



Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και
Διοίκησης

Πτυχιακή Εργασία με θέμα:

***«Ο Πιεζοηλεκτρισμός και οι Εφαρμογές του: Μια Σύγχρονη
Προσέγγιση»***

Εκπόνηση και επιμέλεια εργασίας:

ΑΓΑΤΣΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

A.M: 2013010148

Επιβλέπων Καθηγητής : Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Πρώτο Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Μαρία Σταυρουλάκη

Δεύτερο Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής : Μαρία Μπακατσάκη

Χανιά, 2024

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά μια συνολική μελέτη του φαινομένου του πιεζοηλεκτρισμού, ξεκινώντας από τις βασικές αρχές και εξελίξεις του, προχωρώντας στην ανάλυση των υλικών που εκδηλώνουν τέτοια ιδιότητα, και καταλήγοντας στις εφαρμογές και τις τεχνικές απόσβεσης ταλαντώσεων. Αναλύονται επισταμένως ο ορισμός και η ιστορία του πιεζοηλεκτρισμού, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, καθώς και οι σύγχρονες και καινοτόμες εφαρμογές τους στην καθημερινότητα και τη μηχανολογία. Ειδική έμφαση δίνεται στη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου, μέσω της οποίας εξηγείται η διαδικασία μετατροπής της μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα, καθώς και στις μεθόδους απόσβεσης ταλαντώσεων που βελτιώνουν την αποδοτικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων. Οι μελλοντικές προοπτικές του πιεζοηλεκτρισμού υπόσχονται περαιτέρω εξελίξεις σε τεχνολογικές εφαρμογές, ανοίγοντας νέους δρόμους για την επιστήμη και την τεχνολογία.

Λέξεις Κλειδιά: πιεζοηλεκτρισμός, πιεζοηλεκτρικά υλικά, απόσβεση ταλαντώσεων, ευθύ φαινόμενο, αντίστροφο φαινόμενο, σύγχρονες εφαρμογές

Abstract

The present work concerns a comprehensive study of the phenomenon of piezoelectricity, starting from its basic principles and developments, proceeding to the analysis of materials that manifest such property, and ending with applications and techniques of oscillation damping. The definition and history of piezoelectricity, piezoelectric materials, as well as their modern and innovative applications in everyday life and engineering are reviewed in detail. Special emphasis is placed on the mathematical description of the phenomenon, through which the process of converting mechanical energy into electrical energy and vice versa is explained, as well as on the methods of damping oscillations that improve the efficiency and safety of systems. The future prospects of piezoelectricity promise further developments in technological applications, opening up new avenues for science and technology.

Keywords: piezoelectricity, piezoelectric materials, oscillation damping, straight effect, reverse effect, modern applications

1 Εισαγωγή	1
2 Πιεζοηλεκτρισμός	2
2.1 Ορισμός.....	2
2.2 Ιστορία του Πιεζοηλεκτρισμού.....	2
2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά.....	5
2.3.1 Κεραμικά Υλικά.....	6
2.3.2 Πολυμερή Υλικά.....	10
2.3.3 Κρυσταλλικά Υλικά.....	14
2.4 Σύγκριση πιεζοηλεκτρικών υλικών	16
3 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	18
3.1 Το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	18
3.2 Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.....	20
3.2 Μαθηματικές Εξισώσεις	22
3.4 Εφαρμογές του Πιεζοηλεκτρισμού	23
3.4.1 Αισθητήρες	23
3.4.2 Συσκευές συλλογής ενέργειας	25
3.4.3 Βιολογικές και Ιατρικές Εφαρμογές	26
3.4.4 Ακουστικοί Αισθητήρες και Μικρόφωνα	27
4 Απόσβεση Ταλαντώσεων.....	30
4.1 Εισαγωγικά	30
4.2 Απόσβεση Ταλαντώσεων μέσω διακλάδωσης	32
4.2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή	32
4.2.2 Κατηγοριοποίηση παθητικών συστημάτων διακλάδωσης.....	34
4.3 Πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα συντονισμού	36
4.3.1 Κύκλωμα διακλάδωσης μίας ιδιομορφής	36
4.3.2 Κύκλωμα διακλάδωσης πολλών ιδιομορφών	36
4.3.3 Επιπλέον Τεχνικές	37
4.4 Σύγχρονες Μηχανολογικές Εφαρμογές	39
4.4.1 Δοκός με κύκλωμα πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης	39
4.4.2 Σύστημα Μάζας – Ελατηρίου	44
4.4.3 Πλάκες με πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα παραδιακλάδωσης	46
5 Συμπεράσματα	49
6 Βιβλιογραφία	50

Εικόνα 1 Οι αδερφοί Curie	3
Εικόνα 2 Ο πρώτος ανιχνευτής υπερήχων	4
Εικόνα 3 Δομή πιεζοηλεκτρικών κεραμικών πριν και μετά την πόλωση [1]	7
Εικόνα 4 Αντίδραση πιεζοηλεκτρικού κεραμικού σε εξωτερικά ερεθίσματα [1]	7
Εικόνα 5 Κεραμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά	9
Εικόνα 6 Η διαδικασία του "τραβήγματος"	10
Εικόνα 7 Επίδραση λόγου έλξης στο N-11 και PLLA	11
Εικόνα 8 Η διαδικασία του Polling [6]	11
Εικόνα 9 Δομή πολυμερών πιεζοηλεκτρικών	13
Εικόνα 10 Άμορφη και κρυσταλλική δομή	14
Εικόνα 11 Ένα απλό τετράεδρο	19
Εικόνα 12 Σχηματισμός διπολικής Ροπής	19
Εικόνα 13 Διάφορες "κοπές" κρυστάλλου χαλαζία	20
Εικόνα 14 Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	21
Εικόνα 15 α) PVDF αισθητήρας και β) Συστοιχίες Μembranών [6]	23
Εικόνα 16 Αισθητήρας κτύπου κινητήρα	24
Εικόνα 17 Πιεζοηλεκτρική διάταξη συλλογής ενέργειας [6]	25
Εικόνα 18 Block διάγραμμα της προτεινόμενης εφαρμογής παραγωγής ηλ. ενέργειας απο το περπάτημα	26
Εικόνα 19 i) Πιεζοηλεκτρική επιφάνεια καλλιέργειας κυττάρων ii) Ανθρώπινος ιστός αναπτυσσόμενος μεταξύ πιεζοηλεκτρικών PLLA [13]	27
Εικόνα 20 Πιεζοηλεκτρικός Μετατροπέας Υπερήχων	27
Εικόνα 21 Μικρόφωνο ZnO MEMS (α) Άνω όψη ομόκεντρων ηλεκτροδίων (β) Διατομή του αισθητήρα [16]	28
Εικόνα 22 PZT Μικρόφωνο για αεροακουστικές εφαρμογές (α) σχηματικό διάγραμμα διατομής (β) κατασκευασμένη διάταξη [16]	29
Εικόνα 23 Η έννοια του πιεζοηλεκτρικού ελέγχου για τον έλεγχο δονήσεων μηχανικών συστημάτων [19]	31
Εικόνα 24 Δομή πιεζοηλεκτρικού ελάσματος που διαταράσσεται από εξωτερική δύναμη w [1]	32
Εικόνα 25 Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα σε αντίσταση ή συντονισμένη παραδιακλάδωση	33
Εικόνα 26 Κατηγοριοποίηση παθητικών κυκλωμάτων διακλάδωσης	35
Εικόνα 27 (α) Παράλληλη και (β) σε σειρά σύνδεση κυκλώματος μιας ιδιομορφής	36
Εικόνα 28 (α) Παράλληλη και (β) σε σειρά σύνδεση κυκλώματος πολλών ιδιομορφών	37
Εικόνα 29 Κύκλωμα παραδιακλάδωσης δύο ιδιοτιμών	37
Εικόνα 30 Κύκλωμα παραδιακλάδωσης πολλών ιδιοτιμών current-flowing	38
Εικόνα 31 Series/Parallel κύκλωμα απόσβεσης [34]	39
Εικόνα 32 Δοκός με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα [35]	40
Εικόνα 33 Συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας (α) FRF βραχυκύκλωμα και (β) Βραχυκύκλωμα FRF σε απόσβεση	43
Εικόνα 34 Μοντέλο Μάζας – Ελατηρίου	44
Εικόνα 35 (α) Πλήρες και (β) Απλοποιημένο μοντέλο πιεζοηλεκτρικού συντονισμού	44
Εικόνα 36 Ισοδύναμο κύκλωμα	44
Εικόνα 37 Συνάρτηση μεταφοράς	45
Εικόνα 38 Πλάκα με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα	47

1 Εισαγωγή

Ο πιεζοηλεκτρισμός αποτελεί ένα σημαντικό φαινόμενο στον τομέα της επιστήμης και της τεχνολογίας. Είναι η ιδιότητα ορισμένων υλικών να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν υποβάλλονται σε μηχανική πίεση ή τάση. Το αντίστροφο φαινόμενο, η μετατροπή ηλεκτρικής τάσης σε μηχανική παραμόρφωση, ονομάζεται αντίστροφος πιεζοηλεκτρισμός. Ο πιεζοηλεκτρισμός, που κυριολεκτικά σημαίνει "ηλεκτρισμός που προκύπτει από πίεση", βρίσκεται φυσικά σε πολλά μονοκρυσταλλικά υλικά, όπως το πυρίτιο, το τουρμαλίνη, το τοπάζι και το αλάτι του Ροσέλ. Η κατανόηση του πιεζοηλεκτρισμού έχει ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς, από την ηλεκτρονική και τη μηχανολογία μέχρι την ιατρική και την αυτοκινητοβιομηχανία. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε γκάμα εφαρμογών, όπως ο έλεγχος δονήσεων, η ακριβής ρύθμιση θέσης, τα αισθητήρια όργανα, τα συστήματα αεροπορικής τεχνολογίας, ιατρικές συσκευές ενεργοποιητές κ.α. Πρόσφατα έχουν αποκτήσει κρίσιμο ρόλο και στην προαγωγή της έρευνας στη νανοτεχνολογία [1,2,3].

Στόχοι της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει και να αναλύσει το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού, τις εφαρμογές του στην καθημερινή ζωή και τις μηχανολογικές εφαρμογές που προκύπτουν από αυτό. Επίσης, η έρευνα αποσκοπεί στην ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων σχετικά με τα πιεζοηλεκτρικά υλικά και την απόσβεση ταλαντώσεων σε αυτά. Στην μελέτη συμπεριλαμβάνετε ανασκόπηση του ευθέος αλλά και του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου καθώς και των μαθηματικών εξισώσεων που διέπουν τα φαινόμενα αυτά.

Η έρευνα αποτελείται από πέντε κύρια κεφάλαια. Αρχικά, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο πιεζοηλεκτρισμός, αναλύοντας τον ορισμό του φαινομένου και την ιστορική του ανάπτυξη. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, κατηγοριοποιώντας τα και αναλύοντας τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση του φαινομένου του πιεζοηλεκτρισμού, καλύπτοντας τόσο το ευθύ όσο και το αντίστροφο φαινόμενο, καθώς και τις πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις. Τέλος, αναφέρονται οι πρακτικές εφαρμογές του πιεζοηλεκτρισμού στην καθημερινότητα και στη μηχανολογία. Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζονται οι μέθοδοι απόσβεσης ταλαντώσεων σε πιεζοηλεκτρικά συστήματα, εστιάζοντας στα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις που προκύπτουν. Τέλος, στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια ευρήματα της έρευνας, ενώ παρέχονται προοπτικές για μελλοντικές εφαρμογές και ερευνητικές κατευθύνσεις, επισημαίνοντας τη σημασία του πιεζοηλεκτρισμού στη σύγχρονη μηχανολογία.

2 Πιεζοηλεκτρισμός

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε στον ορισμό του φαινομένου, πραγματοποιώντας παράλληλα μία ιστορική αναδρομή και έρευνα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία που υπάρχει στον κλάδο. Στην συνέχεια θα προχωρήσουμε σε συζήτηση αναφορικά με υλικά που χρησιμοποιούνται εξετάζοντας τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς που παρουσιάζουν.

2.1 Ορισμός

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, πιεζοηλεκτρισμός ονομάζεται η ιδιότητα ορισμένων κρυστάλλων να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν υποβάλλονται σε μηχανική καταπόνηση, όπως πίεση ή τάση. Το αντίστροφο φαινόμενο, η παραγωγή μηχανικής παραμόρφωσης από ηλεκτρικό σήμα, ονομάζεται αντίστροφος πιεζοηλεκτρισμός. Αυτό το ηλεκτρικό φορτίο παράγεται από εξαναγκασμένη ασυμμετρία. Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα θετικά και τα αρνητικά φορτία διαχωρίζονται μεταξύ τους, ενώ παραμένουν ευθυγραμμισμένα σε συμμετρικό σχέδιο. Όταν ασκείται μηχανική καταπόνηση στην ουσία, αυτή η συμμετρία χάνεται, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου. Η βασική παραδοχή που γίνεται σε αυτήν την εργασία είναι ότι οι μετατροπείς που κατασκευάζονται από πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι γραμμικές διατάξεις των οποίων οι ιδιότητες διέπονται από ένα σύνολο τανυστικών εξισώσεων. Αυτό είναι σύμφωνο με τα πρότυπα πιεζοηλεκτρικού ηλεκτρισμού του IEEE [1,2,3].

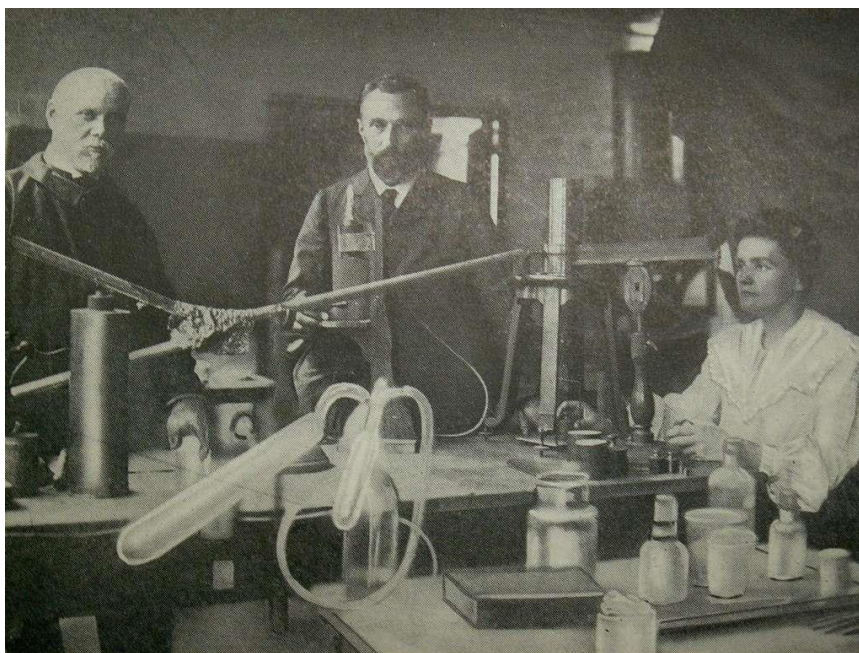
Βασικές έννοιες και Χαρακτηριστικά:

- Πιεζοηλεκτρικό υλικό: Υλικό που εμφανίζει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Συνήθως αποτελούνται από κρυσταλλικές δομές με συμμετρία που επιτρέπουν την εμφάνιση του φαινομένου.
- Πιεζοηλεκτρικός συντελεστής: Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης προς την ασκούμενη μηχανική καταπόνηση.
- Πιεζοηλεκτρική σταθερά: Είναι μια φυσική σταθερά που χαρακτηρίζει την απόκριση ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού σε μια εξωτερική μηχανική ή ηλεκτρική διέγερση. Αντικατοπτρίζει τη σχέση μεταξύ της προκαλούμενης πραγματικής μηχανικής παραμόρφωσης και του παράγοντα πίεσης ή της προκαλούμενης πραγματικής ηλεκτρικής παραμόρφωσης και του παράγοντα εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής τάσης.
- Πολικότητα: Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν θετικό και αρνητικό πόλο.
- Συμμετρία: Ο πιεζοηλεκτρισμός εμφανίζεται μόνο σε κρυστάλλους με μη κεντροσυμμετρική δομή.
- Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο: Η μηχανική καταπόνηση του κρυστάλλου προκαλεί μετατόπιση των ιόντων του, δημιουργώντας ηλεκτρική τάση.
- Αντίστροφος πιεζοηλεκτρισμός: Η εφαρμογή ηλεκτρικού σήματος στον κρύσταλλο προκαλεί μετατόπιση των ιόντων του, οδηγώντας σε μηχανική παραμόρφωση.

2.2 Ιστορία του Πιεζοηλεκτρισμού

Η ιστορία της μελέτης των πιεζοηλεκτρικών φαινομένων ξεκινάει πάνω από ενάμιση αιώνα πριν, συγκεκριμένα την δεκαετία του 1880 από τους αδερφούς Curie. Η πρώτη πειραματική επίδειξη μιας σύνδεσης μεταξύ μακροσκοπικών πιεζοηλεκτρικών φαινομένων και κρυσταλλογραφικής δομής δημοσιεύτηκε το 1880 από τους Pierre και Jacques Curie. Το πείραμά τους αποτελούνταν από μια καταλυτική μέτρηση επιφανειακών φορτίων που εμφανίζονταν σε ειδικά προετοιμασμένα κρύσταλλα

(μεταξύ αυτών τουρμαλίνη, κρυστάλλινος πυρίτης, τοπάζιο, ζάχαρη καλάμου και αλάτι Rochelle) τα οποία υποβάλλονταν σε μηχανική ένταση [2,4].



Εικόνα 1 Οι αδερφοί Curie[2]

Στους επιστημονικούς κύκλους της εποχής, αυτό το φαινόμενο θεωρήθηκε σημαντική ανακάλυψη και γρήγορα ονομάστηκε «πιεζοηλεκτρισμός» προκειμένου να διακριθεί από άλλους τομείς της τότε επιστήμης όπως ο επιφανειακός (στατικός δηλαδή ηλεκτρισμός που παράγεται από τριβή) [2,4].

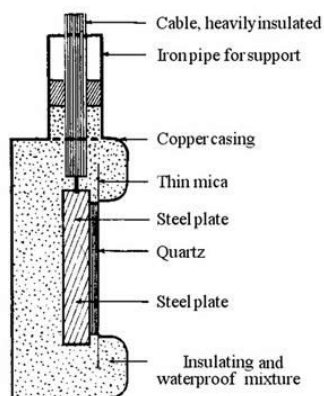
Οι αδελφοί Κιουρί ισχυρίστηκαν ότι υπήρχε μια αντιστοιχία ένα προς ένα μεταξύ των ηλεκτρικών επιδράσεων της μεταβολής της θερμοκρασίας και της μηχανικής καταπόνησης σε έναν δεδομένο κρύσταλλο και ότι είχαν χρησιμοποιήσει αυτή την αντιστοιχία όχι μόνο για να επιλέξουν τους κρυστάλλους για το πείραμα, αλλά και για να καθορίσουν τα κοψίματα αυτών των κρυστάλλων. Δεν προέβλεψαν, ωστόσο, ότι οι κρύσταλλοι που εμφανίζουν το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο θα εμφάνιζαν επίσης το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η ιδιότητα αυτή προέκυψε μαθηματικά από τις θεμελιώδεις θερμοδυναμικές αρχές από τον Lippmann το 1881. Οι Curie επιβεβαίωσαν αμέσως την ύπαρξη του "αντίστροφου φαινομένου" και συνέχισαν για να αποκτήσουν ποσοτική απόδειξη της πλήρους αντιστρεψιμότητας των ηλεκτρο-μηχανικών παραμορφώσεων σε πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους.

Το 1882, μετά από μόλις δύο χρόνια συνεργασίας στα πλαίσια της ευρωπαϊκής επιστημονικής κοινότητας, ο πυρήνας της επιστήμης των πιεζοηλεκτρικών εφαρμογών καθορίστηκε: η ταυτοποίηση των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων με βάση την ασύμμετρη κρυσταλλική δομή, η αντιστρεπτή ανταλλαγή ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας και η χρησιμότητα της θερμοδυναμικής στην ποσοτικοποίηση πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρικών μεταβλητών. [2,4]

Στα επόμενα 25 χρόνια, μέχρι το 1910, έγινε πολύ περισσότερη δουλειά ώστε αυτός ο πυρήνας να εξελιχθεί σε ένα ευέλικτο και πλήρες πλαίσιο που όριζε πλήρως τις 20 φυσικές κατηγορίες κρυστάλλων στις οποίες εμφανίζονται πιεζοηλεκτρικά φαινόμενα και όριζε και τους 18 πιεζοηλεκτρικούς μακροσκοπικούς συντελεστές που μπορούν να προκύψουν συνοδεύοντας μια ¹

αυστηρή θερμοδυναμική επεξεργασία των κρυσταλλικών στερεών με τη χρήση κατάλληλης τεταγμένης ανάλυσης. Το 1910 εκδόθηκε το "Lerbuch der Kristallphysik" του Voigt, το οποίο έγινε το πρότυπο έργο αναφοράς που ενσωματώνει την κατανόηση που είχε επιτευχθεί. Ωστόσο, αξίζει να αναφέρουμε πως οι πιεζοηλεκτρική επιστήμη δεν βρήκε αμέσως οπαδούς, καθώς υπήρχαν ακόμη δυσκολίες στην ερμηνεία αλλά και στις πιθανές εφαρμογές. Σε αντίθεση, ο ηλεκτρομαγνητισμός είχε ήδη αναπτυχθεί σε τεχνολογία με ορατές και εντυπωσιακές εφαρμογές. [2,4]

Το 1917, στην διάρκεια του πρώτου παγκοσμίου πολέμου, έγινε η πρώτη σοβαρή εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών συσκευών, σε έναν υποβρύχιο ανιχνευτή υπερήχων. Ο μετατροπέας του P.Langevin ήταν ένα σύνολο από λεπτούς κρυστάλλους χαλαζία κολλημένους μεταξύ δύο χαλύβδινων πλακών με συχνότητα συντονισμού περίπου 50 KHz σε ένα βυθιζόμενο περίβλημα. Μετά το τέλος του πολέμου, πέτυχαν τον στόχο τους να εκπέμπουν υποβρύχιο ήχο υψηλής συχνότητας και να μετρούν το βάθος με τη χρονομέτρηση της ηχούς που επιστρέφει. Η παραπάνω ανακάλυψη ήταν η αρχή για την δημιουργία της τεχνολογίας που σήμερα είναι γνωστή ως «σόναρ» [2,4].



Εικόνα 2 Ο πρώτος ανιχνευτής υπερήχων[1]

Η δεκαετία του 1920 σηματοδότησε την αυγή της «πρώτης γενιάς» του πιεζοηλεκτρισμού. Ο Walter Cady, ένας Αμερικανός φυσικός, ηγήθηκε της έρευνας, εστιάζοντας στην εξέλιξη θεωρητικών μοντέλων και μεθόδων μέτρησης πιεζοηλεκτρικών υλικών. Παράλληλα, η εταιρεία Brush Development Company ίδρυσε το πρώτο εργοστάσιο παραγωγής πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων χαλαζία. Η εστίαση ήταν στην κατασκευή ακουστικών μεταγωγέων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν σε ραντάρ, sonar και υπέρηχους. Μερικά από τα σημαντικά επιτεύγματα αυτής της περιόδου:

- 1921: Ο Cady δημοσίευσε το πρώτο θεωρητικό μοντέλο για τον πιεζοηλεκτρισμό.
- 1923: Οδηγήθηκε η πρώτη εμπορική παραγωγή κρυστάλλων χαλαζία.
- 1930: Ουσιαστική βελτίωση της ευαισθησίας των πιεζοηλεκτρικών μεταγωγέων.
- 1935: Εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών μεταγωγέων σε ραντάρ.
- 1940: Ανάπτυξη υπερηχογραφικών συσκευών με πιεζοηλεκτρικούς μεταγωγείς.

Η 20ετία από 1940 έως 1960 χαρακτηρίζεται ως η «δεύτερη γενιά» του πιεζοηλεκτρισμού και εστίασε στην ανάπτυξη νέων υλικών και εφαρμογών. Αναφορικά, τέλη του 40' επιτευχθεί η ανακάλυψη του βαρίου τιτανικού (BaTiO_3), ενός κεραμικού υλικού με υψηλότερο πιεζοηλεκτρικό συντελεστή από τον χαλαζία. Στην επόμενη δεκαετία, άρχισε η εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών υλικών σε μικρόφωνα και

ακουστικά, σε βιομηχανικούς αισθητήρες αλλά και αναπτύχθηκαν πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες. Σχεδιασμένο το 1952, και εξακολουθεί να είναι ένα από τα πιο δημοφιλή πιεζοηλεκτρικά κεραμικά σήμερα είναι το PZT (τιτανικό ζirkονικό μόλυβδο). Ωστόσο, με μειονεκτήματα όπως περιορισμένη παραμόρφωση, ευθραυστότητα και υψηλή πυκνότητα μάζας, το PZT δεν είναι ιδανικό για κάθε εφαρμογή [2,4].

Η «τρίτη γενιά» (1960-1980) εστιάστηκε στην ανάπτυξη λεπτών μεμβρανών και σύνθετων υλικών. Μερικά παραδείγματα είναι η εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών μεμβρανών σε μικρόφωνα, ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών υλικών για ιατρικές εφαρμογές, ρομποτική και αυτοματοποίηση. Τότε αναπτύχθηκε το PVDF (φθοριούχο πολυβινυλιδένιο). Το PVDF έχει ημι-κρυσταλλική δομή και δημιουργεί φορτία πολλές φορές μεγαλύτερα από τον χαλαζία. Αν και αυτό το τεχνητό πολυμερές αντιμετώπιζε πολλά από τα μειονεκτήματα του PZT, είχε διάφορα δικά του – πιεζοηλεκτρικές βλάβες σε υψηλές θερμοκρασίες και υποβάθμιση. Με την πρόσφατη τεχνολογική πρόοδο και τις αυξανόμενες απαιτήσεις, τα PZT και PVDF μπορεί να έχουν φτάσει στα όριά τους.

Τέλος, περνάμε στην «τέταρτη γενιά» που εξελίσσεται μέχρι και σήμερα. Στοχεύει στην ανάπτυξη νανοϋλικών και μοριακών ηλεκτρικών υλικών. Αυτή σηματοδοτείται από την ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών νανοσωλήνων το 1990, εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών υλικών σε συλλογή ενέργειας και ανάπτυξη μοριακών ηλεκτρικών υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες (2000-2010) [2,4].

Σήμερα, ο πιεζοηλεκτρισμός έχει πολυάριθμες εφαρμογές που θα αναλύσουμε και στην συνέχεια της παρούσας εργασίας και παραμένει ένα πεδίο με ραγδαίες εξελίξεις. Στις πιο πρόσφατες καινοτομίες περιλαμβάνονται η μελέτη και σύνθεση νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες, συλλογή ενέργειας από δονήσεις, κίνηση και αλλαγές στην θερμοκρασία, βιοϊατρικές εφαρμογές, τεχνητή νοημοσύνη κ.α.

2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Στην παρούσα ενότητα της ερευνητικής μας εργασίας αναδεικνύουμε τον πλούτο και την ποικιλομορφία των πιεζοηλεκτρικών υλικών, προχωρώντας πέρα από την εισαγωγική εξέταση του φαινομένου και την ιστορική του πορεία που καλύψαμε στις προηγούμενες ενότητες. Σε αυτό το στάδιο, θα εστιάσουμε στην κατηγοριοποίηση των πιεζοηλεκτρικών υλικών σε κεραμικά, πολυμερή και κρυστάλλους, εξερευνώντας τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε κατηγορίας. Η συζήτησή μας θα προχωρήσει στην ανάλυση των ιδιοτήτων που καθιστούν κάθε υλικό κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές, ενώ θα αναδειχθούν και οι προκλήσεις που εγείρονται στη χρήση τους. Μέσα από μια συγκριτική ανάλυση, θα παρουσιάσουμε πώς διαφορετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς, αναλόγως της απόδοσης, της διάρκειας ζωής, και του κόστους, υπογραμμίζοντας τη σημασία της επιλογής του κατάλληλου υλικού για κάθε εφαρμογή.

Χαρακτηριστικά και μετρικές των πιεζοηλεκτρικών υλικών

Για να αποκτήσουμε μια καλύτερη αντίληψη και να μπορέσουμε να συγκρίνουμε εν τέλει τους διάφορους τύπους των πιεζοηλεκτρικών υλικών, είναι απαραίτητο αρχικά να αναλύσουμε τα μεγέθη και τις μετρικές που τα χαρακτηρίζουν.

Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα παρακάτω:

Οι πιεζοηλεκτρικοί συντελεστές (d_{ij} πχ d_{33} , d_{31} , d_{15} κ.λπ.) μετρούν την μηχανική πίεση που προκαλείται από μια εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση (εκφρασμένη σε μέτρα ανά βολτ). Οι υψηλοί συντελεστές d_{ij} υποδηλώνουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις, οι οποίες απαιτούνται για την κίνηση των συσκευών μετατροπών.

Η σχετική διαπερατότητα (ϵ_r) είναι ο λόγος μεταξύ της απόλυτης διαπερατότητας του πιεζοηλεκτρικού υλικού, ϵ , και της διαπερατότητας του κενού, ϵ_0 .

Ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης k είναι ένας δείκτης της αποτελεσματικότητας με την οποία ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ή μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ο πρώτος δείκτης του k υποδηλώνει την κατεύθυνση κατά την οποία εφαρμόζονται τα ηλεκτρόδια- ο δεύτερος υποδηλώνει την κατεύθυνση κατά την οποία εφαρμόζεται ή αναπτύσσεται η μηχανική ενέργεια.

Ο μηχανικός συντελεστής ποιότητας Q_m είναι μια σημαντική ιδιότητα υψηλής ισχύος των πιεζοηλεκτρικών κεραμικών. Είναι το αντίστροφο της μηχανικής απώλειας $\tan \phi$.

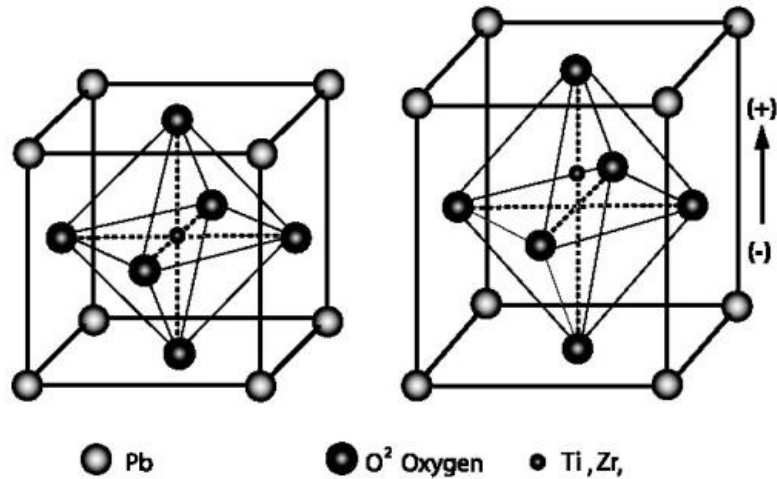
Οι σταθερές πιεζοηλεκτρικής τάσης g_{ij} είναι κρίσιμη παράμετρος που ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής τάσης που παράγεται ανά μονάδα μηχανικής πίεσης που εφαρμόζεται κατά μήκος της ίδιας κατεύθυνσης. Δίνεται δηλαδή από τον τύπο $g=d/\epsilon$ όπου d είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά όπως την ορίσαμε πάνω και ϵ η διηλεκτρική σταθερά του υλικού κατά μήκος της ίδιας κατεύθυνσης.

2.3.1 Κεραμικά Υλικά

Τα κεραμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά αποτελούν την πλέον διαδεδομένη κατηγορία πιεζοηλεκτρικών υλικών λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων και της ευρείας εφαρμογής τους. Τα κεραμικά υλικά είναι ανόργανα, μη μεταλλικά υλικά που αποτελούνται κυρίως από οξείδια, καρβίδια, νιτρίδια και άλλες ουσίες που συμπιέζονται και θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα κεραμικά υλικά διακρίνονται για την υψηλή τους σκληρότητα, ανθεκτικότητα σε φθορά, υψηλές θερμοκρασίες και χημική σταθερότητα. Η πιεζοηλεκτρική τους ιδιότητα επιτρέπει τη μετατροπή μηχανικής πίεσης σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα, καθιστώντας τα ιδανικά για πολλές εφαρμογές.

Σύνθεση και Κατασκευή

Τα κεραμικά, γενικά, αποτελούνται από ηλεκτρικά φορτισμένους κρυστάλλους (όπως $BaTiO_3$ και $PbZrO_3$). Για την παρασκευή ενός πιεζοηλεκτρικού κεραμικού, χρησιμοποιούνται λεπτές σκόνες των συστατικών μετάλλων οξειδίων αναμιγνύονται σε συγκεκριμένες αναλογίες. Το μείγμα αυτό θερμαίνεται στη συνέχεια για να σχηματιστεί σε μια ομοιόμορφη σκόνη. Η σκόνη αναμιγνύεται στη συνέχεια με ένα οργανικό συνδετικό υλικό και διαμορφώνεται σε συγκεκριμένα σχήματα. Στα περισσότερα κεραμικά, εκτός από τα σιδηροηλεκτρικά κεραμικά, τα ηλεκτρικά φορτία των κρυστάλλων εξισορροπούνται. Τα σιδηροηλεκτρικά κεραμικά είναι ηλεκτρικά πολωμένα και ως εκ τούτου διαθέτουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Αμέσως μετά την κατασκευή τους, ωστόσο, δεν παρουσιάζουν πιεζοηλεκτρικά φαινόμενα λόγω της τυχαίας κατανομής των κρυστάλλων που φέρουν ηλεκτρικά φορτία. Οι κρύσταλλοι πρέπει να ευθυγραμμιστούν με την εφαρμογή υψηλής συνεχούς τάσης, πολώνοντας έτσι το κεραμικό για να καταστεί πιεζοηλεκτρικό. Αφού πολωθούν, τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά διατηρούν την πόλωση ακόμη και όταν αφαιρεθεί η τάση συνεχούς ρεύματος [1,5].

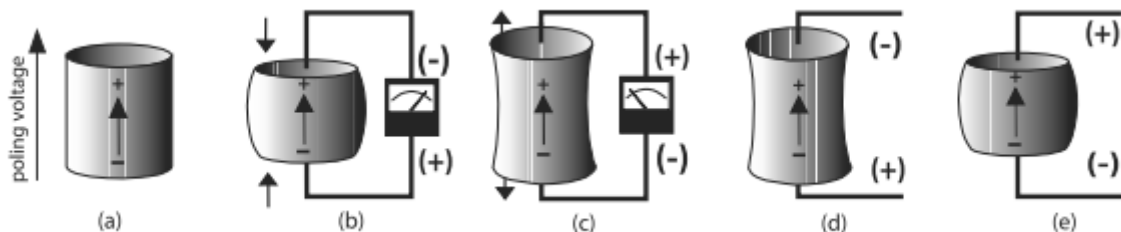


Εικόνα 3 Δομή πιεζοηλεκτρικών κεραμικών πριν και μετά την πόλωση [1]

Η μαλακότητα ή σκληρότητα ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού αναφέρεται στο πόσο εύκολα πολώνεται. Τα μαλακά πιεζοηλεκτρικά υλικά πολώνονται εύκολα, ενώ τα σκληρά όχι. Τα μαλακά πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν υψηλό συντελεστή σύζευξης, που σημαίνει ότι έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία στα ηλεκτρικά πεδία. Έχουν επίσης υψηλό συντελεστή πιεζοηλεκτρικού φορτίου, υψηλή διηλεκτρική σταθερά και απόκριση χωρίς θόρυβο στο ερέθισμα [1,5].

Λειτουργία

Οι ιδιότητες ενός πολωμένου πιεζοηλεκτρικού κεραμικού στοιχείου μπορούν να εξηγηθούν από τις εικόνες του παρακάτω σχήματος.



Εικόνα 4 Αντίδραση πιεζοηλεκτρικού κεραμικού σε εξωτερικά ερεθίσματα [1]

Η μηχανική συμπίεση ή τάση στο στοιχείο αλλάζει τη διπολική ροπή που συνδέεται με το στοιχείο αυτό. Αυτό δημιουργεί μια τάση. Η συμπίεση κατά μήκος της διεύθυνσης της πόλωσης ή η τάση κάθετα προς τη διεύθυνση της πόλωσης, δημιουργεί τάση του ίδιου πολικότητας με την τάση πόλωσης (Εικόνα 4β). Η τάση κατά μήκος της διεύθυνσης της πόλωσης, ή συμπίεση κάθετη προς τη διεύθυνση αυτή, παράγει μια τάση με πολικότητα αντίθετη από εκείνη της τάσης πόλωσης (Εικόνα 4γ). Όταν λειτουργεί σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, η διάταξη χρησιμοποιείται ως αισθητήρας. Δηλαδή, η διάταξη λειτουργεί ως συσκευή μέτρησης της τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος, το κεραμικό στοιχείο μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια της συμπίεσης ή της τάσης σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι τιμές για τη συμπιεστική τάση την ένταση του πεδίου που δημιουργείται από την εφαρμογή τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό κεραμικό στοιχείο είναι γραμμικά ανάλογες, μέχρι μια συγκεκριμένη τάση, η οποία

εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού. Το ίδιο ισχύει και για την εφαρμοζόμενη τάση και την παραγόμενη τάση [1,5].

Εάν μια τάση της ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης εφαρμοστεί σε ένα κεραμικό στοιχείο, προς την κατεύθυνση της τάσης πόλωσης, το στοιχείο θα επιμηκυνθεί και η διάμετρός του θα γίνει μικρότερη (Εικόνα 3δ). Εάν μια τάση πολικότητας αντίθετης από εκείνη της τάσης πόλωσης, το στοιχείο θα γίνει μικρότερο και φαρδύτερο (Εικόνα 3ε). Εάν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση στη διάταξη, το στοιχείο θα διαστέλλεται και θα συστέλλεται κυκλικά, με τη συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης. Όταν λειτουργεί σε αυτή τη λειτουργία, το πιεζοηλεκτρικό κεραμικό χρησιμοποιείται ως ενεργοποιητής, δηλαδή, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια [1,5].

Εφαρμογές:

Τα κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε αισθητήρες (π.χ. μέτρηση πίεσης, δύναμης, κραδασμών κ.α.) και ενεργοποιητές, υλικά αναφοράς σε ψηφιακές εκτυπώσεις, ιατρικές συσκευές για διάγνωση και θεραπεία όπως υπερηχογράφοι, καθώς και σε στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή και την επεξεργασία ήχου και εικόνας. Παραδείγματα αυτών των εφαρμογών είναι οι αισθητήρες ήχου, μικρόφωνα και ηχεία. Η ικανότητά τους να λειτουργούν σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και η υψηλή τους ανθεκτικότητα στη φθορά τα καθιστούν ιδανικά για χρήση σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

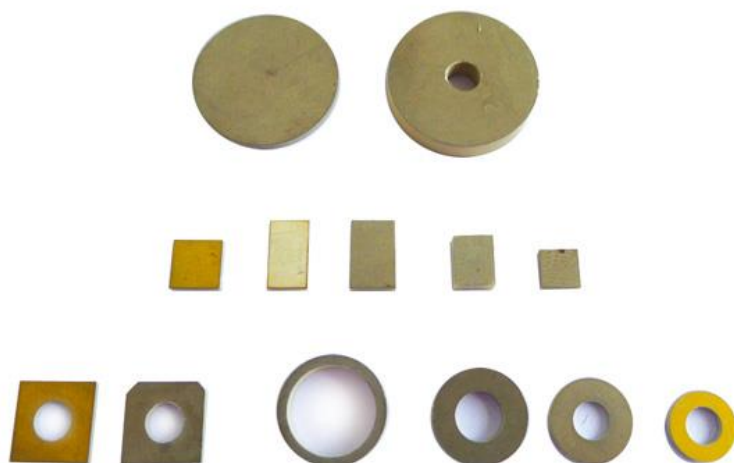
Πλεονεκτήματα:

- Εξαιρετική χημική αντοχή
- Ικανότητα λειτουργίας σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών
- Υψηλή πιεζοηλεκτρική απόκριση
- Υψηλή ευαισθησία
- Υψηλή τιμή g_{33}
- Χαμηλό κόστος για γενικές εφαρμογές

Προκλήσεις:

- Περιορισμένη ελαστικότητα
- Εύθραυστα
- Δυσκολία στην επεξεργασία και σχηματισμό λεπτομερών δομών
- Περιβαλλοντικοί προβληματισμοί (π.χ. χρήση μολύβδου)
- Πιθανή θραύση σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις
- Δυσκολία ελέγχου της πολικότητας
- Υψηλό κόστος παραγωγής για εξειδικευμένες εφαρμογές

Η έρευνα και ανάπτυξη νέων πιεζοηλεκτρικών κεραμικών υλικών είναι ένας ενεργός τομέας, με στόχο την βελτίωση των ιδιοτήτων και την ανάπτυξη νέων εφαρμογών. Αυτή η έρευνα εστιάζεται σε διάφορους τομείς όπως η βελτίωση ιδιοτήτων, για παράδειγμα η αύξηση του πιεζοηλεκτρικού συντελεστή για ισχυρότερη μετατροπή ενέργειας, ενίσχυση της μηχανικής αντοχής για ανθεκτικότητα σε δύσκολες συνθήκες και η βελτίωση της θερμοκρασιακής. Παράλληλα στοχεύει σε μείωση του κόστους και στην ανάπτυξη νέων υλικών όπως βιοσυμβατών υλικών για ιατρικές εφαρμογές και εμφυτεύσιμες συσκευές και η σύνθεση νανοδομών για βελτιωμένες ιδιότητες και λειτουργίες.



Εικόνα 5 Κεραμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά¹

¹ Πηγή: <http://gr.sinopiezo.net/piezoelectric-ceramics/piezoelectric-ceramic-material.html>

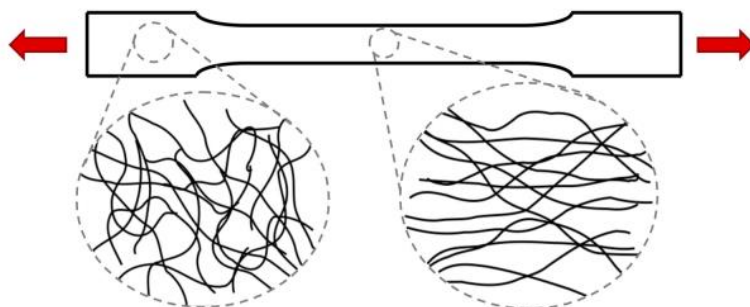
2.3.2 Πολυμερή Υλικά

Τα πολυμερή υλικά αποτελούν μία σημαντική κατηγορία εντός του ευρύτερου φάσματος των πιεζοηλεκτρικών υλικών, τα οποία διακρίνονται για την ικανότητά τους να μετατρέπουν μηχανική πίεση σε ηλεκτρική ενέργεια και αντιστρόφως. Αυτή η ιδιότητα τους καθιστά κρίσιμα για μια πληθώρα εφαρμογών, από την ηλεκτρονική και την ιατρική τεχνολογία μέχρι την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική. Τα πολυμερή υλικά, χάρη στην ευελιξία, την ελαφρότητα και την υψηλή αντοχή τους, προσφέρουν μοναδικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με πιο παραδοσιακά υλικά όπως τα κεραμικά και οι κρύσταλλοι. Γενικά, οι πιεζοηλεκτρικοί συντελεστές στα πολυμερή είναι μικρότεροι, αλλά τα υλικά είναι πιο εύκαμπτα και πιο εύκολα στην επεξεργασία. Τα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή δεν αντικαθιστούν τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, αλλά οι δύο ομάδες αλληλοσυμπληρώνονται.

Σύνθεση και Κατασκευή

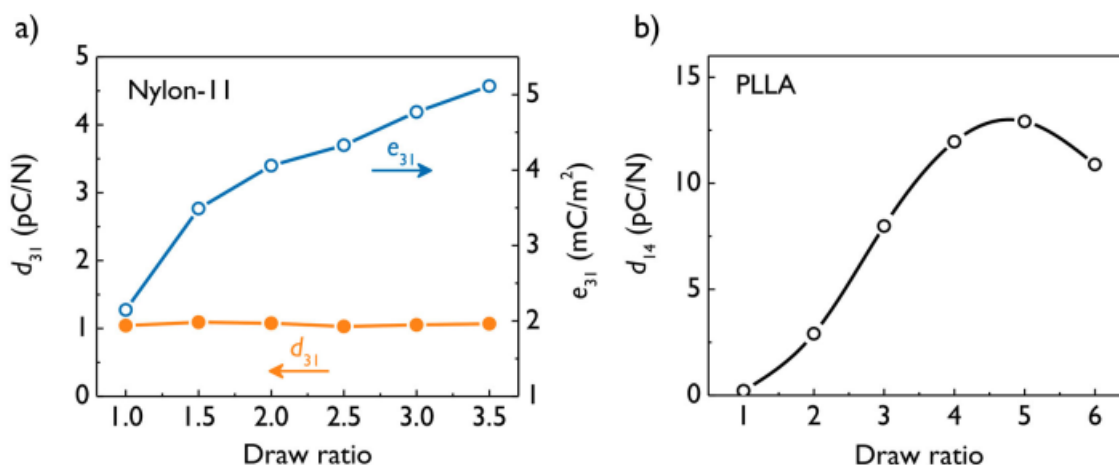
Σε γενικές γραμμές, ο πιεζοηλεκτρισμός προκύπτει λόγω της μετατόπισης ιόντων και ατόμων μέσα σε μη κεντροσυμμετρικές μοναδιαίες κυψέλες. Αυτή η διαισθητική περιγραφή λειτουργεί καλά για υλικά όπως τα κεραμικά τα οποία διαθέτουν κανονική κρυσταλλική δομή. Τα πολυμερή, ωστόσο, αποτελούνται από ένα δίκτυο μακρών μορίων. Ο πιεζοηλεκτρισμός στα πολυμερή συνδέεται στενά με τη μοριακή δομή και την ευθυγράμμιση. Τα πολυμερή πρέπει να στερούνται κέντρου συμμετρίας για να παρουσιάζουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Η κρυστάλλωση μπορεί δυνητικά να σπάσει αυτή τη συμμετρία, αλλά επειδή τα πολυμερή είναι ημικρυσταλλικά, η επίτευξη μη κεντροσυμμετρικής ευθυγράμμισης σε πολυμερή περιλαμβάνει πρόσθετη επεξεργασία πέραν της απλής κρυστάλλωσης. Αυτή η περαιτέρω επεξεργασία συναντάτε υπο την μορφή του «drawing» και του «polling».

Η διαδικασία «τραβήγματος» (drawing), η οποία περιλαμβάνει το τέντωμα του πολυμερούς, ευθυγραμμίζει τις πολυμερικές αλυσίδες κατά μήκος της διεύθυνσης τραβήγματος, δημιουργώντας την ανισοτροπία που είναι απαραίτητη για τον πιεζοηλεκτρισμό. Η διαδικασία αυτή επηρεάζει τόσο τις άμορφες όσο και τις κρυσταλλικές φάσεις εντός του πολυμερούς, ενισχύοντας την πιεζοηλεκτρική απόκριση του υλικού με την ευθυγράμμιση των κρυσταλλιτών και των πολυμερικών αλυσίδων.



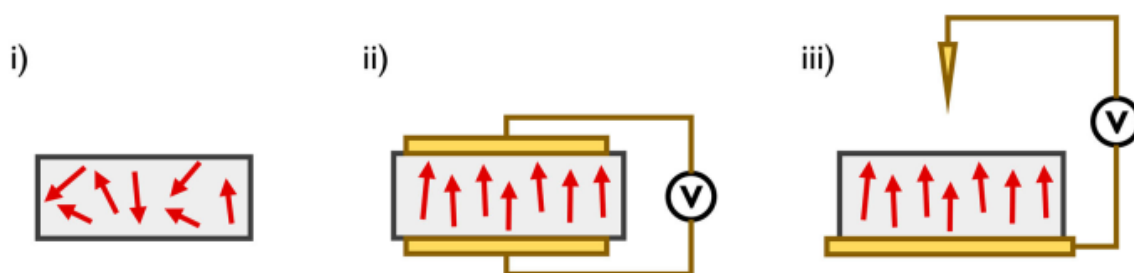
Εικόνα 6 Η διαδικασία του "τραβήγματος"²

Στην παρακάτω εικόνα (7a) παρατηρούμε την επίδραση του λόγου έλξης στους πιεζοηλεκτρικούς συντελεστές e_{31} και d_{31} του Nylon-11 που μετρήθηκαν στους 25°C. Ο λόγος έλξης έχει αμελητέα επίδραση στον συντελεστή d_{31} . Παρατηρείται ότι η έλξη αυξάνει το e_{31} λόγω αλλαγών στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Παράλληλα στην εικόνα (7b) βλέπουμε την επίδραση του λόγου έλξης στον πιεζοηλεκτρικό συντελεστή του PLLA. Παρατηρείται μέγιστο στο d_{14} σε λόγο έλξης ~5.



Εικόνα 7 Επίδραση λόγου έλξης στο N-11 και PLLA³

Μια άλλη μέθοδος επεξεργασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εισαγωγή ανισοτροπίας είναι η ηλεκτρική πόλωση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ένα μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στο υλικό για να ευθυγραμμιστούν τα δίπολα εντός της δομής. Σημειώστε ότι, γενικά, αυτό είναι δυνατό μόνο σε πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία είναι επίσης σιδηροηλεκτρικά, καθώς μόνο σε αυτά τα υλικά η πόλωση είναι αυθόρμητη και αναστρέψιμη. Σαν διαδικασία, είναι η αντίστοιχη που περιγράψαμε και για την περίπτωση των κεραμικών υλικών. Εν συντομία, η πόλωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με την τοποθέτηση ηλεκτροδίων απευθείας στην επιφάνεια του υλικού (5ii) ή μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως corona poling, κατά την οποία το δείγμα τοποθετείται κάτω από ένα αιχμηρό ηλεκτρόδιο και υποβάλλεται σε «εκκένωση κορώνας», όπως φαίνεται στην εικόνα (5iii). Η διαδικασία εφαρμόζεται συχνά καθώς το υλικό ψύχεται στο σημείο Curie, εξασφαλίζοντας ότι αυθόρμητη πόλωση είναι ευθυγραμμισμένη σε μία μόνο κατεύθυνση.



Εικόνα 8 Η διαδικασία του Poling [6]

Μια σημαντική πρόκληση που περιορίζει την ευρεία διάδοση εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών πολυμερών είναι η μειωμένη πιεζοηλεκτρικοί συντελεστές σε σύγκριση με τα κεραμικά υλικά. Έχουν αναφερθεί διάφορες μέθοδοι για την ενίσχυση της πιεζοηλεκτρικής απόκρισης των πολυμερών και αυτό παραμένει ενεργός τομέας έρευνας.

Εφαρμογές:

Τα πολυμερή πιεζοηλεκτρικά έχουν βρει εφαρμογές σε διάφορους τομείς λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα:

³ Πηγές [7] και [8]

Αισθητήρες αφής: Χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες αφής για εύκαμπτες ηλεκτρονικές συσκευές, προσφέροντας πίνακες αφής ευαίσθητους στην πίεση, οι οποίοι είναι κρίσιμοι για την ανάπτυξη τεχνολογιών αλληλεπίδρασης με τον χρήστη.

Συσκευές συλλογής ενέργειας (EH-electric harvesting): Η ικανότητά τους να μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική έχει αξιοποιηθεί στη συγκομιδή ενέργειας, καθιστώντας τα κατάλληλα για την τροφοδοσία μικρών συσκευών ή αισθητήρων από τις μηχανικές δονήσεις του περιβάλλοντος.

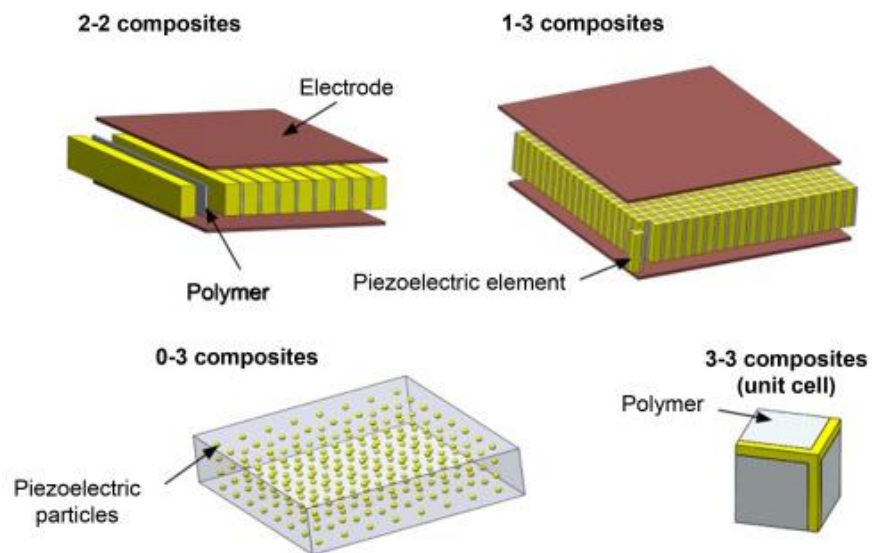
Βιολογικές εφαρμογές: Λόγω της βιοσυμβατότητας και της ευελιξίας τους, τα πολυμερή πιεζοηλεκτρικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές κυτταρικής καλλιέργειας, όπου επηρεάζουν και διεγείρουν την κυτταρική λειτουργία. Η εφαρμογή αυτή είναι σημαντική στην ιατρική έρευνα και την αναγεννητική ιατρική, καταδεικνύοντας τις δυνατότητες του υλικού στη δημιουργία βιο-διαδραστικών ικριωμάτων («σκελετών») και συσκευών.

Πλεονεκτήματα:

- Ευελιξία και ανθεκτικότητα: Τα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή, όπως το PVDF, είναι εύκαμπτα και μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορα σχήματα και επιφάνειες, καθιστώντας τα ευέλικτα για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των φορητών τεχνολογιών.
- Βιοσυμβατότητα: Είναι γενικά πιο βιοσυμβατά από τα αντίστοιχα κεραμικά τους, μειώνοντας την ανάγκη για πρόσθετες επιστρώσεις ή επεξεργασίες όταν χρησιμοποιούνται σε βιολογικά περιβάλλοντα.
- Χαμηλή ακουστική εμπέδηση: Η ακουστική σύνθετη αντίσταση πολυμερών όπως το PVDF ταιριάζει πολύ με εκείνη του νερού, καθιστώντας τα ιδανικά για υποβρύχιες εφαρμογές ή ως μετατροπείς υπερήχων στην ιατρική απεικόνιση.

Μειονεκτήματα:

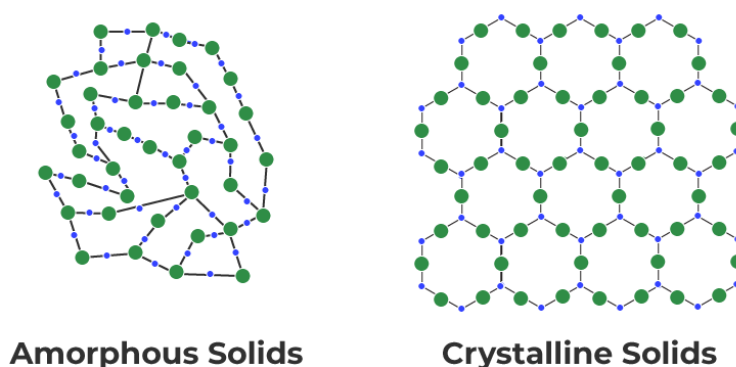
- Μειωμένοι πιεζοηλεκτρικοί συντελεστές: Αυτό μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητά τους σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές πιεζοηλεκτρικές αποκρίσεις.
- Ευαισθησία στη θερμοκρασία: Τα πολυμερή είναι γενικά πιο ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τις πιεζοηλεκτρικές τους ιδιότητες και τη σταθερότητά τους με την πάροδο του χρόνου.
- Περιορισμοί μηχανικής αντοχής: Ενώ η ευελιξία αποτελεί πλεονέκτημα, μπορεί επίσης να αποτελέσει περιορισμό σε εφαρμογές που απαιτούν υλικά με υψηλή μηχανική αντοχή. Τα πολυμερή πιεζοηλεκτρικά ενδέχεται να μην είναι σε θέση να ασκήσουν το ίδιο επίπεδο δύναμης με τα κεραμικά πιεζοηλεκτρικά.



Εικόνα 9 Δομή πολυμερών πιεζοηλεκτρικών[6]

2.3.3 Κρυσταλλικά Υλικά

Οι κρύσταλλοι ήταν τα πρώτα υλικά που ανιχνεύθηκε ότι διαθέτουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Όπως είδαμε και στην εισαγωγή, ο χαλαζίας αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης τόσο και των αδερφών Curie όπως και τον επόμενων ερευνητών. Ως κρυσταλλικά υλικά ορίζουμε αυτά που έχουν «τακτοποιημένη» και κρυσταλλική δομή όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 10 Άμορφη και κρυσταλλική δομή[9]

Εκτός από τον χαλαζία, άλλα φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι η ζάχαρη από ζαχαροκάλαμο, το αλάτι Rochelle, το τοπάζι, ο τουρμαλίνης, ακόμη και τα οστά.

Λειτουργία

Η λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων δεν διαφέρει σημαντικά από τα άλλα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι έχουν ισορροπημένο φορτίο με ασύμμετρη ατομική δομή. Όταν ασκείται μηχανική πίεση, η δομή παραμορφώνεται, ωθώντας το αρνητικό φορτίο στη μία πλευρά και το θετικό φορτίο στην άλλη. Αυτό είναι γνωστό ως άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι κρύσταλλοι με συμμετρική δομή δεν επηρεάζονται από την πίεση με αυτόν τον τρόπο και δεν είναι πιεζοηλεκτρικοί. Το φαινόμενο αυτό λειτουργεί και αντίστροφα - η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από εξωτερική πηγή μέσω πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων θα μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε ηχητικά κύματα. Αυτό είναι που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του σόναρ και ονομάζεται αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο [9].

Η διαδικασία είναι απλή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο που είναι αρκετά απλός. Για να μετατραπεί η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική (το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο), χρησιμοποιούνται μεταλλικές πλάκες για τη συμπίεση του κρυστάλλου. Η πίεση διαταράσσει την ατομική δομή και δημιουργεί ηλεκτρικό φορτίο το οποίο συλλέγεται από τις πλάκες. Περισσότερη πίεση σημαίνει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια.

Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο δημιουργείται όταν ο ισορροπημένος κρύσταλλος, τοποθετημένος και πάλι μεταξύ δύο μεταλλικών πλακών, φορτίζεται με ηλεκτρισμό. Αυτό ουσιαστικά αναγκάζει τον κρύσταλλο να συμπιεστεί, παραμορφώνοντας τη δομή του, η οποία απελευθερώνει ένα ηχητικό κύμα.

Εφαρμογές:

Κρυστάλλινα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε ωρολογιακές συσκευές, σενσόρες, φίλτρα συχνότητας, ηχεία, μικρόφωνα και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα. Επιπλέον, λόγω της υψηλής τους αντοχής σε θερμοκρασία και της μικρής τους απώλειας ενέργειας, είναι ιδιαίτερα προτιμώμενα σε βιομηχανικές και ερευνητικές εφαρμογές.

Πλεονεκτήματα:

Υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα

Εξαιρετική αντοχή σε θερμοκρασία και χημικά

Μικρή απώλεια ενέργειας σε δονήσεις

Μακροχρόνια αξιοπιστία και διάρκεια ζωής

Προκλήσεις:

Περιορισμένη ευελιξία σε σχεδιασμό και μορφή

Υψηλό κόστος παραγωγής για εξειδικευμένες εφαρμογές

Δυσκολία στην επεξεργασία και στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων

2.4 Σύγκριση πιεζοηλεκτρικών υλικών

Στις προηγούμενες ενότητες παρείχαμε μια ανάλυση της δομής, λειτουργίας, των εφαρμογών αλλά και πλεονεκτημάτων/προκλήσεων που χαρακτηρίζουν τα πιο κοινά πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σε αυτήν την ενότητα θα προσπαθήσουμε να συνθέσουμε μια άμεση σύγκριση των παραπάνω υλικών, ως προς την απόδοση, διάρκεια ζωής, κόστος κ.α.

Για την ανάλυση και συγκριτική των πιεζοηλεκτρικών υλικών, θα εστιάσουμε στα κεραμικά, τα πολυμερή και τα κρυσταλλικά υλικά, παρέχοντας πληροφορίες για την απόδοση, τη διάρκεια ζωής, το κόστος και άλλους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή τους για διάφορες εφαρμογές. Θα κλείσουμε με έναν πίνακα σύγκρισης για να διευκολύνουμε την κατανόηση των διαφορών και των ομοιοτήτων μεταξύ αυτών των υλικών.

Κεραμικά Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Απόδοση

Τα κεραμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως ο PZT (οξειδίο του μολύβδου-ζirkονίου-τιτανίου), έχουν υψηλή πιεζοηλεκτρική σταθερά και διηλεκτρική σταθερά, προσφέροντας εξαιρετική απόδοση σε εφαρμογές όπως αισθητήρες, ακτινοβολίες και ενεργειακοί μετατροπείς.

Διάρκεια Ζωής

Η διάρκεια ζωής των κεραμικών πιεζοηλεκτρικών υλικών μπορεί να επηρεαστεί από την κυκλική φόρτωση και την υγρασία. Παρ' όλα αυτά, με κατάλληλη συντήρηση και χρήση, μπορούν να έχουν μακρά διάρκεια ζωής.

Κόστος

Το κόστος των κεραμικών υλικών είναι σχετικά χαμηλό σε μαζική παραγωγή, αλλά η παραγωγή τους μπορεί να είναι περίπλοκη λόγω της ανάγκης για υψηλές θερμοκρασίες και συμπίεση.

Πολυμερή Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Απόδοση

Τα πολυμερή πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως το PVDF (φθορίδιο του πολυβινυλίου), προσφέρουν καλή πιεζοηλεκτρική απόδοση, ευελιξία και τη δυνατότητα να λειτουργούν σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Είναι ιδανικά για εφαρμογές όπου η ευελιξία και η ελαφρότητα είναι κρίσιμης σημασίας.

Διάρκεια Ζωής

Η διάρκεια ζωής των πολυμερών είναι συνήθως υψηλή, αλλά μπορεί να επηρεαστεί από την υπερβολική έκθεση σε UV ακτινοβολία και χημικά διαλύματα.

Κόστος

Το κόστος παραγωγής των πολυμερών είναι σχετικά χαμηλό και η διαδικασία είναι λιγότερο περίπλοκη σε σύγκριση με τα κεραμικά, κάτι που τα καθιστά οικονομικά ελκυστικά για μαζική παραγωγή.

Κρυσταλλικά Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Απόδοση

Κρυσταλλικά υλικά, όπως ο κουαρτς, έχουν υψηλή πιεζοηλεκτρική απόδοση και σταθερότητα, κάνοντάς τα ιδανικά για ακριβείς εφαρμογές όπως ρολόγια και συσκευές συχνότητας.

Διάρκεια Ζωής

Οι κρυσταλλικές δομές παρέχουν εξαιρετική διάρκεια ζωής και σταθερότητα, αντέχοντας σε σκληρές συνθήκες χωρίς σημαντική φθορά.

Κόστος

Το κόστος και η διαδικασία παραγωγής κρυσταλλικών πιεζοηλεκτρικών υλικών μπορεί να είναι υψηλότερο λόγω της ανάγκης για εξειδικευμένη καλλιέργεια και επεξεργασία των κρυστάλλων.

Πίνακας 1 Σύγκριση Πιεζοηλεκτρικών υλικών

Χαρακτηριστικό	Κεραμικά	Πολυμερή	Κρυσταλλικά
Απόδοση	Υψηλή	Καλή	Υψηλή
Διάρκεια Ζωής	Μεσαία έως υψηλή	Υψηλή	Εξαιρετικά υψηλή
Κόστος	Χαμηλό σε μαζική παραγωγή	Χαμηλό	Μεσαίο έως υψηλό
Ευελιξία	Χαμηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Θερμοκρασιακή Σταθερότητα	Υψηλή	Καλή	Εξαιρετικά υψηλή

3 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Όπως είναι ήδη φανερό από όσα συζητήσαμε έως τώρα, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αναφέρεται στην ικανότητα των υλικών να μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα, εξερευνώντας το μαγνητικό γεφύρωμα μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρονικής. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα διερευνήσουμε το ευθύ και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, παρέχοντας μια μαθηματική περιγραφή μέσω των κύριων πιεζοηλεκτρικών εξισώσεων και αναδεικνύοντας τις πρακτικές εφαρμογές σε τομείς όπως η ηλεκτρονική, η μηχανολογία, η ιατρική και η αυτοκινητοβιομηχανία. Επίσης, θα εξετάσουμε καινοτόμες εφαρμογές που αποδεικνύουν το δυναμικό του πιεζοηλεκτρισμού, ενισχύοντας την κατανόηση της αξίας και της σημασίας του στην σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία.

3.1 Το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

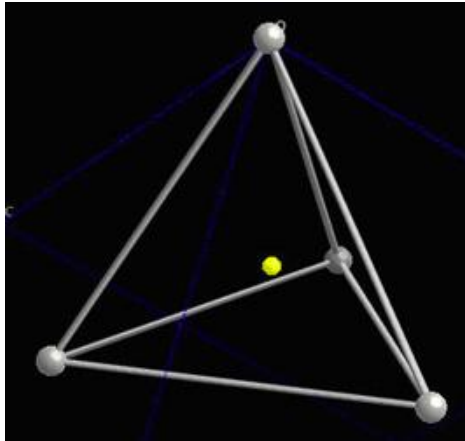
Η ενότητα 3.1 ανοίγει τον διάλογο για το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, μια διαδικασία όπου τα ειδικά υλικά μετατρέπουν τη μηχανική πίεση σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανικής δύναμης και ηλεκτρικής απόκρισης αποτελεί τη βάση για μια σειρά από εφαρμογές, από αισθητήρες μέχρι ακτινοβολίες και ενεργειακούς μετατροπείς. Σε αυτή την ενότητα, θα εξερευνήσουμε τις θεμελιώδεις φυσικές αρχές που υποκρύπτονται στο ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, διερευνώντας πώς η μηχανική ενέργεια που εφαρμόζεται σε αυτά τα υλικά μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Μέσα από αυτή την κατανόηση, θα αποκτήσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το πώς ο πιεζοηλεκτρισμός συνδέει την φυσική κόσμο με τον ηλεκτρονικό, ανοίγοντας νέους δρόμους στην τεχνολογική εξέλιξη και εφαρμογή.

Μηχανισμός ηλεκτρικής πόλωσης

Όπως έχουμε αναφέρει, ο πιεζοηλεκτρισμός προκύπτει λόγω της μετατόπισης ιόντων και ατόμων σε υλικά με μη κεντρική συμμετρία και πιο συγκεκριμένα αυτό που ονομάζουμε μη κεντροσυμμετρική κρυσταλλική δομή. Αυτή η δομή επιτρέπει τη δημιουργία εσωτερικών ηλεκτρικών πεδίων όταν εφαρμόζεται μηχανική πίεση. Αυτό το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της ασύμμετρης διάταξης των ιόντων στην κρυσταλλική πλέγμα, που προκαλεί την ανισορροπία φορτίου κατά την εφαρμογή εξωτερικής δύναμης [12].

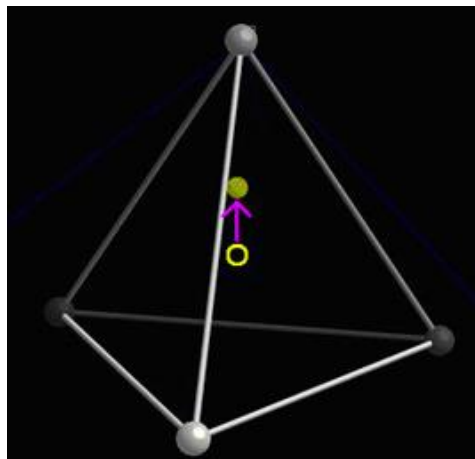
Πιο συγκεκριμένα, αυτή η ασυμμετρία σημαίνει ότι η χωρική διάταξη των ιόντων πυριτίου και οξυγόνου δεν διαθέτει συμμετρία αντιστροφής. Ως αποτέλεσμα, όταν εφαρμόζεται μηχανική καταπόνηση στον κρύσταλλο όπως πίεση, κάμψη ή τέντωμα, αυτή η ασύμμετρη δομή οδηγεί σε ανακατανομή των εσωτερικών φορτίων, δημιουργώντας ηλεκτρική πόλωση στο υλικό και κατά συνέπεια ηλεκτρισμό. Ουσιαστικά, η μηχανική παραμόρφωση οδηγεί σε διαχωρισμό των κέντρων θετικών και αρνητικών φορτίων, προκαλώντας μια ηλεκτρική διπολική ροπή [11]. Για να αναπτυχθεί μια καθαρή πόλωση, το σχηματιζόμενο δίπολο δεν πρέπει να ακυρώνεται από άλλα δίπολα στη μοναδιαία κυψελίδα, για αυτό τον λόγο απαιτείται να μην υπάρχει κεντροσυμμετρική δομή [12]. Αυτό μπορεί να φανεί στις ακόλουθες εικόνες.

θεωρήστε ένα απλό τετράεδρο:



Εικόνα 11 Ένα απλό τετράεδρο[11]

Όταν το κεντρικό άτομο κινείται, σχηματίζεται μια διπολική ροπή:



Εικόνα 12 Σχηματισμός διπολικής Ροπής[11]

Αναλογία φορτίου και μηχανικής τάσης

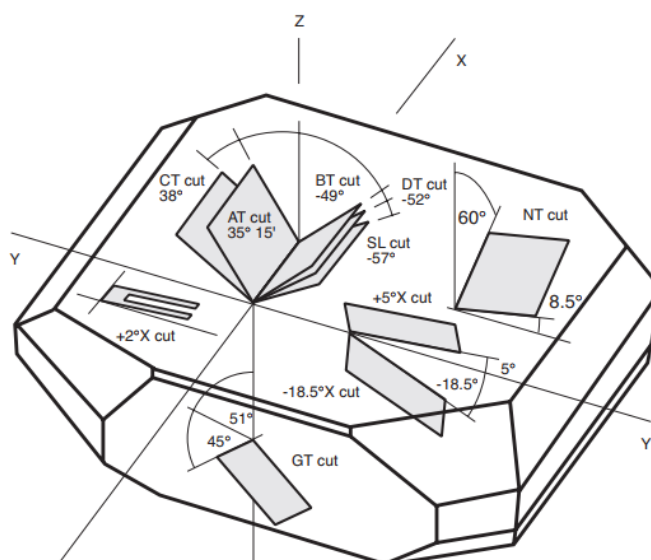
Το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφει τη δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου σε ορισμένες επιφάνειες ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού ως απόκριση σε εφαρμοζόμενη μηχανική τάση. Στο πλαίσιο του μονοκρυσταλλικού χαλαζία, όταν εφαρμόζεται μια εξωτερική δύναμη, παραμορφώνεται το κρυσταλλικό πλέγμα, οδηγώντας σε ανισορροπία φορτίου. Αυτή η ανισορροπία δεν είναι αυθαίρετη, αλλά σχετίζεται άμεσα με τη φύση της ασύμμετρης δομής του κρυστάλλου και τη διεύθυνση και το μέγεθος της εφαρμοζόμενης δύναμης. Το ηλεκτρικό φορτίο που παράγεται είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης, πράγμα που σημαίνει ότι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να ρυθμιστεί λεπτομερώς με βάση τη δύναμη που ασκείται στο υλικό. Η ιδιότητα αυτή αξιοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως συσκευές ελέγχου συχνότητας ακριβείας, όπου η ενέργεια δόνησης (μηχανική) του κρυστάλλου χαλαζία μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα πολύ συγκεκριμένης συχνότητας [10,12]. Το παραπάνω ορίζεται ως $D=dT$, όπου D είναι η πυκνότητα φορτίου, d η πιεζοηλεκτρική σταθερά (συντελεστής) και T η εξωτερική τάση.

Πιεζοηλεκτρικός Συντελεστής

Ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής, συμβολίζεται συνήθως με d , αναφέρεται στην ηλεκτρική πολικότητα που παράγεται ανά μονάδα εφαρμοσμένης μηχανικής πίεσης. Αυτός ο συντελεστής εκφράζει την άμεση σχέση μεταξύ της μηχανικής δύναμης που εφαρμόζεται στο πιεζοηλεκτρικό υλικό και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας μια κβαντική μέτρηση της απόδοσης του υλικού στη μετατροπή ενέργειας [12].

Προσδιορισμός Ιδιοτήτων του Πιεζοηλεκτρικού υλικού

Για διαφορετικές εφαρμογές, απαιτούνται πιεζοηλεκτρικά υλικά, με διαφορετικούς συντελεστές και χαρακτηριστικά. Ακόμα και στο ίδιο υλικό, μπορούμε να συναντήσουμε διαφορετικές συχνότητες δόνησης και ιδιότητες. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές «κοπές» που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή του κρυστάλλου. Σύμφωνα με μια έρευνα από TFC [10], η ειδική ακρίβεια ενός κρυστάλλου χαλαζία επιτυγχάνεται με την ακριβή κοπή γωνιών προσανατολισμένων προς τον κρυσταλλογραφικό άξονα. Αυτοί οι άξονες αναφέρονται στον άξονα Z, ο οποίος είναι ο οπτικός άξονας του κρυστάλλου. Έχουν αναπτυχθεί πολλές κοπές, συμπεριλαμβανομένων των AT, IT, BT, FC και SC και κάθε μία έχει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε διάφορες εφαρμογές [10].



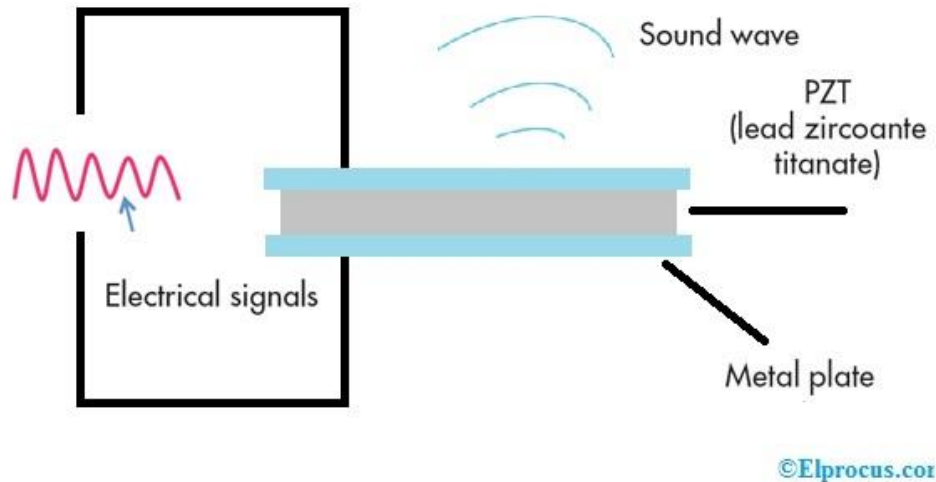
Εικόνα 13 Διάφορες "κοπές" κρυστάλλου χαλαζία [10]

3.2 Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Τα αντίθετα για ότι έχουμε συζητήσει μέχρι τώρα σαν μηχανισμό παραγωγής ηλεκτρισμού από μηχανική τάση, χαρακτηρίζουν το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Δηλαδή, ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζεται όταν επιβάλλεται ηλεκτρικό πεδίο στα πιεζοηλεκτρικά υλικά και το εσωτερικό κέντρο των θετικών φορτίων και το κέντρο των αρνητικών φορτίων υφίστανται μετατόπιση, αλλάζοντας κατ' επέκταση τις μορφολογικές ιδιότητες του υλικού.

Πιο συγκεκριμένα, όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, τα ηλεκτρικά φορτία (ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα) εντός του υλικού επηρεάζονται από το πεδίο και κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις, ανάλογα με την πολικότητα τους. Αυτή η κίνηση προκαλεί μια εσωτερική μηχανική παραμόρφωση λόγω της επανατοποθέτησης των ατόμων ή των ιόντων στην κρυσταλλική δομή του υλικού. Η εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί μια διατάραξη στην

κρυσταλλική δομή του πιεζοηλεκτρικού υλικού, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση (επέκταση ή συστολή) του υλικού. Αυτή η διατάραξη και η ακόλουθη παραμόρφωση είναι ανάλογες του μεγέθους και της κατεύθυνσης του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Η βασική αρχή του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου είναι η ηλεκτρομηχανική σύζευξη, η οποία επιτρέπει την μετατροπή της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια (μηχανική κίνηση). Η αποτελεσματικότητα της σύζευξης εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού και της δομής του, καθώς και από τις συνθήκες εφαρμογής του ηλεκτρικού πεδίου [9,12].



Εικόνα 14 Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο⁴

⁴ Πηγή: <https://www.elprocus.com/what-is-the-piezoelectric-effect-working-and-its-applications/>

3.2 Μαθηματικές Εξισώσεις

Έχουμε ήδη αναφέρει σε διάφορα σημεία τις εργασίας κάποιες από τις εξισώσεις που περιγράφουν με μαθηματικό τρόπο τις σχέσεις και την αλληλεπίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και δυνάμεων με τον ηλεκτρισμό. Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μια προσπάθεια συγκέντρωσης της σχετικής πληροφορίας, δηλαδή των συμβόλων, εξισώσεων και μαθηματικών εκφράσεων που περιγράφουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Ας ξεκινήσουμε την συγγραφή με ανάλυση και κατανόηση των βασικών συμβόλων.

Πιεζοηλεκτρικός Συντελεστής d : Μετρά την ηλεκτρική πολικότητα που παράγεται ανά μονάδα εφαρμοσμένης μηχανικής πίεσης ή την μηχανική παραμόρφωση ανά μονάδα εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου.

Διηλεκτρική σταθερά του υλικού ϵ : Αντιπροσωπεύει την ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια υπό τη μορφή ενός ηλεκτρικού πεδίου.

Ηλεκτρομηχανικός συντελεστής g : Είναι η αντίστροφη ιδιότητα του d και χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ηλεκτρική απόκριση υπό μηχανική διέγερση.

Ελαστικός συντελεστής s : Σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο, αντιπροσωπεύει την ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται σε μηχανικές παραμορφώσεις.

Μηχανική Παραμόρφωση S : Η αλλαγή στις διαστάσεις του υλικού υπό εφαρμοσμένη δύναμη.

Μηχανική Πίεση T : Δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που εφαρμόζεται στο υλικό.

Ηλεκτρικό Πεδίο E : Η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού ανά μονάδα απόστασης στο υλικό.

Ηλεκτρική πυκνότητα φορτίου D : Η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου ανά μονάδα όγκου στο υλικό.

Στην προηγούμενη ενότητα δώσαμε την απλοποιημένη έκφραση $D=dT$ που περιγράφει το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η πλήρης έκφραση ωστόσο είναι η: $D_i = d_{ijk} * T_{jk} + \epsilon_{ij} * E_j$ που περιγράφει ότι η ηλεκτρική πυκνότητα φορτίου D που παράγεται σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό εξαρτάται πέρα από τον πιεζοηλεκτρικό συντελεστή/εξωτερική πίεση αλλά και από ηλεκτρικό πεδίο/διηλεκτρική σταθερά. Φυσικά, εάν δεν υπάρχει κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο τότε ο δεύτερος όρος ισούται με μηδέν [10,12].

Αντίστοιχη εξίσωση δίνεται και για το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Συγκεκριμένα, η εξίσωση $S_{ij} = d_{kij} * E_k + s_{ijkl} * T_{kl}$ συνδέει την μηχανική παραμόρφωση S ενός υλικού με την πιεζοηλεκτρική σταθερά, το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται καθώς και την μηχανική τάση, η οποία αν είναι μηδενική, μηδενίζει με την σειρά της τον 2^ο όρο της πρόσθεσης. [10,12] Τα σύμβολα i,j,k,l υποδηλώνουν ότι πρόκειται για τους ταυιστές των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Ωστόσο, μέσω του συμβολισμού του Voigt οι σχέσεις αυτές μπορούν να απλοποιηθούν [6].

Για να περιγράψουμε το μέγεθος της πιεζοηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αντισταθεί τις σταθερές σύζευξης των ελαστικών ιδιοτήτων και των διηλεκτρικών ιδιοτήτων, ορίζεται ο συντελεστής

ηλεκτρομηχανικής σύζευξης, ο οποίος μπορεί να εκφραστεί ως εξής: $K = \sqrt{\frac{U_{12}^2}{u_1 u_2}}$

Όπου U_{12} είναι η πιεζοηλεκτρική ενέργεια, u_1 η ελαστική ενέργεια και u_2 η διηλεκτρική ενέργεια.

Συζητήσαμε επίσης πως ο μηχανισμός δημιουργίας ηλεκτρισμού βασίζεται στον σχηματισμό δίπολου ροπής και στο φαινόμενο της πόλωσης. Η πόλωση ορίζεται ως το δίπολο ροπής προς μονάδα όγκου:

$$P = \frac{\sum \mu}{V}$$

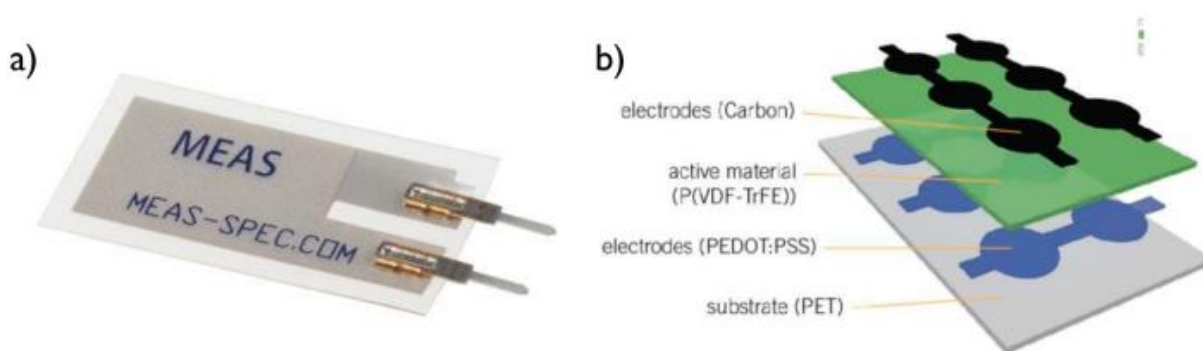
3.4 Εφαρμογές του Πιεζοηλεκτρισμού

Όπως πιθανό γίνεται ήδη αντιληπτό από τον αναγνώστη της παρούσας εργασίας, η τεχνολογία του πιεζοηλεκτρισμού βρίσκει πολλές εφαρμογές στην πράξη εφόσον δίνει εκπληκτικές ικανότητες που βασίζονται τόσο στο ευθύ όσο και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Σε αυτήν την ενότητα θα συγκεντρώσουμε τα πιο σημαντικά παραδείγματα εφαρμογής στην καθημερινή ζωή και τον σύγχρονο κόσμο.

3.4.1 Αισθητήρες

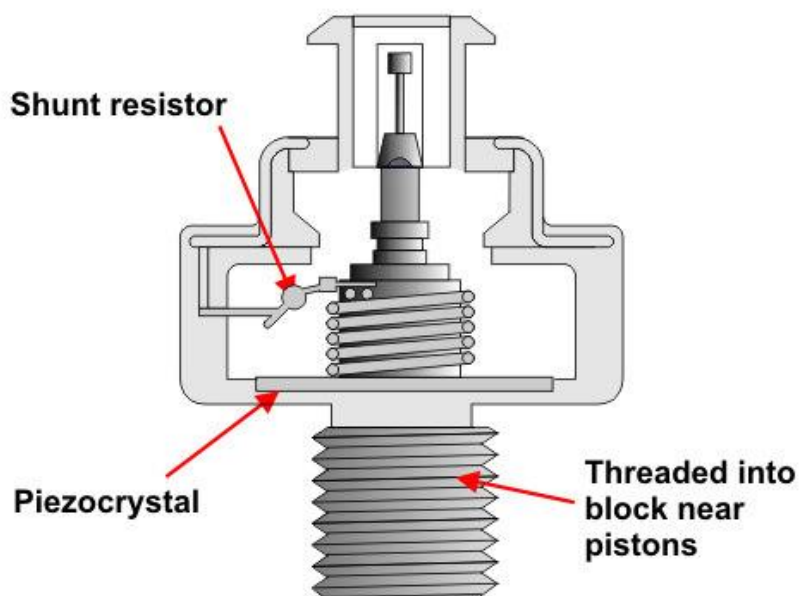
Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι συσκευές που χρησιμοποιούν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για να μετρήσουν αλλαγές σε διάφορες φυσικές παραμέτρους, όπως πίεση, δύναμη, θερμοκρασία, και ακουστική ενέργεια. Η ιδιότητα των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων, όταν καταπονούνται μηχανικά, να παράγουν τάση καθιστά τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς κατάλληλους για εφαρμογές ανίχνευσης. Σε σύγκριση με τους μετρητές καταπόνησης, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες προσφέρουν ανώτερο λόγο σήματος προς θόρυβο και καλύτερη απόρριψη θορύβου υψηλής συχνότητας. Επομένως, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι αρκετά κατάλληλοι για εφαρμογές που περιλαμβάνουν τη μέτρηση χαμηλών επιπέδων παραμόρφωσης. Είναι συμπαγείς, ενσωματώνονται εύκολα και απαιτούν μέτρια κυκλώματα επεξεργασίας σήματος.

Συγκεκριμένα, υπάρχουν αρκετά παραδείγματα που αποδεικνύουν τη χρήση των PVDF ως ενεργού υλικού σε αισθητήρες αφής. Αυτά τα συσκευές προορίζονται να λειτουργήσουν ως πίνακες αφής ευαίσθητοι στην πίεση για εύκαμπτες ηλεκτρονικές συσκευές. Συστοιχίες μονών ή πολλαπλών ηλεκτροδίων εναποτίθενται σε μεμβράνες πολωμένου PVDF για τη δημιουργία μιας δομής τύπου πυκνωτή παράλληλων πλακών, όπως φαίνεται στην εικόνα 15(β). Η δύναμη που εφαρμόζεται στον αισθητήρα μπορεί στη συνέχεια να παρακολουθείται ως φορτίο (ή τάση) σε αυτά τα ηλεκτρόδια.



Εικόνα 15 α) PVDF αισθητήρας και β) Συστοιχίες Μεμβρανών [6]

Στο κομμάτι της βιομηχανίας η παραπάνω τεχνολογία βρίσκει πληθώρα εφαρμογών. Μία από αυτές είναι ο αισθητήρας κτύπου κινητήρα. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο στο εσωτερικό του αισθητήρα κτυπήματος συντονίζεται για να ανιχνεύει τη συχνότητα κτυπήματος/εκρήξεων του κινητήρα. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ο αισθητήρας κτυπήματος αποτελείται από πιεζοκρυστάλλους, μια αντίσταση παράκαμψης και ένα σπείρωμα στο ένα άκρο του αισθητήρα, το οποίο επιτρέπει τη σπείρωση της συσκευής στο μπλοκ κοντά στα έμβολα.



Εικόνα 16 Αισθητήρας κτύπου κινητήρα⁵

Κατά τη διάρκεια της καύσης, ένα χτύπημα στο θάλαμο καύσης στέλνει μια δόνηση στους δακτυλίους σιλικόνης που είναι συνδεδεμένοι με τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους στον αισθητήρα χτυπήματος (με τη μορφή μηχανικής τάσης). Ο δακτύλιος σιλικόνης επιταχύνεται, αναγκάζοντας τον αισθητήρα κτυπήματος να παράγει μια ηλεκτρική τάση και ένα κύμα πίεσης μέσω του μπλοκ κυλίνδρων. Η τάση εξόδου από τον αισθητήρα κτύπου θα είναι υψηλή κατά τη διάρκεια ενός κτύπου στο σύστημα ανάφλεξης. Ένα τυπικό σήμα τάσης που παράγεται από τον αισθητήρα κρότου μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 300mV - 500mV. Οποιαδήποτε απόκλιση από τις αναμενόμενες τιμές υποδηλώνει πρόβλημα στον κινητήρα και ειδοποιεί τον οδηγό για την ενδεχόμενη βλάβη.

Μέτρηση θερμοκρασίας

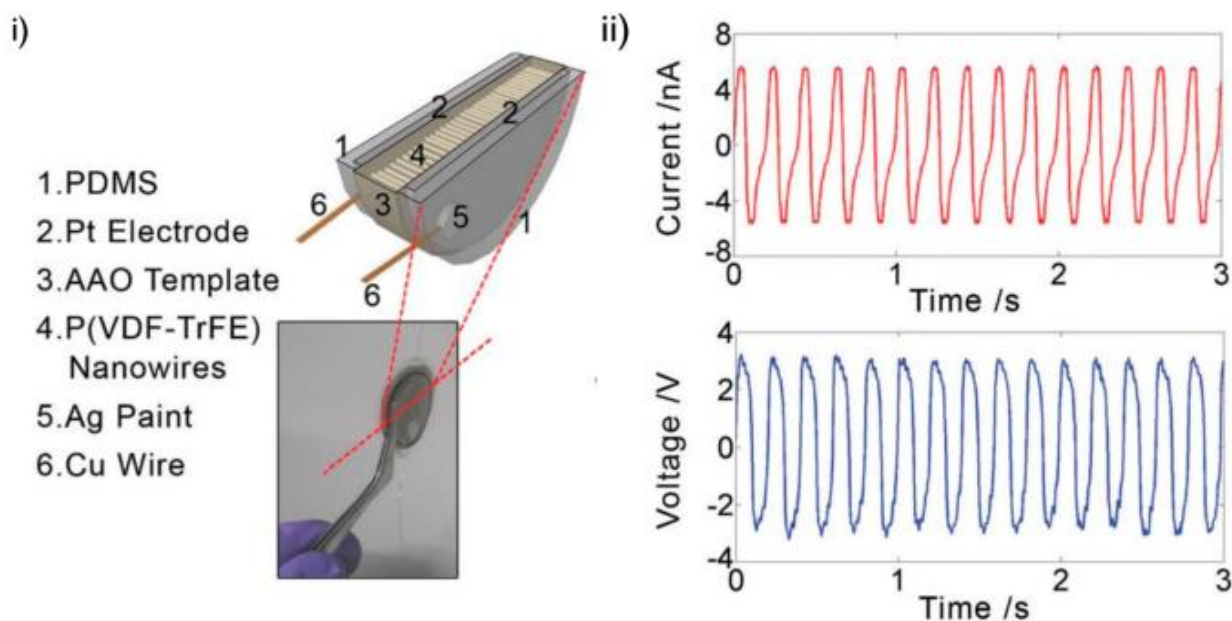
Μια άλλη ειδική κατηγορία πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων είναι οι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να αξιοποιήσουν τις αλλαγές στις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις για να μετρήσουν τη θερμοκρασία. Ωστόσο όπως έχουμε αναφέρει οι μεγάλες διακυμάνσεις τις θερμοκρασίας μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια του αισθητήρα και την εγκυρότητα των μετρήσεων, επομένως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην προσεκτική επιλογή των κατάλληλων υλικών όπως και στην ορθή βαθμονόμηση των οργάνων.

Ιδιαίτερος λόγος γίνεται για εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά που μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς αστοχία είναι επιθυμητά για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης ή/και τη μη καταστροφική αξιολόγηση των στροβίλων επόμενης γενιάς, των αποδοτικότερων κινητήρων τζετ, του ατμού και των πυρηνικών/ηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας. Στα άρθρα [17] και [18] περιγράφεται με λεπτομέρεια η επιλογή των κατάλληλων υλικών σε αυτές τις ειδικές εφαρμογές.

⁵ Πηγή: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=50>

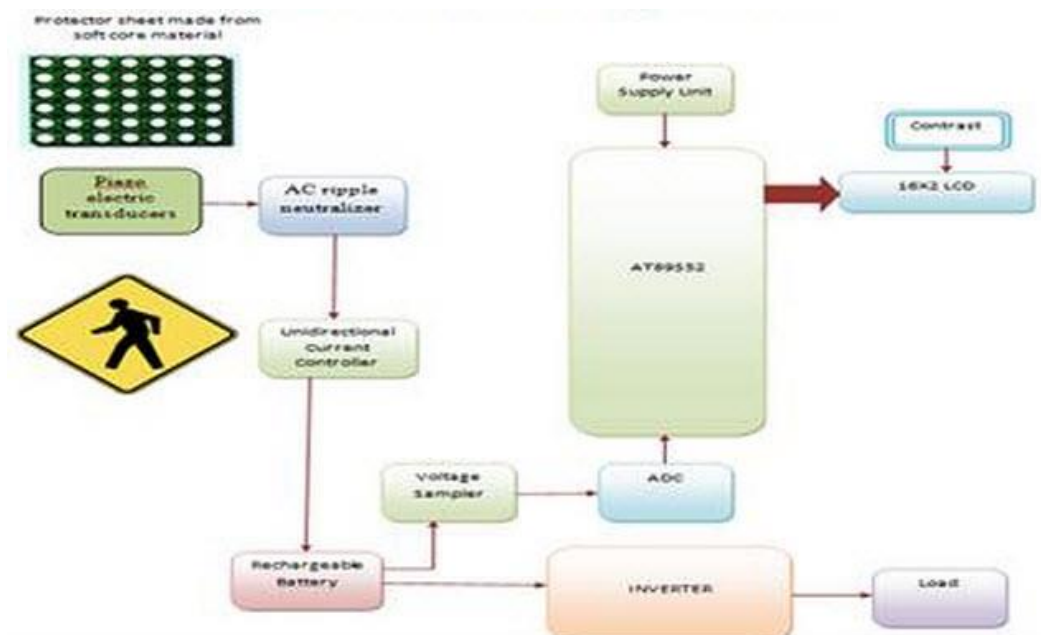
3.4.2 Συσκευές συλλογής ενέργειας

Γνωστές και ως EH (Energy Harvesting) Devices, είναι μια άλλη πολύ ενδιαφέρουσα πτυχή της αξιοποίησης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου [6]. Η EH περιγράφει την ιδέα της μετατροπής των «αποβλήτων» της ενέργειας όπως πχ των δομικών δονήσεων ή της κίνησης του σώματος, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για να κάνει κάποια χρήσιμη εργασία, όπως η τροφοδοσία ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων ή η φόρτιση της μπαταρίας μιας φορητής συσκευής. Μια μέθοδος μετατροπής μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας είναι η χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών: το μηχανικό ερέθισμα χρησιμοποιείται για την παραμόρφωση ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού, το οποίο στη συνέχεια πολώνεται και το προκύπτον ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετακίνηση φορτίου μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος.



Εικόνα 17 Πιεζοηλεκτρική διάταξη συλλογής ενέργειας [6]

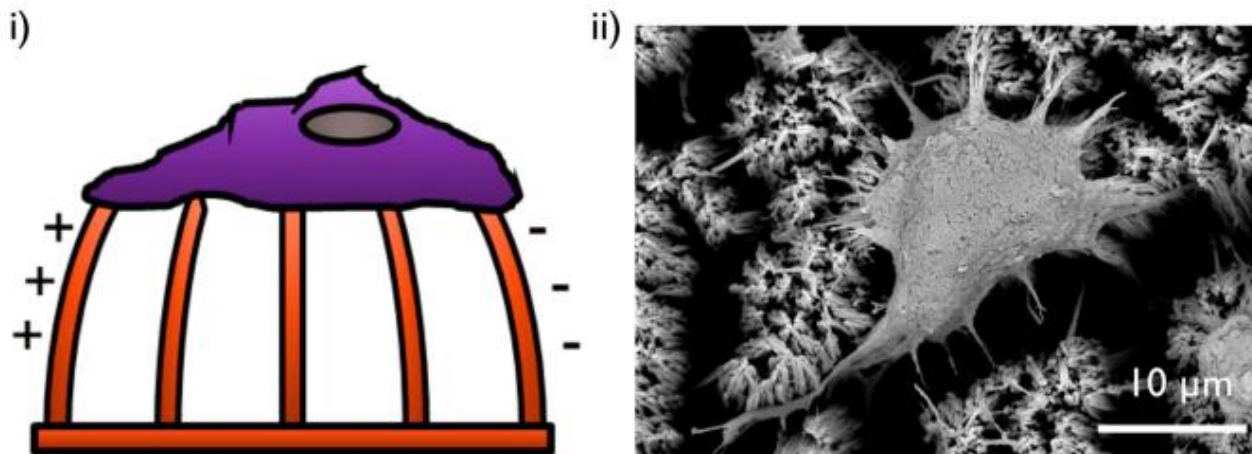
Μια πολύ ενδιαφέρουσα πρακτική εφαρμογή της παραπάνω τεχνολογίας, παρουσιάζεται από το Elprocus [14] και περιγράφει την δημιουργία και αποθήκευση ενέργειας από κάτι εξαιρετικά απλό και καθημερινό, όπως το περπάτημα. Αυτό το project προτείνει την παραγωγή τάσης χρησιμοποιώντας τη δύναμη του βήματος. Κάτι τέτοιο θα ήταν πολύ χρήσιμο σε δημόσιους χώρους όπως στάσεις λεωφορείων, θέατρα, σιδηροδρομικούς σταθμούς, εμπορικά κέντρα κ.λπ. όπου πολλοί άνθρωποι περπατούν ή στέκονται.



Εικόνα 18 Block διάγραμμα της προτεινόμενης εφαρμογής παραγωγής ηλ. ενέργειας απο το περπάτημα [14]

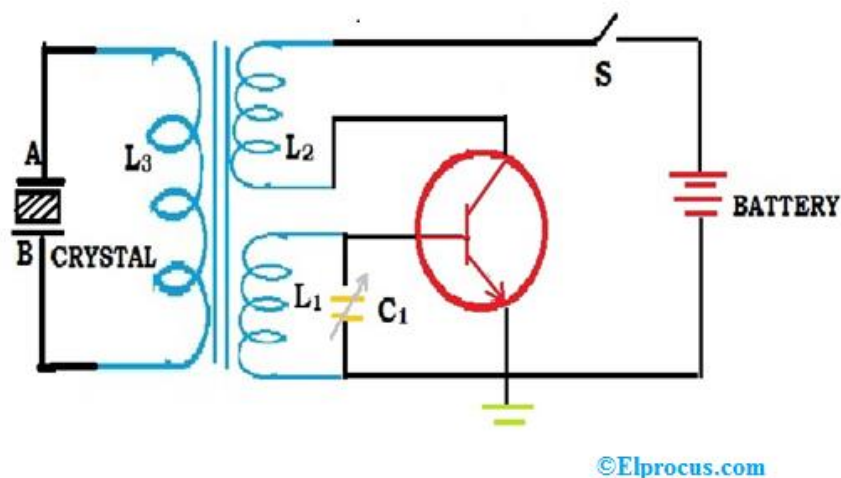
3.4.3 Βιολογικές και Ιατρικές Εφαρμογές

Παραδόξως, ένας μεγάλος αριθμός βιολογικών υλικών είναι τα ίδια πιεζοηλεκτρικά, καθώς το φαινόμενο παρατηρείται στο ξύλο, στα οστά, στους τένοντες, στο δέρμα, στο DNA και σε αμέτρητα άλλα φυσικά υλικά. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη μελέτη του τρόπου με τον οποίο τα τεχνητά πιεζοηλεκτρικά υλικά επηρεάζουν και διεγείρουν την κυτταρική λειτουργία. Η κατανόηση και η ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι επομένως επίσης σημαντική για την υψηλού επιπέδου, θεμελιώδη έρευνα στις φυσικές και βιολογικές επιστήμες [13]. Κατά την τελευταία δεκαετία, υπήρξε μια τεράστια αύξηση στη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών σε εφαρμογές κυτταροκαλλιέργειας. Εν συντομία, τα κύτταρα καλλιεργούνται πάνω σε πιεζοηλεκτρικά υλικά και παρακολουθούνται πτυχές της συμπεριφοράς τους. Οι παρατηρήσεις αυτές συγκρίνονται στη συνέχεια με εκείνες από μη πιεζοηλεκτρικές επιφάνειες για να εξαχθεί η επίδραση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Συνήθως, τα κύτταρα καλλιεργούνται απευθείας πάνω σε ικρίσματα κατασκευασμένα από πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, πολυμερή ή σύνθετα των δύο υλικών όπου ένα ή και τα δύο συστατικά μπορεί να είναι πιεζοηλεκτρικά. Τα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή έχουν ορισμένα διακριτά πλεονεκτήματα σε αυτές τις εφαρμογές κυτταροκαλλιέργειας. Πρώτον, τα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή θεωρούνται γενικά πιο βιοσυμβατά από τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά. Απαιτούνται λιγότερες επικαλύψεις και συγκολλητικοί παράγοντες, αν απαιτούνται, και επομένως το βιολογικό υλικό μπορεί να βρίσκεται σε άμεση επαφή με το πιεζοηλεκτρικό υλικό, αυξάνοντας την επίδραση του πιεζοηλεκτρικού φορτίου. Πολλά πιεζοηλεκτρικά πολυμερή είναι επίσης βιοαποικοδομήσιμα, δημιουργώντας τη δυνατότητα για μεταβατικές πιεζοηλεκτρικές διατάξεις. Δεύτερον, τα πολυμερή είναι συνήθως πιο μαλακά, πιο εύκαμπτα και πιο ανθεκτικά από τα κεραμικά υλικά. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε εφαρμογές κυτταροκαλλιέργειας [13].



Εικόνα 19 i) Πιεζοηλεκτρική επιφάνεια καλλιέργειας κυττάρων ii) Ανθρώπινος ιστός αναπτυσσόμενος μεταξύ πιεζοηλεκτρικών PLLA [13]

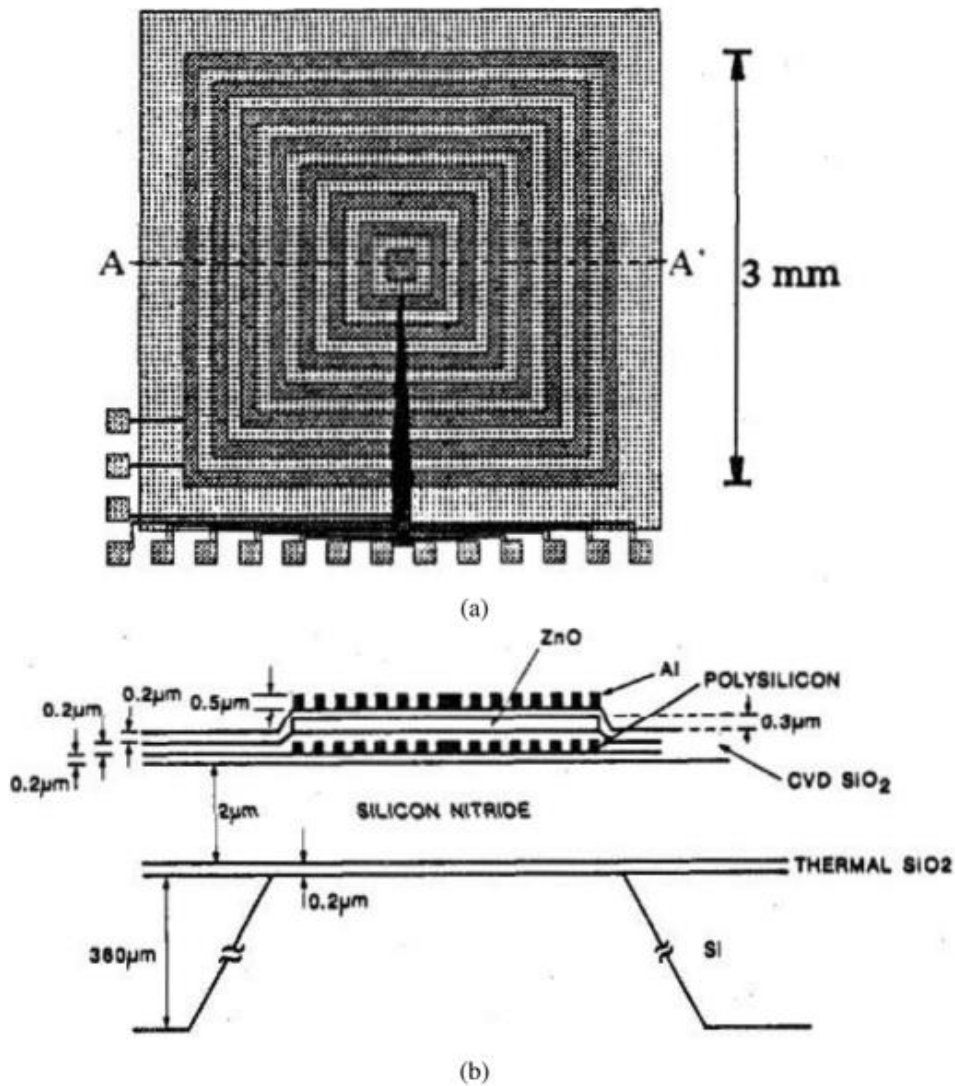
Πέρα από το κομμάτι των βιολογικών εφαρμογών και κυτταρικής ανάπτυξης, οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς (transducers) κατακλύζουν την ιατρική κοινότητα σε ιατρικά μηχανήματα απεικόνισης με λειτουργία υπερήχων. Ο υπερηχητικός πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας λειτουργεί με βάση την αρχή του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, όπως το έχουμε ήδη εξετάσει ενδελεχώς. Το κύκλωμα του μετατροπέα υπερήχων δίνεται παρακάτω.



Εικόνα 20 Πιεζοηλεκτρικός Μετατροπέας Υπερήχων

3.4.4 Ακουστικοί Αισθητήρες και Μικρόφωνα

Η πιεζοηλεκτρική απόκριση σε ακουστικές πιέσεις καθιστά τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ιδανικά για χρήση σε μικρόφωνα και άλλους ακουστικούς αισθητήρες, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια και ανταπόκριση σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Όταν ένα ηχητικό κύμα πλήττει την επιφάνεια ενός πιεζοηλεκτρικού μικροφώνου, το πιεζοηλεκτρικό υλικό υφίσταται μηχανική πίεση, που με τη σειρά της παράγει ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό το φορτίο συλλέγεται από ηλεκτρόδια και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, αντιπροσωπεύοντας τον ήχο. [16] Η ανάπτυξη νανομεγεθών, ελαφρών, χαμηλής ισχύος, φθηνών και συμπαγών συσκευών ECM καθίσταται δυνατή με τη βοήθεια της τεχνολογίας των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS).



Εικόνα 21 Μικρόφωνο ZnO MEMS (α) Άνω όψη ομόκεντρων ηλεκτροδίων (β) Διατομή του αισθητήρα [16]

Σύμφωνα με [16] η αγορά μικροφώνων MEMS καθοδηγείται κυρίως από τα κινητά τηλέφωνα, με την κατανάλωση μικροφώνων ανά smartphone να αυξάνεται από το 2010. Εκτός από τα smartphones, τα μικρόφωνα MEMS αποκομίζουν σημαντικά έσοδα από τη χρήση τους σε ακουστικά, φορητούς υπολογιστές, ακουστικά βαρηκοΐας και έξυπνα ηχεία κ.α. Με τα εγγενή πλεονεκτήματα της υψηλότερης πυκνότητας απόδοσης, της συμβατότητας με κυκλώματα μικροεπιπέδου, της σταθερότητας θερμοκρασίας, της δυνατότητας συγκόλλησης με επαναρροή και της χαμηλότερης ευαισθησίας σε κραδασμούς σε σύγκριση με τους συμβατικούς αισθητήρες ECM, τα μικρόφωνα MEMS γίνονται πολλά υποσχόμενα.

Το 2007, οι Horowitz et al. παρουσίασαν ένα πρώτο πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο MEMS σχεδιασμένο ειδικά για αεροακουστικές εφαρμογές. Ανέφεραν ένα μικρόφωνο με κυκλικό διάφραγμα που χρησιμοποιεί υλικό PZT μεταξύ ηλεκτροδίων Ti/Pt. Αυτή η πιεζοηλεκτρική στοιβά υποστηρίζεται από στρώμα πυριτίου, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:

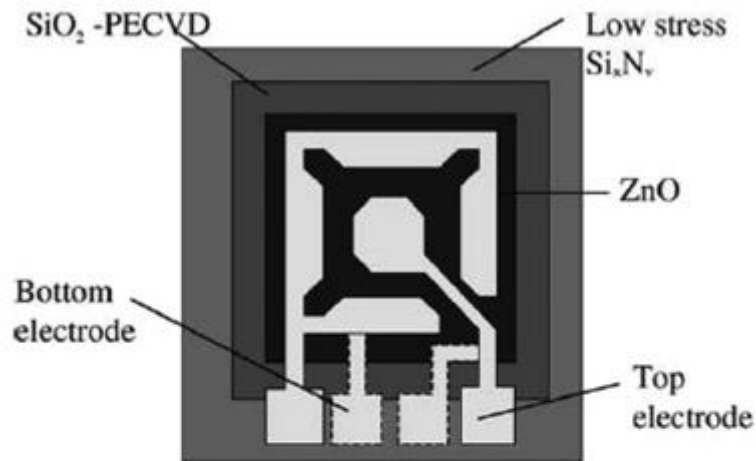
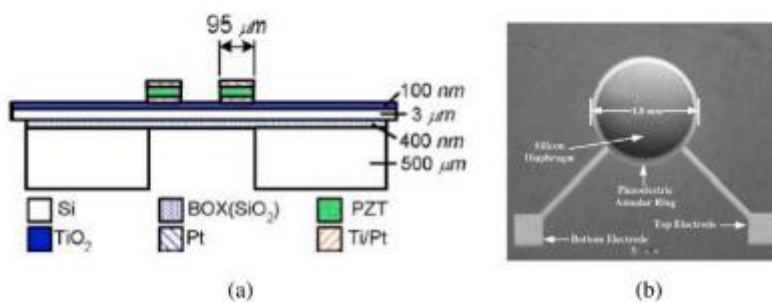


Fig. 7. A schematic view of acoustic device using segmented electrode [59].



Εικόνα 22 PZT Μικρόφωνο για αεροακουστικές εφαρμογές (α) σχηματικό διάγραμμα διατομής (β) κατασκευασμένη διάταξη [16]

Περισσότερες πληροφορίες, σύγκριση διάφορων υλικών στην εξειδικευμένη εφαρμογή των αεροακουστικών μικροφώνων παρέχονται στο [15] και [16].

Τα πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα επομένως βασίζονται στο ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Σε αντίθεση, οι συσκευές παραγωγής ήχου στηρίζονται στο αντίστροφο φαινόμενο. Έτσι σε εφαρμογές όπως κινητά τηλέφωνα, ακουστικά, παιχνίδια, buzzers κ.α τα πιεζοηλεκτρικά υλικά δονούνται και παράγουν ήχο.

4 Απόσβεση Ταλαντώσεων

Όταν αναφερόμαστε στην απόσβεση ταλαντώσεων στον τομέα του πιεζοηλεκτρισμού, μιλάμε για τη διαδικασία μείωσης ή εξάλειψης των ανεπιθύμητων μηχανικών δονήσεων σε διάφορες δομές και συστήματα, χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά υλικά ή συστήματα. Αυτή η διαδικασία έχει ζωτική σημασία σε πολλές εφαρμογές όπου οι δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν φθορά, να μειώσουν την αποδοτικότητα, ή ακόμα και να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των δομών και των ανθρώπων. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργοί αποσβεστήρες ταλαντώσεων με τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας των ταλαντώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μπορεί να διασκορπιστεί ασφαλώς ή να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση. Αυτή η διαδικασία απόσβεσης είναι εφικτή χάρη στην αντίστροφη λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, δηλαδή την ικανότητα των πιεζοηλεκτρικών υλικών να παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν υπόκεινται σε μηχανική πίεση ή παραμόρφωση. Η συγγραφή του κεφαλαίου έχει βασιστεί σε μεγάλο βαθμό στο βιβλίο «Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping» [1] των Reza Moheimani και Andrew J. Fleming.

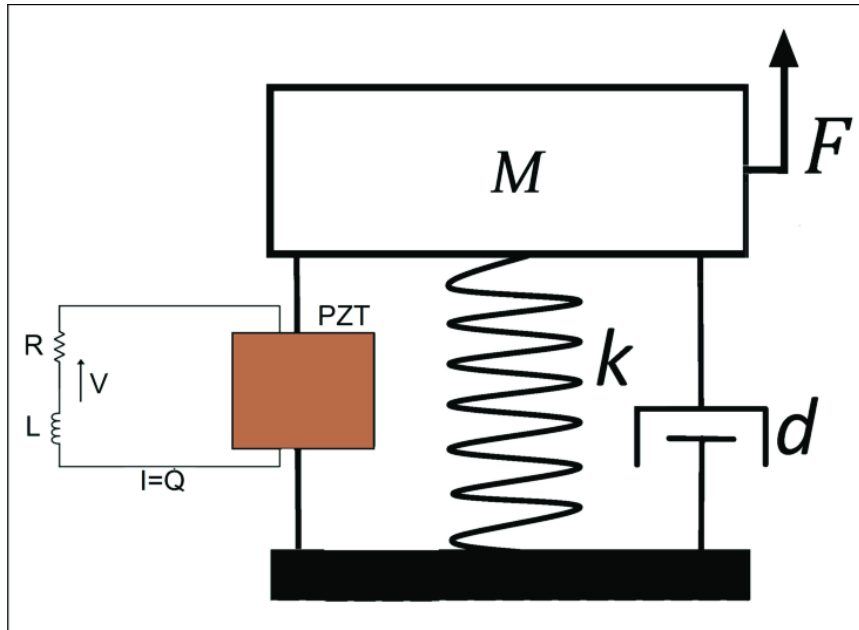
4.1 Εισαγωγικά

Διαχείριση Κραδασμών

Η ευρεία χρήση των πιεζοηλεκτρικών στην διαχείριση δονήσεων μπορεί να αποδοθεί στις εξαιρετικές ικανότητες ενεργοποίησης και ανίχνευσης που απορρέουν από τον υψηλό συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης, καθώς και στη μη παρεμβατική φύση τους. Για σκοπούς ελέγχου των κραδασμών, οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς συνδέονται ή ενσωματώνονται σε μια σύνθετη δομή [19]. Ο τύπος των δομών που προσφέρονται για πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς είναι γενικά εύκαμπτος στη φύση. Οι συναρτήσεις μεταφοράς αυτών των συστημάτων είναι υψηλής τάξης και οι πόλοι τους έχουν πολύ μικρή απόσβεση. Τα προβλήματα ελέγχου που σχετίζονται με αυτά τα συστήματα δεν είναι καθόλου ασήμαντα [1].

Piezoelectric Shunt Damping

Το "Piezoelectric Shunt Damping" αναφέρεται σε μια τεχνική απόσβεσης ταλαντώσεων που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικά υλικά σε συνδυασμό με ηλεκτρικά κυκλώματα (shunts) για να μειώσει ή να εξαλείψει τις ανεπιθύμητες μηχανικές δονήσεις σε δομικά στοιχεία ή συστήματα. Η βασική ιδέα πίσω από αυτή την τεχνική είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας των δονήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και η επακόλουθη διαχείριση αυτής της ενέργειας μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος (shunt) για την απόσβεση των δονήσεων. Στην τεχνική αυτή το δίκτυο, μαζί με την εγγενή χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα, συντονίζεται στη συχνότητα συντονισμού της δομής που πρόκειται να αποσβεστεί [1,19]. Στο σημείο αυτό γίνεται η διάκριση απόσβεσης μονού και πολλαπλού τρόπου. Η απόσβεση μονού τρόπου μπορεί να εφαρμοστεί για τη μείωση των δονήσεων πολλών δομικών τρόπων με τη χρήση τόσων πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων και κυκλωμάτων απόσβεσης. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, αυτό μπορεί να μην είναι μια πρακτική λύση, δεδομένου ότι θα χρειαστεί μεγάλος αριθμός μετατροπέων εάν πρόκειται να αποσβεστεί ένας μεγάλος αριθμός δονήσεων. Αυτό ενθάρρυνε τους ερευνητές να αναπτύξουν κυκλώματα απόσβεσης πολλαπλών τρόπων λειτουργίας (παραδιακλαδώσεις πολλαπλών ιδιομορφών) που χρησιμοποιούν μόνο έναν πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα.



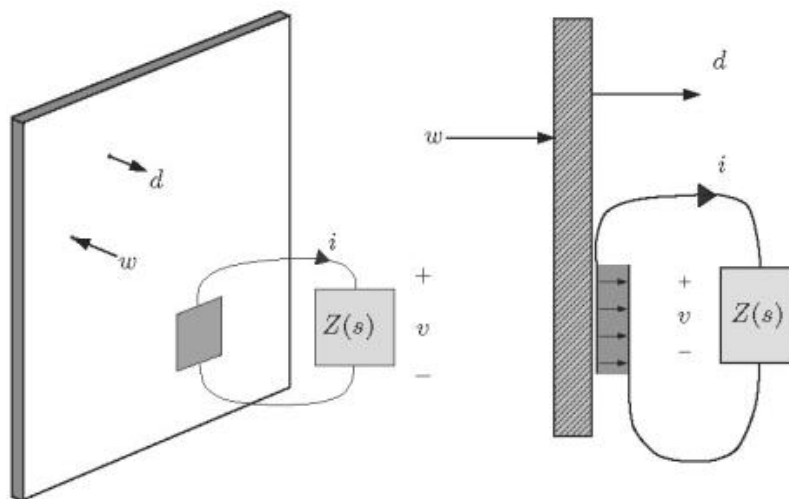
Εικόνα 23 Η έννοια του πιεζοηλεκτρικού ελέγχου για τον έλεγχο δονήσεων μηχανικών συστημάτων [19]

Καθυστέρηση

Η υπόθεση που έχει γίνει μέχρι στιγμής ήταν ότι οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς είναι γραμμικές διατάξεις που μεταδίδουν ενέργεια μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών περιοχών, όπου ο μηχανισμός σύζευξης διέπεται από μια γραμμική σχέση που περιγράφεται από τα πρότυπα IEEE για τον πιεζοηλεκτρισμό. Ενώ αυτό είναι γενικά αληθές σε χαμηλότερες κινήσεις όταν οδηγούνται από ενισχυτή τάσης, σε υψηλότερες κινήσεις οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά γνωστή ως υστέρηση. Η ύπαρξη υστέρησης στα πιεζοηλεκτρικά υλικά αποδίδεται γενικά στην υπολειπόμενη ισοκατανόηση των κρυσταλλικών κόκκων στο πολωμένο κεραμικό. Η ύπαρξη υστέρησης έχει αποδειχθεί ότι έχει αρνητική επίδραση στη σταθερότητα και την απόδοση κλειστού βρόχου των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών ελεγχόμενων με τάση.

4.2 Απόσβεση Ταλαντώσεων μέσω διακλαδώσεων

Όπως αναφέραμε, η απόσβεση κραδασμών και ταλαντώσεων μέσω πιεζοηλεκτρικών διακλαδώσεων (piezoelectric shunt dampening) είναι μια δημοφιλής τεχνική για την καταστολή κραδασμών σε έξυπνες κατασκευές. Όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα, οι τεχνικές που περιλαμβάνονται σε αυτή την ευρεία περιγραφή χαρακτηρίζονται από τη σύνδεση μιας ηλεκτρικής αντίστασης σε έναν δομικά συνδεδεμένο πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα.

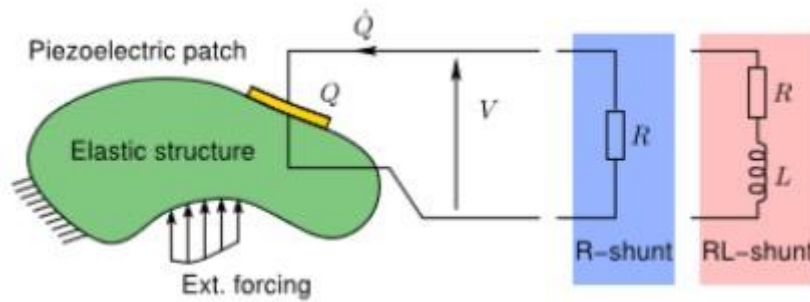


Εικόνα 24 Δομή πιεζοηλεκτρικού ελάσματος που διαταράσσεται από εξωτερική δύναμη w [1]

Αυτή η μέθοδος περιγράφει την ενσωμάτωση ενός ηλεκτρονικού συστατικού, όπως μια αντίσταση, σε συνδυασμό με ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο τοποθετημένο σε έναν μηχανισμό. Αυτή η διαδικασία δεν χρειάζεται πρόσθετους αισθητήρες και, όταν εφαρμοστεί σωστά, εξασφαλίζει ότι το σύστημα θα παραμείνει σταθερό. Μέσω αυτής της τεχνικής, το ηλεκτρικό κύκλωμα και η χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού υλικού ρυθμίζονται να συμφωνούν με την συχνότητα που πρέπει να αποσβεστεί. Οι λεγόμενες τεχνικές «παραδιακλάδωσης» έχουν αποτελέσει αντικείμενο εντατικής ερευνητικής προσοχής τα τελευταία χρόνια. Οι κυκλώματα απόσβεσης που χρησιμοποιούν πηνία, πυκνωτές και αντιστάσεις είναι σχετικά απλά στον σχεδιασμό τους και μπορούν να βελτιώσουν δραματικά την απόσβεση σε δομές που είναι εύκαμπτες και ελαστικές.

4.2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η αρχική εφαρμογή ενός κυκλώματος πολλαπλής διακλάδωσης για την απόσβεση πολλαπλών δονήσεων αναπτύχθηκε από τον Hollkamp. Αυτή η καινοτομία κατάφερε να μειώσει εντυπωσιακά τις δονήσεις στη δεύτερη και τρίτη συχνότητα δικής τους μορφής μιας δοκού, μείωση 19 και 12 dB αντιστοίχως. Για την επίτευξη αυτού του αποτελέσματος, το σύστημα χρησιμοποιεί πολλαπλούς παράλληλους κλάδους, ανάλογα με τον αριθμό των δονήσεων που απαιτείται να ελεγχθούν. Ο Hollkamp προσφέρει μια μέθοδο αριθμητικής βελτιστοποίησης για την εύρεση των ιδανικών τιμών που θα ρυθμίσουν το κύκλωμα, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή απόσβεση. Ωστόσο, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει είναι μη γραμμικό και περίπλοκο, κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα δύσκολο στην επίλυση, ειδικά όταν ασχολείται με μεγάλο αριθμό δονήσεων. [1]



Εικόνα 25 Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα σε αντίσταση ή συντονισμένη παραδιακλάδωση⁶

Στις αρχές της δεκαετίας του '90, Hagood και Von Flotow παρουσίασαν μια πρωτοποριακή έρευνα [20], εισάγοντας τις τεχνικές R- και RL-shunt. Αυτή η έρευνα εμπνεύστηκε από μια προηγούμενη ιδέα [21] και σκιαγραφεί δύο κυκλώματα που λειτουργούν ως ηλεκτρικά αντίστοιχα ενός αποσβεστήρα Lanchester για την αντιστατική απόσβεση και ενός συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας (ή αποσβεστήρα Frahm)[22] για την συντονισμένη απόσβεση. Οι ερευνητές απέδειξαν ότι ένα πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα διακλάδωσης, που αποτελείται από ένα πηνίο και μια αντίσταση, αντιστοιχεί στην λειτουργία ενός συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας (TMD). Αυτή η συντονισμένη διακλάδωση, η οποία είναι πιο πολύπλοκη από την απλή αντιστατική διακλάδωση, κατορθώνει να μειώσει σημαντικά τις δονήσεις όταν επιτυγχάνεται ηλεκτρικός συντονισμός σε μια από τις φυσικές συχνότητες της δομής που εξετάζεται. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου μπορεί να διευρυνθεί σε ευρύτερες κατασκευές με τη χρήση πολλαπλών πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων [23,24]. Ακολούθησαν πολλές προτάσεις για βελτιώσεις και διαφορετικές παραλλαγές της αρχικής ιδέας, εμπλουτίζοντας τον τομέα της απόσβεσης ταλαντώσεων.

Σε πρώιμες μελέτες των Hagood και Von Flotow, εξερευνήθηκαν διαφορετικές διατάξεις αντιστατών και επαγωγών, είτε παράλληλα είτε σε σειρά, όπως αναφέρεται στις αναφορές [25] και [26]. Η ρύθμιση ενός RL-shunt αποδείχθηκε ότι απαιτεί σημαντικά μεγάλη αυτεπαγωγή, πράγμα που έκανε την προσέγγιση λιγότερο βιώσιμη για την αντιμετώπιση συνηθισμένων μηχανικών συχνοτήτων. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, κάποιες μελέτες πρότειναν την ενσωμάτωση πρόσθετης χωρητικότητας προκειμένου να μειωθεί η απαιτούμενη αυτεπαγωγή, παρά το γεγονός ότι αυτό οδηγούσε σε μείωση της αποτελεσματικότητας απόσβεσης [27].

Αντίστοιχα, η χρήση αρνητικής χωρητικότητας πρότεινε μια εναλλακτική για την ενίσχυση της απόσβεσης, αν και αυτή η προσέγγιση απαιτούσε ενεργές συνθήκες που μπορεί να είναι ασταθείς και να βασίζονται σε συνθετικά ηλεκτρικά συστατικά [28]. Παρά τη δυνατότητα δημιουργίας συνθετικών επαγωγών μέσω λειτουργικών ενισχυτών, αυτή η τεχνική εξακολουθεί να απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία.

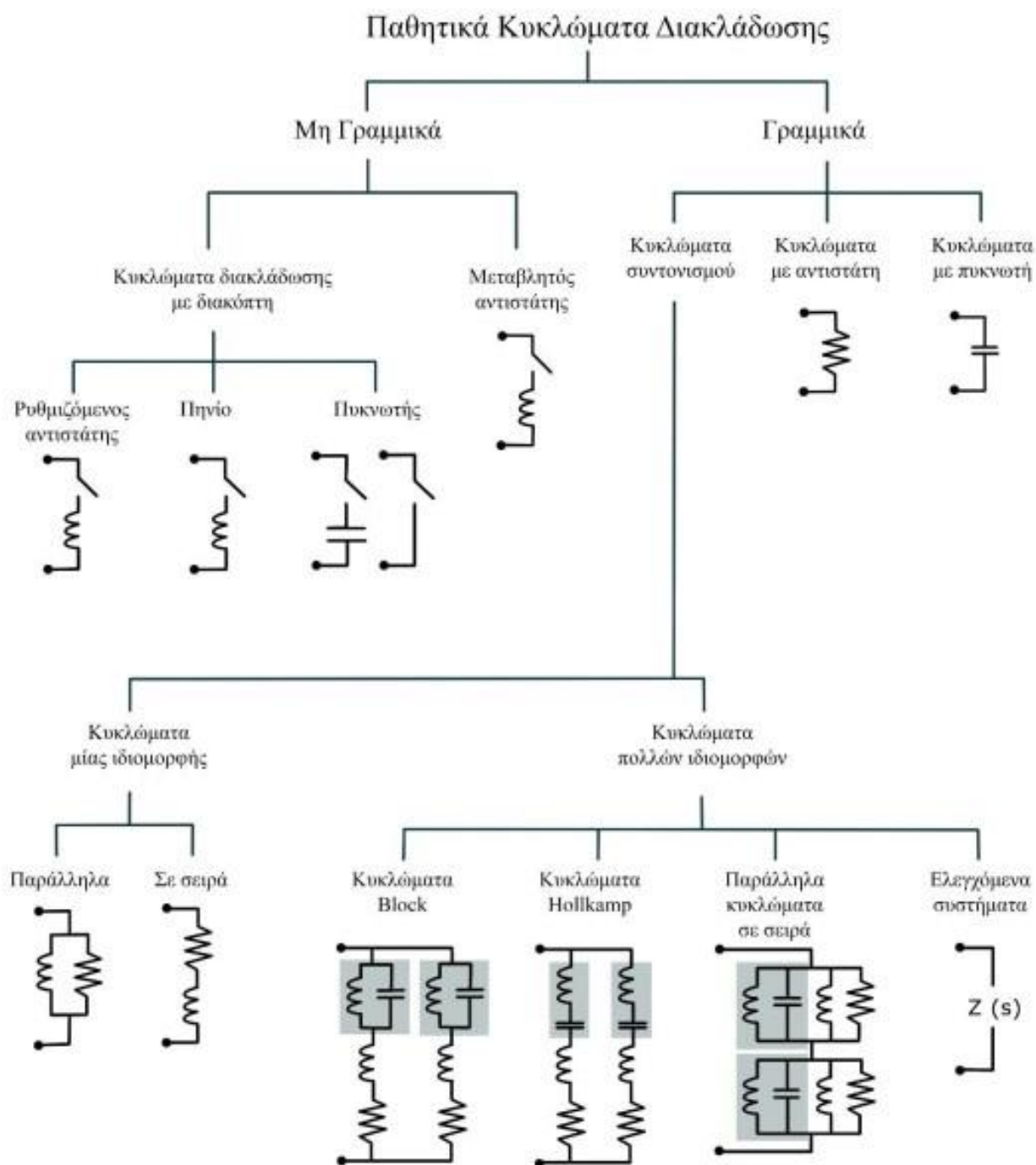
Η ανθεκτικότητα της συντονιστικής διακλάδωσης αντιμετωπίζει επίσης προκλήσεις, καθώς μικρές αλλαγές στην αυτεπαγωγή μπορούν να έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην αποδοτικότητα απόσβεσης [29,30]. Προσαρμοστικά κυκλώματα, τα οποία αυτόματα συντονίζουν τον επαγωγέα με τη μηχανική συχνότητα, προτάθηκαν ως λύση για τον περιορισμό της κλασικής συντονισμένης διακλάδωσης. Μέσω διαφόρων προσεγγίσεων και τεχνικών, οι πρόσφατες έρευνες έχουν επιδιώξει να ενισχύσουν την αποδοτικότητα και να ξεπεράσουν τα εμπόδια που συνδέονται με τις παραδοσιακές

⁶ Πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108768>

πιεζοηλεκτρικές διακλαδώσεις, ενσωματώνοντας προσαρμοστικές και ημι-παθητικές στρατηγικές για βελτιωμένη απόδοση.

4.2.2 Κατηγοριοποίηση παθητικών συστημάτων διακλάδωσης

Παθητικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης μπορούν να καταταχθούν ως γραμμικά ή μη γραμμικά, με τα μη γραμμικά να υποδιαιρούνται περαιτέρω σε κυκλώματα με διακόπτη και κυκλώματα που περιλαμβάνουν μεταβλητούς αντιστάτες. Ειδικότερα, στην κατηγορία με τους διακόπτες ανήκουν κυκλώματα με ρυθμιζόμενους αντιστάτες, επαγωγείς και πυκνωτές. Αντιθέτως, τα γραμμικά κυκλώματα περιλαμβάνουν συντονιστικά κυκλώματα, καθώς και κυκλώματα που εστιάζουν σε αντιστάσεις και πυκνωτές. Όσον αφορά τα συντονιστικά κυκλώματα, αυτά χωρίζονται σε εκείνα που αφορούν μία μόνο ιδιομορφή και σε εκείνα που αντιμετωπίζουν πολλαπλές ιδιομορφές. Τα κυκλώματα που ασχολούνται με μία μόνο ιδιομορφή διακρίνονται σε παράλληλα και σε σειριακά, ενώ τα πολυ-ιδιομορφικά κυκλώματα μπορεί να εμφανίζονται ως Block κυκλώματα, κυκλώματα Hollkamp, παράλληλα κυκλώματα σε σειρά και ελεγχόμενα συστήματα. Η ανάλυση αυτή καταγράφεται και οπτικοποιείται στο σχετικό σχηματικό διάγραμμα παρακάτω.



Εικόνα 26 Κατηγοριοποίηση παθητικών κυκλωμάτων διακλάδωσης⁷

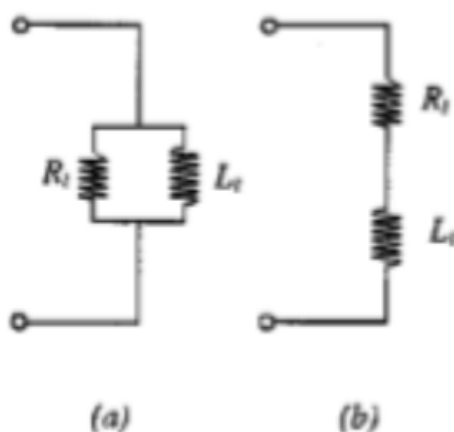
⁷ Πηγή: https://www.ugent.be/ea/emsme/en/education/we/thesis_trilling.pdf

4.3 Πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα συντονισμού

Η αρχική ιδέα για το κύκλωμα παραδιακλάδωσης προήλθε από τον Forward το 1979, ο οποίος πρωτοπόρησε προτείνοντας την χρήση ενός επαγωγικού (LC) κυκλώματος για να εξομαλύνει τις στενές μηχανικές συντονιστικές αποκρίσεις. Έδειξε ότι μια τέτοια επαγωγική μετατόπιση θα μπορούσε να αντισταθμίσει τη χωρητική αντίσταση που παρουσιάζει ένας πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας. Στη συνέχεια, Hagood και von Flotow περαιτέρω εξήγησαν την αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου συντονισμένου πιεζοηλεκτρικού συστήματος, συγκρίνοντάς το με ένα ρυθμισμένο μανόμετρο μάζας, όπου ένα μικρότερο σύστημα δεύτερης τάξης είναι ενσωματωμένο στη δυναμική ενός μεγαλύτερου συστήματος. Μελέτησαν επίσης την προσθήκη ενός αντιστάτη στο κύκλωμα, δημιουργώντας ένα συντονισμένο κύκλωμα RLC, προσφέροντας μια ακόμη πιο εξελιγμένη προσέγγιση στην απόσβεση δονήσεων.

4.3.1 Κύκλωμα διακλάδωσης μίας ιδιομορφής

Κυκλώματα που αφορούν την απόσβεση μεμονωμένων δονήσεων (ιδιομορφών) δημιουργήθηκαν για τη μείωση ειδικών δονητικών καταστάσεων σε δομές. Αυτά τα κυκλώματα, που περιγράφονται συχνά ως παράλληλη και σειριακή διακλάδωση, εκτελούν ηλεκτρικό συντονισμό, λειτουργώντας παρόμοια με έναν μηχανικό αποσβεστήρα κραδασμών. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την εξισορρόπηση πολλαπλών δονητικών καταστάσεων μέσω της χρήσης αντίστοιχου αριθμού πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων και κυκλωμάτων. Ωστόσο, η ενσωμάτωση ή η σύνδεση αυτών των επιθεμάτων στη δομή μπορεί να συναντήσει προκλήσεις. Ένα πρόβλημα είναι ο περιορισμένος χώρος διαθέσιμος για την τοποθέτηση όλων των επιθεμάτων, ενώ ένα άλλο είναι η πιθανή μεταβολή ή εξασθένηση των δονητικών χαρακτηριστικών της δομής λόγω της εφαρμογής των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Επιπρόσθετα, η προσθήκη πολλών στοιχείων μπορεί να επιβαρύνει το δομικό βάρος, γεγονός που μπορεί να καταστήσει την εφαρμογή αναποτελεσματική σε τομείς όπως η αεροδιαστημική βιομηχανία.

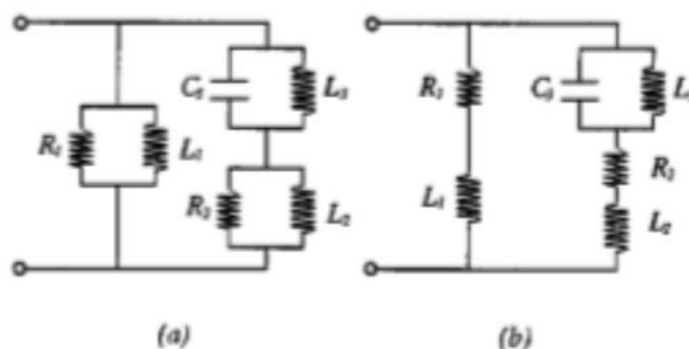


Εικόνα 27 (α) Παράλληλη και (β) σε σειρά σύνδεση κυκλώματος μιας ιδιομορφής[1]

4.3.2 Κύκλωμα διακλάδωσης πολλών ιδιομορφών

Για να ξεπεραστούν τα ζητήματα που προκύπτουν κατά την απόσβεση ειδικών δονητικών καταστάσεων (ιδιομορφών) σε μια δομή, έχει αναπτυχθεί η τεχνική για την ταυτόχρονη απόσβεση πολλαπλών ιδιομορφών. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός μοναδικού πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που λειτουργεί σε πολλαπλές δονητικές συχνότητες ταυτόχρονα. Δύο βασικές ρυθμίσεις κυκλωμάτων για αυτή την ιδιομορφική απόσβεση περιλαμβάνουν παράλληλες και σειριακές διατάξεις, με τα αντίστοιχα παραδείγματα να παρουσιάζονται ενδεικτικά στο παρακάτω σχηματικό.

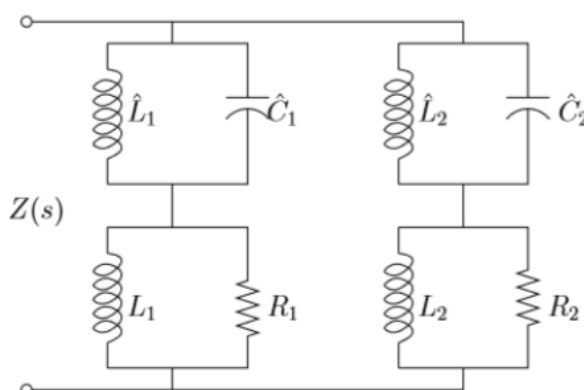
Επιπλέον, αναλύονται και άλλες προσεγγίσεις για την απόσβεση πολλαπλών ιδιομορφών, δίνοντας έμφαση στην ποικιλομορφία και την προσαρμοστικότητα των διαθέσιμων τεχνικών.



Εικόνα 28 (α) Παράλληλη και (β) σε σειρά σύνδεση κυκλώματος πολλών ιδιομορφών[1]

4.3.3 Επιπλέον Τεχνικές Current Blocking

Η πρωτοποριακή προσέγγιση για την απόσβεση πολλαπλών δονητικών καταστάσεων (ιδιομορφών) αναπτύχθηκε από τον Wu και την ομάδα του [31-33]. Βασίζονται στην τακτική της ανάπτυξης μιας αυτόνομης RL διακλάδωσης (παράλληλης ή σειριακής) για κάθε διαφορετική ιδιομορφή. Ακολουθώς, ενσωματώνουν LC κυκλώματα που αποκλείουν το ρεύμα (current blocking), εφαρμοζόμενα σε κάθε έναν από τους κλάδους, με σκοπό την πιο αποτελεσματική απόσβεση.



Εικόνα 29 Κύκλωμα παραδιακλάδωσης δύο ιδιοτιμών[1]

Για την επίτευξη μείωσης στις δονήσεις των πρώτων δύο ιδιοσυχνοτήτων, τοποθετούμε το κύκλωμα L_1C_1 ώστε να συμφωνεί συντονιστικά με την πρώτη ιδιοσυχνότητα (ω_1), ενώ το L_2C_2 με τη δεύτερη (ω_2). Αντιστρέφοντας τη λογική, συντονίζουμε το L_1C_1 με την ω_2 και το L_2C_2 με την ω_1 , επιτυγχάνοντας έτσι διακριτή απόσβεση για κάθε μία από αυτές τις ιδιοσυχνότητες μέσω των συνδυασμών L_1R_1 και L_2R_2 . Κατά την προσπάθεια μείωσης τριών δονητικών λειτουργιών, ενσωματώνονται δύο κυκλώματα που περιορίζουν το ρεύμα, εντός κάθε κλάδου, προσαρμόζοντας τη μέθοδο ανάλογα για την απόσβεση περισσότερων ιδιομορφών.

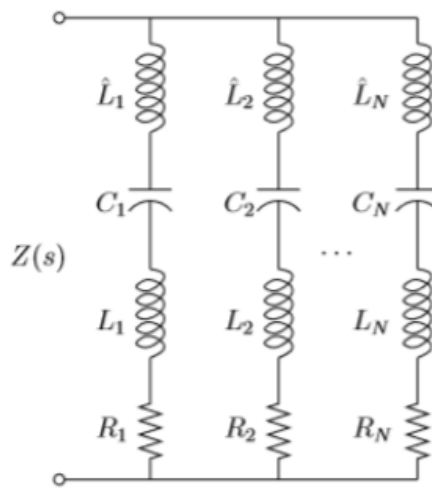
Current Flowing

Η απόσβεση πολλαπλών δονήσεων χρησιμοποιώντας την τεχνική των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης προτάθηκε αρχικά για την ελαχιστοποίηση της ανταπόκρισης συγκεκριμένων

ιδιοσυχνοτήτων μιας δομής. Αυτή η διαδικασία αντλεί από τη λογική της χρήσης ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου το οποίο ενεργοποιείται σε συγκεκριμένες δονητικές συχνότητες μέσω των συντονισμένων κυκλωμάτων LC, έτσι ώστε να αντισταθμίσει την χωρητικότητα του μετατροπέα και να επιφέρει μια συντονισμένη μείωση των δονήσεων.

$$\hat{L}_1 = \frac{1}{\omega_1^2 C_1}, \dots, \hat{L}_N = \frac{1}{\omega_N^2 C_N}$$

Σε αυτό το πλαίσιο, οι επαγωγικές τιμές (L) ρυθμίζονται κατάλληλα για να συμπίπτουν με τις ιδιοσυχνότητες που στοχεύουμε να ελέγξουμε. Αναλόγως, για κάθε ιδιομορφή που επιθυμούμε να αποσβέσουμε, δημιουργείται ένα κύκλωμα που είναι συντονισμένο με την αντίστοιχη συχνότητα. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί με την προσθήκη πρόσθετων κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης, που είναι επίσης συντονισμένα με τις υψηλότερες ιδιοσυχνότητες.

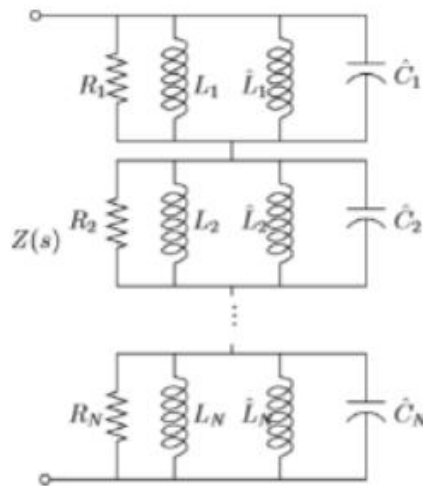


Εικόνα 30 Κύκλωμα παραδιακλάδωσης πολλών ιδιοτιμών current-flowing[1]

Στα κυκλώματα παραδιακλάδωσης πολλαπλών ιδιομορφών, η προσθήκη συντονιστικών στοιχείων στα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα αυξάνει τον βαθμό απόσβεσης που είναι εφικτός. Αυτό το σύστημα ενισχύει την ευελιξία των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης και ανοίγει τον δρόμο για την αποτελεσματική εφαρμογή σε δομικά συστήματα με πολλαπλές δυναμικές ανάγκες.

Series/Parallel Circuit

Η καινοτομία στην απόσβεση δονήσεων ξεκίνησε με την πρόταση του Forward το 1979, που έθεσε τις βάσεις για την επαγωγική παραδιακλάδωση (LC), στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της στενής ζώνης της μηχανικής συντονιστικής απόκρισης [34]. Με αυτή τη μέθοδο, οι επαγωγικές αντιδράσεις ρυθμίζονταν με τρόπο που ακυρώνουν τη χωρητική αντίδραση ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα. Αυτή η λογική αναπτύχθηκε περαιτέρω από τους Hagood και von Flotow, οι οποίοι διαπίστωσαν ότι ένας συντονισμένος πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας λειτουργεί όπως ένα ρυθμισμένο μανόμετρο μάζας και ασχολήθηκαν με την προσθήκη αντίστασης στο δίκτυο, δημιουργώντας ένα συντονισμένο κύκλωμα RLC.



Εικόνα 31 Series/Parallel κύκλωμα απόσβεσης [34]

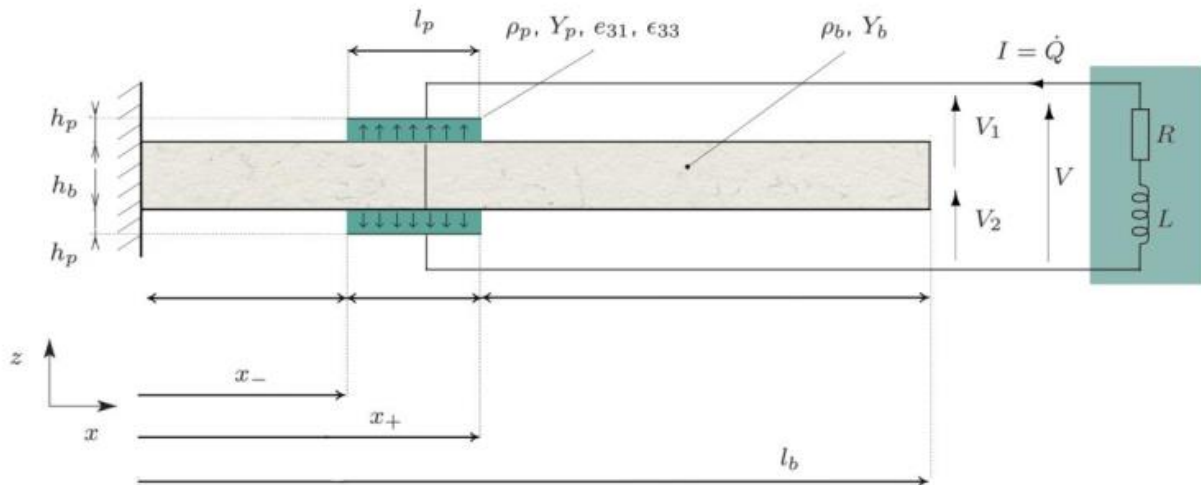
Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη συγχρονισμένη ρύθμιση των επαγωγικών στοιχείων (L_1 και L_2) με τις ιδιοσυχνότητες που επιθυμούμε να ελέγξουμε, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζει ότι κάθε επιμέρους σύστημα απόσβεσης μπορεί να επιτύχει συντονισμό με την αντίστοιχη συχνότητα. Αυτή η προσέγγιση δίνει τη δυνατότητα σε κάθε κύκλωμα απόσβεσης να ενεργήσει ανεξάρτητα, βελτιστοποιώντας την αποτελεσματικότητά του σε συγκεκριμένες δονητικές συχνότητες. Συνεπώς, όταν τα κυκλώματα απλοποιηθούν μέσω της συνδυαστικής λογικής της παράλληλης σειράς, τα αποτελεσματικά πηνία που επιτυγχάνονται είναι συχνά μικρότερα σε μέγεθος σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται σε άλλα κυκλώματα μίας ή πολλαπλών ιδιομορφών, επιφέροντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε όρους χώρου και βάρους.

4.4 Σύγχρονες Μηχανολογικές Εφαρμογές

Η διαδικασία ρύθμισης και ελέγχου των δονήσεων μέσω πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης συνδυάζει αρχές από τομείς της μηχανικής με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά κυκλώματα. Στην κατηγορία των συντονιστικών κυκλωμάτων, η βέλτιστη επαγωγικότητα και αντίσταση καθορίζονται μέσω της διαδικασίας που επιδιώκει την μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας ελέγχου των δονήσεων. Η ροή του ρεύματος μέσω του κυκλώματος προσδιορίζεται και λαμβάνεται υπόψη για την περαιτέρω ανάπτυξη και σχεδίαση των ηλεκτρικών στοιχείων. Ωστόσο, πρακτικές δοκιμές δείχνουν ότι οι τιμές της επαγωγικότητας που χρειάζονται είναι συχνά εκτός των δυνατοτήτων που παρέχουν τα συμβατικά παθητικά ηλεκτρικά στοιχεία, εγείροντας την ανάγκη για ειδικά σχεδιασμένα ή εξατομικευμένα και «έξυπνα» συστήματα [34,35]

4.4.1 Δοκός με κύκλωμα πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης

Μια δοκός, όπως π.χ. αυτή της παρακάτω εικόνας μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας την πολυστρωματική θεωρία.



Εικόνα 32 Δοκός με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα [35]

Το πεδίο μηχανικής μετατόπισης μπορεί να γραφτεί ως

- $u_x(x, z, t) = u(x, t) + z\theta(x, t)$ αξονική μετατόπιση
- $u_z(x, z, t) = w(x, t)$ εγκάρσια μετατόπιση
- $\theta = -\partial w / \partial x$ περιστροφή

Σε συνέχεια των αναφερθέντων θεωρήσεων, τα πιεζοηλεκτρικά στρώματα και το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο προσανατολίζονται κατά την z κατεύθυνση. Αυτή η διάταξη επιδεικνύει μια εξαιρετική ηλεκτρομηχανική συνδεσιμότητα, η οποία συντελείται μέσω της αλληλεπίδρασης της αξονικής τάσης στην κατεύθυνση e_1 και του εγκάρσιου ηλεκτρικού πεδίου E_3 [35]. Ανεξάρτητα από το εάν υφίσταται ή όχι επίπεδη τάση ή παραμόρφωση κατά την διεύθυνση του πλάτους, υιοθετούμε τις βασικές θεωρήσεις της επίπεδης τάσης όπως προκύπτουν από τη θεωρία των δοκών για λόγους απλοποίησης.

Η εξεταζόμενη δοκός είναι εν μέρει επικαλυμμένη με δύο συντονισμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία τα οποία είναι πολωμένα σε αντίθετες κατευθύνσεις, διευκολύνοντας την απόσβεση και τον έλεγχο των δονήσεων μέσω της αλλαγής της πόλωσης τους. Αυτή η δομή επιτρέπει την ακριβή διαχείριση των μηχανικών και ηλεκτρικών αντιδράσεων στη δοκό, αξιοποιώντας την αρχή της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης για την βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του συστήματος ελέγχου των δονήσεων [35]. Στο σύστημα ελέγχου δονήσεων που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, τα ηλεκτρόδια είναι διασυνδεδεμένα σειριακά με ένα παθητικό κύκλωμα που περιλαμβάνει ένα αντιστάτη και ένα επαγωγέα, δημιουργώντας ένα συντονισμένο σύστημα διακλάδωσης. Η ηλεκτρομηχανική αλληλεπίδραση επιτυγχάνεται μέσω της σύζευξης '31', που συνδέει τις διαμήκεις παραμορφώσεις της δομής στην κατεύθυνση x με το ηλεκτρικό πεδίο στην κατεύθυνση z , η οποία είναι κάθετη στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Η αντίθετη πόλωση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σημαίνει ότι μόνο οι ελαστικές διαταραχές στον άξονα x επηρεάζουν το ηλεκτρικό κύκλωμα, επιτρέποντας στο σύστημα να ανταποκρίνεται μόνο σε εκείνες τις δυνάμεις που συμβαίνουν κατά μήκος του μήκους της δοκού.

Οι σταθερές που χαρακτηρίζουν το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι η πυκνότητά του ρ_p , το μέτρο του Young Y_p , η σύζευξη της πιεζοηλεκτρικής σταθεράς e_{31} και η διηλεκτρική σταθερά ϵ_{33} . Η γεωμετρία του συστήματος εξαρτάται από το μήκος και το πάχος της δοκού όπως και των

πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Τέλος, τα όρια των πιεζοηλεκτρικών επιπέδων προσδιορίζονται με x - και y . Τα παραπάνω συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2 Παράμετροι συστήματος [35]

Parameters	Beam	Values	Piezo.	Values
Lengths (mm)	l_b	170	l_p	25
Thicknesses (mm)	h_b	2	h_p	0.5
Width (mm)	b	20	b	20
Patches position (mm)			x_-	0.5
Densities (kg/m ³)	ρ_b	2800	ρ_p	8500
Young's moduli (GPa)	Y_b	72	Y_p	66.7
Piezoelectric constant (C/m ²)			\bar{e}_{31}	-14
Dielectric constant (F/m)			$\bar{\epsilon}_{33}$	2068 ϵ_0

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για το σύστημα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 32. Το σύστημα αυτό χωρίζεται γεωμετρικά σε τρεις περιοχές: μια περιοχή I και μια περιοχή III, που αποτελούνται από ένα στρώμα υλικού δέσμης, και μια περιοχή II που αντιστοιχεί στα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα. Η περιοχή II είναι συμμετρική και αποτελείται από τρία στρώματα, δύο πιεζοηλεκτρικά και ένα στρώμα δοκού. Οι περιοχές αυτές είναι διακριτοποιημένες με συγκεκριμένο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων (1,5 και 35 στοιχεία, συνολικά N=41). Λόγω των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο, ο συνολικός αριθμός μηχανικών βαθμών ελευθερίας είναι καθορισμένος και ίσος με τρία. Η εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων μας επιτρέπει να εισάγουμε τις κατάλληλες μεταβλητές για τη διατύπωση των εξισώσεων του προβλήματος.

- Συνολικοί βαθμοί ελευθερίας= 3N=123
- $U=N \times 1$
- $K_m=M_m=N \times N$
- $V=(V_1 \times V_2)^T$
- $Q=(Q_1 \times Q_2)^T$
- Οι πίνακες K_e και K_c περιγράφονται ως:

$$K_e = \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix}, \quad K_c = (K_1 \quad K_2), \quad C = \frac{\bar{\epsilon}_{33} b l_p}{h_p}$$

Επομένως προκύπτει ότι τα K_1, K_2 είναι ίσα στο μέτρο, ίσα όταν αντιστοιχούν στους βαθμούς ελευθερίας της περιστροφής, και αντίθετα όταν αντιστοιχούν στους βαθμούς ελευθερίας της μετατόπισης. Το παραπάνω πρακτικά σημαίνει ότι όταν στα πιεζοηλεκτρικά έμπλαστρα εφαρμοστούν ίδιες τάσεις, τότε αυτά κάμπτονται και όταν εφαρμοστούν αντίθετες τάσεις τότε αυτά κινούνται κατά αξονικό τρόπο. Η τελική σύνθεση του ηλεκτρομηχανικού προβλήματος συνοψίζεται στην εξίσωση:

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

Που αναλύεται ως:

$$X = \begin{pmatrix} U \\ Q \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} M_m & 0 \\ 0 & L \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0^T & R \end{pmatrix}$$

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

Ένας δεύτερος τρόπος σύνδεσης της πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης στην μηχανική εφαρμογή είναι η παράλληλη σύνδεση των επιθεμάτων. Σε αυτή την περίπτωση αλλάζουν οι εκφράσεις των μητρών K και K_m αλλά η γενική διατύπωση (1) παραμένει ίδια.

Πειραματική επικύρωση των αποτελεσμάτων

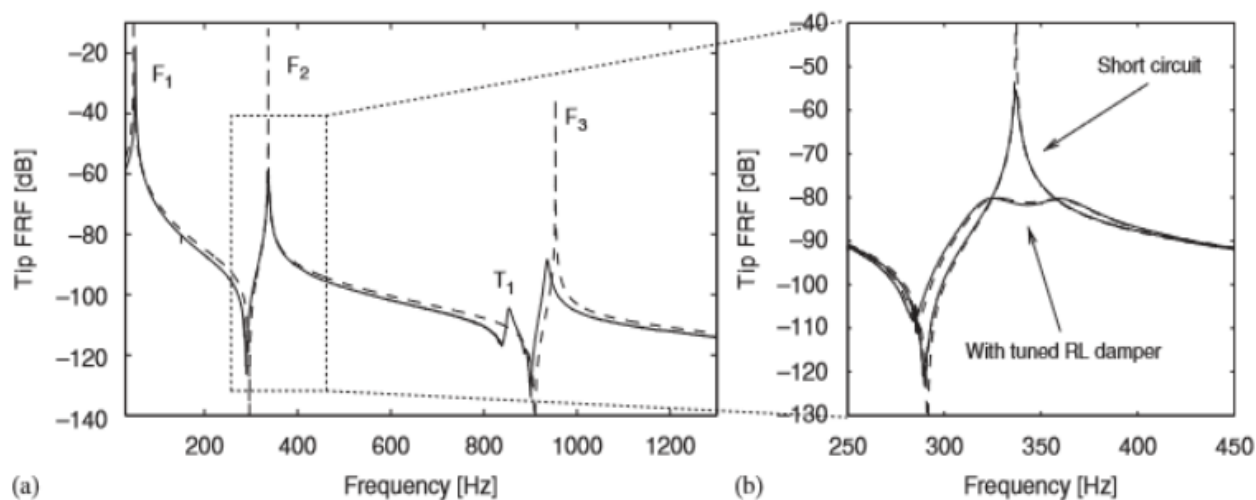
Στις αναφορές [36,37] οι ερευνητές εκτελούν πειραματικά την προαναφερθήσα διαδικασία, τοποθετώντας σε μια δοκό ένα ανέπαφο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα οδήγησης αποτελούμενο από μαγνήτη με κηρήθρα και ένα πηνίο που προσδίδει ημιτονοειδές ηλεκτρικό σήμα. Η δοκός στερεώθηκε σε ένα σημείο με τη χρήση μιας ακίδας, και η διέγερση επιτεύχθηκε μέσω ενός εξωτερικού, ακουστικού ηλεκτρομαγνητικού μηχανισμού. Το σύστημα αυτό περιελάμβανε ένα μικρό μαγνήτη συνδεδεμένο στη δοκό, ο οποίος ήταν ενσωματωμένος σε ένα μαγνητικό πεδίο που παρήγαγε ένα πηνίο, όταν αυτό διέπερνε ένα ημιτονοειδές ηλεκτρικό ρεύμα. Η παραγόμενη δύναμη κατά μήκος της δοκού καθορίστηκε από την ένταση του ρεύματος στο πηνίο, και η κίνηση της δοκού μετρήθηκε με τη χρήση ενός Laser Doppler Vibrometer (LDV), ένα εργαλείο που μετρά την ταχύτητα ενός σημείου στην επιφάνεια της δοκού.

Για την αξιολόγηση και την επιβεβαίωση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων, υλοποιήθηκαν δυο ξεχωριστές μετρήσεις: μία με τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα συνδεδεμένα σε βραχυκύκλωμα και μία με ανοικτό κύκλωμα, δηλαδή με τα επιθέματα να μην συνδέονται μεταξύ τους. Οι μετρήσεις αυτές επιτρέπουν την ανίχνευση των πρώτων τεσσάρων φυσικών συχνοτήτων, που συνδέονται με τις τρεις κύριες ιδιομορφές κάμψης και μία στρέψης.

Οι συγκρίσεις μεταξύ του μοντέλου και των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνονται εφικτές μέσω της προσθήκης μιας συμπυκνωμένης μάζας στη θέση του μαγνήτη, η οποία αντιπροσωπεύει το βάρος του και τροποποιεί τις συχνότητες και τα σχήματα των ιδιομορφών. Η παρατηρούμενη αύξηση στον συντελεστή σύζευξης κατά τις πειραματικές δοκιμές μπορεί να εξηγηθεί από τον τοπικό επανακαθορισμό της έντασης και της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στις άκρες των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων λόγω του τυλιγμένου ηλεκτροδίου.

Ενώ η ακριβής επίδραση αυτής της διαμόρφωσης είναι δύσκολο να προσδιοριστεί χωρίς τη χρήση ενός λεπτομερούς τρισδιάστατου ηλεκτρομηχανικού μοντέλου, η παρατηρούμενη διαφορά στον συντελεστή σύζευξης δείχνει ότι η πειραματική διαμόρφωση έχει έναν μη αμελητέο αντίκτυπο

στην ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά του συστήματος, και ίσως προσφέρει ένα επιπλέον μέσο για τη βελτίωση της απόδοσης στην πράξη.



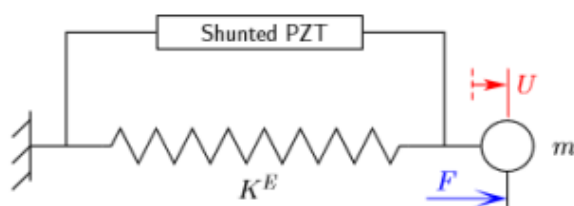
Εικόνα 33 Συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας (α) FRF βραχυκύκλωμα και (β) Βραχυκύκλωμα FRF σε απόσβεση[35]

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών (-) σε σύγκριση με αυτά των πεπερασμένων στοιχείων (--). Στο γράφημα (α), φαίνεται ένα διάγραμμα απόκρισης συχνότητας που αναφέρεται σε μετρήσεις των τεσσάρων πρώτων φυσικών συχνοτήτων μιας δοκού καθοριζόμενες από τις τρεις ιδιομορφές κάμψης και μία στρέψης. Σημεία F1, F2, και F3 στο γράφημα δείχνουν τις ιδιοσυχνότητες κάμψης, ενώ το σημείο T1 αντιστοιχεί στη συχνότητα στρέψης. Η γραμμή αναφοράς που περνάει από τα σημεία αυτά υποδηλώνει τη μεταβολή της φυσικής συχνότητας μεταξύ της κατάστασης βραχυκυκλώματος και της κατάστασης ανοικτού κυκλώματος.

Στο γράφημα (β), παρουσιάζονται δύο καμπύλες απόκρισης: μία για τη δοκό με τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα συνδεδεμένα σε βραχυκύκλωμα (υποδεικνύεται ως "Short circuit") και μία για τη δοκό με την εφαρμογή ενός συντονισμένου διακλαδωτή RL (υποδεικνύεται ως "With tuned RL damper"). Η αντίκριση των καμπυλών δείχνει την αποτελεσματικότητα του συστήματος απόσβεσης: οι κορυφές των καμπυλών στο βραχυκύκλωμα δείχνουν τις φυσικές συχνότητες που παρουσιάζουν μικρότερη απόσβεση σε σύγκριση με το σύστημα με τον συντονισμένο διακλαδωτή, όπου οι κορυφές είναι περισσότερο "μετριασμένες" και η απόσβεση φαίνεται να είναι αυξημένη.

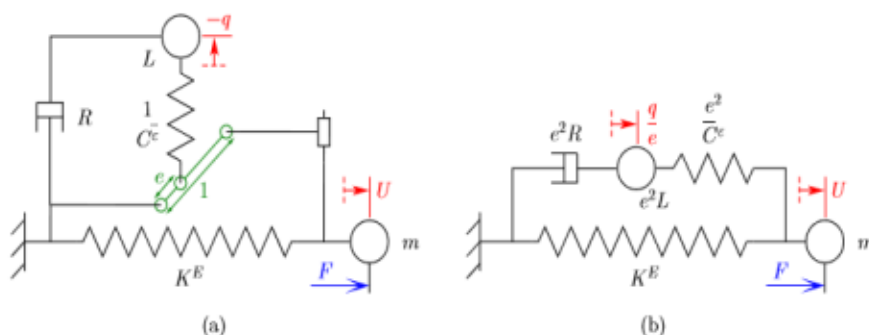
4.4.2 Σύστημα Μάζας – Ελατηρίου

Ένα απλό σύστημα συντονισμένης πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



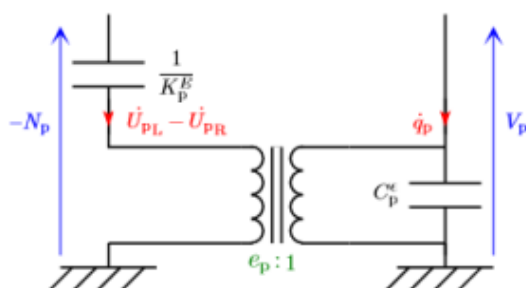
Εικόνα 34 Μοντέλο Μάζας – Ελατηρίου[35]

Πρόκειται για ένα μοντέλο που συνδέει παράλληλα ένα ελατήριο ελαστικότητας K_E με το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Αυτό αντιπροσωπεύει έναν μονοβαθμιαίο ταλαντωτή απόσβεσης. Οι μαθηματικοί τύποι που ορίζουν την πιεζοηλεκτρική σύζευξη είναι οι $N=K^E U - eV$ και $q=eU+C^e V$. Η συνολική μάζα του συστήματος είναι ίση με m επομένως η σχέση διαμορφώνεται ως $m\ddot{U}=F-K^E U-e\dot{V}$. Σε περίπτωση που έχουμε βραχυκύκλωση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου ορίζεται η συχνότητα βραχυκύκλωσης $\omega_s=\sqrt{\frac{k^E}{m}}$. Παρακάτω δίνονται τα μηχανικά μοντέλα του πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος συντονισμού. [38]



Εικόνα 35 (α) Πλήρες και (β) Απλοποιημένο μοντέλο πιεζοηλεκτρικού συντονισμού[35]

Για να συνθέσουμε το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πρέπει να αναφέρουμε τα ζεύγη ισοδυναμιών μάζας-επαγωγού, αποσβεστήρα-αντιστάτη και ελατηρίου πυκνωτή.



Εικόνα 36 Ισοδύναμο κύκλωμα[35]

Προχωρώντας, έχουμε ένα απλοποιημένο κύκλωμα που δείχνει άμεσα την σχέση της συντονισμένης παραδιακλάδωσης με έναν ρυθμιζόμενο αποσβεστήρα μάζας. Ιδιαίτερη σημασία έχει ότι ο

αποσβεστήρας δεν τοποθετείτε ανάμεσα στις κινούμενες μάζες, αλλά στην γείωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια ανεπαρκής απόσβεση να δίνει τα ίδια αποτελέσματα με το ανοιχτοκύκλωμα.

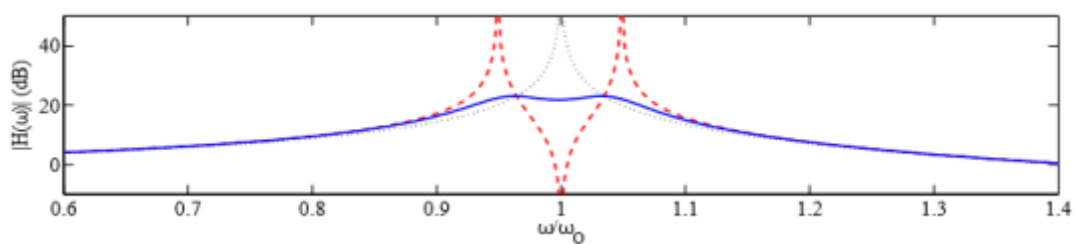
Τα μηχανικά μοντέλα στην εικόνα 35, μπορούν να εκφραστούν στα ηλεκτρικά ανάλογα τους με βάση την ηλεκτρομηχανική αναλογία. Για παράδειγμα, το ανάλογο του κυκλώματος της εικόνας 35 (α) εκφράζεται ως $-F = -j\omega m\dot{U} - \frac{K^E}{j\omega}\dot{U} + \frac{e}{j\omega C^E}(\dot{q} - e\dot{U})$. Τόσο η παραδιακλάδωση όσο και η μάζα του μηχανικού συστήματος αντιπροσωπεύονται πλήρως στον ηλεκτρικό κλάδο. Η ηλεκτρική αναπαράσταση συχνά επιλέγεται καθώς διευκολύνει την ανάλυση για να ληφθούν οι εξισώσεις και να απλοποιηθεί το σύστημα.

Βελτιστοποίηση της απόκρισης

Όταν συνδέεται μια πιεζοηλεκτρική παραδιακλάδωση συντονισμού σε μια μηχανική κατασκευή, η απόδοση απόσβεσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί επιλέγοντας κατάλληλες τιμές αντίστασης και επαγωγής. Στα [39,40] έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την προσέγγιση των βέλτιστων τιμών για τα εξαρτήματα. Μια ενδιαφέρουσα μέθοδος που προτείνεται στο [39] εστιάζει στην ελαχιστοποίηση του μεγίστου της συνάρτησης μεταφοράς μετατόπισης U/F (όπου F είναι η δύναμη διέγερσης). Το παραπάνω μπορεί να γραφεί ως $\frac{1}{\omega_e^2}\ddot{q} + \frac{2\xi_e}{\omega_e}\dot{q} + q = eU$ όπου ω είναι η συχνότητα της συντονισμένης παραδιακλάδωσης, ξ είναι ο συντελεστής απόσβεσης και ω_0 η συχνότητα του ανοιχτοκυκλώματος. Η συνάρτηση μεταφοράς που καταλήγουμε δίνεται από την σχέση:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{\left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}\right]^2 + 4\xi_e^2 \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right)^2}{\left[\frac{\omega_s^2}{\omega_0^2} + \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{\omega_e^2}\right)\omega^2 + \frac{\omega^4}{\omega_0^2\omega_e^2}\right]^2 + 4\xi_e^2 \frac{\omega^2}{\omega_e^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2}$$

Γραφικά, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται ως εξής



Εικόνα 37 Συνάρτηση μεταφοράς[36]

Στην εικόνα βλέπουμε με διακεκομμένη γραμμή την βέλτιστη αυτεπαγωγή χωρίς αντίσταση, με μπλε γραμμή την βέλτιστη αντίσταση και την βέλτιστη αντίσταση και με την μαύρη γραμμή την συνάρτηση μεταφοράς με ανοιχτό κύκλωμα. Συνεχίζοντας σε ένα βήμα παραπέρα, μπορούμε να δούμε πως η χρήση συντονισμένου διακένου δημιουργεί παράλληλο συντονισμό στην ωε. Αυτό οφείλεται σε ισοδύναμη ακαμψία που τείνει στο άπειρο.

4.4.3 Πλάκες με πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα παραδιακλάδωσης

Στις σύγχρονες κατασκευές, είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιούνται πλάκες που συνδυάζουν ελαστικά και πιεζοηλεκτρικά στρώματα, όπως ελασματομενά υλικά ή επιθέματα. Αυτά τα στρώματα είναι σχεδιασμένα να είναι αρκετά λεπτά, επιτρέποντας την εφαρμογή μιας θεωρίας επίπεδης κατάστασης τάσεων. Τα στρώματα είναι στενά συνδεδεμένα και κατασκευασμένα από ορθοτροπικά πιεζοηλεκτρικά υλικά. Οι ελαστικές ιδιότητες επιτυγχάνονται μέσω της αντιστάθμισης των πιεζοηλεκτρικών συντελεστών. Για την απλοποίηση της ανάλυσης, οι επιφάνειες των πιεζοηλεκτρικών στρωμάτων καλύπτονται ολόκληρες από ηλεκτρόδια και εφαρμόζεται μια θεωρία μονού στρώματος που επιτρέπει την ομοιόμορφη εξέταση των μετατοπίσεων σε όλα τα στρώματα. Επιπλέον, παρόλο που η ανάλυση περιορίζεται σε συμμετρικές πλάκες, οι ηλεκτρικές μετατοπίσεις σε κάθε στρώμα εξετάζονται ανεξάρτητα.

Ένας κρίσιμος δείκτης που χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση αυτών των κατασκευών είναι ο τετραγωνικός συντονισμένος συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης (EMCC), ο οποίος μετρά την ποσότητα της ενέργειας παραμόρφωσης που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα σε μια κατασκευή όπου η βαλβίδα είναι σχεδιασμένη ανάλογα. Αυτός ο δείκτης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

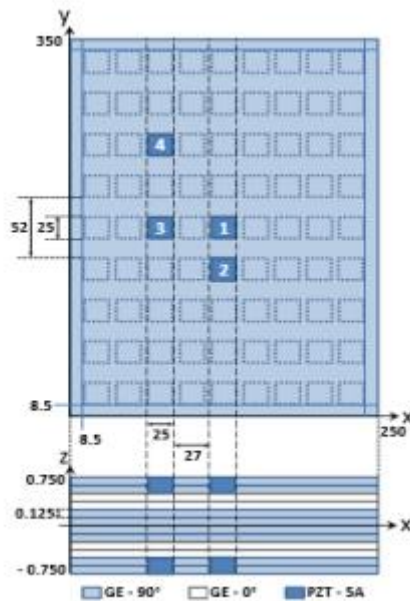
$$K_j^2 = \frac{f_{oc}^{j^2} - f_{sc}^{j^2}}{f_{oc}^{j^2}}$$

Όπου f_{oc} και f_{sc} δηλώνουν την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής.

Ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης σε πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, τοποθετώντας τέσσερα ζευγάρια συμμετρικά επάνω στην πλάκα. Η τοποθέτηση αυτή γίνεται μέσω μιας παραμετρικής ανάλυσης, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η ηλεκτρομηχανική σύζευξη σε σημεία που ευνοούν τις τέσσερις κύριες ιδιομορφές της κατασκευής.

Για την εύρεση της ιδανικής τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων που θα ενισχύσει την ενεργειακή απόδοση, η ανάλυση διεξάγεται διαφοροποιώντας τις θέσεις x , y , z . Αυτή η μέθοδος σκοπεύει να αξιολογήσει την ηλεκτρομηχανική σύζευξη κάθε ζευγαριού επιθεμάτων ανάλογα με τις τέσσερις κύριες ιδιομορφές. Συγκεκριμένα, τρεις θέσεις κατά την κατεύθυνση του πάχους z επιλέγονται με βάση προηγούμενη ανάλυση.

Στις δύο πρώτες θέσεις, τα πιεζοηλεκτρικά επίθεμα ενσωματώνονται αντικαθιστώντας μέρη από το πρώτο και τελευταίο επίπεδο, αρχίζοντας από το μεσαίο επίπεδο και συνεχίζοντας στα δύο γειτονικά στρώματα από γραφίτη-εποξείδιο. Στην τρίτη θέση, τα πιεζοηλεκτρικά επίθεμα τοποθετούνται στις εξωτερικές επιφάνειες της πλάκας. Η ανάλυση στο επίπεδο xy αναφέρεται σε εννέα διαφορετικές θέσεις για τις συντεταγμένες x και y , σύμφωνα με μια προκαθορισμένη διαρρύθμιση που περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα, χρησιμοποιώντας συνολικά 700 στοιχεία στην ανάλυση.



Εικόνα 38 Πλάκα με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα[37]

Τα ευρήματα από την παραμετρική ανάλυση τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων έδειξαν ότι η δεύτερη θέση στο πάχος της πλάκας προσφέρει την ιδανική σύζευξη, καθώς οι εξωτερικές επιφάνειες των επιθεμάτων συμβαδίζουν με αυτές των ελασμάτων. Στη συγκεκριμένη θέση στον άξονα z, η ανάλυση των μεταβολών του συντελεστή K_j^2 κατά μήκος των κατευθύνσεων x και y υποδεικνύει ότι η βέλτιστη τοποθέτηση του επιθέματος συμπίπτει με τα σχήματα των ιδιομορφών. Αυτό σημαίνει ότι η ηλεκτρομηχανική σύζευξη είναι μεγιστοποιημένη στις περιοχές όπου η καμπυλότητα της πλάκας είναι μέγιστη, όπως στο κέντρο για τον πρώτο τρόπο λειτουργίας.

Για τη δεύτερη και τρίτη ιδιομορφή δόνησης, η ανάλυση ανέδειξε δύο θέσεις όπου οι συντελεστές ζεύξης είναι στα υψηλότερα επίπεδα. Στην περίπτωση της τέταρτης ιδιομορφής, υπάρχουν τέσσερις θέσεις που προσφέρουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, επειδή παρουσιάζουν ισχυρή σύζευξη. Αυτή η εξειδικευμένη γνώση επιτρέπει την ακριβέστερη σχεδίαση και βελτιστοποίηση της ηλεκτρομηχανικής απόδοσης στις κατασκευές όπου ενσωματώνονται τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, αξιοποιώντας πλήρως τις ιδιότητές τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Πίνακας 3 Τετραμερής συνδυασμένη ηλεκτρομηχανική σύζευξη

Ζευγάρια	Σύζευξη 1	Σύζευξη 2	Σύζευξη 3	Σύζευξη 4
1	0.35	0.00	0.00	0.00
2	0.23	0.59	0.00	0.00
3	0.10	0.00	0.54	0.00
4	0.03	0.26	0.22	0.79
1-4	1.12	0.54	1.20	1.67

Σε μια εκτεταμένη μελέτη, αναλύθηκαν τέσσερα ζευγάρια πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, με κάθε ζευγάρι να αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση της απόδοσης για ένα συγκεκριμένο είδος δονήσεων. Η τοποθέτηση τους σχεδιάστηκε έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αλληλεπίδραση με την αντίστοιχη δόνηση. Οι σχεδιαστικές αποφάσεις βασίστηκαν στις λεπτομέρειες που παρουσιάζονται στην αναφερόμενη Εικόνα 38, και οι διάφοροι συντελεστές συζεύξεως αξιολογήθηκαν για κάθε μορφή

κραδασμού. Εντοπίστηκε ότι, αν και κάθε ζευγάρι ήταν ιδιαίτερα συντονισμένο με μια συγκεκριμένη δόνηση, το δεύτερο και το τέταρτο ζευγάρι εμφάνισαν σημαντική αλληλεπίδραση και με άλλες μορφές δόνησης.

Ακολούθησε μια διαδικασία απλοποίησης με βάση τη θεωρία των δυναμικών απορροφητών κραδασμών για τον σχεδιασμό ενός παθητικού συστήματος απορρόφησης ενέργειας. Το σύστημα αυτό μιμείται τη λειτουργία των μηχανικών απορροφητών κραδασμών αλλά αντί για μηχανικές δομές χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικά υλικά για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ενσωματώνει επίσης ένα κύκλωμα βραχυκύκλωσης που λειτουργεί ως ηλεκτρικός απορροφητής. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξαρτάται από την προσεκτική ρύθμιση της αντίστασης και της επαγωγικότητας για την βέλτιστη απορρόφηση ή απόρριψη της ενέργειας. Για την εφαρμογή της κλασικής θεωρίας των δυναμικών απορροφητών κραδασμών, οι εξισώσεις κίνησης απλοποιούνται σε δύο βαθμούς ελευθερίας, έναν μηχανικό και έναν ηλεκτρικό. Ο μηχανικός αντιστοιχεί στη μετατόπιση ενός επιλεγμένου τρόπου δόνησης, ενώ ο ηλεκτρικός αντανακλά το ηλεκτρικό φορτίο που συσσωρεύεται στο κύκλωμα βραχυκύκλωσης.

$$\begin{bmatrix} M_m & 0 \\ 0 & L_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{q}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q}_c \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_m & -\overline{K_{me}} \\ -\overline{K_{me}} & \overline{K_e} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ q_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_m \\ V_c \end{Bmatrix}$$

Η προαναφερθείσα απλοποίηση προϋποθέτει τη σύνδεση ενός ή περισσότερων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων σε μια μοναδική βραχυκύκλωση. Αυτή η μέθοδος εξαλείφει την επίδραση άλλων δυναμικών τρόπων στην συμπεριφορά της δομής, θεωρώντας τους ανεπαίσθητους ή εξωτερικούς παράγοντες στην ανταπόκριση του συστήματος.

Μέσω μαθηματικής ανάλυσης, καταλήγουμε στον εντοπισμό των κραδασμών σε ορισμένες συγκεκριμένες συχνότητες που παραμένουν αμετάβλητες, γνωστές ως ω_1 , καθώς και στην αντίσταση αντι-συντονισμού ω_n . Η αντίσταση R_c , στην οποία αναφερόμαστε, είναι δυνατό να υπολογιστεί με βάση την ισοδύναμη στατική δυσκαμψία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος k_p , την ηλεκτρική δυσκαμψία, και την συχνότητα του συντονισμού της δομής που μας ενδιαφέρει.

Αυτές οι σχέσεις και παράμετροι είναι κρίσιμες για τον καθορισμό της ικανότητας του συστήματος να μεταφέρει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, ενώ παράλληλα διατηρεί την ικανότητα του κυκλώματος να απορροφά τις δονήσεις. Εν ολίγοις, το σύστημα πρέπει να είναι ρυθμισμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εναρμονισμένο με τους επιθυμητούς τρόπους δόνησης και να αποφεύγει ή να μειώνει τις ανεπιθύμητες δονήσεις για βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας και της απόδοσης.

$$|G_p(\omega_1)|^2 = \frac{R_c^2 \omega_n^2}{k_p^4} \text{ και } |G_p(\omega_n)|^2 = \frac{2\overline{K_e}}{k_p^2 \omega_n^2}$$

$$R_c = \frac{k_p \sqrt{2\overline{K_e}}}{\omega_n^2}$$

Μέσω περαιτέρω ανάλυσης, παρατηρήθηκε ότι απαιτούνται προσαρμογές στις τιμές της αντίστασης (R_c) και της επαγωγικότητας (L_c) για να επιτευχθούν βελτιστοποιημένες αποκρίσεις:

i) Η συχνότητα παράλληλου συντονισμού πρέπει να ταυτίζεται με την συχνότητα συντονισμού που είναι στο επίκεντρο του σχεδιασμού. Εάν η πραγματική συχνότητα παράλληλου συντονισμού είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη, τότε η τιμή του L_c αυξάνεται, και το αντίθετο ισχύει όταν η συχνότητα είναι μικρότερη.

ii) Όταν το σύστημα παρουσιάζει δύο ξεχωριστούς συντονισμούς προερχόμενους από το κύκλωμα, το πλάτος των συντονισμών μπορεί να μειωθεί με την αύξηση της R_c . Αντιθέτως, αν υπάρχει μόνο ένας συντονισμός, τότε η αντίσταση πρέπει να μειωθεί από την τιμή που επιτρέπει τη σύγκλιση των δύο συντονισμών σε έναν.

Οι υπολογισμοί έδειξαν μικρές μεταβολές στις τιμές του L_c και μεγαλύτερες στις τιμές του R_c , με εξαίρεση τις περιπτώσεις της πρώτης ιδιομορφής. Αυτό υποδηλώνει ότι η μονοδιάστατη προσέγγιση για την αξιολόγηση της R_c δεν είναι η ιδανική για την ανάλυση των συχνотήτων με υψηλή πυκνότητα ενεργειακών μεταφορών. Επομένως, η εξίσωση που δόθηκε για την R_c πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή, και να θεωρείται ως αρχικό σημείο για περαιτέρω χειροκίνητη ή αυτόματη βελτιστοποίηση.

5 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής εργασίας, διερευνήθηκε ενδελεχώς το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού, η αντίστοιχη χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών και η εφαρμογή τους στην απόσβεση ταλαντώσεων μέσω συστημάτων διακλάδωσης. Στόχος ήταν η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα πιεζοηλεκτρικά υλικά συνδέουν τη μηχανική ενέργεια με το ηλεκτρικό πεδίο, προσφέροντας καινοτόμες λύσεις στην τεχνολογία και τη μηχανική.

Οι πιεζοηλεκτρικές εφαρμογές αναδείχθηκαν ως ένας σημαντικός πυλώνας στο πεδίο των σύγχρονων τεχνολογιών, με δυνατότητες που εκτείνονται από αισθητήρες και συσκευές συλλογής ενέργειας έως βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές. Ειδικά στον τομέα της απόσβεσης ταλαντώσεων, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά προσφέρουν μία υποσχόμενη μέθοδο για την ενεργή ελάττωση των δονήσεων, μέσω της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Στην εργασία αναλύθηκαν τα κυκλώματα διακλάδωσης, εστιάζοντας στις μεθόδους μίας ιδιομορφής και πολλαπλών ιδιομορφών. Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι, μέσω του κατάλληλου συντονισμού και της εφαρμογής των συστημάτων διακλάδωσης, είναι δυνατή η αποτελεσματική ελάττωση των δονήσεων σε μηχανολογικές δομές. Πειραματικά αποτελέσματα και μοντελοποιήσεις επιβεβαιώνουν τη θεωρητική ανάλυση, παρέχοντας ένα στέρεο υπόβαθρο για την ανάπτυξη πρακτικών εφαρμογών.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι η ιδιοτιμή στρέψως εμφανίζει χαμηλό συντελεστή σύζευξης, ενώ θα έπρεπε να είναι θεωρητικά μηδενική. Αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της λεπτομερούς μοντελοποίησης και της εκτίμησης των παραμέτρων στο σχεδιασμό πιεζοηλεκτρικών συστημάτων. Επιπρόσθετα, η μελέτη αποκάλυψε ότι η μη τέλεια σύνδεση των στοιχείων μπορεί να έχει άμεσο αντίκτυπο στις μετρήσεις, όπως είναι οι διαφορές στον μετρούμενο αποτελεσματικό συντελεστή σύζευξης.

Συνοψίζοντας, η παρούσα έρευνα επιβεβαιώνει τη σημασία του πιεζοηλεκτρισμού ως εργαλείου για την ανάπτυξη υψηλά εξειδικευμένων και αποδοτικών συστημάτων απόσβεσης. Η συνεχής πρόοδος στη μοντελοποίηση και στα πειραματικά πρωτόκολλα αναμένεται να οδηγήσει στην περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση των τεχνολογιών πιεζοηλεκτρικής απόσβεσης.

6 Βιβλιογραφία

- [1] S.O. Reza Moheimani and A. J. Fleming, Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping. Springer Science & Business Media, 2006.
- [2] J. J. Gagnepain and G. W. Taylor, Piezoelectricity. New York Gordon And Breach, 1992.
- [3] Stefan Johann Rupitsch, Piezoelectric Sensors and Actuators : Fundamentals and Applications. Berlin, Germany Springer, 2019.
- [4] “Piezo Systems: History of Piezoelectricity,” web.archive.org, Oct. 11, 2013. <https://web.archive.org/web/20131011004641/http://www.piezo.com/tech4history.html> (accessed Feb. 17, 2024).
- [5] R. J. Brook, R. W. Cahn, and M. B. Bever, Concise encyclopedia of advanced ceramic materials. Oxford ; New York: Pergamon Press ; Cambridge, Mass., Usa, 1991.
- [6] M. Smith and S. Kar-Narayan, “Piezoelectric polymers: theory, challenges and opportunities,” International Materials Reviews, vol. 67, no. 1, pp. 65–88, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1915935>.
- [7] S. L. Wu, J. I. Scheinbeim, and B. A. Newman, “Ferroelectricity and piezoelectricity of nylon 11 films with different draw ratios,” Journal of Polymer Science Part B, vol. 37, no.19, pp. 2737–2746, Oct. 1999, doi: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-0488\(19991001\)37:19%3C2737::aid-polb3%3E3.0.co;2-o](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-0488(19991001)37:19%3C2737::aid-polb3%3E3.0.co;2-o).
- [8] Eiichi Fukada and S. Sasaki, “Piezoelectricity of α -chitin,” vol. 13, no. 9, pp. 1845–1847, Sep. 1975, doi: <https://doi.org/10.1002/pol.1975.180130916>.
- [9] “Piezoelectric Crystal - an overview | ScienceDirect Topics,” www.sciencedirect.com. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/piezoelectric-crystal> (accessed Feb. 25, 2024).
- [10] TFC, “Mono Crystalline Quartz -The Piezoelectric Effect.” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.tfc.co.uk/pdfs/the_piezoelectric_effect_tfc.pdf
- [11] “DoITPoMS - TLP Library Piezoelectric Materials,” Doitpoms.ac.uk, 2019. <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/piezoelectrics/printall.php>
- [12] Y. Meng, G. Chen, and M. Huang, “Piezoelectric Materials: Properties, Advancements, and Design Strategies for High-Temperature Applications,” Nanomaterials, vol. 12, no. 7, p. 1171, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/nano12071171>.
- [13] M. Smith, “Electro-mechanically interfacing with biology using piezoelectric polymer nanostructures,” Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.17863/cam.35256>.
- [14] T. Agarwal, “Microcontroller based Footstep Power Generation System,” ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students, Jul. 09, 2015. <https://www.elprocus.com/footstep-power-generation-system/>
- [15] M. D. Williams, B. A. Griffin, T. N. Reagan, J. R. Underbrink, and M. Sheplak, “An AIN MEMS Piezoelectric Microphone for Aeroacoustic Applications,” Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 21, no. 2, pp. 270–283, Apr. 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/jmems.2011.2176921>
- [16] A. Kumar et al., “Recent development and futuristic applications of MEMS based piezoelectric microphones,” Sensors and Actuators A: Physical, vol. 347, p. 113887, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113887>
- [17] S. Zhang and F. Yu, “Piezoelectric Materials for High Temperature Sensors” Journal of the American Ceramic Society, vol. 94, no. 10, pp. 3153–3170, Aug. 2011, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04792.x>
- [18] H. Lee, S. Zhang, Y. Bar-Cohen, and S. Sherrit, “High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers,” Sensors, vol. 14, no. 8, pp. 14526–14552, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.3390/s140814526>.
- [19] K. Marakakis, G. K. Tairidis, P. Koutsianitis, and G. E. Stavroulakis, “Shunt Piezoelectric Systems for Noise and Vibration Control: A Review,” Frontiers in Built Environment, vol. 5, May 2019, doi: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00064>.
- [20] Hagood N W and Von Flotow A 1991 Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks J. Sound Vib. 146 243–68
- [21] Forward R L 1979 Electronic damping of vibrations in optical structures Appl. Opt. 18 690–7
- [22] Snowdon J C 1968 Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems (New York: Wiley)

- [23] O. Thorp, M. Ruzzene, and A. Baz, "Attenuation and localization of wave propagation in rods with periodic shunted piezoelectric patches," *Smart Materials and Structures*, vol. 10, no. 5, p. 979, 2001
- [24] O. Thorp, M. Ruzzene, and A. Baz, "Attenuation of wave propagation in fluidloaded shells with periodic shunted piezoelectric rings," *Smart Materials and Structures*, vol. 14, no. 4, p. 594, 2005
- [25] Caruso G 2001 A critical analysis of electric shunt circuits employed in piezoelectric passive vibration damping *Smart Mater. Struct.* 10 1059–68
- [26] Park C H 2003 Dynamics modelling of beams with shunted piezoelectric elements *J. Sound Vib.* 268 115–29
- [27] Behrens S, Moheimani S O R and Fleming A J 2003 Reducing the inductance requirements of piezoelectric shunt damping systems *Smart Mater. Struct.* 12 57–64
- [28] Tang J and Wang K W 2001 Active–passive hybrid piezoelectric networks for vibration control: comparisons and improvement *Smart Mater. Struct.* 10 794–806
- [29] J.J. Hollkamp, "Multimodal passive vibration suppression with piezoelectric materials and resonant shunts," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 5, no. 1, pp. 49–57, 1994.
- [30] of electrical uncertainties on resonant piezoelectric shunting," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 18, no. 5, pp. 477–485, 2007.
- [31] S. Y. Wu. Method for multiple mode shunt damping of structural vibration using a single PZT transducer. In *Proc. SPIE Symposium on Smart Structures and Materials – Smart Structures and Intelligent Systems*, pages 159–167, March 1998.
- [32] S. Y. Wu. Piezoelectric shunts for simultaneous vibration reduction and damping of multiple vibration modes. U.S. patent 5,783,898, July 1998.
- [33] S. Y. Wu and A. S. Bicos. Structural vibration damping experiments using improved piezoelectric shunts. In *Proc. SPIE Conference on Passive Damping and Isolation*, SPIE Vol. 3045, pages 40–50, 1997.
- [34] A. J. Fleming, S. O. R. Moheimani, and S. Behrens. Reducing the inductance requirements of piezoelectric shunt damping circuits. *Smart Materials and Structures*, 12(1):57–64, February 2003.
- [35] P. I. Koutsianitis, G. K. Tairidis, and G. E. Stavroulakis, "Shunted piezoelectric patches on auxetic microstructures for the enhancement of band gaps," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 91, no. 2, pp. 739–751, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00419-020-01804-1>.
- [36] O. Thomas, J. Ducarne, and J.-F. Deu", "Performance of piezoelectric shunts for vibration reduction," *Smart Materials and Structures*, vol. 21, no. 1, p. 015008, 2012
- [37] A. S'en'echal, Optimization of shunted piezoelectric patches for vibration reduction of complex structures: application to a turbojet fan blade. PhD thesis, Conservatoire national des arts et m'etiers - Cnam, 2011.
- [38] A. Bloch, "Electromechanical analogies and their use for the analysis of mechanical and electromechanical systems," *Journal of the Institution of Electrical Engineers Part I: General*, vol. 92, no. 52, pp. 157–169, 1945.
- [39] F. Bachmann, R. de Oliveira, A. Sigg, V. Schnyder, T. Delpero, R. Jaehne, A. E. Bergamini, V. Michaud, and P. Ermanni, "Passive damping of composite blades using embedded piezoelectric modules or shape memory alloy wires: a comparative study," *Smart Materials and Structures*, vol. 21, no. 7, p. 075027, 2012.
- [40] R. P. Paganelli, A. Romani, A. Golfarelli, M. Magi, E. Sangiorgi, and M. Tartagni, "Modeling and characterization of piezoelectric transducers by means of scattering parameters. Part I: Theory," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 160, no. 1-2, pp. 9–18, 2010.