



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

***Προσομοίωση παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών συστημάτων για την
απόσβεση ταλαντώσεων σε ευφρείς κατασκευές μέσω της μεθόδου των
πεπερασμένων στοιχείων***

Δουλάς Ιωάννης

ΑΜ ≈ 2018010084

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

1ο μέλος εξεταστικής επιτροπής: Αριστομένης Αντωνιάδης

2ο μέλος εξεταστικής επιτροπής: Παναγιώτης Αλευράς

Χανιά, Ιούνιος 2025

Αφιερωμένη

Στον πατέρα μου Αντώνη, τη μητέρα μου Βάσω και την αδερφή μου Άσπα,
για την αγάπη, το χιούμορ και την αληθινή τους στήριξη σε κάθε μου βήμα.

Και στην Έλενα μου,
για την πίστη, την ηρεμία και την αγκαλιά της,
όταν όλα τα άλλα έμοιαζαν αβέβαια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που εμφανίζονται στις κατασκευές, αποτελούν οι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση των κατασκευών, καθώς και την ασφάλεια και την αξιοπιστία τους. Ως απόρροια των παραπάνω, παρατηρείται αύξηση της ζήτησης για ελαφριές, αποδοτικές και ανθεκτικές κατασκευές, οι οποίες δεν θα κάνουν υπέρμετρη εκμετάλλευση πόρων.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά προσφέρουν μια ελκυστική λύση στον τομέα της απόσβεσης ταλαντώσεων, εφόσον παρέχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Εκτός αυτού, όταν συνδυάζονται με κυκλώματα παραδιακλάδωσης, όπως είναι ένα κύκλωμα αντίστασης - πηνίου, μπορούν να διαμορφώσουν αποδοτικούς μηχανισμούς απόσβεσης ταλαντώσεων και μείωση των κραδασμών, οι οποίοι προσαρμόζονται ικανοποιητικά στις δυναμικές απαιτήσεις της κατασκευής.

Στην παρούσα διπλωματική προσομοιώνονται κυκλώματα παραδιακλάδωσης εφαρμοσμένα σε πιεζοηλεκτρικά συστήματα για την απόσβεση ταλαντώσεων σε ευφυείς κατασκευές, έχοντας ως πρόκληση τον προσδιορισμό των καταλληλότερων παραμέτρων του ηλεκτρικού κυκλώματος. Η μελέτη εστιάζει σε μια δοκό με χαραγμένη μια αυξητική μικροδομή εγκοπών, πάνω στην οποία τοποθετείται πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Μέσω μιας στατικής (static), ιδιομορφικής (modal) και αρμονικής (harmonic) ανάλυσης, με την βοήθεια του λογισμικού ANSYS, εξετάζονται οι μηχανικές και οι δυναμικές ιδιότητες του συστήματος, καθώς και οι κατάλληλα ρυθμισμένες τιμές αντίστασης και πηνίου του κυκλώματος. Η εργασία αποσκοπεί στη βελτίωση της απόσβεσης ταλαντώσεων μέσω της καλύτερης δυνατής παραμετροποίησης του συστήματος.

ABSTRACT

One of the most critical issues encountered in structural applications is the presence of undesirable vibrations, which can adversely affect the performance, safety, and reliability of a system. As a result, there is growing demand for lightweight, efficient, and durable structures that minimize the excessive use of resources.

Piezoelectric materials offer a promising solution in the field of vibration damping, as they possess the unique ability to convert mechanical energy into electrical energy and vice versa. Furthermore, when coupled with shunt circuits, such as resistor-inductor (RL) circuits, they can form effective vibration suppression mechanisms, capable of adapting to the dynamic requirements of the structure.

This thesis investigates the application of shunt circuits in piezoelectric systems for the damping of vibrations in smart structures, with the main challenge being the identification of optimal electrical circuit parameters. The study focuses on a cantilever beam incorporating an engraved additive microstructure, on which a piezoelectric patch is mounted. Through static, modal, and harmonic analysis using ANSYS software, the mechanical and dynamic behavior of the system is evaluated, along with the tuning of resistance and inductance values within the circuit. The objective of this research is to enhance vibration suppression by achieving optimal system parameterization.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. ΓΕΩΡΓΙΟ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ και την υπεύθυνη κ. ΜΑΡΙΑ-ΣΤΥΛΙΑΝΗ ΔΑΡΑΚΗ για την αμέριστη καθοδήγηση, την επιστημονική τους υποστήριξη και τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η εμπιστοσύνη και η ενθάρρυνσή τους υπήρξαν καθοριστικές για την πρόοδο και την επιτυχία του έργου.

Ευχαριστώ επίσης την επιτροπή αξιολόγησης και τους διδάσκοντες του Τμήματος για τις γνώσεις και τα εφόδια που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου και φίλους μου για τη συνεχή υποστήριξη και συνεργασία σε κάθε στάδιο της φοιτητικής μου πορείας.

Τέλος, ένα βαθύ ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για τη διαρκή τους στήριξη, την υπομονή και την πίστη τους σε εμένα. Χωρίς αυτούς, τίποτα από όλα αυτά δεν θα ήταν δυνατό.

ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΟΥΛΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 ΠΕΡΙ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	12
2.1 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ YOUNG.....	12
2.1.1 ΜΙΑ ΒΑΣΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ	12
2.1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ YOUNG.....	12
2.1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ	13
2.1.4 ΕΛΑΣΤΙΚΗ & ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	14
2.2 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	15
2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
2.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	15
2.2.2 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΧΑΛΑΖΙΑ	17
2.2.3 ΠΟΛΩΣΗ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ	18
2.2.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ.....	19
2.2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	20
2.3 Ο ΛΟΓΟΣ POISSON ΚΑΙ ΤΑ ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	20
2.3.1 Ο ΛΟΓΟΣ ΤΟΥ POISSON: ΜΙΑ ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	20
2.3.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ Ο ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΤΟΥ POISSON	21
2.3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ.....	22
2.3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΣΕΩΝ	23
2.3.5 ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	23
2.4 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	25
2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	25
2.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ	25
2.4.3 ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ (PASSIVE SHUNT)	27

2.4.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΜΙΑΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	28
2.4.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	33
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESHING).....	34
3.3 ΣΧΗΜΑΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	35
3.4 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΟΡΦΗΣ (SHAPE FUNCTIONS)	36
3.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEM).....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	39
4.1 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ.....	39
4.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS	39
4.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ	39
4.4 ΕΥΦΥΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	40
4.4.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	40
4.4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	42
4.4.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	44
4.5 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (STATIC ANALYSIS)	47
4.5.1 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	48
4.5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (TOTAL DEFORMATION).....	48
4.5.3 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	51
4.5.4 ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ.....	55
4.5.5 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (EQUIVALENT STRESS)	58
4.5.6 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ POISSON	60
4.6 ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ ...	62
4.6.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΜΕΝΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ.....	62
4.6.2 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΩΔΙΚΑ.....	64
4.7 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (MODAL ANALYSIS)	66
4.8 ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (HARMONIC ANALYSIS)	69
4.8.1 ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	69
4.8.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΤΙΜΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ (L)	72
4.8.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΤΙΜΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (R).....	75

4.8.3 ΕΚΦΡΑΣΗ ΣΕ DESIBELL	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	84
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	84
5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΕΡΙ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία εξετάζει τις θεμελιώδεις μηχανικές και ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες των υλικών που σχετίζονται με την απόσβεση ταλαντώσεων σε ευφυείς κατασκευές, με στόχο την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων προσομοίωσης. Σε πρώτη φάση γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση του θεωρητικού πλαισίου της εργασίας. Αυτό περιλαμβάνει το μέτρο ελαστικότητας του Young, το οποίο αποτελεί μια βασική ελαστική σταθερά που περιγράφει τη σχέση τάσης και παραμόρφωσης στα υλικά. Ως παράδειγμα κατανόησης δίνεται μια ανάλυση της δοκιμής εφελκυσμού, εξετάζοντας τις έννοιες της ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς.

Η συνέχεια της θεωρίας επεκτείνεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο βασίζεται στην αμφίδρομη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη δομή του χαλαζία. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία πόλωσης μέσω εφαρμογής μηχανικής δύναμης, η αντιστροφή του φαινομένου, καθώς αναφέρονται και κάποιες κύριες εφαρμογές του σε τεχνολογικά συστήματα.

Βασικό κομμάτι του θεωρητικού πλαισίου είναι ο λόγος του Poisson, ο οποίος αποτελεί βασική ιδιότητα των υλικών, διότι εκφράζει τη σχέση μεταξύ διαμήκους και εγκάρσιας παραμόρφωσης. Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζονται οι μαθηματικοί ορισμοί του λόγου, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναφορά, παρατίθενται οι περιπτώσεις των υλικών που εμφανίζουν αρνητικό λόγο Poisson (auxetic materials) και υποδεικνύονται κάποιες εφαρμογές βάσει της ανάλυσης τάσεων και της μηχανικής σχεδίασης.

Εν συνεχεία, η εργασία προχωρά στην ανάλυση των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης, τα οποία αξιοποιούνται για την απόσβεση ταλαντώσεων, με την εφαρμογή τους σε πιεζοηλεκτρικά συστήματα. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας τους, καθώς και οι κατηγορίες κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται, αναδεικνύοντας τον ρόλο τους στη βελτιστοποίηση της δυναμικής απόκρισης. Το κεφάλαιο συμπληρώνεται με την σημαντικότητα των παθητικών διατάξεων και του ελέγχου μια ιδιομορφής διαμέσω πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων έχοντας ως κατακλείδα τις γενικές ηλεκτρομηχανικές εξισώσεις των συστημάτων.

Σε δεύτερη φάση ακολουθεί εκτενής περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση των πολύπλοκων προβλημάτων της

μηχανικής. Εξετάζονται τα ζητήματα της δημιουργίας πλέγματος, της επιλογής των σχημάτων των στοιχείων και οι συναρτήσεις μορφής, καθώς και οι βασικές τεχνικές βελτίωσης του πλέγματος με στόχο την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών.

Σε τρίτη και τελευταία φάση λαμβάνει χώρα το κομμάτι προσομοίωσης της εργασίας, όπου αναπτύσσεται το μοντέλο και πραγματοποιούνται οι απαιτούμενες αναλύσεις. Η μελέτη διεξάγεται με τη βοήθεια και χρήση του λογισμικού ANSYS, εφαρμόζοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε τρεις βασικές αναλύσεις, τη στατική, την ιδιομορφική και την αρμονική ανάλυση. Αρχικά, περιγράφεται ο τρόπος της σχεδίασης της ευφυούς κατασκευής και των μερών που την απαρτίζουν και στην συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των προαναφερθέντων αναλύσεων και η ηλεκτρική μοντελοποίηση του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Στη μοντελοποίηση του κυκλώματος δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επεξήγηση του υποστηρικτικού κώδικα και των παραμέτρων που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Η εργασία ολοκληρώνεται με την εξαγωγή συμπερασμάτων και τη παρουσίαση μελλοντικών προοπτικών, συμβάλλοντας στη βελτίωση της απόσβεσης ταλαντώσεων σε σύνθετα μηχανικά συστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ YOUNG

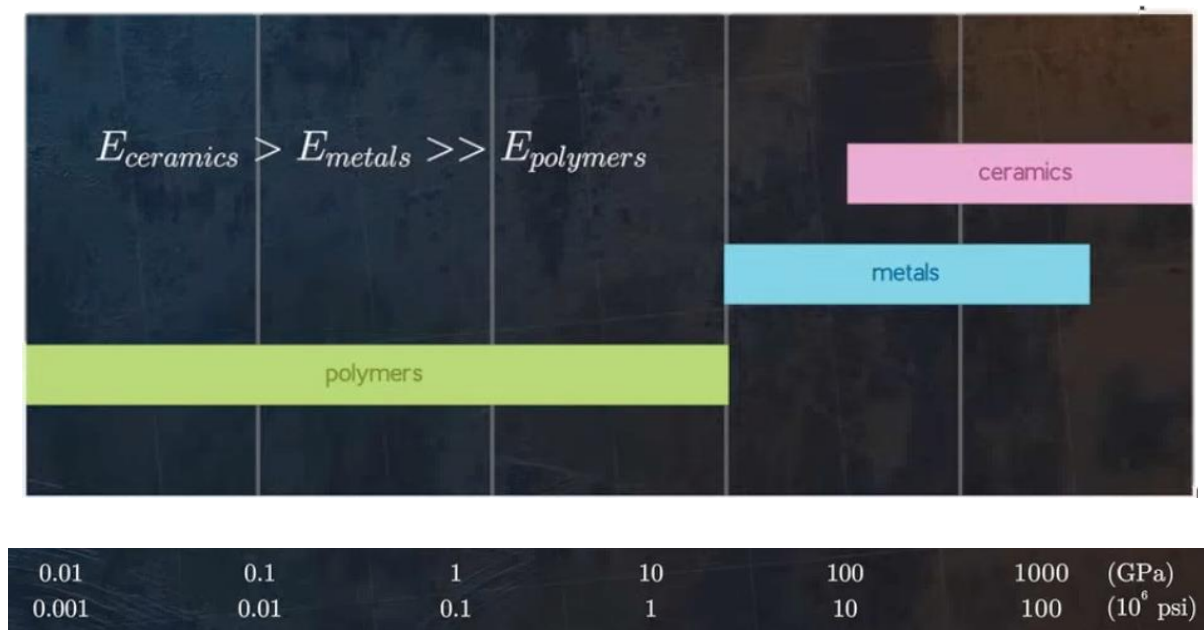
2.1.1 ΜΙΑ ΒΑΣΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Το **μέτρο ελαστικότητας** του Young αποτελεί μία από τις τρεις βασικές ελαστικές σταθερές, συμπληρωματικά με το μέτρο διάτμησης και το μέτρο όγκου, τα οποία χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν πώς παραμορφώνεται ένα υλικό υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Η κατανόηση αυτής της παραμέτρου είναι ζωτικής σημασίας για τη μηχανική των υλικών και τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των δομών [1].

2.1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ YOUNG

Το μέτρο του Young, γνωστό και ως μέτρο ελαστικότητας, ορίζεται ως ο λόγος της τάσης προς τη παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή. Συμβολίζεται με το γράμμα E και έχει τις ίδιες μονάδες με την τάση: Pascal (Pa) στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) και PSI στο αμερικάνικο σύστημα. Μπορεί επίσης, να προσδιοριστεί από τη κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή.

Το μέτρο του Young αντιπροσωπεύει την ακαμψία ενός υλικού. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του, τόσο μικρότερες είναι οι ελαστικές παραμορφώσεις για ένα δεδομένο εφαρμοζόμενο φορτίο. Τα διαφορετικά υλικά έχουν χαρακτηριστικά διαφορετικές τιμές μέτρου του Young. Για ανισοτροπικά υλικά, όπως το ξύλο ή σύνθετα υλικά, η τιμή του εξαρτάται από τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου [5][6].

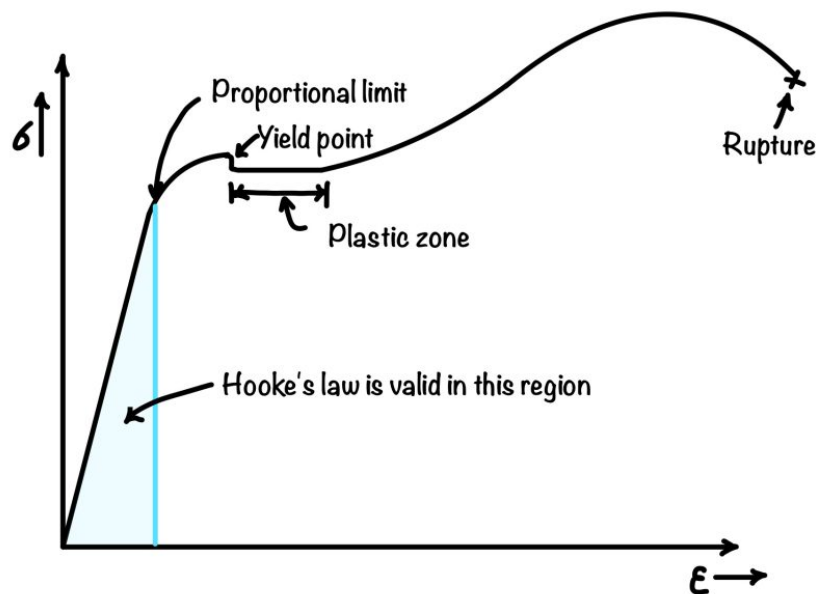


Εικόνα 1: Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) για διάφορα υλικά.

2.1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Το μέτρο του Young μπορεί να παρουσιαστεί μέσω του παραδείγματος της δοκιμής εφελκυσμού, η οποία αποτελεί μια συνήθης δοκιμή στη μηχανική, κατά την οποία ένα δοκιμαστικό δείγμα τεντώνεται κατά μήκος. Πρόκειται για μια μονοαξονική δοκιμή, στην οποία το φορτίο εφαρμόζεται αποκλειστικά σε μία κατεύθυνση, ενώ η μηχανή μέτρησης καταγράφει το εφαρμοζόμενο φορτίο και την αντίστοιχη αλλαγή στο μήκος του δείγματος.

Το βασικό αποτέλεσμα της δοκιμής είναι η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Εικόνα 2), η οποία δείχνει τη σχέση μεταξύ του επιπέδου της εφαρμοζόμενης τάσης και της παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό. Η δοκιμή συνεχίζεται μέχρι τη θραύση του δείγματος. Η καμπύλη χωρίζεται σε δύο κύριες περιοχές: την **ελαστική περιοχή**, όπου η καμπύλη είναι γραμμική, και τη **πλαστική περιοχή**, όπου το υλικό υφίσταται μη αναστρέψιμη παραμόρφωση [2].



Stress-strain curve for mild steel under uniaxial tension

Εικόνα 2 : Καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων για ήπιο χάλυβα υπό μονοαξονική τάση

2.1.4 ΕΛΑΣΤΙΚΗ & ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Στην ελαστική περιοχή, οι παραμορφώσεις είναι γραμμικά ανάλογες της εφαρμοζόμενης τάσης. Όταν το φορτίο αφαιρείται, το υλικό ανακτά τις αρχικές του διαστάσεις. Αντιθέτως, στη πλαστική περιοχή, η εφαρμογή μεγαλύτερων φορτίων οδηγεί σε **μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις**, οι οποίες παραμένουν ακόμη και μετά την αφαίρεση του φορτίου. Στην ελαστική περιοχή, η γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης περιγράφεται από τον **νόμο του Hooke** [3].

HOOKE'S LAW

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1)$$

2.2 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά αποτελούν μια κατηγορία προηγμένων υλικών, τα οποία παρότι χρησιμοποιούνται ευρέως στη καθημερινότητά μας, παραμένουν σχετικά άγνωστα στο ευρύ κοινό. Ο όρος «πιεζοηλεκτρισμός» προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη «πιέζειν», που σημαίνει «συμπιέζω», και περιγράφει τη δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου όταν ένα υλικό δέχεται μηχανική πίεση.

Τα υλικά αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους τομείς της τεχνολογίας, από τα κινητά τηλέφωνα και τα ιατρικά μηχανήματα έως και τα σύγχρονα οχήματα και τα βιομηχανικά συστήματα. Για παράδειγμα, η τεχνολογία υπερήχων που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του εμβρύου βασίζεται σε πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, όπως επίσης και οι αισθητήρες παρκαρίσματος στα αυτοκίνητα.

Οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες συναντώνται σε μια μεγάλη γκάμα υλικών, όπως κεραμικά, πολυμερή, κρύσταλλοι και σύνθετα υλικά. Αυτά τα υλικά έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν μηχανική πίεση σε ηλεκτρική τάση και το αντίστροφο, δηλαδή να παραμορφώνονται όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο. Η δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου λόγω μηχανικής καταπόνησης ονομάζεται **άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο**, ενώ η πρόκληση μηχανικής παραμόρφωσης λόγω ηλεκτρικού πεδίου αναφέρεται ως **αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο**.

Ένα υλικό για να παρουσιάζει πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά πρέπει να μην άγει ηλεκτρικό ρεύμα, να είναι δηλαδή ένα μονωτικό υλικό. Εκτός αυτού, είναι απαραίτητο να διαθέτει ασύμμετρη κρυσταλλική δομή. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο χαλαζίας (SiO_2), του οποίου η κρυσταλλική δομή επιτρέπει τη μετατόπιση των θετικών και αρνητικών φορτίων όταν ασκείται πίεση, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό δίπολο στο εσωτερικό του υλικού [4].

2.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Το 1880, οι αδελφοί Πιερ και Ζακ Κιουρί, πειραματιζόμενοι με αλάτι Rochelle και χαλαζία, παρατήρησαν ότι η άσκηση πίεσης σε συγκεκριμένους κρυστάλλους προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνειά τους. Την επόμενη χρονιά, το 1881, ο Γκαμπριέλ Λίπμαν,

βασισμένος σε θεμελιώδεις μαθηματικές εξισώσεις και αρχές της θερμοδυναμικής, κατέληξε θεωρητικά στο ότι η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου σε τέτοια υλικά μπορεί να προκαλέσει εσωτερική μηχανική παραμόρφωση.

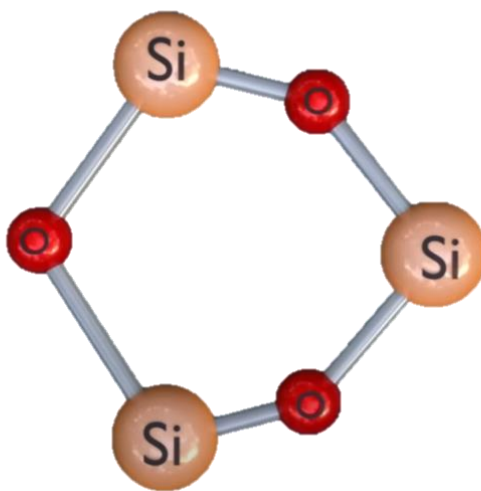
Οι Κιουρί συνέχισαν πειραματικά την έρευνα επί των θεωρητικών ευρημάτων του Λίπμαν, γεγονός που τροφοδότησε έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον στην Ευρώπη. Παρότι ο χαλαζίας είχε καθιερωθεί ως το κυρίαρχο πιεζοηλεκτρικό υλικό, η έρευνα επικεντρώθηκε στη σύνθεση νέων ενώσεων, όπως το τιτανικό ζirkόνιο του μολύβδου (PZT) και ο τιτανικό βάριο, οι οποίοι παρουσίαζαν ιδιότητες κατάλληλες για εξειδικευμένες εφαρμογές. Η πρώτη πειραματική επιβεβαίωση της σχέσης μεταξύ των μακροσκοπικών πιεζοηλεκτρικών φαινομένων και της κρυσταλλογραφικής δομής δημοσιεύθηκε από τους Κιουρί το 1880. Χρησιμοποιώντας κατάλληλα προετοιμασμένους κρυστάλλους, όπως τουρμαλίνη, χαλαζία, τοπάζι, ζάχαρη και αλάτι Rochelle, μέτρησαν την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων στην επιφάνειά τους υπό μηχανική καταπόνηση. Το έργο τους αποτέλεσε απόδειξη δημιουργικότητας και επιμονής και αναγνωρίστηκε ως σημαντική ανακάλυψη στους επιστημονικούς κύκλους της εποχής.

Ωστόσο, οι Κιουρί δεν προέβλεψαν την ύπαρξη του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, την πρόκληση δηλαδή μηχανικής παραμόρφωσης από την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Η ύπαρξή του προβλέφθηκε θεωρητικά από τον Λίπμαν το 1881, βάσει των νόμων της θερμοδυναμικής. Οι Κιουρί επιβεβαίωσαν πειραματικά τη θεωρητική πρόβλεψη και στη συνέχεια προχώρησαν σε ποσοτική απόδειξη της πλήρους αναστρεψιμότητας των ηλεκτρομηχανοελαστικών παραμορφώσεων στα πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Οι πρώτες σοβαρές εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών υλικών εμφανίστηκαν στον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο. Το 1917, ο Πολ Λανζεβέν και η ερευνητική του ομάδα στη Γαλλία ανέπτυξαν έναν υποβρύχιο αισθητήρα υπερήχων. Ο μετατροπέας (transducer) που κατασκεύασαν αποτελούνταν από λεπτούς δίσκους χαλαζία διατεταγμένους σε μορφή μωσαϊκού και πακτωμένους ανάμεσα σε δύο μεταλλικές πλάκες, σχηματίζοντας ένα σύστημα συντονισμένο στα 50 kHz. Η συσκευή εξέπεμπε ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας στο νερό και μετρούσε το βάθος μέσω της χρονομέτρησης της επιστροφής του ηχητικού παλμού (ηχούς). Μεταξύ των δύο Παγκοσμίων Πολέμων, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ενσωματώθηκαν σε ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή κατέχει σημαντική θέση στη μηχανολογία και τις προηγμένες κατασκευαστικές δομές [4].

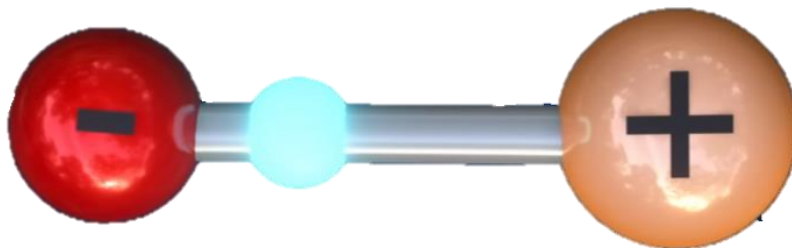
2.2.2 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΧΑΛΑΖΙΑ

Το κλειδί για τη κατανόηση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου είναι η έννοια της **ηλεκτραρνητικότητας** [5]. Η δομή του κρυστάλλου χαλαζία (διοξείδιο του πυριτίου), όταν εξετάζεται από συγκεκριμένες γωνίες, διαπιστώνεται ότι στερείται κέντρου συμμετρίας.



Εικόνα 3: Εξαγωνική κρυσταλλική δομή.

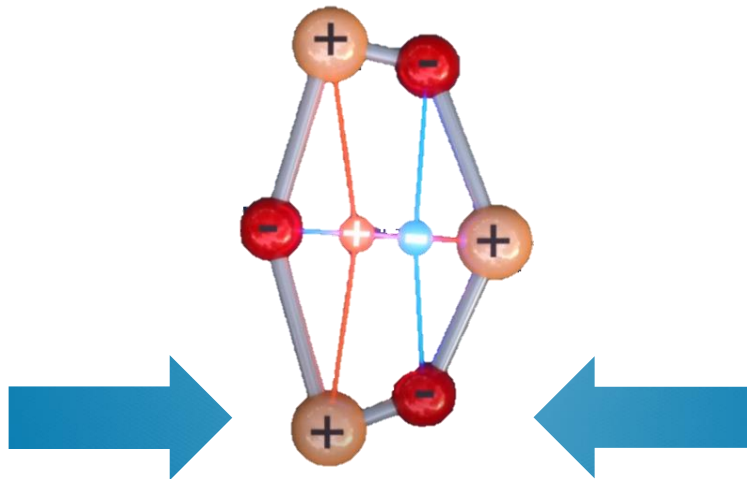
Στους δεσμούς του χαλαζία, τα άτομα οξυγόνου και πυριτίου μοιράζονται ηλεκτρόνια, ενώ εξαιτίας του μικρότερου μεγέθους του πρώτου, το κοινό ηλεκτρόνιο έλκεται πιο κοντά στον πυρήνα του, καθιστώντας το οξυγόνο πιο ηλεκτραρνητικό. Το αποτέλεσμα είναι ότι το οξυγόνο αποκτά ελαφρώς αρνητικό φορτίο, ενώ το πυρίτιο αποκτά ελαφρώς θετικό φορτίο. Δημιουργείται, έτσι, ένα **δίπολο**. Σε έναν αμετάβλητο κρύσταλλο χαλαζία, τα δίπολα αυτά ευθυγραμμίζονται έτσι ώστε τα κέντρα των θετικών και αρνητικών φορτίων να συμπίπτουν [6].



Εικόνα 4: Δίπολο χαλαζία.

2.2.3 ΠΟΛΩΣΗ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

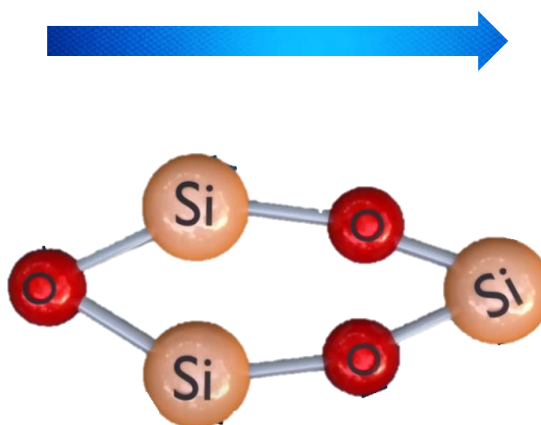
Εφαρμόζοντας δύναμη συμπίεσης στο υλικό, τα κέντρα των θετικών και αρνητικών φορτίων μετατοπίζονται με τέτοιο τρόπο, που οδηγεί σε διαχωρισμό του φορτίου. Η μετατόπιση με την σειρά της προκαλεί την εμφάνιση πόλωσης, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο και μια ηλεκτρική τάση στο υλικό. Καθώς η κρυσταλλική δομή του χαλαζία αποτελείται από πολλά εξάγωνα συνδεδεμένα σε σειρά, ο συνολικός διαχωρισμός φορτίων αθροίζεται, έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σημαντικής τάσης. Η ένταση της παραγόμενης τάσης εξαρτάται από τον αριθμό των εξαγώνων στη δομή, ή το πάχος του υλικού. Όσο περισσότερα εξάγωνα τόσο μεγαλύτερη η τάση [7].



Εικόνα 5: Δύναμη συμπίεσης στην εξαγωνική δομή του χαλαζία.

2.2.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι **αντιστρεπτό**. Εάν εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση στο υλικό, τα θετικά και αρνητικά φορτία μετακινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις, προκαλώντας παραμόρφωση του υλικού. Εάν η πολικότητα της τάσης αντιστραφεί, η δομή θα συμπιεστεί αντί να τεντωθεί. Αυτές οι μικροσκοπικές παραμορφώσεις αθροίζονται και οδηγούν σε καθαρή διαστολή ή συμπίεση του υλικού.



Εικόνα 6: Κατεύθυνση ηλεκτρικού πεδίου.

Η μοναδική αυτή ιδιότητα των πιεζοηλεκτρικών υλικών επιτρέπει τη χρήση τους σε πληθώρα εφαρμογών, με μερικά παραδείγματα, η ανίχνευση, η μετατροπή και η ενίσχυση ηχητικών και μηχανικών σημάτων. Στα ηλεκτρονικά στηθοσκόπια, η ικανότητα του πιεζοηλεκτρικού υλικού να μετατρέπει μηχανικές δονήσεις σε ηλεκτρικά σήματα είναι ζωτικής σημασίας για τη καταγραφή και την επεξεργασία των ήχων από το ανθρώπινο σώμα.

2.2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα υλικά αυτά στον τομέα της ναυτιλιακής βιομηχανίας, αξιοποιούνται σε συστήματα σόναρ για υποβρύχια απεικόνιση, εντοπισμό αντικειμένων και επικοινωνία. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες πίεσης και συστήματα ανίχνευσης αντικροτικής καύσης (knock sensors), προσφέροντας έγκαιρη και ακριβή διάγνωση για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των κινητήρων. Στον τομέα των εκτυπώσεων, οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές ενσωματώνονται στις κεφαλές εκτυπωτών inkjet, επιτρέποντας την ακριβή ρύθμιση των σταγόνων μελανιού για υψηλής ανάλυσης εκτυπώσεις. Εκτός αυτού, χρησιμοποιούνται και σε μικροαντλίες, αισθητήρες βιοϊατρικών εφαρμογών και μικροσκοπικούς υπερηχητικούς μετατροπείς (pMUT), χάρη στις μικρές τους διαστάσεις και την ενεργειακή τους απόδοση. Τέλος, συναντώνται σε καθημερινές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως ηχεία κινητών τηλεφώνων, ακουστικά, παιχνίδια, βομβητές, υγραντήρες και ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες, όπου αξιοποιούνται για την αποδοτική παραγωγή ήχου ή την αίσθηση κραδασμών με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.

2.3 Ο ΛΟΓΟΣ POISSON ΚΑΙ ΤΑ ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

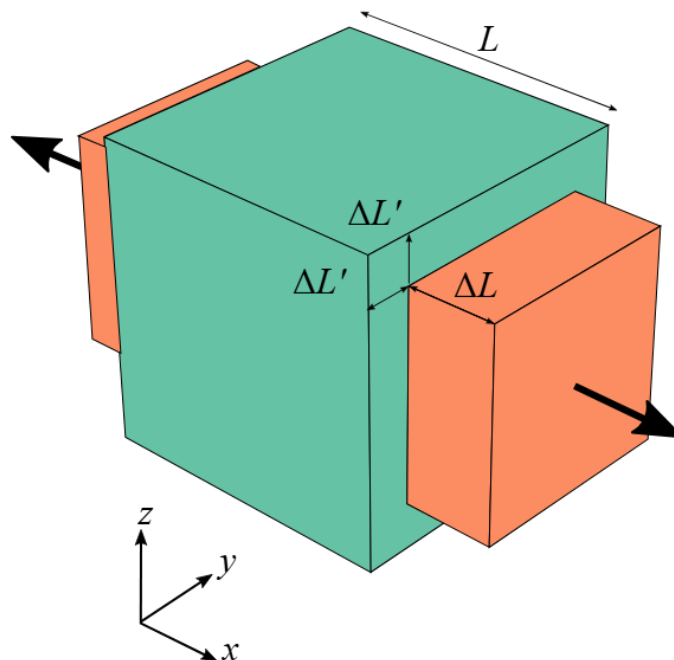
2.3.1 Ο ΛΟΓΟΣ ΤΟΥ POISSON: ΜΙΑ ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ο **λόγος του Poisson** αποτελεί μια θεμελιώδη ιδιότητα των υλικών, η οποία παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τον τρόπο παραμόρφωσης των υλικών υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Η κατανόηση αυτής της παραμέτρου είναι καίρια για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς υλικών και τη μοντελοποίηση διαφόρων συστημάτων [8].

2.3.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ Ο ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΤΟΥ POISSON

Η έννοια του λόγου του Poisson μπορεί να κατανοηθεί μέσω παραδειγμάτων, ένα χαρακτηριστικό εκ των οποίων, να αποτελεί το λαστιγάκι. Όταν τεντώνεται κατά μήκος του άξονα του (διαμήκης διεύθυνση), η αύξηση του μήκους συνοδεύεται από μείωση του πάχους (εγκάρσια διεύθυνση). Ο λόγος του Poisson προσδιορίζει το βαθμό της διαφοράς.

Στην περίπτωση ενός γενικού υλικού, λόγου χάριν ένα παραλληλεπίπεδο, η εφαρμογή θλιπτικής δύναμης προκαλεί διαστολή στις εγκάρσιες διευθύνσεις, ενώ η εφαρμογή εφελκυστικής δύναμης προκαλεί σύσπαση στις εγκάρσιες διευθύνσεις και επιμήκυνση στη διαμήκη διεύθυνση όπως φαίνεται στο αντικείμενο της εικόνας. Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως ο λόγος της εγκάρσιας παραμόρφωσης προς τη διαμήκη παραμόρφωση. Συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ν και αποτελεί μια σταθερά του υλικού.



Εικόνα 7: Αντικείμενο με παραμορφώσεις για επεξήγηση του λόγου poisson.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_x} \quad \varepsilon_y = \frac{-\Delta L_y}{L_y} \quad \varepsilon_z = \frac{-\Delta L_z}{L_z} \quad (2) \quad (3) \quad (4)$$

2.3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

Ο μαθηματικός ορισμός του λόγου του Poisson περιλαμβάνει τη χρήση των παραμορφώσεων, οι οποίες υπολογίζονται ως ο λόγος της μεταβολής στο μήκος προς το αρχικό μήκος. Η μαθηματική έκφραση περιλαμβάνει αρνητικό πρόσημο για να διασφαλίσει τη σωστή πρόσημη διάταξη, δεδομένου ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις θεωρούνται θετικές και οι θλιπτικές αρνητικές. Η ιδιότητα αυτή ορίστηκε επίσημα από τον Γάλλο μαθηματικό Σιμεόν Ντενί Πουασόν το 1827 [9].

$$\text{Poisson's Ratio } \nu = \frac{-\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (5)$$

Η εξίσωση του λόγου του Poisson ισχύει μόνο για ισοτροπικά υλικά που παραμορφώνονται εντός της ελαστικής περιοχής. Σε περιπτώσεις πλαστικής παραμόρφωσης ή ανισοτροπικών υλικών, η ανάλυση γίνεται πιο σύνθετη. Παρόλα αυτά, ο λόγος του Poisson χρησιμοποιείται ευρέως στη μηχανική του συνεχούς, καθώς παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για τον τρόπο αντίδρασης ενός σώματος υπό την επίδραση τάσεων.

Οι θεωρητικές τιμές του λόγου του Poisson κυμαίνονται από -1 έως 0.5 , αλλά τα περισσότερα πραγματικά υλικά έχουν λόγο μεταξύ 0 και 0.5 . Παραδείγματος χάριν, τα μέταλλα έχουν τυπικές τιμές γύρω στο 0.3 . Ειδικά υλικά, όπως ο φελλός [10], με λόγο κοντά στο 0 , δεν παρουσιάζουν εγκάρσιες παραμορφώσεις όταν εφαρμόζεται διαμήκης τάση, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές, όπως πώματα μπουκαλιών.



Εικόνα 8: Διάστημα τιμών του λόγου poisson.

2.3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΣΕΩΝ

Στην ανάλυση τάσεων, ο λόγος του Poisson χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων σε εγκάρσιες κατευθύνσεις. Στην περίπτωση μονοαξονικής τάσης, οι εγκάρσιες παραμορφώσεις υπολογίζονται ως το γινόμενο της διαμήκουσ παραμόρφωσης με τον λόγο του Poisson. Σε πιο σύνθετα προβλήματα με τριαξονική τάση, η ανάλυση απαιτεί τη γενικευμένη μορφή του νόμου του Hooke.

Γενικευμένοι τύποι του κανόνα του Hooke

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (7)$$

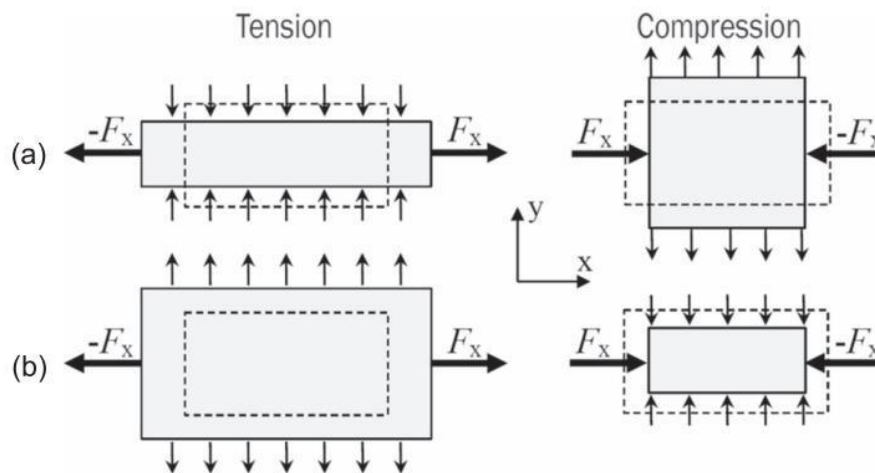
$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (8)$$

Ο λόγος του Poisson συνιστά βασικό εργαλείο για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών. Από τις μονοαξονικές τάσεις μέχρι τις σύνθετες τριαξονικές περιπτώσεις, η γνώση αυτής της ιδιότητας επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση και ανάλυση παραμορφώσεων σε υλικά με ποικίλες εφαρμογές.

2.3.5 ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα υλικά αυτά κατατάσσονται στην κατηγορία των μεταϋλικών (metamaterials), ενώ η χαρακτηριστική συμπεριφορά τους περιγράφεται ως αρνητικός λόγος Poisson. Τα **αυξητικά**

υλικά (auxetic materials) παρουσιάζουν την ιδιότητα να αυξάνουν τη διατομή τους στην εγκάρσια διεύθυνση όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό και, αντιστρόφως, να μειώνουν τη διατομή τους όταν υποβάλλονται σε θλίψη. [3 [11]. Αυτά είναι κυρίως κατασκευασμένα υλικά, όπως ειδικοί αφροί, που βρίσκουν εφαρμογές σε προηγμένα τεχνολογικά πεδία. Αξίζει να τονιστεί ότι η ιδιαιτερότητα αυτής της συμπεριφοράς δεν οφείλεται στις εγγενείς ιδιότητες του υλικού, αλλά πηγάζει από την ειδική γεωμετρία και τον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής του.



Εικόνα 9: Αυξητικά υλικά.

Η βιοιατρική είναι ένας κλάδος, όπου χρησιμοποιούνται τα αυξητικά υλικά, είτε για την κατασκευή τεχνητών αιμοφόρων αγγείων, είτε για άλλες συσκευές που βασίζονται στη μοναδική ελαστικότητα και αντίδραση αυτών των υλικών [12]. Συγκεκριμένα, τα τεχνητά αιμοφόρα αγγεία έχουν την δυνατότητα να αποτρέψουν τη ρήξη τοιχωμάτων μέσω ιατρικών επιδέσμων που αντιδρούν στο πρήξιμο ενός τραύματος.

Ένας άλλος κλάδος αποτελεί η αεροναυπηγική, όπου μέσω της ικανότητά τους να απορροφούν ενέργεια, τα αυξητικά υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε κωνικές περιοχές αεροσκαφών και θωρακισμένα οχήματα.

Στον τομέα των κατασκευών, χρησιμοποιούνται ως πυρήνες σε σανίδες σάντουιτς για αύξηση της δομικής ακαμψίας με χαμηλό βάρος. Παράλληλα, έξυπνα υφάσματα κατασκευασμένα από αυξητικές ίνες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κρανών, θωρακισμένου εξοπλισμού και αθλητικών ενδυμάτων με αυξημένη αντίσταση σε καταπονήσεις, ενώ ερευνώνται για την ανάπτυξη ειδικών βλημάτων και άλλων εφαρμογών που απαιτούν υψηλή αντοχή και απόδοση. Ένας ακόμη τρόπος αξιοποίησης τους είναι η ενσωμάτωση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε εξωτερικά κυκλώματα αναστολής, γεγονός που έχει συμβάλει αποφασιστικά ανοίγοντας νέους

ορίζοντες στη βελτίωση της απόσβεσης κραδασμών. Η τοποθέτησή τους και η ρύθμιση του κυκλώματος με κατάλληλη μορφή επιτρέπουν την αύξηση των ιδιοτήτων απόσβεσης σε πολλαπλές συχνότητες δονήσεων.

Η πολυπλοκότητα και ευελιξία των αυξητικών υλικών και των συνδυασμών τους με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, τα καθιστά ιδανικά για καινοτόμες εφαρμογές στη βιομηχανία, την αεροναυπηγική, τη βιοϊατρική και τη τεχνολογία υψηλής απόδοσης.

2.4 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα παραδιακλάδωσης, ή αλλιώς πιεζοηλεκτρικά συστήματα παραδιακλάδωσης, αποτελούν ηλεκτρικά κυκλώματα, τα οποία συνδέονται απευθείας με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, όπως επιθέματα PZT και πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς (transducers). Στη συντριπτική τους πλειονότητα χαρακτηρίζονται ως παθητικά, αν και πρόσφατες ερευνητικές προσεγγίσεις έχουν προτείνει και ημι-παθητικές ή ακόμη και πλήρως ενεργές αρχιτεκτονικές [13] [14].

Στο πλαίσιο του παθητικού ελέγχου μέσω παραδιακλάδωσης, η παρουσία πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα κρίνεται απαραίτητη, προκειμένου να επιτευχθεί η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, διαμέσο των ταλαντώσεων της κατασκευής. Η ηλεκτρική αυτή ενέργεια διοχετεύεται, στη συνέχεια στα ηλεκτρικά στοιχεία του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος, όπου υφίσταται κατάλληλη διαχείριση ή και μετασχηματισμό, με απώτερο στόχο την απόσβεση των ανεπιθύμητων δονήσεων της δομής [15].

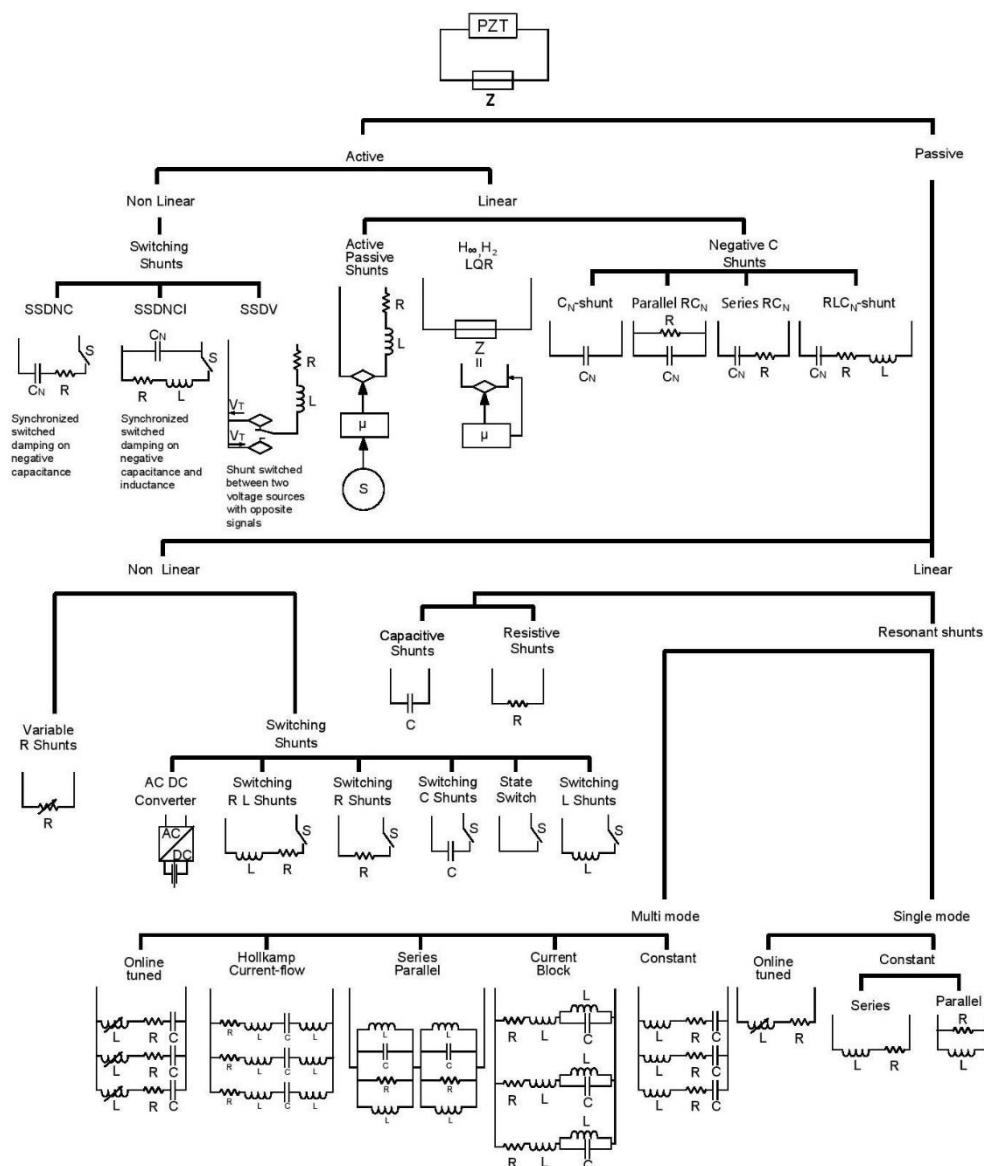
2.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ

Τα κυκλώματα παραδιακλάδωσης μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τα παθητικά και τα ενεργά. Μια εναλλακτική ταξινόμηση βασίζεται στη γραμμικότητά τους, διακρίνοντάς τα σε γραμμικά και μη γραμμικά κυκλώματα.

Στην παρούσα μελέτη, γίνεται χρήση παθητικού γραμμικού κυκλώματος συντονισμού. Πιο συγκεκριμένα, για τον έλεγχο της μίας ιδιομορφής χρησιμοποιείται το κύκλωμα τύπου «αντίστασης-πηνίου» (R-L), το οποίο ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η συχνότητα συντονισμού του να συμπίπτει με τη φυσική συχνότητα της εξεταζόμενης ιδιομορφής.

Το κύκλωμα συντονισμού διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επιθυμητή απόσβεση των δομικών συστημάτων, καθώς βασίζεται στην αρχή λειτουργίας των δυναμικών αποσβεστήρων. Ειδικότερα, επιτυγχάνει τη καταστολή των ανεπιθύμητων δονήσεων μέσω του συντονισμού τους στη φυσική συχνότητα της κατασκευής, λειτουργώντας ουσιαστικά ως αποσβεστήρες ταλαντώσεων εντός ενός πεπερασμένου εύρους συχνοτήτων.

Στην Εικόνα 10 [16] [17] παρουσιάζονται τα πιο αντιπροσωπευτικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης.



Εικόνα 10: Κατηγορίες διάφορων κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης.

2.4.3 ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ (PASSIVE SHUNT)

Οι παθητικές διατάξεις απόσβεσης (passive shunts) βασίζονται κυρίως σε παθητικά ηλεκτρονικά στοιχεία, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία. Μέσω κατάλληλου σχεδιασμού του εξωτερικού κυκλώματος, είναι δυνατή η απόσβεση κραδασμών είτε σε μία μόνο συχνότητα (single-mode) είτε σε πολλαπλές συχνότητες (multimode).

Οι πιεζοηλεκτρικοί και οι ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς (transducers) λειτουργούν συμπληρωματικά, γεγονός που επιτρέπει την αντιστοίχιση σειριακής συντονισμένης σύνδεσης (series resonant shunt) στον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα με παράλληλη συντονισμένη σύνδεση (parallel shunt) στον ηλεκτρομαγνητικό, και αντίστροφα.

Στην απόσβεση των κυρίαρχων ιδιομορφών ταλάντωσης μιας εύκαμπτης δομής, η αποτελεσματικότητα της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακριβή επιλογή των παραμέτρων των ηλεκτρονικών στοιχείων στο κύκλωμα απόσβεσης [18].

2.4.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΜΙΑΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Η απόσβεση κραδασμών μιας ιδιομορφής σε μηχανικές κατασκευές μέσω πιεζοηλεκτρικών διατάξεων συνδεδεμένων με εξωτερικά κυκλώματα αποτελεί αποτελεσματική τεχνική για τη μείωση ανεπιθύμητων ταλαντώσεων. Η αρχική πειραματική επίδειξη πραγματοποιήθηκε από τον Forward το 1979, αποδεικνύοντας ότι απλά εξωτερικά ηλεκτρονικά κυκλώματα μπορούν να μειώσουν τους κραδασμούς σε οπτικά συστήματα. Όταν το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο συνδέεται μόνο με αντίσταση (resistive shunt), λειτουργεί παρόμοια με τα συμβατικά υλικά απόσβεσης τύπου ιξωδοελαστικού, με χαμηλή όμως αποτελεσματικότητα. Αντίθετα, η χρήση κυκλωμάτων τύπου «αντίστασης – πηνίου» (είτε σε σειρά είτε παράλληλα) προσδίδει ιδιοσυντονισμό στο σύστημα. Όταν ο ηλεκτρικός συντονισμός του κυκλώματος ταυτίζεται με τη μηχανική ιδιοσυχνότητα του δομικού συστήματος, παράγεται ισχυρή αντίδραση που απορροφά την ενέργεια των ταλαντώσεων, επιτυγχάνοντας σημαντική απόσβεση.

Η σχεδίαση αυτών των κυκλωμάτων βασίζεται συχνά στη θεωρία των σταθερών σημείων (fixed points theory) ή σε αναλυτικά μαθηματικά μοντέλα, όπως αυτά που προτάθηκαν από τους Kim, Kozlowski, Soltani[19] [20] και άλλους, τα οποία προσδιορίζουν τις καλύτερες δυνατές τιμές επαγωγών και αντιστάσεων με βάση φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος (μάζα, δυσκαμψία, συντελεστής σύζευξης κ.λπ.). Συστήματα όπως ο δίσκος-άξονας (spindle) σκληρών δίσκων (HDD) έχουν επιδείξει έως και 60% μείωση ταλαντώσεων με χρήση τέτοιων κυκλωμάτων.

Έχουν μελετηθεί ποικίλλες διατάξεις, λόγου χάρη, σε σειρά και παράλληλα «αντίστασης – πηνίου» (RL), συνδυαστικές «αντίστασης – πηνίου – πυκνωτή (RL-C) , ενώ έχουν εφαρμοστεί και σε έξυπνες κατασκευές, όπως δοκάρια ή sandwich panels [21]. Η θέση της αντίστασης στο κύκλωμα δεν επηρεάζει σημαντικά την τελική απόδοση, κάτι που επιβεβαιώνεται τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Επίσης, έχει ληφθεί υπόψη και η διηλεκτρική απώλεια των πιεζοηλεκτρικών υλικών μέσω της εισαγωγής παράλληλης αντίστασης «αντίστασης – πυκνωτή – αντίστασης , πυκνωτή- αντίστασης – πυκνωτή» (RCR_CRC) , η οποία μοντελοποιεί την απορρόφηση ενέργειας λόγω του χρόνου χαλάρωσης της πολώσεως.

Σύγχρονες προσεγγίσεις, όπως η μέθοδος τοποθέτησης των πόλων (pole placement) που προτάθηκε από τους Hogsberg και Krenk [22], επιτυγχάνουν αποτελεσματικότερη απόσβεση μέσω της ισομερούς κατανομής της δυναμικής ενέργειας μεταξύ των επιμέρους ιδιομορφών του συστήματος. Περαιτέρω, οι εν λόγω ερευνητές εισάγουν ένα ενοποιημένο πλαίσιο ρύθμισης των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, προσαρμοζόμενο στον εκάστοτε τύπο επιθυμητής ανάδρασης, είτε πρόκειται για ανάδραση ταχύτητας, επιτάχυνσης ή θέσης.

Συνολικά, ο έλεγχος απόσβεσης μιας ιδιομορφής με πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα «αντίστασης πηνίου» (RL) αποτελεί μια αποδοτική και ευέλικτη λύση για την παθητική μείωση κραδασμών σε ποικίλες εφαρμογές υψηλής ακρίβειας.

2.4.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η μεθοδολογία είναι ίδια με αυτή, που περιγράφεται στη δημοσίευση του Jeon, 2009 [23].

Οι γενικές ηλεκτρομηχανικές εξισώσεις, που περιγράφουν τη συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών καθορίζονται στο Πρότυπο IEEE για τον Πιεζοηλεκτρισμό (IEEE Standard on Piezoelectricity, 1987):

$$\begin{pmatrix} T \\ D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & -e \\ e^t & \varepsilon^s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S \\ E \end{pmatrix} \quad (9)$$

T : Διάνυσμα Τάσης [N/m²]

D : Διάνυσμα Ηλεκτρικής Μετατόπισης [C/m²]

S : Διάνυσμα Παραμόρφωσης

Όπου :

E : Διάνυσμα Ηλεκτρικού Πεδίου [V/m]

c^E : Πίνακας Ελαστικής Ακαμψίας που υπολογίζεται σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο

e : Πίνακας Πιεζοηλεκτρικής Τάσης

ε^S : Διηλεκτρικός Πίνακας που υπολογίζεται σε σταθερή μηχανική παραμόρφωση

Μετά την εφαρμογή της αρχής του Hamilton και τη διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για συζευγμένα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα [26] έχουμε:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{w} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{w} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & \Theta \\ \Theta^t & -C_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ q \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Όπου αναπαράστώνται οι καθολικοί πίνακες [M] μάζας, [C] απόσβεσης, [K] ακαμψίας και [Θ] της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης ολόκληρης της κατασκευής και των πιεζοηλεκτρικών υλικών, ξεχωριστά, [CP] είναι ο πίνακας της πιεζοηλεκτρικής χωρητικότητας, [F] είναι το διάνυσμα της εφαρμοζόμενης μηχανικής δύναμης, [q] το διάνυσμα του ηλεκτρικού φορτίου, [w] η γενικευμένη μηχανική συντεταγμένη και [v] είναι η γενικευμένη ηλεκτρική συντεταγμένη που είναι η φυσική τάση στο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα.

Η εξίσωση κίνησης του συζευγμένου πιεζοηλεκτρικού ηλεκτρομηχανικού συστήματος, όπως περιγράφεται στην εξίσωση, είναι ένα σύνολο δύο συζευγμένων εξισώσεων [23] [24]:

$$[M]\{\ddot{w}\} + [C]\{\dot{w}\} + [K]\{w\} + [\Theta]\{v\} = \{F\} \quad (11)$$

$$[\theta]^t\{w\} - [C_p]\{v\} = \{q\} \quad (12)$$

Στο συζευγμένο σύνολο εξισώσεων (11) , (12) η πρώτη σειρά εξισώσεων περιγράφει τη κατάσταση ισορροπίας των μηχανικών δυνάμεων και η δεύτερη δίνει την ηλεκτροδυναμική εξίσωση του ηλεκτρικού δυναμικού. Αυτές οι δύο σειρές εξισώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαχθεί η πιεζοηλεκτρική παθητική δύναμη απόσβεσης μέσω κυκλωμάτων απόσβεσης παραδιακλάδωσης, που συνδέουν την κατασκευή με τα ηλεκτρόδια του πιεζοηλεκτρικού.

Η ηλεκτρική τάση απόσβεσης κατά μήκος του δικτύου απόσβεσης παραδιακλάδωσης μπορεί να αναπαρασταθεί από τη σχέση ρεύματος-τάσης στο πεδίο Laplace ως:

$$V_{sh}(s) = Z_{sh}(s) \cdot I_{sh}(s) \quad (13)$$

Αν στην εξίσωση (13) αντικαταστήσουμε την ένταση του ρεύματος $I_{sh}(s)$ με τη παράγωγο του φορτίου $\dot{q}(s)$ της εξίσωσης (12) τότε έχουμε τη σχέση :

$$V_{sh}(s) = Z_{sh}(s) \cdot \dot{q}(s) = Z_{sh}(s) \cdot ([\theta]^t\{w\}s - [C_p]V_{sh}(s)s) \quad (14)$$

Λύνοντας την εξίσωση (14) ως προς $V_{sh}(s)$ παίρνουμε την εξίσωση :

$$V_{sh}(s) = \frac{Z_{sh}(s)[\theta]^t\{w\}s}{1 + Z_{sh}(s)[C_p]s} \quad (15)$$

Όπου s ο τελεστής Laplace.

Εισάγοντας την εξίσωση (15) στην εξίσωση (11) παίρνουμε τη σχέση του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού λαμβάνοντας υπόψη τη πρόσθετη παθητική πιεζοηλεκτρική δύναμη απόσβεσης:

$$[M]\{\ddot{w}\} + ([C] + Z_{total}[\theta][\theta]^t)\{\dot{w}\} + [K]\{w\} = \{F\} \quad (16)$$

Όπου η συνολική ηλεκτρική εμπέδηση Z_{total} εμπεριέχει την εσωτερική χωρητικότητα C_p του πιεζοηλεκτρικού ως εξής :

$$Z_{total} = \frac{Z_{sh}}{1 + Z_{sh}[C_p]s} \quad (17)$$

Η εξίσωση (15) μετασχηματίζεται σε ανάλυση ιδιόμορφων με τις ακόλουθες ιδιομορφικές συντεταγμένες μεταφοράς:

$$\{w\} = [\Phi]\{\xi\} \quad (18)$$

Εισάγοντας την εξίσωση (18) στην εξίσωση (16) και στη συνέχεια μετασχηματίζοντάς στο πεδίο των συχνοτήτων, παίρνουμε τις μη συζευγμένες εξισώσεις κίνησης των αρμονικών εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στο τομέα των ιδιόμορφων :

$$\begin{aligned} -\omega^2[m]\{\xi\} + j\omega([c] + Z_{total}[\theta]) + [\kappa]\{\xi\} &= \{f\} \\ \{\xi\} &= (-\omega^2[m] + j\omega([c] + Z_{total}[\theta]) + [\kappa])^{-1}\{f\} \end{aligned} \quad (19) \quad (20)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM), η οποία καθιερώθηκε επίσημα από τον Clough το 1960 [25], έχει εξελιχθεί τις τελευταίες δεκαετίες, σε ένα πλήρως ανεπτυγμένο επιστημονικό πεδίο στον χώρο της μηχανικής. Στη σύγχρονη πρακτική, η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων συνιστά μια μεθοδική εφαρμογή που συνδυάζει τρία βασικά στάδια. Τον καθορισμό ενός φυσικού προτύπου, το οποίο περιγράφει ένα σύνθετο σύστημα διαμέσου απλούστερων δομικών μονάδων, (τα πεπερασμένα στοιχεία), την επίλυση συστημάτων εξισώσεων σε μορφή μητρώου που περιγράφουν το μοντέλο, και την ανάλυση και ερμηνεία των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Η θεμελιώδης βάση της FEM αποσκοπεί στον σχεδιασμό αξιόπιστων και ορθών στοιχείων και στις μεθόδους δημιουργίας μητρώων για την αριθμητική ανάλυση. Μολονότι αρχικά είχε αναπτυχθεί για τη μελέτη των σύνθετων δομικών συστημάτων, σήμερα η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, μεταξύ άλλων, η ανάλυση θερμικής αγωγιμότητας, η ρευστομηχανική, η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, καθώς επίσης και σε προβλήματα πολυφυσικής, που περιλαμβάνουν συζευγμένες αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών φυσικών πεδίων.

Τα σύγχρονα λογισμικά ΜΕΠΕΣ διαθέτουν προηγμένα γραφικά διεπαφής χρήστη (GUI), τα οποία αυτοματοποιούν τις διαδικασίες κατασκευής του μοντέλου και διευκολύνουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στο πλαίσιο της βιομηχανικής πρακτικής, η ανάλυση FEM, σε συνδυασμό με τον υποβοηθούμενο από υπολογιστή σχεδιασμό και τις πειραματικές δοκιμές, αποτελεί πλέον μέρος μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης «συγχρονισμένης μηχανικής» (concurrent engineering). Κάποια από τα σημαντικά εμπορικά πακέτα, που ευρέως χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, είναι τα MSC/NASTRAN (MSC.Software), ANSYS (ANSYS Incorporated) και ABAQUS (HKS Incorporated).

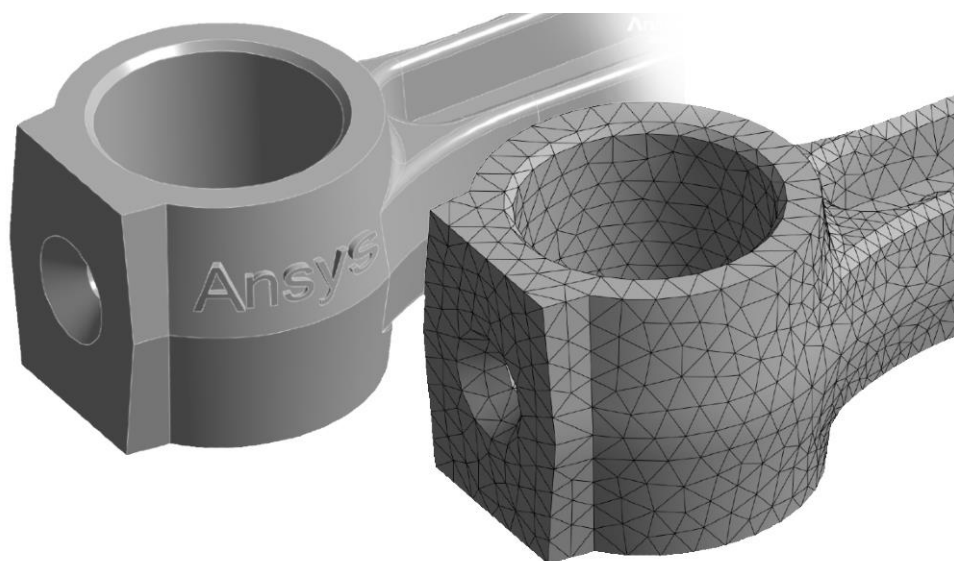
Η συγκεκριμένη ενότητα επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση και ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη μελέτη φαινομένων ταλαντώσεων

και δονήσεων σε δομές, καθώς και στην αλληλεπίδρασή τους με παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία [26].

3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESHING)

Στο πλαίσιο της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM), το πλέγμα (mesh) είναι ο διαμερισμός του υπολογιστικού χώρου σε μικρότερα, απλά γεωμετρικά στοιχεία (όπως τρίγωνα, τετράγωνα, τετράεδρα ή πολύγωνα), πάνω στα οποία εφαρμόζονται οι εξισώσεις της μεθόδου.

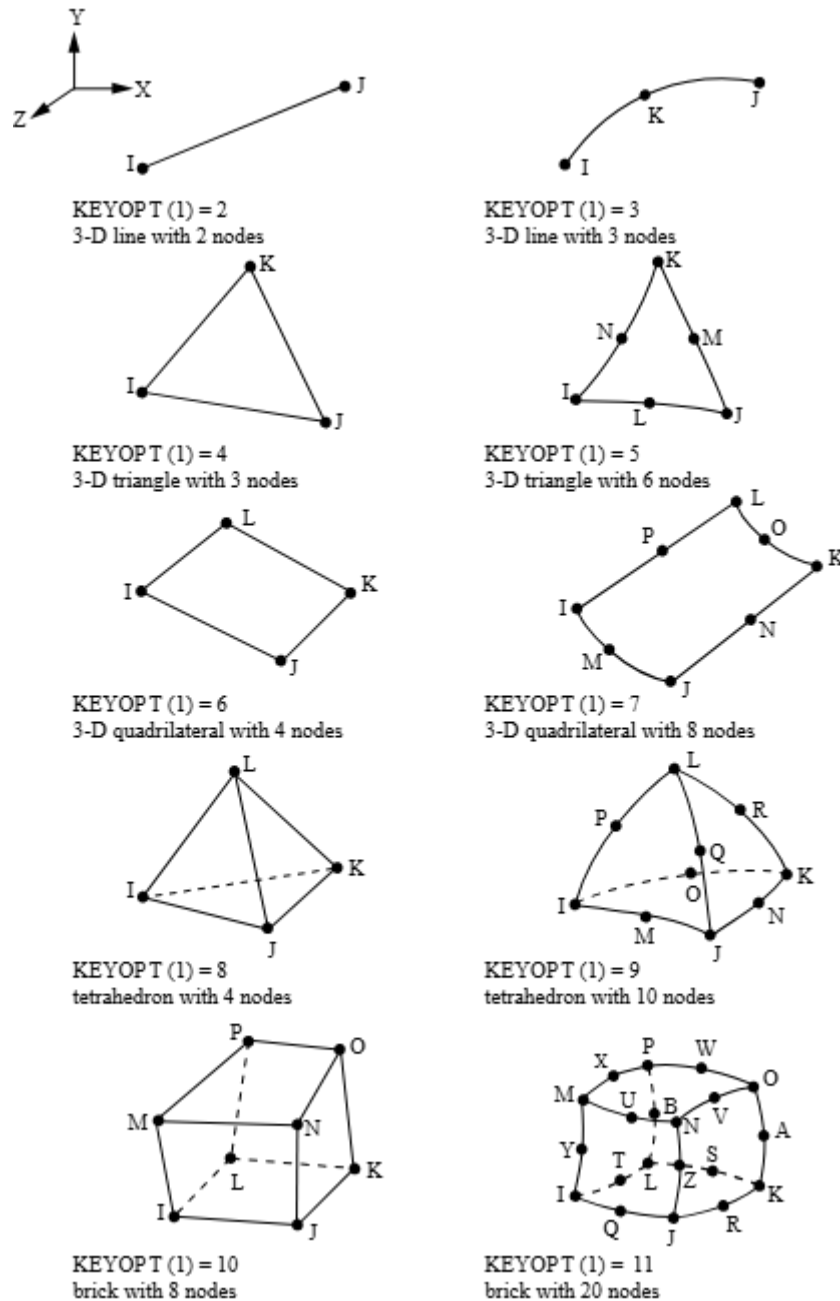
Το πλέγμα καθορίζει πώς χωρίζεται το πρόβλημα σε μικρά κομμάτια (στοιχεία), ώστε να μπορεί να λυθεί αριθμητικά με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ποιότητα και η πυκνότητα του πλέγματος επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια και τη σταθερότητα της λύσης. Πιο λεπτομερές πλέγμα δίνει συνήθως πιο ακριβή αποτελέσματα, αλλά αυξάνει τον υπολογιστικό φόρτο. Τα πλέγματα μπορεί να αποτελούνται από διάφορα σχήματα στοιχείων, λόγω χάρη, τρίγωνα, τετράγωνα, τετράεδρα, πολύγωνα ή πολυεδρικά στοιχεία, αναλόγως με τη γεωμετρία του προβλήματος (εικόνα 11). Ιδιαίτερης σημασίας συνιστά το γεγονός ότι υπάρχουν τεχνικές για τη βελτίωση της ποιότητας του πλέγματος (mesh refinement), καθώς και για τη προσαρμοσμένη βελτίωση (adaptive mesh refinement), ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ακρίβεια με το ελάχιστο υπολογιστικό κόστος [27] [28] [29] [30].



3.3 ΣΧΗΜΑΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), τα στοιχεία του πλέγματος μπορούν να έχουν διάφορα γεωμετρικά σχήματα, αναλόγως της διάστασης και της φύσης του προβλήματος. Στα δισδιάστατα προβλήματα, τα πιο συνηθισμένα σχήματα είναι τα τρίγωνα και τα τετράγωνα (ή ορθογώνια), ενώ σε τρισδιάστατα προβλήματα χρησιμοποιούνται κυρίως τα τετράεδρα, τα εξαέδρα (κύβοι) και οι σφήνες, καθώς αυτά τα σχήματα επιτρέπουν εύκολο διαμερισμό και προσαρμογή σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Νεότερες μέθοδοι επιτρέπουν τη χρήση στοιχείων με αυθαίρετο αριθμό πλευρών (πολύγωνα) ή πολυέδρων, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στον διαμερισμό πολύπλοκων γεωμετριών και τη δυνατότητα εφαρμογής σε προβλήματα με σύνθετα όρια.

Για την ανάλυση καμπύλων δομών, χρησιμοποιούνται καμπύλα στοιχεία ή στοιχεία με συναρτήσεις μορφής υψηλότερης τάξης, ώστε να προσεγγίζεται καλύτερα η γεωμετρία και να αυξάνεται η ακρίβεια της λύσης. Η επιλογή του σχήματος των στοιχείων εξαρτάται από τη γεωμετρία του προβλήματος, την επιθυμητή ακρίβεια και την ευκολία δημιουργίας του πλέγματος, ενώ τα πολυγωνικά και πολυεδρικά στοιχεία προσφέρουν επιπλέον ευελιξία και μπορούν να συνδυαστούν με παραδοσιακά σχήματα για πολύπλοκες εφαρμογές [31] [32].



Εικόνα 12: Κατηγορίες σχημάτων πλέγματος στο ANSYS (element types).

3.4 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΟΡΦΗΣ (SHAPE FUNCTIONS)

Οι συναρτήσεις μορφής (shape functions) στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι μαθηματικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για να προσεγγίσουν το πεδίο της λύσης, την μετατόπιση και την θερμοκρασία παραδείγματος χάριν, μέσα σε κάθε στοιχείο του πλέγματος. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο έχει το δικό του σύνολο συναρτήσεων μορφής, οι οποίες συνήθως

ορίζονται σε ένα τοπικό παραμετρικό σύστημα συντεταγμένων και χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν την τιμή της άγνωστης μεταβλητής ως γραμμικό συνδυασμό των τιμών της στους κόμβους του στοιχείου [33] [34].

Οι συναρτήσεις μορφής μπορεί να είναι πολωνυμικές, ενδεικτικά οι Lagrange ή οι Bernstein polynomials, αλλά υπάρχουν και πιο σύνθετες μορφές σαν τις σφαιρικές Hankel συναρτήσεις ή τις συναρτήσεις βάσης ακτίνας (radial basis functions), που προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια ή ευελιξία σε ειδικές εφαρμογές [35] [36]. Υπάρχουν επίσης, γενικευμένες συναρτήσεις μορφής που μπορούν να οριστούν σε στοιχεία με αυθαίρετο αριθμό πλευρών (πολύγωνα ή πολυεδρικά), επιτρέποντας την ανάλυση πολύπλοκων γεωμετριών. Αυτές οι συναρτήσεις μπορούν να είναι γραμμικές, τετραγωνικές ή υψηλότερης τάξης, με τις υψηλότερης τάξης να προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη σύγκλιση της λύσης, ειδικά όταν χρησιμοποιείται p-refinement (αύξηση της τάξης του πολωνύμου) αντί για h-refinement (μείωση του μεγέθους του στοιχείου) [37].

Η επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων μορφής εξαρτάται από το είδος του προβλήματος, τη γεωμετρία των στοιχείων και τις απαιτήσεις ακρίβειας και υπολογιστικής απόδοσης. Πυρήνας της ανάλυσης είναι η συμβατότητα των συναρτήσεων μεταξύ γειτονικών στοιχείων, η εξασφάλιση της απαραίτητης συνέχειας και συνεκτικότητας, όπως και η επιτρεπτότητα της αποτελεσματικής κατασκευής των πινάκων του συστήματος [37]. Επί του συνόλου, οι συναρτήσεις μορφής αποτελούν το βασικό εργαλείο για τη διακριτοποίηση και την αριθμητική προσέγγιση των πεδίων στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

3.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEM)

Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η βελτίωση του πλέγματος είναι απαραίτητη για την αύξηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αριθμητικών προσομοιώσεων. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που εφαρμόζονται για να βελτιώσουν τη ποιότητα, τη προσαρμοστικότητα και την αποδοτικότητα του πλέγματος.

Η τοπική πύκνωση των κόμβων (mesh refinement) συνιστά μία βασική τεχνική βελτίωσης . Σε αυτήν, οι θέσεις των κόμβων μεταβάλλονται ώστε τα στοιχεία να αποκτήσουν καλύτερες γεωμετρικές ιδιότητες, όπως λόγο πλευρών κοντά στη μονάδα. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεθόδους που βασίζονται σε ανάλυση παραμόρφωσης, όπου εφαρμόζονται δυνάμεις στους κόμβους για να προσεγγίσουν μια βέλτιστη θέση, ή με Laplacian smoothing, όπου κάθε κόμβος μετακινείται προς τον μέσο όρο των γειτονικών του. Οι συγκεκριμένες τεχνικές εφαρμόζονται τόσο σε 2D, όσο και σε 3D πλέγματα και μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τη ποιότητα με λίγες επαναλήψεις [38] [39].

Η προσαρμοσμένη βελτίωση (adaptive mesh refinement) στοχεύει στην τοπική αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος σε περιοχές με υψηλό σφάλμα ή έντονη μεταβολή του πεδίου, διατηρώντας το πλέγμα πιο αραιό σε λιγότερο κρίσιμες περιοχές. Το παραπάνω επιτυγχάνεται με εκτίμηση του σφάλματος, επιλογή των στοιχείων προς βελτίωση και τοπική διαίρεση ή συγχώνευση στοιχείων. Εξειδικευμένες τεχνικές, όπως η χρήση Voronoi διαγραμμάτων και clustering, βοηθούν στην προσαρμογή του πλέγματος σε περισσότερο πολύπλοκες γεωμετρίες ή σε περιοχές με ραγδαία μεταβολή της πυκνότητας [40] [41] [42].

Εφαρμόζονται επιπλέον, τεχνικές βελτιστοποίησης της τοπολογίας, κατά τις οποίες αλλάζει η συνδεσμολογία του πλέγματος, μέσω της εισαγωγής ή συγχώνευσης στοιχείων, για περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας και της ομαλότητας του πλέγματος [39]. Σε περιπτώσεις, όπου το πλέγμα παραμορφώνεται σημαντικά, εφαρμόζεται αυτόματη επαναδημιουργία του πλέγματος (remeshing) βάσει γεωμετρικών ή φυσικών κριτηρίων, ώστε να διατηρείται η ποιότητα και η ακρίβεια της προσομοίωσης [41].

Εν γένει, οι τεχνικές βελτίωσης του πλέγματος περιλαμβάνουν τοπική πύκνωση, προσαρμοσμένη βελτίωση, βελτιστοποίηση τοπολογίας και αυτόματη επαναδημιουργία, με στόχο την αύξηση της ακρίβειας, τη μείωση του υπολογιστικού κόστους και τη βελτίωση της σταθερότητας των αριθμητικών λύσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

4.1 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής απόσβεσης των ταλαντώσεων μιας ευφηούς κατασκευής, μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, σε συνδυασμό με τη λειτουργία του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος τύπου «αντίστασης – πηνίου» (R-L). Η ανάλυση επεκτείνεται στην εξέταση του ρόλου της αυξητικής μικροδομής όσον αφορά τη βελτίωση της αποσβεστικής συμπεριφοράς του συστήματος.

4.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

Η ανθρωπότητα χτίζει ένα βιώσιμο μέλλον μέσα από την τεχνολογία και την καινοτομία και στο επίκεντρο αυτής της μετάβασης βρίσκεται η προσομοίωση, ένα ισχυρό εργαλείο που επιτρέπει τη κατανόηση και την αντιμετώπιση πολύπλοκων προκλήσεων. Το ANSYS, αξιοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), προσφέρει προηγμένες δυνατότητες ανάλυσης τάσεων, παραμορφώσεων, ροής και θερμικών φαινομένων.

Η πλατφόρμα υποστηρίζει τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση προϊόντων, παρέχοντας προγνωστική ακρίβεια που ενισχύει την αποδοτικότητα και μειώνει σημαντικά το κόστος ανάπτυξης. Από τη βελτίωση ιδιοτήτων υλικών μέχρι την πρόβλεψη δυναμικών συμπεριφορών, το ANSYS παρέχει εργαλεία που μετασχηματίζουν ιδέες σε πρακτικές λύσεις, διαμορφώνοντας το μέλλον κάθε κλάδου της βιομηχανίας.

4.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Το μεγαλύτερο μέρος της υπολογιστικής διαδικασίας, κομμάτι της οποίας αποτελεί η συναρμολόγηση του συνολικού συστήματος και η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων, εκτελείται από εξειδικευμένο λογισμικό ανάλυσης. Ωστόσο, η συμβολή του μηχανικού παραμένει καθοριστική, καθώς είναι υπεύθυνος για τον ορθό ορισμό του προβλήματος, τη

δημιουργία ενός κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος και τη τεκμηριωμένη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, ο μηχανικός φέρει την ευθύνη για την επικύρωση του μοντέλου, διασφαλίζοντας ότι τα παραγόμενα δεδομένα είναι ρεαλιστικά, αξιόπιστα και εναρμονισμένα με τη φυσική συμπεριφορά του υπό μελέτη συστήματος.

4.4 ΕΥΦΥΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

4.4.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης μια δοκό, τύπου προβόλου, η οποία στη σημερινή εποχή, συνιστά μια διαδεδομένη αρχιτεκτονική σε διατάξεις πιεζοηλεκτρικής απόσβεσης ταλαντώσεων [43]. Στη δοκό έχει σχεδιαστεί κατάλληλη αυξητική μικροδομή εγκοπών [44], οι οποίες έχουν χαραχθεί κατά μήκος της δοκού και όπως είναι γνώριμο από τη βιβλιογραφία εμφανίζει αρνητικό λόγο Poisson , χαρακτηριστικό που ενδέχεται να επηρεάζει θετικά την ευκαμψία και την απόσβεση της κατασκευής. Επιπλέον, επάνω στη μικροδομή τοποθετείται ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, το οποίο συνδέεται με κύκλωμα παραδιακλάδωσης τύπου “αντίστασης-πηνίου” (R-L), επιτρέποντας την ηλεκτρομηχανική σύζευξη και την ενεργειακή απόκριση του συστήματος.

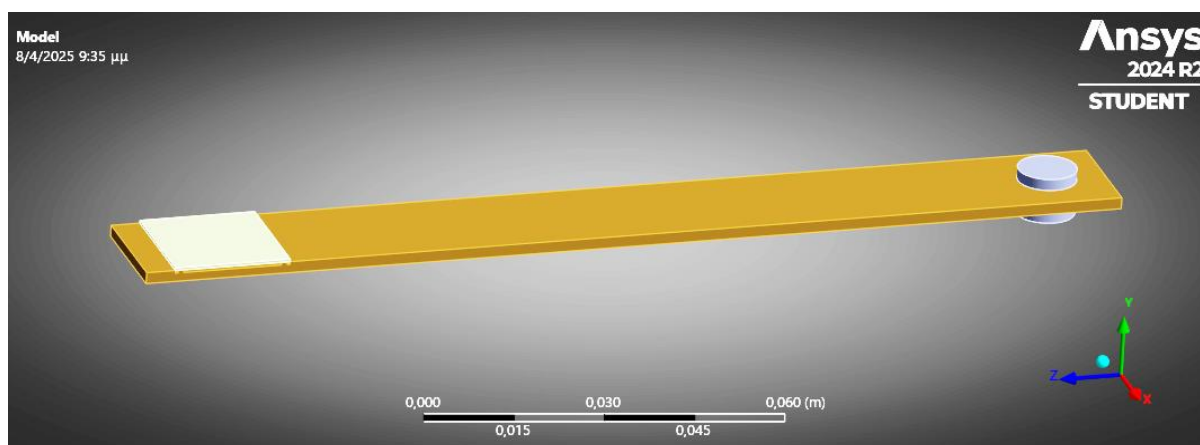
Η συγκεκριμένη διαμόρφωση επιλέγεται λόγω της υψηλής μηχανικής καταπόνησης που αναπτύσσεται κατά τη δόνηση καθώς και της σχετικά απλής γεωμετρικής κατασκευής [43]. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι βασικοί τρόποι κάμψης μιας δοκού προβόλου επιτυγχάνονται σε χαμηλές ιδιοσυχνότητες, γεγονός που διευκολύνει τη σύζευξη με χαμηλές περιβαλλοντικές διεγέρσεις και ενισχύει την αποδοτικότητα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος .

Για την υποβοήθηση της εφαρμογής της διεγείρουσας δύναμης, τοποθετήθηκαν δύο μαγνήτες στην ελεύθερη άκρη της δοκού, ένας επάνω και ένας κάτω από αυτήν. Οι σχετικές διαστάσεις των παραπάνω μοντέλων αναφέρονται στον πίνακα 1.

Διαστάσεις	
Δοκός	170mm x 20mm x 2mm
Μικροδομή	20mm x 20 mm x 0.5mm
Επίθεμα	20mm x 20mm x 0.5mm
Μαγνήτης επάνω	t=2mm D=10mm
Μαγνήτης κάτω	t=4mm D=10mm

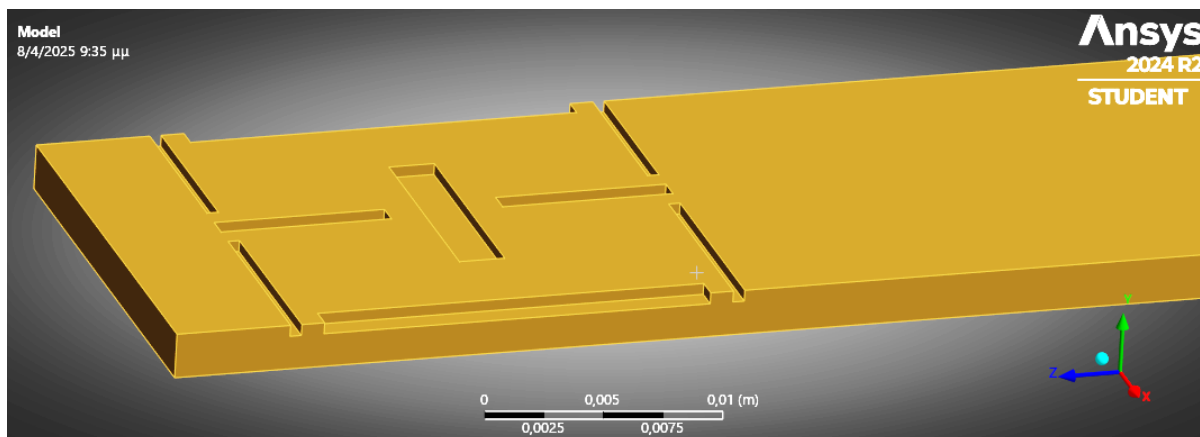
Πίνακας 1 : Διαστάσεις στοιχείων ευφούς κατασκευής.

Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται ποιοτικά το μοντέλο όπως φαίνεται στο λογισμικό.



Εικόνα 13: Ευφούς κατασκευή.

Στην εικόνα 14, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκαν οι εγκοπές επάνω στη δοκό, όπου αποτελούν την αυξητική μικροδομή της κατασκευής. Οι κατάλληλα διαμορφωμένες εγκοπές μπορούν να μειώσουν τη συγκέντρωση τάσεων έχοντας ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της δημιουργίας ρωγμών και εν συνεχεία, την αύξηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής [45]. Σε προγενέστερες έρευνες ανεδείχθη ότι σε σύνθετες κατασκευές, όπως οι ξύλινες-σκυροδεμένες δοκοί, οι εγκοπές προσφέρουν ισχυρές και άκαμπτες συνδέσεις με μικρό αριθμό συνδέσμων, φέροντας σημαντική βελτίωση στη καμπτική απόδοση και στη μέγιστη δυνατότητα φόρτισης [46].



Εικόνα 14: Αυξητική μικροδομή με εγκοπές στην κατασκευή.

4.4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σε πρώτο στάδιο, κατά οποιαδήποτε ανάλυση στο λογισμικό ANSYS, προαπαιτείται η εισαγωγή των δεδομένων της μηχανικής των υλικών. Στην καρτέλα ‘Engineering data’ , καθίσταται απαραίτητη η εισαγωγή όλων των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την ανάλυση. Το λογισμικό περιέχει βιβλιοθήκες για τα υλικά τα οποία εισάγονται αυτόματα κατά την επιλογή τους.

Για το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, για το οποίο χρησιμοποιήθηκε PZT-5A με πυκνότητα 7750 kg/m^3 , θεμελιώδης λεπτομέρεια, αποτελεί ο σωστός ορισμός της κατεύθυνσης πόλωσης του. Στην εικόνα 14 γίνεται αντιληπτό ότι ο ενδιαφερόμενος για την πόλωση άξονας είναι ο y και η επιλογή των 3 βασικών πινάκων του πιεζοηλεκτρικού, που αναφέρονται παρακάτω, βασίζονται σε αυτόν.

Η μηχανική και ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του επιθέματος ορίστηκε μέσω των πινάκων ανισοτροπικής ελαστικότητας (anisotropic elasticity), σχετικής επιτρεπτικότητας (anisotropic relative permittivity) και πιεζοηλεκτρικής σύζευξης (piezoelectric matrix), όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια, στους πίνακες 2,3,4 αντίστοιχα.

Η απόδοση και η αξιοπιστία των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον ακριβή προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους, ο οποίος γίνεται μέσα από τους τρεις προαναφερόμενους πίνακες.

Ο πίνακας ανισοτροπικής ελαστικότητας (πίνακας 2) περιγράφει τον τρόπο, με τον οποίο ανταποκρίνεται μηχανικά το υλικό σε τάσεις διαφορετικών διευθύνσεων. Ο ρόλος του είναι ιδιαίτερα κρίσιμος όταν πρόκειται για σύνθετες κατασκευές ή υλικά με έντονα κατευθυνόμενη

πόλωση. Μεταβολές στην ανισοτροπία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ικανότητα του υλικού να μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική [47].

D[*/*]	A	B	C	D	E	F
	1.2E+11					
	7.51E+11	1.11E+11				
	7.52E+11	7.51E+11	1.2E+11			
	0	0	0	2.11E+11		
	0	0	0	0	2.11E+11	
	0	0	0	0	0	2.26E+11

Πίνακας 2: Ανισοτροπικής ελαστικότητας (Anisotropic elasticity).

Ο πίνακας σχετικής επιτρεπτικότητας (πίνακας 3), από την άλλη, περιγράφει την αποτελεσματικότητα του υλικού ως προς την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας όταν εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο. Η συγκεκριμένη ιδιότητα επηρεάζει άμεσα την ηλεκτρική συμπεριφορά του επιθέματος, καθώς είναι γνωστό ότι υλικά με χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά τείνουν να ενισχύουν τη μηχανική απόκριση, προσφέροντας μεγαλύτερη ευαισθησία σε εφαρμογές αισθητήρων και ενεργοποιητών [48].

E[*/*]	A	B	C
	1.2E+11		
	7.51E+11	1.11E+11	
	7.52E+11	7.51E+11	1.2E+11

Πίνακας 3: Σχετικής επιτρεπτικότητας (Anisotropic relative permittivity).

Τέλος, ο πίνακας πιεζοηλεκτρικής σύζευξης (πίνακας 4) αποτυπώνει το πώς αλληλεπιδρούν τα μηχανικά και ηλεκτρικά μεγέθη, όπως η τάση και το ηλεκτρικό πεδίο ή η παραμόρφωση και το ηλεκτρικό φορτίο. Αποτελεί λοιπόν, βασικό εργαλείο για τη κατανόηση και τη πρόβλεψη της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων, ιδίως σε εφαρμογές όπως ο έλεγχος δονήσεων, η ενεργειακή συγκομιδή και οι ευφυείς κατασκευές [49].

E[*/*]	A	B	C
	0	-5.3512	0
	0	15,783	0
	0	-5,3512	0
	12.295	0	0
	0	0	12.295
	0	0	0

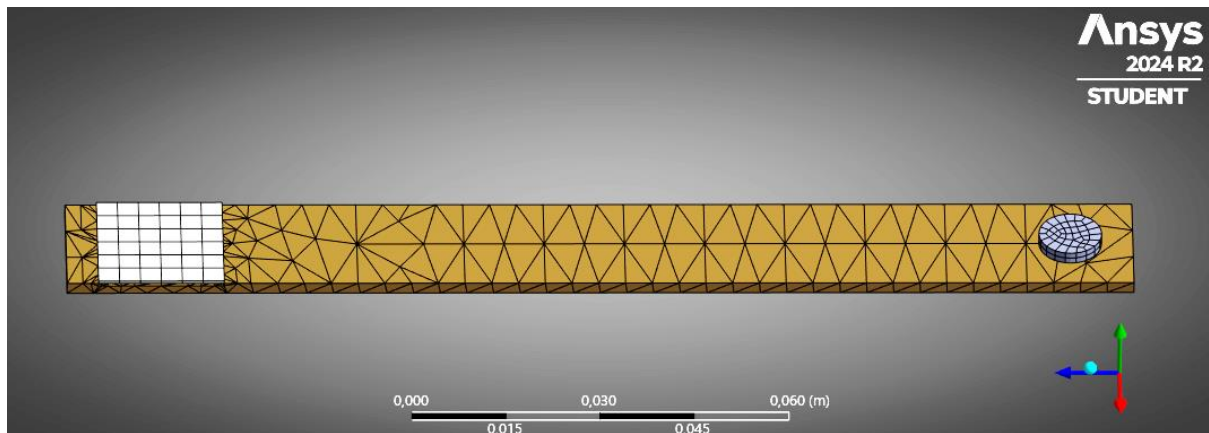
Πίνακας 4: Πιεζοηλεκτρικής σύζευξης (Piezoelectric Matrix).

Για τη δοκό χρησιμοποιήθηκε κράμα αλουμινίου (aluminum alloy), λόγω της υψηλής αναλογίας αντοχής προς βάρος και της καλής κατεργασιμότητάς του. Αντίστοιχα, για τους μαγνήτες επιλέχθηκε δομικός χάλυβας (structural steel), προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαραίτητη μηχανική ακαμψία και μαγνητική απόκριση.

4.4.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

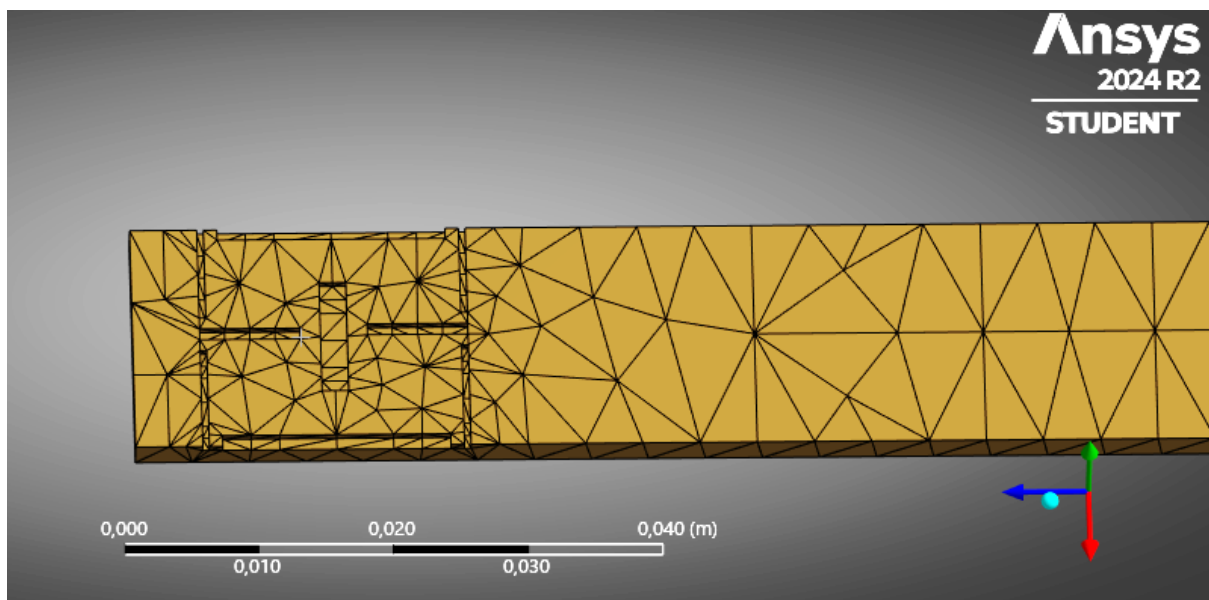
Για την αριθμητική ανάλυση της δοκού στο λογισμικό ANSYS Mechanical, πραγματοποιήθηκε κατάλληλο πλέγμα διακριτοποίησης (mesh generation), ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ ακρίβειας αποτελεσμάτων και υπολογιστικού κόστους.

Η εικόνα 15 αποδίδει την διακριτοποίηση του μοντέλου της ευφυούς κατασκευής όπως παρουσιάζεται στο λογισμικό. Στη περιοχή των εγκοπών της αυξητικής μικροδομής καθώς και στο σημείο εφαρμογής δύναμης, το πλέγμα πυκνώθηκε τοπικά (mesh refinement) για τη καλύτερη αποτύπωση των τάσεων και παραμορφώσεων που αναμένεται να εμφανίζονται εντονότερα. Αντίθετα, στις περιοχές μακριά από κρίσιμα σημεία, εφαρμόστηκε αραιότερο πλέγμα, με σκοπό τη μείωση του συνολικού αριθμού στοιχείων.



Εικόνα 15: Πλέγμα (mesh) ευφρούς κατασκευής.

Στην εικόνα 16 αναδεικνύεται το πλέγμα διακριτοποίησης στη περιοχή της αυξητικής μικροδομής με την απουσία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος.



Εικόνα 16: Διακρίνεται και το πλέγμα (mesh) στην επιφάνεια της αυξητικής μικροδομής.

Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 15 και 16, το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την προσομοίωση δείχνει να είναι κατάλληλο και αξιόπιστο για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπως αυτές που περιλαμβάνουν πιεζοηλεκτρικά υλικά. Αποτελείται από 1326 στερεά στοιχεία, με την πλειοψηφία να είναι τετραεδρικά 10 κόμβων (Tet10) και εξαεδρικά 20 κόμβων (Hex20), τα οποία θεωρούνται προηγμένα και προσφέρουν καλύτερη προσαρμογή σε καμπύλες ή πολύπλοκες γεωμετρίες. Αυτό βοηθά το μοντέλο να αποδίδει πιο σωστά τα φυσικά φαινόμενα.

Όσον αφορά τη ποιότητα του πλέγματος, οι τιμές κυμαίνονται σε αποδεκτά επίπεδα. Η ελάχιστη τιμή στοιχειώδους ποιότητας είναι περίπου 0.055, ελάχιστα ανώτερο από το κρίσιμο όριο των 0.05 [50], ενώ ο μέσος όρος είναι στο 0.39, αρκετά ικανοποιητικός για τις περισσότερες αναλύσεις. Η αναλογία των πλευρών των στοιχείων (aspect ratio) φτάνει έως και 23, αλλά κατά μέσο όρο είναι περίπου 5.45, κάτι που δείχνει ότι το πλέγμα παραμένει λειτουργικό, ακόμα κι αν υπάρχουν μεμονωμένα πιο "μακρόσκελή" στοιχεία [51].

Συνολικά, το πλέγμα είναι ισορροπημένο και καλά διαμορφωμένο. Υπάρχει μια καλή σχέση ανάμεσα στην ακρίβεια και την υπολογιστική αποδοτικότητα, ενώ η χρήση τετραεδρικών και εξαεδρικών στοιχείων υψηλής τάξης το καθιστά κατάλληλο για να προσομοιώσει αξιόπιστα το φαινόμενο που μας ενδιαφέρει.

Παρακάτω αποδίδονται οι πίνακες των στατιστικών (statistics) του πλέγματος (πίνακας 4) και των ποσοτικών δεικτών της ποιότητας (πίνακας 5) και της αναλογίας των διαστάσεων (πίνακας 6).

Στατιστικά πλέγματος	
Κόμβοι (Nodes)	4030
Στοιχεία (elements)	1326
Γωνιακοί κόμβοι (corner nodes)	921
Μεσαίοι κόμβοι (mid nodes)	3109
Στερεά στοιχεία (Solid elements)	1326
Τετράεδρα (Tet10)	1085
Εξάεδρα (Hex20)	241

Πίνακας 5: Τα στατιστικά στοιχεία του πλέγματος (mesh).

Ποιότητα στοιχείων (mesh quality)	
Min	5,4975e-002
Max	0,98826
Average	0,38933

Standard Deviation	0,25594
---------------------------	---------

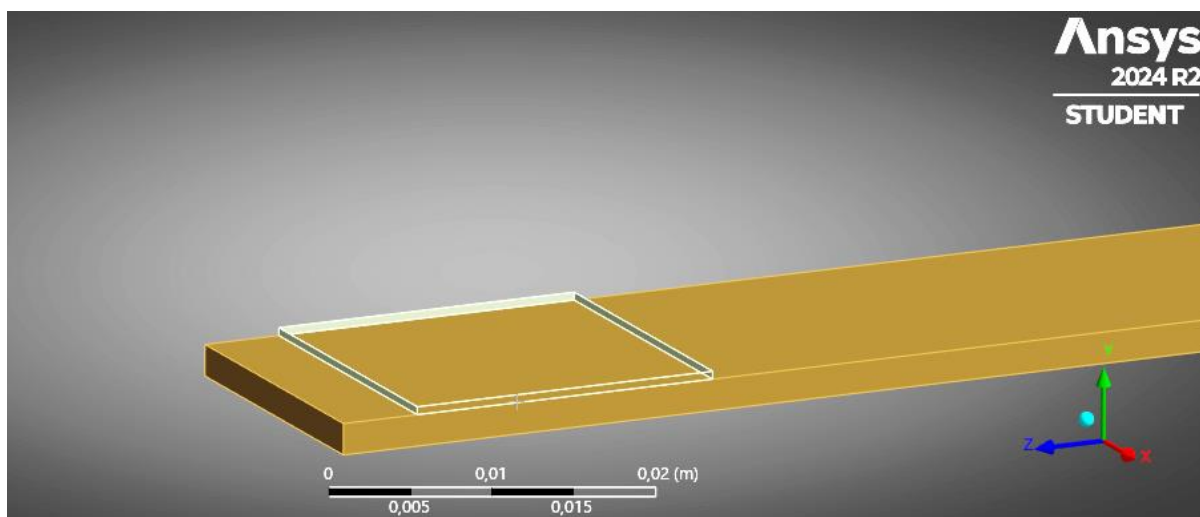
Πίνακας 6: Οι ποσοτικοί δείκτες της ποιότητας του πλέγματος.

Αναλογία διαστάσεων (Aspect Ratio)	
Min	1,1262
Max	23,361
Average	5,4551
Standard Deviation	3,1517

Πίνακας 7: Οι ποσοτικοί δείκτες της αναλογίας των διαστάσεων.

4.5 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (STATIC ANALYSIS)

Σε πρώτο στάδιο, διερευνάται η επίδραση της μικροδομής στην απόδοση της δοκού, και συγκεκριμένα κατά πόσο αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της ευκαμψίας της. Για τον σκοπό αυτό, σχεδιάζεται μια δεύτερη κατασκευή, πανομοιότυπη της αρχικής αλλά χωρίς την ενσωμάτωση μικροδομής (εικόνα 18). Η σύγκριση των δύο διατάξεων πραγματοποιείται μέσω στατικής ανάλυσης, εστιάζοντας στον υπολογισμό της συνολικής παραμόρφωσης της δοκού. Η επιλογή της στατικής ανάλυσης πεδίου σύζευξης (coupled field static analysis), επιλέχθηκε διότι επιτρέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και της υποκείμενης δομής.



Εικόνα 18: Ευφύης κατασκευής χωρίς αυξητική μικροδομή.

4.5.1 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στο πλαίσιο της στατικής ανάλυσης, αρχικά εφαρμόζεται μια συνθήκη πάκτωσης (Fixed Support) στις τέσσερις ακμές της μιας πλευράς της δοκού, προσομοιώνοντας έτσι τη στερέωση της ως δοκό προβόλου. Για τη διέγερση του συστήματος, εφαρμόζεται εξωτερική δύναμη ύψους 2 N στον μαγνήτη που είναι τοποθετημένος στην άνω πλευρά, προκαλώντας κάμψη της δοκού και ενεργοποίηση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Παράλληλα, για την ορθή λειτουργία του ηλεκτρικού κυκλώματος, είναι απαραίτητος ο καθορισμός μηδενικού δυναμικού (γείωση 0 V) στο κάτω ηλεκτρόδιο του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, δηλαδή στη πλευρά που βρίσκεται σε άμεση επαφή με τη μικροδομή της δοκού.

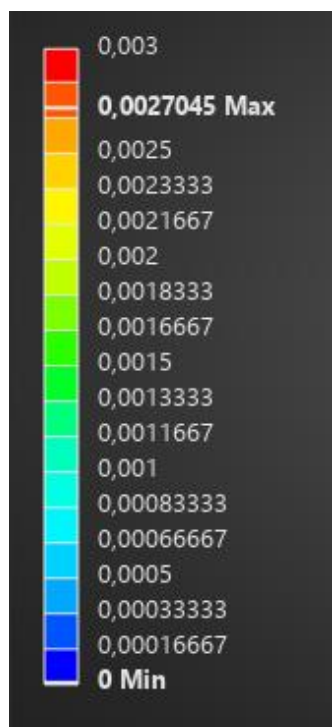
4.5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (TOTAL DEFORMATION)

Διαμέσου της στατικής ανάλυσης και τη λύση των μαθηματικών εξισώσεων με τη βοήθεια του Ansys, βρίσκεται η συνολική παραμόρφωση της δοκού.

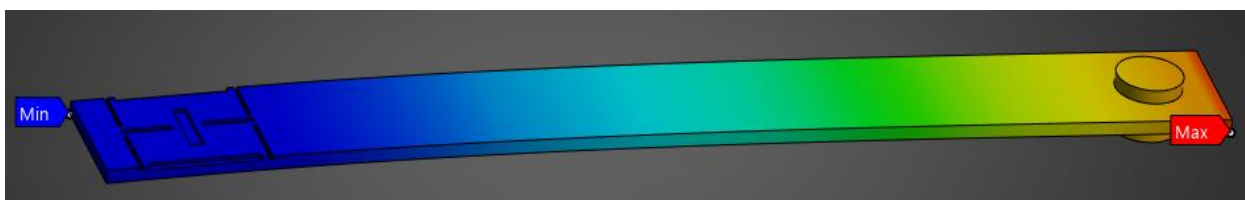
Κατά τον σχεδιασμό της μικροδομής, δίνεται έμφαση στη μηχανική απόκριση της εγκάρσιας διατομής της δοκού, καθότι οι παραμορφώσεις στις εξωτερικές ζώνες της διατομής, αναπτύσσουν μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις λόγω κάμψης οι οποίες είναι κρίσιμες για τη ισχυρότερη ενεργοποίηση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Η τοποθέτηση του

πιεζοηλεκτρικού υλικού σε επιφάνειες κάθετες προς τον κύριο άξονα της δοκού επιτρέπει την αποδοτικότερη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα, αξιοποιώντας την έντονη μεταβολή της παραμόρφωσης που παρατηρείται σε αυτές τις περιοχές. [52]

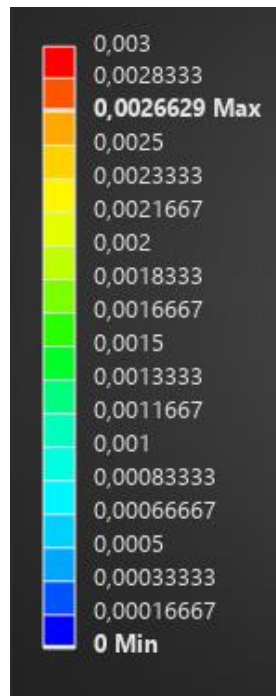
Απο τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι η ύπαρξη μικροδομής αυξάνει την παραμόρφωση της δοκού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρατηρούμενες τιμές είναι σχετικά μικρες, πράγμα αποδεκτό λόγω της μικρής δύναμης που υφίσταται η δοκός, ύψους 2 N. Επιπλέον δεν ξεπερνά τα όρια της ακαμψίας, όπου θα μειωνόταν η αποτελεσματικότητα της δοκού και ενδεχομένως να υπήρχε πιθανή αποτυχία του συστήματος.



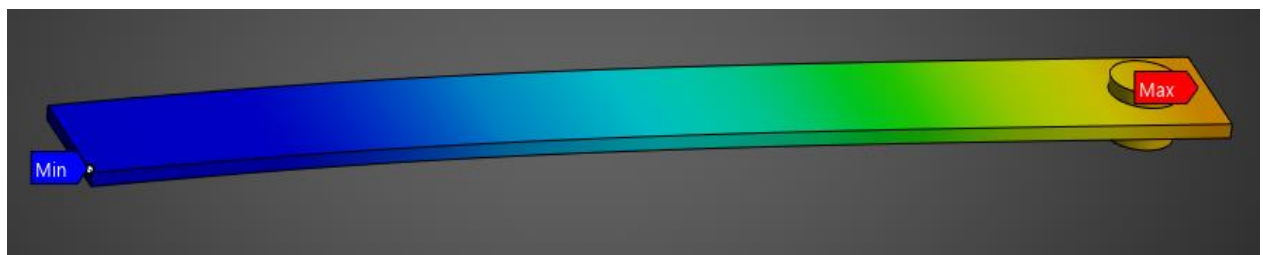
Εικόνα 19: Ποσοτικά αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης της δοκού με αυξητική μικροδομή.



Εικόνα 20: Συνολική παραμόρφωση της δοκού με αυξητική μικροδομή.



Εικόνα 21: : Ποσοτικά αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωση της δοκού χωρίς αυξητική μικροδομή.



Εικόνα 22: Συνολική παραμόρφωση της δοκού χωρίς αυξητική μικροδομή.

<i>Μέγιστη Παραμόρφωση (mm)</i>	
<i>Με μικροδομή</i>	2.7045
<i>Χωρίς μικροδομή</i>	2.6629

Πίνακας 8: Μέγιστες τιμές παραμορφώσεων κατασκευής με και χωρίς μικροδομή.

Η εφαρμογή μικροδομής επάνω στη δοκό φαίνεται να επηρεάζει ουσιαστικά τη μηχανική της απόκριση, ιδίως ως προς τη παραμόρφωση. Συγκεκριμένα, η συνολική παραμόρφωση της δομής παρουσίασε μικρή αλλά μετρήσιμη αύξηση, στην μέγιστη τιμή, από 2.6629 mm στην απλή κατασκευή σε 2.7045 mm στη δομή με μικροδομή. Η μεταβολή αυτή, της τάξης του 1,56%, υποδηλώνει ότι η μικροδομή καθιστά τη δοκό ελαφρώς πιο εύκαμπτη, μειώνοντας την ακαμψία της υπό το ίδιο εφαρμοζόμενο φορτίο. Η ενίσχυση της ευκαμψίας αποδίδεται στη παρουσία γεωμετρικών ασυνεχειών και εγχοπών, οι οποίες διευκολύνουν τη τοπική παραμόρφωση της κατασκευής.

Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η αυξημένη ευκαμψία μπορεί να ενισχύσει τη δυναμική απόκριση του συστήματος και να βελτιώσει τη λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, προσφέροντας υψηλότερη ενεργειακή διέγερση. Παρ' όλα αυτά, απαιτείται προσεκτική αξιολόγηση της συνολικής επίδρασης της μικροδομής, καθώς η αυξημένη παραμόρφωση ενδέχεται να συνοδεύεται από τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν δυσμενώς τη μηχανική αντοχή του συστήματος.

Μεγαλύτερη παραμόρφωση της δοκού αποδεικνύει ότι έχει βελτιωθεί η ευκαμψία της δοκού [5] έχοντας ως αποτέλεσμα να απορροφά καλύτερα τις δυνάμεις από φορτία και δονήσεις [2]. Εκτός αυτού, βελτιώνει την πιεζοηλεκτρική απόδοση, αφού η ηλεκτρική τάση που παράγεται είναι μεγαλύτερη απορρέοντας μεγαλύτερη ηλεκτρική παραγωγή, ενώ μια πιο εύκαμπτη δομή μπορεί να προσαρμόζεται καλύτερα και να μειώνει τις καταπονήσεις [53] [6]. Τελικώς, με την χάραξη της μικροδομής μειώνεται το συνολικό βάρος της δοκού [40] [41].

4.5.3 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο της στατικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, υπολογίστηκε και η μέγιστη κύρια ελαστική παραμόρφωση (maximum principal elastic strain) για κάθε μία από τις δύο δομές, τη δοκό με μικροδομή και τη δοκό χωρίς μικροδομή. Η παράμετρος αυτή αποτελεί κρίσιμο μέγεθος, καθώς εκφράζει τη μεγαλύτερη εφελκυστική παραμόρφωση που αναπτύσσεται σε κάθε σημείο της δομής και είναι ενδεικτική των περιοχών με τη μεγαλύτερη μηχανική ένταση.

Η ποσοτική συγκριτική αξιολόγηση των δύο γεωμετρικά διαφοροποιημένων μοντέλων απέδειξε ότι η παρουσία μικροδομής προκαλεί εντοπισμένες αυξήσεις στη μέγιστη κύρια ελαστική παραμόρφωση, με μέγιστη τιμή 6.4919×10^{-4} (m/m) έναντι 5.7691×10^{-4} (m/m) στο απλοποιημένο μοντέλο και ελάχιστη 1.1561×10^{-8} (m/m) έναντι 3.059×10^{-9} (m/m) αντίστοιχα.

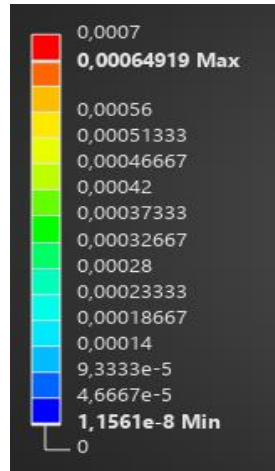
	<i>Ελάχιστη Παραμόρφωση (m/m)</i>	<i>Μέγιστη Παραμόρφωση (m/m)</i>
<i>Με μικροδομή</i>	1.1561×10^{-8}	6.4919×10^{-4}
<i>Χωρίς μικροδομή</i>	3.059×10^{-9}	5.7691×10^{-4}

Πίνακας 9: Ελάχιστες και μέγιστες τιμές μέγιστων κύριων παραμορφώσεων.

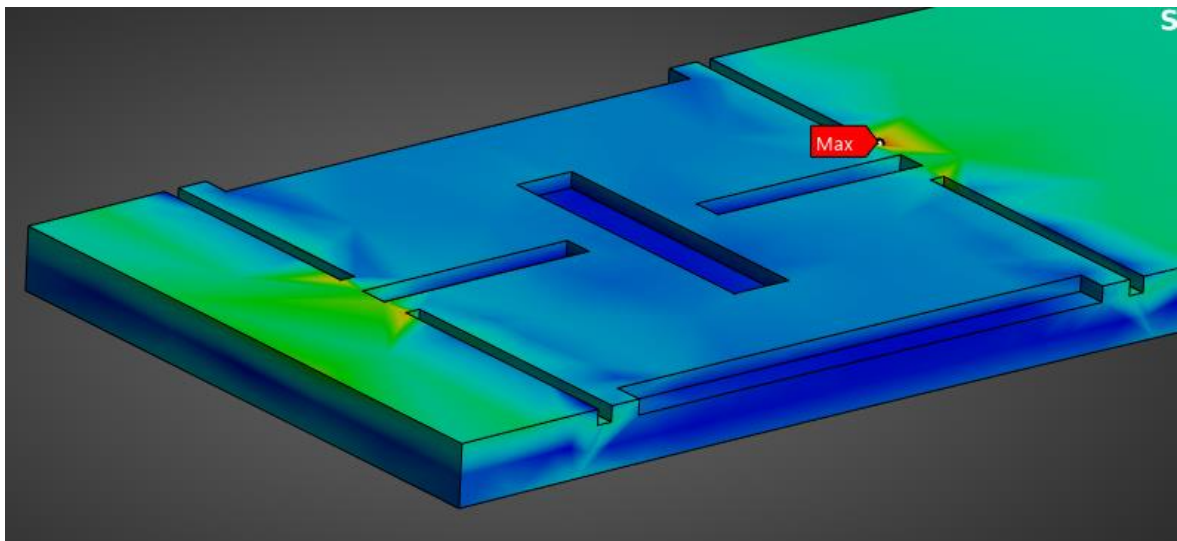
Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στη κατανομή των παραμορφώσεων. Στη δοκό με μικροδομή, οι παραμορφώσεις εντοπίζονται σε περιοχές γύρω από τις εγκοπές, ενώ στη συμβατική δομή η κατανομή είναι πιο ομοιόμορφη. Αυτό επιβεβαιώνει τον ρόλο των εγκοπών ως ζώνες εκτόνωσης όπου το φορτίο «παγιδεύεται» κατά μήκος των εγκοπών και έτσι προστατεύεται η άκρη της κατασκευής από υπέρμετρη ένταση. Οι παραμορφώσεις αυτές συγκεντρώνονται στην επιφάνεια, εγκάρσια στο διαμήκη άξονα, γεγονός που επιβεβαιώνει την καταλληλότητά της για την τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων

Το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό από μηχανολογικής απόψεως, καθώς μπορεί να επηρεάσει τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος υπό εξωτερικά φορτία. Εντούτοις, η αυξημένη παραμόρφωση σε τοπικό επίπεδο μπορεί να έχει θετική επίδραση στην απόδοση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, καθώς το υλικό αποκρίνεται ηλεκτρικά σε μηχανικές παραμορφώσεις, προσφέροντας έτσι εντονότερη ηλεκτρική έξοδο.

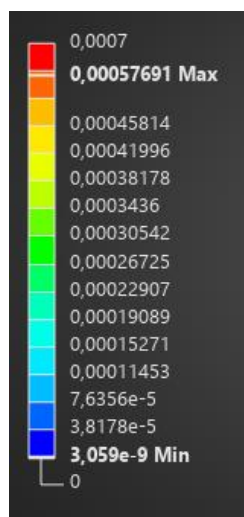
Στις ακόλουθες εικόνες 24 και 26 παρουσιάζονται ποιοτικά τα πεδία της μέγιστης κύριας ελαστικής παραμόρφωσης και για τις δύο περιπτώσεις, ώστε να αποδοθεί με σαφήνεια η επίδραση της μικροδομής στην κατανομή των παραμορφώσεων εντός της δομής.



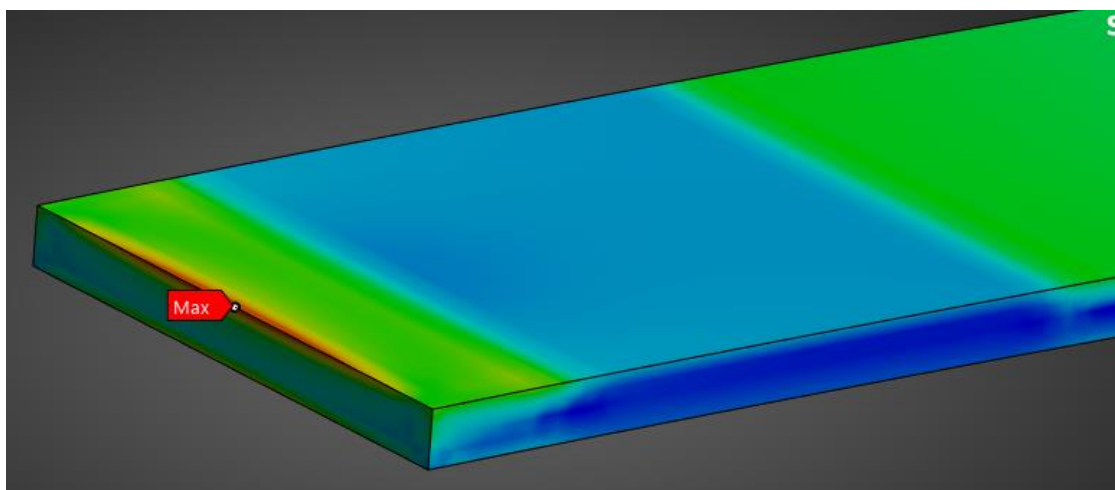
Εικόνα 23 : Αποτελέσματα μέγιστης κύριας ελαστικής παραμόρφωσης με αυξητική μικροδομή.



Εικόνα 24 : Μέγιστη κύρια ελαστική παραμόρφωση με αυξητική μικροδομή.



Εικόνα 25 : Αποτελέσματα μέγιστης κύριας ελαστικής παραμόρφωσης χωρίς αυξητική μικροδομή.



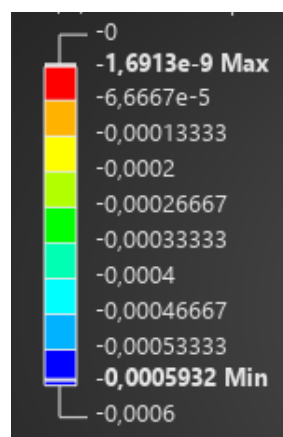
Εικόνα 26: Μέγιστη κύρια ελαστική παραμόρφωση χωρίς αυξητική μικροδομή.

Η χρωματική αποτύπωση των αποτελεσμάτων κατέδειξε σαφές ότι στην περίπτωση της δοκού με μικροδομή οι ζώνες «θερμών» χρωμάτων (κίτρινο έως κόκκινο) συγκεντρώνονται μόνο στις ρίζες των εγκοπών, ενώ το κύριο σώμα της δοκού παραμένει σε αποχρώσεις σκούρου μπλε, υποδηλώνοντας εξαιρετικά χαμηλές τιμές παραμόρφωσης. Αντιθέτως, στη συμβατική πλάκα η υψηλή παραμόρφωση καταλαμβάνει ευρύ μέτωπο στο πακτωμένο άκρο και εκτείνεται προς το εσωτερικό.

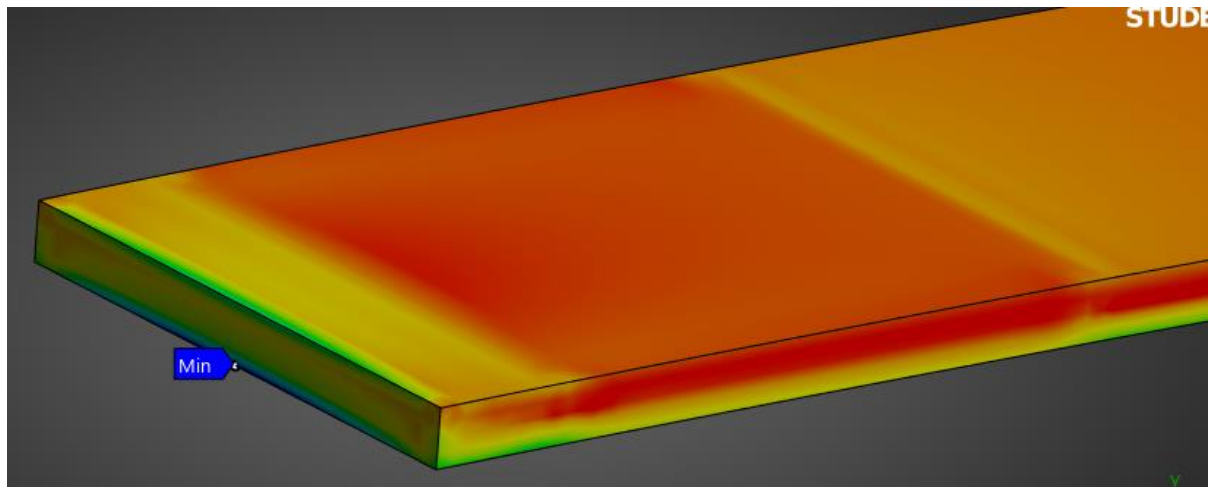
Η ενσωμάτωση της αυξητικής μικροδομής στη σχεδίαση ευφών κατασκευών ενισχύει σημαντικά τη λειτουργικότητα των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων, μέσω της τοπικής ενίσχυσης της παραμόρφωσης σε κρίσιμες περιοχές. Με τον τρόπο αυτό, η μικροδομή λειτουργεί ως μηχανισμός προσαρμογής και ενίσχυσης της σύζευξης μεταξύ της δομικής και της ηλεκτρικής απόκρισης του συστήματος, συμβάλλοντας στην αποδοτικότερη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα και ενισχύοντας τη συνολική απόδοση της ευφούς κατασκευής. Ωστόσο, η τοπική ενίσχυση της παραμόρφωσης ενδέχεται να επιφέρει αυξημένο κίνδυνο αστοχίας, επισημαίνοντας την ανάγκη για προσεκτική σχεδίαση της μικροδομής ώστε να εξισορροπηθούν η λειτουργικότητα και η μηχανική αντοχή της.

4.5.4 ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

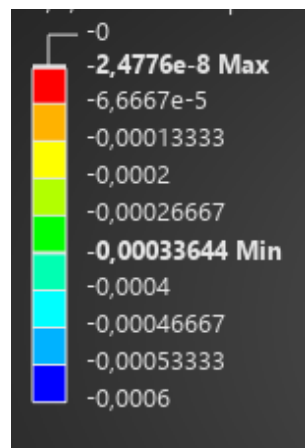
Στον αντίποδα, έλαβε χώρα ο υπολογισμός των ελαχίστων κύριων ελαστικών παραμορφώσεων (minimum principal elastic strain) με και χωρίς τη παρουσία της αυξητικής μικροδομής. Η κατανομή των παραμορφώσεων παρουσιάζει ουσιώδεις διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο γεωμετρικών εκδοχών. Στη περίπτωση της δοκού χωρίς μικροδομή (εικόνα 28), οι θλιπτικές παραμορφώσεις εμφανίζονται εντοπισμένες κατά μήκος των οριακών επιφανειών, κυρίως στην αριστερή παρυφή, όπου παρατηρούνται έντονες συγκεντρώσεις παραμόρφωσης. Αντιθέτως, η ενσωμάτωση μικροδομής (εικόνα 30) οδηγεί σε εμφανή ανακατανομή του πεδίου παραμόρφωσης, με τις υψηλές θλιπτικές τιμές να διαχέονται περιφερειακά της περιοχής της μικροδομής, μειώνοντας τις συγκεντρώσεις και ευνοώντας την ομοιογενή κατανομή των εντάσεων.



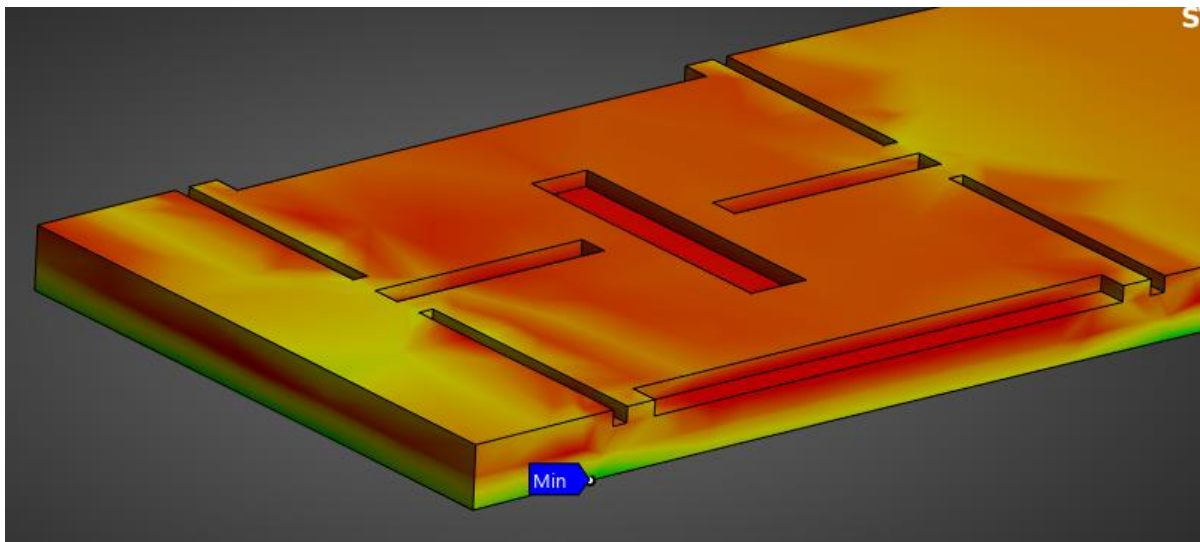
Εικόνα 27: Αποτελέσματα ελάχιστης κύριας ελαστικής παραμόρφωσης χωρίς αυξητική μικροδομή.



Εικόνα 28: Ελάχιστη κύρια ελαστική παραμόρφωση χωρίς αυξητική μικροδομή.



Εικόνα 29: Αποτελέσματα ελάχιστης κύριας ελαστικής παραμόρφωσης με αυξητική μικροδομή.



Εικόνα 30: Ελάχιστης κύρια ελαστική παραμόρφωση με αυξητική μικροδομή.

Οι αρνητικές τιμές της ελάχιστης κύριας ελαστικής παραμόρφωσης καταδεικνύουν την ανάπτυξη **θλιπτικών** παραμορφώσεων. Το πρόσημο αυτό δεν αντανακλά ποιότητα ή ένταση της παραμόρφωσης, αλλά το είδος της μηχανικής καταπόνησης που ασκείται στο υλικό.

Η ποσοτική αποτίμηση των ακραίων τιμών της παραμόρφωσης, στο πίνακα 10, ενισχύει τα ποιοτικά ευρήματα.

Στο χάρτη της ελάχιστης κύριας ελαστικής παραμόρφωσης η συμβατική δοκός εμφανίζει μια συνεχή ζώνη σκούρου-μπλε κατά μήκος του πακτωμένου άκρου, γεγονός που υποδηλώνει εκτεταμένο μέγιστο θλιπτικό μέτρο και, κατ' επέκταση, υψηλό κίνδυνο τοπικής αστοχίας σε μεγάλη επιφάνεια. Αντίθετα, στη δομή με τις εγκοπές ο κύριος κορμός αποτυπώνεται σε κίτρινο-πορτοκαλί, δηλαδή σε αισθητά χαμηλότερες θλιπτικές τιμές. Η χρωματική αυτή διαφοροποίηση καταδεικνύει ότι η αυξητική μικροδομή λειτουργεί ως αποτελεσματικός μηχανισμός εκτόνωσης, «παγιδεύει» ουσιαστικά την έντονη θλίψη στα άκρα των εγκοπών, εκφορτίζοντας το μεγαλύτερο μέρος της δοκού και μειώνοντας συνολικά τις συγκεντρώσεις τάσης. Συνεπώς, η μικροδομή βελτιώνει τον δείκτη μηχανικής ασφάλειας, και ενισχύει τη διάρκεια ζωής έναντι κόπωσης, επιβεβαιώνοντας την ευεργετική της επίδραση σε σχέση με τη συμπαγή γεωμετρία.

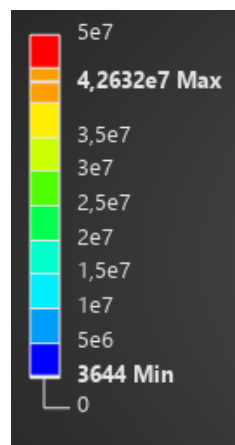
Η ένταξη της αυξητικής μικροδομής στη γεωμετρία της δοκού αποδεικνύεται ευεργετική για την κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων, συμβάλλοντας στην αποφυγή τοπικών

συγκεντρώσεων θλιπτικής καταπόνησης. Η ομαλότερη χωρική τους κατανομή συνιστούν ενδείξεις ενίσχυσης της δομικής απόδοσης, γεγονός που καθιστά την ύπαρξη αυξητικής μικροδομής πολλά υποσχόμενη στρατηγική στον σχεδιασμό προηγμένων κατασκευών μηχανικής.

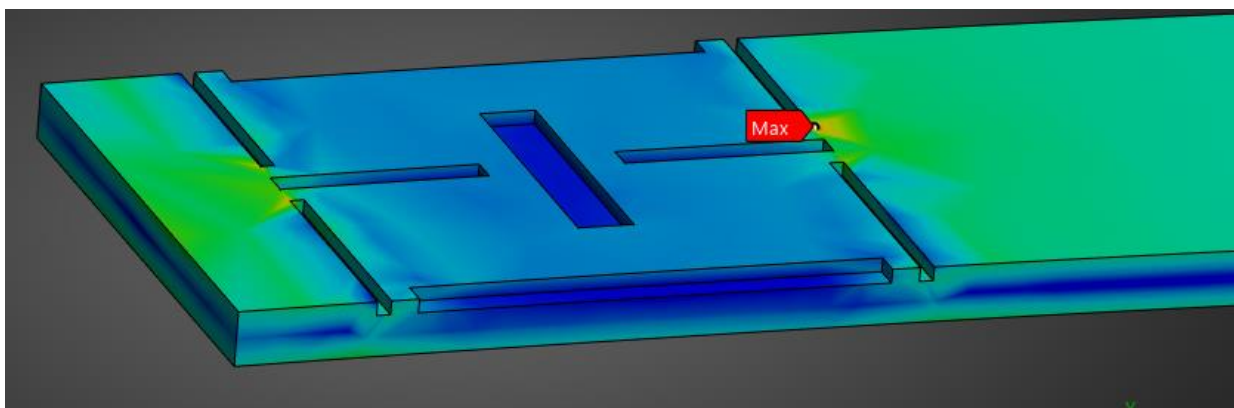
4.5.5 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (EQUIVALENT STRESS)

Πέραν της μελέτης των παραμορφώσεων, υπολογίστηκαν και οι ισοδύναμες τάσεις (Equivalent stress ή Von Mises stress) σε ολόκληρο τον όγκο της δοκού, τόσο για τη γεωμετρία με μικροδομή όσο και για τη δομή αναφοράς χωρίς μικροδομή. Οι ισοδύναμες τάσεις αποτελούν βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση της μηχανικής αστοχίας, καθώς συγκεντρώνουν τις επιμέρους συνιστώσες τάσης σε ένα ενιαίο μέγεθος, κατάλληλο για σύγκριση με τα όρια αντοχής του υλικού.

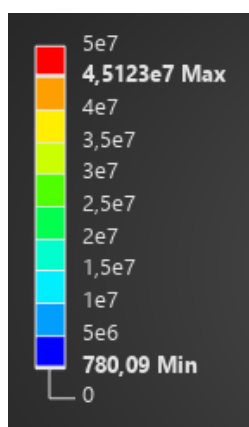
Στις εικόνες 32 και 34 αντίστοιχα παρουσιάζονται ποιοτικά οι κατανομές ισοδύναμων τάσεων για τις δύο δομές, επιτρέποντας την οπτική σύγκριση και αξιολόγηση της επίδρασης της μικροδομής στην ένταση των αναπτυσσόμενων τάσεων.



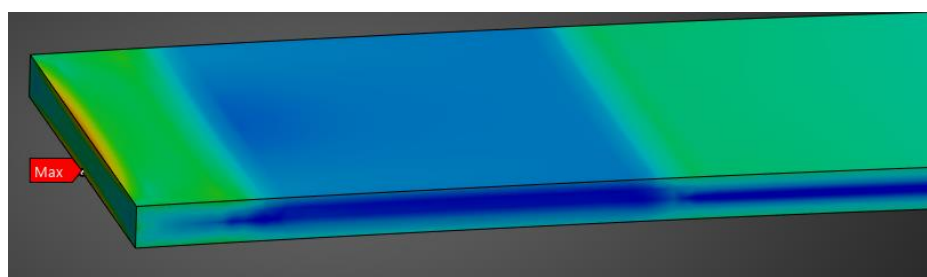
Εικόνα 31: Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων (Equivalent stress) με μικροδομή.



Εικόνα 32: Ισοδύναμες τάσεις (Equivalent stress) με μικροδομή.



Εικόνα 33 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων (Equivalent stress) χωρίς μικροδομή.



Εικόνα 34: Ισοδύναμες τάσεις (Equivalent stress) χωρίς μικροδομή.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται και τα ποσοτικά αποτελέσματα των ισοδύναμων τάσεων (Equivalent stress) για τις δύο περιπτώσεις, με και χωρίς μικροδομή. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές του πεδίου τάσεων, προσφέροντας σαφή εικόνα της μηχανικής καταπόνησης που αναπτύσσεται σε κάθε διαμόρφωση.

Ισοδύναμες τάσεις	Μέγιστη (Pa)	Ελάχιστη (Pa)
Με μικροδομή	5.2632e+07 (51.14MPa)	3644
Χωρίς μικροδομή	4.5123e+07 (45.13MPa)	780.1

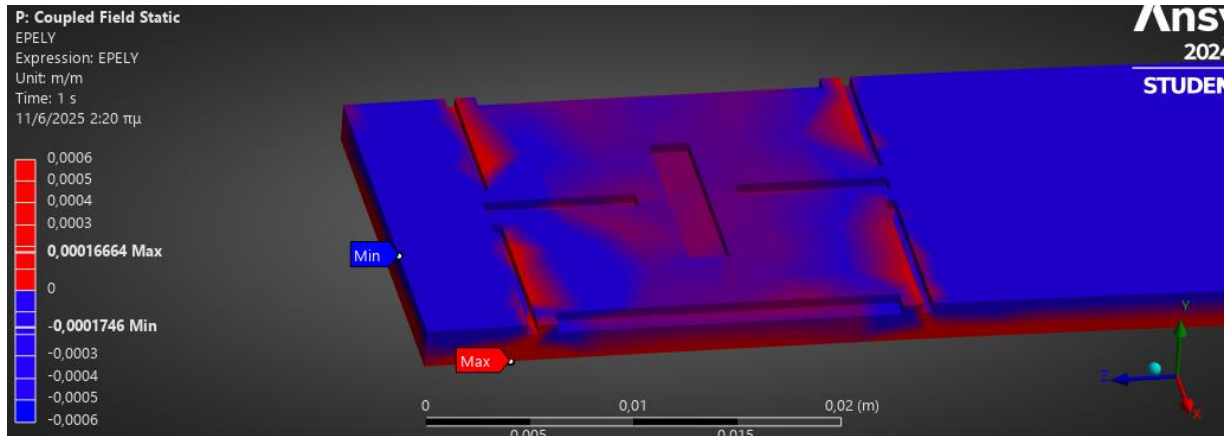
Πίνακας 11: Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων με και χωρίς μικροδομή.

Η προσθήκη μικροδομής στη δοκό ανέδειξε ότι αν και οδηγεί σε τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων, συντελεί σε ελαφρά μείωση της μέγιστης τιμής von Mises κατά περίπου 6%. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι ο σχεδιασμός της μικροδομής ευνοεί την ανακατανομή των φορτίων εντός της δομής, διατηρώντας τη μηχανική ακεραιότητα. Παράλληλα ενισχύει τη μηχανική διέγερση στις κρίσιμες ζώνες λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Η συμπεριφορά αυτή συνιστά σημαντικό πλεονέκτημα για την αντοχή και την αξιοπιστία της κατασκευής, καθώς μειώνεται η πιθανότητα μηχανικής αστοχίας υπό λειτουργικά φορτία. Επομένως, η εισαγωγή της μικροδομής συμβάλλει ουσιαστικά στη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας, ενισχύοντας την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία του συστήματος.

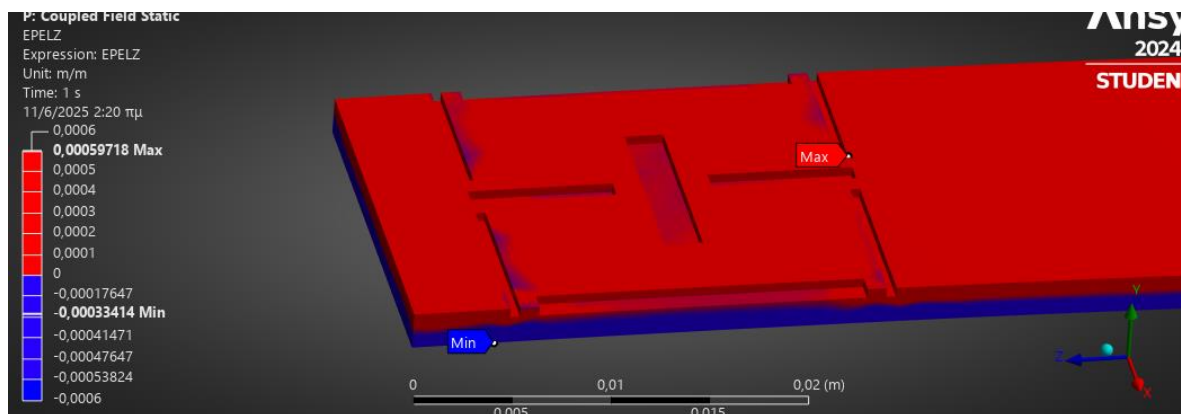
4.5.6 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ POISSON

Όπως τεκμηριώθηκε θεωρητικά (βλ. Κεφ. 2.3.5), χαρακτηριστικό γνώρισμα των αυξητικών υλικών αποτελεί η ταυτόχρονη ανάπτυξη θετικής διαμήκους και εγκάρσιας γραμμικής παραμόρφωσης, φαινόμενο που οδηγεί σε αρνητικό λόγο Poisson ($\nu < 0$). Στο μοντέλο η δυναμική φόρτιση εφαρμόζεται κατά τον άξονα y , ο οποίος συνεπώς αντιστοιχεί στην εγκάρσια συνιστώσα ε_y , ενώ ο οριζόντιος άξονας z συσχετίζεται με την διαμήκη παραμόρφωση ε_z . Τα πεδία EPEL_Y και EPEL_Z που προέκυψαν από το ANSYS αποδίδουν

ποιοτικά την κατανομή των παραμορφώσεων στη μικροδομή. Οι εικόνες 35 και 36 παραθέτουν τα αποτελέσματα.



Εικόνα 35: Εγκάρσια ελαστική παραμόρφωση (elastic strain Y) της ευφούς κατασκευής.



Εικόνα 36: Διαμήκη ελαστική παραμόρφωση (elastic strain Z) της ευφούς κατασκευής.

Στις δύο ανωτέρω απεικονίσεις υιοθετήθηκε διχρωματική κλίμακα, όπου οι θετικές τιμές παραμόρφωσης αποδίδονται με κόκκινη απόχρωση και οι αρνητικές με σκούρο μπλε, ώστε η ποιοτική σύγκριση των μοντέλων να καθίσταται σαφής και εύληπτη. Στις εικόνες 35 και 36 παρουσιάζεται σύμπτωση θετικών τιμών, αναλυτικότερα στην επιφάνεια της μικροδομής, κυρίως πλησίον των εγκοπών, παρατηρούνται θετικές τιμές (κόκκινη απόχρωση) για αμφότερες των συνιστώσεων y και z . Η εφαρμογή του τύπου (5) (βλ. Κεφ. 2.3.3) στις συγκεκριμένες περιοχές οδηγεί σε αρνητικό λόγο Poisson, επιβεβαιώνοντας την ενεργή αυξητική συμπεριφορά της κατασκευής.

Η αυξητική απόκριση έλαβε χώρα σε στενή ζώνη περίξ των εγκοπών με αποτέλεσμα το περιορισμό της λειτουργία της. Ως εκ τούτου, η διερεύνηση για καταλληλότερη σχεδίαση της μικρομής, ίσως με πύκνωση των εγκοπών, συνιστά μεγάλη πρόκληση για μελλοντικές έρευνες στον τομέα των ευφύων κατασκευών.

4.6 ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

4.6.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΜΕΝΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ

Για την προσομοίωση της ηλεκτρικής απόκρισης του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος τύπου PZT-5A, εφαρμόστηκε μοντελοποίηση κυκλώματος μέσω εντολών APDL, με στόχο τη σύνδεση του επιθέματος με ένα παθητικό ηλεκτρικό κύκλωμα «αντιστάτης – πηνίου» (RL). Το κύκλωμα αυτό σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μιμείται τη σύνδεση ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα με εξωτερικό φορτίο απόσβεσης.

Η κατασκευή του κυκλώματος υλοποιήθηκε με τη χρήση των στοιχείων CIRCU94 του ANSYS. Συγκεκριμένα, το πηνίο και η αντίσταση ορίστηκαν ως δύο ξεχωριστοί τύποι στοιχείων, και στη συνέχεια συνδέθηκαν μεταξύ τους μέσω ενός ενδιάμεσου κόμβου. Οι κόμβοι, στους οποίους συνδέθηκαν τα άκρα του κυκλώματος (κόμβοι 172 και 2600) επιλέχθηκαν ώστε να αντιστοιχούν στις επιφάνειες του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, δηλαδή στο άνω και κάτω ηλεκτρόδιο του υλικού. Με αυτόν τον τρόπο, η ηλεκτρική συμπεριφορά του RL κυκλώματος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ηλεκτρομηχανική απόκριση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, επιτρέποντας την ταυτόχρονη ανάλυση μηχανικής και ηλεκτρικής συμπεριφοράς.

Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, το σύστημα αντιδρά τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρικά, συνεπώς η μηχανική παραμόρφωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού από κάμψη της δοκού προκαλεί ανάπτυξη ηλεκτρικού δυναμικού στα άκρα του επιθέματος. Το δυναμικό αυτό οδηγεί ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα «αντίστασης-πηνίου», το οποίο απορροφά ενέργεια. Έτσι, το κύκλωμα λειτουργεί ως μέσο απόσβεσης των ταλαντώσεων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης

περιλαμβάνουν τις τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού στους σχετικούς κόμβους, επιτρέποντας την ποσοτική αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος.

Ο κώδικας και η λειτουργία του φαίνονται παρακάτω στις εικόνες 37 και 38:

```
8
9  /PREP7
10
11
12
13  ET, 7003, CIRC94, 0      ! RESISTOR
14  ET, 7004, CIRC94, 1      ! INDUCTOR
15
16
17
18  R, 1, 8076.10           ! R1
19
20  R, 2, 19.37             ! L1
21
22  a, 8001, 0.01, 0.006, 0.16 ! Connection between resistor & inductor
23
24  TYPE, 7003
25  REAL, 1
26  E, 172, 8001            ! R1
27
28  TYPE, 7004
29  REAL, 2
30  E, 8001, 260            ! L1
31
32  d, 260, volt, 0          ! Grounding
33  !d, 172, volt, 0         ! GrounAding
34  FINISH
35
```

Εικόνα 37: 1ο μέρος του κώδικα apdl κυκλώματος.

```
35
36  /solu
37  solve
38  finish
39
40  /post1
41  set, last                ! Load results
42  prnsol, volt             ! Print voltage at nodes
43
```

Εικόνα 38: 2ο μέρος του κώδικα apdl κυκλώματος.

4.6.2 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΩΔΙΚΑ

Ο κώδικας σε γλώσσα APDL δομείται σε τρία βασικά τμήματα, καθένα από τα οποία επιτελεί συγκεκριμένη λειτουργία. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκε και οργανώθηκε η κάθε ενότητα του.

ΤΜΗΜΑ 1

Προετοιμασία κυκλώματος

/PREP7

Ξεκινάει το περιβάλλον προετοιμασίας μοντέλου (PREP7), όπου ορίζονται τα στοιχεία, τα υλικά και οι κόμβοι.

Ορισμός τύπων στοιχείων (Element Types)

ET, 7003, CIRCU94, 0 ! RESISTOR

ET, 7004, CIRCU94, 1 ! INDUCTOR

Ρεαλιστικά σύνολα (Real Constants – R)

R, 1, 8076.10 ! R1

R, 2, 19.37 ! L1

R, 1: Ορίζεται αντιστάτης με τιμή 8076.10 Ohm.

R, 2: Ορίζεται πηνίο με επαγωγή 19.37 H.

Δημιουργία κόμβων και σύνδεση

N, 8001, 0.01, 0.006, 0.16 ! Κόμβος 8001 (θέση αυθαίρετη χωρίς μηχανική σημασία).

Δημιουργείται ο κόμβος 8001. Η θέση του είναι αριθμητική και έχει νόημα μόνο για τα στοιχεία κυκλώματος.

Σύνδεση Αντιστάτη

TYPE, 7003 ! Τύπος: Αντίσταση.

REAL, 1 ! Χρήση του συνόλου αντίστασης.

E, 172, 8001 ! Σύνδεση αντιστάτη μεταξύ κόμβων 172 και 8001.

Δημιουργείται αντιστάτης μεταξύ των κόμβων 172 και 8001.

Σύνδεση Πηνίου

TYPE, 7004 ! Τύπος: Πηνίο.

REAL, 2 ! Χρήση του συνόλου επαγωγής.

E, 8001, 260 ! Σύνδεση πηνίου μεταξύ κόμβων 8001 και 260.

Δημιουργείται πηνίο μεταξύ κόμβων 8001 και 260.

Συνθήκες γείωσης

D, 260, VOLT, 0 ! Γείωση κόμβου 260.

! D, 172, VOLT, 0 ! (προαιρετικά γείωση κόμβου 172 για όταν δημιουργείται βραχυκυκλωμένο κύκλωμα).

Ορίζεται το δυναμικό του κόμβου 260 ίσο με 0V (γείωση).

ΤΜΗΜΑ 2

Ανάλυση

/SOLU

SOLVE

FINISH

SOLVE: Εκτελεί την αριθμητική επίλυση.

FINISH: Τερματίζει το block της ανάλυσης.

ΤΜΗΜΑ 3

Μεταεπεξεργασία

/POST1

SET, LAST ! Φόρτωση τελευταίων αποτελεσμάτων.

PRNSOL, VOLT ! Εκτύπωση δυναμικών (voltages) στους κόμβους.

Είσοδος στο περιβάλλον επεξεργασίας αποτελεσμάτων.

Εμφανίζονται τα ηλεκτρικά δυναμικά σε όλους τους κόμβους.

4.7 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (MODAL ANALYSIS)

Το παραδιακλαδωμένο κύκλωμα «αντίστασης – πηνίου» (RL) έχει ως στόχο την επίτευξη βελτιωμένης απόσβεσης μέσω της αξιοποίησης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και της ηλεκτρικής τάσης που αναπτύσσεται κατά τη διέγερση του συστήματος σε συχνότητες κοντά στις ιδιοσυχνότητες συντονισμού. Για τη διερεύνηση αυτών των συχνοτήτων πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική (modal) ανάλυση στο ANSYS, η οποία παρέχει αποτελέσματα για τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι πέντε πρώτες ιδιοσυχνότητες, συνοδευόμενες από τα αντίστοιχα είδη κάμψης (στροφικές ή καμπτικές), τα οποία καθορίζουν τη μορφή της ταλάντωσης σε κάθε ιδιομορφή.

Για τη λειτουργία του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος απαιτείται ο καθορισμός κατάλληλων τιμών για την αντίσταση (R) και την επαγωγή (L). Οι τιμές αυτές υπολογίζονται βάσει ενδεικτικών σχέσεων ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή, ο οποίος αναπαριστά το δυναμικό σύστημα δοκού–επιθέματος κατά προσέγγιση.

Οι υπολογισμοί βασίζονται σε θεωρητικά μοντέλα μονοβάθμιου μηχανικού συστήματος, τα οποία παρέχουν κατά προσέγγιση σχέσεις για τον καθορισμό των τιμών της αντίστασης R και της επαγωγής L [15]. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

$$L = \frac{1}{C_p^s \omega_o^2} \quad R = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{K_c}{C_p^s \cdot \omega_o} \quad (21) \quad (22)$$

Όπου:

ω_o : είναι η ιδιοσυχνότητα ανοιχτού (open) κυκλώματος

C_p : ηλεκτρική χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος*

k_c : συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης

*Η χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού δίνεται $C_p = 11.5 \text{ nF}$.

Για τη χρήση των σχετικών εξισώσεων, απαιτούνται οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής υπό συνθήκες ανοιχτού (open) και βραχυκυκλωμένου (short) ηλεκτρικού κυκλώματος.

Στη περίπτωση του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος, βασική συνθήκη είναι η μηδενική διαφορά δυναμικού στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, γεγονός που στη πράξη μοντελοποιείται επιβάλλοντας μηδενική τάση (0 V) στο άνω και κάτω ηλεκτρόδιο του επιθέματος. Εκτελώντας δύο διαδοχικές ιδιομορφικές (modal) αναλύσεις, μία για το ανοιχτό (open) κύκλωμα και μία για το βραχυκυκλωμένο (short) κύκλωμα, προκύπτουν οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες του συστήματος. Από τη σχέση που δίνεται παρακάτω (σχέση 23), μεταξύ των δύο αυτών συχνοτήτων, προκύπτει ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης k_c , ο οποίος εκφράζει την ικανότητα του πιεζοηλεκτρικού υλικού να μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Η τιμή του k_c είναι καθοριστική για την αποδοτικότητα του συστήματος, καθώς επηρεάζει άμεσα τη ποσότητα της ηλεκτρικής τάσης που αναπτύσσεται υπό μηχανική διέγερση. Η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή έχει την εξής μορφή:

$$K_c = \sqrt{\frac{\omega_0^2 - \omega_s^2}{\omega_s^2}} \quad (23)$$

Όπου:

ω_0 : είναι η ιδιοσυχνότητα του ανοιχτού (open) κυκλώματος

ω_s : είναι η ιδιοσυχνότητα βραχυκυκλωμένου (short) κυκλώματος

Στη συνέχεια, στον πίνακα 12 παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμένων ιδιοσυχνοτήτων για το ανοιχτό και το βραχυκυκλωμένο κύκλωμα, καθώς και η αντίστοιχη τιμή του συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης (k_c).

Open [Hz]	Short [Hz]	Kc
47.867	47.115	0.1794
337.21	332.94	0.1607
438.61	435.93	
897.73	897.55	
968.2	960.71	0.1251

Πίνακας 12 : Οι πρώτες 5 ιδιοσυχνότητες με ανοιχτό και βραχυκυκλωμένο κύκλωμα και ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης των μη στροφικών ιδιοσυχνοτήτων.

Από τις πέντε πρώτες ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν από τη modal ανάλυση, διαπιστώθηκε ότι η τρίτη και η τέταρτη αντιστοιχούν σε στροφικές μορφές ταλάντωσης, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες που είναι καμπτικές. Για τον υπολογισμό των βέλτιστων παραμέτρων του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος «αντίστασης – πηνίου» (RL), επιλέγεται η δεύτερη ιδιοσυχνότητα (337.21 Hz) ως συχνότητα συντονισμού, καθώς η πρώτη είναι πολύ χαμηλή και οδηγεί σε εξαιρετικά μεγάλες και μη πρακτικές τιμές για την αντίσταση.

Στην παρούσα ανάλυση, ο συντελεστής σύζευξης έχει υπολογιστεί ως $k_c = 0.1607$, και οι υπολογισμοί βασίζονται στη δεύτερη ιδιοσυχνότητα (337.21 Hz) του συστήματος. Βάσει των παραπάνω εξισώσεων και των αντίστοιχων παραμέτρων του συστήματος, προκύπτουν οι ακόλουθες βέλτιστες τιμές για τα στοιχεία του κυκλώματος:

R = 8076.10 Ω	L = 19.37 H
----------------------	--------------------

4.8 ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (HARMONIC ANALYSIS)

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται αρμονική ανάλυση (Harmonic analysis) για τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με τη συχνότητα διέγερσης. Η ανάλυση πραγματοποιείται αρχικά για το ανοιχτό (open) κύκλωμα, ώστε να καταγραφούν οι τιμές της ταχύτητας ταλάντωσης (Velocity) στη συχνότητα συντονισμού (337.21Hz). Ακολούθως, η ίδια ανάλυση επαναλαμβάνεται με τη προσθήκη του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος «αντίστασης – πηνίου» (RL), χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες τιμές για την αντίσταση (8076.10 Ω) και την επαγωγή (19.37 H).

4.8.1 ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Κατά την αρμονική ανάλυση, το εύρος των διερευνώμενων συχνοτήτων ορίστηκε από 287 Hz έως 387 Hz, ώστε να περιλαμβάνει τη δεύτερη ιδιοσυχνότητα (337.21 Hz) του συστήματος, η οποία αποτελεί και την ενδιαφέρουσα συχνότητα συντονισμού. Για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας στον προσδιορισμό της συχνότητας συντονισμού και την αποτύπωση της δυναμικής απόκρισης με λεπτομέρεια, το παραπάνω διάστημα διασπάστηκε σε πέντε υποδιαστήματα (πίνακας 13), καθένα εκ των οποίων αναλύθηκε με διαφορετικό αριθμό βημάτων (step size), ως εξής:

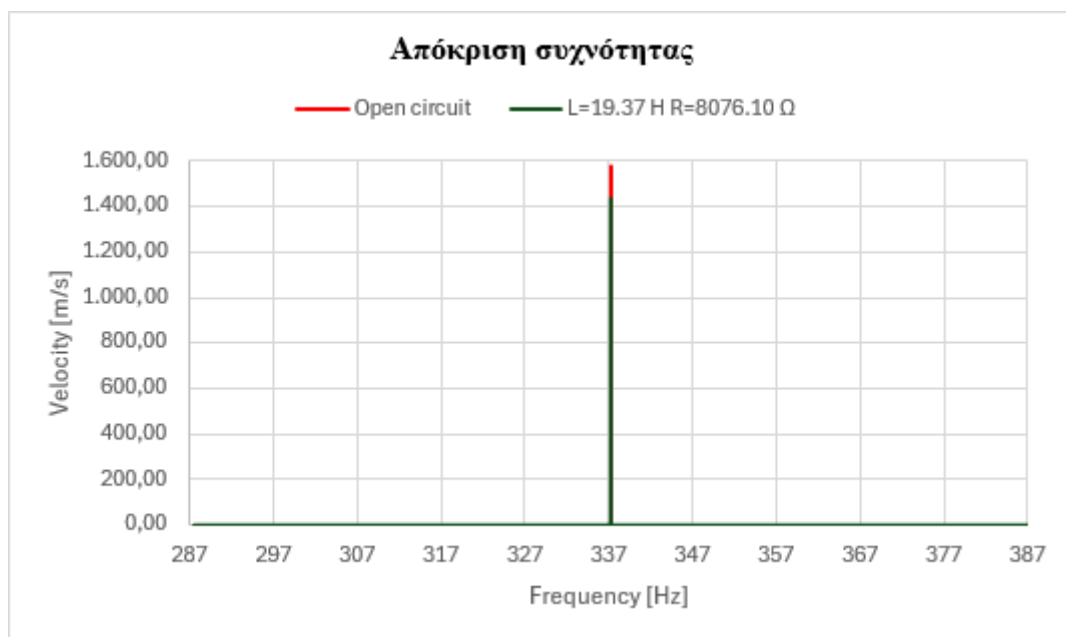
287 – 330 Hz	→	100 βήματα
330 – 337.18 Hz	→	200 βήματα
337.18 – 337.22 Hz	→	400 βήματα
337.22 – 340 Hz	→	200 βήματα
340 – 387 Hz	→	100 βήματα

Πίνακας 13: Υποδιαστήματα συχνοτήτων με τον αντίστοιχο αριθμό βημάτων της ανάλυσης.

Η παραπάνω προσέγγιση επιτρέπει τη πυκνότερη δειγματοληψία στις περιοχές γύρω από την ιδιοσυχνότητα, όπου αναμένεται η αιχμή της ταλάντωσης, και πιο αραιή σε περιοχές όπου η

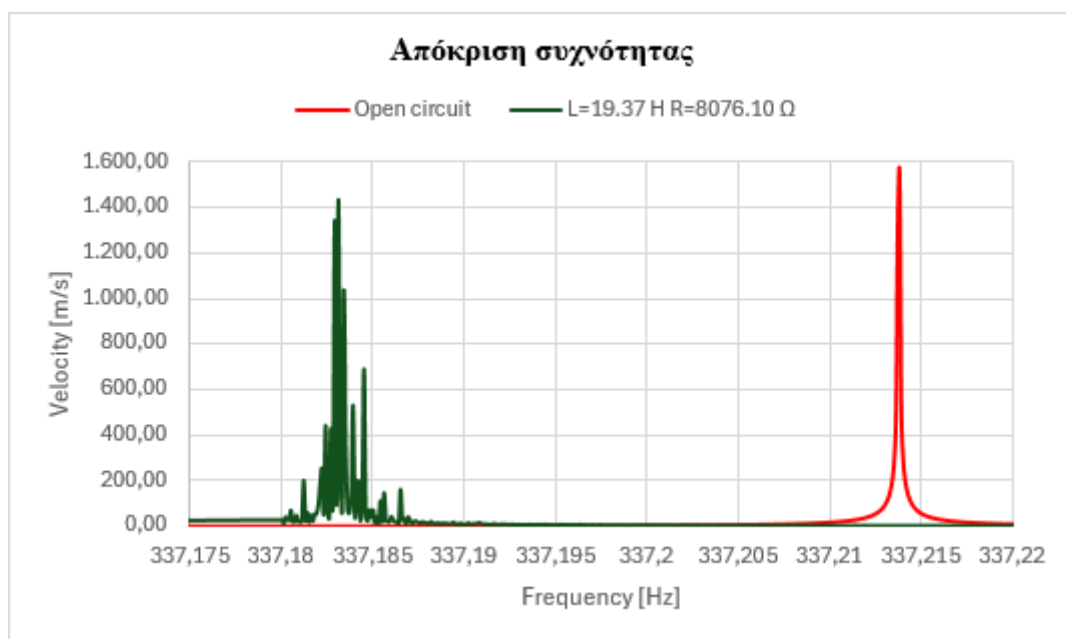
απόκριση μεταβάλλεται αργά. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρείται ότι η ταχύτητα ταλάντωσης παραμένει σε χαμηλά επίπεδα στο μεγαλύτερο μέρος του φάσματος, παρουσιάζοντας όμως μια αιχμή (peak) σε περιοχή πολύ κοντά στη δεύτερη ιδιοσυχνότητα (337.21Hz), όπως αναμενόταν από τη ιδιομορφική (modal) ανάλυση.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων, στο σχεδιάγραμμα 1, επιτρέπει την αξιολόγηση της αποσβεστικής ικανότητας του κυκλώματος και την επίδρασή του στη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής.



Σχεδιάγραμμα 1 : Ανοιχτό (Open) κύκλωμα και κύκλωμα με θεωρητικές τιμές απο μονοβάθμιο για αντίσταση και επαγωγή.
287-337 Hz

Για τη καλύτερη απεικόνιση της αιχμής και την ενίσχυση της ευκρίνειας στη γραφική απεικόνιση, εστιάζεται η ανάλυση σε τοπικά μικρότερο εύρος τιμών του άξονα συχνοτήτων, γύρω από το σημείο συντονισμού.



Σχεδιάγραμμα 2: Ανοιχτό (Open) κύκλωμα και κύκλωμα με θεωρητικές τιμές απο μονοβάθμιο για αντίσταση και επαγωγή.
337,15-337,22 Hz

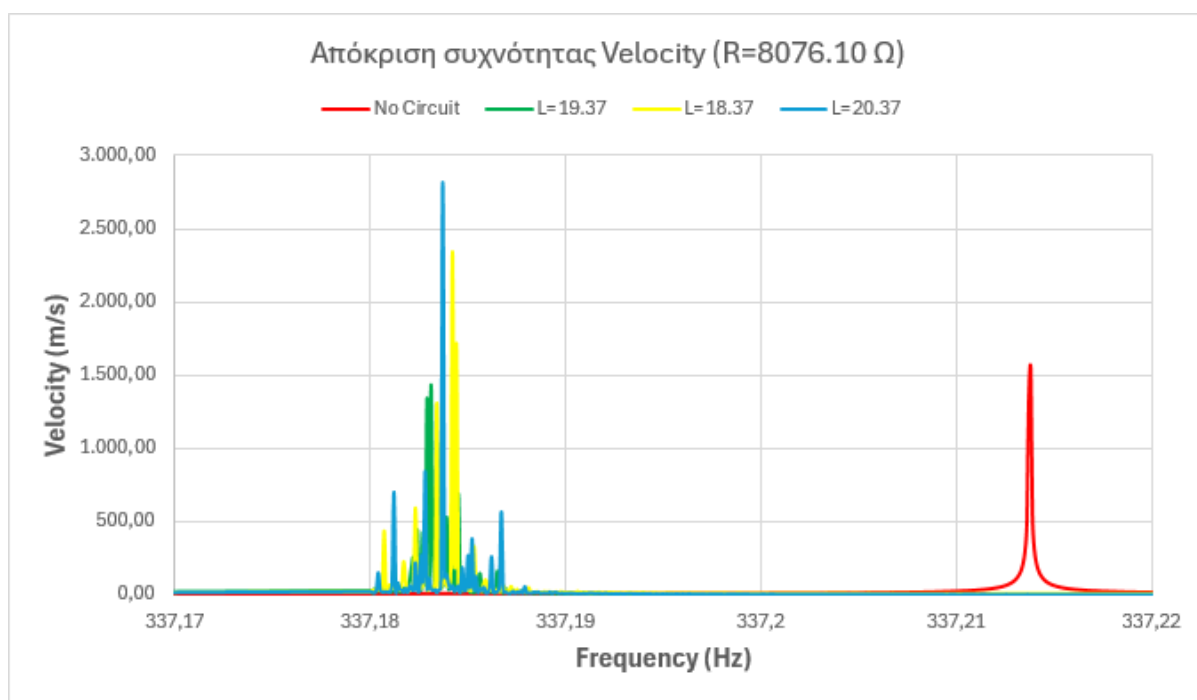
Στο διάστημα συχνοτήτων 337,15 Hz - 337,22 Hz γίνονται αντιληπτές οι δύο αιχμές των ταχυτήτων, όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα 2.

Τα αποτελέσματα της αρμονικής ανάλυσης έδειξαν ότι η αποσβεστική ικανότητα του κυκλώματος «αντίστασης – πηνίου» (RL) δεν είναι ικανοποιητική, καθώς η μείωση των τιμών της ταχύτητας ταλάντωσης είναι περιορισμένη. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι αρχικά υπολογισμένες τιμές των παραμέτρων του κυκλώματος ,και συγκεκριμένα της αντίστασης και της επαγωγής, ενδέχεται να μην αντιστοιχούν σε συνθήκες ιδανικής απόσβεσης, και ως εκ τούτου απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση καταλληλότερων τιμών.

Εκτός αυτού, γίνεται αντιληπτή μια μικρή μετατόπιση της ιδιοσυχνότητας συντονισμού του συστήματος, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στην επίδραση του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος «αντίστασης – πηνίου» (RL) και την αλληλεπίδρασή του με το ηλεκτρομηχανικό σύστημα της δοκού-επιθέματος. Η μεταβολή αυτή επιβεβαιώνει την παρουσία συζεύξεων και την ανάγκη ακριβούς συντονισμού των ηλεκτρικών και μηχανικών παραμέτρων.

4.8.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΤΙΜΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ (L)

Ως πρώτο βήμα, διερευνάται η επίδραση της τιμής της επαγωγής (L) στη συμπεριφορά του συστήματος. Η τιμή της αντίστασης διατηρείται σταθερή, ενώ η επαγωγή μεταβάλλεται συμμετρικά ως προς την αρχικά υπολογισμένη θεωρητική τιμή (19.37 H), με βήμα ± 1 H. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι τιμές 18.37 H, 19.37 H και 20.37 H, ώστε να εντοπιστεί η καταλληλότερη τιμή που επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή απόσβεση.



Σχεδιάγραμμα 3: Η ταχύτητα σε συνάρτηση της συχνότητας με σταθερή τιμή αντίστασης ($R=8076.10 \Omega$) και διαφορετικές τιμές επαγωγής (L).

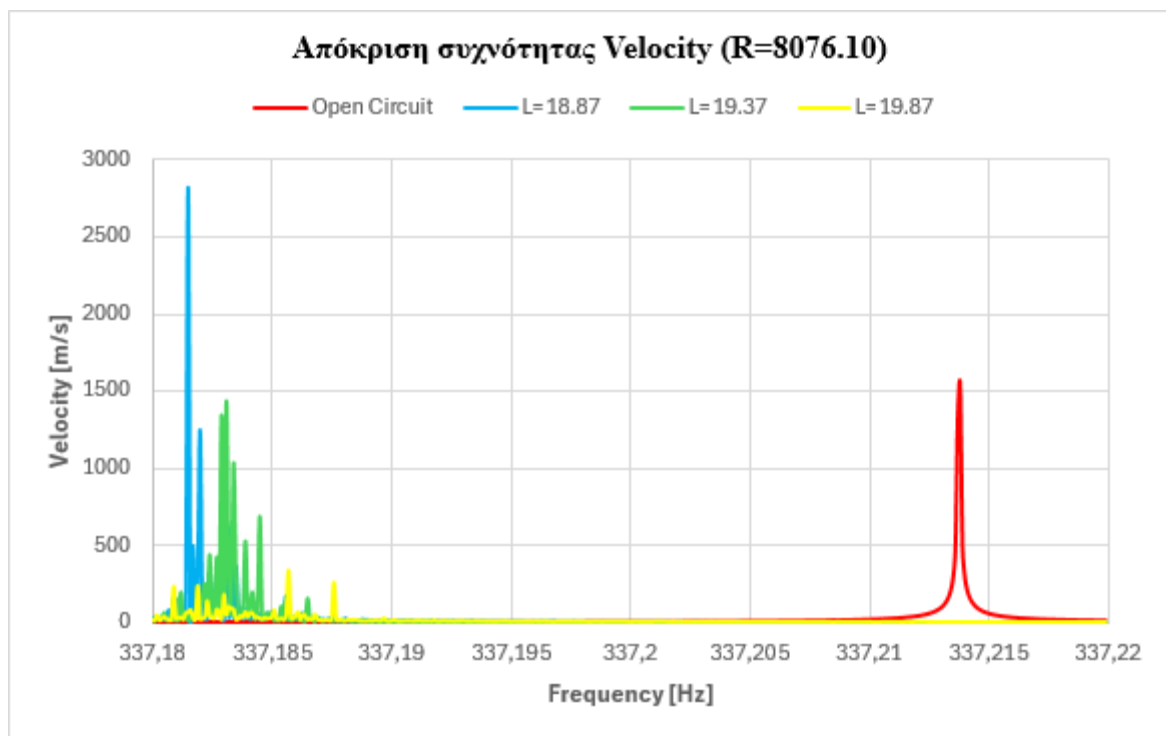
Στο Σχεδιάγραμμα 3 απεικονίζεται η δυναμική απόκριση του συστήματος, εκφρασμένη ως ταχύτητα ταλάντωσης (velocity), συναρτήσει με τη συχνότητα διέγερσης, για διαφορετικές τιμές επαγωγής (L), ενώ η τιμή της αντίστασης (R) παραμένει σταθερή στα 8076.10 Ω . Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι τιμές $L=18.37$ H, $L=19.37$ H (θεωρητική τιμή) και $L=20.37$ H, ενώ για λόγους σύγκρισης περιλαμβάνεται και η απόκριση του συστήματος με ανοιχτό (open) κύκλωμα.

Παρατηρείται ότι η χρήση του κυκλώματος παραδιακλάδωσης αυξάνει σημαντικά το πλάτος της ταχύτητας ταλάντωσης, δίχως επιτυχής απόσβεση στην περιοχή της ιδιοσυχνότητας 337.18

Hz. Απο το σχεδιάγραμμα 3 , γίνεται φανερό ότι το πλάτος της αιχμής και των δύο (κίτρινη και γαλάζια καμπύλη) αυξάνεται αισθητά σε σχέση με τη τιμή του ανοιχτού (open) κυκλώματος (κόκκινη καμπύλη). Καταληκτικά, ουδεμία απο τις εφαρμοσμένες τιμές επαγωγής δεν κρίνονται αποδεκτές για την χρήση τους στο κύκλωμα «αντίστασης – πηνίου» (RL).

Αξιοσημείωτη παρατήρηση αποτελεί η μικρή μετατόπιση της αιχμής για κάθε τιμή του πηνίου, φαινόμενο που συνδέεται με τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος. Η προσεκτική ρύθμιση της τιμής της επαγωγής είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της απόσβεσης, καθώς ακόμα και μικρές μεταβολές επηρεάζουν έντονα τη αιχμή της απόκρισης.

Λόγω του ότι δεν βρίσκεται κάποια ικανοποιητική τιμή , οι τιμές του πηνίου διερευνώνται περισσότερο, προσθέτοντας τις τιμές 18.87 και 19.87 (H).



Σχεδιάγραμμα 4 : Η ταχύτητα της συχνότητας και για τις τιμές επαγωγής $L=18.87H$ και $L=19.87H$.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι η μείωση της τιμής της επαγωγής κατά 0.5H σε σχέση με τη θεωρητική τιμή επιδρά και αυτή αρνητικά στη δυναμική απόκριση του συστήματος, καθώς οδηγεί σε σημαντική αύξηση του πλάτους ταλάντωσης. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει περιορισμένη αποσβεστική ικανότητα. Στον αντίποδα, η αύξηση της επαγωγής κατά το ίδιο ποσό συμβάλλει θετικά, προσφέροντας βελτιωμένη απόσβεση και χαμηλότερες τιμές ταχύτητας στην περιοχή της συχνότητας συντονισμού.

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η μεταβολή της επαγωγής γύρω από την αρχική θεωρητική τιμή (19.37 H) επηρεάζει καθοριστικά την αποσβεστική ικανότητα του κυκλώματος. Ειδικά για τιμή επαγωγής $L = 19.87$ H, το κύκλωμα φαίνεται να λειτουργεί περισσότερο αποδοτικά, απορροφώντας μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας και μειώνοντας το πλάτος της ταλάντωσης κοντά στη δεύτερη ιδιοσυχνότητα.

Επιπλέον, η μετατόπιση της συχνότητας αιχμής παραμένει ελάχιστη και παρόμοια και για τις δύο τιμές επαγωγής L , υποδεικνύοντας ότι η αλλαγή της επαγωγής δεν μεταβάλλει σημαντικά τη θέση της συχνότητας συντονισμού, αλλά επηρεάζει πρωτίστως το πλάτος της απόκρισης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες τιμές ταχύτητας ταλάντωσης για κάθε τιμή επαγωγής, καθώς και για τη περίπτωση ανοιχτού (open) κυκλώματος, προκειμένου να διευκολυνθεί η ποσοτική αξιολόγηση της επίδρασης της παραμέτρου επαγωγής L στην απόδοση του κυκλώματος.

	Open Circuit	L=19.37 [H]	L=20.37 [H]	L=18.37[H]	L=19.87 [H]	L=18.87 [H]
Frequency [Hz]	337,2138	337,1831	337,1842	337,1837	337,1857	337,1815
Max [m/s]	1553,9	1437,4	2342,1	2812,1	336,54	2816

Πίνακας 14: Μέγιστες τιμές ταχύτητας για κάθε διαφορετική τιμή του πηνίου για σταθερή τιμή αντίστασης

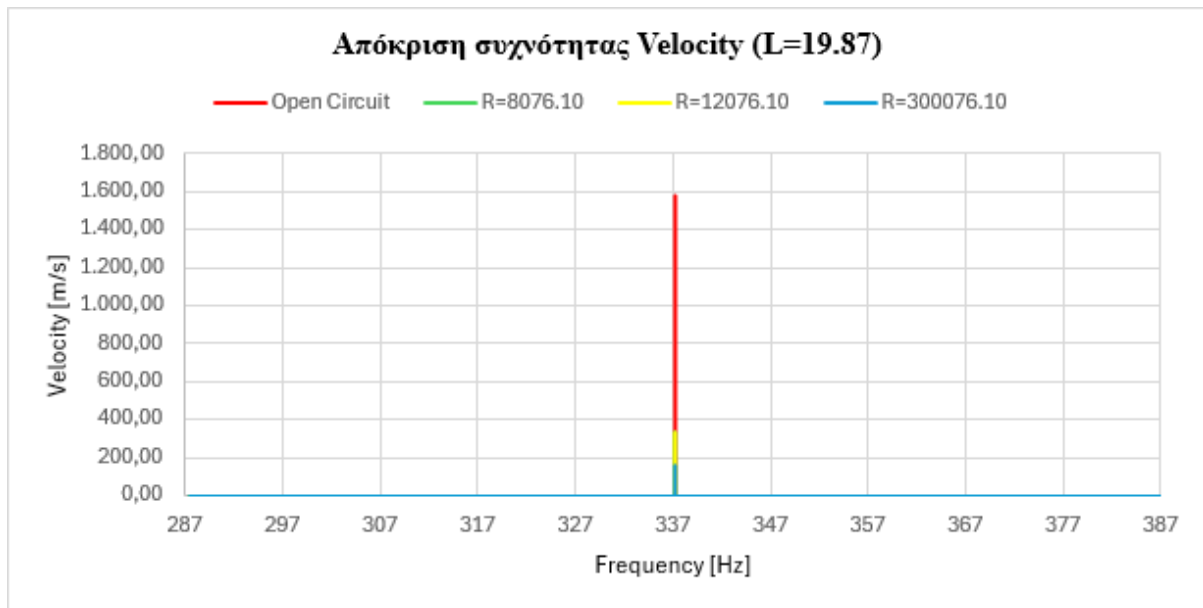
$$R=8076.10\Omega.$$

Η χρήση του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος με επαγωγή $L=19.87\text{ H}$ επιφέρει σημαντική βελτίωση στην αποσβεστική ικανότητα του συστήματος, καθώς οδηγεί σε μείωση της μέγιστης ταχύτητας ταλάντωσης κατά 78.34% σε σχέση με τη περίπτωση του ανοιχτού κυκλώματος. Η απόκριση του συστήματος κοντά στη δεύτερη ιδιοσυχνότητα καθίσταται σαφώς πιο ισορροπημένη και ελεγχόμενη. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι μικρές μεταβολές στη τιμή της επαγωγής προκαλούν ιδιαίτερα έντονες επιδράσεις στη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής, γεγονός που καταδεικνύει την ευαισθησία του συστήματος και την ανάγκη για ακριβή βελτιστοποίηση των παραμέτρων του κυκλώματος.

4.8.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΤΙΜΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (R)

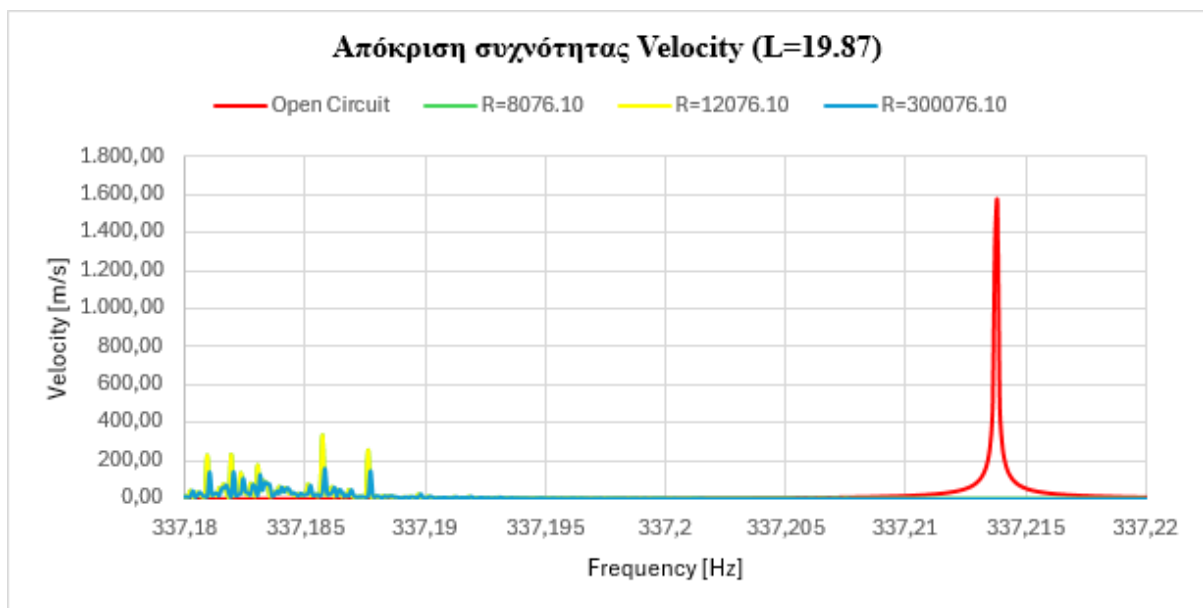
Σε επόμενο στάδιο, εξετάζεται η επίδραση της αντίστασης R , κρατώντας σταθερή την τιμή επαγωγής στα 19.87 H , η οποία είχε προηγουμένως αναδειχθεί ως η πλέον αποδοτική. Στο πλαίσιο αυτό, η τιμή της αντίστασης αυξήθηκε σε σχέση με τη θεωρητικά υπολογισμένη, και συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν οι εξής τιμές: $10,076.10\ \Omega$, $12,076.10\ \Omega$ και $300,076.10\ \Omega$. Η ανάλυση στοχεύει στη κατανόηση της επίδρασης της ηλεκτρικής απόσβεσης στη συμπεριφορά του συστήματος και στη διερεύνηση πιθανών βελτιώσεων.

Στα Σχεδιαγράμματα 5, 6 και 7 παρουσιάζεται η απόκριση ταχύτητας του συστήματος για διαφορετικές τιμές αντίστασης, με σταθερή επαγωγή $L=19.87\text{ H}$. Οι τιμές που εξετάζονται είναι οι $R=8076.10\ \Omega$, $R=12076.10\ \Omega$ και $R=300076.10\ \Omega$, ενώ για λόγους σύγκρισης συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση ανοιχτού (open) κυκλώματος.



Σχεδιάγραμμα 5 : Η απόκριση της ταχύτητας σε συνάρτηση με την συχνότητα για διαφορετικές τιμές της αντίστασης έχοντας σταθερή την τιμή επαγωγής $L=19.87\text{ H}$.

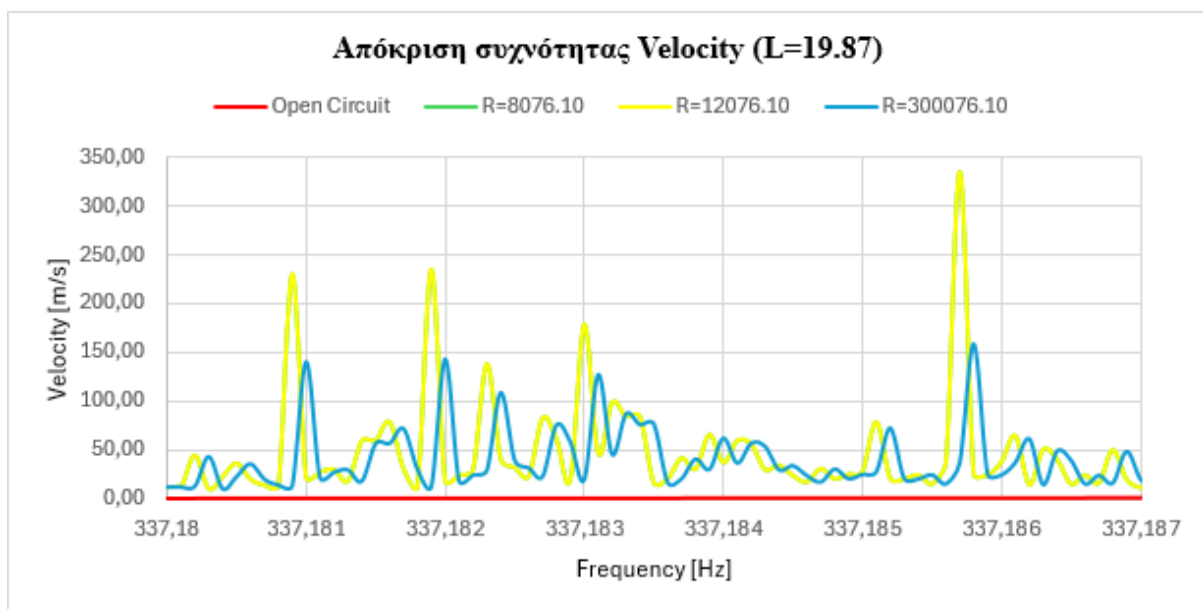
Από το Σχεδιάγραμμα 5, το οποίο καλύπτει το πλήρες εύρος συχνοτήτων (287–387 Hz), είναι εμφανές ότι το κύριο μέγιστο ταλάντωσης εντοπίζεται στην περιοχή της δεύτερης ιδιοσυχνότητας (~337.21 Hz). Η καμπύλη του ανοιχτού (Open) κυκλώματος (κόκκινο χρώμα) παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό πλάτος, το οποίο μειώνεται σημαντικά σε όλες τις περιπτώσεις με συνδεδεμένο κύκλωμα «αντίστασης – πηνίου» (RL), υποδεικνύοντας αποτελεσματική απόσβεση.



Σχεδιάγραμμα 6: Εστιασμένο το σχεδιάγραμμα 5 στις συχνότητες 337.18-337.22 Hz

Το Σχεδιάγραμμα 6, το οποίο εστιάζει στην περιοχή 337.18–337.22 Hz, αναδεικνύει με μεγαλύτερη ευκρίνεια την επίδραση των διαφορετικών τιμών αντίστασης. Παρατηρείται ότι οι χαμηλότερες τιμές αντίστασης (π.χ. $R = 8076.10 \, \Omega$) εμφανίζουν πιο ήπια αποσβεστική συμπεριφορά, με σχετικά αυξημένο πλάτος απόκρισης, ενώ η αύξηση της αντίστασης συνοδεύεται από μικρότερη ένταση ταλάντωσης. Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι ακόμη και για πολύ υψηλή τιμή αντίστασης ($300076.10 \, \Omega$), η απόσβεση εξακολουθεί να είναι σημαντική, χωρίς να προκαλείται αισθητή μετατόπιση στη συχνότητα συντονισμού.

Φαίνεται εν τέλει, στο σχεδιάγραμμα 6, ότι η αύξηση της τιμής της αντίστασης δεν μεταβάλλει σε μεγάλη κλίμακα ούτε εμφανίζει έντονη διαφοροποίηση στην απόκριση της συχνότητας. Αντιθέτως μεγάλη αύξηση της επιφέρει μόνο μείωση της ταχύτητας και βελτίωση του αποσβεστικού μοντέλου. Παρακάτω γίνεται μια ακόμη μεγαλύτερη εστίαση σε μεγαλύτερη ακρίβεια των συχνοτήτων για να αντιληφθούμε και ποσοτικά τη μεταβολή της μέγιστης ταχύτητας.



Σχεδιάγραμμα 7 : Εστιασμένο το σχεδιάγραμμα 5 σε διάστημα συχνοτήτων 337.18-337.187 Hz.

Στο Σχεδιάγραμμα 7, το οποίο εστιάζει ακόμη περισσότερο (337.180–337.187 Hz), καταγράφονται μικρές διακυμάνσεις στο πλάτος της ταχύτητας για κάθε τιμή αντίστασης. Η αντίσταση $R=12076.10 \ \Omega$ συγκριτικά με την θεωρητική τιμή ($R=8076.10 \ \Omega$), φαίνεται να αποδίδει ελάχιστα μεγαλύτερη αποσβεστική επίδραση, σχεδόν ταυτόσημες αιχμές (peaks) στο εξεταζόμενο εύρος, υποδεικνύοντας ότι η αύξηση της αντίστασης πέραν της θεωρητικής ($8076.10 \ \Omega$) μπορεί να βελτιώσει την απόσβεση. Από την άλλη, για πολύ μεγάλες τιμές αντίστασης ($300076.10 \ \Omega$), παρατηρείται μια τάση σταθεροποίησης της συμπεριφοράς, με εμφανή μείωση του πλάτους αλλά και εξασθένιση της απόκρισης γενικότερα.

Από την ανάλυση καθίσταται σαφές ότι η αύξηση της αντίστασης κατά $4000 \ \Omega$ (από $8076.10 \ \Omega$ σε $12076.10 \ \Omega$) επιφέρει πολύ μικρή διαφοροποίηση στη δυναμική απόκριση, με οριακή μείωση στο πλάτος της ταχύτητας ταλάντωσης. Συμπληρωματικά, μια πολύ μεγαλύτερη αύξηση της αντίστασης, όπως αυτή που αντιστοιχεί στη τιμή $300076.10 \ \Omega$, οδηγεί σε αισθητή βελτίωση της αποσβεστικής ικανότητας του συστήματος.

Για καλύτερη κατανόηση βρίσκουμε το μέγεθος της αύξησης της θεωρητικής τιμής εκφρασμένο σε ποσοστό επί τις εκατό για την κατανόηση του μεγέθους της.

$$\frac{(300076.10 - 8076.10)}{8076.10} \cdot 100 = \frac{292}{8076.10} \cdot 100 = 3616\%$$

Συνοψίζοντας, προκύπτει ότι μια αύξηση της αντίστασης κατά 3616% σε σχέση με τη θεωρητική τιμή ($R=8076.10 \ \Omega$), συνεπάγεται μείωση της μέγιστης ταχύτητας ταλάντωσης κατά 52.73%, γεγονός που ενισχύει σημαντικά την απόδοση του κυκλώματος απόσβεσης. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι τέτοιου μεγέθους τιμές αντίστασης ενδέχεται να μην είναι εύκολα υλοποιήσιμες στη πράξη, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον τελικό σχεδιασμό.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας για κάθε τιμή αντίστασης και για την περιοχή γύρω από τη δεύτερη ιδιοσυχνότητα, προκειμένου να διευκολυνθεί η ποσοτική αξιολόγηση της αποσβεστικής συμπεριφοράς του συστήματος.

	Open Circuit	R=8.076,10	R=12.076,10	R=300.076,10
Frequency [Hz]	337,2138	337,1857	337,1857	337,1858
Max [m/s]	1553,9	336,54	335,65	159,09

Πίνακας 15 : Μέγιστες τιμές ταχυτήτων για διάφορες τιμές αντίστασης έχοντας τιμή επαγωγής σταθερή $L=19.87H$.

4.8.3 ΕΚΦΡΑΣΗ ΣΕ DESIBELL

Ένας άλλος τρόπος για απεικόνιση των αποτελεσμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω σχεδιαγραμμάτων dB - συχνότητας. Συγκεκριμένα μέσω βοηθητικού τύπου μπορούμε να μετατρέψουμε τις τιμές της ταχύτητας (velocity) σε μονάδες dB και να αναλύσουμε τα αποτελέσματα δια μέσου των συγκεκριμένων σχεδιαγραμμάτων.

Ο ενδεικτικός τύπος δίνεται από την βιβλιογραφία [56]

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε λογαριθμική κλίμακα decibel (dB), χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) \quad (24)$$

Όπου:

V: είναι η μετρούμενη ταχύτητα

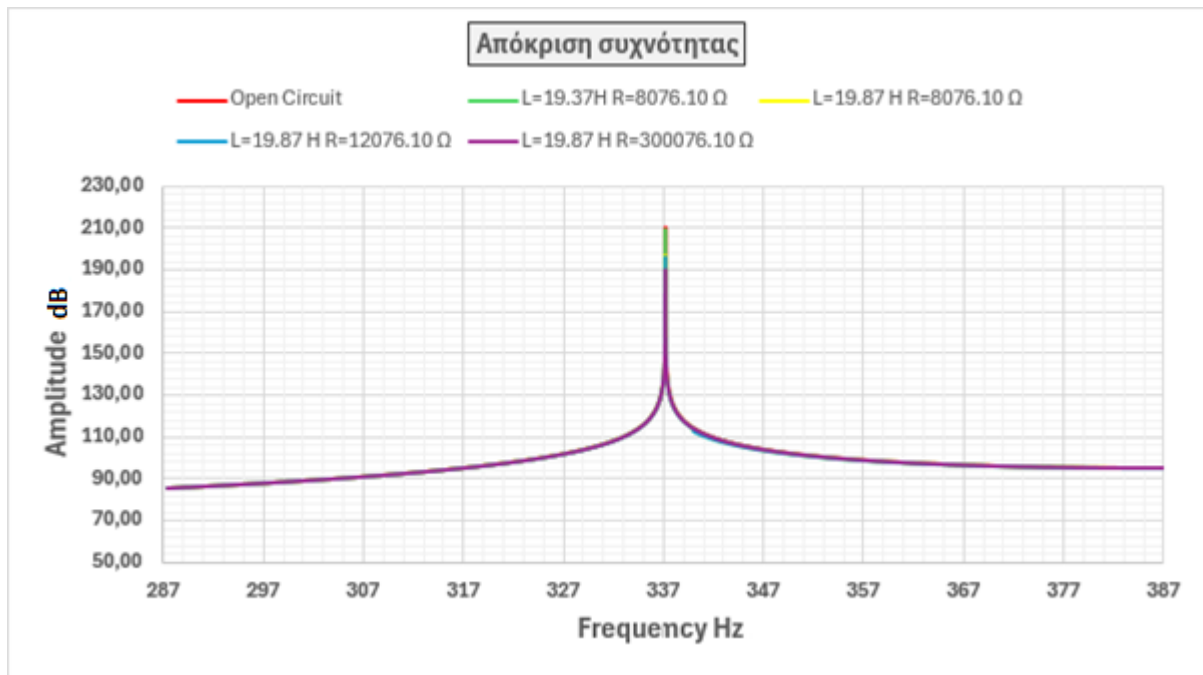
V_{ref} : η τιμή αναφοράς

Ο συντελεστής 20 αντί για 10 οφείλεται στο γεγονός ότι το decibel ορίζεται με βάση την ισχύ, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο του πλάτους (όπως η ταχύτητα ή η πίεση). Επομένως, η μετατροπή πλάτους σε dB απαιτεί διπλάσιο λογαριθμικό συντελεστή. Η θεμελιώδης εξήγηση αυτού του ορισμού παρέχεται στο κλασικό έργο του Beranek Acoustics (1986) [57] , το οποίο αποτελεί βασική αναφορά για τη θεωρία και τις εφαρμογές της λογαριθμικής κλίμακας σε μετρήσεις ακουστικής, δονήσεων και άλλων δυναμικών πεδίων.

Για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων σε λογαριθμική κλίμακα (dB), χρησιμοποιήθηκε ως τιμή αναφοράς η $V_{ref} = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Η συγκεκριμένη τιμή επελέγη ώστε να καλύπτει το κατώτερο όριο ευαισθησίας του συστήματος μέτρησης και να διασφαλίζεται η αποφυγή αριθμητικών σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό του λογαρίθμου, δεδομένου ότι οι ταχύτητες σε ορισμένες περιπτώσεις πλησίαζαν πολύ χαμηλά επίπεδα. Επιπλέον, η τιμή αυτή συνάδει με τυπικές πρακτικές παρουσίασης αποτελεσμάτων σε ανάλυση δονήσεων, σύμφωνα με τις οδηγίες της σχετικής βιβλιογραφίας [58] , επιτρέποντας τη σαφή σύγκριση των μετρούμενων μεγεθών σε σχέση με ένα σταθερό και φυσικώς ερμηνεύσιμο σημείο αναφοράς.

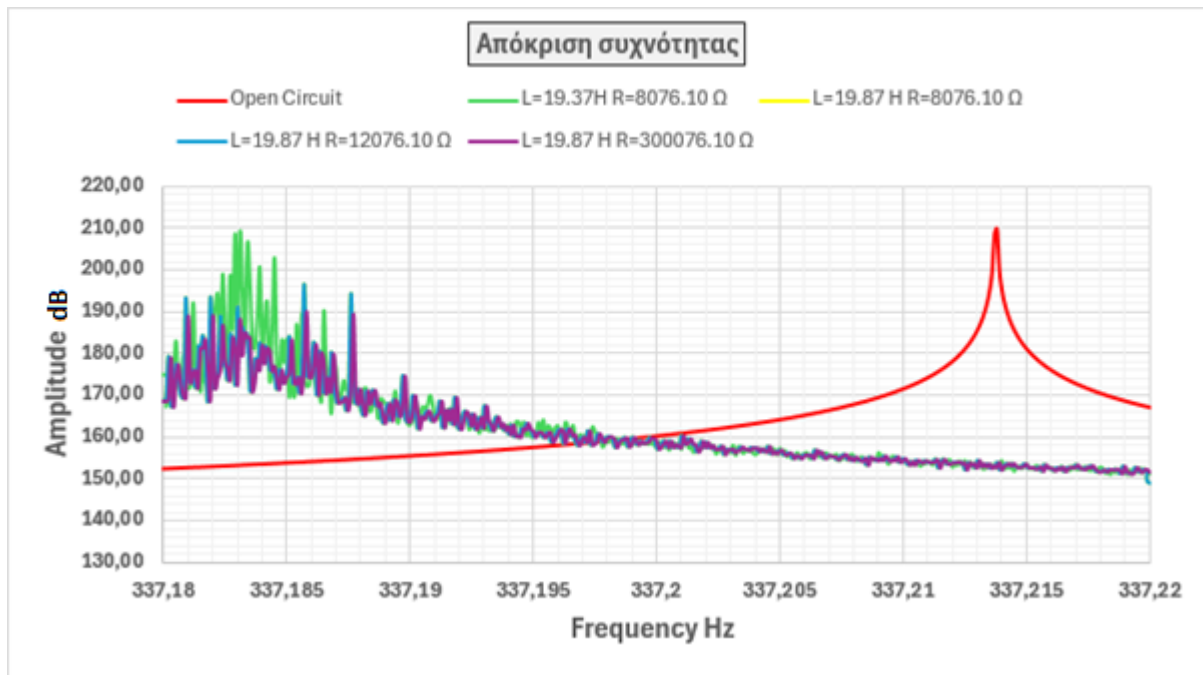
Στο σχεδιάγραμμα 8 απειονίζεται η απόκριση της συχνότητας σε Desibell έπειτα από μετατροπή των τιμών της ταχύτητας. Το διάστημα ανάλυσης είναι ίδιο με το διάστημα της ταχύτητας στις προηγούμενες παραγράφους , 287 Hz – 387 Hz.



Σχεδιάγραμμα 8: Απόκριση του πλάτους σε συνάρτηση με την συχνότητα εκφρασμένη σε dB.

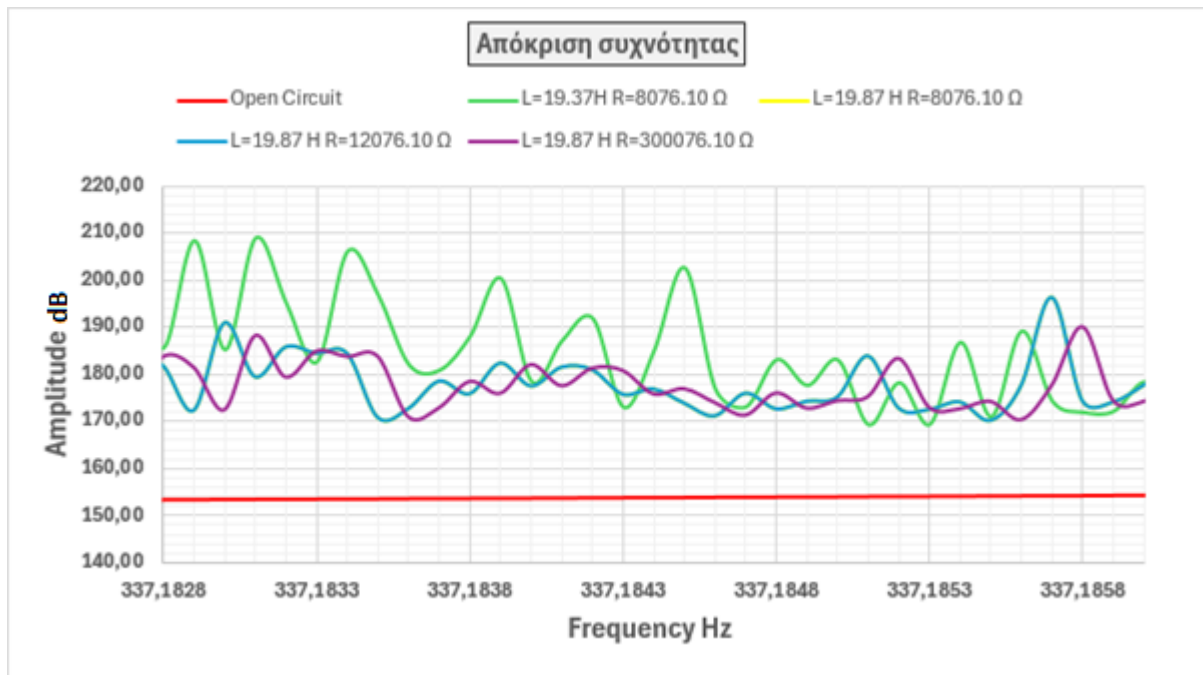
Λόγω της περιορισμένης ευκρίνειας στην απεικόνιση του πλήρους φάσματος, εφαρμόζεται η τεχνική εστίασης "Zoom-In", σε στενότερο εύρος συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, εξετάζεται το διάστημα 337,18 Hz – 337,22 Hz, το οποίο θεωρείται κατάλληλο για τη παρατήρηση των μέγιστων τιμών απόκρισης, οι οποίες εμφανίζονται σε περιοχές κοντά στις ιδιοσυχνότητες του συστήματος.

Από την αρχική επισκόπηση των αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι οι θεωρητικές τιμές της αντίστασης και της επαγωγής, όπως υπολογίστηκαν από το μοντέλο του μονοβάθμιου ταλαντωτή ($R = 8076,10 \, \Omega$ και $L = 19,37 \, \text{H}$, πράσινη καμπύλη), δεν οδηγούν σε βέλτιστη απόσβεση. Αντίθετα, η αύξηση της επαγωγής κατά 0,5 H (μπλέ, μώβ και κίτρινη καμπύλη συγκριτικά με την αρχική θεωρητική τιμή οδηγεί σε αισθητά βελτιωμένη δυναμική απόδοση του συστήματος.



Σχεδιάγραμμα 9: Απόκριση εκφρασμένη σε dB με εστίαση «Zoom in» στο διάστημα 337,18 Hz –337,22 Hz.

Εστιάζοντας περαιτέρω σε ακόμη στενότερο εύρος συχνοτήτων, απεικονίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η μεταβολή της ταχύτητας ταλάντωσης σε επίπεδα dB για όλους τους εξεταζόμενους συνδυασμούς τιμών αντίστασης (R) και επαγωγής (L). Από την ανάλυση προκύπτει ότι, παρά τη σημαντική αύξηση της αντίστασης από 12.076,10 Ω σε 300.076,10 Ω, η αντίστοιχη μείωση των επιπέδων dB είναι σχεδόν αμελητέα. Το εύρημα αυτό ενισχύει τη διαπίστωση ότι ο καθοριστικός παράγοντας για την αποτελεσματική απόσβεση της ταλάντωσης είναι η τιμή της επαγωγής του πηνίου, ενώ οι μεταβολές στην αντίσταση έχουν σαφώς μικρότερη επίδραση στο συνολικό απόσβεστικό αποτέλεσμα.



Σχεδιάγραμμα 10: Απόκριση συχνότητας σε dB με εστίαση «Zoom in» στο διάστημα 337,1828 Hz –337,1858 Hz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας ως οδηγό την στατική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, καθίσταται αξιοσημείωτη η παρουσία της μικροδομής στην δοκό της ευφυούς κατασκευής. Η επίτευξη υψηλών τιμών ελαστικής παραμόρφωσης σε συνδυασμό με τον έλεγχο των αναπτυσσόμενων τάσεων αποτελεί θεμελιώδη αρχή στον σχεδιασμό προηγμένων ευφών κατασκευών με πιεζοηλεκτρικά συστήματα απόσβεσης. Μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης της μικροδομής, καθίσταται δυνατή η ενίσχυση της τοπικής μηχανικής διέγερσης σε επιλεγμένες περιοχές, όπου η παραμόρφωση μεγιστοποιείται προς όφελος της ηλεκτρικής απόκρισης των επιθεμάτων. Ταυτόχρονα, η μικροδομή δρα ευεργετικά ως προς την κατανομή των φορτίων, περιορίζοντας τη συγκέντρωση τάσεων και διατηρώντας τη δομική ακεραιότητα του φορέα. Κατά συνέπεια, η μικροδομή ενισχύει την ηλεκτρομηχανική αποδοτικότητα του συστήματος, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ασφαλή και σταθερή λειτουργία του υπό φόρτιση.

Η επιβεβαίωση της αυξητικής συμπεριφοράς προέκυψε από τον υπολογισμό του λόγου Poisson. Στις ζώνες γύρω από τις εγκοπές καταγράφηκαν σαφείς αρνητικές τιμές, στοιχείο που τεκμηριώνει την εκδήλωση αυξητικής (auxetic) συμπεριφοράς. Ο μηχανισμός αυτός δεν αναδιανέμει μόνο τις θλιπτικές και εφελκυστικές παραμορφώσεις, αλλά διαδραματίζει καίριο ρόλο στη βελτίωση της αποσβεστικής ικανότητας της ευφυούς κατασκευής, καθώς ενισχύει την ηλεκτρομηχανική σύζευξη του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και περιορίζει τις συγκεντρώσεις τάσης στον κυρίως κορμό.

Η συνολική μελέτη της απόσβεσης μέσω παραδιακλαδωμένου κυκλώματος «αντίστασης – πηνίου» (RL) ανέδειξε τη σημαντική επιρροή των ηλεκτρικών παραμέτρων, επαγωγής L και αντίστασης R , στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Αρχικά, η εφαρμογή του κυκλώματος επέφερε σαφή μείωση της μέγιστης ταχύτητας ταλάντωσης κοντά στη δεύτερη ιδιοσυχνότητα του συστήματος, γεγονός που επιβεβαιώνει τη λειτουργία του ως μηχανισμός ενεργητικής απόσβεσης μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

Η παραμετρική ανάλυση της επαγωγής έδειξε ότι ακόμη και μικρές μεταβολές της τάξης ± 0.5 H γύρω από την αρχικά θεωρητική τιμή 19.37 H οδηγούν σε ιδιαίτερα σημαντικές αλλαγές στο πλάτος της απόκρισης. Η μεγαλύτερη απόσβεση επιτεύχθηκε για $L=19.87$ H και $R=8076.20 \Omega$, όπου καταγράφηκε μείωση του πλάτους ταλάντωσης έως και 78.34 % σε σχέση με το ανοιχτό κύκλωμα. Αυτό καταδεικνύει ότι η ακρίβεια στον καθορισμό του πηνίου είναι κρίσιμη, καθώς το σύστημα εμφανίζει έντονη ευαισθησία στη τιμή της επαγωγής (L).

Αντίστοιχα, η μεταβολή της αντίστασης παρουσίασε λιγότερο έντονη επίδραση, ειδικά για μεταβολές μικρής κλίμακας (π.χ. αύξηση κατά 4000 Ω). Ωστόσο, για πολύ μεγάλες τιμές αντίστασης (όπως 300076.10 Ω) και διατηρώντας την καταλληλότερη τιμή επαγωγής ($L=19.87$ H), το σύστημα παρουσίασε πρόσθετη βελτίωση στην απόσβεση, με ποσοστό μείωσης της τάξης του 89.76 % σε σχέση με το ανοιχτό (Open) κύκλωμα. Παρά τη θετική επίδραση, η υλοποίηση τόσο υψηλών τιμών στη πράξη είναι συχνά ανέφικτη, και επομένως η χρήση τους πρέπει να αξιολογηθεί ως θεωρητικά άνω όρια απόδοσης.

Συμπερασματικά, η μελέτη ανέδειξε ότι το παραδιακλαδωμένο κύκλωμα «αντίστασης-πηνίου» (RL) μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ως αποσβεστικό μέσο όταν η τιμή της επαγωγής βρίσκεται εντός ενός στενού εύρους. Η αντίσταση επηρεάζει δευτερευόντως τη συμπεριφορά, αλλά μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά. Η επιτυχής αξιοποίηση του κυκλώματος προϋποθέτει ακριβή σχεδιασμό με βάση τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος, αλλά και επαλήθευση των ηλεκτρικών παραμέτρων μέσω αριθμητικής ή πειραματικής διαδικασίας.

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης αναδεικνύουν τη σημαντική δυνατότητα αξιοποίησης ηλεκτρικών κυκλωμάτων ως ρυθμιστικών μηχανισμών για τη δυναμική συμπεριφορά μηχανικών δομών. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε πλήθος τεχνολογικών και επιστημονικών πεδίων, με σημαντικές προοπτικές. Αρχικά, η ενσωμάτωση κατάλληλα σχεδιασμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων επιτρέπει τον έλεγχο των ταλαντώσεων και τη μείωση των ανεπιθύμητων δυναμικών φαινομένων σε μηχανικές κατασκευές, όπως γέφυρες, ουρανοξύστες και βιομηχανικές πλατφόρμες. Η δυνατότητα περιορισμού των ταλαντώσεων ενισχύει τη σταθερότητα και τη μακροχρόνια αντοχή αυτών των δομών. .

Παράλληλα, η βελτιστοποίηση της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης καθιστά δυνατή την ανάπτυξη συστημάτων ανίχνευσης κραδασμών και παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας. Τέτοια συστήματα είναι κρίσιμα για την ασφάλεια και τη συντήρηση κατασκευών υψηλής σημασίας, όπως αεροδιαστημικά οχήματα, αγωγοί πετρελαίου και πλατφόρμες γεωτεχνικής παρακολούθησης.

Η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ηλεκτρικών κυκλωμάτων και μηχανικών δομών μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων προσαρμοσίμων συστημάτων. Αυτές οι δομές θα διαθέτουν δυναμικά ελεγχόμενα χαρακτηριστικά, τα οποία θα προσαρμόζονται ανάλογα με τις λειτουργικές απαιτήσεις και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η συνέχιση της έρευνας σε αυτόν τον τομέα δύναται να προσφέρει νέες δυνατότητες στη σχεδίαση και τον έλεγχο πολυλειτουργικών δομών, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των σύγχρονων τεχνολογικών συστημάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. F. Ashby, *Materials selection in mechanical design*, 3. ed., Reprint. Amsterdam Heidelberg: Elsevier, 2010.
- [2] E28 Committee, *Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. doi: 10.1520/E0008_E0008M-13A.
- [3] W. F. Hosford, *Mechanical behavior of materials*, 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2010.
- [4] A. Behera, *Advanced Materials: An Introduction to Modern Materials Science*. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-80359-9.
- [5] W. Heywang, *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*. in Springer Series in Materials Science Ser, no. v. 114. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2008.
- [6] E. Suaste-Gomez, Ed., *Piezoelectric Ceramics*. Erscheinungsort nicht ermittelbar: IntechOpen, 2010.
- [7] A. Safari and E. K. Akdoğan, Eds., *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Boston, MA: Springer US, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-76540-2.
- [8] G. N. Greaves, A. L. Greer, R. S. Lakes, and T. Rouxel, "Poisson's ratio and modern materials," *Nat. Mater.*, vol. 10, no. 11, pp. 823–837, Nov. 2011, doi: 10.1038/nmat3134.
- [9] A. C. Ugural, *Stresses in Beams, Plates, and Shells*, 0 ed. CRC Press, 2009. doi: 10.1201/b17516.
- [10] K. E. Evans and A. Alderson, "Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!," *Adv. Mater.*, vol. 12, no. 9, pp. 617–628, May 2000, doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3.
- [11] H. M. A. Kolken and A. A. Zadpoor, "Auxetic mechanical metamaterials," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 9, pp. 5111–5129, 2017, doi: 10.1039/C6RA27333E.
- [12] S. B. Tandale, B. Markert, and M. Stoffel, "Smart stiffness computation of one-dimensional Finite Elements," *Mech. Res. Commun.*, vol. 119, p. 103817, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.mechrescom.2021.103817.

- [13] L. R. Corr and W. W. Clark, "A Novel Semi-Active Multi-Modal Vibration Control Law for a Piezoceramic Actuator," *J. Vib. Acoust.*, vol. 125, no. 2, pp. 214–222, Apr. 2003, doi: 10.1115/1.1547682.
- [14] S. O. R. Moheimani, A. J. Fleming, and S. Behrens, "Dynamics, Stability, and Control of Multivariable Piezoelectric Shunts," *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 9, no. 1, pp. 87–99, Mar. 2004, doi: 10.1109/TMECH.2004.823882.
- [15] K. Marakakis, G. K. Tairidis, P. Koutsianitis, and G. E. Stavroulakis, "Shunt Piezoelectric Systems for Noise and Vibration Control: A Review," *Front. Built Environ.*, vol. 5, p. 64, May 2019, doi: 10.3389/fbuil.2019.00064.
- [16] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures*, vol. 246. in Solid Mechanics and Its Applications, vol. 246. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-72296-2.
- [17] Z. Chen, B. Guo, Y. Xiong, C. Cheng, and Y. Yang, "Melnikov-method-based broadband mechanism and necessary conditions of nonlinear rotating energy harvesting using piezoelectric beam," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 27, no. 18, pp. 2555–2567, Nov. 2016, doi: 10.1177/1045389X16635844.
- [18] P. Flament, B. Lossouarn, É. Ramond, P. Audrain, and J.-F. Deü, "Passive damping of several resonances using multi-branch resonant piezoelectric shunts," *INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc.*, vol. 270, no. 9, pp. 2207–2218, Oct. 2024, doi: 10.3397/IN_2024_3151.
- [19] P. Soltani, G. Kerschen, G. Tondreau, and A. Deraemaeker, "Piezoelectric vibration damping using resonant shunt circuits: an exact solution," *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 12, p. 125014, Dec. 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/12/125014.
- [20] J. Shen, W. Sun, K. Xu, and H. Zhang, "Optimization analysis of the intentional mistuning mode of the blisk with piezoelectric shunt damping patches," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 46, no. 1, p. 3, Jan. 2024, doi: 10.1007/s40430-023-04583-2.
- [21] W. Liu and Q. Mao, "Research of vibration control based on current mode piezoelectric shunt damping circuit," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 274, p. 012102, Dec. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/274/1/012102.
- [22] J. Høgsberg and S. Krenk, "Balanced calibration of resonant shunt circuits for piezoelectric vibration control," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 23, no. 17, pp. 1937–1948, Nov. 2012, doi: 10.1177/1045389X12455727.
- [23] O. Thomas, J. -F. Deü, and J. Ducarne, "Vibrations of an elastic structure with shunted piezoelectric patches: efficient finite element formulation and electromechanical coupling coefficients," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 235–268, Oct. 2009, doi: 10.1002/nme.2632.
- [24] J. A. B. Gripp and D. A. Rade, "Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 112, pp. 359–383, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.04.041.
- [25] *Computational Engineering — Introduction to Numerical Methods*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. doi: 10.1007/3-540-30686-2.
- [26] S. Badia, A. F. Martín, E. Neiva, and F. Verdugo, "The Aggregated Unfitted Finite Element Method on Parallel Tree-Based Adaptive Meshes," *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 43, no. 3, pp. C203–C234, Jan. 2021, doi: 10.1137/20M1344512.
- [27] E. Burman, D. Elfverson, P. Hansbo, M. G. Larson, and K. Larsson, "Shape optimization using the cut finite element method," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 328, pp. 242–261, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cma.2017.09.005.

- [28] C. Song, *The Scaled Boundary Finite Element Method: Introduction to Theory and Implementation*, 1st ed. Wiley, 2018. doi: 10.1002/9781119388487.
- [29] A. Y. T. Leung, "Standard Shape Function Method for Finite Element Formulation," *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 79–89, Jul. 1986, doi: 10.1111/j.1467-8667.1986.tb00115.x.
- [30] B. Xiao, S. Natarajan, C. Birk, E. Ooi, C. Song, and E. Ooi, "Construction of generalized shape functions over arbitrary polytopes based on scaled boundary finite element method's solution of Poisson's equation," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 124, no. 17, pp. 3603–3636, Sep. 2023, doi: 10.1002/nme.7287.
- [31] S. Hamzehei-Javaran and S. Shojaee, "Improvement of numerical modeling in the solution of static and transient dynamic problems using finite element method based on spherical Hankel shape functions," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 115, no. 10, pp. 1241–1265, Sep. 2018, doi: 10.1002/nme.5842.
- [32] D. N. Kien and X. Zhuang, "Radial basis function based finite element method: Formulation and applications," *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 152, pp. 455–472, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.enganabound.2023.04.014.
- [33] R. L. Taylor, "On completeness of shape functions for finite element analysis," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 17–22, Jan. 1972, doi: 10.1002/nme.1620040105.
- [34] E. Amezua, M. V. Hormaza, A. Hernández, and M. B. G. Ajuria, "A method for the improvement of 3D solid finite-element meshes," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 22, no. 1, pp. 45–53, Jan. 1995, doi: 10.1016/0965-9978(95)00004-G.
- [35] L. Sun, G. Zhao, and X. Ma, "Quality improvement methods for hexahedral element meshes adaptively generated using grid-based algorithm," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 89, no. 6, pp. 726–761, Feb. 2012, doi: 10.1002/nme.3261.
- [36] M. Jabbari and H. Moslemi, "Adaptive mesh refinement in polygonal finite elements using clustering technique," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 212, p. 103841, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.finela.2022.103841.
- [37] R. Falla, B.-J. Bobach, R. Boman, J.-P. Ponthot, and V. E. Terrapon, "Mesh adaption for two-dimensional bounded and free-surface flows with the particle finite element method," *Comput. Part. Mech.*, vol. 10, no. 5, pp. 1049–1076, Sep. 2023, doi: 10.1007/s40571-022-00541-2.
- [38] X. Tian, H. Zhang, Z. Qu, and S. Ai, "An efficient finite element mesh generation methodology based on μ CT images of multi-layer woven composites," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 184, p. 108255, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108255.
- [39] T. Zimmermann, "The finite element method. Linear static and dynamic finite element analysis," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 65, no. 2, p. 191, Nov. 1987, doi: 10.1016/0045-7825(87)90013-2.
- [40] H. M. A. Kolken and A. A. Zadpoor, "Auxetic mechanical metamaterials," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 9, pp. 5111–5129, 2017, doi: 10.1039/C6RA27333E.
- [41] A. Carpinteri, R. Brighenti, and S. Vantadori, "Surface cracks in notched round bars under cyclic tension and bending," *Int. J. Fatigue*, vol. 28, no. 3, pp. 251–260, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.05.006.
- [42] H. Zinelaabidine, B. Zeineddine, and F. Noureddine, "The influence of notch connection location on the short-term behaviour of timber-concrete composite beams, modelling of TCC beams and research for optimal locations, a numerical study," *Frat. Ed Integrità Strutt.*, vol. 17, no. 64, pp. 186–203, Mar. 2023, doi: 10.3221/IGF-ESIS.64.12.

- [43] V. Yu. Topolov, C. R. Bowen, and A. N. Isaeva, "Anisotropy Factors and Electromechanical Coupling in Lead-Free 1–3-Type Composites," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 65, no. 7, pp. 1278–1286, Jul. 2018, doi: 10.1109/TUFFC.2018.2833856.
- [44] W. En-Bo, G. Guo-Qing, and P. Ying-Ming, "Elastic properties of spherically anisotropic piezoelectric composites," *Chin. Phys. B*, vol. 19, no. 9, p. 096201, Sep. 2010, doi: 10.1088/1674-1056/19/9/096201.
- [45] X.-J. Dong, G. Meng, and J.-C. Peng, "Vibration control of piezoelectric smart structures based on system identification technique: Numerical simulation and experimental study," *J. Sound Vib.*, vol. 297, no. 3–5, pp. 680–693, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.jsv.2006.04.021.
- [46] L. A. Neves *et al.*, "Exploring Mesh Generation and Quality Enhancement with Open Source Codes," *J. Comput. Sci.*, vol. 14, no. 7, pp. 1000–1028, Jul. 2018, doi: 10.3844/jcssp.2018.1000.1028.
- [47] Z. Wang, X. Chen, T. Li, C. Gong, Y. Pang, and J. Liu, "Evaluating mesh quality with graph neural networks," *Eng. Comput.*, vol. 38, no. 5, pp. 4663–4673, Oct. 2022, doi: 10.1007/s00366-022-01720-8.
- [48] D. J. Inman and R. C. Singh, *Engineering vibration*, 4. ed., Internat. ed. in Always Learning. Boston, Mass. München: Pearson, 2014.
- [49] P. Li, C. Li, and B. Cong, "Piezoelectric-thermo-elastic coupling effect analysis for piezoelectric vibration energy harvester," *Microsyst. Technol.*, vol. 24, no. 9, pp. 3823–3832, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00542-018-3852-z.
- [50] S. Adhikari, "Damping modelling using generalized proportional damping," *J. Sound Vib.*, vol. 293, no. 1–2, pp. 156–170, May 2006, doi: 10.1016/j.jsv.2005.09.034.
- [51] J. N. Grima and K. E. Evans, "Auxetic behavior from rotating squares".
- [52] M.-S. Daraki *et al.*, "Comparison Of Different Auxetic Enhancement Layers For Shunted Piezoelectric Control," *E3S Web Conf.*, vol. 631, p. 01006, 2025, doi: 10.1051/e3sconf/202563101006.
- [53] T. R. Shrout and S. J. Zhang, "Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT?," *J. Electroceramics*, vol. 19, no. 1, pp. 113–126, Oct. 2007, doi: 10.1007/s10832-007-9047-0.
- [54] N. A. Shaw, "Books on acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 5_Supplement, pp. 2531–2531, May 2004, doi: 10.1121/1.4783410.
- [55] C. M. Harris and A. G. Piersol, Eds., *Harris' shock and vibration handbook*, 5. ed. in McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [56] A. Jackson, S. Fletcher, and N. Ariaga, "ANSYS Modelling of Piezoelectric Smart Beam using Ritz Vector Method and Sub-structuring Analysis," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2909, no. 1, p. 012005, Dec. 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2909/1/012005.
- [57] "Acoustics - L. Beranek."
- [58] B. T. Meggitt, A. C. Lewin, and D. A. Jackson, "A Fibre-Optic Non-Contacting Reference Grade Vibration Sensor," presented at the Fibre Optics '89, P. McGeehin, Ed., London, United Kingdom, Oct. 1989, p. 307. doi: 10.1117/12.961000.