



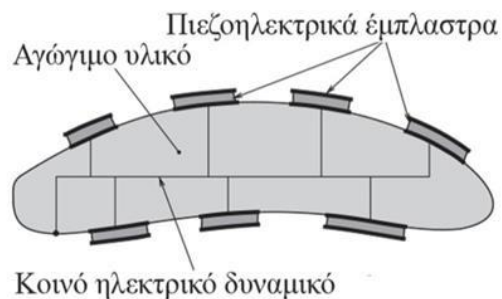
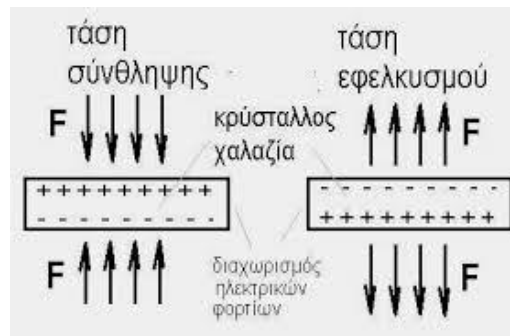
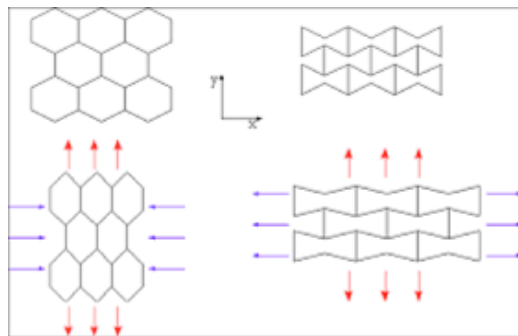
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΑΥΞΗΤΙΚΕΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΕΣ ΚΑΙ ΠΙΕЗОΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ »



ΖΥΜΒΡΑΓΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ, 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πριν την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Πρώτο από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή Γεώργιο Σταυρουλάκη για την πολύτιμη καθοδήγηση του, την υλικοτεχνική υποστήριξη και την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να απευθύνω στους διδάκτορες Κουτσιανίτη Παναγιώτη και Ταϊρίδη Γεώργιο, και τον υποψήφιο διδάκτορα Μαρακάκη Κωνσταντίνο, οι οποίοι στάθηκαν σημαντικοί αρωγοί στην προσπάθειά μου και με υποστήριξαν σε κάθε φάση της πορείας μου, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τις ευχαριστίες μου εκφράζω και στους καθηγητές Αριστομένη Αντωνιάδη και Μπιλάλη Νικόλαο που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Ελένη και Ανδρέα, καθώς και τις αδερφές μου Έφη και Ιωάννα, που με υπομονή και κουράγιο πρόσφεραν την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση για την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο μετριασμός των ταλαντώσεων είναι ένα σημαντικό πεδίο μελέτης, καθώς οι ανεπιθύμητες δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν πολλά προβλήματα στη μηχανική.

Μία τεχνική για την καταστολή των δονήσεων είναι η χρήση περιοδικών μικροδομών, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να εξασθενούν τις δονήσεις σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. Αυτά τα αποκαλούμενα κενά ζώνης σχηματίζονται μέσω διαφορετικών μηχανισμών, που εμποδίζουν τη διάδοση των ελαστικών κυμάτων.

Μία άλλη τεχνική είναι η χρήση παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, όπου στην περίπτωση αυτή η μηχανική ενέργεια των ταλαντώσεων μετατρέπεται σε ηλεκτρική και στη συνέχεια καταναλώνεται σε κάποια ηλεκτρική αντίσταση, με αποτέλεσμα την απόσβεση των ταλαντώσεων.

Στην παρούσα έρευνα θα μελετηθεί η συμπεριφορά αυτών των περιοδικών δομών και των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, καθώς και ο συνδυασμός των δύο τεχνικών, σε πλέγμα υπό αρμονική φόρτιση και θα αξιολογηθεί η ικανότητα εξασθένησης ταλαντώσεων στο πεδίο των συχνοτήτων.

Για τη μοντελοποίηση του δοκιμίου, των συνοριακών συνθηκών, των φορτίσεων, την επίλυση του συνοριακού προβλήματος των συνδυασμένων πεδίων και την εξαγωγή αποτελεσμάτων θα γίνει χρήση κατάλληλου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

SUMMARY

Vibration mitigation is an important field of study, as unwanted vibrations can cause many engineering problems.

One technique for suppressing vibrations is the use of periodic microstructures, which are capable of attenuating vibrations in specific frequency bands. These so-called band gaps are formed by different mechanisms that prevent the propagation of elastic waves.

Another technique is the use of branched piezoelectric elements, where in this case the mechanical energy of the vibrations is converted to electrical energy and then consumed at some electrical resistance, resulting in the damping of the vibrations.

The present study will study the behavior of these periodic structures and piezoelectric elements, as well as the combination of the two techniques, in a harmoniously charged grid, and evaluate the attenuation of the vibrations in the frequency domain.

An appropriate finite element program will be used to model the test piece, the boundary conditions, the loads, solve the boundary problem of the combined fields and extract the results.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	6
2	ΘΕΩΡΙΑ	8
2.1	Απόσβεση μέσω παθητικών πιεζοηλεκτρικών διακλαδώσεων	8
2.1.1	Μαθηματικό Μοντέλο.....	9
2.2	Αυξητικές μικροδομές.....	10
2.2.1	Αυξητικά υλικά * (AUXETIC Materials):	10
2.2.2	Πλεονεκτήματα των αυξητικών υλικών συγκρινόμενα με τα συμβατικά υλικά.	12
2.2.3	Ιδιότητες των αυξητικών υλικών.....	13
2.2.4	Εφαρμογές αυξητικών υλικών	13
3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	13
3.1	Διαδικασία μοντελοποίησης σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων	13
3.2	Μοντελοποίηση δομών με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.....	15
3.2.1	Μοντελοποίηση δοκαριού με δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα	15
3.2.2	Αυξητική δομή αστεριού με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.....	20
3.3	Βέλτιστες Μικροδομές	32
3.3.1	Βέλτιστη Δομή «1»	33
3.3.2	Βέλτιστη Δομή «2»	36
3.3.3	Βέλτιστη Δομή «3»	38
3.3.4	Σύνθεση πλέγματος από τρία διαφορετικά πλέγματα σε σειρά	40
3.3.5	Σύγκριση δομών «1», «2» ΚΑΙ «3»	41
3.3.6	Επιπλέον συγκρίσεις	41
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	43
5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΕΙΑ	43

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Κατηγορίες παθητικών κυκλωμάτων διακλάδοσης.....	9
Εικόνα 2. Συμπεριφορά συμβατικών και αυξητικών υλικών σε εφελκυσμό.	11
Εικόνα 3. Εξαγωνική αυξητική δομή	11
Εικόνα 4. Παραδείγματα αυξητικών δομών [19].....	12
Εικόνα 5. Μοντέλο δοκαριού με δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα-πραγματικές διαστάσεις.	15
Εικόνα 6. Σύνδεση ηλεκτρικού κυκλώματος στο μοντέλο του δοκαριού.....	15
Εικόνα 7. Μοντέλο αυξητικής δομής αστεριού με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα.	21
Εικόνα 8. Μοντέλο αυξητικής δομής 2 αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στο κάθε αστέρι.	24
Εικόνα 9. Μοντέλο αυξητικής δομής 5 αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στο κάθε αστέρι.	26
Εικόνα 10. Μοντέλο αυξητικής δομής 25 αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στο κάθε αστέρι.	30
Εικόνα 11. Απλή δομή δύο υλικών	33
Εικόνα 12. Βέλτιστη δομή 1	33
Εικόνα 13. Πλέγμα 5x5 στοιχείων Βέλτιστης δομής 1	34
Εικόνα 14. Πλέγμα 0.150 m x 0.450 m με μικροδομές τύπου 1	35
Εικόνα 15. Βέλτιστη δομή 2	36
Εικόνα 16. Πλέγμα 5x5 στοιχείων βέλτιστης δομής 2	37
Εικόνα 17. Βέλτιστη δομή 3	38
Εικόνα 18. Πλέγμα 5x5 στοιχείων Βέλτιστης δομής 3	39
Εικόνα 19. Πλέγμα τριών δομών σε σειρά (δομή 1- δομή 2- δομή 3).....	40

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τη σημερινή εποχή όπου οι περισσότερες δραστηριότητες του ανθρώπου επηρεάζονται ή εξαρτώνται από τεχνολογικό εξοπλισμό ή συσκευές, έχει γίνει ακόμα πιο επιτακτική ανάγκη η εύρυθμη λειτουργία τους. Ένας από τους παράγοντες φθοράς αυτών των συσκευών, που καλούνται να ρυθμίσουν οι μηχανικοί είναι και η διάδοση των ταλαντώσεων.

Οι ταλαντώσεις βέβαια μπορούν να έχουν αρνητικές συνέπειες τόσο στις συσκευές όσο και στους ανθρώπους που τις χρησιμοποιούν. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η χρήση ενός κρουστικού μηχανήματος από έναν οικοδόμο για την αφαίρεση του σοβά από έναν τοίχο.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να διερευνηθούν καινοτόμες μέθοδοι και συνδυασμοί μεθόδων ώστε να επιτευχθεί μείωση των ταλαντώσεων σε κάποιες συχνότητες λειτουργίας ή σε ένα εύρος συχνοτήτων.

Τα ερωτήματα που τέθηκαν ήταν αρχικά αν μπορούμε χρησιμοποιώντας βελτιωμένες μικροδομές ή αυξητικές μικροδομές να αποκόψουμε τη διάδοση των ταλαντώσεων σε μία διεύθυνση. Στη συνέχεια επόμενο ερώτημα ήταν πώς επιδρά σε ένα σύστημα η χρήση παραδιακλαδομένων πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και κατά πόσο αυτά είναι αποτελεσματικά στη μείωση των ταλαντώσεων. Τέλος, διερωτηθήκαμε εάν θα μπορούσαμε με το συνδυασμό των δύο αυτών μεθόδων να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα.

Όσον αφορά τις μικροδομές θα δοκιμαστούν και θα διερευνηθούν σύνθετες βελτιωμένες μικροδομές που θα αποτελούνται από δύο υλικά - ένα μαλακό και ένα σκληρό. Αυτές οι μικροδομές έχουν παράξενα σχήματα, είναι για παράδειγμα αστεροειδούς μορφής ή μορφής κυψέλης, όπου σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει μια μήτρα από σκληρό υλικό μέσα στην οποία είναι το μαλακό υλικό. Σε αυτές τις μικροδομές αποκόπτονται τελείως οι ταλαντώσεις σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, λόγω πολύπλοκων μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα, με αποτέλεσμα να μη γίνεται διάδοση των ταλαντώσεων στην κατασκευή. Δηλαδή το κύμα εισέρχεται στην κατασκευή αλλά δε διαδίδεται, οπότε γίνεται απόσβεση των ταλαντώσεων.

Στη μέθοδο με τα παραδιακλαδωτικά η δομή είναι η παρακάτω: Πάνω στην κατασκευή προστίθενται επιθέματα πιεζοηλεκτρικών στοιχείων τα οποία συνδέονται σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, που αποτελείται από μία αντίσταση και ένα πηνίο σε σειρά. Θα γίνει εύρεση των παραμέτρων R (αντίσταση) και L (συντελεστής αυτεπαγωγής) του ηλεκτρικού κυκλώματος, χρησιμοποιώντας μεθόδους βελτιστοποίησης. Επιπλέον, στο συνδυασμό των μεθόδων θα επιλεγεί μία μικροδομή στην οποία θα κολληθούν πιεζοηλεκτρικά στοιχεία συνδεδεμένα στο προαναφερθέν ηλεκτρικό κύκλωμα και θα διερευνηθεί η απόκριση του συστήματος.

Η έρευνα αυτή αφορά τη μελέτη ενός συνδυασμένου προβλήματος μηχανικής και ηλεκτρισμού.

1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά εργασίες που μελετούν το παραδιακλαδωμένο σύστημα συντονισμού για την απόσβεση των ταλαντώσεων.

Στο έργο των Hagood & von Flotow (1991) μελετούνται τα μαθηματικά μοντέλα για την απόσβεση ταλαντώσεων κατασκευών με πιεζοηλεκτρικά υλικά και παθητικά ηλεκτρικά δίκτυα. Το παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα προσθέτει κάποια ακαμψία που εξαρτάται από τη συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος. Στην εργασία αυτή, το γενικό μοντέλο εξειδικεύεται για δύο διαφορετικά ηλεκτρικά κυκλώματα: ένα μόνο με αντίσταση (παραδιακλάδωση αντίστασης) και ένα με αντίσταση και πηνίο (παραδιακλάδωση συντονισμού). Το υλικό παρουσιάζει ιξωδοελαστική συμπεριφορά στην περίπτωση της αντιστάσεως. Όταν πρόκειται για την παραδιακλάδωση συντονισμού με αντίσταση και πηνίο, εισάγεται στο σύστημα ηλεκτρικός συντονισμός, ο οποίος με τη σειρά του μπορεί να συντονιστεί κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο με το συντονισμό της κατασκευής. Πραγματοποιείται ένα πείραμα σε μια δοκό πρόβολο και τα αποτελέσματα επικυρώνουν τα παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά μοντέλα απόσβεσης.

Οι Andreaus & Porfiri (2007) ανέλυσαν το πρόβλημα της επίδρασης των μεταβολών της ηλεκτρικής εμπεδήσης σε σχέση με τη βέλτιστη επιλογή της σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο για το συντονισμένο πιεζοηλεκτρικό σύστημα παραδιακλάδωσης. Το προκύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται χρησιμοποιώντας τις θεμελιώδεις ιδιότητες της συνάρτησης μεταφοράς συστήματος. Παράγονται και επικυρώνονται μέσω αριθμητικών δοκιμών, απλοί τύποι κλειστής μορφής, για την ποσοτικοποίηση της απώλειας απόδοσης λόγω των ντετερμινιστικών μεταβολών των ηλεκτρικών στοιχείων.

Στην εργασία των Thomas, et al. (2009) έχουμε μια ακόμα αποτελεσματική διατύπωση με πεπερασμένα στοιχεία, μαζί με ένα σωστά οριζόμενο σύνολο ηλεκτρομηχανικών συντελεστών σύζευξης για μια ελαστική δομή με παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αριθμητική προσομοίωση για εφαρμογές ελέγχου, ανίχνευσης και μείωσης των ταλαντώσεων. Παράλληλα, προτείνεται ένα μοντέλο μειωμένης τάξης με τεχνικές ιδιομορφικής ανάλυσης για να δείξει ότι οι συντελεστές ηλεκτρομηχανικής σύζευξης είναι οι κύριοι παράμετροι στη σύζευξη. Τα αποτελέσματα επαληθεύονται από μια εφαρμογή σε μια δοκό πρόβολο.

Στην εργασία των Deü, et al., (2014) προτείνεται μια διατύπωση με πεπερασμένα στοιχεία, καθώς και ένα μοντέλο μειωμένης τάξης, για την απόσβεση δονήσεων με πιεζοηλεκτρικά παραδιακλαδωμένα σε δομικό-ακουστικά συστήματα. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για την προσέγγιση ενός πλήρως συζευγμένου ηλεκτρομηχανικού συστήματος χρησιμοποιώντας τεχνικές ιδιομορφικής ανάλυσης. Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, μαζί με ενσωματωμένα παραδιακλαδωμένα κυκλώματα συντονισμού, εξετάζονται για την καταστολή των ταλαντώσεων του συζευγμένου συστήματος. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζουν την ακρίβεια και την προσαρμοστικότητα του προτεινόμενου μοντέλου μειωμένης τάξης όσον αφορά την απαιτούμενη εξασθένιση.

Από τον Silva, et al. (2014) παρουσιάζεται η αριθμητική μοντελοποίηση για τη μείωση των θορύβων και των κραδασμών σε λεπτές δομές για περιοχές χαμηλών συχνοτήτων. Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τα οποία συνδέονται με δύο τύπους ηλεκτρικών κυκλωμάτων (ένα με αντίσταση και ένα συντονισμού). Οι παράμετροι της θέσης τοποθέτησης και του μεγέθους των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων βελτιστοποιούνται με στόχο την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων όσον αφορά τη μείωση των δομικών δονήσεων και της ακουστικής ακτινοβολίας.

Μια λεπτομερής μελέτη η οποία επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών παραδιακλάδωσης με εμπέδηση αντίστασης-πηνίου L-R παρουσιάζεται στο (Berardengo, Cigada, Manzoni, & Vanali, 2015). Συγκεκριμένα, διάφοροι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των τιμών των ηλεκτρικών εξαρτημάτων της σύνθετης εμπέδηση παραδιακλάδωσης προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση και να διασφαλιστεί η ευρωστία ολόκληρου του συστήματος. Οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται είναι σε συμφωνία με τη θεωρία απόσβεσης μαζών, η οποία χρησιμοποιείται και για σύγκριση. Τα αναλυτικά και αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από αυτά ενός αντίστοιχου πειράματος.

Όσον αφορά τις περιοδικές και αυξητικές μικροδομές ενδεικτικές εργασίες που έχουν διερευνήσει τη δυναμική συμπεριφορά τους είναι οι παρακάτω:

Οι B.R. Mace, E Manconi (2008) και οι L. Jianbao, W. Yue-Sheng, Z. Chuanzeng (2010) μελέτησαν τη διάδοση του κύματος για δημιουργία band gap σε διδιάστατες μικροδομές εξαγωνικών, τετραγωνικών, τριγωνικών και άλλων μορφών. Βασικό συμπέρασμα των εργασιών αυτών είναι ότι ο μηχανισμός διάδοσης του κύματος εξαρτάται από το σχήμα της μικροδομής.

Οι W. Yifan, B. Ramirez, K. Carpenter, C. Naify, D. C. Hofmann, C. Daraio (2019) μελέτησαν τη διαμόρφωση μικροδομών και πλεγμάτων με χρήση σύγχρονων μεθόδων, με βασική παράμετρο την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Οι N. Aravantinos-Zafiris, and M. M. Sigalas (2015) διερεύνησαν την απορρόφηση σεισμικών ταλαντώσεων σε κτιριακές δομές χρησιμοποιώντας περιοδικές κατασκευές μεγάλης κλίμακας.

Οι W. Chen, X. Tian, R. Gao, S. Liu (2018) μελετούν τη δημιουργία περιοχών band gap με χρήση αυξητικών υλικών, και πως επιδρά το γέμισμα τη κατασκευής από πολυμερές υλικό στις περιοχές αυτές.

Ο J. Hubert (2017) μελέτησε τη συμπεριφορά κατασκευών έπειτα από την εισαγωγή αυξητικών επιθεμάτων σε δομικά υλικά.

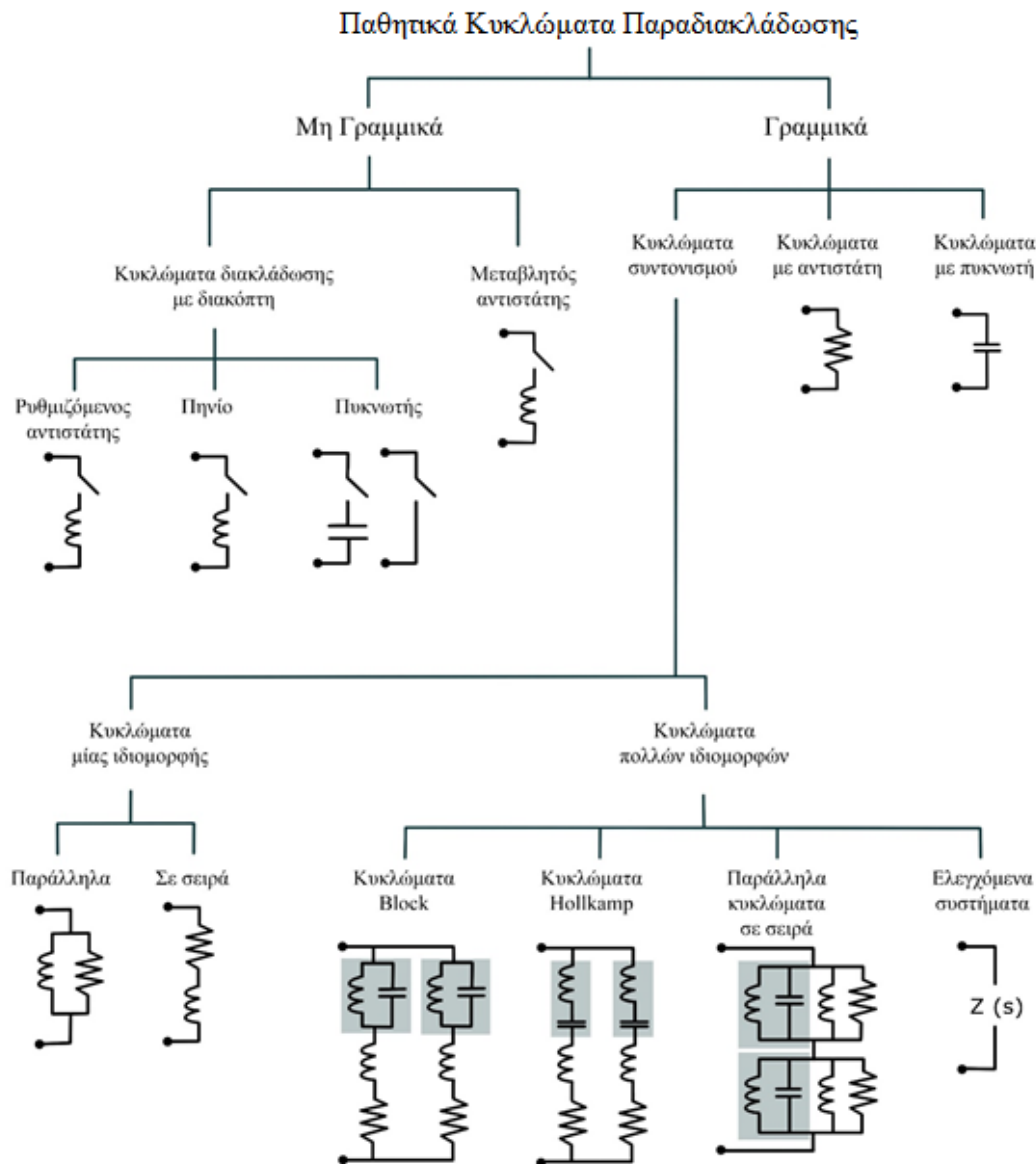
2 ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Απόσβεση μέσω παθητικών πιεζοηλεκτρικών διακλαδώσεων

Η απόσβεση μέσω πιεζοηλεκτρικής διακλάδωσης είναι μια δημοφιλής μέθοδος για την απορρόφηση των κραδασμών σε ελαστικές κατασκευές. Η τεχνική χαρακτηρίζεται από τη σύνδεση ενός ηλεκτρικού στοιχείου (π.χ. μιας ηλεκτρικής αντίστασης) με ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα που βρίσκεται μονολιθικά τοποθετημένο σε μια ταλαντούμενη κατασκευή. 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 και μπορούν να αυξάνουν σημαντικά την απόσβεση των εύκαμπτων ελαστικών κατασκευών. Το κύριο μειονέκτημα που συνδέεται με τα κυκλώματα συντονισμού είναι η απαίτηση σε πολύ υψηλές τιμές επαγωγής.

Αυτά τα συστήματα χαρακτηρίζονται από την ανάγκη για συγκεκριμένες τιμές επαγωγής και αντίστασης προκειμένου να επιτευχθούν οι βέλτιστες τιμές από την άποψη της εξασθένισης των ταλαντώσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το παθητικό σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί την αρχή των δυναμικών αποσβεστήρων ρυθμίζοντας τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος παραδιακλάδωσης στη φυσική συχνότητα του δομικού συστήματος. Αυτά τα κυκλώματα είναι ισοδύναμα με αποσβέστηρες κραδασμών (μάζες καθυσύχασης) εντός ενός περιορισμένου εύρους συχνοτήτων.

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.



Εικόνα 1. Κατηγορίες παθητικών κυκλωμάτων διακλάδωσης [30]

Στην περίπτωση που θα εξετάσουμε γίνεται χρήση ενός γραμμικού κυκλώματος παραδιακλάδωσης τύπου συντονισμού (βλ. εικόνα 1), όπου τα στοιχεία του κυκλώματος, πηνίο και αντίσταση, είναι συνδεδεμένα σε σειρά.

2.1.1 Μαθηματικό Μοντέλο

Στη σχέση (1) ορίζεται η κινηματική εξίσωση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που περιλαμβάνει το μηχανικό μοντέλο, τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και την επίδραση του ηλεκτρικού κυκλώματος, που αποτελείται από μία ωμική αντίσταση R και ένα πηνίο αυτεπαγωγής L .

$$M\ddot{X} + D\dot{X} + KX = \tilde{F} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
X &= \begin{pmatrix} U \\ Q \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} M_m & 0 \\ 0^T & L \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0^T & R \end{pmatrix}, \\
K &= \begin{pmatrix} \hat{K}_m & (K_1 + K_2)/C \\ (K_1^T + K_2^T)/C & 2/C \end{pmatrix}, \quad \tilde{F} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{2}$$

όπου:

Τα ηλεκτρικά στοιχεία εισάγονται στο γενικό ηλεκτρομηχανική εξίσωση με τα παρακάτω μητρώα:

Q = διάνυσμα φορτίου, L = αυτεπαγωγή, R =ωμική αντίσταση, K_1 = μητρώο ηλεκτρομηχανικής σύζευξης 1^{ου} επιθέματος, K_2 = μητρώο ηλεκτρομηχανικής σύζευξης 2^{ου} επιθέματος, C =χωρητικότητα υλικού πιεζοηλεκτρικού.

Ενώ το μηχανικό μοντέλο εισάγεται με τα εξής μητρώα:

U = διάνυσμα μετατόπισης μηχανικού μοντέλου, M_m = μητρώο μάζας μηχανικού μοντέλου, K_m = μητρώο δυσκαμψίας μηχανικού μοντέλου, F = διάνυσμα μηχανικής δύναμης,

Τέλος το συνολικό μοντέλο περιγράφεται με τα συγκεντρωτικά μητρώα:

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

Παρατηρούμε ότι το πηνίο βρίσκεται στον πίνακα της μάζας και ο αντιστάτης σε αυτόν της απόσβεσης. Επίσης, ο πίνακας της δυσκαμψίας τροποποιείται αντίστοιχα και περιλαμβάνει πλέον τη σύζευξη όπως και τη χωρητικότητα των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

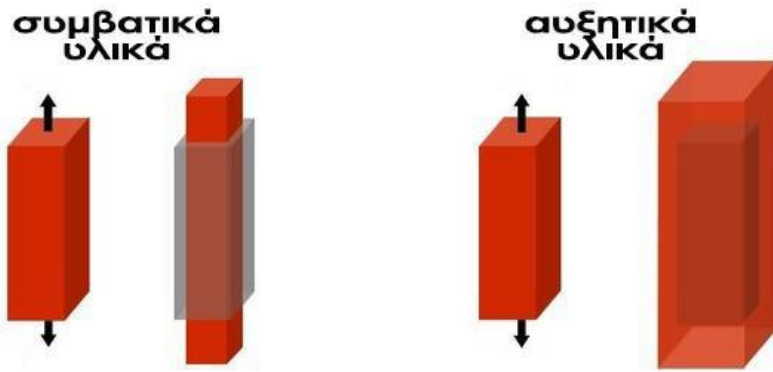
Το παραπάνω διακριτικοποιημένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα μηχανικών κατασκευών που συνδέονται με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και είναι προσαρμοσμένο στην περίπτωση όπου τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα είναι συνδεδεμένα με ένα παθητικό ηλεκτρικό κύκλωμα.

2.2 Αυξητικές μικροδομές

2.2.1 Αυξητικά υλικά * (AUXETIC Materials):

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.

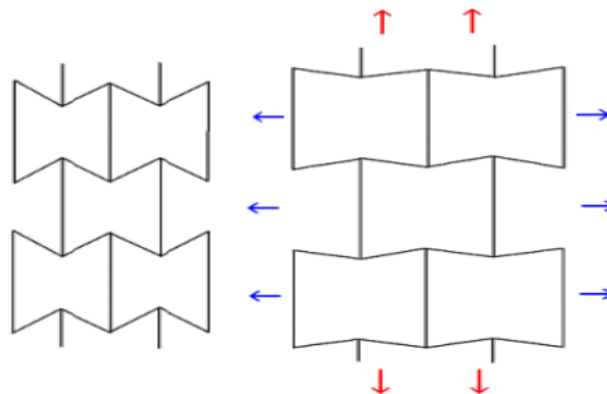


Εικόνα 2. Συμπεριφορά συμβατικών και αυξητικών υλικών σε εφελκυσμό.[31]

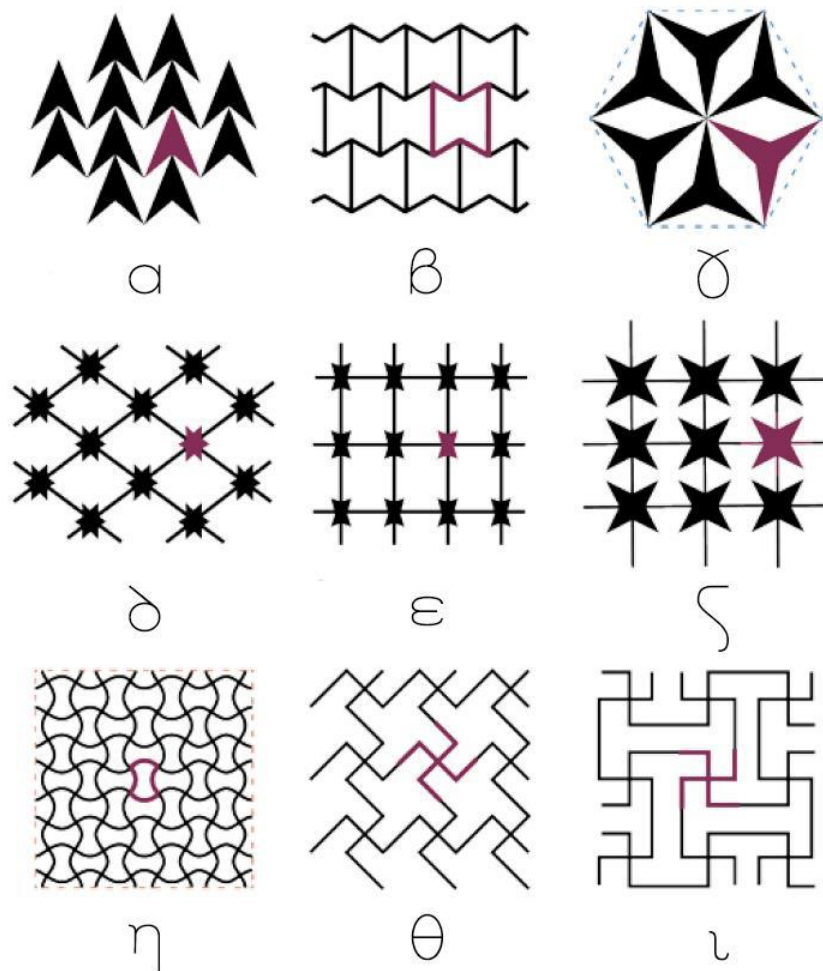
$$\text{Λόγος Poisson } \nu = - \frac{\text{Πλευρική παραμόρφωση}}{\text{Αξονική παραμόρφωση}}$$

Σε μακροσκοπικό επίπεδο ο αρνητικός λόγος του Poisson και οι σχετικές ιδιότητες των αυξητικών υλικών προκύπτουν μέσα από αυξητικά μοντέλα που περιγράφουν τη δομή τους. Αυτό επιτυγχάνεται με μηχανισμούς παραμόρφωσης. Για παράδειγμα ακόμα και συμβατικά υλικά όπως τα μέταλλα θα μπορούσαν να συμπεριφερθούν αυξητικά μετά από κάποια κατεργασία. Δηλαδή είναι ζήτημα της αρχιτεκτονικής ή της μικροδομής του υλικού.

Η πιο διαδεδομένη αυξητική δομή είναι αυτή των εξαγωνικών κυψελών με μη κυρτή μορφή (εισερχόμενες γωνίες reentrant angles). Πρόκειται για ένα πλέγμα από εξάγωνα με αρθρωτές πλευρές που όταν δεχτούν εφελκυστικές τάσεις αναγκάζουν το πλέγμα να διευρυνθεί προς κάθε διεύθυνση. Στην ουσία ο μηχανισμός εφελκυσμού - θλίψης της εξαγωνικής δομής στον άξονα των x είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τη διαστολή - συστολή αντίστοιχα στον άξονα των y .



Εικόνα 3. Εξαγωνική αυξητική δομή [32]



Εικόνα 4. Παραδείγματα αυξητικών δομών [19]

2.2.2 Πλεονεκτήματα των αυξητικών υλικών συγκρινόμενα με τα συμβατικά υλικά

Αναφορικά μερικά από τα πλεονεκτήματα των αυξητικών υλικών είναι τα παρακάτω:

- Έχουν μεγαλύτερη αντοχή (σκληρότητα) σε τοπική παραμόρφωση
- Έχουν μεγαλύτερη ακαμψία στη διάτμηση
- Έχουν την ικανότητα να σχηματίζουν διπλές καμπύλες επιφάνειες
- Έχουν υψηλότερο συντελεστή δυσθραυστότητας¹.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φίλτρα με ρυθμιζόμενους πόρους.

¹ Ο συντελεστής δυσθραυστότητας αποτελεί μέτρο της ενέργειας που απορροφά ένα υλικό πριν τη θραύση του και αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού.

2.2.3 Ιδιότητες των αυξητικών υλικών

Αναφορικά μερικές από τις ιδιότητες των αυξητικών υλικών είναι οι παρακάτω:

- Αντίσταση στην διείσδυση
- Αντίσταση στην διάδοση ρωγμής
- Απορρόφηση ενέργειας
- Μεταβλητή διαπερατότητα
- Συγκλαστική καμπυλότητα

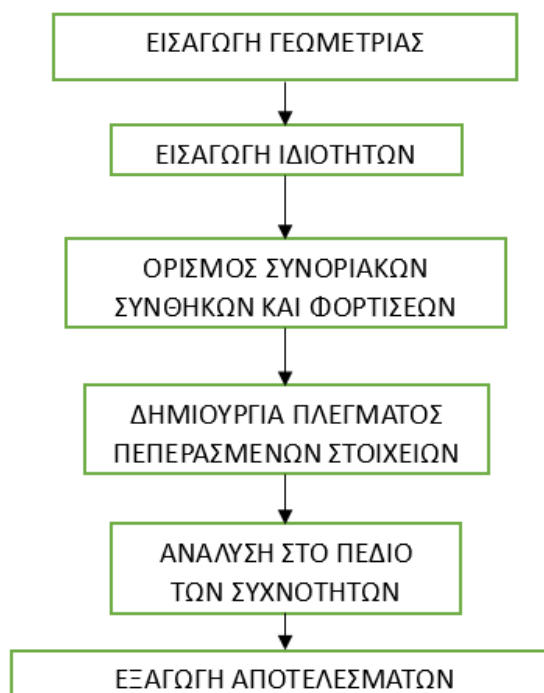
2.2.4 Εφαρμογές αυξητικών υλικών

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν βελτιωμένη απόσβεση σε κύματα και γενικότερα στην απορρόφηση ενέργειας. Η περίπλοκη εσωτερική τους γεωμετρία διευκολύνει την διασπορά και την απορρόφηση των ηχητικών κυμάτων. Προϊόντα που χρησιμοποιούνται στην ηχομόνωση αλλά και στην απορρόφηση ενέργειας κρούσης είναι από τις συνήθεις χρήσεις που βρίσκουν τα αυξητικά υλικά στην αγορά. Ωτοασπίδες, υλικό ηχομόνωσης, προφυλακτήρες αυτοκινήτων, είναι μερικές από αυτές τις εφαρμογές.[33]

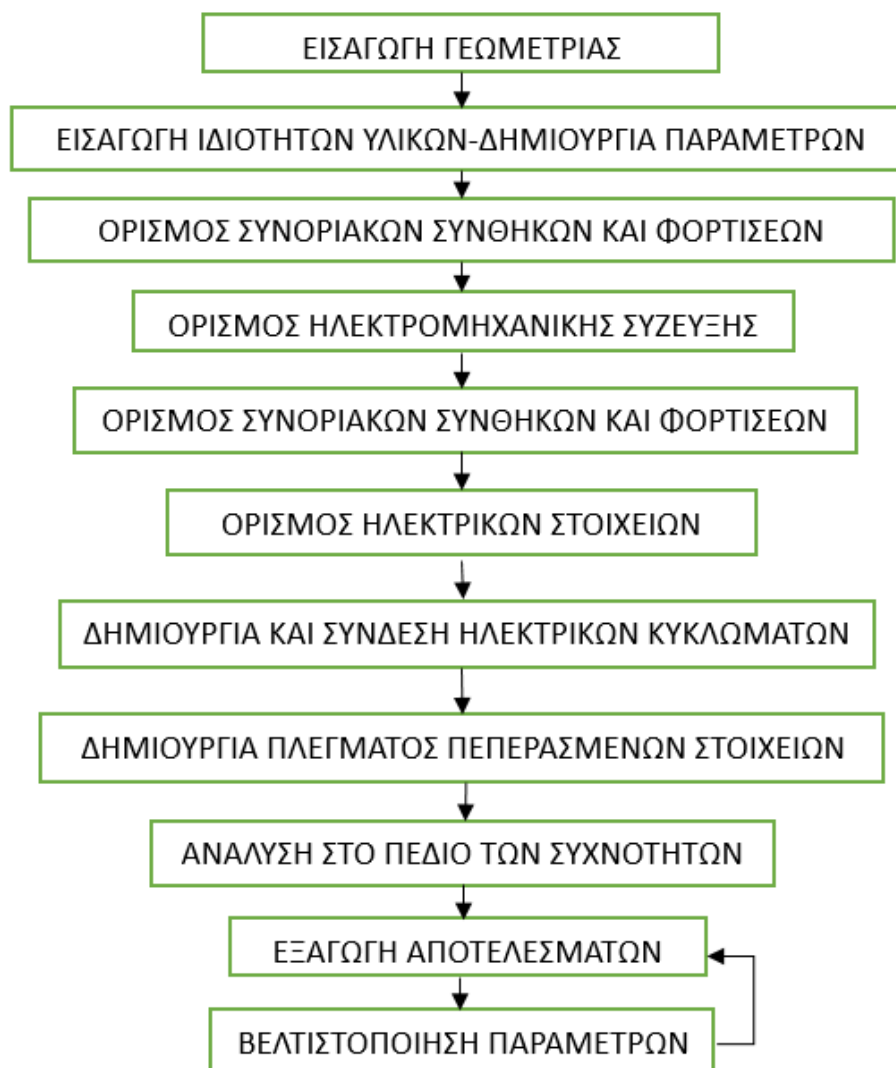
3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Διαδικασία μοντελοποίησης σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΔΟΜΩΝ

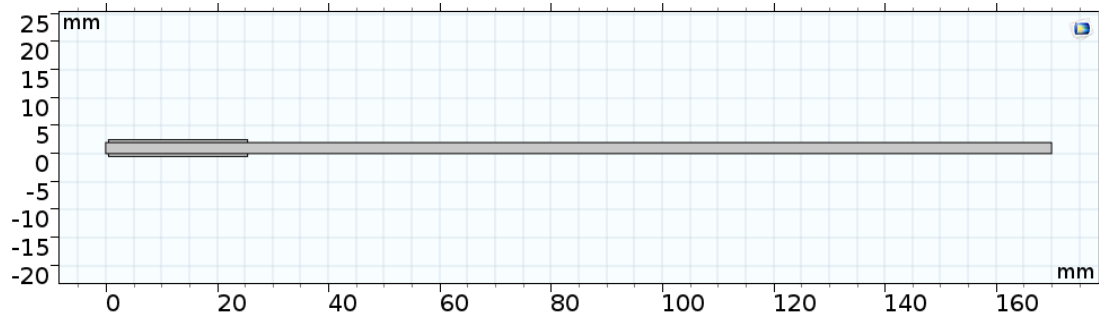


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΜΕΝΩΝ
ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



3.2 Μοντελοποίηση δομών με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία

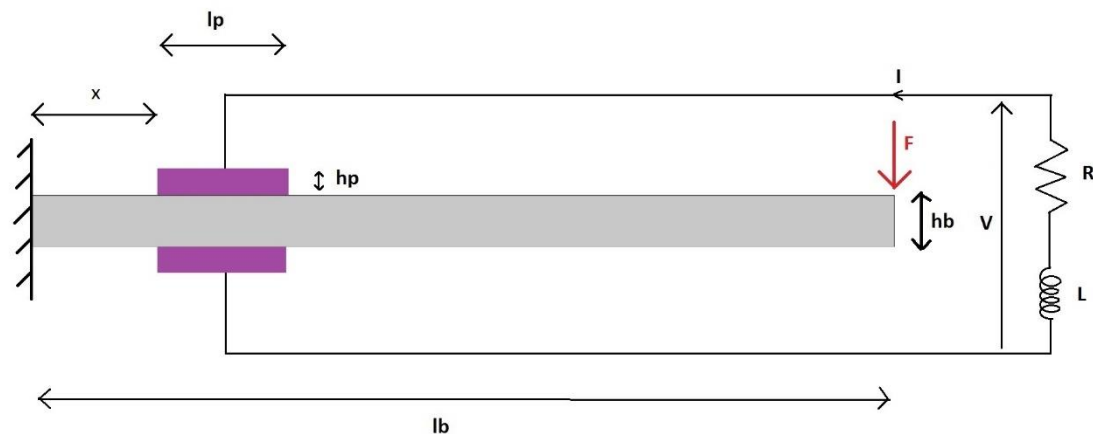
3.2.1 Μοντελοποίηση δοκαριού με δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα



Εικόνα 5. Μοντέλο δοκαριού με δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα-πραγματικές διαστάσεις.

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{y_{\max}} = -1 \text{ N}$ στη δεξιά πλευρά της δοκού.

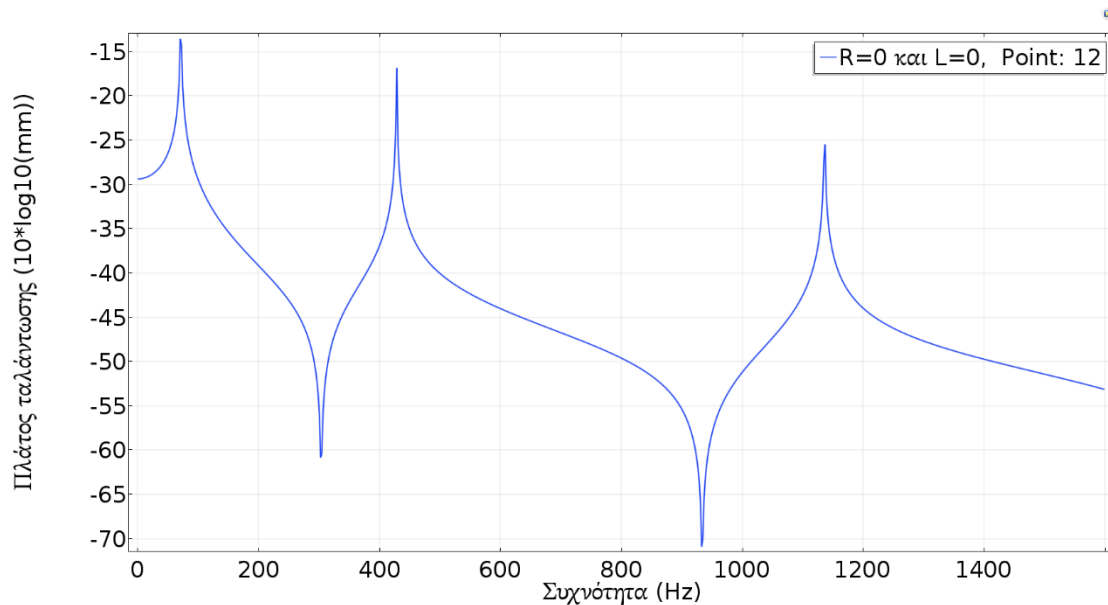
Συνοριακές συνθήκες: $u_x = u_y = 0$, πάκτωση στην αριστερή πλευρά της δοκού.



Εικόνα 6. Σύνδεση ηλεκτρικού κυκλώματος στο μοντέλο του δοκαριού

Οι αναλυτικές διαστάσεις και οι τιμές των ιδιοτήτων των υλικών παρατίθενται στο παράρτημα Α.

Συνδέοντας ένα βραχυκυκλωμένο κύκλωμα ($R=0$ και $L=0$) στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία έχουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο διάγραμμα 1 για το πλάτος ταλάντωσης του σημείου 12 ($x=170 \text{ mm}$, $y=2 \text{ mm}$) σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης.



Διάγραμμα 1. Πλάτος ταλάντωσης στη γ διεύθυνση, του δεξιού άκρου του δοκαριού σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Συνδέουμε τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε ηλεκτρικό κύκλωμα που αποτελείται από μία αντίσταση και ένα πηνίο σε σειρά.

Για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων R και L του ηλεκτρικού κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης του Comsol, Nelder Mead όπου ζητήθηκαν να οριστούν κάποια στοιχεία. Ενδεικτικά αναφέρω τις τιμές των στοιχείων αυτών για τη βελτιστοποίηση του δοκαριού στην 3η ιδιοσυχνότητα (1137 Hz).

Objective function: $10 \cdot \log_{10}(\text{solid.uAmpY})$ (πλάτος ταλάντωσης του σημείου 12)

Type: minimization

Constraints & initial values (παραμέτρων):

Control Variables and Parameters				
Parameter name	Initial value	Scale	Lower bound	Upper bound
L	15	1	0	30
R	3000	600	0	18000

Constraints (αντικειμενικής συνάρτησης)

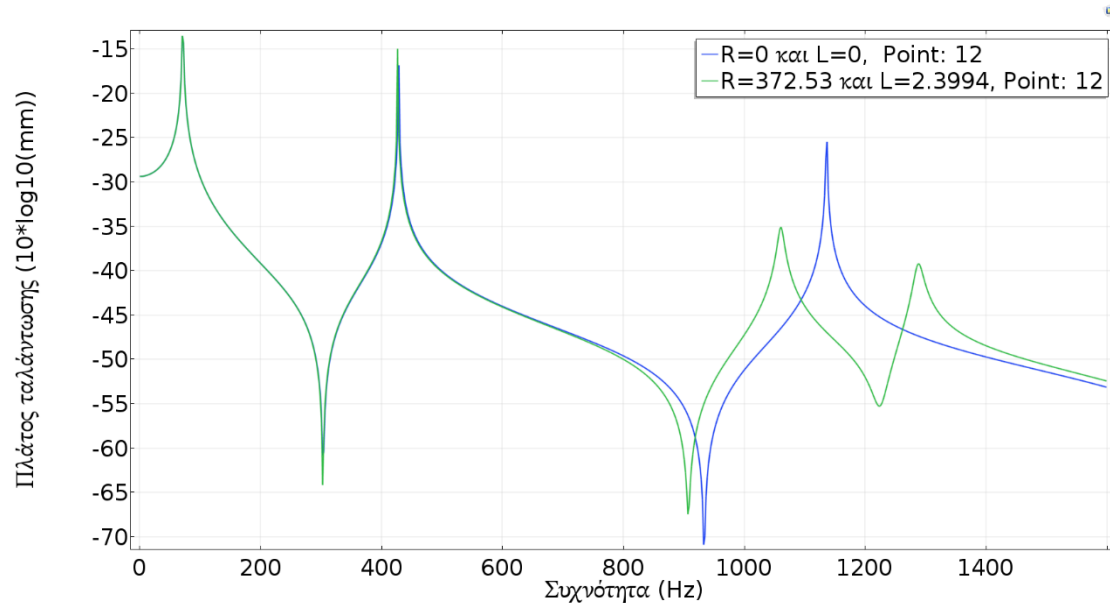
Constraints		
Expression	Lower bound	Upper bound
comp1.dd	-47	-20

Maximum number of model evaluations:

1000

Στη μέθοδο ορίζονται όρια της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του πλάτους ταλάντωσης, οι τιμές -20 και -47. Η μέθοδος προσπαθεί να βρει τις τιμές των R και L για τις οποίες το πλάτος ταλάντωσης στη συγκεκριμένη συχνότητα είναι ίσο με το ελάχιστο όριο που έχουμε ορίσει. Η βελτιστοποίηση μας δίνει τις τιμές $L = 2,3994$ H και $R = 372,53$ Ω.

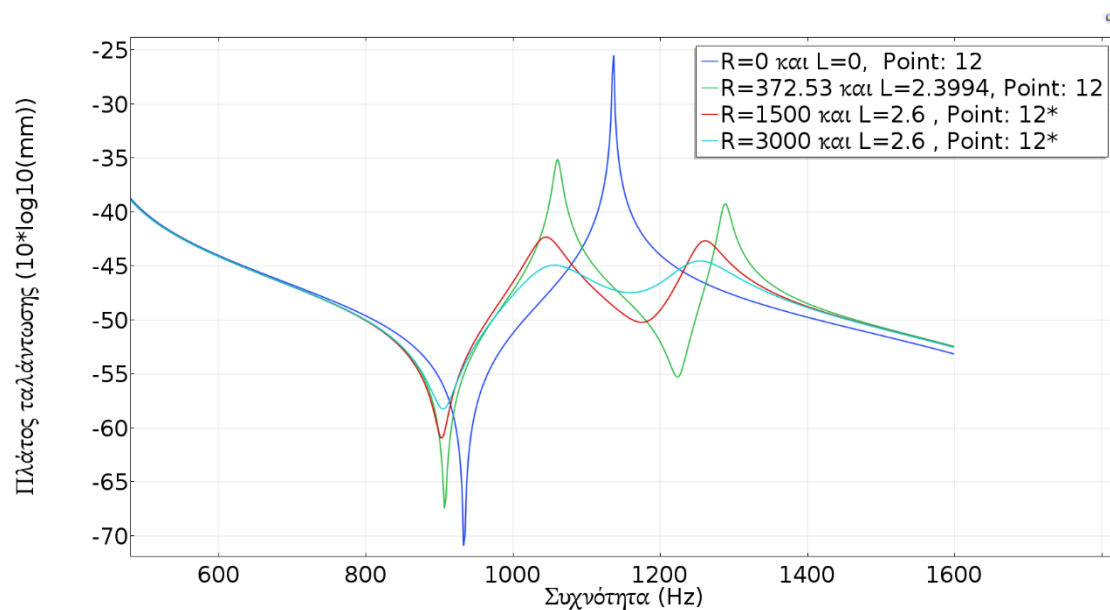
Στο διάγραμμα 2 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (12).



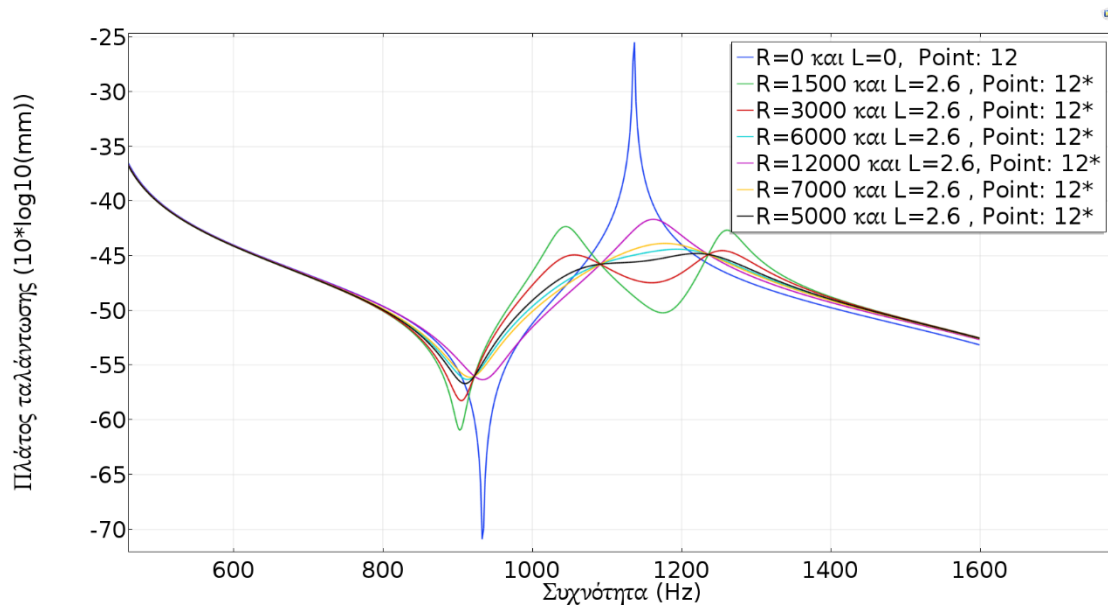
Διάγραμμα 2. Πλάτος ταλάντωσης - Βελτιστοποίηση στην 3η ιδιοσυχνότητα

Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη συχνότητα πετυχαίνεται απόσβεση της ταλάντωσης καθώς το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται κατά 2,15 τάξεις μεγέθους.

Στη συνέχεια έγιναν διάφορες δοκιμές για τις τιμές των R και L και πήραμε τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων 3, 4 και 5.

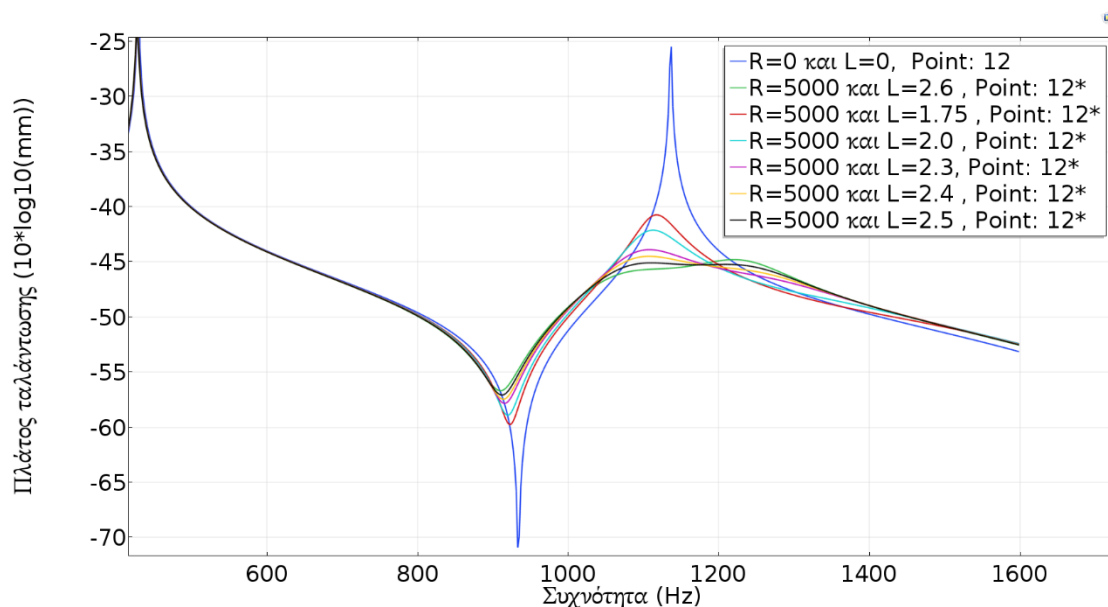


Διάγραμμα 3. Πλάτος ταλάντωσης για διάφορες τιμές R και L



Διάγραμμα 4. Πλάτος ταλάντωσης για διάφορες τιμές R και L (επιπλέον δοκιμές)

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η τιμή της ωμικής αντίστασης, οι δύο κορυφές μειώνονται, ενώ αν συνεχίσει να αυξάνεται δημιουργείται μία κορυφή ανάμεσα στις δύο προηγούμενες.



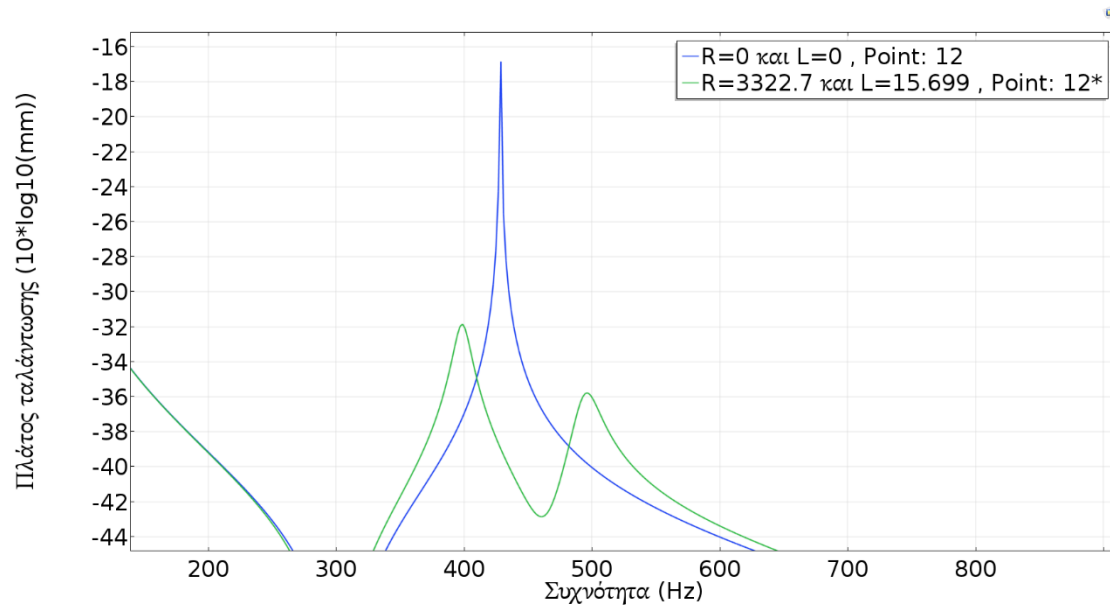
Διάγραμμα 5. Πλάτος ταλάντωσης για διάφορες τιμές R και L (επιπλέον δοκιμές)

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται ο συντελεστής αυτεπαγωγής, διατηρώντας σταθερή την τιμή της ωμικής αντίστασης η καμπύλη εξομαλύνεται κοντά στην περιοχή της ιδιοσυχνότητας.

Έπειτα κάνουμε βελτιστοποίηση, για τη δεύτερη ιδιοσυχνότητα (429 Hz), με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L=15.699$ H και $R=3322.7$ Ω. Στη μέθοδο ορίζονται όρια της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του πλάτους ταλάντωσης, οι τιμές -10 και -39. Η μέθοδος προσπαθεί να βρει τις τιμές των R και L για τις οποίες το

πλάτος ταλάντωσης στη συγκεκριμένη συχνότητα είναι ίσο με το ελάχιστο όριο που έχουμε ορίσει.

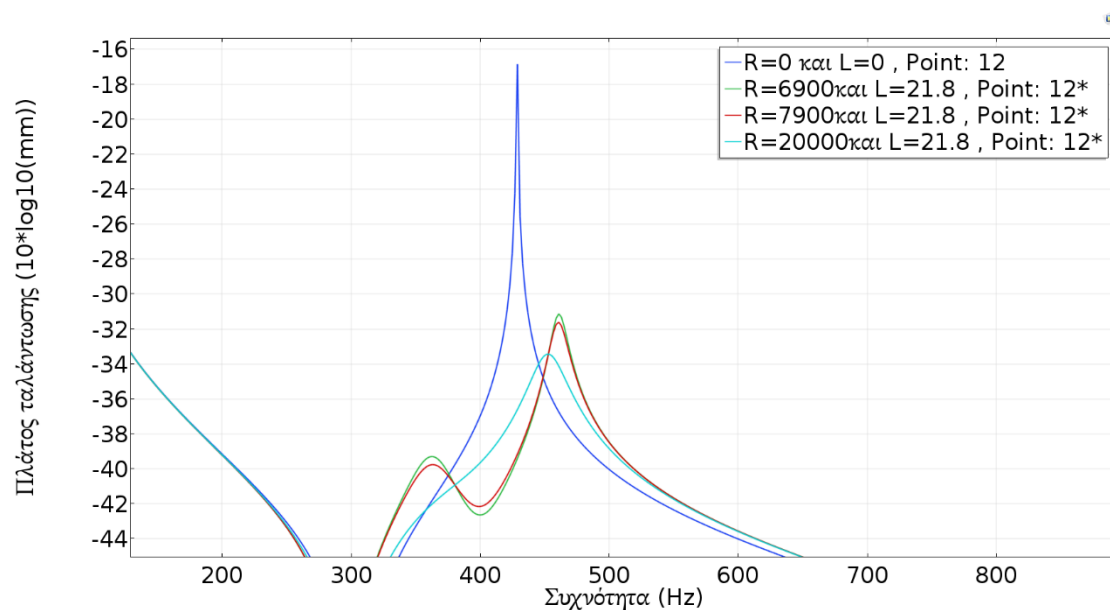
Στο διάγραμμα 14 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (12).



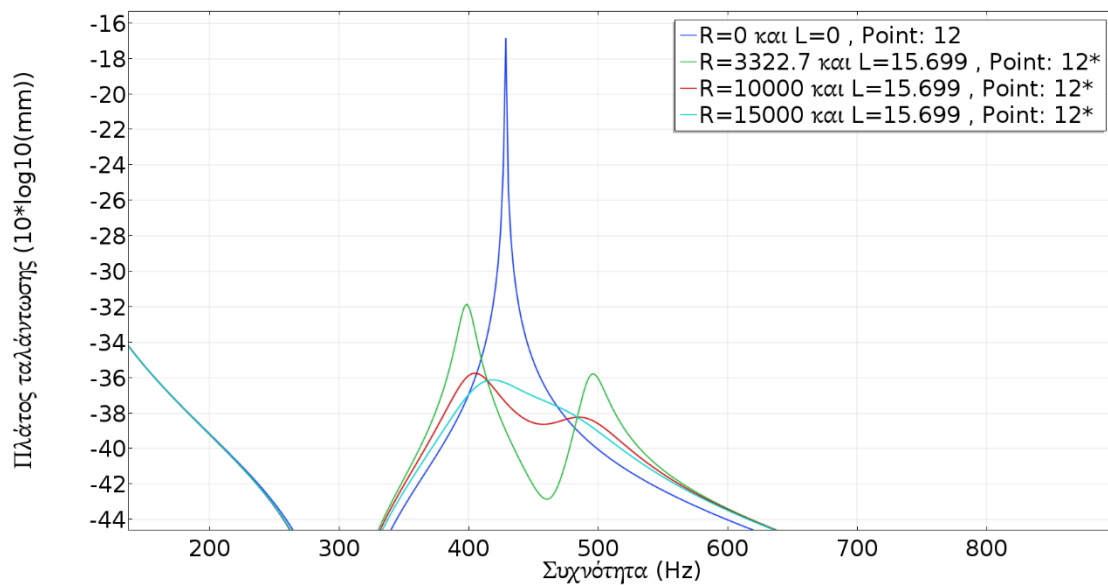
Διάγραμμα 6. Πλάτος ταλάντωσης - Βελτιστοποίηση στη 2^η ιδιοσυχνότητα

Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη συχνότητα πετυχαίνεται απόσβεση της ταλάντωσης καθώς το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται κατά 2,31 τάξεις μεγέθους.

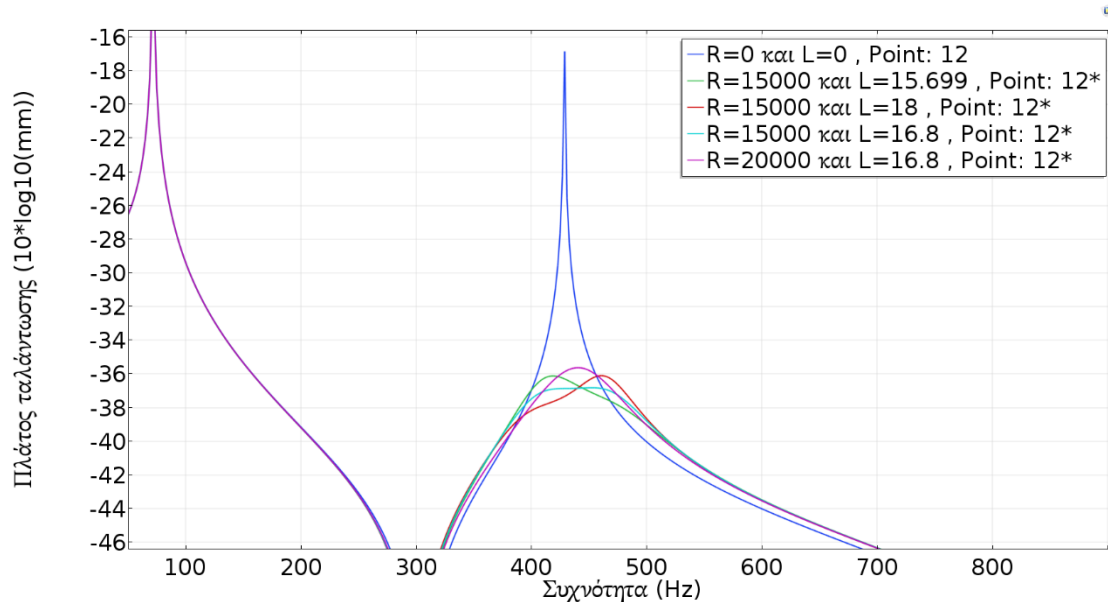
Στη συνέχεια έγιναν διάφορες δοκιμές για τις τιμές των R και L και πήραμε τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων 7,8 και 9.



Διάγραμμα 7. Πλάτος ταλάντωσης για διάφορες τιμές R και L (επιπλέον δοκιμές)



Διάγραμμα 8. Πλάτος ταλάντωσης για διάφορες τιμές R και L (επιπλέον δοκιμές)



Διάγραμμα 9. Πλάτος ταλάντωσης για διάφορες τιμές R και L (επιπλέον δοκιμές)

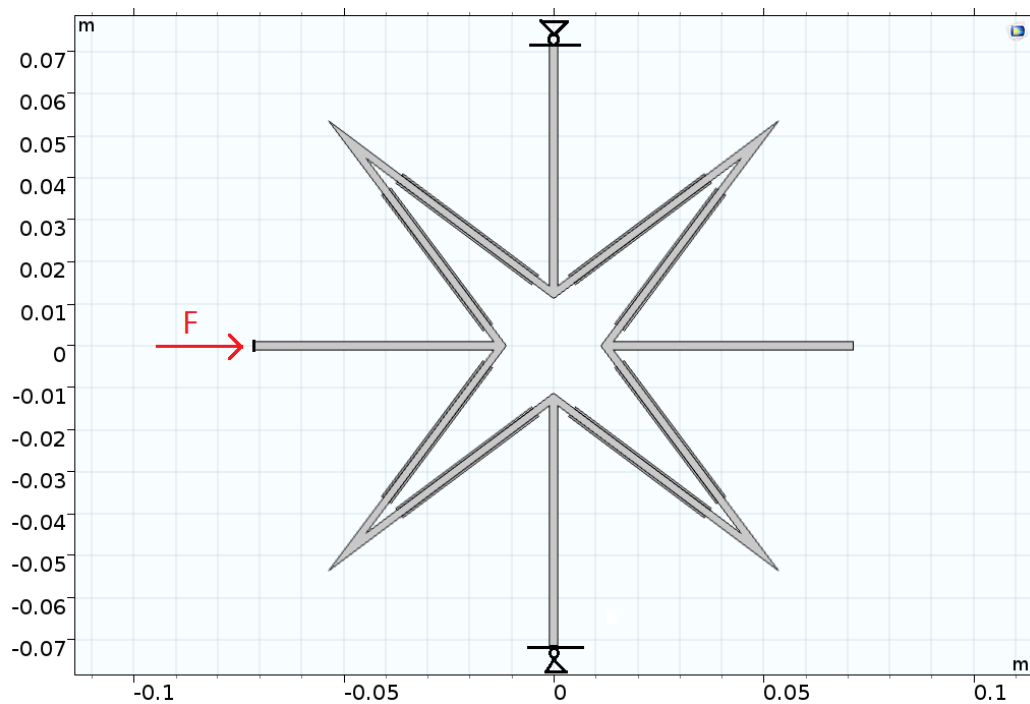
Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας την ωμική αντίσταση παίρνουμε πιο ομαλές καμπύλες απόκρισης, γιατί αυξάνεται η απόσβεση, ενώ μεταβάλλοντας την αυτεπαγωγή μετακινείται η καμπύλη της απόκρισης, γιατί επηρεάζουμε το μητρώο της μάζας.

3.2.2 Αυξητική δομή αστεριού με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία

Τα αυξητικά υλικά έχουν μελετηθεί σε θέματα στατικότητας σε διάφορες εργασίες. Οπότε σε αυτή την ενότητα αποφασίστηκε να διερευνηθεί πως λειτουργούν σε δυναμικά προβλήματα, προσθέτοντας πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Επιλέχθηκε τυχαία η αυξητική δομή του αστεριού καθώς χρησιμοποιείται και σε άλλες εργασίες του εργαστηρίου.

3.2.2.1 Μελέτη ενός αστεριού

Στην εικόνα 7 απεικονίζεται το συνδυαστικό μοντέλο μίας αυξητικής δομής τύπου αστεριού με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα.

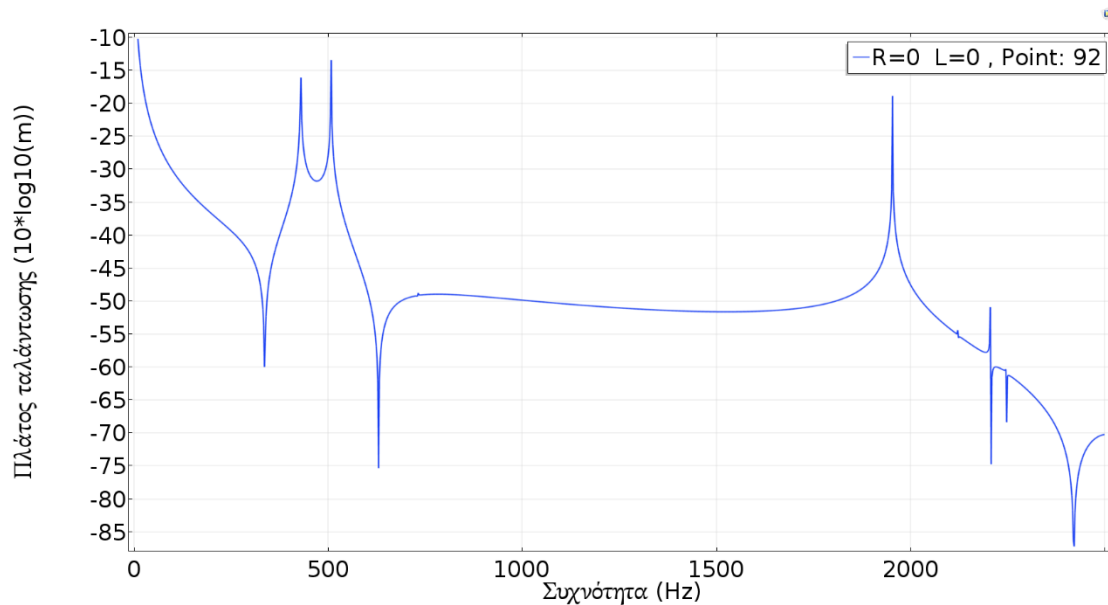


Εικόνα 7. Μοντέλο αυξητικής δομής αστεριού με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα.

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{x_{\max}}=100 \text{ N}$ στο αριστερό άκρο του αστεριού.

Συνοριακές συνθήκες: $u_y=0$ στο πάνω και κάτω άκρο.

Στο διάγραμμα 18 φαίνεται το πλάτος ταλάντωσης στη X διεύθυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης, του σημείου 92 ($x=0.0714 \text{ m}$, $y=0.001 \text{ m}$) στο δεξί άκρο του αστεριού, συνδέοντας τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε βραχυκυκλωμένο κύκλωμα.

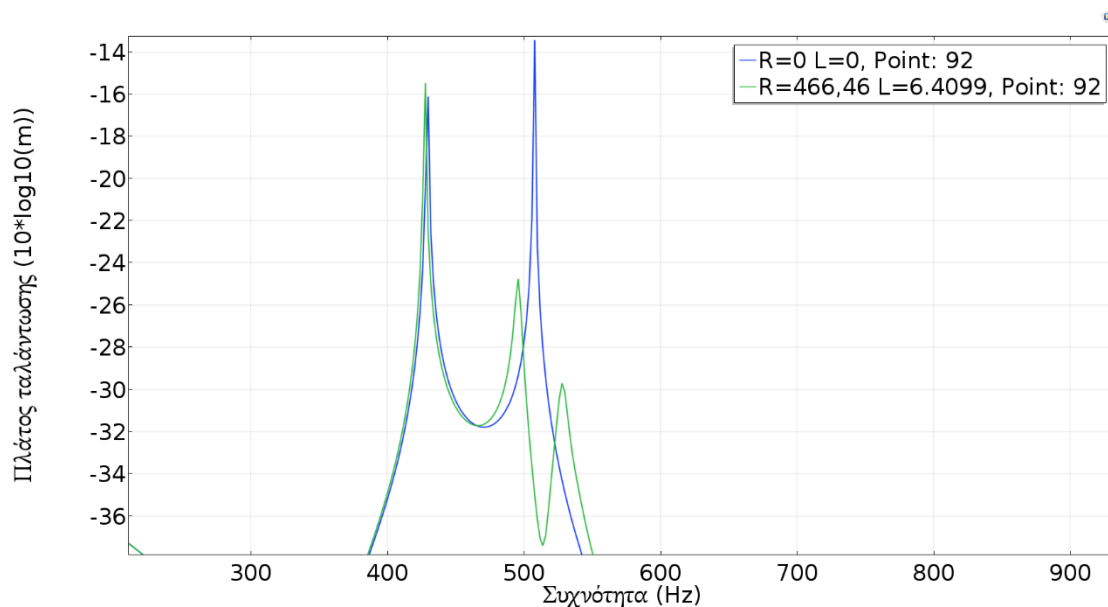


Διάγραμμα 10. Πλάτος ταλάντωσης στη x διεύθυνση του σημείου 92

Συνδέουμε ανά δύο πιεζοηλεκτρικά στοιχεία που βρίσκονται στο ίδιο τμήμα του αστεριού σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που αποτελείται από μία αντίσταση και ένα πηνίο σε σειρά. Οπότε έχουμε συνολικά 8 ηλεκτρικά κυκλώματα στο αστέρι.

Στη συνέχεια κάνουμε βελτιστοποίηση στο Comsol, για τη συχνότητα 508 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L = 6.4099$ H και $R = 466.46$ Ω.

Στο διάγραμμα 11 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων, για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (92).

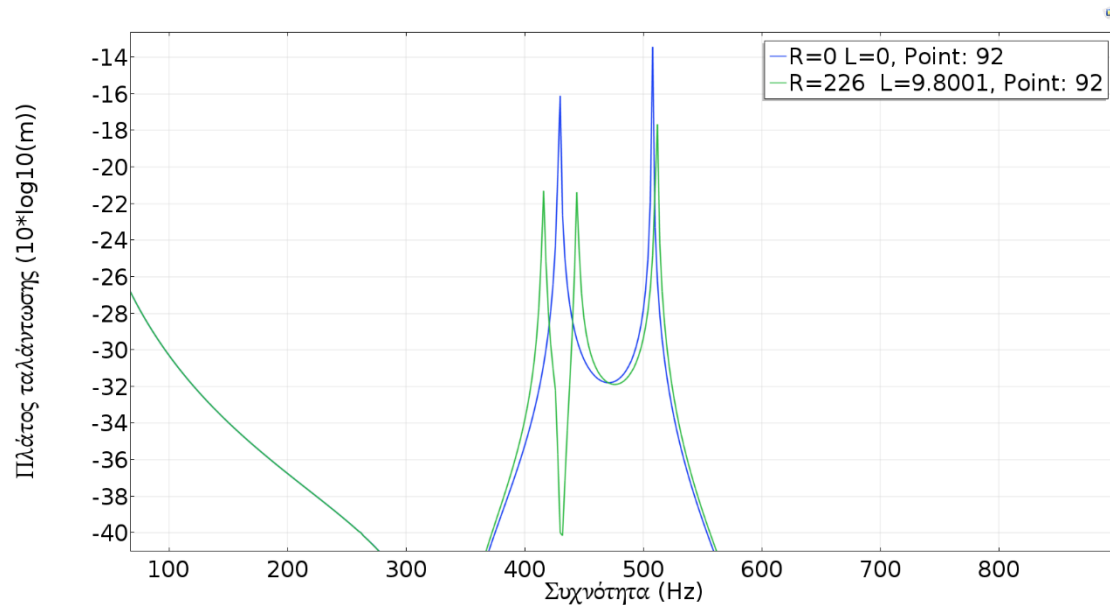


Διάγραμμα 11. Πλάτος ταλάντωσης - Βελτιστοποίηση στα 508 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 508 Hz.

Έπειτα κάνουμε βελτιστοποίηση για τη συχνότητα 430 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L = 9.8001 \text{ H}$ και $R = 226 \Omega$.

Στο διάγραμμα 12 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (92).

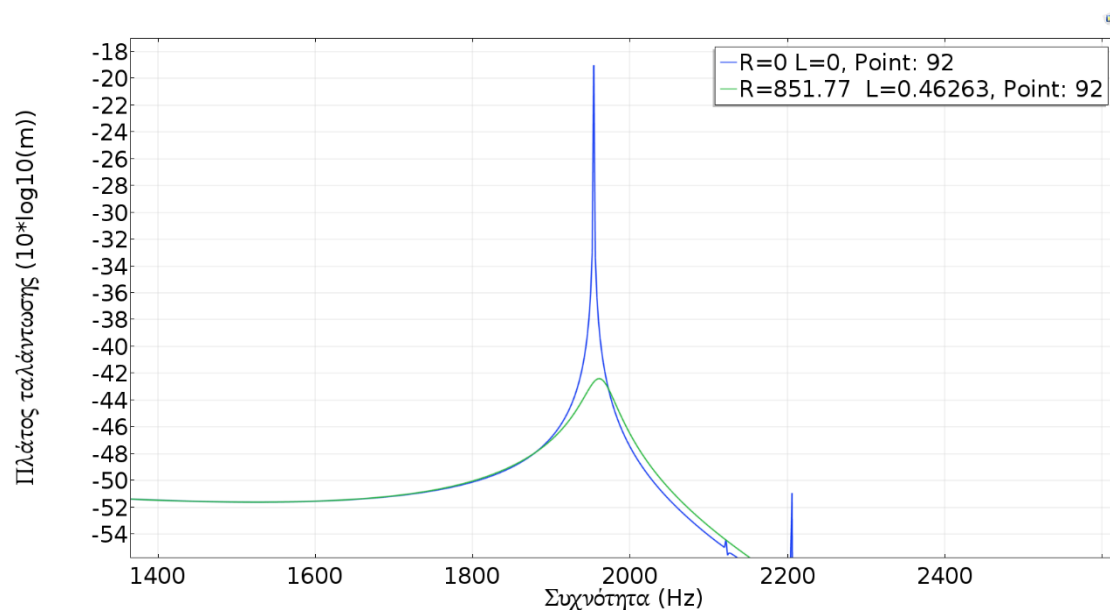


Διάγραμμα 12. Πλάτος ταλάντωσης – Βελτιστοποίηση στα 430 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 430 Hz.

Τέλος, κάνουμε βελτιστοποίηση για τη συχνότητα 1954 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L = 0.46263 \text{ H}$ και $R = 851.77 \Omega$.

Στο διάγραμμα 13 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (92).

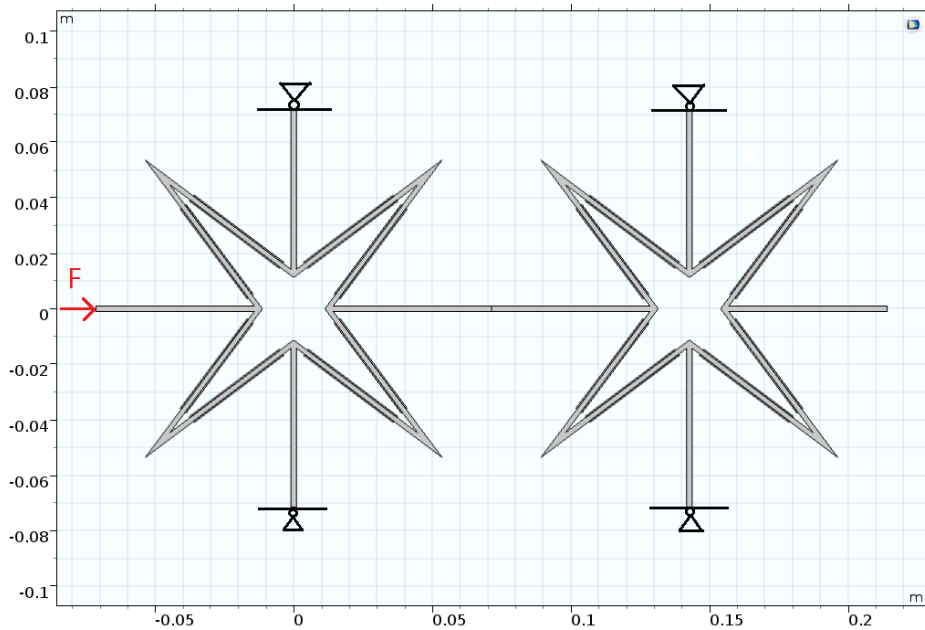


Διάγραμμα 13. Πλάτος ταλάντωσης – Βελτιστοποίηση στα 1954 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 1954 Hz.

3.2.2.2 Μελέτη δύο αστεριών

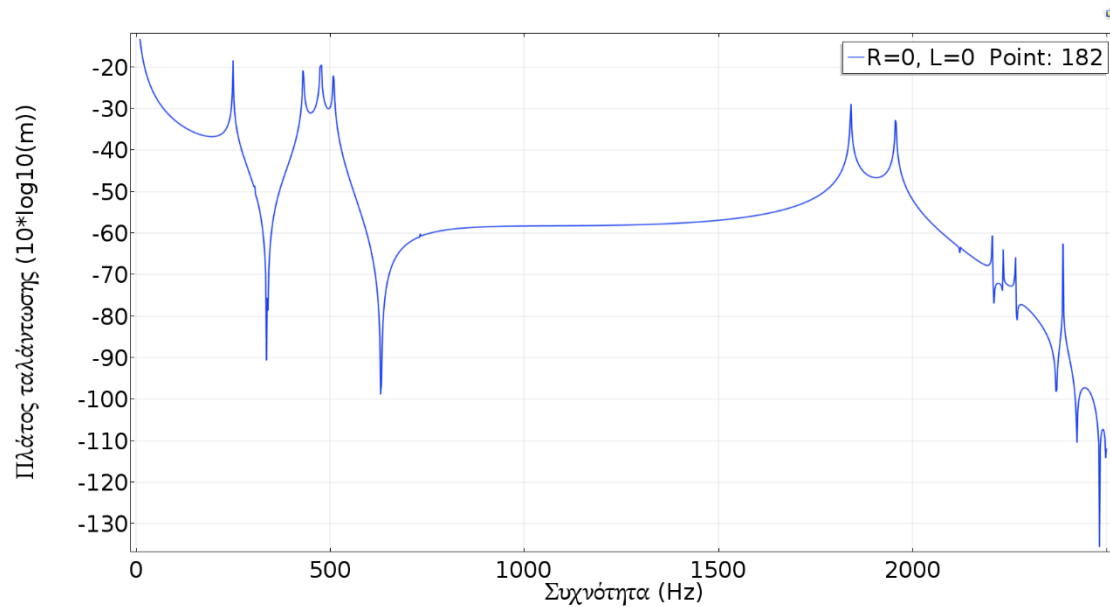
Στην εικόνα 8 απεικονίζεται το μοντέλο δυο αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στο κάθε ένα.



Εικόνα 8. Μοντέλο αυξητικής δομής 2 αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στο κάθε αστέρι.

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{x_{\max}}=100$ N στο αριστερό άκρο του πρώτου αστεριού. Συνοριακές συνθήκες: $u_y=0$ στα πάνω και κάτω άκρα.

Στο διάγραμμα 14 φαίνεται το πλάτος ταλάντωσης στη X διεύθυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης, του σημείου 182 ($x=0.2142$ m, $y=0.001$ m) στο δεξί άκρο του 2^{ου} αστεριού, συνδέοντας τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε βραχυκυκλωμένο κύκλωμα.

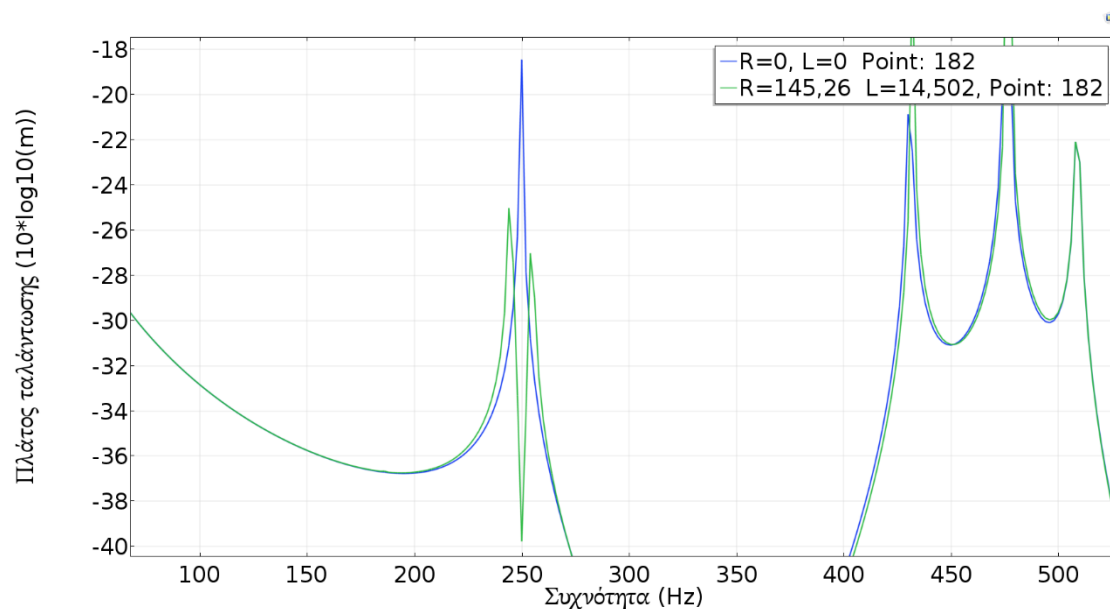


Διάγραμμα 14. Πλάτος ταλάντωσης στη x διεύθυνση του σημείου 182.

Συνδέουμε τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε ηλεκτρικά κυκλώματα που αποτελούνται από μία αντίσταση και ένα πηνίο σε σειρά.

Στη συνέχεια κάνουμε βελτιστοποίηση στο Comsol, για τη συχνότητα 250 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L = 14.502$ H και $R = 145.26$ Ω .

Στο διάγραμμα 15 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (182).

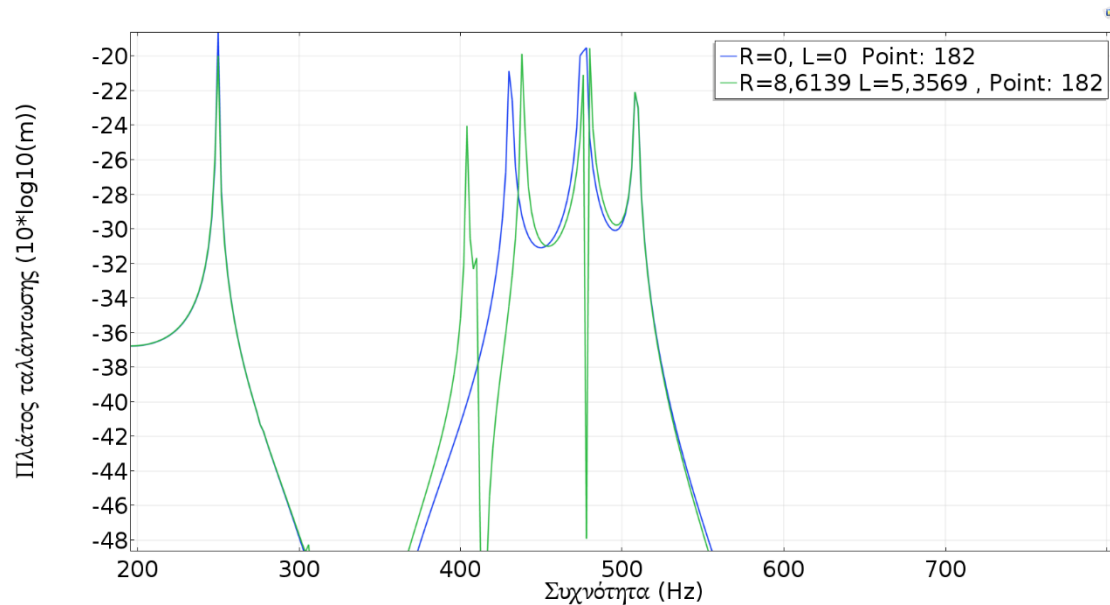


Διάγραμμα 15. Πλάτος ταλάντωσης – Βελτιστοποίηση στα 250 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 250 Hz.

Έπειτα κάνουμε βελτιστοποίηση για τη συχνότητα 478 Hz και μας δίνει τις τιμές $L=5.3569$ H και $R=8.6139$ Ω.

Στο διάγραμμα 16 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (192).

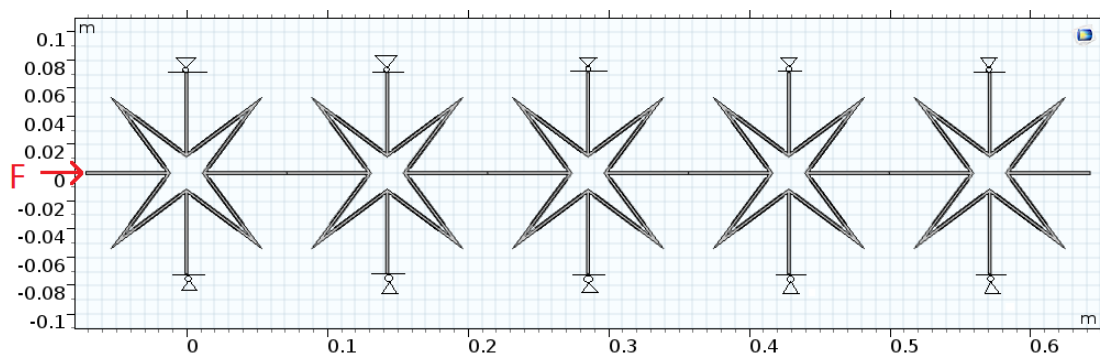


Διάγραμμα 16. Πλάτος ταλάντωσης – Βελτιστοποίηση στα 478 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 478 Hz.

3.2.2.3 Μελέτη 5 αστεριών σε σειρά

Στην εικόνα 9 απεικονίζεται το μοντέλο πέντε αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα το κάθε ένα.

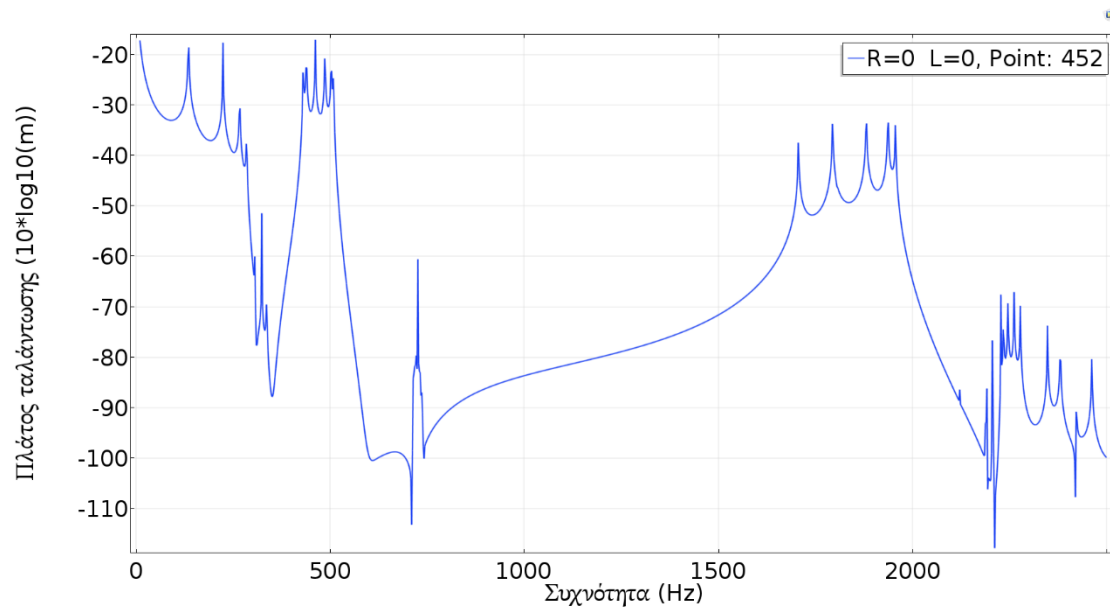


Εικόνα 9. Μοντέλο αυξητικής δομής 5 αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στο κάθε αστερίο.

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{x_{\max}}=100$ N στο αριστερό άκρο του πρώτου αστεριού.

Συνοριακές συνθήκες: $u_y=0$ στα πάνω και κάτω άκρα.

Στο διάγραμμα 17 φαίνεται το πλάτος ταλάντωσης στη X διεύθυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης, του σημείου 452 ($x=0.6426$ m, $y=0.001$ m) στο δεξί άκρο του 5^{ου} αστεριού, συνδέοντας τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα σε βραχυκυκλωμένο κύκλωμα.



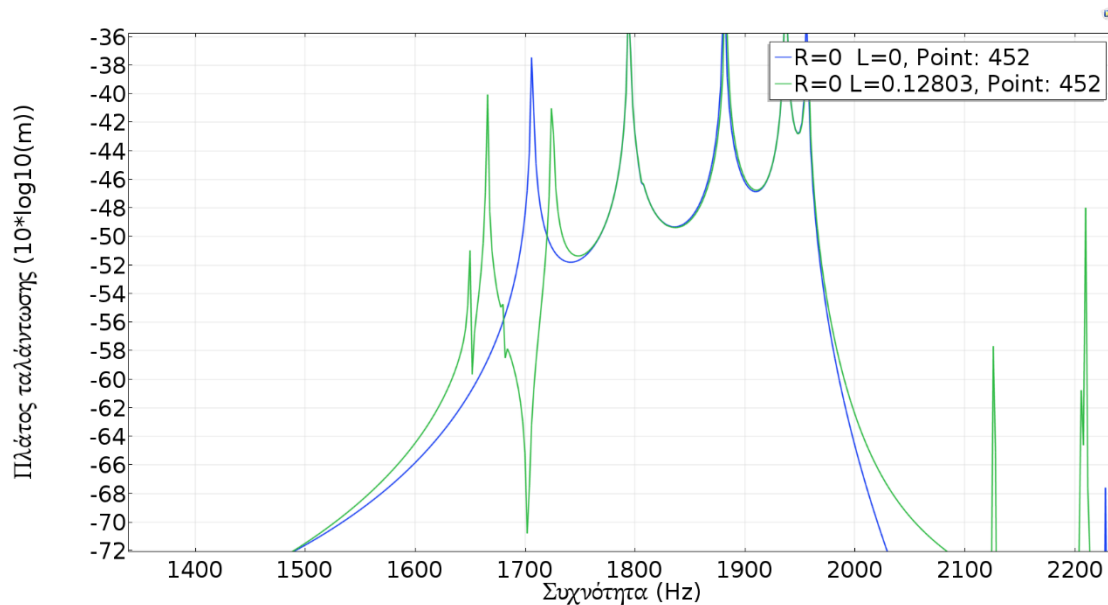
Διάγραμμα 17. Πλάτος ταλάντωσης στη x διεύθυνση του σημείου 452.

Παρατηρούμε ότι πλέον, τώρα που έχουμε μεγαλύτερο αριθμό αστεριών, λειτουργεί η ιδιότητα των αυξητικών δομών και δημιουργούνται κενά ζώνης.

Συνδέουμε τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε ηλεκτρικά κυκλώματα που αποτελούνται από μία αντίσταση και ένα πηνίο σε σειρά.

Στη συνέχεια κάνουμε βελτιστοποίηση στο Comsol, για τη συχνότητα 1706 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L=0.12803$ H και $R=0$ Ω.

Στο διάγραμμα 18 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (452).

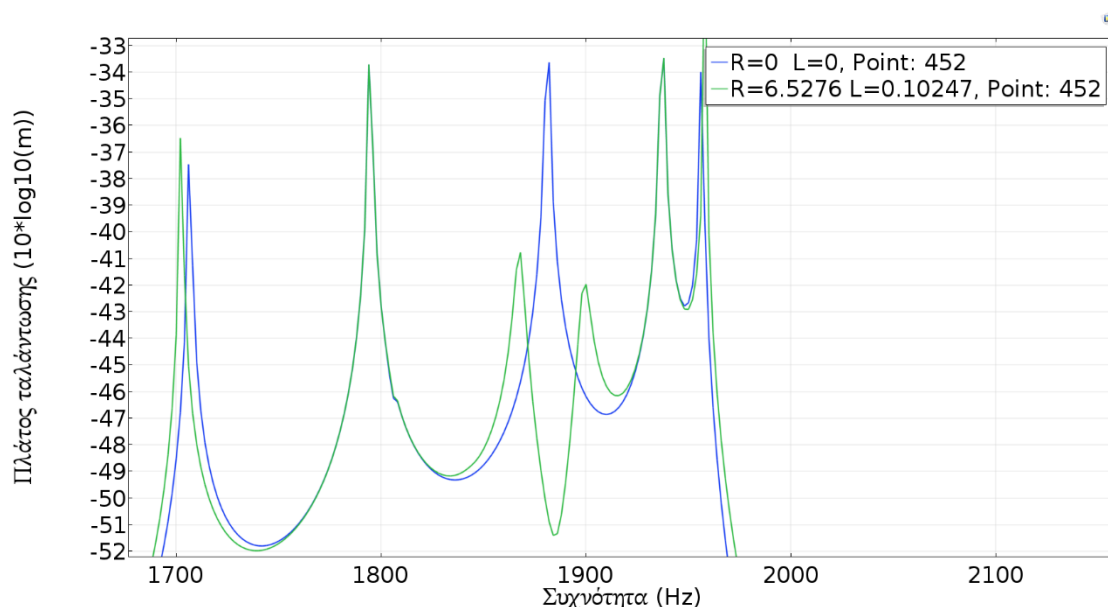


Διάγραμμα 18. Πλάτος ταλάντωσης – Βελτιστοποίηση στα 1706 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 1706 Hz.

Έπειτα κάνουμε βελτιστοποίηση για τη συχνότητα 1882 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L = 0.10247$ H και $R = 6.5276$ Ω.

Στο διάγραμμα 19 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (452).

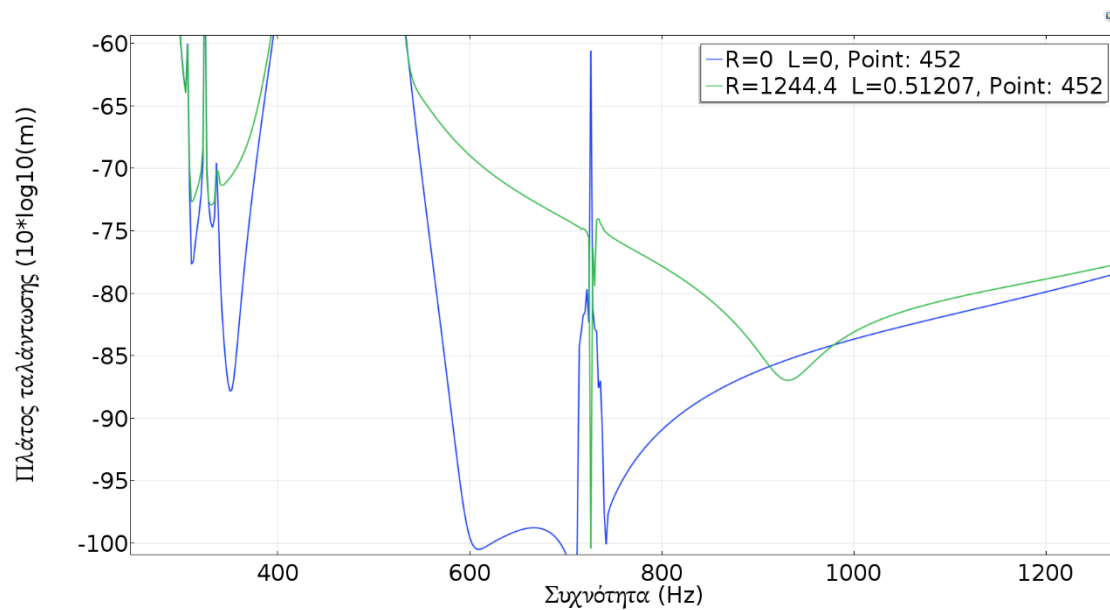


Διάγραμμα 19. Πλάτος ταλάντωσης – Βελτιστοποίηση στα 1882 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 1882 Hz.

Τέλος, κάνουμε βελτιστοποίηση για τη συχνότητα 726 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L = 0.51207$ H και $R = 1244.4$ Ω.

Στο διάγραμμα 20 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (452).

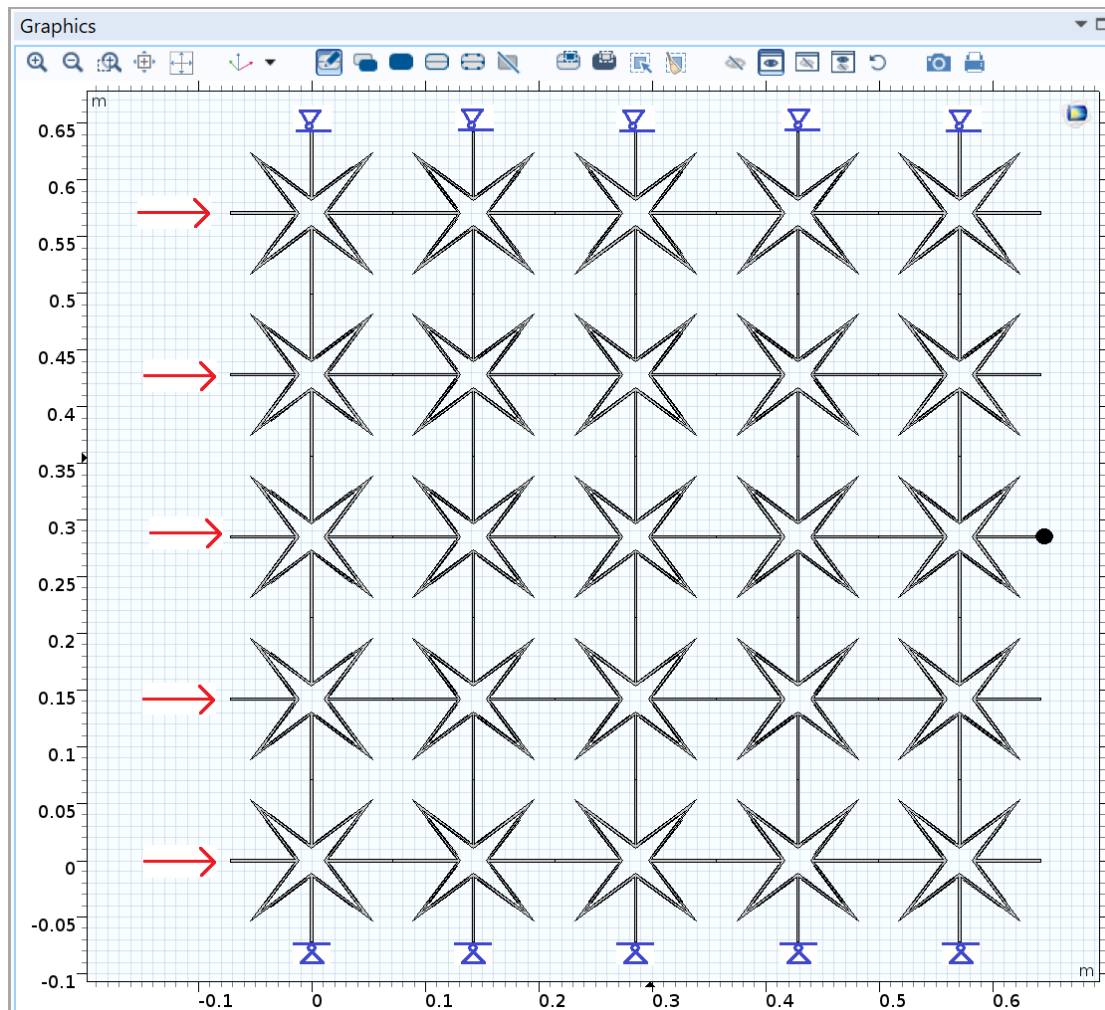


Διάγραμμα 20. Πλάτος ταλάντωσης – Βελτιστοποίηση στα 726 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 726 Hz.

3.2.2.4 Μελέτη πλέγματος 5x5 αστεριών

Στην εικόνα 10 απεικονίζεται το πλέγμα 5x5 αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα το κάθε ένα.

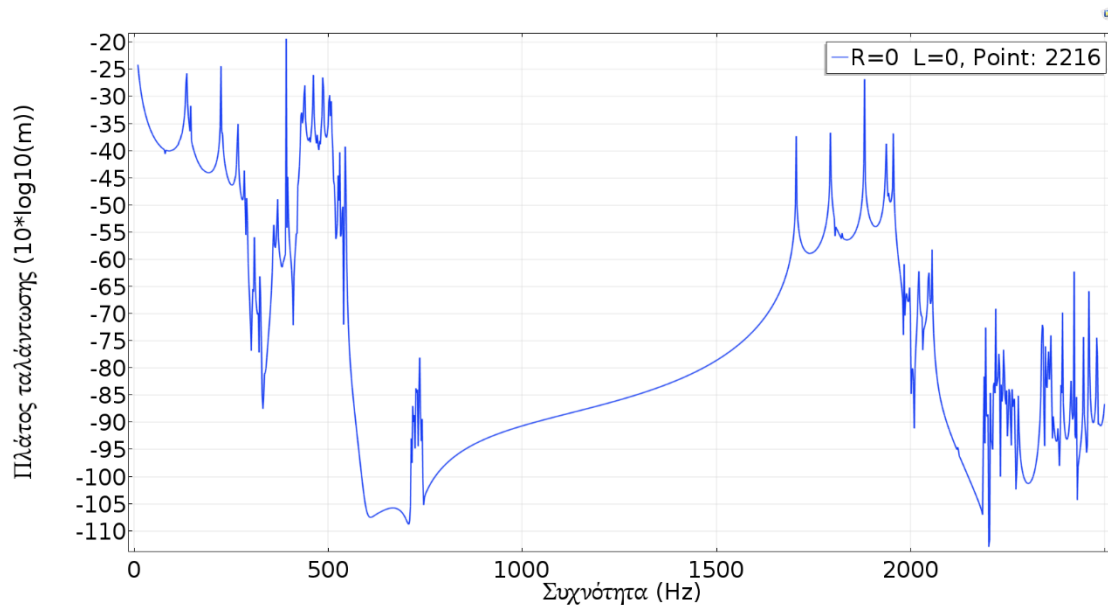


Εικόνα 10. Μοντέλο αυξητικής δομής 25 αστεριών με 16 πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στο κάθε αστέρι.

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{x_{\max}}=100$ N στο αριστερό άκρο του πλέγματος.

Συνοριακές συνθήκες: $u_y=0$ στα πάνω και κάτω άκρα.

Στο διάγραμμα 21 φαίνεται το πλάτος ταλάντωσης στη X διεύθυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης, του σημείου 2216 ($x=0.6426$ m, $y=0.2866$ m) στο δεξί άκρο του πλέγματος, συνδέοντας τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα σε βραχυκυκλωμένο κύκλωμα.



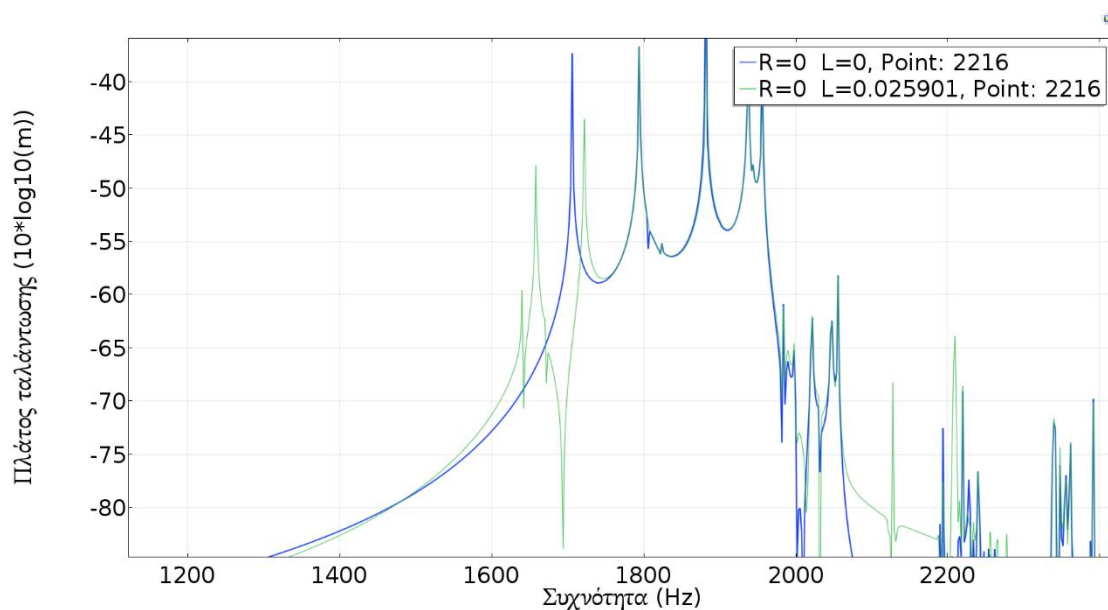
Διάγραμμα 21. Πλάτος ταλάντωσης στη x διεύθυνση του σημείου 2216.

Παρατηρούμε και εδώ ότι λειτουργεί η ιδιότητα των αυξητικών δομών και δημιουργούνται κενά ζώνης.

Συνδέουμε τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε ηλεκτρικά κυκλώματα που αποτελούνται από μία αντίσταση και ένα πηνίο σε σειρά.

Στη συνέχεια κάνουμε βελτιστοποίηση στο Comsol, για τη συχνότητα 1706 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L=0.025901$ H και $R=0$ Ω.

Στο διάγραμμα 22 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (2216).

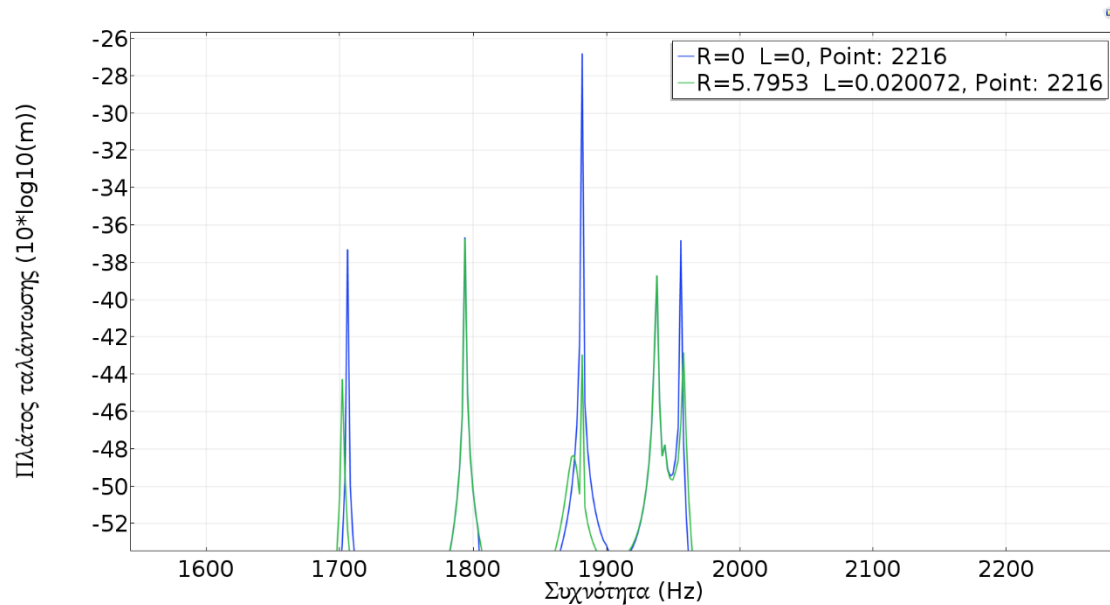


Διάγραμμα 22. Πλάτος ταλάντωσης - Βελτιστοποίηση στα 1706 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 1706 Hz.

Έπειτα κάνουμε βελτιστοποίηση για τη συχνότητα 1882 Hz, με τη μέθοδο Nelder-Mead και μας δίνει τις τιμές $L=0.020072$ H και $R=5.7953$ Ω.

Στο διάγραμμα 23 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για το συνδεδεμένο και το βραχυκυκλωμένο μοντέλο, στο ίδιο σημείο (2216).



Διάγραμμα 23. Πλάτος ταλάντωσης - Βελτιστοποίηση στα 1882 Hz

Παρατηρούμε ότι πετυχαίνεται σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης στη συχνότητα 1882 Hz.

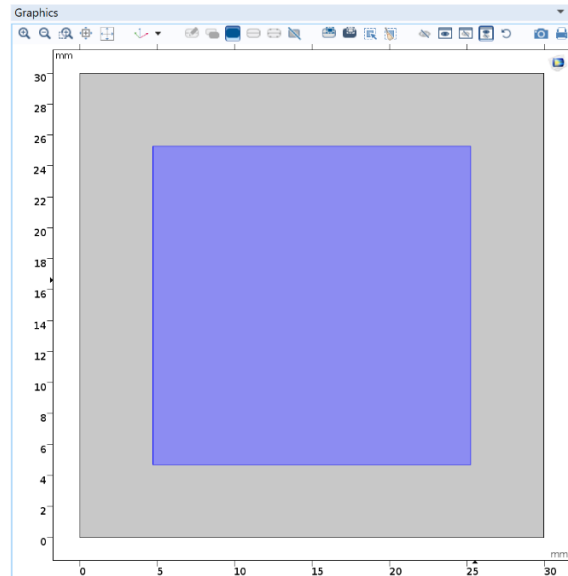
3.3 Βέλτιστες Μικροδομές

Στο στάδιο αυτό μελετώνται βέλτιστες δομές που προκύπτουν από τοπολογική βελτιστοποίηση η οποία έγινε εκτός των πλασίων της παρούσας εργασίας. Κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθούν οι αποκρίσεις των δομών αυτών ώστε η εργασία αυτή να είναι πιο πλήρης ως προς τις μεθόδους απόσβεσης ταλαντώσεων.

Στην εργασία του κ.Κουτσιανίτη [27] έγινε τοπολογική βελτιστοποίηση της σύνθετης δομής της εικόνας 11 με σκοπό τη μεγιστοποίηση του εύρους αποκοπής συχνοτήτων οπότε προέκυψαν οι βέλτιστες δομές σύνθετων υλικών των εικόνων 12,15 και 17. Οι βέλτιστες δομές έχουν το ίδιο ποσοστό από κάθε υλικό με τη σύνθετη δομή (εικόνα 11).

Στην παρούσα εργασία έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων στο πεδίο των συχνοτήτων.

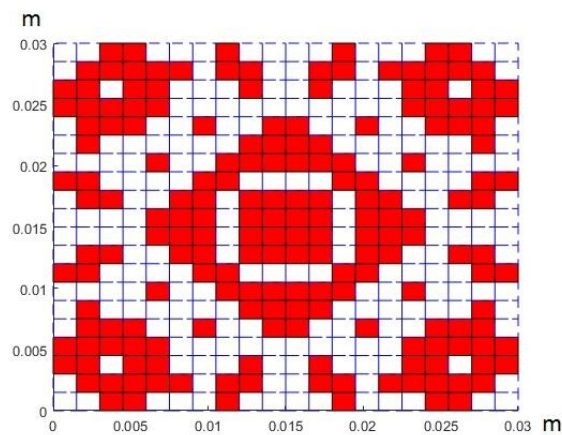
Στην εικόνα 11 με μοβ χρώμα δηλώνεται το σκληρό υλικό και με γκρι το μαλακό υλικό.



Εικόνα 11. Απλή δομή δύο υλικών

3.3.1 Βέλτιστη Δομή «1»

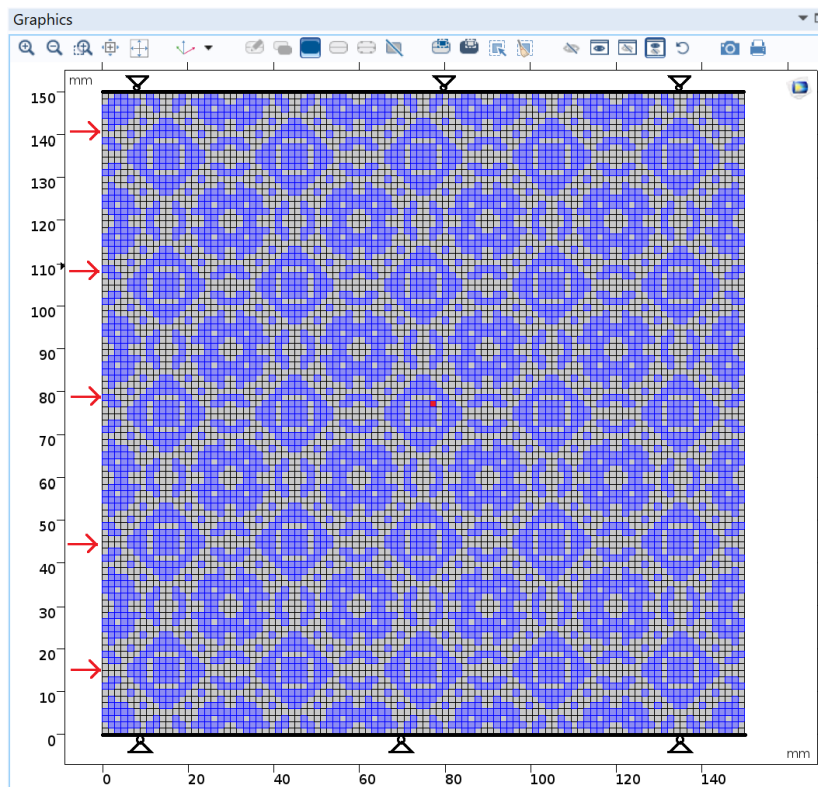
Η δομή της εικόνας 12 σχεδιάστηκε ώστε να κάνει αποκοπή των ταλαντώσεων στο εύρος συχνοτήτων 5.000 έως 6.500 Hz.



Εικόνα 12. Βέλτιστη δομή 1 [27]

Στην εικόνα 12 με κόκκινο χρώμα δηλώνεται το σκληρό υλικό και με άσπρο το μαλακό υλικό.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της δομής φτιάχτηκε ένα πλέγμα 5x5 unit cells.

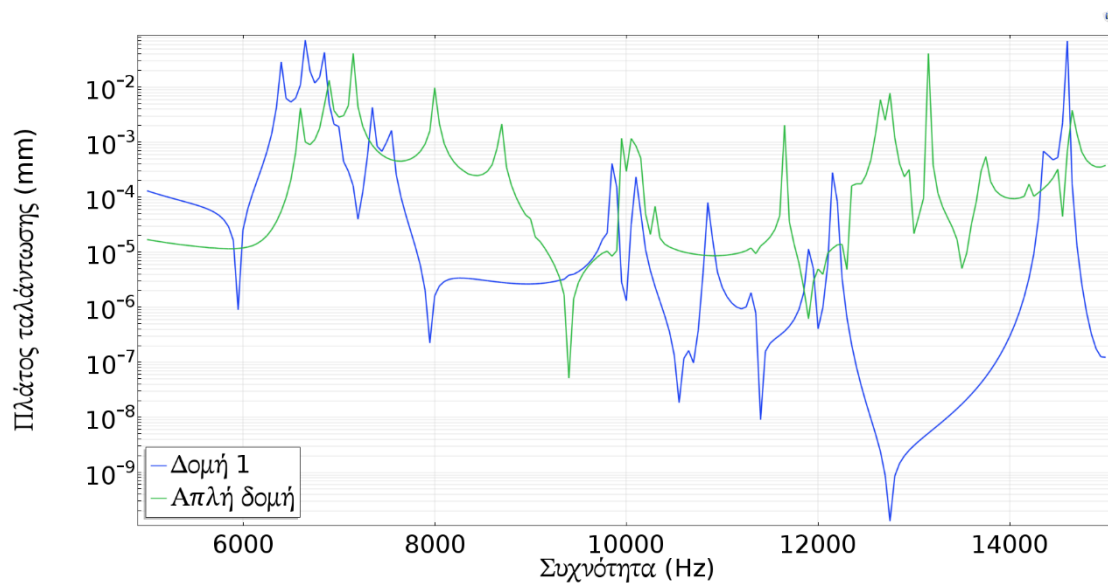


Εικόνα 13.Πλέγμα 5x5 στοιχείων Βέλτιστης δομής 1

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{x_{\max}}=1000$ N στην αριστερή πλευρά του πλέγματος.

Συνοριακές συνθήκες: $u_y=0$ στην πάνω και κάτω πλευρά.

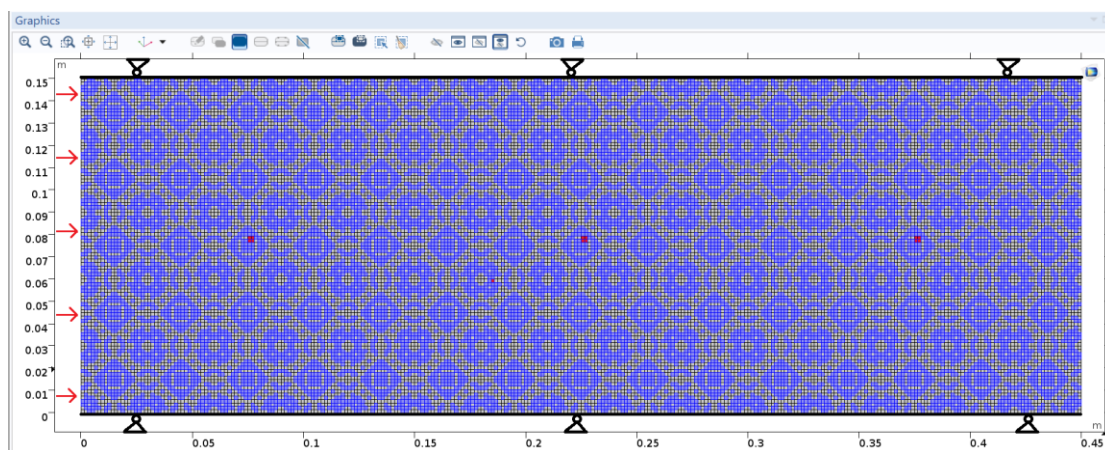
Στο διάγραμμα 24 συγκρίνονται τα αποτελέσματα του πλάτους ταλάντωσης στη X διεύθυνση για τις δύο δομές. Το σημείο μελέτης είναι το 5204 ($x=0.0765$ m, $y= 0.078$ m) στο κέντρο περίπου του πλέγματος. Η απόκριση είναι σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης, για τιμές της συχνότητας από 5000 έως 15000 Hz.



Διάγραμμα 24. Πλάτος ταλάντωσης στη x διεύθυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα

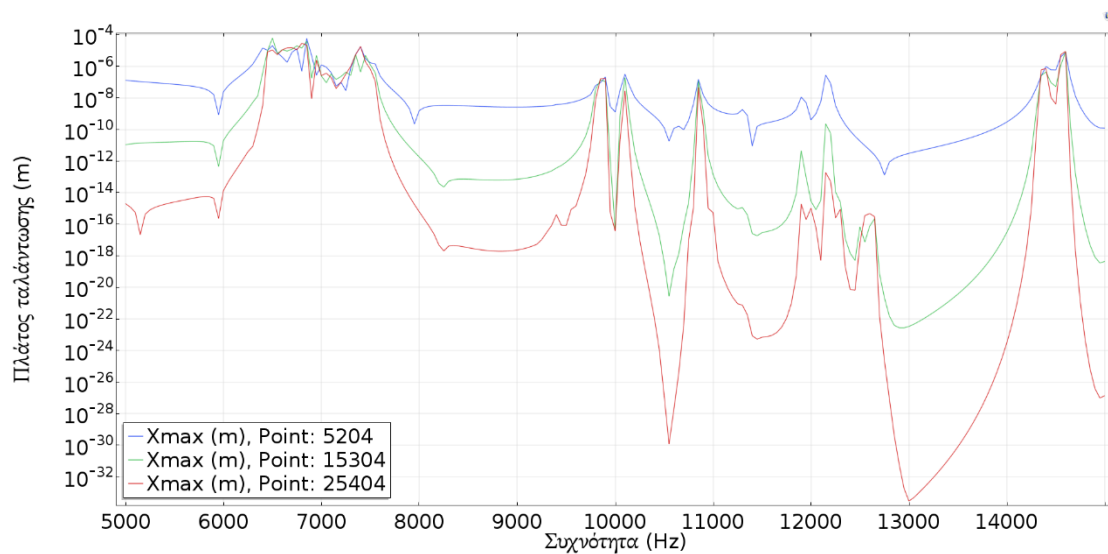
Παρατηρούμε ότι δημιουργούνται κενά ζώνης στα πεδία 7650-9100 Hz, 10200-10900 Hz και 12200-14300 Hz.

Στη συνέχεια μελετάμε τη δομή αυτή σε πλέγμα 5x15 στοιχείων με ίδιο φορτίο και συνοριακές συνθήκες.



Εικόνα 14. Πλέγμα 0.150 m x 0.450 m με μικροδομές τύπου 1

Στο διάγραμμα 25 φαίνεται το πλάτος ταλάντωσης στη X διεύθυνση, των σημείων: 5204 ($x=0.0765$ m, $y=0.078$ m), 15304 ($x=0.2265$ m, $y=0.078$ m) και 25404 ($x=0.3765$ m, $y=0.078$ m) σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης.

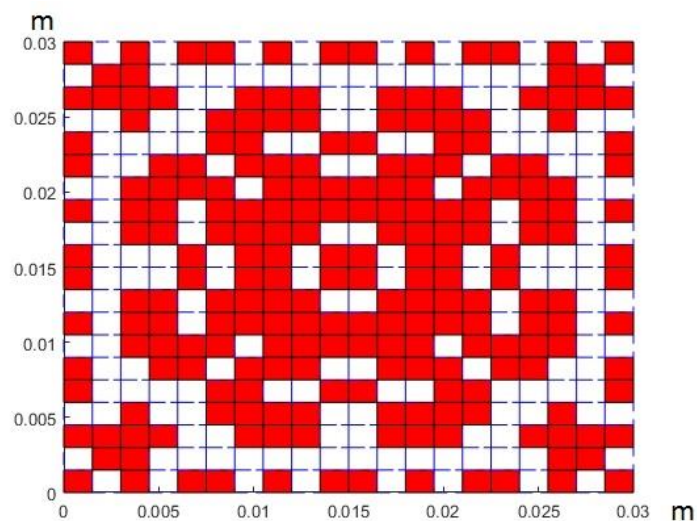


Διάγραμμα 25. Πλάτος ταλάντωσης στη x διεύθυνση τριών σημείων του πλέγματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Παρατηρούμε ότι όσο πιο μακριά από την περιοχή εφαρμογής της δύναμης επιλέγουμε το σημείο παρατήρησης τόσο μεγαλύτερη είναι η αποκοπή των ταλαντώσεων στα κενά ζώνης.

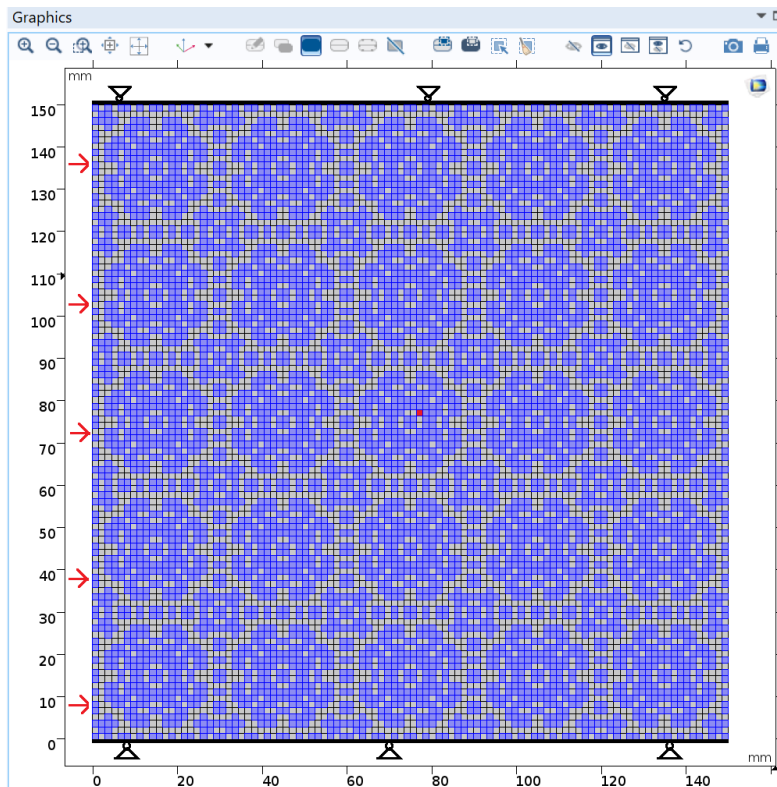
3.3.2 Βέλτιστη Δομή «2»

Η δομή της εικόνας 15 σχεδιάστηκε ώστε να κάνει αποκοπή των ταλαντώσεων στο εύρος συχνοτήτων 8.000 έως 9.000 Hz.



Εικόνα 15. Βέλτιστη δομή 2 [27]

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της δομής φτιάχτηκε ένα πλέγμα 5x5 unit cells.

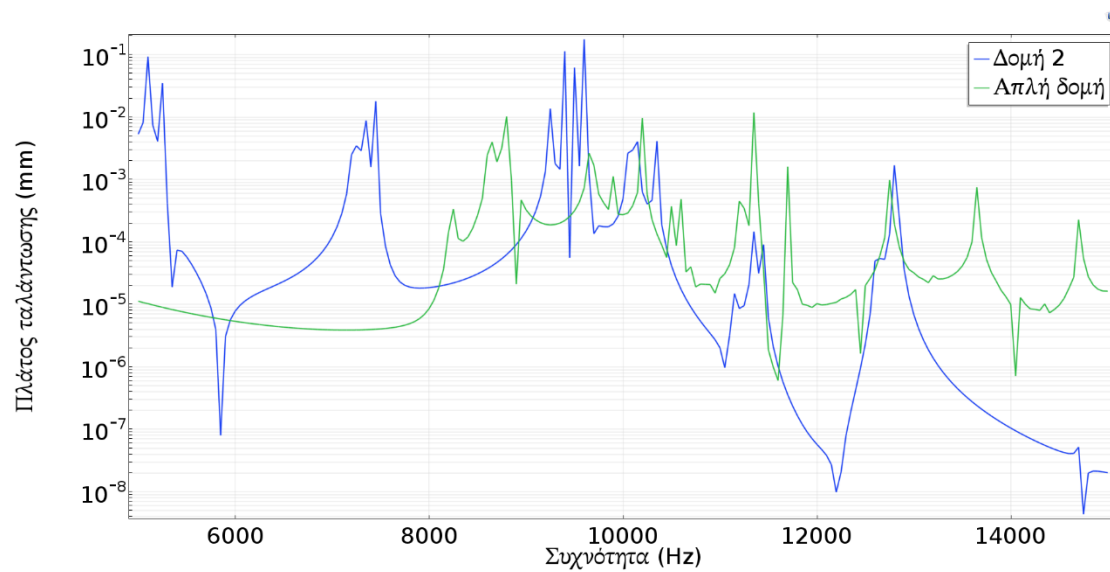


Εικόνα 16. Πλέγμα 5x5 στοιχείων βέλτιστης δομής 2

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{x_{\max}} = 1000 \text{ N}$ στην αριστερή πλευρά του πλέγματος.

Συνοριακές συνθήκες: $u_y = 0$ στην πάνω και κάτω πλευρά.

Στο διάγραμμα 26 συγκρίνονται τα αποτελέσματα του πλάτους ταλάντωσης στη X διεύθυνση για τις δύο δομές. Το σημείο μελέτης είναι το 5204 ($x = 0.0765 \text{ m}$, $y = 0.078 \text{ m}$) στο κέντρο περίπου του πλέγματος. Η απόκριση είναι σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης, για τιμές της συχνότητας από 5000 έως 15000 Hz.

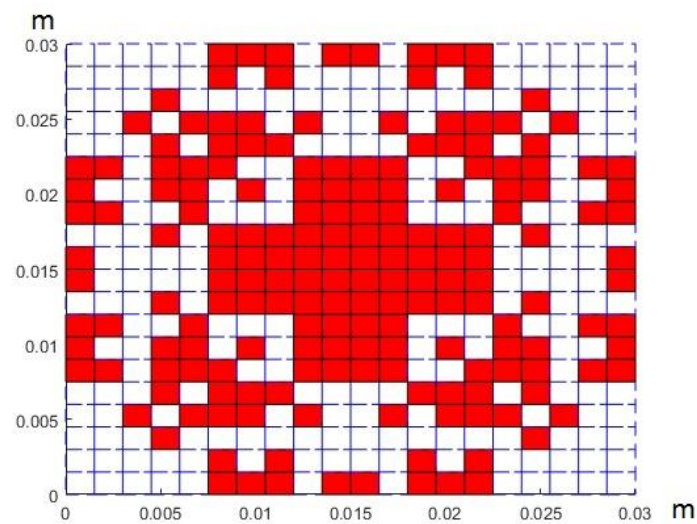


Διάγραμμα 26. Πλάτος ταλάντωσης στη x διεύθυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Παρατηρούμε ότι δημιουργούνται κενά ζώνης στα πεδία 5300-7150 Hz, 7500-9150 Hz, 10400-11250 Hz, 11600-12500 Hz και 13150-15000 Hz.

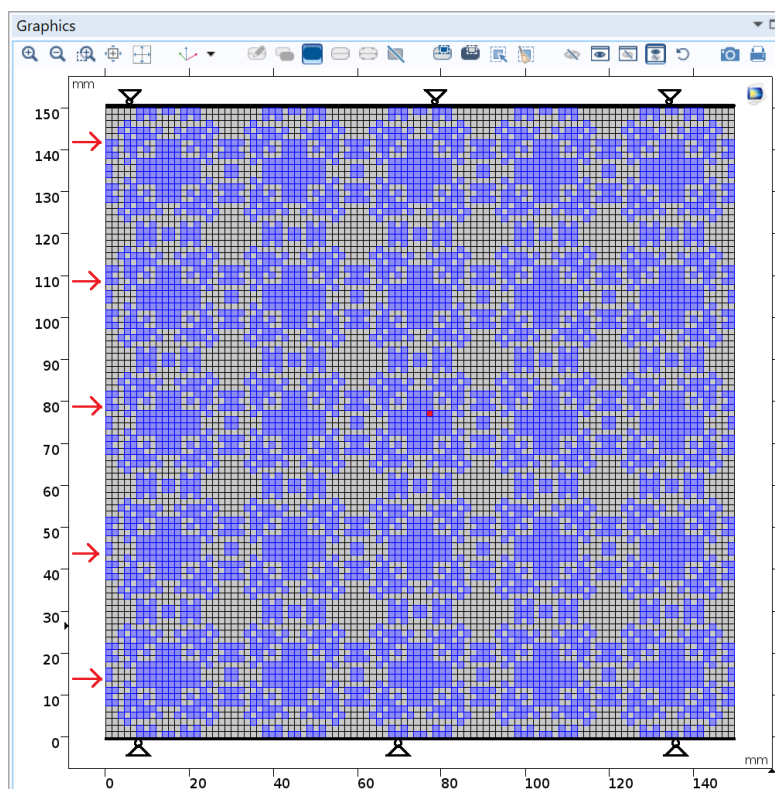
3.3.3 Βέλτιστη Δομή «3»

Η δομή της εικόνας 17 σχεδιάστηκε ώστε να κάνει αποκοπή των ταλαντώσεων στο εύρος συχνοτήτων 9.500 έως 10.500 Hz.



Εικόνα 17. Βέλτιστη δομή 3 [27]

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της δομής φτιάχτηκε ένα πλέγμα 5x5 unit cells.

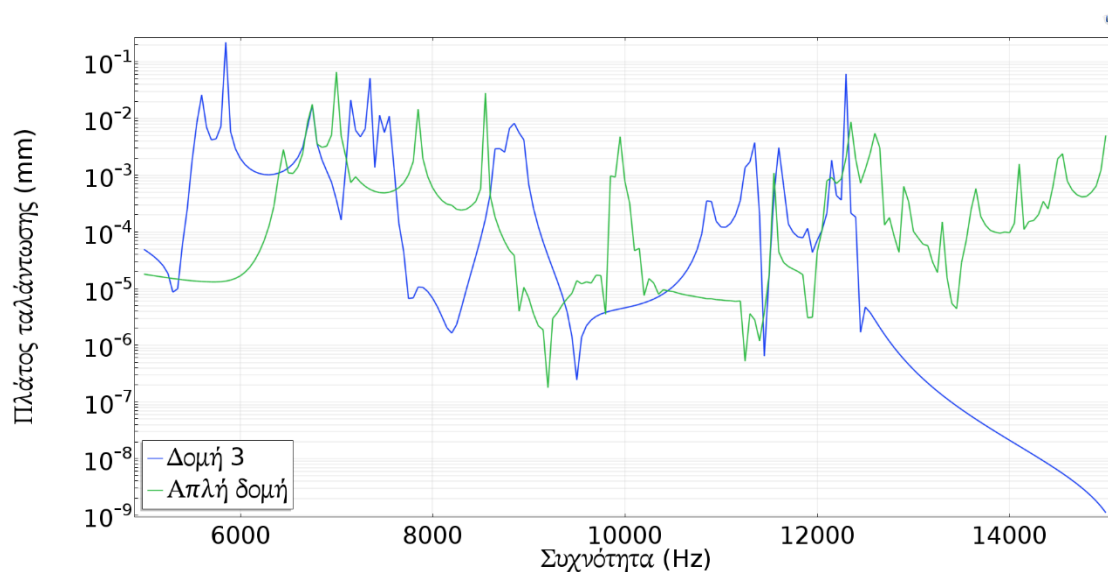


Εικόνα 18. Πλέγμα 5x5 στοιχείων Βέλτιστης δομής 3

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{x_{\max}} = 1000 \text{ N}$ στην αριστερή πλευρά του πλέγματος.

Συνοριακές συνθήκες: $u_y = 0$ στην πάνω και κάτω πλευρά.

Στο διάγραμμα 27 φαίνεται το πλάτος ταλάντωσης στη X διεύθυνση, του σημείου 5204 ($x=0.0765 \text{ m}$, $y=0.078 \text{ m}$) στο κέντρο περίπου του πλέγματος.

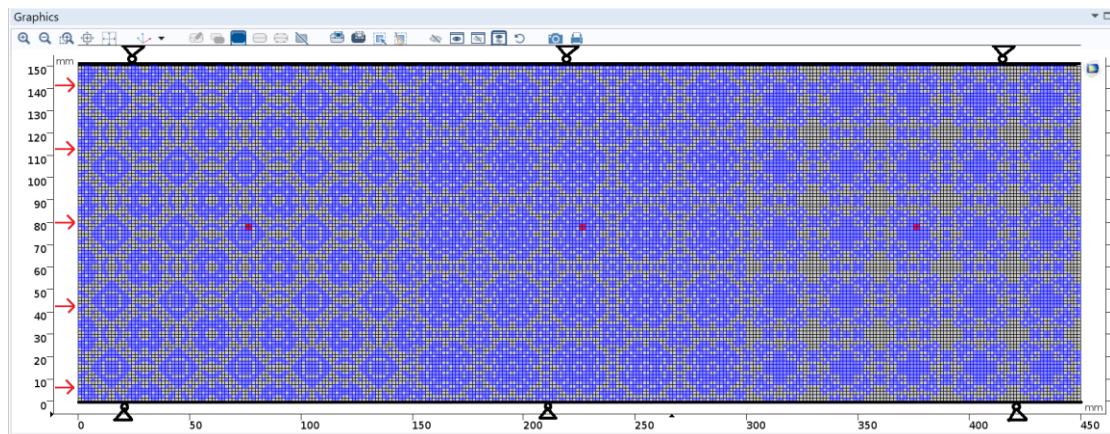


Διάγραμμα 27. Πλάτος ταλάντωσης στη x διεύθυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Παρατηρούμε ότι δημιουργούνται κενά ζώνης στα πεδία 5900-6650 Hz, 6800-7100 Hz, 7650-8550 Hz, 9200-10750 Hz και 12450-15000 Hz.

3.3.4 Σύνθεση πλέγματος από τρία διαφορετικά πλέγματα σε σειρά

Στην προσομοίωση αυτή μελετήθηκε η απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων του παρακάτω πλέγματος το οποίο αποτελεί ένωση των τριών προηγούμενων πλεγμάτων.

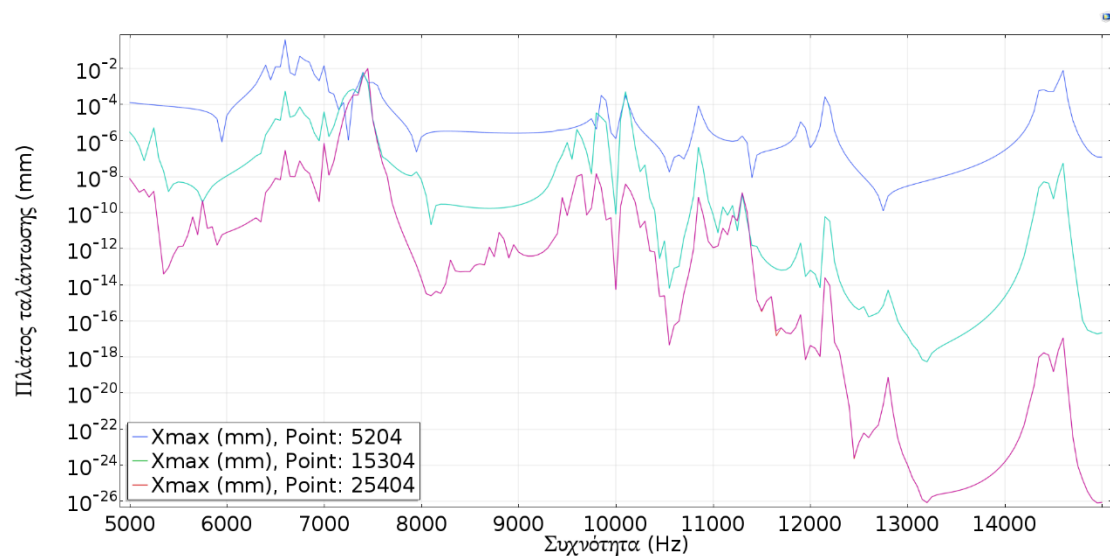


Εικόνα 19. Πλέγμα τριών δομών σε σειρά (δομή 1- δομή 2- δομή 3)

Εφαρμόζεται αρμονικό φορτίο: $F_{x_{\max}} = 1000$ N στην αριστερή πλευρά του πλέγματος.

Συνοριακές συνθήκες: $u_y = 0$ στην πάνω και κάτω πλευρά.

Στο διάγραμμα 28 φαίνεται το πλάτος ταλάντωσης στη X διεύθυνση, των σημείων: 5204 ($x=0.0765$ m, $y=0.078$ m), 15304 ($x=0.2265$ m, $y=0.078$ m) και 25404 ($x=0.3765$ m, $y=0.078$ m) στο κέντρο περίπου των επιμέρους πλεγμάτων.

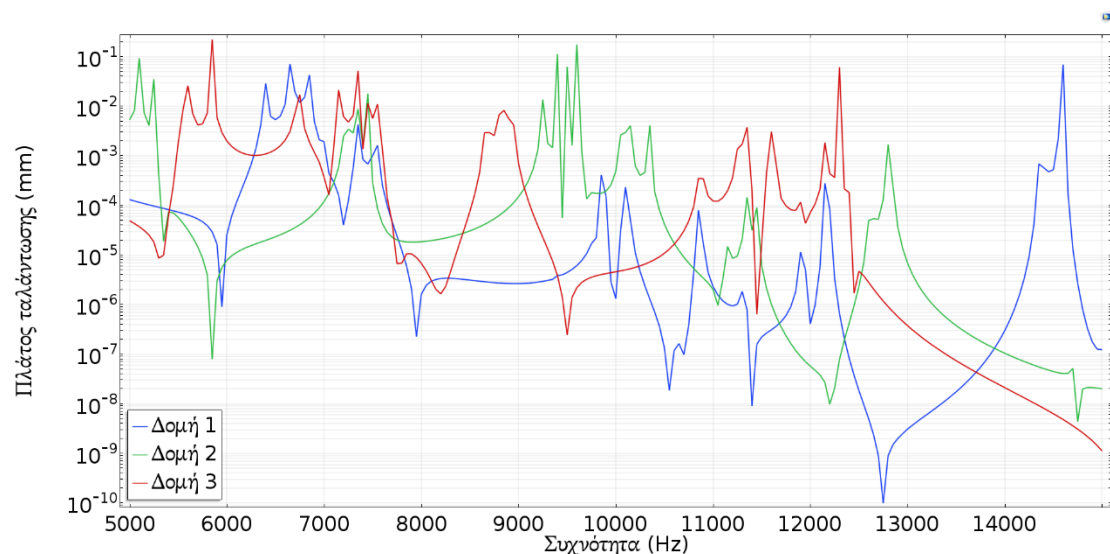


Διάγραμμα 28. Πλάτος ταλάντωσης σε σημεία στο κέντρο των επιμέρους πλεγμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Παρατηρείται ότι όσο πιο μακριά από την περιοχή εφαρμογής της δύναμης επιλέγουμε το σημείο παρατήρησης, τόσο μικρότερο είναι το πλάτος ταλάντωσης. Εφόσον η ταλάντωση διαδίδεται από τα αριστερά προς τα δεξιά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύνθετο πλέγμα έχει σαν αποτέλεσμα την περεταίρω μείωση του πλάτους της ταλάντωσης.

3.3.5 Σύγκριση δομών «1», «2» ΚΑΙ «3»

Εφαρμόζοντας τις ίδιες συνοριακές συνθήκες και την ίδια φόρτιση συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για το ίδιο σημείο εξέτασης στα πλέγματα των τριών διαφορετικών δομών.

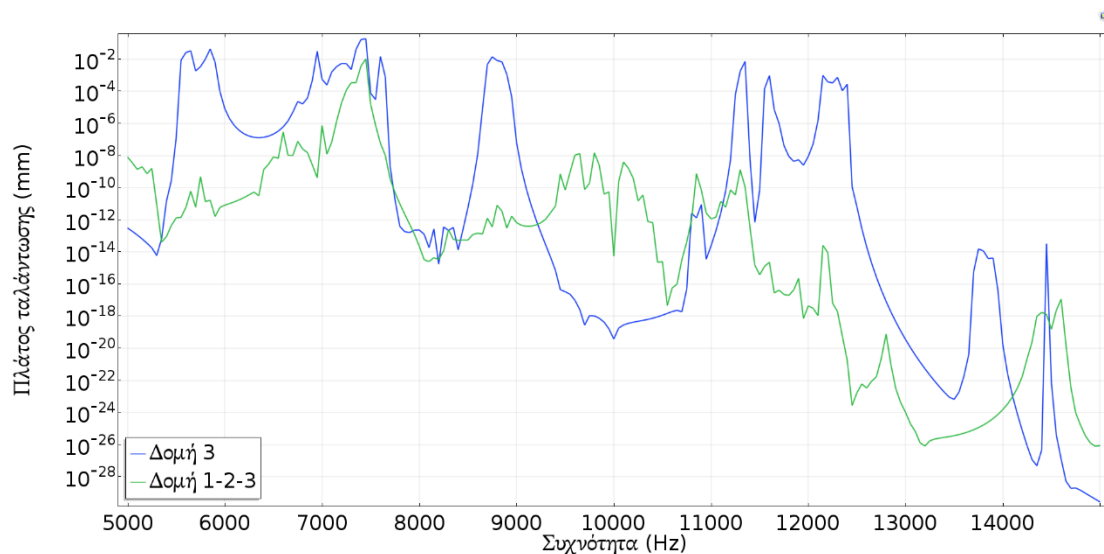


Διάγραμμα 29. Σύγκριση πλάτους ταλάντωσης του ίδιου σημείου ($x=0.0765$ m, $y=0.078$ m) σε πλέγματα 5x5 στοιχείων των τριών βελτιωμένων δομών.

Παρατηρούμε ότι η δομή 1 είναι γενικά πιο αποτελεσματική στο εύρος 8300 έως 9300 Hz και 12400 έως 13600 Hz.

3.3.6 Επιπλέον συγκρίσεις

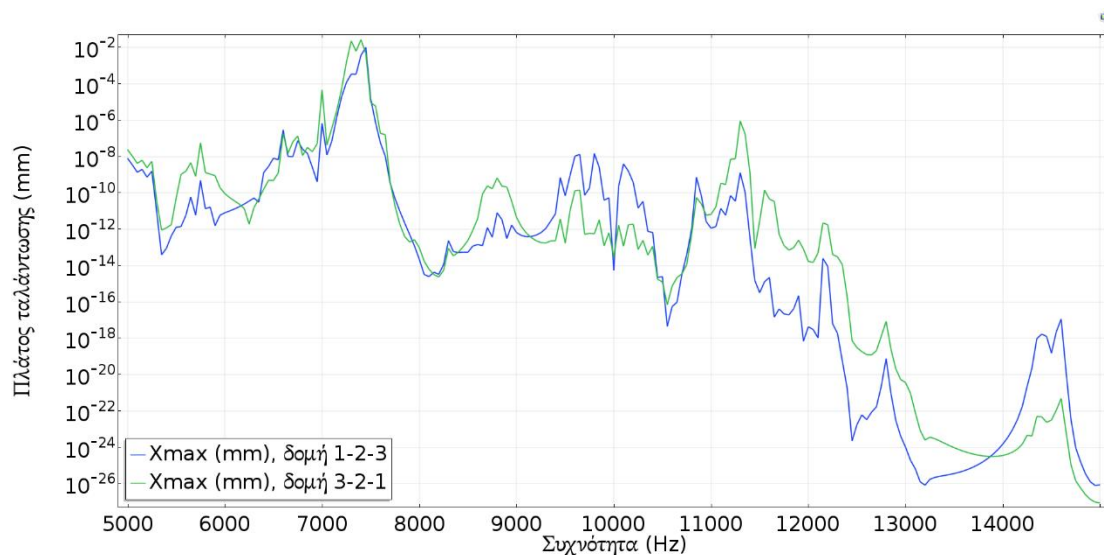
Στη συνέχεια συγκρίνουμε τα αποτελέσματα από ένα τριπλό πλέγμα της δομής 3 (150 mm x 450 mm) με τη σύνθετη δομή που παρουσιάστηκε στην εικόνα 12, στο σημείο 25404 ($x=0.3765$ m, $y=0.078$ m).



Διάγραμμα 30. Σύγκριση πλάτους ταλάντωσης στο σημείο 25404 ($x=0.3765$ m, $y=0.078$ m) της σύνθετης δομής και της δομής 3 (πλέγμα 5×15 στοιχείων)

Παρατηρούμε ότι στη σύνθετη δομή αποκόπτεται η ταλάντωση σημαντικά σε κάποια εύρη συχνοτήτων σε σχέση με το πλέγμα που αποτελείται μόνο από τη δομή 3.

Έπειτα στο μοντέλο της σύνθετης δομής, που παρουσιάστηκε στην εικόνα 12, αλλάζουμε τη σειρά των δομών σε $3^{\text{η}}$ - $2^{\text{η}}$ - $1^{\text{η}}$ και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με το αρχικό μοντέλο στο σημείο 25404 ($x=0.3765$ m, $y=0.078$ m).



Διάγραμμα 31. Σύγκριση πλάτους ταλάντωσης σε δύο σύνθετες δομές 5×15 στοιχείων με διαφορετική σειρά των δομών

Παρατηρούμε ότι η σειρά των πλεγμάτων επιδρά σημαντικά στην απόκριση του συστήματος. Παρόλο που τα δύο γραφήματα ακολουθούν παρόμοια μορφή, όπως ήταν αναμενόμενο, οι γραφικές παραστάσεις δεν ταυτίζονται.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη μιας σύγχρονης τεχνολογίας σχεδιασμού η οποία μπορεί να προσδώσει υψηλή προστιθέμενη αξία σε έξυπνα προϊόντα. Πιθανές εφαρμογές περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την ανάπτυξη ευφυούς αθλητικού εξοπλισμού, έξυπνων συστημάτων ακουστικής μόνωσης, ελαφρών, ηχομονωτικών κατασκευών κελύφους οχημάτων, ελέγχου των κραδασμών σε εργαλεία κοπής, ελέγχου ανεπιθύμητων ταλαντώσεων σε μηχανολογικές εφαρμογές κλπ. Επίσης, η τεχνολογία αυτή μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία καλύτερων και ασφαλέστερων μηχανικών μοντέλων, το οποίο σημαίνει λιγότερη κόπωση, αυξημένη ασφάλεια, ελάττωση των ατυχημάτων, αύξηση της παραγωγικότητας κλπ.

Για μελλοντική έρευνα τα αντικείμενα που προτείνονται είναι η παρούσα μελέτη να διευρυνθεί σε τρισδιάστατα μοντέλα και να γίνει διερεύνηση διαφορετικών αυξητικών δομών και υλικών, καθώς και χρήση διαφορετικών παθητικών κυκλωμάτων διακλάδοσης.

5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΕΙΑ

- [1] Thomas, O., Deü, J.-F., and Ducarne, J. (2009). Vibrations of an elastic structure with shunted piezoelectric patches: efficient finite element formulation and electromechanical coupling coefficients. *Int J Numer Meth Eng.* 80, 235–268.
- [2] Tairidis, G. K. (2019). Vibration control of smart composite structures using shunted piezoelectric systems and neuro-fuzzy techniques. *Journal of Vibration and Control* 25, 2397-2408.
- [3] Forward, R.L. (1979). Electronic damping of vibrations in optical structures. *Appl Opt.* 18, 690-697.
- [4] Hollkamp, J. J. (1994). Multimodal passive vibration suppression with piezoelectric materials and resonant shunts. *J Intel Mat Syst Str.* 5, 49-57.
- [5] Moheimani, R.S., and Fleming, A.J. (2006). *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. London: Springer-Verlag.
- [6] Bachmann, F., Oliveira, R., Sigg, A., Schnyder, V., Delpero, T., Jaehne, R., Ermanni, P. (2012). Passive damping of composite blades using embedded piezoelectric modules or shape memory alloy wires: a comparative study. *Smart Mater. Struct.* 21, 075027 (13 pages).
- [7] Viana, F. A., and Steffen, J. V. (2006). Multimodal vibration damping through piezoelectric patches and optimal resonant shunt circuits. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.* 28, 293-310.
- [8] Stavroulakis, G., Foutsitzi, G., Hadjigeorgiou, E., Marinova, D., and Baniotopoulos, C. (2005). Design and robust optimal control of smart beams with application on vibrations suppression. *Adv Eng Softw.* 806–813.
- [9] Corr, L., and Clark, W. (2003). A Novel Semi-Active Multi-Modal Vibration Control Law for a Piezoceramic Actuator. *J Vib Acoust.* 125(2), 214-222.

- [10] Behrens, S., Fleming, A.J., and Moheimani, S.O. (2004). Control Orientated Synthesis of Electromagnetic Shunt Impedances for Vibration Isolation. 3rd IFAC Symposium on Mechatronic Systems 2004, Sydney: Elsevier, 301-306.
- [11] Fleming, A., Behrens, S., and Moheimani, S. (2000). A New Approach to Piezoelectric Shunt Damping. In Proc. International Symposium on Smart Structures and Microsystems, Hong Kong.
- [12] Lossouarn, B., Aucejo, M., Deü, J.-F., and Multon, B. (2017). Design of inductors with high inductance values for resonant piezoelectric damping. *Sens. Actuator A-Phys.* 259, 68-76.
- [13] Isola, F. d., Maurini, C., and Porfiri, M. (2004). Passive damping of beam vibrations through distributed electric networks and piezoelectric transducers: prototype design and experimental validation. *Smart Mater Struct.* 13, 299-308.
- [14] Høgsberg, J., and Krenk, S. (2015). Piezoelectric RL shunt damping of flexible structures. 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, Ponta Delgada, (15 pages).
- [15] Hassan, H., Yves, B., and Razek, A. (2011). Finite element model of a beam structure with piezoelectric patches using RL shunt circuits. 14th International Conference on active systems for dynamics markets, Darmstadt, (124-131).
- [16] Chevallier, G., Ghorbel, S., and Benjeddou, A. (2009). Piezoceramic shunted damping concept: testing, modelling and correlation. *Mec Ind.* 10, 397-411.
- [17] Saravanos, D. (1999). Damped vibration of composite plates with passive piezoelectric-resistor elements. *J Sound Vib.* 221, 867-885.
- [18] Park, C.H., Kim, Y.H., and Park, H.C. (2005). Dynamic Formulations of Plates with Shunted Piezoelectric Materials. *J Intell Mater Syst Struct.* 16, 971-976.
- [19] Mirante Lorenzo (2015), "Auxetic structures: Towards bending-active architectural applications", Master Thesis, Icar/12 Tecnologia dell'architettura, Paoletti Ingrid
- [20] B.R. Mace, E Manconi, "Modelling wave propagation in two-dimensional structures using finite element analysis.", *J Sound Vib* 318:884–902, 2008
- [21] L. Jianbao, W. Yue-Sheng, Z. Chuanzeng (2010), "Finite Element Method for Analysis of Band Structures of 2D Phononic Crystals with Archimedean-like tilings." *AIP Conference Proceedings* 1233, 131
- [22] W. Yifan, B. Ramirez, K. Carpenter, C. Naify, D. C. Hofmann, C. Daraio, "Architected lattices with adaptive energy absorption", *Extreme Mechanics Letters*, 33, 2019
- [23] N. Aravantinos-Zafiris, and M. M. Sigalas, "Large scale phononic metamaterials for seismic isolation", *J. Appl. Phys.* 118, 2015
- [24] B. Ungureanu, Y. Achaoui, S. Enoch, S. Brûlé, S. Guenneau (2015), "Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections", *EPJ Applied Metamaterials*, Volume 2, Article Number: 17, Number of page(s): 8 .
- [25] W. Chen, X. Tian, R. Gao, S. Liu, "A low porosity perforated mechanical metamaterial with negative Poisson's ratio and band gaps.", *Smart Mater Struct*, 27:115010 , 2018

- [26] J. Hubert, Finite Element Analysis of Tunable Composite Tubes Reinforced with Auxetic Structures, *Materials*, 10(12): 1359, 2017
- [27] Κουτσιανίτης Παναγιώτης (2020), «Σχεδιασμός μικροδομής ευφυών υλικών και κατασκευών με χρήση βελτιστοποίησης», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμ. Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Διδακτορική διατριβή.
- [28] Koutsianitis, P.I., Tairidis, G.K., Drosopoulos, G.A. , Stavroulakis, G.E., Conventional and star-shaped auxetic materials for the creation of band gaps *Arch Appl Mech* (2019) 89: 2545.
- [29] Marakakis Konstantinos, Tairidis Georgios K., Koutsianitis Panagiotis, Stavroulakis Georgios E., Shunt Piezoelectric Systems for Noise and Vibration Control: A Review *Frontiers in Built Environment* Vol. 5 2019.
- [30] Νίκος Πίγκας Μπαλανίγκας (2017), «Διερεύνηση πιεζοηλεκτρικών συστημάτων στις κατασκευές», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμ. Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Διπλωματική εργασία σελ.10 .
- [31] Joseph N. Grima, Daphne Attard and Ruben Gatt.,2009, “A novel chemo-mechanical process for making auxetic foams and for their reconversion to conventional foam”, *Advanced Engineering Materials* 11(7):533 - 535
- [32] “Smart textile materials”, https://campus.mines-douai.fr/pluginfile.php/19034/mod_resource/content/0/CH2_en_mai_2013/co/ch2_5_2_en.html
- [33] Georgios E. Stavroulakis, Paraskevi Boura, Mathaios Aliopis , “Nike goes auxetic. Why?”, *Cesare’17, Dead Sea, Amman, Jordan* 2017

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στις βελτιωμένες δομές «1», «2» και «3» χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά.

Πίνακας 1

Steel			Rubber		
Density	7800	kg/m ³	Density	1000	kg/m ³
Poisson's ratio	0,25	-	Poisson's ratio	0,4	-
Young's modulus	$2 \cdot 10^{11}$	Pa	Young's modulus	$5 \cdot 10^7$	Pa

Στη μοντελοποίηση του δοκαριού με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω παράμετροι.

Πίνακας 2

Μήκος δοκαριού (mm)	lb	170
Ύψος δοκαριού (mm)	hb	2
Πλάτος δοκαριού και πιεζοηλεκτρικού (mm)	b	20
Πυκνότητα υλικού δοκαριού (kg/m ³)	rb	2800
Young's Modulus υλικού δοκαριού (Pa)	Yb	$72 \cdot 10^9$
Μήκος πιεζοηλεκτρικού επιθέματος (mm)	lp	25
Ύψος πιεζοηλεκτρικού επιθέματος (mm)	hp	0,5
Πυκνότητα υλικού πιεζοηλεκτρικού (kg/m ³)	rp	8500
Θέση στον x-άξονα πιεζοηλεκτρικού (mm)	x ₋	0,5
Poisson's ratio υλικού δοκαριού	vb	0,31
Elastic constants (compliance) πιεζοηλεκτρικού	s11	1,50E-11
	s12	-4,50E-12
	s13	-5,70E-12
	s33	1,90E-11
	s44	5,10E-11
Piezoelectric charge constants	d31	-2,10E-10
	d33	5,00E-10
	d15	0
Permittivity perpendicular to the polarity	E11	1980
Permittivity in the polarization direction	E33	2400
Συντελεστής Αυτεπαγωγής	L	2,5
Ωμική Αντίσταση	R	5000

Στο σύνθετο μοντέλο αυξητικής δομής αστεριού με πιεζοηλεκτρικά χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω παράμετροι.

Πίνακας 3

Young's Modulus υλικού αστεριού	E2	200e9[Pa]
Πυκνότητα υλικού αστεριού	Rho2	7800[kg/m ³]
Poisson's ratio υλικού αστεριού	Poisson2	0,25
Πυκνότητα υλικού πιεζοηλεκτρικού	rp	8500[kg/m ³]
Elastic constants (compliance) πιεζοηλεκτρικού	s11	1,50E-11
	s12	-4,50E-12
	s13	-5,70E-12
	s33	1,90E-11
	s44	5,10E-11
Piezoelectric charge constants	d31	-2,10E-10
	d33	5,00E-10
	d15	0
Permittivity perpendicular to the polarity	E11	1980
Permittivity in the polarization direction	E33	2400
Συντελεστής Αυτεπαγωγής	L	0
Ωμική Αντίσταση	R	0

Συντεταγμένες γεωμετρικών σημείων αυξητικής δομής αστεριού

A) Εξωτερικού περιβλήματος

Πίνακας 4

	x	y
1	-0,00100	0,07140
2	-0,00100	0,01428
3	-0,05355	0,05355
4	-0,01428	0,00100
5	-0,07140	0,00100
6	-0,07140	-0,00100
7	-0,01428	-0,00100
8	-0,05355	-0,05355
9	-0,00100	-0,01428
10	-0,00100	-0,07140
11	0,00100	-0,07140
12	0,00100	-0,01428
13	0,05355	-0,05355
14	0,01428	-0,00100
15	0,07140	-0,00100
16	0,07140	0,00100
17	0,01428	0,00100
18	0,05355	0,05355

19	0,00100	0,01428
20	0,00100	0,07140

Β)Εσωτερικού περιβλήματος

Πίνακας 5

	x	y
1	0	0,01128
2	-0,044635843	0,044635843
3	-0,01128	0
4	-0,044635843	-0,044635843
5	0	-0,01128
6	0,044635843	-0,044635843
7	0,01128	0
8	0,044635843	0,044635843

Γ) Πιεζοηλεκτρικών στοιχείων ενός τεταρτημορίου

	x	y
1	0,040964694	0,035873431
2	-0,040564174	0,036172735
3	-0,016426095	0,003871843
4	-0,016826616	0,003572539

	x	y
1	-0,039118682	0,037252934
2	-0,038718161	0,037552239
3	-0,014580083	0,005251347
4	-0,014980603	0,004952042

	x	y
1	-0,036172735	0,040564174
2	-0,035873431	0,040964694
3	-0,003572539	0,016826616
4	-0,003871843	0,016426095

	x	y
1	-0,037552239	0,038718161
2	-0,037252934	0,039118682
3	-0,004952042	0,014980603
4	-0,005251347	0,014580083