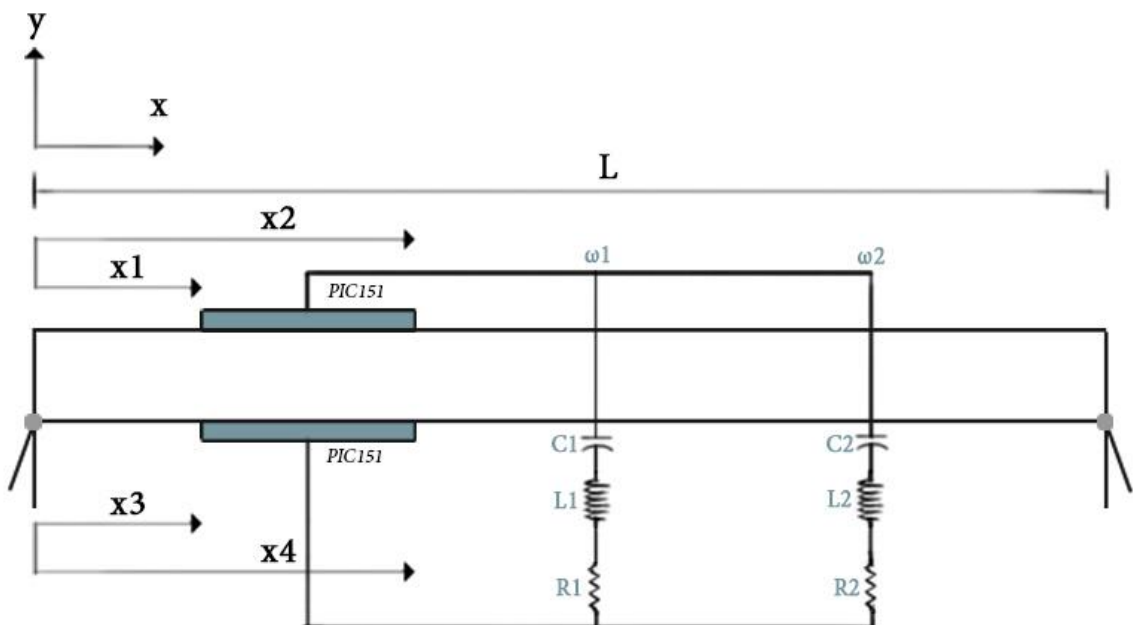
Το μοντέλο της δοκού μαζί με τα 2 πιεζοηλεκτρικά στοιχεία θεωρείται ενιαίο και η χρήση της θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων η οποία βασίζεται στην διακριτοποίηση των πεδίων τους μας δίνει μια πιο αποτελεσματική και ρεαλιστική προσομοίωση για την δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής.



Εικόνα 18: Εξεταζόμενο μοντέλο.



Εικόνα 19: Εξεταζόμενο μοντέλο τύπου “Current-Block”.



Εικόνα 20: Εξεταζόμενο μοντέλο τύπου “Current-flow”.

4.3 Μία δοκός με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα

Η δοκός μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας την κλασσική πολυστρωματική θεωρία που βασίζεται στις παραδοχές Euler - Bernoulli. Η θεωρία δέσμης Euler – Bernoulli είναι μια απλοποίηση της γραμμικής θεωρίας της ελαστικότητας, η οποία παρέχει ένα μέσο υπολογισμού των φορτίων και των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης των δοκών.

Η μέγιστη ελαστική μετατόπιση μιας αμφιέριστης δοκού περιγράφεται από την μονοδιάστατη εξίσωση της παραπάνω θεωρίας [16] τροποποιημένη ως εξής:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[E_b I_b \frac{d^2 y(x,t)}{dx^2} - C_a v_a(x,t) \right] + p_A A_A \frac{d^2 y(x,t)}{dt^2} = 0$$

Όπου τα E_b , I_b , A_b και ρb αντιπροσωπεύουν το μετρό ελαστικότητας (Young's modulus), την ροπή αδράνειας, την επιφάνια διατομής, και την πυκνότητα μάζας της δοκού αντίστοιχα. Ο πρόσθετος όρος αφορά την ροπή που εφαρμόζεται στον ουδέτερο άξονα της δοκού από τον ενεργοποιητή $M_a = C_a v_a(x,t)$, όπου C_a σταθερά εξαρτώμενη από τις ιδιότητες του ενεργοποιητή [15]. Υποθέτουμε ότι κάθε πιεζοηλεκτρικό επίθεμα είναι εξαιρετικά λεπτό και ότι η δοκός αποκλίνει μόνο ως προς τον y άξονα. Ισχύουν οι οριακές συνθήκες της αμφιέριστης $y(0,t) = y(L,t) = 0$ και $E_b I_b \frac{dy(0,t)}{dx} = E_b I_b \frac{dy(L,t)}{dx} = 0$. Με την τεχνική ανάλυσης ιδιομορφών [16] η συνάρτηση θέσης $y(x,t)$ μπορεί να επεκταθεί ως: $y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) q_i(t)$, όπου $\varphi_i(x)$ είναι οι κανονικοποιημένες ιδιομορφές δεδομένου ότι το $\varphi_i(x) = \sqrt{\frac{2}{p_b A_b L}} \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right)$ [16] και το $q_i(t)$ είναι η ιδιομορφική μετατόπιση.

Επιπλέον όταν γίνεται μοντελοποίηση μιας κατασκευής, είναι συνήθης πρακτική η άντληση της συνάρτησης μεταφοράς σε κάθε σημείο της δοκού και της τάσης του ενεργοποιητή $Y(x,s)/V_a(s)$, όπως και της συνάρτησης μεταφοράς μεταξύ της τάσης του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού και της τάσης του ενεργοποιητή $V_s(s)/V_a(s)$.

Χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη μονοδιάστατη εξίσωση Euler – Bernoulli για την δοκό αντλούμε τις δύο συναρτήσεις μεταφοράς. Την συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ την μετατόπισης σε κάθε σημείο της δοκού και της τάσης του ενεργοποιητή.

$$G_{yx}(x,s) \triangleq \frac{Y(x,s)}{V_a(s)} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{C_a [\varphi_i(x_1) - \varphi_i(x_2)] \varphi_i(x)}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}$$

Παίρνοντας τον μετασχηματισμό Laplace, προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της τάσης του ενεργοποιητή και της τάσης της παραδιακλάδωσης [15]

$$G_{vv}(S) \triangleq \sum_{i=0}^{\infty} \frac{C_s C_a [\phi_i(x_1) - \phi_i(x_2)][\phi_i(x_3) - \phi_i(x_4)]}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}$$

Σημειώνεται ότι ο πρόσθετος όρος C_a εξαρτάται από τις ιδιότητες του ενεργοποιητή, C_s είναι σταθερά πιεζοηλεκτρικής διακλάδωσης, $\phi_i(x)$ και $\phi'_i(x)$ είναι η κανονικοποιημένη ιδιομορφή και η παράγωγός της αντίστοιχα. Επιπλέον οι όροι $2\zeta_i \omega_i s$, προστίθενται για να ισορροπηθεί η δομική απόσβεση και συνήθως βρίσκεται πειραματικά.

Σε μορφή διανύσματος κατάστασης για το $G_{yv}(x, s)$ και $G_{vv}(s)$ έχουμε

$$\dot{x}_b = Ax_b + BV_a$$

$$Y = C_Y x_b$$

$$Vs = CV_s x_b$$

όπου x_b οι καταστάσεις της δοκού, C_Y και C_{Vs} εξαρτώνται από $Y_{(x,s)}$ και $Y_s(s)$.

Τέλος στην εικόνα 18 φαίνεται ότι το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα παραδιακλαδώνεται από μια εμπέδηση Z . Έτσι, η σχέση αντίστασης ρεύματος-τάσης για την αντίσταση είναι :

$$V_Z(s) = I_Z(s)Z(s)$$

όπου V_Z η τάση στην αντίσταση και I_Z το ρεύμα που την διαπερνά. Χρησιμοποιώντας τον νόμο τάσεων του Kirchhoff στο κύκλωμα της εικόνας 18 η $V_Z(s)$ εκφράζεται ως :

$$V_Z(s) = V_p(s) - \frac{1}{C_p s} I_Z(s)$$

όπου V_p η τάση που επάγεται από το φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης και C_p η χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού.

Συνεπώς έχουμε :

$$V_z(s) = \frac{Z(s)}{\frac{1}{C_p s} + Z(s)} V_p(s)$$

η ισάξια

$$V_z(s) = \frac{C_p s Z(s)}{1 + C_p(s) Z(s)} V_p(s)$$

Όταν το πιεζοηλεκτρικό παραδιακλαδώνεται με πεπερασμένη εμπέδηση Z

$$V_p(s) = G_{vv}(s) V_a(s) - G_{vv}(s) V_z(s)$$

αντικαθιστώντας την στην παραπάνω εξίσωση η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ $V_p(s)$ και $V_a(s)$, έχουμε

$$G_{vv}(s) \triangleq \frac{Y_s(s)}{V_a(s)} = \frac{G_{vv}(s)}{1 + G_{vv}(s) K(s)}$$

όπου

$$K(s) = \frac{Z(s)}{Z(s) + \frac{1}{C_p s}}$$

ομοίως η συνάρτηση μεταφοράς $\widehat{G}_{yv}(x, s)$ είναι

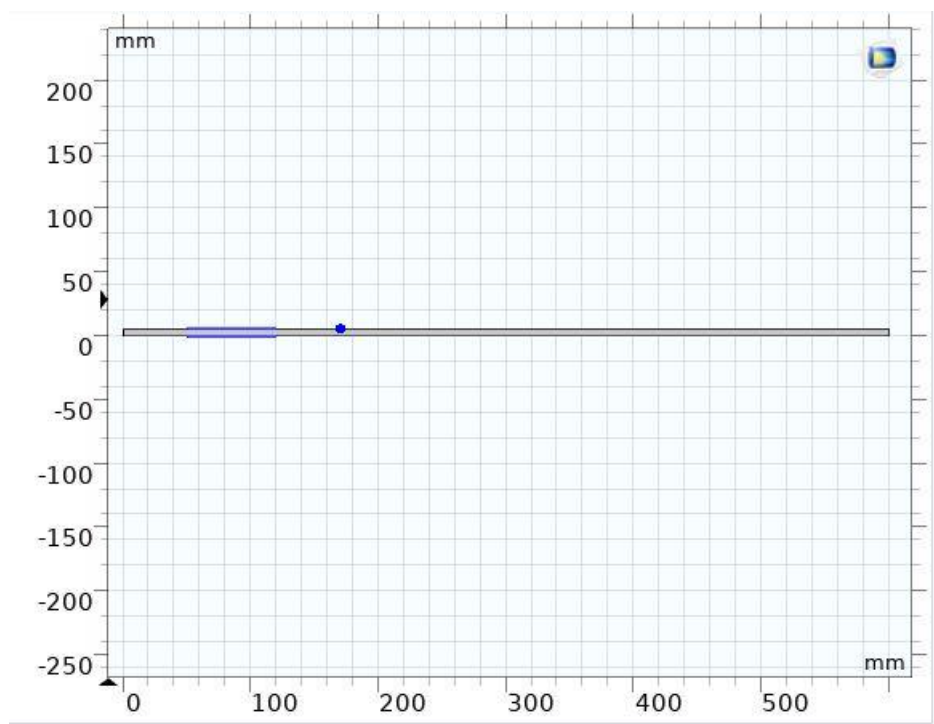
$$\widehat{G}_{yv}(x, s) \triangleq \frac{Y(x, s)}{V_a(s)} = \frac{G_{yv}(s)}{1 + G_{vv}(s) K(s)}$$

Παρατηρούμε από τις παραπάνω εξισώσεις ότι η απόσβεση μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι στην πραγματικότητα ένα πρόβλημα ελέγχου με ανάδραση, όπως επιδεικνύεται από τον Behrens στα [17, 18]. Έτσι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχες τεχνικές ελέγχου για να προσδιοριστεί η κατάλληλη εμπέδηση [11].

4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΑΡΙΟΥ ΜΕ 2 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

Τα βήματα που ακολουθήσαμε στο πρόγραμμα COMSOL Multiphysics για την μοντελοποίηση παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι τα εξής :

- Εισαγωγή γεωμετρίας
- Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών-Δημιουργία παραμέτρων
- Ορισμός συνοριακών συνθηκών και φορτίσεων
- Ορισμός ηλεκτρομηχανικής σύζευξης
- Ορισμός ηλεκτρικών στοιχείων
- Δημιουργία σύνδεσης ηλεκτρικών στοιχείων
- Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων
- Ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων
- Βελτιστοποίηση παραμέτρων



Εικόνα 21: Μοντέλου δοκού με δυο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα.

• ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Η γεωμετρία του συστήματος περιγράφεται από το μήκος, το πλάτος και το πάχος της δοκού και των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων . Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι αναλυτικές τους τιμές

Μήκος δοκαριού (Width)	600 mm
Ύψος δοκαριού (Height)	6 mm

Πίνακας 3. Διαστάσεις δοκού.

Μήκος πιεζοηλεκτρικού επιθέματος (Width)	70 mm
Ύψος πιεζοηλεκτρικού επιθέματος (Height)	0,25 mm
Θέση στον x-άξονα πιεζοηλεκτρικού	0,5 mm

Πίνακας 4. Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού.

Η τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων γίνεται συμμετρικά σε απόσταση 0.05m από τα άκρα της δοκού, $x_1 = x_3 = 0.5\text{mm}$, ενώ τα όρια τους ορίζονται από τα x_3 και x_4 ισχύει ότι $x_4 - x_3 = l$. Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα που χρησιμοποιηθήκαν για την προσομοίωση αυτής της κατασκευής είναι τύπου PIC151.

• ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Στη συνέχεια ορίσαμε τα χαρακτηριστικά της δοκού και των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Young's modulus:

E User defined

65*10⁹ Pa

Poisson's ratio:

ν User defined

0.31 1

Density:

ρ User defined

2650 kg/m³

Εικόνα 21: Χαρακτηριστικά δοκού.

Για τα χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων PIC151 χρειάστηκε να συμπληρώσουμε τα παρακάτω στοιχεία καθώς είναι απαραίτητα για τις εξισώσεις που ορίζουν το πιεζοηλεκτρικό αλλά και την λειτουργία του στο ευθύ φαινόμενο του σύμφωνα με το [25] .

Πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις για το ευθύ φαινόμενο :

$$\bullet \mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{D} \mathbf{E}$$

$$\bullet \mathbf{D} = \mathbf{\epsilon}^T \mathbf{E} + \mathbf{D}^t$$

Όπου :

\mathbf{S} =mechanical strain

\mathbf{T} =mechanical stress [N/m²]

\mathbf{s}^E =elastic compliance [Pa⁻¹]

\mathbf{d} =piezoelectric coefficient [C/N]

\mathbf{D} =electric displacement [C/m²]

\mathbf{E} =electric field [V/m]

$\mathbf{\epsilon}^T$ =dielectric permittivity [F/m]

$$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$$

Elastic constants (compliance) πιεζοηλεκτρικού

15e-12	-4.5e-12	-5.7e-12	0	0	0
-4.5e-12	19e-12	-5.7e-12	0	0	0
-5.7e-12	-5.7e-12	19e-12	0	0	0
0	0	0	39e-12	0	0
0	0	0	0	39e-12	0
0	0	0	0	0	49.4e-12

Piezoelectric charge constraint

0	0	0	0	5.8e-10	0
0	0	0	5.8e-10	0	0
-210e-12	-210e-12	500e-12	0	0	0

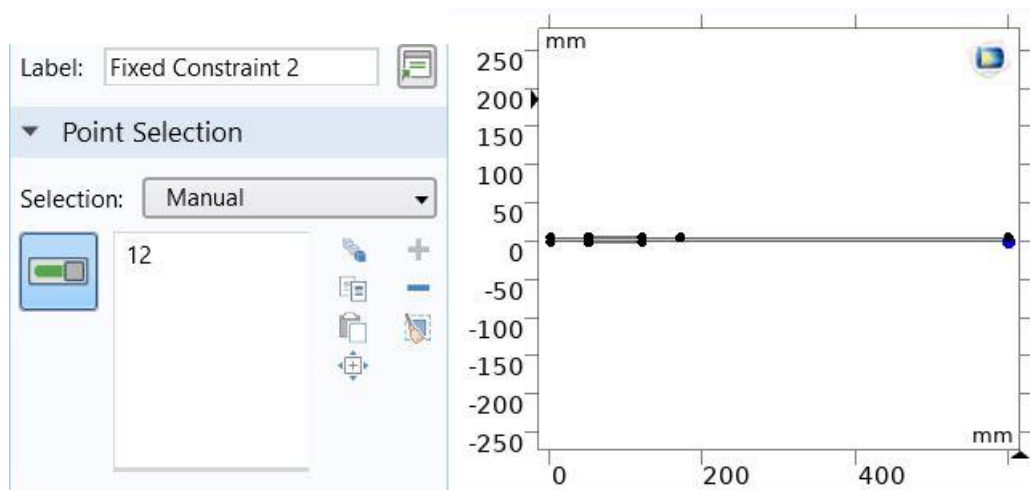
Relative permittivity

1980	0	0
0	2400	0
0	0	2400

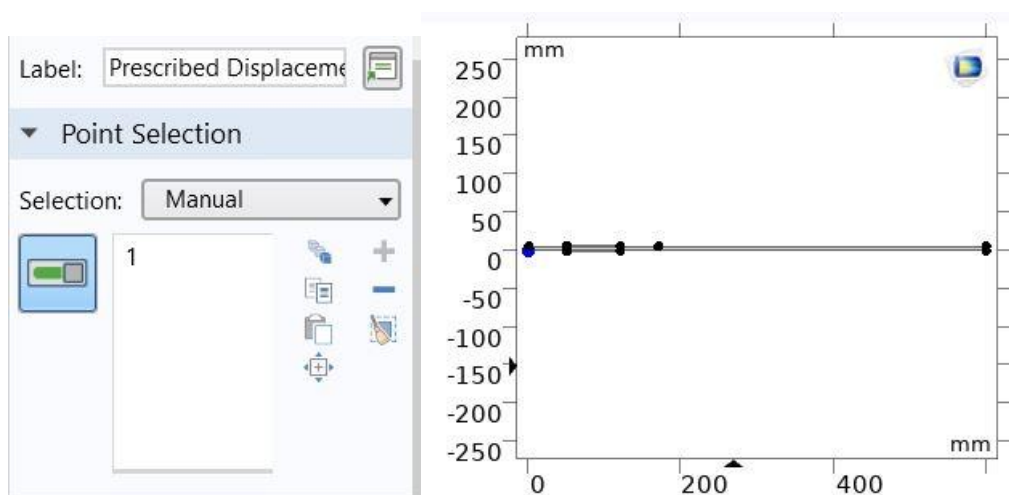
Εικόνα 22: Χαρακτηριστικά πιεζοηλεκτρικού.

· ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΦΟΤΡΙΣΕΩΝ

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_y = 5 \text{ N}$ στα 170mm στο επάνω μέρος της δοκού.
Συνοριακές συνθήκες: $u_x = u_y = 0$, πάκτωση στην αριστερή και στη δεξιά πλευρά της δοκού.



Εικόνα 23: Πάκτωση στην δεξιά πλευρά της δοκού.



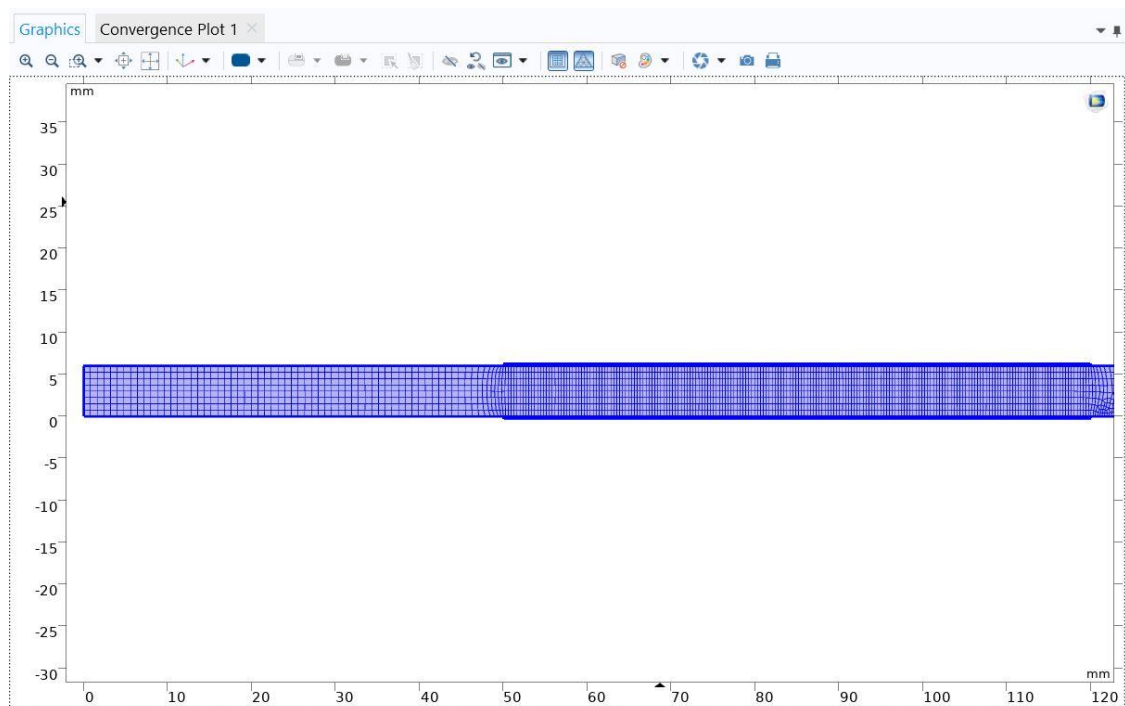
Εικόνα 24: Πάκτωση στην αριστερή πλευρά της δοκού.

Στη συνέχεια δημιουργήσαμε το ηλεκτρικό κύκλωμα και την σύνδεση των ηλεκτρικών

στοιχείων όπως έχουν οριστεί παραπάνω και για τους 2 τύπους κυκλωμάτων Current-Block και Current-flow(βλ. εικόνα 19 και εικόνα 20)

• Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διακριτοποίηση στο στρώμα της κατασκευής με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι η default επιλογή που δόθηκε από το λογισμικό του COMSOL. Όπως φαίνεται η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας ανάγκασε τη χρήση μεγαλύτερης πύκνωσης με πεπερασμένα στοιχεία στο σημείο που τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα. Η διακριτοποίηση των στρωμάτων αυτών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

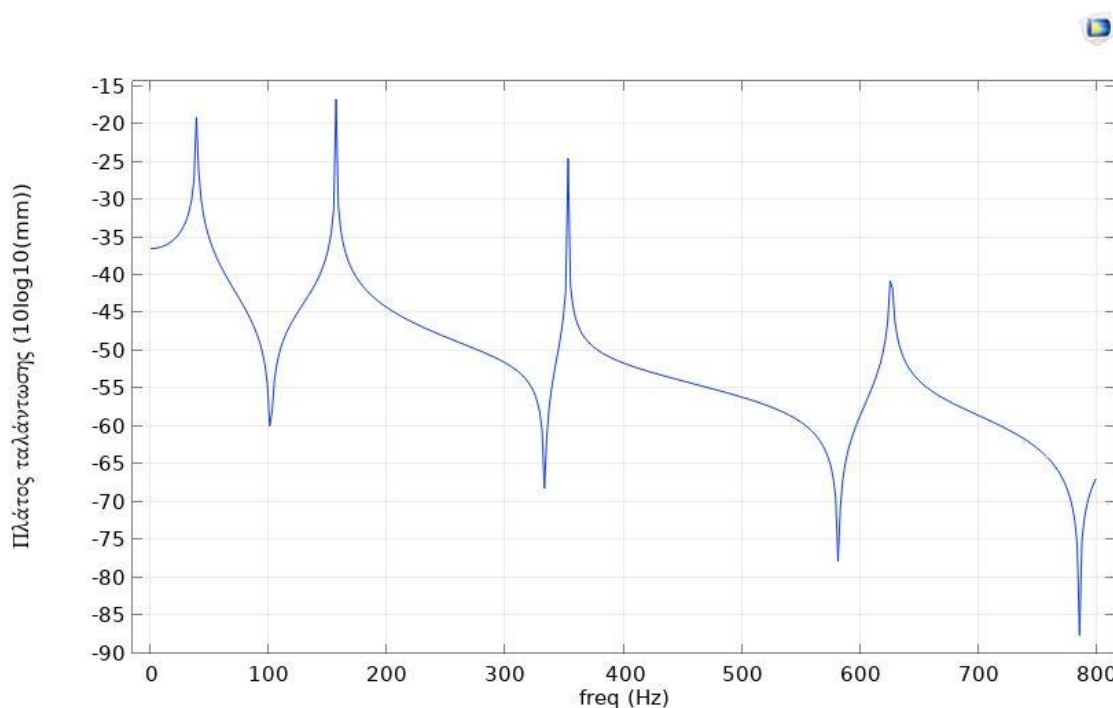


Εικόνα 25: Διακριτοποίηση συστήματος

Όπως παρατηρούμε, η διακριτοποίηση στο σημείο με τα πιεζοηλεκτρικά είναι αρκετά πιο πυκνή σε σχέση με την υπόλοιπη δοκό και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο σχεδιασμός σε εκείνο το σημείο της δομής μας είναι αρκετά πιο σύνθετος αλλά και ελάχιστα πιο «βαρύ». Για το λόγο αυτό, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι πολύ περισσότερα. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτά που προτείνει το λογισμικό (default).

4.5 Απόκριση του συστήματος

Η απόκριση του συστήματος στον χώρο των συχνοτήτων για κλειστό κύκλωμα που υπόκειται σε αρμονική δύναμη, φαίνονται το διάγραμμα της εικόνας 25. Συγκεκριμένα, βλέπουμε τις 4 πρώτες ιδιοσυχνότητες.



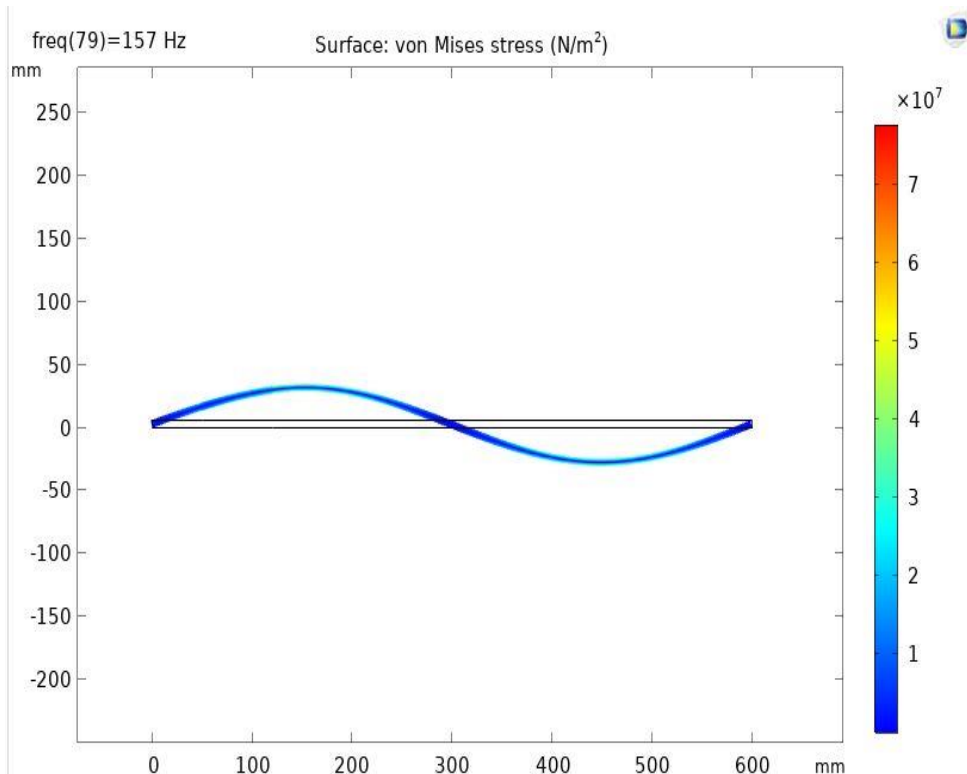
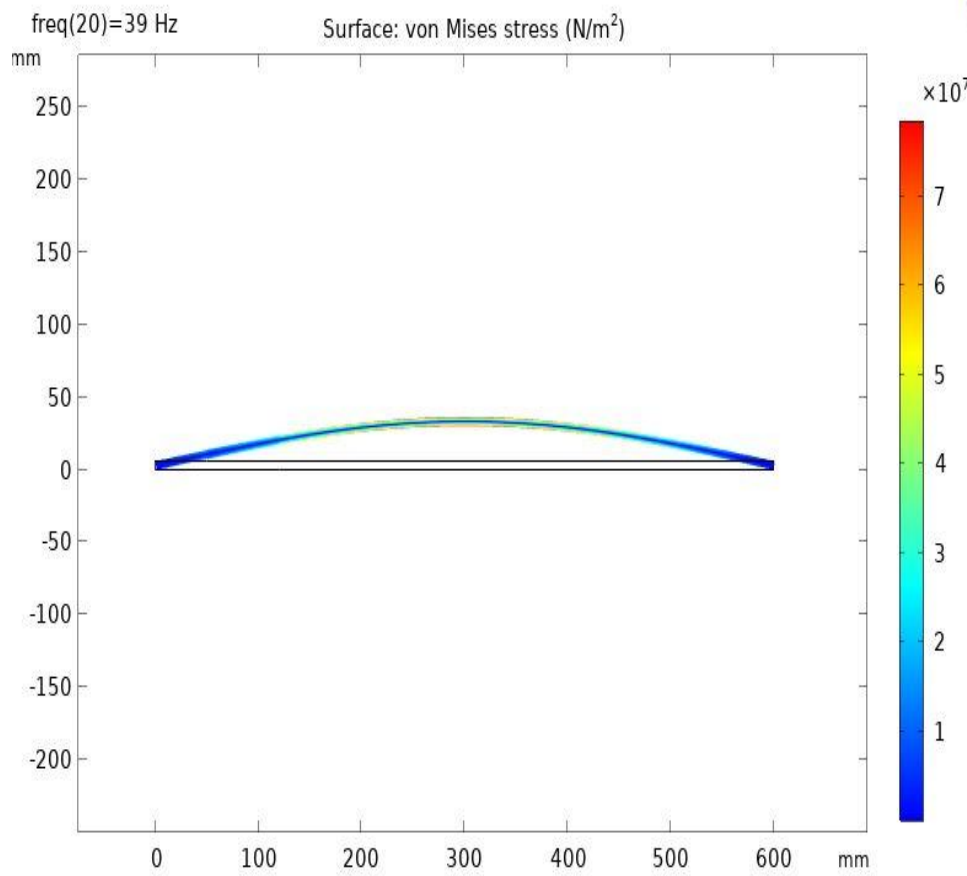
Εικόνα 25: Διάγραμμα με τις πρώτες τέσσερις ιδιοσυχνότητες.

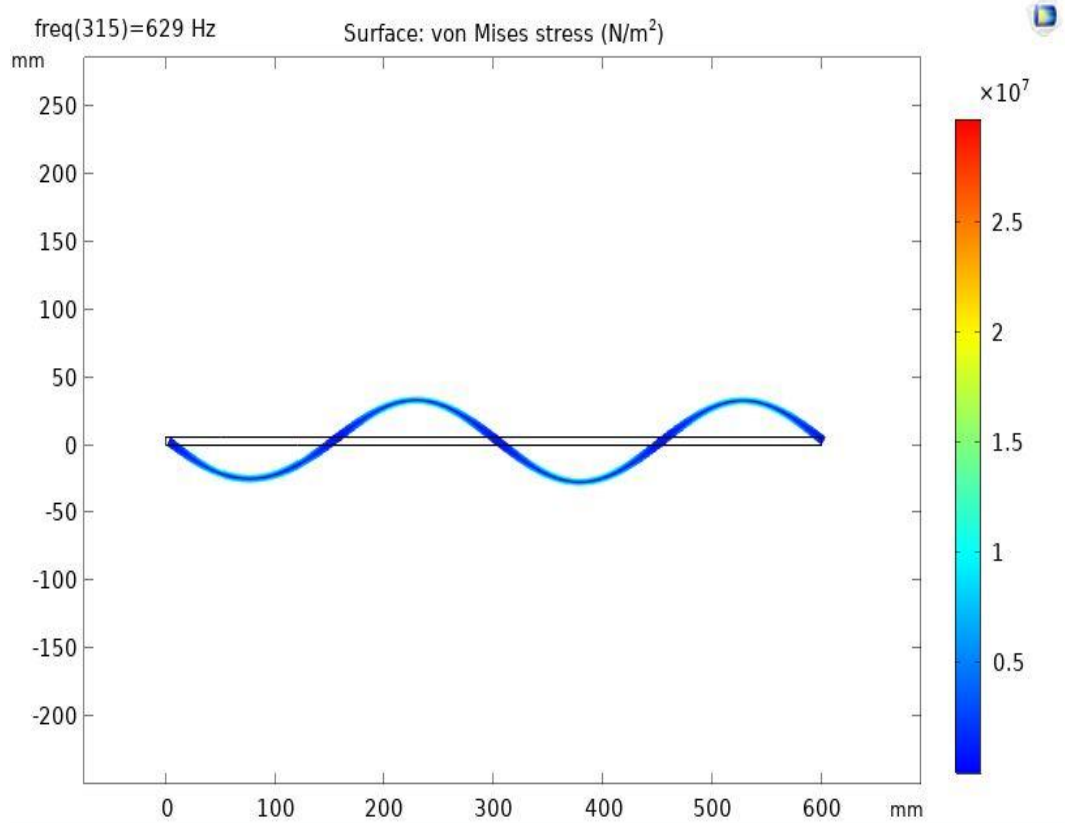
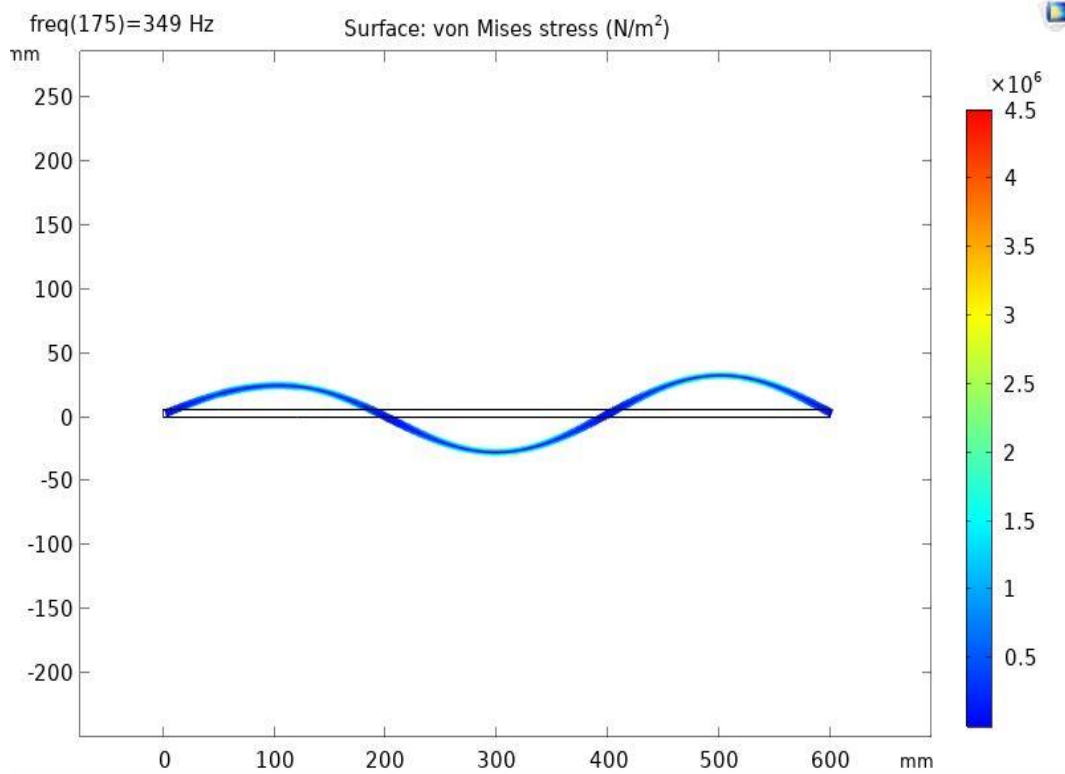
Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ακριβείς τιμές των πρώτων τεσσάρων ιδιοσυχνοτήτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η απόσβεση της δεύτερης $\omega_2=157,8$ και της τρίτης $\omega_3=349,8$ ιδιοσυχνότητας με την χρήση πιεζοηλεκτρικών συνδεδεμένα με παθητικά κυκλώματα τύπου “Current-Block” και “Current-flow”

ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ (HZ)
ω_1	39,6
ω_2	157,8
ω_3	349,8
ω_4	629

Πίνακας 5. Ιδιοσυχνότητες συστήματος.

Παρακάτω φαίνονται οι 4 ιδιομορφές της δοκού





4.6 Απόσβεση με “Current-flow” κύκλωμα

Χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία της υποενότητας 3.3 συνδέσαμε στη δοκό μας το παραδιακλαδωμένο κύκλωμα τύπου “Current-flow” όπως φαίνεται και στην εικόνα 20.

Οι τιμές των πηνίων και των αντιστάσεων υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις της 3.3.1 υποενότητας και παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες.

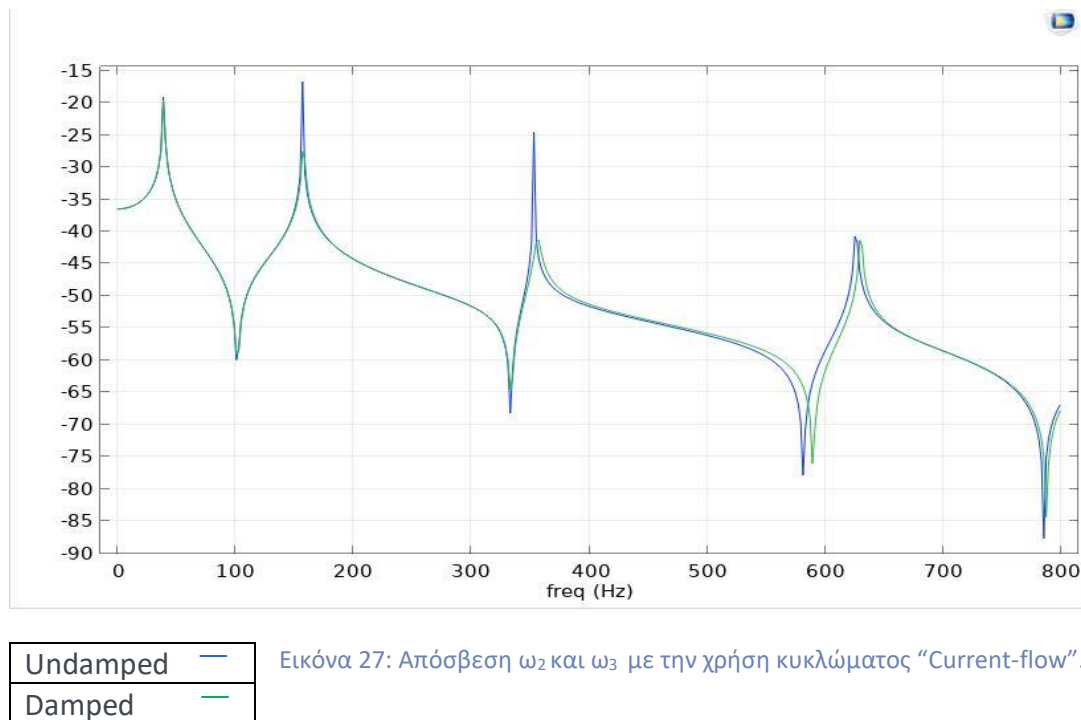
Πηνίο (L)	Τιμή (H)
L_1	112,5
L_2	22,77

Πίνακας 6. Τιμές πηνίων κυκλώματος “Current-flow”.

Αντίσταση (R)	Τιμή (Ω)
R_1	10.266
R_2	4.618

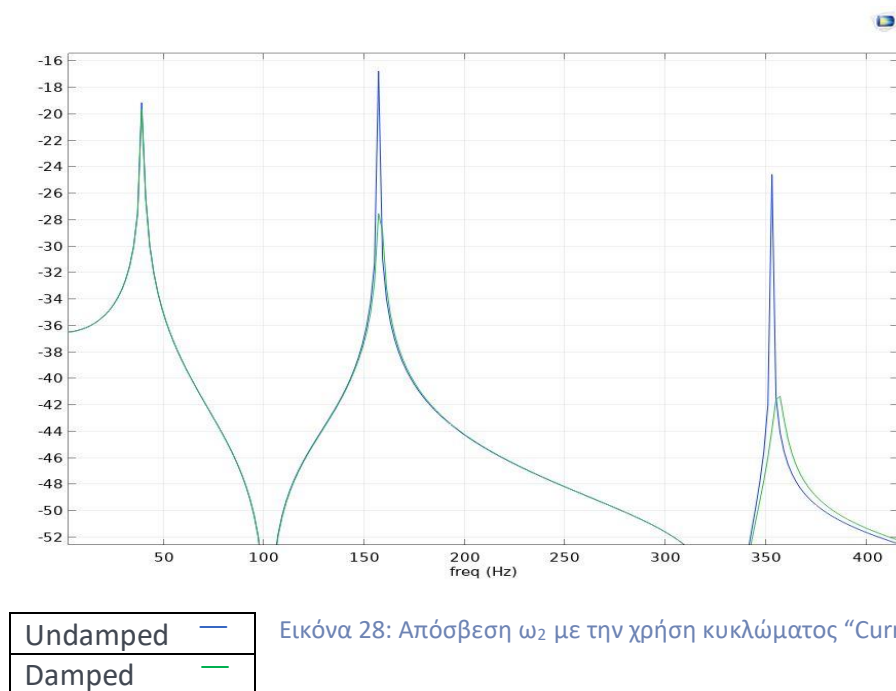
Πίνακας 7. Τιμές αντιστάσεων κυκλώματος “Current-flow”.

Οι τιμές των πυκνωτών C_1 και C_2 είναι 10nf λόγω της εμπορικής διαθεσιμότητά τους. Παρακάτω παρατίθεται η εικόνα 26 η οποία επιτυγχάνει απόσβεση της δεύτερης και τρίτης ιδιοσυχνότητας με την χρήση του παραπάνω κυκλώματος και στοιχείων.



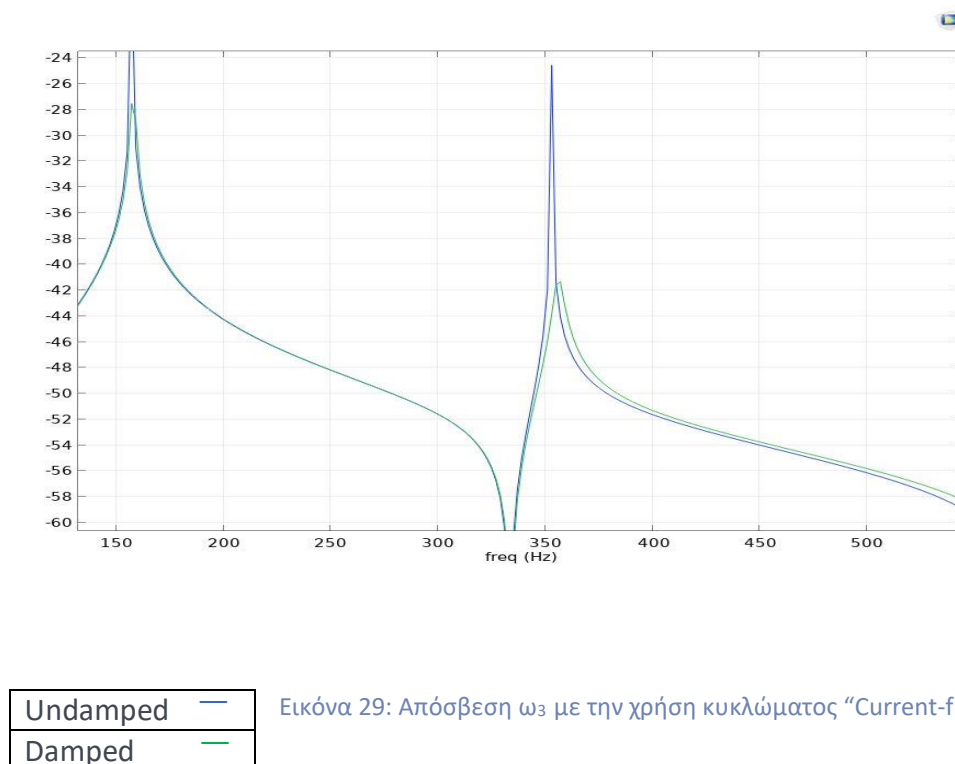
Εικόνα 27: Απόσβεση ω_2 και ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow”.

Πιο αναλυτικά παρατηρούμε στην εικόνα 28 την μείωση της δεύτερης ιδιοσυχνότητας ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow” από -16,5 db στα -27,5db.



Εικόνα 28: Απόσβεση ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow”.

Ενώ στην εικόνα 29 παρατηρούμε την μείωση της τρίτης ιδιοσυχνότητας ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow” από -24,5db στα -41,5db.



Εικόνα 29: Απόσβεση ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow”.

4.7 Απόσβεση με “Current-Block” κύκλωμα

Παρόμοια με στην ενότητα 4.2 για την απόσβεση με κύκλωμα “Current-flow” ακολουθήσαμε την μεθοδολογία της ενότητας 3.2 και τις υποενότητας 3.2.1 ώστε να υπολογίσουμε τα στοιχεία του “Current-Block” κυκλώματος.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες των στοιχείων.

Πηνίο (L)	Τιμή (H)
L_1	9.7
L_2	5.0
L_2'	10.2

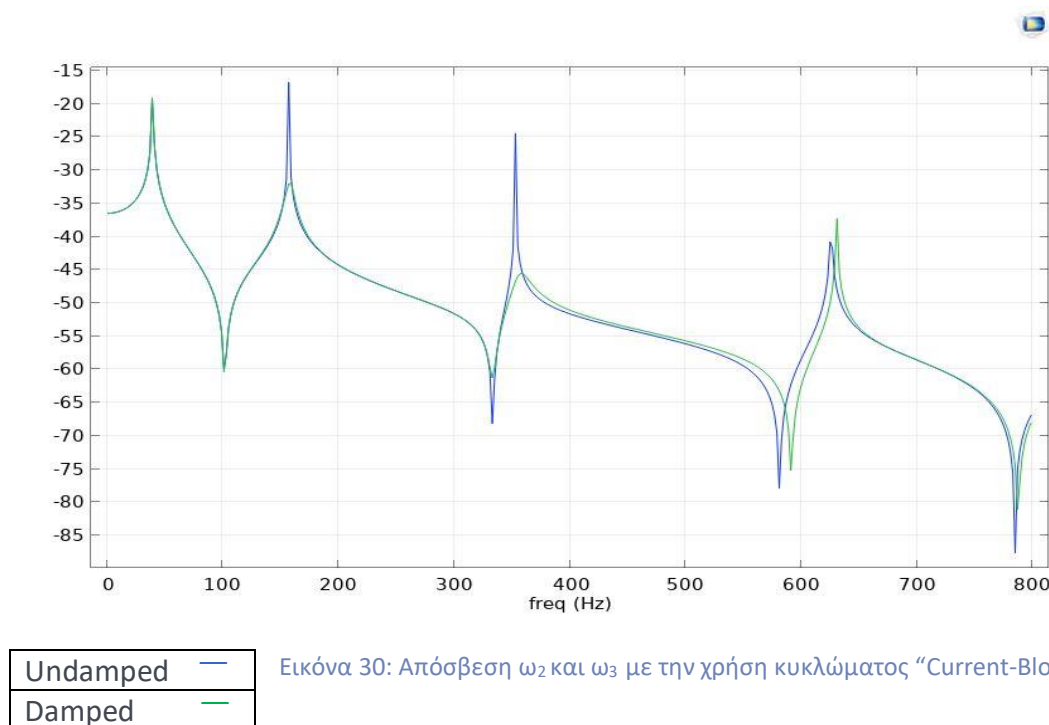
Πίνακας 8. Τιμές πηνίων κυκλώματος “Current-Block”.

Αντίσταση (R)	Τιμή (Ω)
R_1	2500
R_2	2400

Πίνακας 9. Τιμές αντιστάσεων κυκλώματος “Current-Block”.

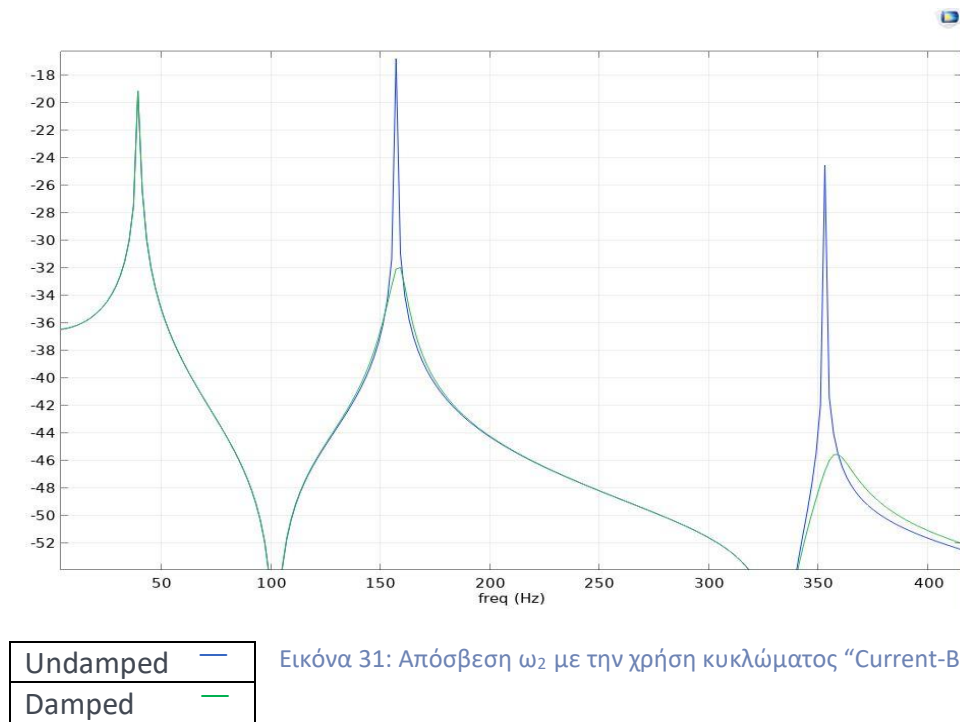
Η τιμή για τον πυκνωτή C_2 είναι 100nf λόγω εμπορικής διαθεσιμότητας.

Παρακάτω παρατίθεται η εικόνα 30 η οποία επιτυγχάνει απόσβεση της δεύτερης και τρίτης ιδιοσυχνότητας με την χρήση του παραπάνω κυκλώματος και στοιχείων.



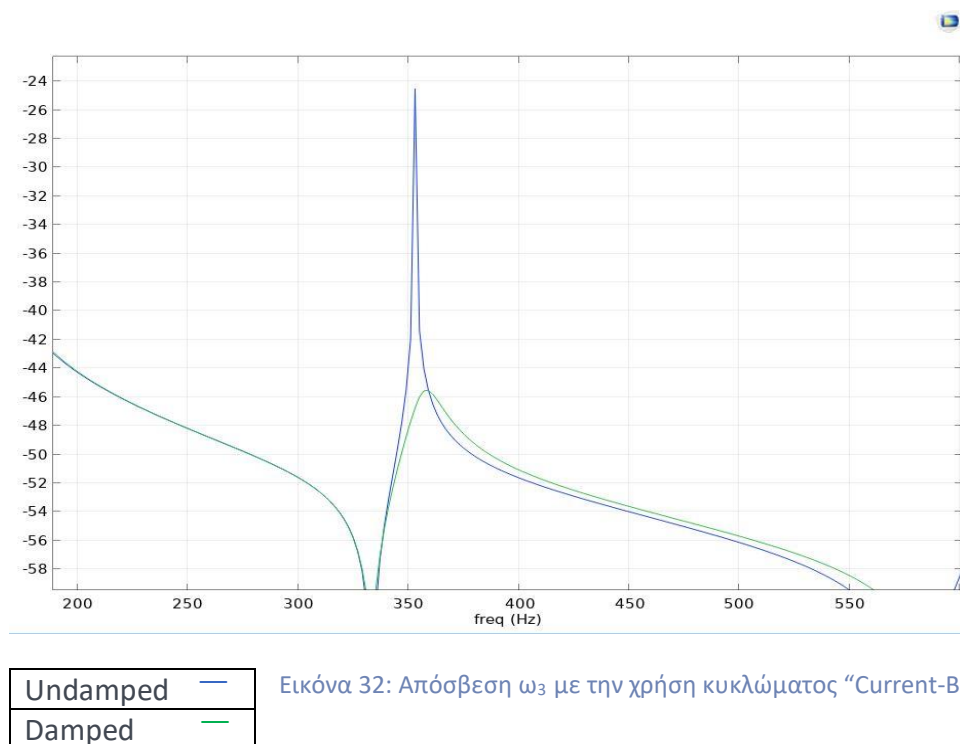
Εικόνα 30: Απόσβεση ω_2 και ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block”.

Πιο αναλυτικά παρατηρούμε στην εικόνα 31 την μείωση της δεύτερης ιδιοσυχνότητας ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” από -16,5 db στα -32db.



Εικόνα 31: Απόσβεση ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block”.

Ενώ στην εικόνα 32 παρατηρούμε την μείωση της τρίτης ιδιοσυχνότητας ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” από -24,5db στα -45,5db.

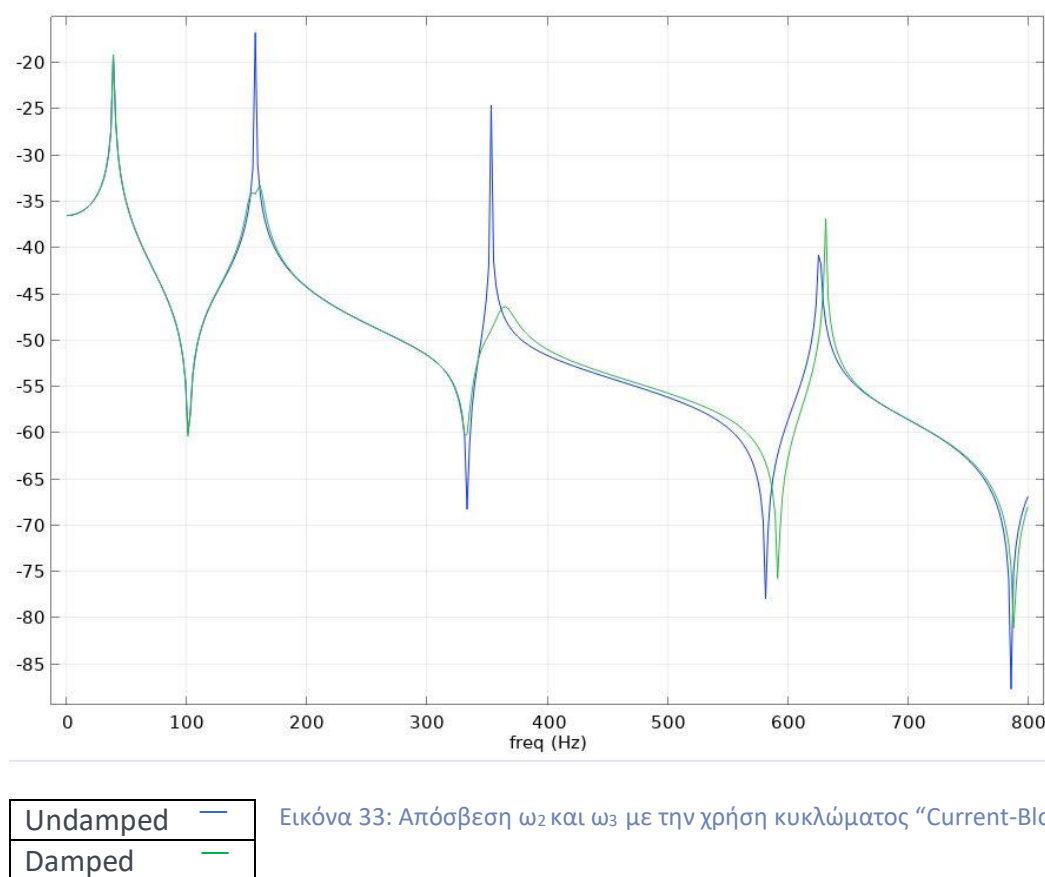


Εικόνα 32: Απόσβεση ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block”.

4.8 Βελτίωση αποτελεσμάτων

Παρόλο που οι αποσβέσεις που επιτυγχάνουν τα κυκλώματα “Current-Block” και “Current-Flow” είναι σημαντικές, μπορούν να γίνουν καλύτερες. Με βάση τα αποτελέσματα που πέτυχαμε με τις παραπάνω παραμέτρους, έγινε προσπάθεια βελτίωσης των αποτελεσμάτων μέσω δοκιμής και σφάλματος.

4.8.1 Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος “Current- Block”



Εικόνα 33: Απόσβεση ω_2 και ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block”.

Τα στοιχεία L_1 και L_2 του κυκλώματος της εικόνας 19 δεν τροποποιήθηκαν καθώς και τα στοιχεία L_2' και C_2 του κυκλώματος αντισυντονισμού καθώς είναι ρυθμισμένα να λειτουργούν σαν ανοιχτοκύκλωμα στην συχνότητα ω_2 . Οι τιμές των R_1 και R_2 τροποποιήθηκαν για να βελτιωθούν τα αποτελέσματα του κυκλώματος ως προς την απόσβεση των ταλαντώσεων.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες των στοιχείων.

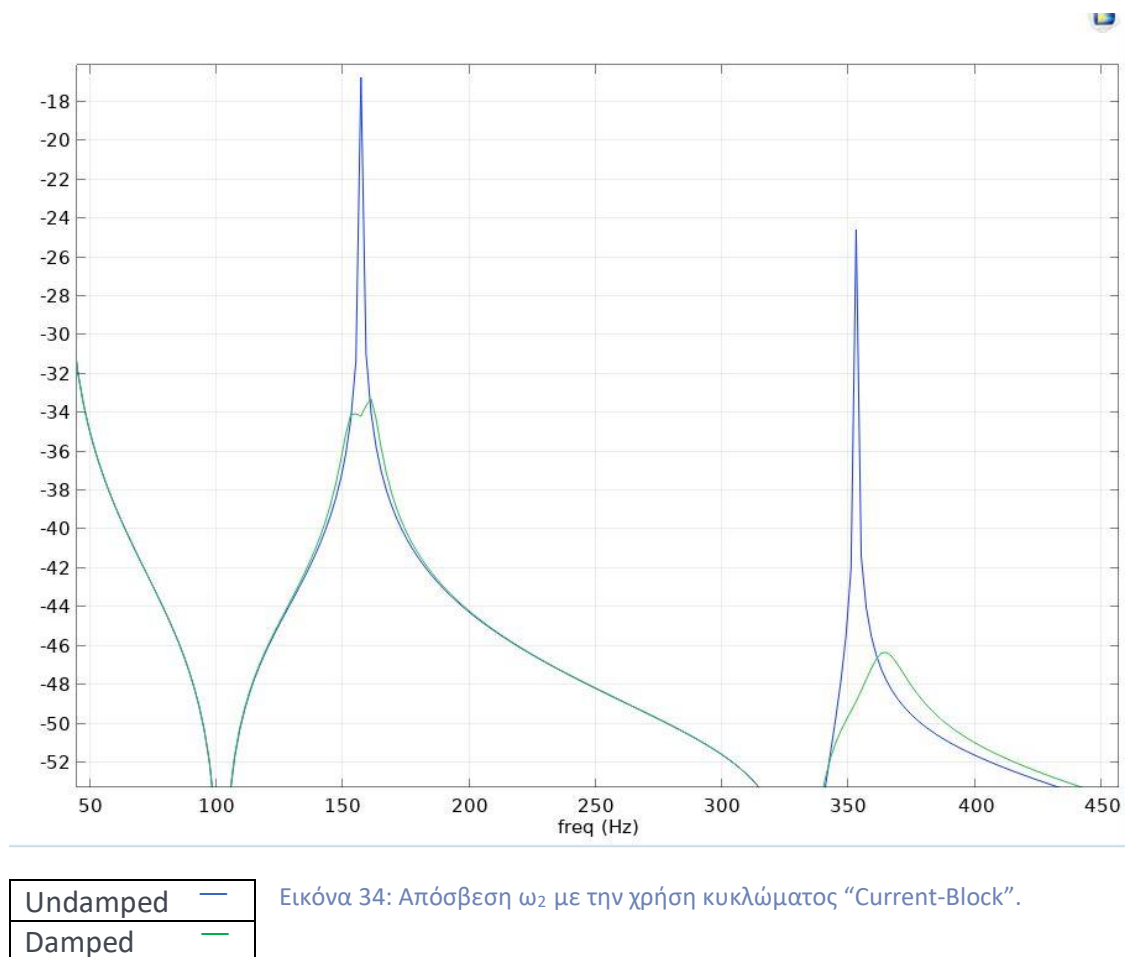
Πηνίο (L)	Τιμή (H)
L_1	9.7
L_2	5.0
L_2'	10.2

Πίνακας 10. Τιμές πηνίων κυκλώματος “Current-Block”.

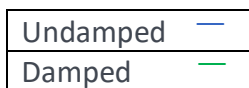
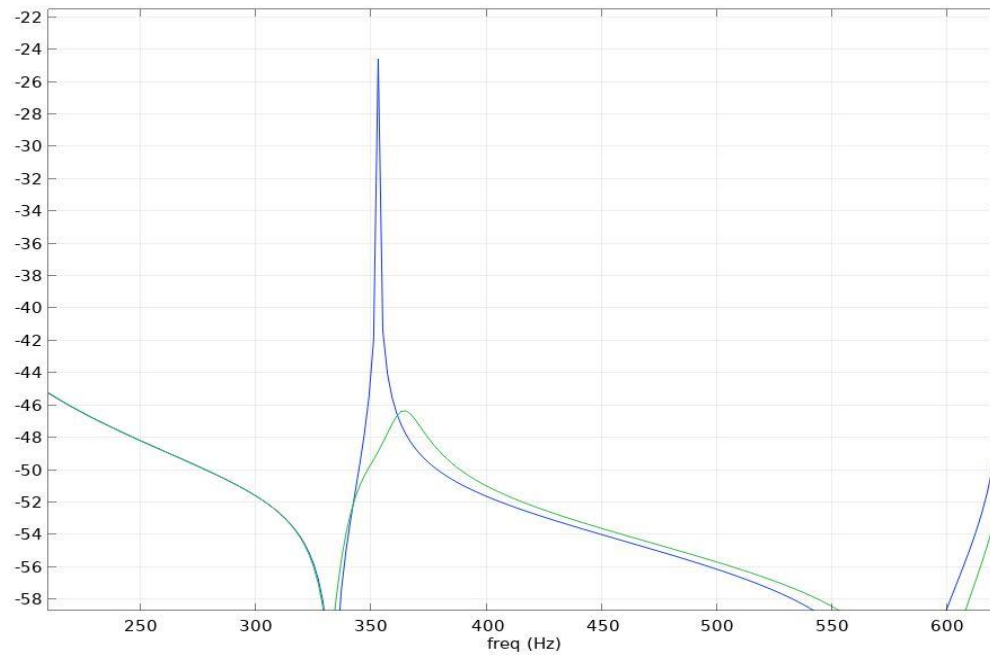
Αντίσταση (R)	Τιμή (Ω)
R_1	1500
R_2	1400

Πίνακας 11. Τιμές αντιστάσεων κυκλώματος “Current-Block”.

Πιο αναλυτικά παρατηρούμε στην εικόνα 34 την μείωση της δεύτερης ιδιοσυχνότητας ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” από -16,5 db στα -34db.

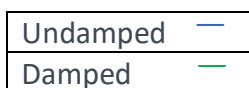
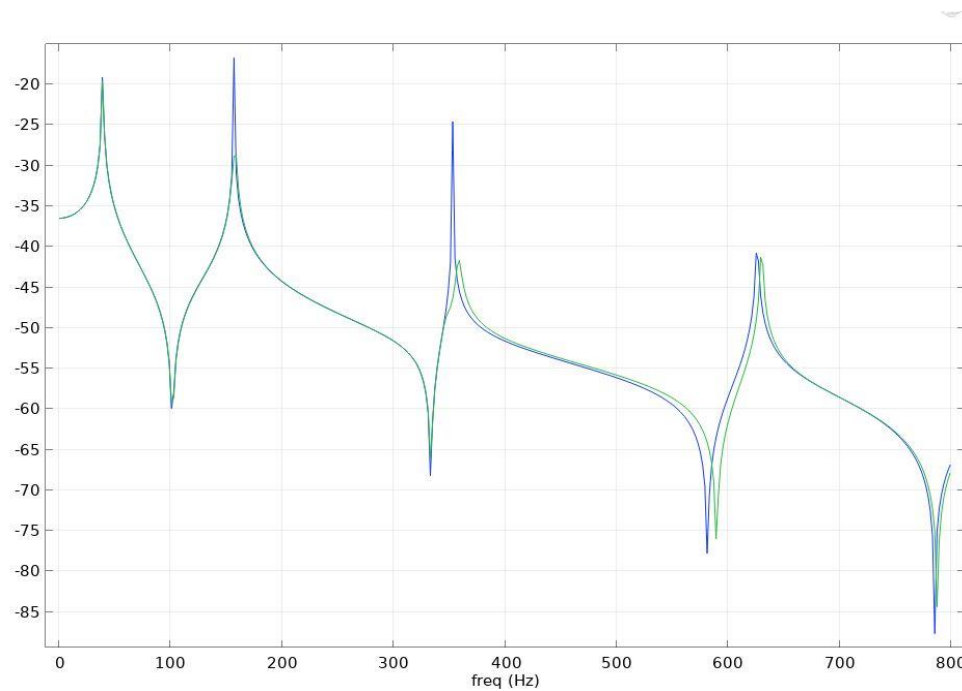


Ενώ στην εικόνα 35 παρατηρούμε την μείωση της τρίτης ιδιοσυχνότητας ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” από -24,5db στα -46db.



Εικόνα 35: Απόσβεση ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block”.

4.8.2 Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος “Current- flow”



Εικόνα 36: Απόσβεση ω_2 και ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow”.

Παρόμοια με το “Current-block” στην προηγούμενη υποενότητα, έτσι και το “Current-flow” της εικόνας 20 τροποποιείται ώστε να γίνει πιο αποδοτικό ως προς την απόσβεση των ταλαντώσεων της αμφιέρειστης δοκού. Και σε αυτή την περίπτωση τα στοιχεία L_1 και L_2 δεν αλλάζουν. Οι δυο πυκνωτές του κυκλώματος C_1 , C_2 παραμένουν ίδιοι και ίσοι με 10nF. Βασιζόμενη στη μεθοδολογία δοκιμής και σφάλματος οι τιμές των R_1 και R_2 τροποποιήθηκαν για να βελτιωθούν τα αποτελέσματα του κυκλώματος ως προς την απόσβεση των ταλαντώσεων.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες των στοιχείων.

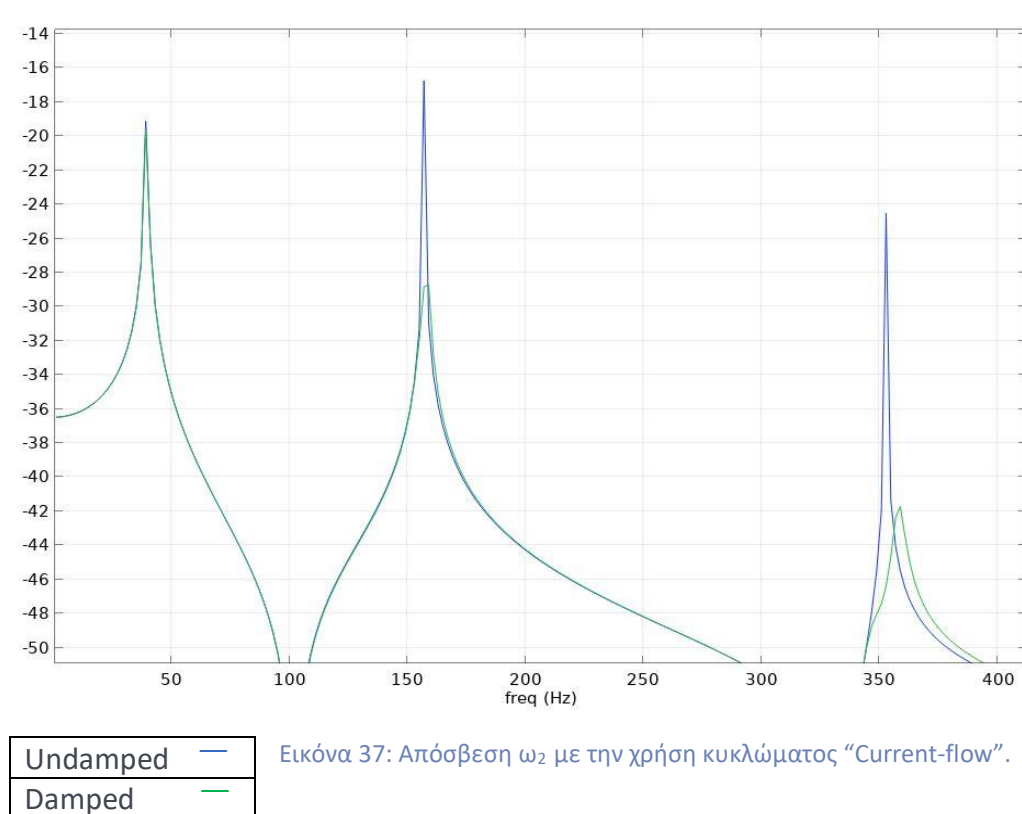
Πηνίο (L)	Τιμή (H)
L_1	112,5
L_2	22,77

Πίνακας 12. Τιμές πηνίων κυκλώματος “Current-flow”.

Αντίσταση (R)	Τιμή (Ω)
R_1	6351
R_2	2021

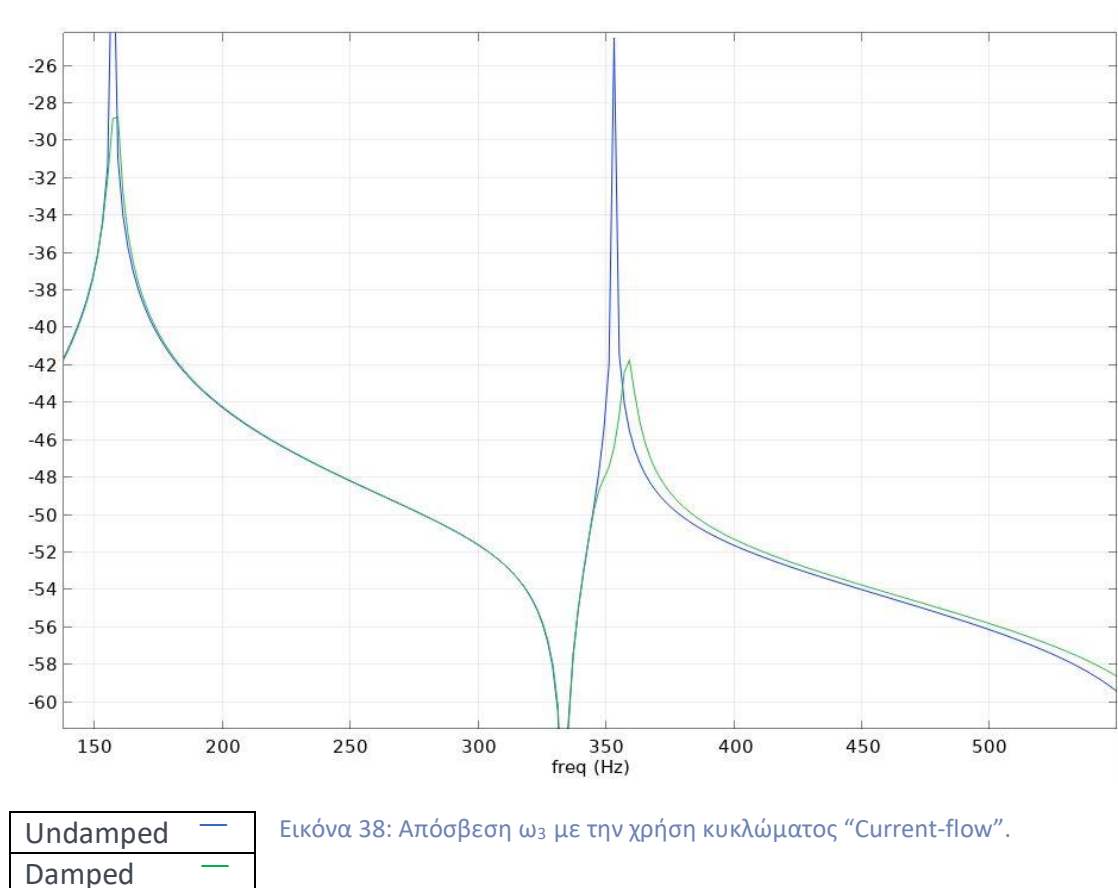
Πίνακας 13. Τιμές αντιστάσεων κυκλώματος “Current-flow”.

Πιο αναλυτικά παρατηρούμε στην εικόνα 37 την μείωση της δεύτερης ιδιοσυχνότητας ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow” από -16,5 db στα -29db.



Εικόνα 37: Απόσβεση ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow”.

Ενώ στην εικόνα 38 παρατηρούμε την μείωση της τρίτης ιδιοσυχνότητας ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow” από -24,5db στα -42db.



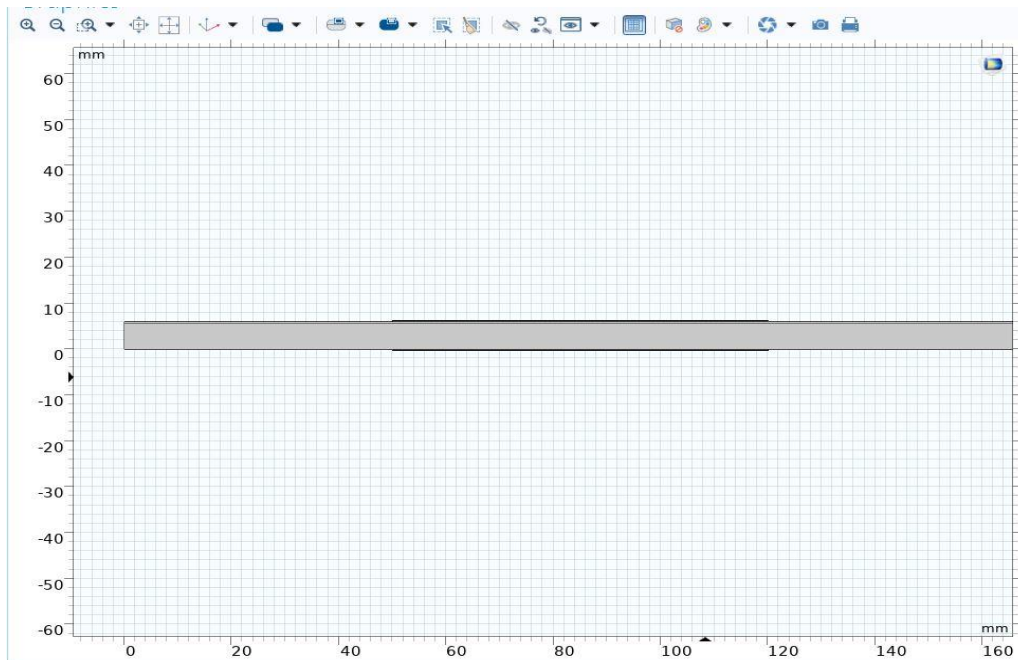
4.9 Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων με αυξητικό υλικό

Αυξητικά είναι τα υλικά με αρνητικό λόγο διόγκωσης ή λόγο Poisson. Δηλαδή υλικά τα οποία επιδεικνύουν τη συμπεριφορά να αυξάνεται η διατομή στην κάθετη διεύθυνση όταν εφελκύνονται και να μειώνεται η διατομή τους όταν συμπιέζονται.

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Αντίσταση στη διείσδυση (indentation behaviour)
2. Αντοχή στη ρωγμή (fracture behaviour)
3. Απόσβεση ταλαντώσεων
4. Μεταβλητή διαπερατότητα (variable permeability)
5. Συγκλαστική καμπυλότητα (synclastic curvature)

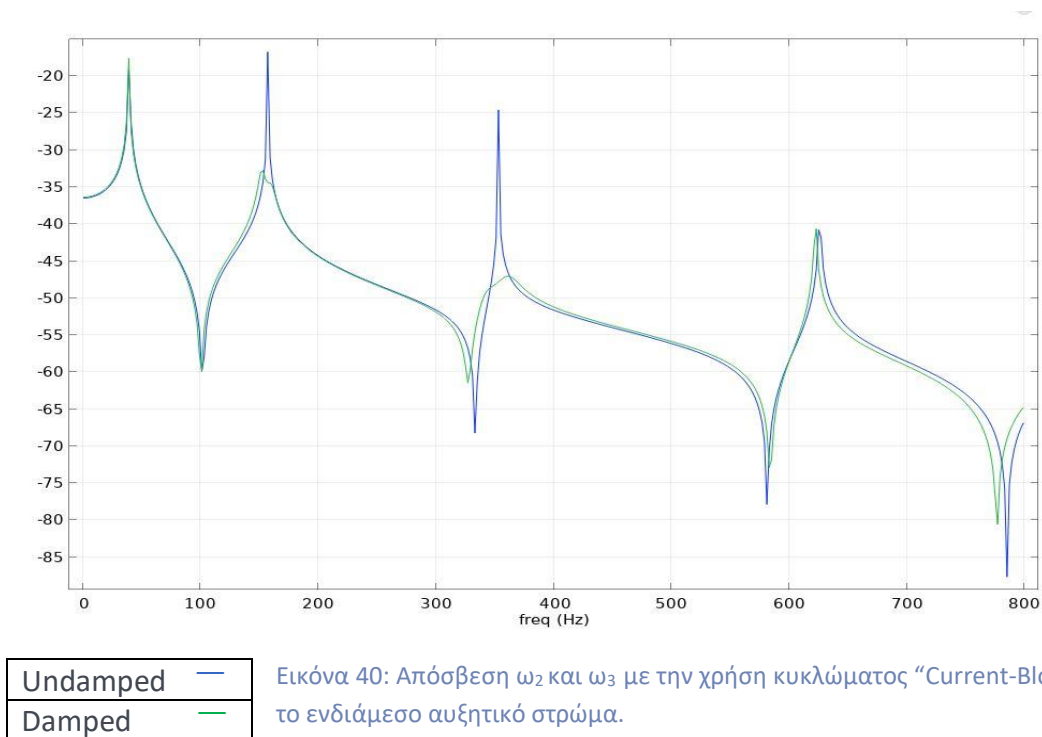
Προσθέσαμε ενδιάμεσα της δοκού και του πιεζοηλεκτρικού μας ένα ενδιάμεσο αυξητικό στρώμα το οποίο διατηρεί τις ιδιότητες υλικού της δοκού αλλά με αρνητικό λόγο Poisson = -0.2 με σκοπό να παρατηρήσουμε αν θα έχουμε καλύτερη απόδοση του συστήματός μας.



Εικόνα 39: Μοντέλου δοκού με δυο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και ενδιάμεσο αυξητικό στρώμα.

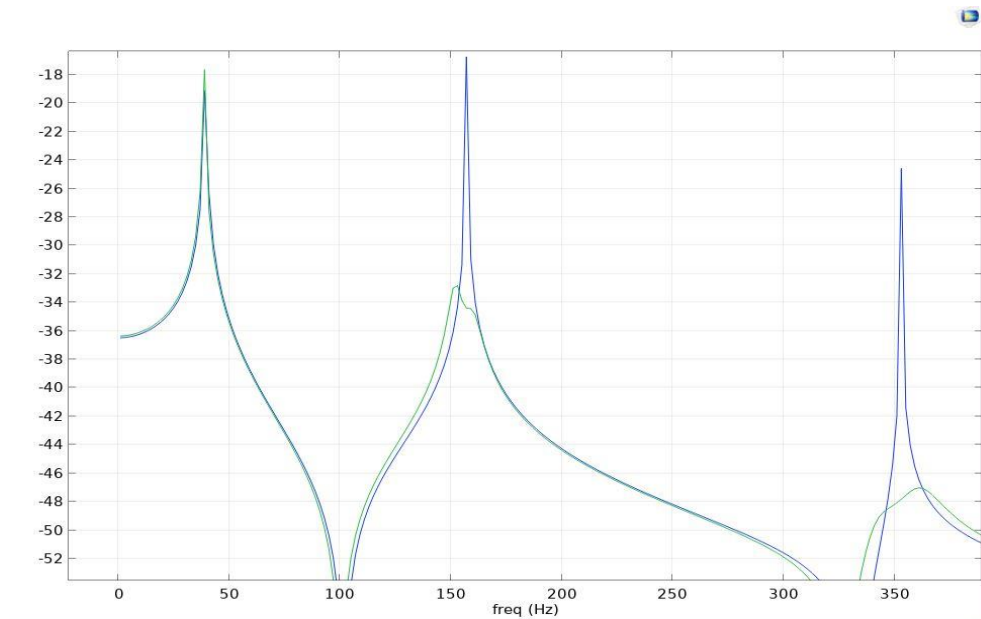
4.9.1 Μέθοδος “Current-Block” με ενδιάμεσο αυξητικό στρώμα

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για την μέθοδο “Current-Block” διατηρώντας τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος ίδιες αλλά έχοντας προσθέσει το ενδιάμεσο αυξητικό στρώμα.



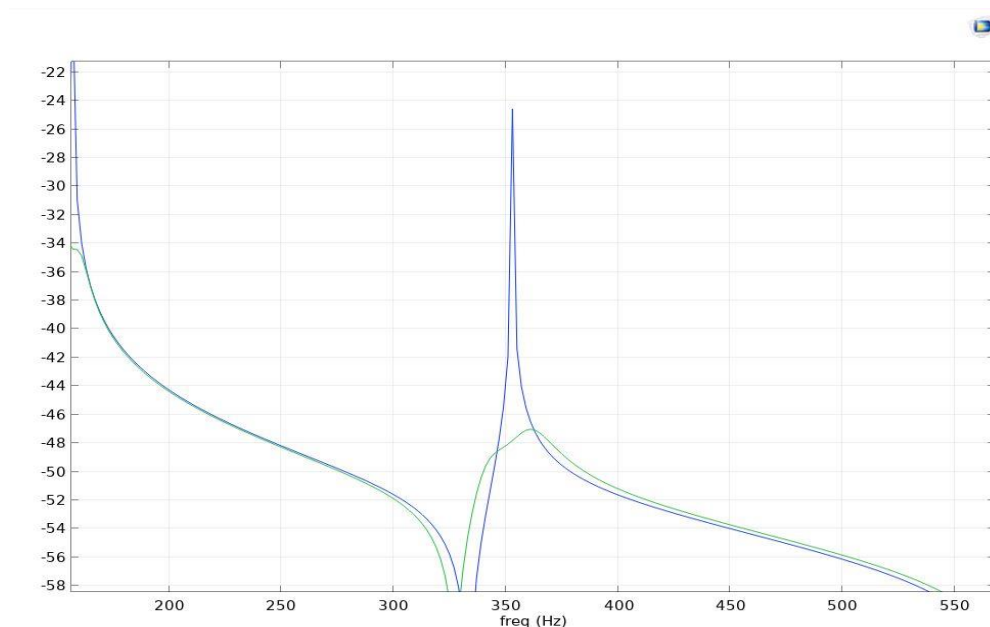
Εικόνα 40: Απόσβεση ω_2 και ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” και το ενδιάμεσο αυξητικό στρώμα.

Πιο αναλυτικά παρατηρούμε στην εικόνα 41 την μείωση της δεύτερης ιδιοσυχνότητας ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” και το ενδιαμέσο αυξητικό στρώμα από -16,5 db στα -33.5 db.



Εικόνα 41: Απόσβεση ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” και το ενδιαμέσο αυξητικό στρώμα.

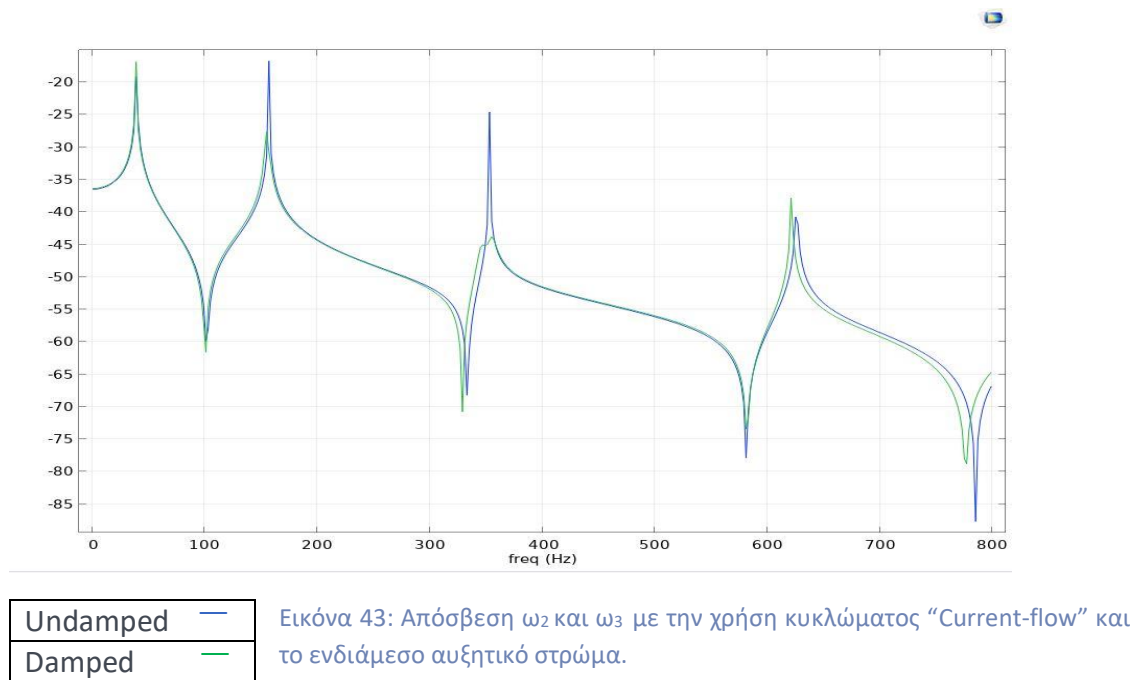
Ενώ παρατηρούμε στην εικόνα 42 την μείωση της τρίτης ιδιοσυχνότητας ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” και το ενδιαμέσο αυξητικό στρώμα από -24,5 db στα -47 db.



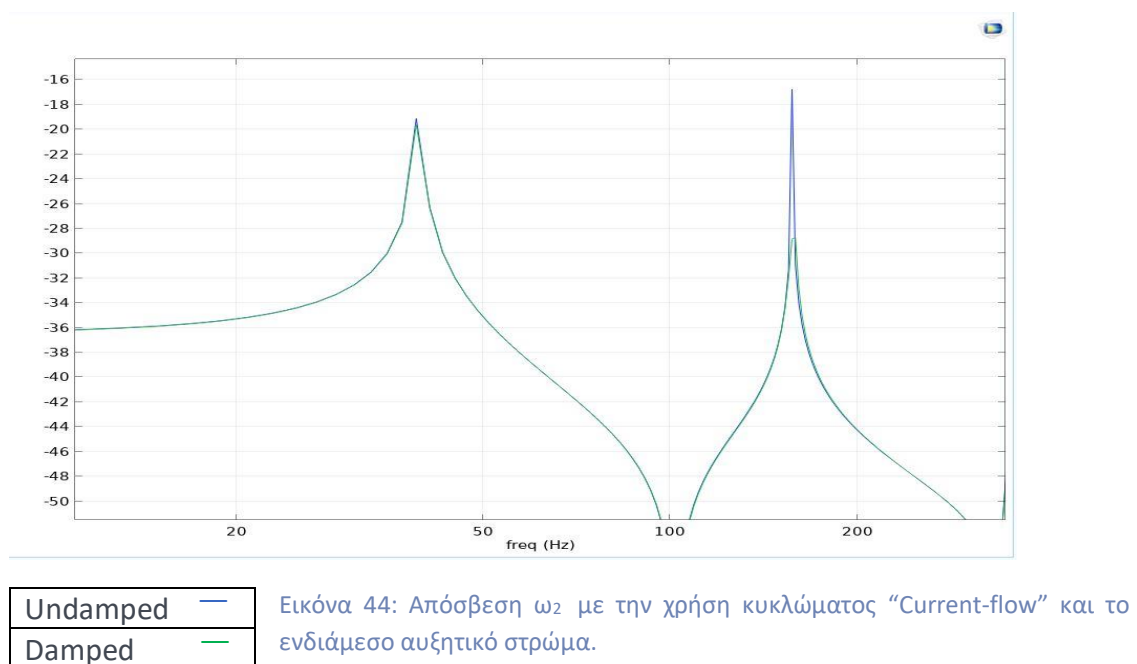
Εικόνα 42: Απόσβεση ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-Block” και το ενδιαμέσο αυξητικό στρώμα.

4.9.2 Μέθοδος “Current-flow” με ενδιάμεσο αυξητικό στρώμα

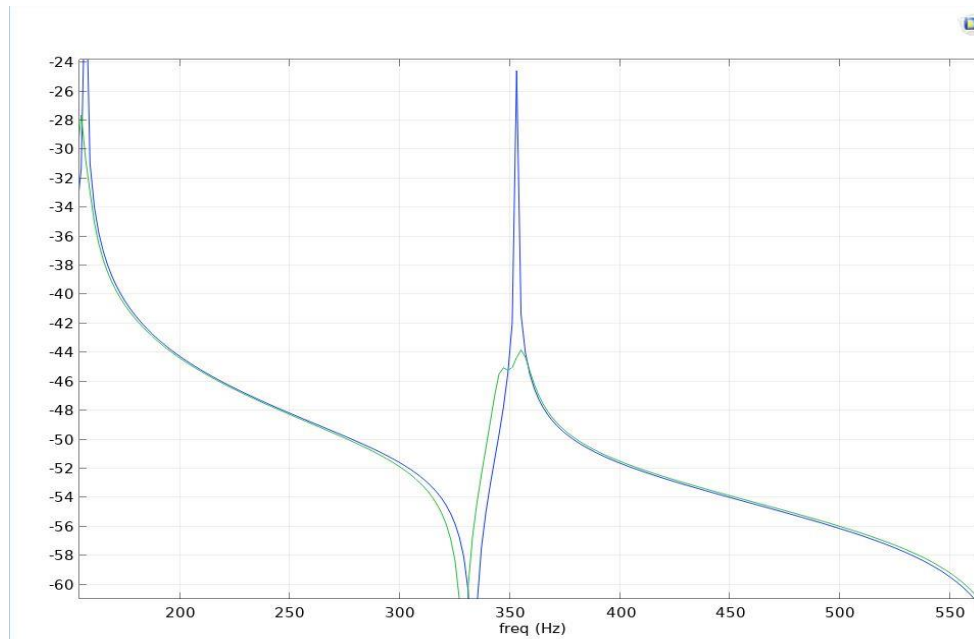
Αντίστοιχα με την μέθοδο “Current-Block” και για την μέθοδο “Current-flow” διατηρήσαμε τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος ίδιες και προσθέσαμε το ενδιάμεσο αυξητικό στρώμα.



Πιο αναλυτικά παρατηρούμε στην εικόνα 44 την μείωση της δεύτερης ιδιοσυχνότητας ω_2 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow” και το ενδιάμεσο αυξητικό στρώμα από -16,5 db στα -29db.



Ενώ παρατηρούμε στην εικόνα 45 την μείωση της τρίτης ιδιοσυχνότητας ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow” και το ενδιαμέσο αυξητικό στρώμα από -24,5 db στα -44 db.



Εικόνα 45: Απόσβεση ω_3 με την χρήση κυκλώματος “Current-flow” και το ενδιαμέσο αυξητικό στρώμα.

Συγκρίνοντας τα βελτιωμένα αποτελέσματα της μεθόδου “Current-Block” και “Current-flow” με τα αποτελέσματα του κυκλώματος “Current-Block” με το ενδιαμέσο αυξητικό στρώμα αλλά και αντίστοιχα του κυκλώματος “Current-flow” με το ενδιαμέσο αυξητικό στρώμα παρατηρήσαμε ότι για την δεύτερη ιδιοσυχνότητα και στις 2 περιπτώσεις δεν καμία αλλαγή αλλά για την τρίτη ιδιοσυχνότητα είχαμε μια μείωση -1db έξτρα για την μέθοδο “Current-Block” ενώ για την μέθοδο “Current-flow” -2db.

	“Current-Block” (Μείωση db)	“Current-Block” με αυξητικό στρώμα (Μείωση db)
ω_1	17	17
ω_2	21.5	22.5

	“Current-flow” (Μείωση db)	“Current-flow” με αυξητικό στρώμα (Μείωση db)
ω_1	12.5	12.5
ω_2	17.5	19.5

Παρόλο που οι διαφορές των τιμών της απόσβεσης δεν είναι μεγάλες ακόμα και αυτή η μικρή μείωση μας δείχνει ότι όντως ένα αυξητικό στρώμα μπορεί να μεγεθύνει τη δράση του πιεζοηλεκτρικού και να βελτιώσει την απόσβεση.

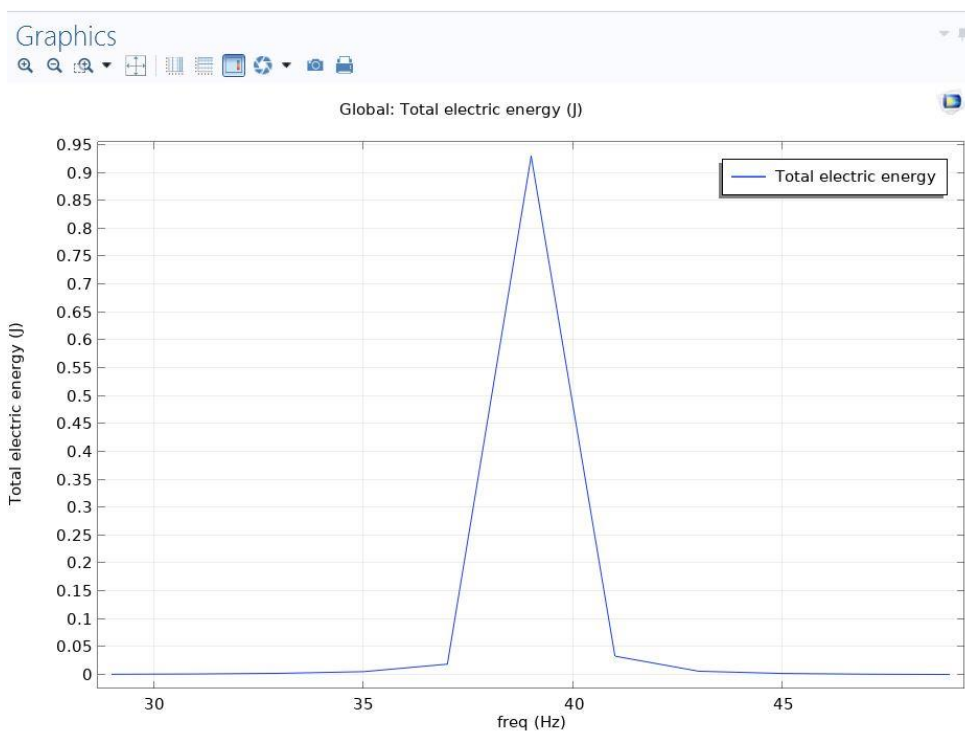
5. Μάστευση ενέργειας

Πέρα από την απόσβεση των ταλαντώσεων, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν χρησιμοποιηθούν και σε πλείστες άλλες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στη μάστευση ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, εκμεταλλευόμαστε τις μηχανικές ταλαντώσεις μιας κατασκευής, για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών συσκευών.

Αυτή η τεχνολογία στο σύνολο της μπορεί να παρέχει καλύτερες και ασφαλέστερες κατασκευές μειώνοντας την κόπωση, τους κραδασμούς και βελτιώνοντας την απόδοση. Καθώς η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος πηγάζει από τις ταλαντώσεις της κατασκευής, ακόμη και μικρά ποσά ενέργειας είναι αρκετά για να κάνουν το σύστημά μας αυτοσυντηρούμενο. Το σύστημά αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε απλές κατασκευές όπως π.χ. δοκοί και πλάκες, ωστόσο μπορεί να επεκταθεί και σε μεγαλύτερες κατασκευές, όπως για παράδειγμα σε πυλώνες ανεμογεννητριών.

Κάποια από τα κριτήρια συλλογής ενέργειας είναι η μάζα και το μέγεθος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Επιπλέον πολύ σημαντικό κριτήριο είναι οι διαστάσεις και οι ιδιότητες της κατασκευής καθώς και η θέση τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων πάνω σε αυτή.

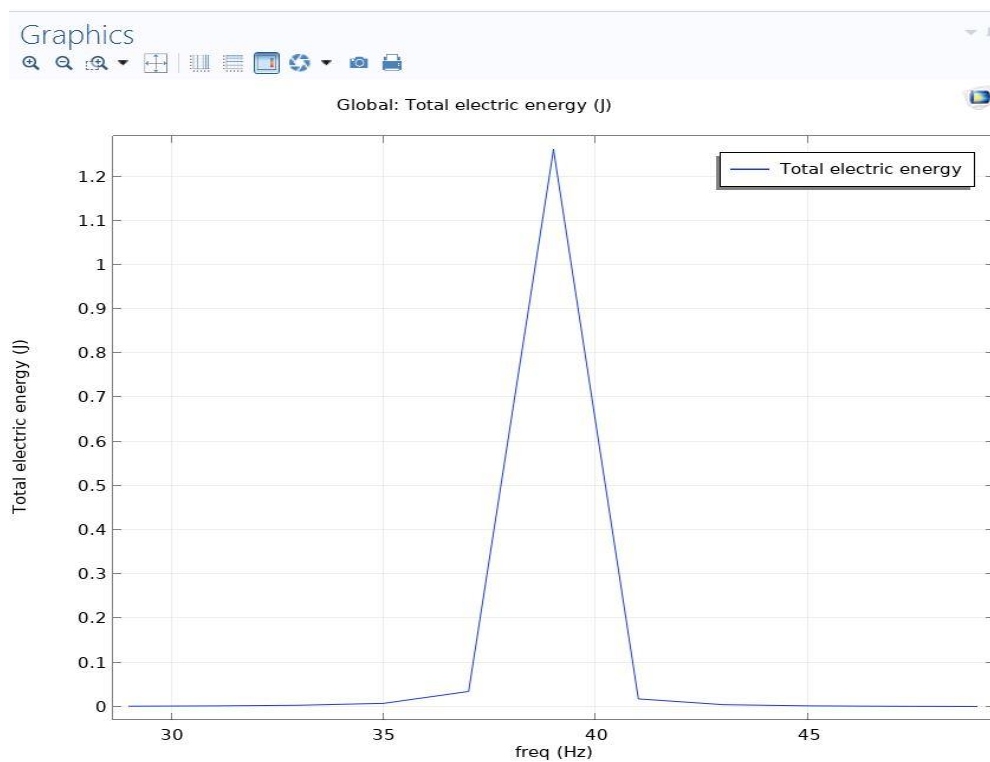
Διατηρώντας την θέση και το μέγεθος των πιεζοηλεκτρικών μας στοιχείων ίδιο με τα προηγούμενα παραδείγματα η συνολική ηλεκτρική ενέργεια φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 46: Συνολική ηλεκτρική ενέργεια

Παρατηρούμε ότι τη μέγιστη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι στα 38 Hz και είναι της τάξης των 0.95 Joule.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο με την αυξητική δομή για να μετρήσουμε την συνολική ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 46: Συνολική ηλεκτρική ενέργεια με αυξητικό

Παρατηρούμε ότι τη μέγιστη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στα 38 Hz και είναι της τάξης των 1.25 Joule. Έχουμε δηλαδή μια αύξηση κατά 36%.

Η χρήση των αυξητικών υλικών στην μάστευση ενέργειας είναι ακόμα σε αρχικό ερευνητικό στάδιο. Παρόλα αυτά τα υλικά αυτά στοχεύουν στην αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η αυξητικής δομής μπορεί από την μια να τεντώσει το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα και έτσι αυξάνει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Από την άλλη, η ενισχυτική κατασκευή έχει χαμηλότερη δυσκαμψία από την υπόλοιπη κατασκευή, με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση πίεσης στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Με συνακόλουθη αύξηση της ενέργειας που συλλέγεται [23].

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν και μελετηθήκαν δύο είδη παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών και συγκεκριμένα τα κυκλώματα “Current-flow” και “Current-Block”. Και στις δυο περιπτώσεις η συνδεσμολογία έγινε με δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τα οποία τοποθετήθηκαν πάνω σε μια αμφιέριστη δοκό με σκοπό την απόσβεση της δεύτερης και της τρίτης ιδιοσυχνότητας.

Τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν ικανοποιητικά καθώς παρατηρήσαμε ικανοποιητική απόσβεση και στους δύο τύπους πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων. Για την ακρίβεια το “Current-flow” κύκλωμα πέτυχε μικρότερη απόσβεση καθώς για την δεύτερη ιδιοσυχνότητα είχαμε μια μείωση 12,5db και για την τρίτη 17,5db ενώ στο “Current-Block” είχαμε μια μείωση 17,5db και 22 db αντίστοιχα. Πράγματι το “Current-Block” κύκλωμα μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα κάνοντάς το προτιμότερο από το “Current-flow” ωστόσο και οι δυο παραπάνω τύποι παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων έχουν περιθώρια βελτίωσης.

Επιπλέον έγινε προσθήκη αυξητικού υλικού (ως επιπλέον στρώμα) για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της κατασκευής. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου χωρίς το αυξητικό υλικό αλλά και με τη χρήση του αυξητικού υλικού παρατηρήσαμε ότι η απόδοση της απόσβεσης αυξήθηκε κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό παρόλα αυτά επιβεβαιώνει την θεωρία ότι τα αυξητικά υλικά συμβάλουν στην απόσβεση ταλαντώσεων.

Τέλος πραγματοποιήθηκε και μια μικρή διερεύνηση πάνω στη μάζα ενέργειας από τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, η οποία μας έδωσε την πληροφορία ότι η χρήση αυξητικών υλικών σε μία δομή με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία οδηγεί και πάλι στην αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Εν κατακλείδι, ως μελλοντική έρευνα προτείνεται μια πιο αποδοτική διαδικασία βελτιστοποίησης ώστε ο προσδιορισμός των στοιχείων να είναι πιο επωφελής. Επιπλέον θα μπορούσε να εφαρμοστεί και κάποια άλλη τεχνική παραδιακλάδωσης ώστε να έχουμε την μέγιστη απόδοση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Βιβλιογραφία

- [1] Δήμητρα Παπαγιάννη, “Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων πιεζοηλεκτρικών υλικών με μεθόδους υπολογιστικής ομογενοποίησης και πεπερασμένων στοιχείων”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, σελ. 29-30, 2019.
- [2] Abdulrahman & Ronald W. Yeung, “Piezoelectric devices for ocean energy: a brief survey”, pages 102-103, November 2014.
- [3] Μπαλάφα Παναγιώτα, “Ομογενοποίηση σύνθετων πολυλειτουργικών υλικών”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, σελ. 14-22, 2017.
- [4] Imran Patel, “Ceramic Based Intelligent Piezoelectric Energy Harvesting Device”, September 2011.
- [5] Gripp, J.A.B. and Rade D.A., “Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review”. Mechanical Systems and Signal Processing 112, pages 359–383, 2018.
- [6] Marakakis K., Tairidis G.K., Koutsianitis P., Stavroulakis G.E. “Shunt piezoelectric systems for noise and vibration control: A review”, Front Built Environ - Computational Methods in Structural Engineering, pages 5-64 (16 pages), 2019
- [7] S. Y. Wu. “Method for multiple mode shunt damping of structural vibration using a single PZT transducer.” In Proc. SPIE Symposium on Smart Structures and Materials – Smart Structures and Intelligent Systems, pages 159–167, March 1998.
- [8] S. Y. Wu and A. S. Bicos, “Structural vibration damping experiments using improved piezoelectric shunts.” In Proc. SPIE Conference on Passive Damping and Isolation, SPIE Vol. 3045, pages 40–50, 1997.
- [9] S. Y. Wu. “Piezoelectric shunts with a parallel R-L circuit for structural damping vibration control”, SPIE Vol. 2720, pages 259-269, 1996.
- [10] S. Behrens and S. O. R. Moheimani, “Optimal resistive elements for multiple shunt damping of a piezoelectric laminate beam.”, In Proc. IEEE Conference on Decision and Control, December 2000.
- [11] Behrens S and Moheimani S O R. “Current flowing multiple mode piezoelectric shunt dampener”, Proc. SPIE Smart Materials and Structures, pp 4697–24 pages 217-226, March 2002.
- [12] A. J. Fleming, S. O. R. Moheimani, and S. Behrens, “Reducing the inductance requirements of piezoelectric shunt damping circuits. Smart Materials and Structures”, 12(1): pages 57–64, February 2003.
- [13] S. Behrens, S. O. R. Moheimani and A. J. Fleming. “Multiple mode current flowing passive piezoelectric shunt controller.”, Journal of Sound and Vibration, 266(5): pages 929-942, October 2003.

- [14] Amr M. Baz, "Active and Passive Vibration Damping", Wiley, Year: 2019
- [15] S. O. R Moheimani, "Experimental verification of the corrected transfer function of a piezoelectric laminate beam.", IEEE Transactions on Control Systems Technology 8, pages 660- 666, July 2000.
- [16] L. Meirovitch, "Elements of Vibration Analysis", McGraw-Hill, Sydney, 2nd ed., 1996.
- [17] S. Behrens, "Passive and semi-active vibration control of piezoelectric laminates", Master's thesis, University of Newcastle, Australia, April 2001.
- [18] S. O. R. Moheimani, A. J. Fleming and S. Behrens, "On the feedback structure of wideband piezoelectric shunt damping systems", Smart Materials and Structures, 2002.
- [19] <https://www.theguardian.com/environment/2009/jun/15/sainsburys-kinetic-plates-speed-bumps> (Προσπελάστηκε 11/11/2020)
- [20] J. J. H. Paulides, J. W. Jansen, L. Encica, E. A. Lomonova and M. Smit, "Human-powered small-scale generation system for a sustainable dance club,"IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, pages 439-444, 2009
- [21] H. Yang, L. Wang, B. Zhou, Y. Wei, Q. Zhao, A preliminary study on the highway piezoelectric power supply system, International Journal of Pavement Research and Technology, VoL. 11, Issue 2, pages 168-175, 2018
- [22] <http://victorstelmasuk.com/project/piezo> (Προσπελάστηκε 11/11/2020)
- [23] William J.G. Ferguson, Yang Kuang, Kenneth E. Evans, Christopher W. Smith, Meiling Zhu, "Auxetic structure for increased power output of strain vibration energy harvester" College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences University of Exeter, UK, 2018