



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ/ ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ»**

Μεταπτυχιακή διατριβή

Ζαχαράκης Ανδρ. Ιωάννης

Μηχανολόγος Μηχανικός

Εξεταστική επιτροπή :

Προβιδάκης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής (Επιβλέπων)

Σωτηρόπουλος Δημήτριος, Καθηγητής

Γκότσης Αλέξανδρος, Επίκουρος Καθηγητής

XANIA 2006

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα γίνει ανάπτυξη ενός πρότυπου μέτρησης της σύνθετης αντίστασης-εμπέδησης και θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του πρότυπου συστήματος αυτού με ένα αναλυτή εμπέδησης. Επίσης θα γίνει έρευνα μη καταστροφικού ελέγχου υλικών. Η εφαρμογή αυτή θα μπορεί να αξιοποιηθεί σε μελλοντικές εφαρμογές. Η έρευνα επιστημόνων από όλο τον κόσμο για το συγκεκριμένο θέμα παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και αποτέλεσε την απαρχή αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ τους καθηγητές:

- κ. Σωτηρόπουλο Δημήτριο, Καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης
- κ. Γκότση Αλέξανδρο, Επίκουρο Καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης

για τις χρήσιμες συμβουλές και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου,

Προβιδάκη Κωνσταντίνο, Αναπληρωτή Καθηγητή, για την άριστη συνεργασία, τις πολύτιμες γνώσεις του κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τη διαρκή καθοδήγηση του στην εκπόνηση και συγγραφή της παρούσης εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	σελ 3
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	σελ 6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ 9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-«ΕΥΦΥΕΣ» ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ-«ΕΥΦΥΗ» ΥΛΙΚΑ.....	σελ 11
2.1 «Ευφύες» κατασκευές.....	σελ 11
2.2 «Ευφυή» υλικά.....	σελ 12
2.3 Ιστορία του πιεζοηλεκτρισμού.....	σελ 13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-«ΕΥΦΥΕΙΣ» ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ.....	σελ 15
3.1 Ενεργοποιητές.....	σελ 17
3.1.1. Πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	σελ 18
3.1.2. Ηλεκτροσυστολή-Σιδηροηλεκτρικά υλικά.....	σελ 19
3.1.3. Μαγνητοσυστολή-Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	σελ 23
3.1.4. Κράματα μνήμης μορφής.....	σελ 25
3.1.5. Ηλεκτρορεολογικά υλικά.....	σελ 27
3.1.6. Μαγνητορεολογικά υλικά.....	σελ 28
3.1.7. Μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS).....	σελ 30
3.2. Αισθητήρες.....	σελ 30
3.2.1. Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες.....	σελ 31
3.2.2. Αισθητήρες οπτικών ινών.....	σελ 31
3.2.3. Αισθητήρες μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS).....	σελ 32
3.3. Εφαρμογές των «ευφύων» υλικών.....	σελ 32
3.3.1. Εφαρμογές των «ευφύων» υλικών σε καθημερινή χρήση.....	σελ 32
3.3.2. Βιομηχανικές εφαρμογές.....	σελ 32

3.3.3. Προσδιορισμός του όρου ζημία.....	σελ 33
3.3.4. Ανίχνευση ζημίας.....	σελ 34
3.3.4.1. Ανίχνευση ζημίας στα σύνθετα υλικά-επιστημονική εφαρμογή.....	σελ 34
3.3.5. Έλεγχος δόνησης.....	σελ 39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ.....	σελ 40
4.1. Πιεζοηλεκτρικά κεραμικά.....	σελ 40
4.2. Ιστορία των πιεζοκεραμικών.....	σελ 44
4.3. Κατεργασία των πιεζοκεραμικών υλικών.....	σελ 44
4.4. Καταστατικές εξισώσεις.....	σελ 46
4.5. Διαμορφώσεις κεραμικών.....	σελ 47
4.5.1. Δίμορφη διαμόρφωση.....	σελ 47
4.5.2. Σωροί (Stacks).....	σελ 48
4.5.3. Ενεργοποιητές ημισεληνιακής μορφής	σελ 49
4.5.4. Διαμορφώσεις τύπου Rainbow και Thunder Wafers.....	σελ 50
4.5.5. Διαμόρφωση που τοποθετείται στην επιφάνεια και που ενσωματώνεται.....	σελ 50
4.6. Προβλήματα εφαρμογής πιεζοκεραμικών.....	σελ 51
4.6.1. Αποπόλωση.....	σελ 51
4.6.2. Μη γραμμική απόκριση και γήρανση.....	σελ 52
4.6.3. Υστέρηση.....	σελ 53
4.6.4. Προβλήματα με την ενσωμάτωση των κεραμικών.....	σελ 53
4.7. Μοντελοποίηση των πιεζοκεραμικών.....	σελ 54
4.7.1. Μέθοδος στατικής ισοδύναμης δύναμης.....	σελ 54
4.7.2. Μοντέλα που διέπονται από τις βασικές αρχές.....	σελ 56
4.7.3. Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων.....	σελ 57
4.7.4. Μέθοδος σύνθετης αντίστασης.....	σελ 58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	σελ 60
5.1. Διέγερση του πιεζοκεραμικού ενεργοποιητή.....	σελ 61
5.2. Προσδιορισμός των σύνθετων αντιστάσεων από FEA.....	σελ 67
5.3. Προσδιορισμός της απόκρισης της δομής.....	σελ 73
5.4. Κεντρικά σημεία και συναρτήσεις μορφής.....	σελ 77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6-ΣΥΝΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ-ΕΜΠΕΔΗΣΗ....	σελ 78
6.1. Εμπέδηση.....	σελ 78
6.1.1. Διευκρινήσεις-ορισμοί.....	σελ 79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	σελ 85
7.1. Πειραματική διαδικασία.....	σελ 85
7.2. Άμεση μέτρηση-Impedance Analyser Quadtech 7600.....	σελ 87
7.2.1. Impedance Analyser Quadtech 7600.....	σελ 87
7.2.2. Διαδικασία μέτρησης-Αποτελέσματα (Άμεση μέτρηση).....	σελ 89
7.3. Έμμεση μέτρηση.....	σελ 102
7.3.1. Ηλεκτρικό κύκλωμα-Θεωρία.....	σελ 102
7.3.2. Διαδικασία μέτρησης-Αποτελέσματα (Έμμεση μέτρηση).....	σελ 103
7.4. Συμπεράσματα.....	σελ 118
Παράρτημα 1-ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Catman 4.5.....	σελ 120
Παράρτημα 2-ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Matlab 6.0.....	σελ 125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ 127

Εικόνες

- Εικόνα 1: *Ομάδες και υποσύνολα «ευφυών» υλικών*
- Εικόνα 2: *Τύποι ενεργοποιητών*
- Εικόνα 3: *Ενεργοποιητές κυλινδρικού σχήματος*
- Εικόνα 4: *Πίνακας σύγκρισης «ευφυών» υλικών*
- Εικόνα 5: *Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές*
- Εικόνα 6: *Φάση σιδηροηλεκτρικών υλικών*
- Εικόνα 7: *Μεταβολή της πόλωσης συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου*
- Εικόνα 8: *Μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς συναρτήσει της θερμοκρασίας*
- Εικόνα 9: *Πόλωση σιδηροσιδηρομαγνητικού υλικού*
- Εικόνα 10: *Πείραμα της NASA*
- Εικόνα 11: *Μετασχηματισμός από φάση μαρτενσίτη σε ωστενίτη*
- Εικόνα 12: *Πόλωση ηλεκτρορεολογικών υλικών*
- Εικόνα 13: *Πόλωση μαγνητορεολογικών υλικών*
- Εικόνα 14: *Πίνακας σύγκρισης ηλεκτρορεολογικών και μαγνητορεολογικών υλικών*
- Εικόνα 15: *Πίνακας σύγκρισης των ιδιοτήτων των «έξυπνων» υλικών*
- Εικόνα 16: *Πειραματική διάταξη ελέγχου δόνησης*
- Εικόνα 17: *Κυβική κυψελίδα πάνω και κάτω από υη θερμοκρασία Curie*
- Εικόνα 18: *Πόλωση πιεζοκεραμικού*
- Εικόνα 19: *Καμπύλη υστέρησης στην πόλωση του πιεζοκεραμικού*
- Εικόνα 20: *Πιεζοηλεκτρικό ως γεννήτρια και ως μηχανή*
- Εικόνα 21: *Πόλωση κυλινδρικού πιεζοκεραμικού*
- Εικόνα 22: *Πόλωση κυβικού πιεζοκεραμικού*
- Εικόνα 23: *Διαμόρφωση δίμορφων*
- Εικόνα 24: *Δίμορφα που βρίσκονται στην παραγωγή*

- Εικόνα 25: *Διαμόρφωση τύπου σωρού*
- Εικόνα 26: *Διαμόρφωση ημισεληνιακού τύπου*
- Εικόνα 27: *Σχηματική παράσταση ενεργοποιητών σε ζεύγη στην επιφάνεια*
- Εικόνα 28: *Σχηματική παράσταση ενσωμάτωσης ενεργοποιητή*
- Εικόνα 29: *Επίδραση γήρανσης*
- Εικόνα 30: *Βρόγχος υστέρησης*
- Εικόνα 31: *Διάγραμμα στατικής ισοδύναμης δύναμης*
- Εικόνα 32: *Διαγραμματικά μοντέλα ισοδύναμης δύναμης*
- Εικόνα 33: *Πίνακας ισοδύναμων στατικών δυνάμεων και ροπών*
- Εικόνα 34: *Πίνακας συμβόλων*
- Εικόνα 35: *Διαγραμματική παράσταση πιεζοκεραμικού*
- Εικόνα 36: *Εφαρμογή τάσεων σε στοιχειώδες σωματίδιο*
- Εικόνα 37: *Πιεζοκεραμικό σε πλάκα*
- Εικόνα 38: *Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας*
- Εικόνα 39: *Ισοδύναμη αντίσταση ακροδεκτών*
- Εικόνα 40: *Φωτογραφία Quadtech 7600*
- Εικόνα 41: *Φωτογραφία ακροδεκτών Quadtech 7600*
- Εικόνα 42: *Μενού Quadtech 7600*
- Εικόνα 43: *Επιλογή κύριας παραμέτρου μέτρησης*
- Εικόνα 44: *Επιλογή παραμέτρων από Parameter Sweep*
- Εικόνα 45: *Το κομβίο εκκίνησης μέτρησης*
- Εικόνα 46: *Αποτελέσματα σάρωσης από 10Hz έως 2MHz*
- Εικόνα 47: *Αποτελέσματα σάρωσης από 200KHz έως 2MHz*
- Εικόνα 48: *Κυκλωματικό διάγραμμα*
- Εικόνα 49: *Το πιεζοηλεκτρικό στη μεταλλική πλάκα*

- Εικόνα 50: *Πλακέτα σύνδεσης αντιστάσεων πειραματικής διάταξης*
- Εικόνα 51: *Η γεννήτρια εναλλασόμενου ρεύματος*
- Εικόνα 52: *Ενισχυτής τάσης*
- Εικόνα 53: *Η κάρτα Spider 8*
- Εικόνα 54: *Το πρόγραμμα Catman 4.5*
- Εικόνα 55: *Σύνδεση κάρτας με το ηλεκτρικό κύκλωμα*
- Εικόνα 56: *Αποτελέσματα από εφαρμογή εξισώσεων*
- Εικόνα 57: *Συγκριτικά αποτελέσματα άμεσης και έμμεσης μέτρησης*
- Εικόνα 58: *Αποτελέσματα μετρήσεων από εφαρμογή εξισώσεων*
- Εικόνα 59: *Συγκριτικά ακέραιου πρόβολου και πρόβολου με οπή*
- Εικόνα 60: *Κύριο μενού προγράμματος Catman*
- Εικόνα 61: *Ορισμός καναλιών μέτρησης*
- Εικόνα 62: *Μενού Measuring και Data logger για τη διαδικασία της μέτρησης*
- Εικόνα 63: *Ορισμός βημάτων μέτρησης και επιλογή τύπου γραφήματος*
- Εικόνα 64: *Επιλογή μορφής γραφήματος*
- Εικόνα 65: *Σχηματικό διάγραμμα τάσης-χρόνου*
- Εικόνα 66: *Παρουσίαση του προγράμματος Matlab*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρόλο που τα «ευφυή» υλικά ανακαλύφθηκαν στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, εντούτοις η εφαρμογή τους επεκτάθηκε την τελευταία δεκαετία από πολλούς ερευνητές. Οι «ευφυές» κατασκευές αποτέλεσαν την απαρχή για τη λειτουργία αυτόνομων συστημάτων. Με τα «ευφυή» υλικά αναπτύχθηκαν μη καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου, αλλά και μέθοδοι ελέγχου που μπορούσε ο ερευνητής να επέμβει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός «ευφυούς» συστήματος, πράγμα που αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα στην αλλαγή των παραμέτρων ενός πειράματος και την προσαρμογή τους στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Στις τελευταίες δεκαετίες αναπτύχθηκαν μέθοδοι για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών που πηγαζαν από τις εφαρμογές της καθημερινότητας. Στις Η.Π.Α. χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι ακουστικών εκπομπών για να ελεγχθούν τυχόν ρωγμές στις ράγες των σιδηροδρομικών γραμμών. Επίσης, χρησιμοποιούνται μέθοδοι ακουστικών εκπομπών και υπερήχων, για τον έλεγχο διαρροών και τυχόν ρωγμών σε σωλήνες ύδρευσης και αποχέτευσης. Τέλος εφαρμογές μη καταστροφικού ελέγχου έχουν αναπτυχθεί και για τον έλεγχο δικτύου φυσικού αερίου με εκπομπή ακουστικών κυμάτων.

Στην εργασία αυτή θα γίνει χρήση της μεθόδου της ηλεκτρομηχανικής εμπέδησης για την ανάλυση της μηχανικής κατάστασης των υλικών. Η μέτρηση της εμπέδησης θα γίνει καταρχήν με τη χρήση αυτόματου αναλυτή εμπέδησης και στη συνέχεια με την ανάπτυξη πρότυπου συστήματος μέτρησης. Επίσης θα γίνει μη καταστροφικός έλεγχος υλικών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται οι έννοιες της «ευφυούς» κατασκευής και των «ευφυών» υλικών και επικεντρώνεται στα πιεζοηλεκτρικά υλικά και την ιστορική τους ανάπτυξη.

Στο τρίτο κεφάλαιο διαχωρίζονται τα «ευφυή» υλικά ανάλογα με τη χρήση τους ως ενεργοποιητές και αισθητήρες και παρουσιάζονται τα υλικά που ανήκουν σε κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πιεζοκεραμικά, που είναι και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην πειραματική διαδικασία. Παρουσιάζονται, συνοπτικά, οι διαμορφώσεις των υλικών αυτών, οι εφαρμογές τους και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα αναλυτικό, θεωρητικό μοντέλο και οι υπολογισμοί που γίνονται όταν το πιεζοηλεκτρικό χρησιμοποιείται για τη μέτρηση σε πλάκα .

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και με τους δύο τρόπους μέτρησης, ο μη καταστροφικός έλεγχος υλικών με την έμμεση μέθοδο μέτρησης και τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας.

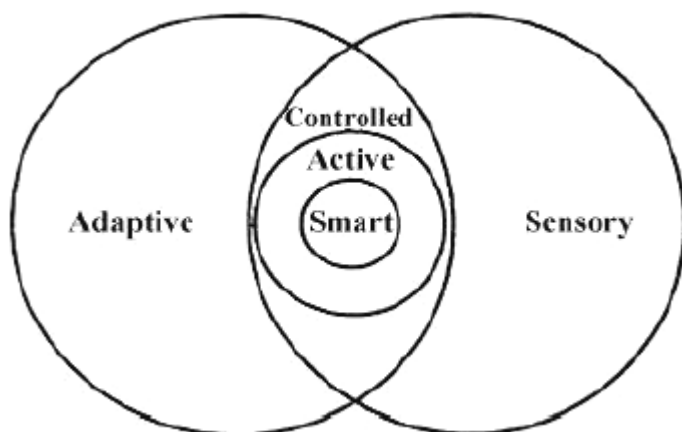
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

«ΕΥΦΥΗΣ» ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ-«ΕΥΦΥΗ» ΥΛΙΚΑ

2.1. «Ευφυής» κατασκευή

Η έξυπνη ή ευφυής κατασκευή χρησιμοποιείται σαν όρος για να καλύψει μια ομάδα κατασκευών και συστημάτων που όλα έχουν σαν σκοπό να αισθάνονται το περιβάλλον τους, να αποφασίζουν ποιος τύπος διορθωτικών μέτρων πρόκειται να ληφθούν και να λαμβάνουν αυτά τα μέτρα. Το ιδανικό θα ήταν αυτό να γινόταν αυτόνομα και αυτόματα, δηλαδή το σύστημα να ελέγχει μια δομή, να εντοπίζει τον κίνδυνο και να επεμβαίνει με διορθωτικές κινήσεις αυτόματα.

Ένα παράδειγμα αυτού του συστήματος είναι οι φακοί τύπου *photogrey* για γυαλιά. Αυτοί οι φακοί έχουν την αίσθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και ανάλογα με τη φωτεινότητα του περιβάλλοντος «ανοίγουν» ή σκουραίνουν αυτόματα. Σε αυτό το παράδειγμα, και τα τρία συστατικά, η μονάδα αισθητήρων, η μονάδα ενεργοποιητών και η μονάδα ελέγχου, είναι και τα στοιχεία που αποτελούν ένα υλικό ευφυούς δομής (Neumann, 1996). Το σύστημα είναι απολύτως αυτόνομο και δεν απαιτεί πρόσθετες μονάδες για την λειτουργία του. Τα περισσότερα συστήματα εντούτοις δεν φθάνουν σε αυτό το επίπεδο αυτονομίας και οι έξυπνες δομές είναι ένα υποσύστημα ενός ευρύτερου συστήματος.



Ο Crawley (1994) παρουσίασε τις έξυπνες ή ευφυές κατασκευές ως υποσύνολο μιας ευρύτερης κατηγορίας κατασκευών. Αυτό φαίνεται στην *Εικόνα 1*. Μια δομή ενεργοποιητών είναι αυτή η δομή που διανέμει τους ενεργοποιητές σε όλο το εύρος της. Αυτοί οι ενεργοποιητές θα χρησιμοποιηθούν για να τροποποιήσουν και τα χαρακτηριστικά της δομής.

Εικόνα 1 Ομάδες και υποσύνολα «ευφυνών» υλικών (Littlefield Andrew George)

Μια κατασκευή θεωρείται αισθητήριος, όταν διανέμει τους αισθητήρες καθ' όλο το εύρος της. Οι αισθητήρες θα ανιχνεύουν τις τάσεις, τις θερμοκρασίες, τις μετατοπίσεις και άλλα μεγέθη που σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού.

Η υπερκάλυψη μεταξύ αυτών των δύο τομέων περιέχει τρεις τύπους κατασκευών. Οποιαδήποτε δομή που μπορεί να τροποποιήσει τις ιδιότητές του μέσω ελέγχου συστημάτων κλειστού βρόγχου ανήκει στην κατηγορία ελεγχόμενων δομών. Καθώς οδηγείται η δομή από ελεγχόμενη, σε ενεργή και σε έξυπνη ο βαθμός ολοκλήρωσης των αισθητήρων και των ενεργοποιητών συνεχίζει να αυξάνεται.

Μέχρι σήμερα, τα περισσότερα από τα συστήματα που θεωρούνται συχνά ως έξυπνα ή ευφυή περιέρχονται στην ενεργή ή ελεγχόμενη περιοχή. Λίγα συστήματα, όπως τα γυαλιά photogrey, προσδιορίζονται ως έξυπνη ή ευφυής δομή. Εντούτοις, η τάση είναι να καταστούν περισσότερα συστήματα ευφυή. Ο τελευταίος στόχος ενός συστήματος ευφυούς κατασκευής είναι η μίμηση του ανθρώπινου σώματος, με τους αισθητήρες να ενεργούν ως νεύρα, οι ενεργοποιητές ως μύες, και το σύστημα ελέγχου να λειτουργεί ως εγκέφαλος.

2.2. «Ευφυή» υλικά

Πολλά υλικά, όπως τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, υλικά σχήματος μορφής, οπτικές ίνες, ηλεκτροροεολογικά υλικά, έχουν τη μοναδική ικανότητα να ανταποκρίνονται στα ερεθίσματα.

Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά εφαρμόζεται τόσο το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όσο και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό. Το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (όταν εφαρμοστεί μια μηχανική τάση παράγεται ηλεκτρικό πεδίο) χρησιμοποιείται σε πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό (όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, παράγεται μηχανική τάση), χρησιμοποιείται στους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι αξιόπιστα και αποδοτικά για εφαρμογές με αισθητήρες, αλλά οι θερμικές αλλαγές επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Τα πιεζοκεραμικά περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό κρυστάλλων που πολώνονται με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου.

Η μαγνητοσυστολή είναι η ικανότητα ενός υλικού να παρουσιάζει μηχανική τάση με την παρουσία μαγνητικού πεδίου. Τα μαγνητοσυστολικά υλικά έχουν βελτιωμένες δυνατότητες σε σχέση με τα πιεζοκεραμικά.

Τα ηλεκτρορεολογικά υλικά οφείλουν την δράση τους στη μεταβολή των ρεολογικών ιδιοτήτων τους, όπως το ιξώδες, η ελαστικότητα ή η πλαστικότητα, όταν βρίσκεται κάτω από την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου.

Πολλά εφυή υλικά βασίζονται στα σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα με βάση κάποιο πολυμερές υλικό βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή λόγω της ευλυγισίας των πολυμερών, της εύκολης κατασκευής και εφαρμογής τους.

2.3. Ιστορία του πιεζοηλεκτρισμού

Πριν από αιώνες, μοναχοί από την Κεϋλάνη και την Ινδία παρατήρησαν κάποια ιδιαίτερη ιδιότητα κάποιων κρυστάλλων. Πέταξαν αυτούς τους κρυστάλλους σε στάχτη και ενώ στην αρχή τις έλκυαν, αργότερα τις απέβαλλαν.

Αυτό το υλικό ήρθε στην Ευρώπη από Ολλανδούς θαλασσοπόρους στις αρχές του 18ου αιώνα. Το υλικό αυτό, *tourmaline*, ονομάστηκε μαγνήτης Κεϋλάνης. Το 1756, η ηλεκτρική συμπεριφορά του υλικού καταδείχθηκε από το Γερμανό φυσικό Aepinus. Αυτή η συμπεριφορά ονομάστηκε πυροηλεκτρισμός από το Σκοτσέζο φυσικό D.Brewster το 1824. Το πυροηλεκτρικό φαινόμενο προσδιορίζεται ως επαγωγή της πόλωσης με τη θερμική απορρόφηση ενέργειας. Η παραγόμενη πολικότητα είναι ανάλογη της αλλαγής της θερμοκρασίας.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αναφέρθηκε από το Γάλλο μεταλλειολόγο Ren'e Just Ha το 1817. Η πρώτη εφαρμογή έγινε από τους Pierre και Jacques Curie το 1880. Τα πειράματά τους τους οδήγησαν να διατυπώσουν τη θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού. Αυτή η θεωρία συμπληρώθηκε από την περαιτέρω εργασία των G.Lippman, W.G.Hankel, Lord Kelvin και W.Voigt στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, όπου ο πιεζοηλεκτρισμός συνεχίζει τις εφαρμογές του στα εργαστήρια. Οι πρώτες εφαρμογές εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια του πρώτου παγκόσμιου πολέμου με τα σόναρ στο οποίο ο πιεζοηλεκτρικός χαλαζίας χρησιμοποιείται για να παραγάγει τα υπερηχητικά κύματα (P.Langevin) και η χρήση του γίνεται ως αισθητήρας. Στη δεκαετία του '20, προτάθηκε η χρήση του χαλαζία για να ελέγξει τη συχνότητα αντήχησης των ταλαντωτών από έναν αμερικανό φυσικό: W. G. Cady. Κατά τη διάρκεια της περιόδου μετά από τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο, ανακαλύφθηκαν οι περισσότερες από τις πιεζοηλεκτρικές εφαρμογές που εξοικειωνόμαστε τώρα (μικρόφωνα, επιταγχοσιόμετρα, υπερηχητικοί μετατροπείς, πένσες κ.λ.π.). Εντούτοις, τα υλικά διαθέσιμα στο χρόνο περιόρισαν συχνά την απόδοση συσκευών. Η ανάπτυξη της ηλεκτρονικής, ειδικά κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου και η ανακάλυψη της σιδηροηλεκτρικής κεραμικής αύξησαν τη χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελείται από τη δυνατότητα ορισμένων κρυστάλλινων υλικών (δηλ. κεραμική) για να παραγάγει μια ηλεκτρική τάση στην εφαρμογή μιας εξωτερικής δύναμης. Το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στο σχεδιασμό μετατροπέων (επιταγχοσιόμετρα, μετατροπείς

δύναμης και τάσης κ.λ.π.). Σύμφωνα με το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ένα ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μια παραμόρφωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έχει εφαρμοστεί στο σχεδιασμό ενεργοποιητών.

Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών ως ενεργοποιητές και ως αισθητήρες για τον έλεγχο του θορύβου και της δόνησης έχουν καταδειχθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια (Forward, 1981; Crawley & de Luis, 1987). Υπάρχουν δύο κατηγορίες πιεζοηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο δόνησης: κεραμικά και πολυμερή σώματα. Το πιο γνωστό πιεζοκεραμικό είναι ο μόλυβδος ζirkονίου τιτανίου (PZT), το οποίο έχει μια ανακτήσιμη τάση 0.1% και χρησιμοποιείται ευρέως ως ενεργοποιητής και ως αισθητήρας για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των υπερηχητικών εφαρμογών και έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα πιεζοπολυμερή χρησιμοποιούνται κυρίως ως αισθητήρες και το πιο γνωστό είναι το PVDF. Το PVDF μελετήθηκε αρχικά από τον Kawai στα τέλη της δεκαετίας του 60 και έγινε εμπορικά διαθέσιμος στις αρχές της δεκαετίας του 80.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

«ΕΥΦΥΕΙΣ» ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Ένα βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται στη δυναμική λειτουργία των δομών είναι η ανεπιθύμητες δονήσεις. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται σε ελέγχους δομών που υποβάλλονται σε εναλλασσόμενες φορτίσεις. Οι αισθητήρες είτε ενσωματώνονται, είτε συγκολλώνται στις δομές. Οι αισθητήρες που συγκολλώνται στη δομή δεν είναι παρεισφρητικοί, δεν αλλοιώνουν τις ιδιότητές της, αλλά δεν έχουν και μεγάλη αντοχή. Τα κύρια πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων είναι η γρήγορη απόκρισή τους, το μικρό τους μέγεθος, η μεγάλη πυκνότητα ισχύος και μεγάλη δύναμη. Έχουν τη δυνατότητα να ενεργούν και ως ενεργοποιητές, αλλά και ως αισθητήρες. Η ικανότητά τους να ανιχνεύουν τάσεις κάτω από τη φόρτιση μέσω δυναμικών φορτίων, επιτρέπει την προβολή των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο.

Οι πιεζοκεραμικοί ενεργοποιητές έχουν γίνει πολύ δημοφιλείς. Το κύριο χαρακτηριστικό του σχεδιασμού τους είναι η μεταφορά της τάσης μέσω ενός στρώματος κόλλας. Οι αισθητήρες είναι σύνθετα υλικά, που αποτελούνται από ένα μη αγωγίμο υλικό και ένα φίλτρο σύνδεσής του με το υπό εξέταση υλικό. Κάτω από την έκταση του, αυξάνεται το διάκενο ανάμεσα στο παρακείμενο υλικό πληρώσεως και αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση του σύνθετου και το αντίστροφο ισχύει στην συμπίεση. Το πρόβλημα είναι η μη γραμμικότητα ανάμεσα στην αλλαγή της αντίστασης και της τάσης.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών προσφέρουν μια αυξημένη ευαισθησία, μόνωση από την ηλεκτρομαγνητική επιρροή και τις ιδιότητες της σύνδεσής τους με τα υπάρχοντα οπτικά δίκτυα. Οι αισθητήρες αυτοί μετρούν την τάση, την θερμοκρασία, την πίεση και άλλες φυσικές παραμέτρους και μπορούν να λειτουργήσουν καλά είτε χρησιμοποιηθούν ως ενσωματωμένοι, είτε ως συσσωρευμένοι στην επιφάνεια της δομής. Το υλικό που δέχεται τον αισθητήρα μπορεί να έχει ως βασική σύσταση πυρήνα μετάλλου, σκυροδέματος ή να είναι πολυμερές. Οι αισθητήρες οπτικών ινών που συνδέονται σε σύνθετα υλικά είναι ικανοί να ανιχνεύσουν αλλαγές στην τάση και στη θερμοκρασία της δομής. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να βρεθούν οι θεωρήσεις που γίνονται για την μη συμβατότητα του υλικού του αισθητήρα με το σύνθετο και στις οποίες λαμβάνονται υπόψη και οι αυτεντατικές καταστάσεις της κατασκευής τους.

Τα υλικά σχήματος μορφής είναι μια νέα κατηγορία υλικών στα οποία τα φορτία μπορούν να ελεγχθούν κατά την εφαρμογή τους. Αυτά τα σύνθετα συμπεριέχουν έναν ενεργοποιητή SMA (Shape Memory Alloys), που ενσωματώνεται σε μήτρα σύνθετου υλικού. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο υλικών και τις φάσεις του μαρτενσίτη/ωστενίτη οδηγούν σε μικρορωγμές. Αυτές οι διεργασίες μπορούν να μελετηθούν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Έχουν εφαρμοστεί αναλύσεις, γραμμικές και μη γραμμικές, quasi-static και μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων για ενεργοποιητές και αισθητήρες για μια συσκευή ή μια σειρά συσκευών. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μελετήθηκε η αξιοπιστία των ενεργοποιητών/αισθητήρων στις εφαρμογές τους σε κατασκευές. Με τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές αυτούς έχουν γίνει μετρήσεις σε θερμοελαστικά φαινόμενα, διατμητικές τάσεις, δόνηση και κρούση, αλλαγή στη συχνότητα, αλλαγές στην πίεση, στο ηλεκτρικό ρεύμα κ.λ.π..

Οι αισθητήρες και ενεργοποιητές που χρησιμοποιούνται είναι: πιεζοκεραμικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές, θερμοπιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές, πιεζοηλεκτρικοί υπερηχητικοί μετατροπείς, πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές κατευθυντήριας δύναμης, μετατροπείς πιεζοαντίστασης, πιεζοσύνθετοι αισθητήρες και ενεργοποιητές, πιεζοσύνθετοι υδροστατικοί μετατροπείς, πιεζοσύνθετες υπερηχητικές σειρές, πιεζοαντιστατικοί αισθητήρες πίεσης πυριτίου, πιεζοηλεκτρικές μηχανές, πιεζοηλεκτρικές υπερηχητικές μηχανές, αισθητήρες αντηχείων πυριτίου αφής, αισθητήρες πυριτίου αφής, αισθητήρες μονολιθικά επιταχύμετρα πυριτίου, αισθητήρες πίεσης πυριτίου, αισθητήρες οπτικών ινών, αισθητήρες οπτικών ινών που ενσωματώνονται στα σύνθετα, παρεμβαλλόμετρα ινών, σιδηροηλεκτρικοί ενεργοποιητές, κεραμικοί ενεργοποιητές RES, αντηχεία/μετατροπείς κυμάτων ακουστικής επιφάνειας, μαγνητοσυστολικοί ενεργοποιητές κραμάτων, πολυστρωματικοί ηλεκτροσυστολικοί ενεργοποιητές, επιταχύμετρα που χρησιμοποιούν τα μαγνητοσυστολικά ή πιεζοανθεκτικά αποτελέσματα, μετατροπείς, ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς, ενεργοποιητές σωληνοειδών, ηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες δομών μικροϋπολογιστών (MEMS), ενεργοποιητές κινήσεων, γραμμικοί ενεργοποιητές, μικροαισθητήρες πίεσης, αισθητήρες γυροσκοπίων, μη καταστρεπτικοί αισθητήρες δοκιμής (NDT), υπερηχητικές μηχανές, υπερηχητικοί μετατροπείς, αισθητήρες ροής, διακινούμενες υπερηχητικές μηχανές κυμάτων, Ενεργοποιητές SMA κλπ

3.1.Ενεργοποιητές



Οι ενεργοποιητές, οι οποίοι αποτελούν τμήμα των ευφών συστημάτων πρέπει να είναι σε θέση να λάβουν τα δεδομένα και να τα μετατρέψουν σε φυσικές ποσότητες, των οποίων

Εικόνα 2 Τύποι ενεργοποιητών

η επίδραση αλλάζει το σύστημα. Οι ενεργοποιητές θα πρέπει, για τη σωστή τους λειτουργία, να είναι διανεμημένοι σε όλο το εύρος της δομής. Ο ενεργοποιητής λαμβάνει ένα ηλεκτρικό σήμα και το μετατρέπει σε μια τάση ή μια μετατόπιση, δηλαδή σε ένα φυσικό μέγεθος. Τα φυσικά αυτά χαρακτηριστικά αποτελούν και τους παράγοντες που χαρακτηρίζουν το σύστημα.



Εικόνα 3 Ενεργοποιητές κυλινδρικού σχήματος

Η τάση που προκαλείται από έναν ενεργοποιητή καλείται τάση ενεργοποίησης. Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να εφαρμοστούν οι τάσεις ενεργοποίησης, όπως οι αλλαγή της θερμοκρασίας η έκθεση σε υγρασία, αλλά μόνο μερικοί από αυτούς είναι χρήσιμοι και δυνατό να ελεγχθούν. Συνηθέστεροι τρόποι εφαρμογής μιας τάσης σε μια δομή μέσω ενός ενεργοποιητή είναι ο πιεζοηλεκτρισμός, η ηλεκτροσυστολή, η μαγνητοσυστολή, και η επίδραση μνήμης μορφής. Αυτοί οι τέσσερις είναι και οι βασικοί ενεργοποιητές που χρησιμοποιούνται στις ευφείς δομές, και μαζί με τα MEMS (μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα) είναι αυτά που θα παρουσιαστούν, εκτενέστερα, σε παρακάτω παραγράφους. Στο παρακάτω διάγραμμα παρατίθενται οι ιδιότητες αυτών των ενεργοποιητών.

	PZT-G 1195	PVDF	PMN-BA	Nitinol	Tenefol-D
Actuation Method	Piezoceramic	Piezo Film	Electrostrictor	Shape Memory Effect	Magnetostrictor
Max Strain (ppm)	300	300	600	20000	1800
E psix10 ⁶	9	0.3	17	4m ^a , 13a ^b	7
T max(°C)	360	100	Hign	45	380
Hysterisis (%)	10	>10	<1	5	2
Bandwidth	KHz	KHz	KHz	1 Hz	100Hz
Temp sens. (%/°C)	0.05	0.8	0.9	-	0.3
m:martensite, a: austenite					

Εικόνα 4 Πίνακας σύγκρισης «ευφρών» υλικών(Littlefield Andrew George)

3.1.1.Πιεζοηλεκτρικά Υλικά



Το 1880, ο Zak και ο Pierre Curie ανακάλυψαν ένα ασυνήθιστο χαρακτηριστικό ορισμένων κρυστάλλινων μεταλλευμάτων: όταν υποβάλλονται σε μια μηχανική δύναμη, τα κρύσταλλα έγιναν ηλεκτρικά πολωμένα. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και είναι μια βασική ιδιότητα ορισμένων φυσικών ή σύνθετων κρυστάλλων, οι οποίοι όταν καταπονούνται εμφανίζουν ηλεκτρικά φορτία αντίθετου σημείου στις απέναντι επιφάνειές τους. Τα ηλεκτρικά φορτία αλλάζουν πρόσημο ανάλογα με τη συχνότητα που αλλάζει φορά η καταπόνηση.

Εικόνα 5 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές

Για παράδειγμα ένας κρύσταλλος που καταπονείται σε εφελκυσμό και θλίψη (εναλλακτικά), παράγει ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό δυναμικό στις επιφάνειές του.

Στη συνέχεια, επιβεβαιώθηκε και το αντίστροφο αυτής της σχέσης (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο): Όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό δυναμικό στις απέναντι επιφάνειες ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, ο κρύσταλλος θα παραμορφωθεί εφελκυστικά ή θλιπτικά, ανάλογα με τη φορά του ηλεκτρικού δυναμικού. Εάν το δυναμικό αυτό είναι εναλλασσόμενο, τότε και ο κρύσταλλος διαδοχικά θα εφελκύεται ή θα θλίβεται με την ίδια συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος .

Αν και τα μεγέθη των πιεζοηλεκτρικών τάσεων, των μετατοπίσεων, ή των δυνάμεων είναι μικρά και απαιτούν συχνά την ενίσχυση τους, (π.χ. ένας χαρακτηριστικός δίσκος πιεζοηλεκτρικού υλικού θα αυξηθεί ή θα μειωθεί στο πάχος από ένα κλάσμα χιλιοστού), τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν βρει εφαρμογή σε πολλές δραστηριότητες. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες δύναμης ή μετατοπίσεων εφαρμόζοντας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και για την ανίχνευση των υπερηχητικών ελαστικών κυμάτων. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εφαρμόζεται όταν ο

κρύσταλλος χρησιμοποιείται για την παραγωγή των υπερηχητικών κυμάτων. Στην πράξη ο ίδιος κρύσταλλος χρησιμοποιείται και σαν πομπός και σαν δέκτης των υπερηχητικών ελαστικών κυμάτων.

Από τους φυσικούς κρυστάλλους που εμφανίζουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ευρέως διαδεδομένος είναι ο κρύσταλλος χαλαζία (quartz (SiO_2)), που έχει τη μορφή εξαγωγικού πρίσματος. Στις πλάκες χαλαζία μπορεί να δοθούν, ανάλογα με τις απαιτήσεις διάφορα σχήματα, όπως τη μορφή κυκλικών, τετραγωνικών ή ορθογωνικών λεπτών δίσκων. Υπάρχει, όμως, περιορισμός ως προς το μέγεθος αυτό, δεδομένου ότι οι φυσικοί κρύσταλλοι χαλαζία δεν απαντώνται στη φύση σε μεγάλο μέγεθος.

Στον 20ό αιώνα η ανακάλυψη νέων πιεζοηλεκτρικών κεραμικών και άλλων σύνθετων υλικών επέτρεψαν στους σχεδιαστές να υιοθετήσουν την πιεζοηλεκτρική δράση και την αντίστροφη πιεζοηλεκτρική επίδραση σε πολλές νέες εφαρμογές. Αυτά τα υλικά είναι γενικά φυσικά ισχυρά και χημικά αδρανή, και είναι σχετικά ανέξοδα να κατασκευάζουν. Τέτοια υλικά είναι τα κεραμικά πιεζοηλεκτρικά.

Τα πιεζοηλεκτρικά φαινόμενα, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να χαρακτηριστούν ως μεταφορά μεταξύ ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας. Τέτοιες μεταφορές μπορούν να προκληθούν όταν τα υλικά είναι ηλεκτρικά φορτισμένα και μπορεί να πολωθούν. Για ένα υλικό που παρουσιάζει ανισότροπη συμπεριφορά, όπως το πιεζοηλεκτρικό υλικό, η κρυσταλλική του δομή δεν έχει κέντρο συμμετρίας (van Randerdaat & Setterington, 1974). Οι κρυσταλλικές δομές που υπάρχουν και παρουσιάζουν μη κεντρική συμμετρία αποτελούν το ποσοστό 21 από 32. Ένας κρύσταλλος που δεν παρουσιάζει κέντρο συμμετρίας έχει έναν ή περισσότερους κρυσταλλογραφικούς άξονες. Οι 20 από τους 21 κρυσταλλικές δομές που παρουσιάζουν ασυμμετρία σε σχέση με το κέντρο της δομής τους, παρουσιάζουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο κατά μήκος του άξονα κατεύθυνσής τους. Από τις παραπάνω είκοσι δομές, οι δέκα έχουν μόνο ένα άξονα συμμετρίας. Τέτοιοι κρύσταλλοι ονομάζονται πολωμένοι αφού παρουσιάζουν στιγμιαία πόλωση. Η τιμή της στιγμιαίας πόλωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αυτό καλείται πυροηλεκτρικό φαινόμενο. Οι πυροηλεκτρικοί κρύσταλλοι, για τους οποίους η διεύθυνση της πολικότητας μπορεί να μεταβληθεί με την επιβολή εξωγενούς ηλεκτρικού πεδίου, λέγεται ότι παρουσιάζουν φεροηλεκτρική συμπεριφορά.

Τα περισσότερα από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι στερεά κρυστάλλων. Αυτά μπορούν να είναι μονοί κρύσταλλοι είτε σχηματισμένοι φυσικά ή με συνθετικές διεργασίες, είτε πολυκρυσταλλικά υλικά, όπως τα φεροηλεκτρικά κεραμικά και δίνοντάς του, σε μακροσκοπική κλίμακα, μια συμμετρία μονού κρυστάλλου με τη διαδικασία της πόλωσης (με την εφαρμογή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία Curie). Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να παρουσιαστεί σε κρυστάλλους που αποτελούνται από ένα είδος στοιχείου (σε αυτήν την περίπτωση η πόλωση είναι ανάλογη με την ηλεκτρική τάση). Τα πολυμερή μπορεί να λειτουργήσουν ως πιεζοηλεκτρικά κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου.

3.1.2. Ηλεκτροσυστολή-Σιδηροηλεκτρικά υλικά

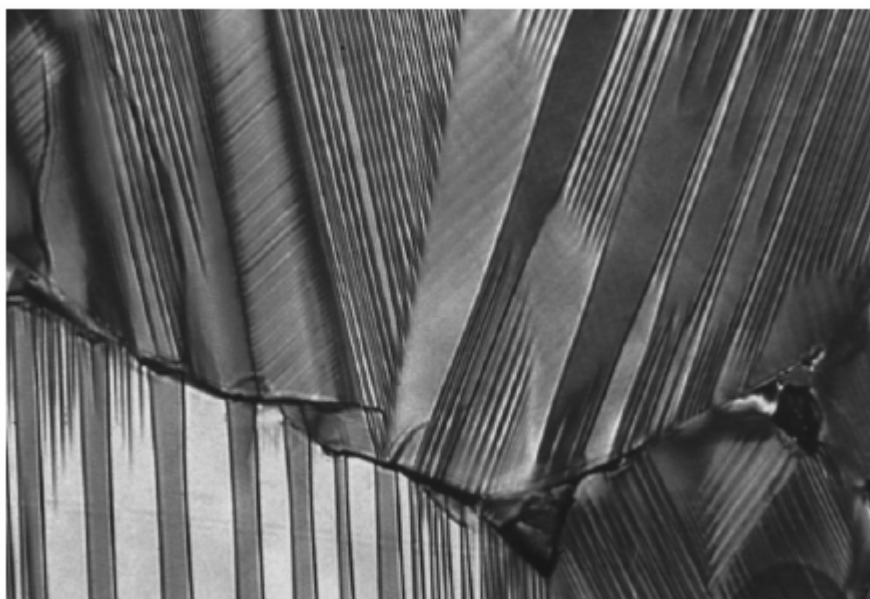
Η ηλεκτρική συμπεριφορά των ενεργών διηλεκτρικών είναι αποτέλεσμα της άμεσης αλληλεπίδρασης μεταξύ εξωτερικών παραγόντων (π.χ. μηχανικής τάσης, έντασης ηλεκτρικού πεδίου, θερμοκρασίας κ.α.) και εσωτερικών μεταβολών που συντελούνται στα υλικά (π.χ. παραμόρφωση, πόλωση, εντροπία κ.α.). Για παράδειγμα η

μεταβολή της ηλεκτρικής πόλωσης ενός υλικού το οποίο υφίσταται παραμόρφωση υπό την επίδραση μηχανικής τάσης ονομάζεται *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*. Επίσης το φαινόμενο της παρουσίας μόνιμης πόλωσης μετά από την απομάκρυνση του ηλεκτρικού πεδίου από ένα υλικό ονομάζεται *σιδηροηλεκτρισμός*.

Ο κατάλογος των ενεργών διηλεκτρικών είναι μεγάλος και ολοένα αυξάνεται. Η σημαντική ερευνα που γίνεται στον τομέα αυτό συνεχώς ανακαλύπτει και προωθεί στις εφαρμογές νέα υλικά που προέρχονται κυρίως από την κατηγορία των ηλεκτρικών κεραμικών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν τα *σιδηροηλεκτρικά* διηλεκτρικά μιας και αποτελούν πρώτης τάξεως υλικά για την κατασκευή *δυναμικών μνημών* (*non-volatile memories*) για εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας.

Όπως τα πιεζοηλεκτρικά, έτσι και τα σιδηροηλεκτρικά υλικά μεταβάλλουν το σχήμα τους όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στα άκρα του ή παράγεται μια ηλεκτρική τάση όταν εφαρμοστεί μια μηχανική τάση. Η διαφορά είναι ότι η προκληθείσα τάση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, έτσι η μετατόπιση δεν είναι ανάλογη του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται, ανεξάρτητα από την πολικότητα.

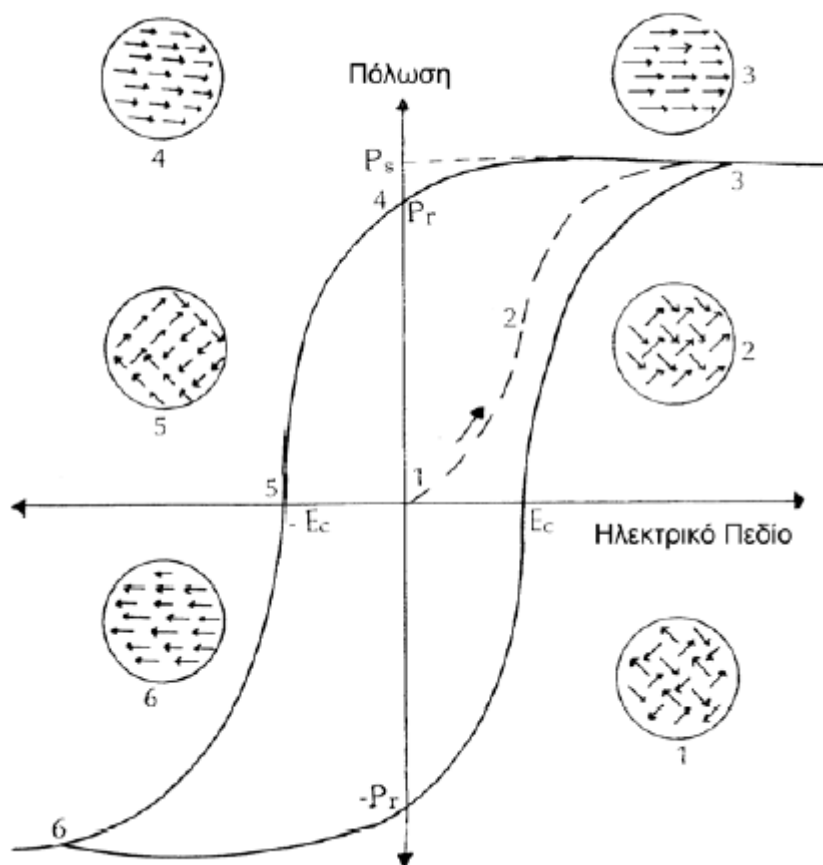
Τα σιδηροηλεκτρικά υλικά παρουσιάζουν αυθόρμητη πόλωση απουσία ηλεκτρικού πεδίου. Το υλικό θεωρείται ότι αποτελείται από μικροσκοπικές *σιδηροηλεκτρικές περιοχές ή τομείς (domains)* μέσα στις οποίες τα δίπολα προσανατολίζονται αυθόρμητα προς την ίδια κατεύθυνση.



Εικόνα 6 Φάση σιδηροηλεκτρικών υλικών

Πριν την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου ο προσανατολισμός της πόλωσης κάθε περιοχής είναι τυχαίος με αποτέλεσμα η συνολική πόλωση του υλικού να είναι μηδέν. Υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, τα δίπολα κάθε τομέα τείνουν να προσανατολιστούν προς τη διεύθυνση του πεδίου με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της πόλωσης του υλικού. Αυτό συμβαίνει με μετακίνηση των ορίων των σιδηροηλεκτρικών περιοχών μέσα στον κρύσταλλο. Όπως δείχνει η *Εικόνα 7* η μεταβολή της πόλωσης P με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E είναι γραμμική, για χαμηλά

πεδία, αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό για μεσαία και εμφανίζει κορεσμό για πολύ υψηλά πεδία. Τότε όλοι οι τομείς έχουν προσανατολιστεί πλήρως προς τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Με την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου η πόλωση δεν επιστρέφει στο μηδέν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι προσανατολισμένες περιοχές αδυνατούν να επιστρέψουν στην αρχική αυθόρμητη πόλωσή τους χωρίς να δεχτούν επιπλέον ενέργεια με επιβολή ηλεκτρικού πεδίου αντίθετης πολικότητας. Η ενέργεια αυτή απαιτείται για την αλλαγή του προσανατολισμού των σιδηροηλεκτρικών τομέων.



Εικόνα 7 Μεταβολή της πόλωσης συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου

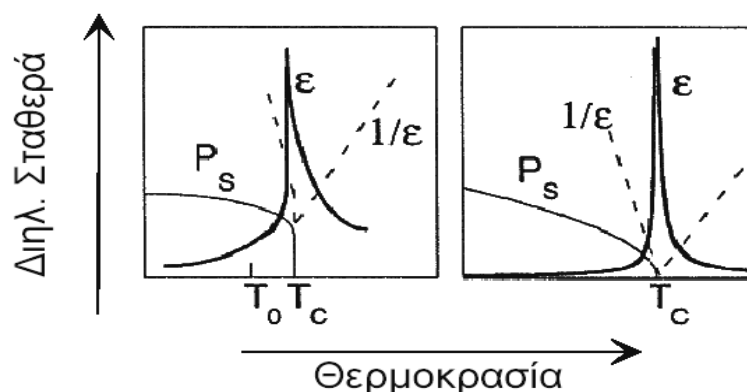
Η μέγιστη πόλωση P_s εμφανίζεται όταν όλες οι περιοχές ίδιας πόλωσης προσανατολίζονται προς τη διεύθυνση του πεδίου, και ονομάζεται *πόλωση κορεσμού* (*saturation polarization*). Η πόλωση P_r που παραμένει στο υλικό μετά την απομάκρυνση του πεδίου ονομάζεται *παραμένουσα πόλωση* (*remnant polarization*). Η ένταση πεδίου E_c αντίθετης διεύθυνσης που πρέπει να εφαρμοστεί στο υλικό για το μηδενισμό της παραμένουσας πόλωσης ονομάζεται *πεδίο αποπόλωσης* (*coercive field*). Ο πλήρης κύκλος πόλωσης – αποπόλωσης ορίζει μια κλειστή καμπύλη που ονομάζεται *βρόγχος υστέρησης* σιδηροηλεκτρικού υλικού.

Η σιδηροηλεκτρική συμπεριφορά εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, *θερμοκρασία Curie*, η σιδηροηλεκτρική συμπεριφορά εξαφανίζεται και έχουμε *μετάβαση φάσης* από τη σιδηροηλεκτρική στην *παραηλεκτρική κατάσταση*. Η θερμοκρασία *Curie* αντιστοιχεί σε μεταβολή της κρυσταλλικής συμμετρίας των κρυστάλλων με αποτέλεσμα η διηλεκτρική, ελαστική, πιεζοηλεκτρική και ηλεκτροοπτική συμπεριφορά των υλικών να εμφανίζει απότομα μέγιστα ή ελάχιστα

(Εικόνα 12). Η μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς σιδηροηλεκτρικού υλικού για θερμοκρασίες $T > T_c$ ακολουθεί το νόμο των *Curie-Weiss*:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + \frac{C_c}{T - T_o}$$

C_c είναι η σταθερά *Curie* και T_o μια κρίσιμη θερμοκρασία η οποία είναι γενικά λίγο διαφορετική από την T_c . Για μεταβάσεις πρώτης τάξεως η T_o είναι λίγο μικρότερη της T_c ενώ για μεταβάσεις δεύτερης τάξεως ισχύει $T_o = T_c$.



Εικόνα 8 Μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς συναρτήσει της θερμοκρασίας

Το φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής είναι παρόν σε όλα τα διηλεκτρικά υλικά, αλλά είναι μικρότερο σε σχέση με το επικρατέστερο στα υλικά αυτά πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Επιπλέον κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των πιεζοηλεκτρικών εφαρμογών το φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής αμελείται στις περισσότερες εφαρμογές. Παρόλα αυτά τα υλικά που έχουν υψηλή διηλεκτρική σταθερά (μεγάλη πόλωση) όπως τα φεροηλεκτρικά υλικά μπορούν να επιτύχουν πολύ μεγάλες ηλεκτροσυστολικές τάσεις.

Το νιόβιο μαγνησίου-μολύβδου (PMN), ή οι συμπαγείς του μορφές με τιτάνιο μολύβδου (PMN-PT), είναι τα πιο σημαντικά φεροηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές. Το PMN είναι διαθέσιμο και σε φύλλα όπως και τα PZT και μπορεί να ενσωματωθεί στο υλικό προς μέτρηση ή να τοποθετηθεί στη επιφάνειά του. Έχει ευρεία χρήση στην βιομηχανία οπτικών για τη ρύθμιση των φακών σε επίπεδο μικρών. Χρησιμοποιείται επίσης από κοινού με τα PZT για τον έλεγχο ακρίβειας των δομών.

Το 1958, οι Smolenski and Agranovskaya ανακάλυψαν πρώτοι το PMN, το οποίο χαρακτηρίζεται με μια μέση θερμοκρασία *Curie* γύρω στους 0°C. Έχει μεγάλη διηλεκτρική σταθερά με ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας. Υλικά με βάση PMN λειτουργούν με θερμοκρασία πάνω από τη σύνηθες και έχουν μεγαλύτερες τάσεις (>0.1%) και χαμηλότερη υστέρηση (<5%) σε πεδία εφαρμοζόμενων τάσεων περίπου (1 MV/m). Τα ηλεκτροσυστολικά υλικά δεν είναι καθαρά πιεζοηλεκτρικά υλικά και το ηλεκτροσυστολικό φαινόμενο δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Εντούτοις, τα ηλεκτροσυστολικά υλικά να είναι πιο αξιόπιστα από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, αφού βασίζονται σε ορισμένες φυσικές ιδιότητες όπως η

υστέρηση, ο συντελεστής πολικότητας, η επίδραση της θερμοκρασίας, εξωτερική παρέμβαση και αναλύονται παρακάτω:

1. Το ηλεκτροσυστολικό PMN έχει αμελητέα υστέρηση ($<1\%$), η οποία είναι βασική για τις ελεγχόμενες ανοιχτού τύπου αποκρίσεις.
2. Τα υλικά PMN δεν απαιτούν πόλωση, το οποίο σημαίνει ότι διατηρούν τη σταθερότητά του σε φαινόμενα γήρανσης και ερπυσμού, τα οποία παρατηρούνται σε συσκευές με πιεζοηλεκτρικά υλικά.
3. Τα υλικά PMN έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (17×10^6 psi), το οποίο συνδέεται με την ακαμψία του υλικού και είναι ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση.
4. Οι ενεργοποιητές PMN έχουν αμελητέα αύξηση της θερμοκρασίας, επειδή ο συντελεστής θερμικής επέκτασης είναι μικρός. Η υψηλή μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της επιτρέπει στις συσκευές PMN για να λειτουργήσουν σε πολύ αντίξοα περιβάλλοντα.
5. Το PMN έχει βελτιωμένη την ευαισθησία πίεσης που μειώνει τη τάση λειτουργίας κάτω από 150 V.
6. Τα υλικά PMN παράγουν ελάχιστη ή καμία ηλεκτρική ή μαγνητική αλληλεπίδραση με άλλα στοιχεία της συσκευής.

Συνεπώς, τα υλικά PMN έχουν αντικαταστήσει πολλούς πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές χρησιμοποιούμενους σε συσκευές ακρίβειας επειδή η απόκλιση των υλικών PMN είναι λιγότερο από 3% για πάνω από δύο ημέρες λειτουργίας σε σύγκριση με το 10–15% μιας πιεζοηλεκτρικής συσκευής που βρίσκεται υπό φόρτιση.

Οι ενεργοποιητές ακρίβειας και οι μετατροπείς μετατοπίσεων είναι ιδανικές εφαρμογές για υλικά PMN. Σημειώνεται ότι και τα ηλεκτροσυστολικά και τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παρέχουν ακριβείς μετατοπίσεις με έναν γρήγορο χρόνο απόκρισης στις εφαρμογές ενεργοποιητών. Συγκρινόμενα με τους ηλεκτρομαγνητικούς ενεργοποιητές, τα ηλεκτροσυστολικά ή πιεζοηλεκτρικά συστήματα είναι πιο σταθερά, καταναλώνουν τη λιγότερη ενέργεια, και έχουν λιγότερα προβλήματα υπερθέρμανσης. Κατά συνέπεια, αυτά τα υλικά είναι καταλληλότερα για μια ευρεία ποικιλία των εμπορικών εφαρμογών. Οι πρακτικές εφαρμογές PMN περιλαμβάνουν τους ενεργοποιητές μετατοπίσεων, τις μηχανές, τις αντλίες, συστήματα οπτικής ανίχνευσης, μονωτές δόνησης, κομμάτια εργαλείων κλπ. Μια εφαρμογή στις οπτικές συσκευές είναι στον προσδιορισμό θέσης των παραμορφώσιμων καθρεφτών, όπως εκείνοι στο διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble. Οι PMN ενεργοποιητές λειτουργούν σε σειρά στο πίσω μέρος της επιφάνειας καθρεφτών, η οποία μπορεί να ελέγξει την επιφάνεια της αντανάκλασης. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στον έλεγχο ακρίβειας στην περίπτωση λέιζερ υψηλής ισχύος φωτός. Η πρόσφατη ανάπτυξη εστιάζει στα ηλεκτροσυστολικά πολυμερή σώματα και τις πολυεπίπεδες θεωρίες συζεύξεων.

3.1.3. Μαγνητοσυστολή-Σιδηρομαγνητικά υλικά

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής παρουσιάζεται σε ορισμένα υλικά, τα λεγόμενα σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως είναι το νικέλιο, ο σίδηρος, το καβάλτιο και

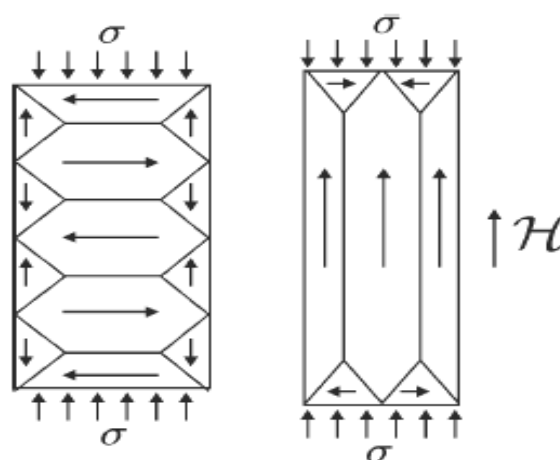
διάφορα άλλα κράματα, τα οποία εμφανίζουν αυτή τη συμπεριφορά. Στο φαινόμενο αυτό, όταν μια ράβδος από σιδηρομαγνητικό υλικό, αφού μαγνητιστεί και τοποθετηθεί σε ένα πηνίο, βραχυνθεί ή επιμηκυνθεί, τότε στα άκρα του πηνίου εμφανίζεται μια μαγνητεγερτική δύναμη. Αντιστρόφως, εάν ένα εναλλασσόμενο δυναμικό εφαρμοστεί στο πηνίο που περιβάλλει τη μαγνητισμένη σιδηρομαγνητική ράβδο, τότε η ράβδος ταλαντώνεται κάτω από την επίδραση του μαγνητικού πεδίου του πηνίου.

Η ανηγμένη παραμόρφωση της ράβδου, είναι πολύ μικρή και της τάξης του 10^{-4} - 10^{-6} . Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής εξαρτάται από τη θερμοκρασία και εξαφανίζεται πάνω από τη θερμοκρασία του υλικού που είναι γνωστή σαν σημείο Curie. Το σημείο Curie για το νικέλιο είναι 360°C .

Μαγνητοσυστολή είναι η αλλαγή του μεγέθους ενός αντικειμένου εξαιτίας ενός εξωτερικού εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την κατασκευή τηλεμηχανισμών εφαρμογής (remote actuator systems), μετατρέποντας ένα μαγνητικό σήμα (είσοδος) σε μηχανική έξοδο. Μια τυπική, τέτοιου είδους διαμόρφωση, είναι μια πρόβολος μικροδοκός ή μεμβράνη που επικαλύπτεται απ' τη μια πλευρά της με μαγνητοσυσταλτικό υλικό. Παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου δημιουργείται συσσώρευση τάσεων και η μικροκατασκευή κάμπτεται σε κάποιο σημείο. Χαρακτηριστικά μαγνητοσυστολικά υλικά είναι κράματα NdFe, TbCo και πολυστρωματικά υμένα TbFe/TbCo, καθώς έχουν υψηλό συντελεστή μαγνητοσυστολής. Ένα άλλο υλικό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το Tefonel-D (Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂) και χρησιμοποιείται κυρίως στους μικρό-αισθητήρες.

Η σύγχρονη εποχή του φαινομένου της μαγνητοσυστολής ξεκίνησε το 1963 όταν η παραμόρφωση των σπάνιων υλικών της γης, όπως του τερβίου (Tb) και του δυσπροσίου (Dy), πλησίασε το 1% σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Μέχρι τότε πολλά υλικά είχαν παρουσιάσει μαγνητοσυστολική συμπεριφορά, συμπεριλαμβανομένων ορισμένων υλικών σε θερμοκρασίες δωματίου, αλλά η μέγιστη μαγνητοσυστολή παρατηρήθηκε στα κράματα, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες δωματίου, πράγμα που τα καθιστά ιδανικά για τις κρυογονικές συσκευές.

Με το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, παράγονται υπερηχητικές ταλαντώσεις υψηλής ενέργειας, μικρών όμως συχνοτήτων μέχρι 100KHz

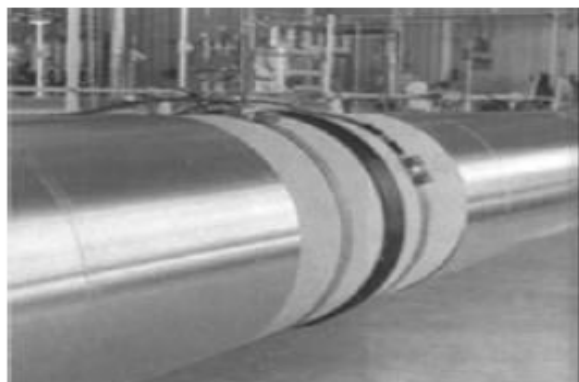


Εικόνα 9 Πόλωση σιδηρομαγνητικού υλικού(Piefort Vincent 2000-2001)

Οι ταλαντωτές μαγνητοσυστολής, είναι συχνά φτιαγμένοι από λεπτά φύλλα σιδηρομαγνητικών υλικών, τα οποία συγκολλούνται με κατάλληλες ουσίες ή έχουν μορφή σωλήνων και όχι το σχήμα της ράβδου, επειδή με τέτοια σχήματα επιτυγχάνονται μικρότερες απώλειες από επαγωγικά ρεύματα ή λόγω μαγνητικής υστέρησης.

Σ' ένα στοιχείο μαγνητοσυστολής το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται είτε από μόνιμο μαγνήτη, είτε από ένα πρόσθετο συνεχές ρεύμα, που εφαρμόζεται στο ίδιο πηνίο στο οποίο εφαρμόζεται και το εναλλασσόμενο ρεύμα και το οποίο δημιουργεί την ταλάντωση του πυρήνα.

Καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται εάν ο πυρήνας του στοιχείου μαγνητοσυστολής γίνει από φερίτες. Οι φερίτες είναι κράματα του τύπου MOFe_2O_3 , όπου Μ είναι μέταλλο όπως το νικέλιο, το μαγγάνιο ή το μαγνήσιο. Για αυτό και οι φερίτες ονομάζονται και φερίτες νικελίου, μαγγανίου κ.λ.π. Οι φερίτες επειδή έχουν μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση εμφανίζουν μικρές απώλειες λόγω επαγωγικών ρευμάτων και επομένως μπορούν να κατασκευάζονται με συμπαγείς πυρήνες και όχι με φύλλα, όπως γίνεται με τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Το σημείο Curie φτάνει για ορισμένους φερίτες και τους 500°C .



Μια μελέτη της NASA του 1992 πρότεινε ότι οι μαγνητοσυστολικοί ενεργοποιητές φύλλων αλουμινίου είναι ανώτεροι από τα πιεζοηλεκτρικά σε τέσσερις περιοχές: αξιοπιστία, σταθερότητα, δυνατότητα να κατασκευαστούν και ευελιξία. Θεωρήθηκε πιο αξιόπιστη μέθοδος επειδή στερείται τους ενσωματωμένους μολύβδους και χρησιμοποιεί της χαμηλής τάσης

Εικόνα 10 Πείραμα της NASA (Littlefield Andrew George)

παροχές ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι σταθερότερη μέθοδος λόγω της ευαισθησίας χαμηλής θερμοκρασίας, του χαμηλού ερπυσμού, και της αντίστασής του στο να σπάσει κάτω από τα υψηλής έντασης ηλεκτρικά πεδία. Η έλλειψη ηλεκτροδίων για τη χρήση του, η ανθεκτικότητα που παρουσιάζουν όταν διαμορφωθούν σε καλώδια, οι μορφές και η ευελιξία ήταν λόγοι για την ανώτερη βιομηχανική παραγωγή της.

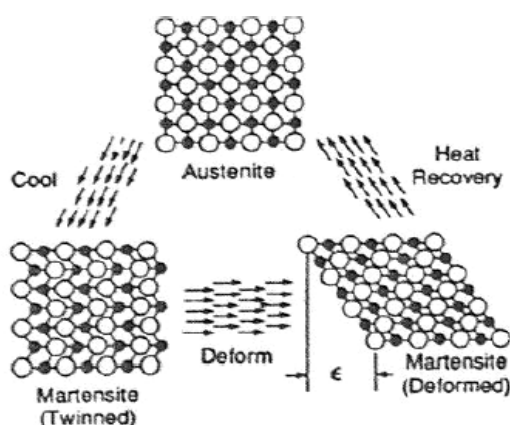
Με όλα αυτά τα πλεονεκτήματα, θα ήταν λογικό να υπήρχαν πολλές εφαρμογές για τα μαγνητοσυστολικά υλικά. Παρόλα αυτά οι εφαρμογές τους είναι περιορισμένες για το λόγο ότι για την ενεργοποίησή τους πρέπει να εφαρμοστεί κάποιο μαγνητικό πεδίο στη δομή των υλικών. Η πιο πρόσφατη χρήση των μαγνητοσυστολικών υλικών είναι για την ανίχνευση διάβρωσης στους σωλήνες.

3.1.4.Κράματα μνήμης μορφής

Τα κράματα μνήμης μορφής είναι υλικά που αλλάζουν την μορφή τους όταν θερμαίνονται. Η θερμότητα μπορεί να αποδοθεί με οποιαδήποτε μέσα συμπεριλαμβανομένου θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση. Εντούτοις, το εύρος ζώνης

του ενεργοποιητή περιορίζεται από την ταχύτητα με την οποία μπορεί να ψυχθεί μεταξύ των θερμάνσεων.

Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται στην κίνηση των περιοχών των κρυστάλλων υπό την επίδραση εξωτερικού θερμικού πεδίου, όταν το υλικό ευρίσκεται σε πλήρη μαρτενσιτική κατάσταση (complete martensite state). Όταν το MSM υλικό υπόκειται σε εξωτερική θέρμανση τα δίπολα που είναι προσανατολισμένα σε ευνοϊκή κατεύθυνση (παράλληλη ή σχεδόν παράλληλη) σχετικά με την κατεύθυνση του πεδίου αυξάνονται σε βάρος των άλλων διπόλων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην αλλαγή του σχήματος του υλικού.



Το Nitinol, ένα κράμα τιτανίου νικελίου, είναι το πιο κοινό των κραμάτων μνήμης μορφής και μπορεί να έχει τη θερμοκρασία μετασχηματισμού του κάτω από τη θερμοκρασία $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ και πάνω από $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, ανάλογα με το ποσοστό του νικελίου στο κράμα.

Εικόνα 11 Μετασχηματισμός από φάση μαρτενσίτη σε ωστενίτη (Littlefield Andrew George)

Ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται μεταξύ μιας πιο χαμηλής θερμοκρασίας φάσης μαρτενσίτη και μιας υψηλότερης θερμοκρασίας φάση ωστενίτη. Η αύξηση ακαμψίας μεταξύ αυτών των δύο φάσεων μπορεί να είναι τριπλάσια ή πολλαπλάσια σε σχέση με άλλους ενεργοποιητές όπως φαίνεται στον πίνακα.

Για να αξιοποιηθεί αυτή η επίδραση μνήμης μορφής, το υλικό θερμαίνεται στην μορφή που προτιμάται και διατηρείται ανωτέρω η θερμοκρασία μετασχηματισμού του, στη φάση του ωστενίτη, για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Έπειτα ψύχεται στη θερμοκρασία χρήσης του, όπου είναι στη φάση του μαρτενσίτη. Το υλικό μπορεί έπειτα να παραμορφωθεί. Θερμαίνοντας πάνω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού του, το υλικό επανέρχεται στην αρχική του μορφή. Η αποκατάσταση της μορφής είναι που κάνει τα κράματα μνήμης μορφής χρήσιμα και ως ενεργοποιητές. Η διαδικασία μπορεί να φανεί σχηματικά στην *Εικόνα 15*.

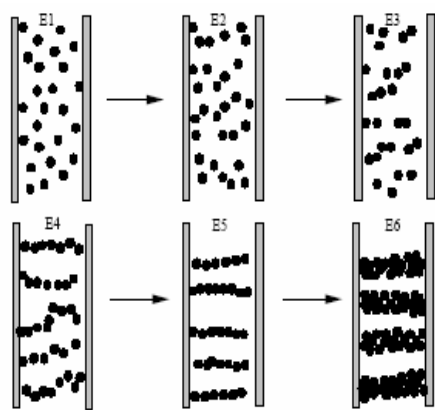
Τα κράματα μνήμης μορφής είναι διαθέσιμα σε ποικίλες μορφές και διαμορφώσεις. Σχηματικά συναντιόνται ως καλώδια, κορδέλες, φύλλα και ελατήρια. Μπορούν επίσης να συνδυαστούν με σχηματισμό δύο μορφών αντί ενός. Αυτό καλείται διπλής κατεύθυνσης επίδραση μνήμης μορφής. Βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη βιοϊατρική, επειδή παρουσιάζουν βιοσυμβατότητα. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για εφαρμογές σε γυαλιά, τα πλαίσια και τους θερμοστάτες καφετιέρων, έως και σε δορυφορικές συσκευές.

Τα σημαντικότερα προβλήματα με τη χρησιμοποίηση των ενεργοποιητών κραμάτων μνήμης μορφής είναι ότι περιλαμβάνουν χαμηλό εύρος ζώνης (bandwidth). Ο

χρόνος αντίδρασης του ενεργοποιητή μπορεί να είναι ταχύς αλλά προτού να μπορέσει δράσει εκ νέου θα πρέπει να ψυχθεί έως την αρχική του μορφή. Αυτός ο χρόνος ψύξης μπορεί να μειωθεί με μεθόδους όπως η υδρόψυξη, αλλά συνήθως το κόστος για τέτοιες τεχνικές αντισταθμίζουν τα οφέλη. Αυτό αποτελεί και ένα σοβαρό μειονέκτημα της χρήσης κραμάτων μνήμης μορφής.

Άλλα προβλήματα με τους ενεργοποιητές SMA περιλαμβάνουν την υστέρηση στην πορεία φόρτισης, απαραίτητο μέγεθος, ώστε ο ενσωματωμένος ενεργοποιητής, να μεταφέρει άμεσα τη θερμότητα στην περιβάλλουσα δομή. Η υστέρηση είναι ένα πρόβλημα που μπορεί να περιοριστεί από την προσθήκη χαλκού στο κράμα. Το μέγεθος του ενσωματωμένου ενεργοποιητή παίζει σημαντικό ρόλο και πρέπει να προσεχθεί ώστε να μην δημιουργεί αλλοίωση στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τέλος, προσοχή πρέπει να δοθεί και στην επιλογή της θερμοκρασίας μετασχηματισμού, έτσι ώστε η θερμότητα που παράγεται να μην αλλοιώσει τη δομή του υπό μέτρηση υλικού.

3.1.5. Ηλεκτρορεολογικά υλικά



Η παρατήρηση των χαρακτηριστικών των ηλεκτρορεολογικών υλικών οφείλεται στον Winkler 1784. Έτσι η συμπεριφορά μερικών υλικών, των ηλεκτρορεολογικών υλικών χαρακτηρίζεται ως συμπεριφορά Winkler. Τα ρευστά ηλεκτρορεολογικά υλικά αποτελούν μια αιώρηση πολωμένων σωματιδίων σε μη αγώγιμο διανεμημένο διαλύτη. Τα ηλεκτρορεολογικά υλικά αποτελούνται από διαλύτη όπως κάποιο σιλικονούχο υλικό ή ορυκτό έλαιο και τα αιωρούμενα σωματίδια από εστέρα πυριτικού οξέως ή πολυαμίδιο.

Εικόνα 12 Πόλωση ηλεκτρορεολογικών υλικών (Piefort Vincent 2000-2001)

Χωρίς την εφαρμογή κάποιου ηλεκτρικού πεδίου, το ηλεκτρορεολογικό υλικό συμπεριφέρεται όπως ένα νευτώνειο ρευστό, εντούτοις μόλις εφαρμοστεί ένα ικανοποιητικό ηλεκτρικό πεδίο το ρευστό υποβάλλεται σε αλλαγή των ιδιοτήτων του.

Όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο τα αιωρούμενα σωματίδια σχηματίζουν αλυσίδες που προκαλούν αντίσταση στη ροή ή αντίσταση στη μετακίνηση. Η αύξηση στην αντίσταση είναι στενά συνδεδεμένη με την αύξηση του ιξώδους του ρευστού και με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Το αρνητικό στη χρήση των ηλεκτρορεολογικών υλικών είναι ότι απαιτείται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο για να ενεργοποιηθούν οι ηλεκτρορεολογικές του ιδιότητες.

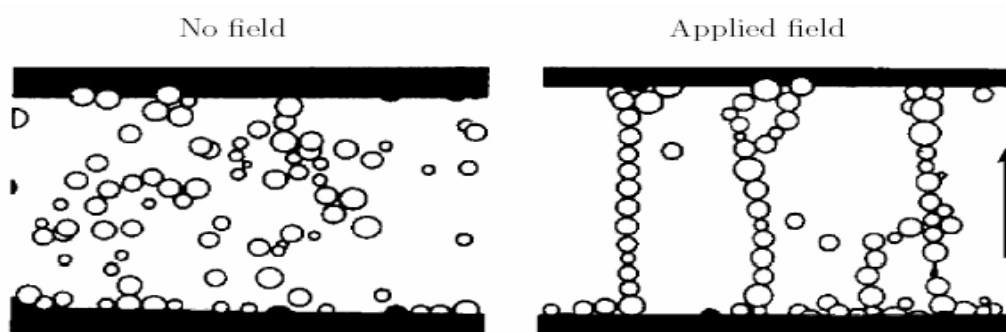
Τα ηλεκτρορεολογικά υλικά κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου γύρω στα 3 kV/mm. συμπεριφέρονται όπως τα πλαστικά Bingham, με μια τάση της τάξης των 10 kPa. Επιπλέον, ο χρόνος μετασχηματισμού που απαιτείται για τα χαρακτηριστικά όπως το ιξώδες του είναι μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Επίσης τα ηλεκτρορεολογικά υλικά μπορούν να μεταβάλλουν τη φάση τους από υγρό σε σχεδόν συμπαγή δομή σχεδόν ακαριαία, γεγονός που οφείλεται στη ευρεία τους εφαρμογή στη βιομηχανία..

Παρόλα αυτά τα ηλεκτρορεολογικά ρευστά έχουν προταθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές. Μεταξύ αυτών είναι οι αποσβεστήρες (Neumann, 1996), υποστηρίγματα μηχανών, και απόσβεση των λεπίδων ελικοπτέρων (NASA, 1992).

3.1.6. Μαγνητορεολογικά υλικά

Τα μαγνητορεολογικά υλικά περιέχουν μαγνητίσιμα μόρια: ινώδης άνθρακας που αιωρείται σε ένα ρευστό διαλύτη.

Τα φερομεταλλικά μόρια, όπως ο σίδηρος καρβονυλίων και άλλες ενώσεις χρησιμοποιούνται ως μαγνητίσιμα μόρια και το σιλικονούχο πυρίτιο χρησιμοποιείται ως φέρων ρευστό. Το μαγνητορεολογικό ρευστό μπορεί επίσης να περιέχει ένα μέσο επιβολής για να ενισχύσει την αναστολή των μαγνητισμένων στερεό-φερομεταλλικών μορίων. Όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται σε αυτά τα ρευστά, τα χαρακτηριστικά ροής αλλάζουν σχεδόν αμέσως. Κατά συνέπεια, ένα ρευστό με χαμηλό ιξώδες μπορεί να αυξήσει το ιξώδες του με την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου, ελεγχόμενο ηλεκτρικά. Ο βαθμός στον οποίο αλλάζει το ιξώδες είναι ανάλογος προς το μέγεθος του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 13 Πόλωση μαγνητορεολογικών υλικών (Piefort Vincent 2000-2001)

Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των ηλεκτρορεολογικών και των μαγνητορεολογικών ρευστών είναι η εφαρμοσμένη τάση. Τα ηλεκτρορεολογικά υλικά αποκρίνονται στα υψηλής τάσεως και χαμηλής έντασης ηλεκτρικά πεδία ενώ τα μαγνητορεολογικά υλικά αποκρίνονται στα μαγνητικά πεδία, που αναπτύσσονται μέσω της τάσης μπαταριών, και παράγει την υψηλή διατμητική τάση στη δομή των ρευστών. Υπάρχει μια άλλη διαφορά σχετικά με την αποδοτικότητά τους. Τα ηλεκτρορεολογικά ρευστά απαιτούν χιλιάδες βολτ για τις χαμηλές διατμητικές τάσεις λειτουργίας και παραγωγής. Με αυτήν την ενέργεια που απαιτείται, υπάρχει κίνδυνος κατά την χρήση των ηλεκτρορεολογικών υλικών και καθιστούν δύσκολη την εφαρμογή τους. Επειδή τα μαγνητορεολογικά ρευστά αποκρίνονται σε μαγνητικά ερεθίσματα, δεν χρειάζονται υψηλή τάση, όπως τα ηλεκτρορεολογικά υλικά, και παράγουν συνήθως πολύ υψηλότερη διατμητική τάση σε σχέση με τα ηλεκτρορεολογικά υλικά. Τα μαγνητορεολογικά υλικά παρουσιάζουν ως πλεονεκτήματα πολύ χαμηλή διατμητική τάση, όταν δεν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο, υψηλές διατμητικές τάσεις όταν εφαρμόζεται η μέγιστη μαγνητοεργετική δύναμη του μαγνητικού πεδίου, μικρή υστέρηση, χημική αδράνεια, θερμοκρασιακή σταθερότητα και γρήγορο χρόνο απόκρισης.

Υπάρχουν τρεις τρόποι που τα ηλεκτρορεολογικά και τα μαγνητορεολογικά υλικά χρησιμοποιούνται σε συσκευές και συστήματα. Ο πρώτος είναι η άμεση διατμητική δράση (ή ο τρόπος πιάτων ολίσθησης) στον οποίο μια από τους μόνιμους πόλους μαγνητών ή ηλεκτροδίων και το ρευστό προκαλούν διατμητική δράση. Ο δεύτερος είναι ο τρόπος βαλβίδων (ή ο σταθερός τρόπος ηλεκτροδίων) στον οποίο το ρευστό βρίσκεται μεταξύ δύο στάσιμων μόνιμων μαγνητών ή ηλεκτροδίων με συνέπεια τη δημιουργία ενός πεδίου ροής μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο τελευταίος τρόπος είναι ο τρόπος ταινιών συμπίεσεων (ή ο σταθερός τρόπος όγκου) όπου η δύναμη και η μετατόπιση του ρευστού είναι παράλληλες στους μαγνητικούς πόλους ή τα ηλεκτρόδια.

Η μαγνητορεολογική απόκριση είναι αποτέλεσμα της πόλωσης που προκαλείται στα σωματίδια από την εφαρμογή του εξωτερικού πεδίου. Η πόλωση των σωματιδίων οδηγεί τις αλυσίδες των διπόλων να προσανατολιστούν στη φορά του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτή, η δομή του υλικού που αποτελείται από τις προσανατολισμένες αλυσίδες των μορίων δυσχεραίνουν την κίνηση του ρευστού με αποτέλεσμα την αύξηση του ιξώδους του. Η μηχανική ενέργεια που απαιτείται για να διασπαστεί η αλυσίδα των αιωρούμενων σωματιδίων αυξάνεται με την επιβολή μεγαλύτερου μαγνητικού πεδίου. Για τις περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές είναι αρκετό ένα πλαστικό μοντέλο Bingham για να χαρακτηρίσει τη συμπεριφορά του μαγνητορεολογικού υλικού. Σε αυτό το υλικό η τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \tau(H) \sin\left(\dot{\gamma}\right) + n_p \dot{\gamma}$$

όπου $\tau(H)$ είναι η διατμητική τάση που προκαλείται από το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο, $\dot{\gamma}$ είναι η διατμητική παραμόρφωση και το n_p είναι ο συντελεστής του πλαστικού ιξώδους που προσδιορίζεται ως ο λόγος της μετρούμενης τάσης προς τη διατμητική τάση.

Ενδιαφέρον στα ρευστά αυτά είναι η ικανότητά τους να παρέχουν απλή και άμεσης απόκρισης εφαρμογές ανάμεσα στα ηλεκτρικά και μηχανικά συστήματα ελέγχου. Τυπικά χαρακτηριστικά των μαγνητορεολογικών και ηλεκτρορεολογικών υλικών παρατίθενται στον πίνακα της *Εικόνας 18*. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τάση που εφαρμόζεται από τα μαγνητορεολογικά υλικά είναι είκοσι φορές μεγαλύτερη από αυτήν που εφαρμόζεται από τα ηλεκτρορεολογικά υλικά.

Property	ER fluid	MR Fluid
Yield Strength τ (field)	2-5 kPa (3-5 kV/mm)	50-100 kPa (150-250 kA/m)
Viscosity n (no field)	0.2-0.3 Pa.s at 25 °C	0.2-0.3 Pa.s at 25 °C
Operating Temperature	-25 to +125 oC	-40 to +150 oC
Response time	ms	ms
Density	1-2 gr/cm ³	3-4 gr/cm ³

Εικόνα 14 Πίνακας σύγκρισης ηλεκτρορεολογικών υλικών και μαγνητορεολογικών υλικών (Piefort Vincent 2000-2001)

Οι εφαρμογές των μαγνητορεολογικών και ηλεκτρορεολογικών υλικών περιλαμβάνουν την ενεργό απομόνωση δόνησης, ελεγχόμενες διατάξεις απόσβεσης, συσκευές απόσβεσης ταινιών συμπίεσεων, ενεργοί αποσβεστήρες οχημάτων, υποστηρίγματα μηχανών, περιστροφική ενεργός διάταξη απόσβεσης ελέγχου κλπ.

3.1.7.Μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS)

Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα είναι μια από τις νεότερες τεχνολογίες αισθητήρων/ενεργοποιητών που είναι διαθέσιμες σήμερα.

Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα είναι μικρές σε μέγεθος (περίπου το πλάτος μιας ανθρώπινης τρίχας) συσκευές, που κατασκευάστηκαν με τη μικρομηχανική και άλλες διαδικασίες που αναπτύχθηκαν, για να αποτελέσουν ολοκληρωμένα κυκλώματα. Το μικρό μέγεθός τους τους κάνει μια συναρπαστική τεχνολογία για τους ενεργοποιητές, αλλά και τους αναγκάζει να είναι οικονομικά δυσπρόσιτοι για τις περισσότερες εφαρμογές. Αυτή τη στιγμή το μεγαλύτερο μέρος της χρήσης για MEMS είναι στους αυτοκινητικούς και βιοϊατρικούς τομείς, όπου οι μεγάλοι αριθμοί που απαιτούνται έχουν βοηθήσει να αντισταθμίσουν το κόστος παραγωγής και να μειώσουν το γενικό κόστος. Η απαίτηση για τους ενεργοποιητές MEMS για τις έξυπνες δομές είναι ακόμα πάρα πολύ μικρή, και η τιμή τους πάρα πολύ υψηλή, για να τους καταστήσει οικονομικώς προσιτούς.

3.2.Αισθητήρες

Το σύστημα ελέγχου πρέπει πρώτα να συγκεντρώσει τις πληροφορίες για τα ερεθίσματα που λαμβάνει από το περιβάλλον του, προτού να μπορέσει να δώσει εντολή στον ενεργοποιητή για τις διορθωτικές ενέργειες. Αυτό αποτελεί και τον ρόλο του αισθητήρα. Σε αναλογία της έξυπνης δομής με ένα ανθρώπινο σώμα, οι αισθητήρες διαδραματίζουν το ρόλο του νευρικού συστήματος. Όπως στους ενεργοποιητές, υπάρχουν και πολλοί διαφορετικοί τύποι αισθητήρων. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται π.χ. για την μέτρηση της μετατόπισης λόγω παραμόρφωσης σε ένα υλικό. Ο πίνακας της *Εικόνας 19* παρουσιάζει μια σύγκριση των ιδιοτήτων μερικών κοινών τύπων αισθητήρων.

	Foil ^a	Semiconductor ^b	Fiber Optic	Piezo Film	Piezoceramic ^c
Sensitivity	30V/ε	1000V/ε	10 ⁶ deg/ε	10 ⁴ V/ε	2x10 ⁴ V/ε
Localization	0.008	0.03	~0.04	<0.04	<0.04
Bandwidth	0 Hz acoustic	0 Hz acoustic	~ 0 Hz acoustic	~ 0.1 Hz-GHz	~ 0.1 Hz-GHz
^a 10V excitation ^b in interferometer gauge length ^c 0.001 in sensor thickness					

Εικόνα 15 Πίνακας σύγκρισης των ιδιοτήτων των «έξυπνων» υλικών (Littlefield Andrew George)

Οι πρώτες δύο στήλες είναι οι σύνηθες μετρητές τάσης, φύλλων αλουμινίου και ημιαγωγών χρησιμοποιούμενοι καθημερινά στις εφαρμογές και κυρίτερα στην εφαρμοσμένη μηχανική. Και οι δύο με μια αλλαγή στην ειδική αντίσταση ανιχνεύουν μια αλλαγή στην τάση. Δεν θα καλυφθούν παρακάτω, δεδομένου ότι δεν βρίσκονται γενικά στις ευφυείς δομές, αλλά παρουσιάζονται συγκριτικά με άλλους αισθητήρες. Οι αισθητήρες που θα παρουσιαστούν παρακάτω περιλαμβάνουν τα πιεζοηλεκτρικά, τις οπτικές ίνες και τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα.

3.2.1. Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες διαμορφώνονται και συμπεριφέρονται όπως οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές. Στους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες χρησιμοποιείται το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και όχι το αντίστροφο. Τα ίδια προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα πιεζοηλεκτρικά ως ενεργοποιητές ισχύουν και στην περίπτωση της λειτουργίας τους ως αισθητήρες. Η πιεζοηλεκτρική ταινία που φαίνεται στον πίνακα της *Εικόνας 15* μπορεί να γίνει είτε από πολυμερές σώμα είτε κεραμικό πιεζοηλεκτρικό. Το μειονέκτημα του πιεζοηλεκτρικού μορφής ταινίας είναι ότι δεν μπορεί να ενσωματωθεί στο προς μέτρηση υλικό. Παρόλα αυτά τα πιεζοηλεκτρικά αποτελούν τον ευρύτερο διαδεδομένο τύπο αισθητήρα που χρησιμοποιείται στις έξυπνες-ευφυείς δομές.

3.2.2. Αισθητήρες οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών βρίσκονται σε άνοδο όσον αφορά τις ευφυείς κατασκευές. Αρχικά η χρησιμοποίηση οπτικών ινών ως αισθητήρες θεωρήθηκε ενεργειακά πολυδάπανη, για να τις καταστήσει ως αισθητήρες, χρήσιμους και οικονομικώς αποδοτικούς. Εντούτοις, δεδομένου ότι η χρήση τους στη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών έχει αυξηθεί, έχουν γίνει όλο και περισσότερο χρήσιμοι και εφαρμόσιμοι ως αισθητήρες για τις ευφυείς κατασκευές. Οι ίδιες ίνες που χρησιμοποιούνται για να διαβιβάσουν τις τηλεφωνικές κλήσεις και τα προγράμματα καλωδιακής τηλεόρασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαβιβάσουν τις μετρήσεις τάσεις για μια δομή. Αυτό καθιστά τις ίνες εύχρηστες και σχετικά φτηνές.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι σε θέση να λαμβάνουν μετρήσεις για διάφορους τύπους πληροφοριών, συμπεριλαμβανομένου της θερμοκρασίας, τις χημικές αλλαγές στη σύσταση του υλικού και μετρήσεων τάσης. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι για να ληφθούν οι επιθυμητές πληροφορίες από τον αισθητήρα.

Οι οπτικές ίνες είναι σε θέση να πάρουν μετρήσεις τάσης με πολλούς τρόπους. Τα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν την απομόνωσή τους από την επίδραση ηλεκτρικών ρευμάτων και ότι παραμένουν ανεπηρέαστες από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Το μέγεθος και η ευλυγισία των οπτικών ινών τις καθιστούν εύκολες στο να ενσωματωθούν μέσα στα υλικά. Το ερώτημα που τίθεται είναι κατά πόσο μπορούν να επηρεάσουν την ευλυγισία και την αντοχή του υλικού στο οποίο θα ενσωματωθούν. Κάποια πειράματα που έγιναν σχετικά με την ευλυγισία και την αντοχή απέδειξαν ότι η ενσωμάτωση των οπτικών ινών δεν επηρεάζει την ευλυγισία του υλικού, αλλά μειώνει την αντοχή του υλικού.

Το ακρυλικό επίστρωμα που βρίσκεται συνήθως στις ίνες μπορεί επίσης να αποτελέσει μια πηγή προβλημάτων για την χρήση τους ως αισθητήρες. Η ύπαρξη αυτού του επιστρώματος μπορεί να παρεμποδίσει τη μεταφορά της πίεσης-τάσης από τη δομή στην ίνα λόγω της μαλακής της υφής. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος έχει προταθεί να χρησιμοποιηθεί αντ' αυτού ένα επίστρωμα πολυαμίδης. Τα επιστρώματα πολυαμίδης όχι μόνο έχουν το πλεονέκτημα της χημικής συμβατότητας με τον πυρήνα ινών, μεταφέροντας κατά συνέπεια τα φορτία καταλλήλότερα, αλλά και είναι πιο σταθερά θερμικά.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών προς το παρόν παρουσιάζουν μεγαλύτερη εφαρμογή στον έλεγχο των δομών έργων πολιτικού μηχανικού, καθώς έχουν τη δυνατότητα μέτρησης σε μεγάλες αποστάσεις. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για την ανίχνευση ζημίας με μη καταστροφικούς ελέγχους και τον έλεγχο δόνησης.

3.2.3. Αισθητήρες μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS)

Το μεγαλύτερο μέρος των διαθέσιμων μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων MEMS χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες. Τα συστήματα MEMS χρησιμοποιούνται κατά ένα μεγάλο μέρος για τις αυτοκινητικές και βιοϊατρικές βιομηχανίες, εν τούτοις μερικές εφαρμογές τους συγκεντρώνονται και για χρήση ως επιταχυνσιόμετρα ή και γυροσκόπια .

Αυτή τη στιγμή τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα MEMS χρησιμοποιούνται ως χημικοί αισθητήρες, αντιπλοκαριστικοί αισθητήρες φρένων και αισθητήρες πίεσης αερίου στα αυτοκίνητα. Στο βιοϊατρικό τομέα, μερικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τους αισθητήρες πίεσης αίματος, τους αισθητήρες ανίχνευσης αερίου και για χημική ανάλυση.

3.3. Εφαρμογές των «ευφών» υλικών

3.3.1. Εφαρμογές των «ευφών» υλικών σε καθημερινή χρήση

Τα ευφυή υλικά και οι κατασκευές χρησιμοποιούνται στην καθημερινότητα, αν και δεν έχουν μεγάλη εφαρμογή στην Ελλάδα. Η απλούστερη από τις εφαρμογές είναι τα γυαλιά photogrey που αναφέρθηκαν και σαν παράδειγμα στην αρχή αυτής της εργασίας. Άλλα παραδείγματα περιλαμβάνουν τα παράθυρα των οποίων η διαφάνεια μπορεί να ρυθμιστεί με την αφή ενός κουμπιού (Neumann, 1996). Επίσης, χρησιμοποιούνται και σε συσκευές στην κεφαλή του τηλεφώνου μιας ντουςιέρας που γίνεται από SMA (Ashley, 1996). Αυτές οι συσκευές κόβουν την παροχή νερού όταν φθάσει σε θερμοκρασία 116 °F, για να αποτρέψει τυχόν εγκαύματα. Άλλες χρήσεις των ενεργοποιητών SMA όσον αφορά εφαρμογές περιλαμβάνουν τους θερμοστάτες στις καφετιέρες και τα πλαίσια των γυαλιών eyeglass που επιστρέφουν στην αρχική μορφή τους όταν βρίσκονται κάτω από καυτό νερό (Shape Memory Applications Inc.). Τα έξυπνα υλικά βρίσκουν εφαρμογές και σε πέδιλα σκι όπου με τη χρήση πιεζοκεραμικών, μπορούν να ελεγχθούν οι δονήσεις που καταπονούν τον σκιέρ (Ashley, 1995). Η εφαρμογή τους αποσκοπεί στο να βελτιωθεί η επαφή των πέλδων με το χιόνι και να δοθεί έτσι ο καλύτερος έλεγχος στον σκιέρ.

3.3.2. Βιομηχανικές εφαρμογές

Οι βιοϊατρικές εφαρμογές των έξυπνων δομών πραγματοποιούνται με την χρήση ενεργοποιητών SMA. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ιδιότητα της βιοσυμβατότητας που παρουσιάζει αυτό το είδος των ενεργοποιητών. Εφαρμογές παρουσιάζονται σε εύκαμπτα χειρουργικά εργαλεία και σε φίλτρα αίματος. Οι νεώτερες χρήσεις SMA γίνονται σε συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση της σκολίωσης, όπως επίσης και στη μικροχειρουργική.

3.3.3. Προσδιορισμός του όρου ζημία

Με τον όρο ζημία μπορεί να οριστεί κάθε αλλαγή που προκαλείται στη δομή ενός υλικού και μπορεί να επηρεάσει την παρούσα ή μελλοντική του απόδοση. Δεν έχει νόημα η αναφορά σε μια ζημία, εάν δεν γίνει συγκριτικός έλεγχος σε σχέση με την ακέραια μορφή του υλικού. Εκτός των άλλων η ζημία έχει ως αντίκτυπο τη μεταβολή των ιδιοτήτων της δομής, της γεωμετρίας, συμπεριλαμβανομένου και των οριακών συνθηκών και της συνδεσιμότητας του συστήματος, τα οποία επηρεάζουν την απόδοση του υλικού. Για παράδειγμα μια ρωγμή που βρίσκεται σε ένα μηχανικό εξάρτημα διαμορφώνει μια αλλαγή στη γεωμετρία του και συνεπάγεται αλλοίωση των χαρακτηριστικών ακαμψίας αυτού του εξαρτήματος. Ανάλογα με το μέγεθος και τη θέση της ρωγμής στη δομή του υλικού εξαρτήματος τα αποτελέσματα της ζημίας μπορεί να είναι άμεσα ή να επηρεάσουν την απόδοσή του μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Σε βαθμίδα μήκους, όλες οι ζημίες αρχίζουν στο επίπεδο ενός υλικού και κάτω από συνθήκες φόρτισης μπορούν να επεκταθούν σε όλο το εύρος του υλικού. Σε σχέση με το χρόνο η ζημία μπορεί να παρατηρηθεί μετά από πολλές περιόδους φόρτισης και σχετίζονται με την αντοχή του υλικού και τη διάβρωσή του. Η ζημία μπορεί να προκληθεί από διακριτά προσχεδιασμένα γεγονότα, όπως η προσγείωση ενός αεροσκάφους και από διακριτά απροσχεδιάστα γεγονότα, όπως π.χ. ένας σεισμός.

Οι περισσότερες μέθοδοι μέτρησης όσον αφορά τις ζημίες γίνονται σε σχέση με την ακαμψία του υλικού. Η βασική προϋπόθεση των περισσότερων μεθόδων ανίχνευσης ζημίας είναι όταν η ζημία αλλάξει την ακαμψία, τη μάζα ή τις ιδιότητες ενός υλικού αυτό να απεικονίζεται στη δυναμική απόκριση του συστήματος. Παρόλο που η βάση της ανίχνευσης της ζημίας είναι εμπειρική και όχι ποσοτική, οι μέθοδοι ανίχνευσης της ζημίας μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλές εφαρμογές. Η ζημία είναι τοπικό φαινόμενο της ύλης και μπορεί να μην επηρεάζει τις χαμηλές συχνότητες που μετρούνται κατά τη διάρκεια πειραμάτων δονήσεων. Βασίζόμενοι σε αυτό το γεγονός για να εντοπιστεί η ζημία πρέπει να μελετηθεί ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και να επικεντρωθεί η μελέτη στο τμήμα που παρουσιάζει μεγαλύτερη επικινδυνότητα. Ένα τέτοιο φαινόμενο είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθεί. Ένα άλλο βασικό μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχουν βασικά πρότυπα για να ειπωθεί πότε ένα υλικό κινδυνεύει από ζημία ή έχει υποστεί κάποια μορφή ζημίας. Έτσι δεν υπάρχουν δεδομένα για την καταστροφή ενός υλικού.

Οι περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, όπως η μεταβολή της θερμοκρασίας και των συνθηκών φορτίσεων μπορούν να επηρεάσουν τη δυναμική απόκριση και δεν μπορούν να αμεληθούν. Στην πραγματικότητα οι επιρροές που δέχεται το υλικό από εξωγενείς παράγοντες μπορούν να επισκιάσουν την ζημία που προέρχεται αποκλειστικά από μια ρωγμή στη δομή του υλικού. Για παράδειγμα ο Farrar (1994) πραγματοποίησε μετρήσεις δόνησης στην γέφυρα πάνω από το Rio Grande στο Νέο Μεξικό για να διερευνήσει εάν οι ιδιομορφικές παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνευθεί η ζημία στη δομή κατά μήκος της γέφυρας. Στη γέφυρα έγινε μια σταδιακή κοπή μιας δοκού και παρατηρήθηκαν τέσσερα επίπεδα ζημίας. Κατόπιν έγινε διάγραμμα της στοιχειώδους συχνότητας σε σχέση με τα τέσσερα επίπεδα ζημίας. Επειδή η φυσική συχνότητα της γέφυρας είναι ανάλογη της ακαμψίας της, αναμενόταν με τη αύξηση της ζημίας να μειωνόταν και η συχνότητα. Παρόλα αυτά οι τιμές της συχνότητας αυξάνονταν στα δύο πρώτα στάδια της ζημίας και κατόπιν μειώθηκε για τα επόμενα δύο στάδια. Μια έρευνα απέδειξε παρότι την ύπαρξη της τεχνητής ζημίας η περιβαλλοντική θερμοκρασία έπαιξε βασικό ρόλο στη διαμόρφωση της δυναμικής συμπεριφοράς της γέφυρας. Πολλοί μελετητές διερεύνησαν και ανέφεραν

το σημαντικό ρόλο που διαδραματίζουν οι δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες σε πειραματικές μετρήσεις που βασίζονται στη μέθοδο ανίχνευσης με δονήσεις.(Cawley 1997, Ruotolo και Surace 1997b, Helmicki 1999, Rohrmann. 1999, Cioara και Alampalli 2000, και Sohn 2001).

3.3.4. Ανίχνευση ζημίας

Η ανίχνευση ζημίας είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα που βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην αεροδιαστημική. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιούνται τόσο πιεζοηλεκτρικά, όσο οπτικές ίνες και ηλεκτροσυστολικά υλικά. Μια εφαρμογή των ηλεκτροσυστολικών υλικών είναι η ανίχνευση της διάβρωσης στους σωλήνες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αποστολή ελαστικών κυμάτων μέσω των σωλήνων ώστε να καθοριστεί η θέση της ζημίας. Τα πιεζοκεραμικά χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν τη ζημία στα σύνθετα υλικά και για την ανίχνευση των αλλαγών στις φυσικές συχνότητες των κατασκευών. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν τη ζημία στα έργα μεγάλων κατασκευών, όπως οι γέφυρες και τα κτήρια, λόγω της δυνατότητάς τους να μετρήσουν δομές σε μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιούνται επίσης για την ανίχνευση ζημίας στα σύνθετα μέταλλα.

Επίσης δύο νέες μέθοδοι στην ανίχνευση ζημίας δεν περιλαμβάνουν κανένα από τα ανωτέρω υλικά. Αυτές οι νέες μέθοδοι εξαρτώνται από τη μέτρηση των αλλαγών στην ηλεκτρική ειδική αντίσταση και να ληφθούν συμπεράσματα για τη ζημία στη δομή ενός υλικού.

Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει την τοποθέτηση μικρών ηλεκτρικών ινών σε σύνθετα υλικά άνθρακα. Ο άνθρακας διευθύνει την ηλεκτρική ροή διαμέσου του υλικού του, έτσι δεδομένου ότι υπάρχει ζημία και οι ίνες είναι σπασμένες, η ειδική αντίσταση του υλικού αυξάνεται, οπότε εντοπίζεται η ζημία. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να μετρηθεί και η αλλαγή στις τάσεις ενός υλικού, που παραπέμπει σε παρεμφερή μέθοδο μέτρησης ζημίας.

Η άλλη μέθοδος περιλαμβάνει ένα νέο ευφυές υλικό ονομαζόμενο CFGFRP (ίνα άνθρακα, ενισχυμένο με ίνα πλαστικού γυαλιού). Δεδομένου ότι οι ίνες άνθρακα στο υλικό που έχει υποστεί ζημία σπάνε, η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού αυξάνεται κατά πολύ. Το CFGFRP αντιστέκεται έπειτα στη φόρτιση λόγω της παρουσίας της ίνας γυαλιού.

3.3.4.1 Ανίχνευση ζημίας στα σύνθετα υλικά-Επιστημονική εφαρμογή

Παρακάτω θα παρουσιαστεί, συνοπτικά, η συνεισφορά πολλών μελετητών στην ανίχνευση ζημίας σε σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα έχουν ευρεία εφαρμογή σε πολλές κατασκευές. Σε σύγκριση με πολλά υλικά, τα σύνθετα έχουν πολύ υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος τους. Λόγω τις στρωματοποιημένης, ετερογενούς, και ανισότροπης φύσης των σύνθετων υλικών, οι ρωγμές δημιουργούνται στα υλικά αυτά από την κατασκευή τους (Bar- Cohen, 1986). Οι ρωγμές, που οδηγούν το σύνθετο υλικό σε μηχανισμούς αστοχίας, είναι πιο σύνθετες από εκείνες τις ρωγμές στα μέταλλα και είναι δυσκολότερο να ανιχνευθούν. Για τη χρήση των σύνθετων υλικών σε εφαρμογές που μπορούν να χαρακτηριστούν ως κρίσιμες για αστοχία, έχουν εφαρμοστεί μέθοδοι για να πιστοποιήσουν την ύπαρξη ζημίας στα υλικά αυτά. Μερικές από τις οποίες παρατίθενται παρακάτω, τόσο για να παρουσιαστούν αυτές οι μέθοδοι, όσο και να παρουσιαστεί η

συμβολή των έξυπνων υλικών και δη των πιεζοηλεκτρικών σε μη καταστροφικούς ελέγχους ανίχνευσης ζημίας.

Οι Bar- Cohen (1986) παρουσιάζουν μια καλή θεώρηση για πολλές από τις μη καταστρεπτικές τεχνικές αξιολόγησης (NDE) για την ενίσχυση των πλαστικών με την χρήση σύνθετων ινών. Η διαδικασία ανίχνευσης ζημίας αρχίζει στο στάδιο παραγωγής των σύνθετων υλικών. Ενώ το φύλλο πλαστικού θεραπεύεται ακόμα, χρησιμοποιείται η διηλεκτρική μέθοδος για να εξασφαλιστεί κατάλληλη θερμότητα, ελέγχοντας τη θερμοχωρητικότητα και τη σκέδαση μέσω δύο ηλεκτροδίων στο σύνθετο. Οι ποσότητες θερμοχωρητικότητα και σκεδασμός είναι ανάλογες προς τις μεταβολές στο μοριακό ιξώδες της δομής και του ιξώδες της ρητίνης αντίστοιχα. Ομοίως, η ιονογραφική μέθοδος μπορεί να προσδιορίσει με γραφική παράσταση το ποσό ρητίνης που θεραπεύεται σε ένα σύνθετο υλικό με τη μέτρηση του συνεχούς ηλεκτρικού δυναμικού σε δύο ηλεκτρόδια μετάλλων στη ρητίνη. Μία άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι ο έλεγχος των ακουστικών εκπομπών, η οποία μπορεί επίσης να χρησιμεύσει στη επεξεργασία σύνθετων. Στη μέθοδο αυτή παράγονται διαφορετικές εκπομπές ακουστικών κυμάτων για τις διαφορετικές φάσεις του υλικού.

Όταν το σύνθετο επανέλθει πλήρως, χρησιμοποιείται η μέθοδος των υπερήχων για την ανίχνευση της ζημίας. Το βάθος της αστοχία μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας τις τεχνικές παλμο-ηχούς και ενός πιεζοηλεκτρικού πομπού μετρώντας την αλλαγή στην συχνότητα του ήχου και στη σύνθετη αντίσταση. Με τη μείωση των υπερηχητικών κυμάτων γίνεται ο έλεγχος των ασυνεχειών στη σύνθεση του υλικού, την πυκνότητα του και κατά πόσο πορώδες είναι. Ο προσανατολισμός των σύνθετων ινών μπορεί να καθοριστεί με την μέθοδο της υπερηχητικής διασποράς. Συνδυάζοντας τους υπέρηχους με το κατάλληλο λογισμικό υπολογιστών ο μελετητής μπορεί να αναγνωρίσει τις ρωγμές στα σύνθετα .

Με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση κόπωσης του σύνθετου υλικού αφότου χρησιμοποιηθεί σε κάποια κατασκευή ή βρίσκεται σε λειτουργία.. Εντούτοις, με τους υπέρηχους δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα όταν η δομή είναι πολύπλοκη. Το ράγισμα της μήτρας του σύνθετου ανιχνεύεται με την μέθοδο διασποράς υπερήχων. Στις λεπτές σύνθετες δομές για να παρατηρηθεί η κόπωση του υλικού χρησιμοποιείται η θερμική απεικόνιση, η θερμογραφία υγρών κρυστάλλων, η θερμογραφία δονήσεων, η ολογραφία.

Αντίθετα από τις περισσότερες τεχνικές που παρουσιάστηκαν παραπάνω, τα δομικά συστήματα ελέγχου υγείας (SHM) έχουν αναπτυχθεί για τη μόνιμη παρατήρηση μιας σύνθετης δομής. Τα συστήματα SHM για την ανίχνευση ζημίας στα σύνθετα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στο θέμα της έρευνας

Χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο τεσσάρων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σε μια πλάκα από σύνθετο υλικό περιγράφεται μια μέθοδος ανίχνευσης ζημίας χρησιμοποιώντας τις ακουστικές εκπομπές υψηλής συχνότητας. Οι πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι ενσωματώνονται στα σύνθετα υλικά. Οι ακουστικές τεχνικές εκπομπής είναι παθητικές, έτσι οι πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες. Για να αναλυθεί το σήμα που παρατηρείται από τους αισθητήρες, χρησιμοποιείται μια παράμετρος αποκαλούμενη υψηλής συχνότητας αξία μέσω των τετραγώνων ρίζας ($HF \cdot RMS$), s , και ορίζεται ως :

$$S = \left(\int_0^T \frac{S^2 dt}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

όπου το s είναι το ηλεκτρικό σήμα που μετريέται από τους αισθητήρες, και το T είναι η χρονική διάρκεια του σήματος. Χρησιμοποιώντας την παράμετρο HF-RMS, μπορεί να προσδιοριστεί η θέση των επιδράσεων, καθώς επίσης και η δριμύτητα της ζημίας που προκαλείται από αυτές τις επιδράσεις. Για να προσδιοριστεί η θέση της ζημίας, πρέπει να βελτιστοποιηθούν δύο άγνωστες παράμετροι που σχετίζονται με την τιμή του S σε κάθε αισθητήρα (όσο μεγαλύτερη η τιμή του S , τόσο πιο κοντά είναι ο αισθητήρας στη ζημιά).

Ο Posser, επίσης, χρησιμοποίησε ακουστικές εκπομπές για να ανιχνεύσει τη ζημιά στα σύνθετα. Τέσσερεις αισθητήρες υψηλής εκπομπής χρησιμοποιούνται για κάθε δείγμα για να ελέγξουν τη ρωγμή και να καθορίσουν την περιοχή θέσης και έναρξης των ρωγμών. Για να ελέγξουν την παρουσία των ρωγμών χρησιμοποιούνται υπέρηχοι και ακτίνες X.

Ο Kander (1991) χρησιμοποίησε ακουστικές εκπομπές για να προβάλει σε οθόνη την κόπωση των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού. Η συσσώρευση ζημίας ελέγχθηκε χρησιμοποιώντας δύο ευρείς διαφορικούς πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς ζωνών με τη μέθοδο της *quasi-static* δοκιμής. Κατά το πείραμα έγινε λήψη τριών ευδιάκριτων ακουστικών σημάτων εκπομπής, που συσχετίζονται άμεσα με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς ζημίας. Η χαμηλότερη εκπομπή ακουστικού σήματος συσχετίζει τη ρωγμή στη μήτρα του υλικού. Τα ενδιάμεσα σήματα εμφανίζονται λόγω της αποσύνδεσης των ινών. Η εκπομπή των υψηλότερων εύρους ακουστικών σημάτων εμφανίζονται από τη θραύση των ινών γυαλιού, οδηγώντας τελικά στην αστοχία του σύνθετου. Εκτός από τη *quasi-static* δοκιμή, εκτελέστηκε, επίσης κυκλική δοκιμή κόπωσης τριών σημείων. Τα τρία ίδια εύρη (που συσχετίζουν τους ίδιους τρεις μηχανισμούς ζημίας) παρουσιάστηκαν και για την κυκλική κόπωση όπως παρουσιάστηκαν και με τη *quasi-static* δοκιμή. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν και με τις δύο δοκιμές ήταν τα ίδια.

Οι Kessler και Spearing χρησιμοποίησαν σαν κύρια τεχνική για να ανιχνεύσουν τη ζημιά σε εποξειδικά δοκίμια, τα κύματα Lamp. Δύο πιεζοκεραμικά μπαλώματα (PZT) ενεργούν ως ενεργοποιητές, ενώ χρησιμοποιούνται κύματα Lamp και ένας αισθητήρας για να καταγράψει την τάση που παράγεται από το ηλεκτρικό δυναμικό στο πιεζοηλεκτρικό. Χρησιμοποιώντας μια δοκό με γνωστή ασυνέχεια μπορεί να βρεθεί η διαφορά μεταξύ ενός ακέραιου δοκιμίου και ενός δοκιμίου που έχει υποστεί ζημιά. Οι μέθοδοι κυμάτων Lamp είναι αποτελεσματικοί στον άμεσο προσδιορισμό της παρουσίας των ρωγμών. Οι Kessler και Spearing πειραματίστηκαν επίσης με τη ανίχνευση ζημίας σε σύνθετα υλικά με τη μέθοδο απόκρισης συχνότητας. Ο έλεγχος των αλλαγών συχνότητας στα διαγράμματα απόκρισης συχνότητας μπορεί να εμφανίσει την παρουσία ζημίας, αλλά δεν μπορεί να διακρίνει τη διαφοροποίηση μεταξύ των τύπων ζημίας, το μέγεθος της ζημίας, τις θέσεις, και τον προσανατολισμό της. Οι μελετητές συστήνουν τις μεθόδους απόκρισης συχνότητας μόνο για την καθολική αλλαγή στην ακαμψία μεγαλύτερων δομών.

Οι Kessler και Spearing εφαρμόζοντας την ίδια πειραματική διαδικασία χρησιμοποιώντας κύματα Lamp και την απόκριση συχνότητας, εξέτασαν επίσης τη

δυνατότητα με τις μεθόδους ελέγχου τάσης και τις ακουστικές εκπομπές, να ανιχνεύσουν τη ζημία σε σύνθετα υλικά. Οι μελετητές προτείνουν ένα σύστημα SHM που αποτελείται από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες με την κατάλληλη καλωδίωση, μία συσκευή συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (data acquisition system), μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία με μια επαγωγική σπείρα για τη φόρτισή της, και μια ασύρματη συσκευή αποστολής-λήψης σημάτων. Αυτοί οι αισθητήρες λειτουργούσαν παθητικά, συλλέγοντας τα ακουστικά στοιχεία εκπομπής και τάσης, εφόσον καταχωρηθεί μια αρκετά μεγάλη βάση δεδομένων. Το σύστημα ενεργοποιείται με κάποιο ερέθισμα (άσκηση δύναμης). Μετά από την επεξεργασία των στοιχείων, οι πληροφορίες στέλνονται στο χειριστή του συστήματος.

Συχνά χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι μικρών κυμάτων. Ο Sohn (2003), προσπαθώντας να βελτιώσει την παραπάνω μέθοδο περιγράφει την ανάπτυξη ενός πίνακα ζημίας (συγκριτικός πίνακας) για να εντοπίσει την περιοχή της ασυνέχειας σε πλάκα σύνθετου υλικού. Ο εν λόγω πίνακας είναι βασισμένος στη διέγερση της δομής με μια συγκεκριμένη εισαγωγή κυματοειδούς. Με μια γνωστή είσοδο μπορεί να συσχετιστεί και να συγκριθεί το πρότυπο σήμα με το σήμα που έχει εξασθενήσει λόγω της διασποράς της ενέργειας στη δομή, που φανερώνει την ύπαρξη ατελειών. Η θέση της ζημίας προσδιορίζεται από τα αποτελέσματα όλων των αισθητήρων που βρίσκονται στη δομή. Οι αισθητήρες όμως μπορεί να βρεθούν σε άνιση απόσταση από τη ρωγμή. Ο Yuan (2004) για να εξαλείψει την επίδραση απόστασης διάδοσης μεταξύ των αισθητήρων όρισε ως ένδειξη ζημίας το αρχικό μέγιστο εύρος του ελεγχόμενου σήματος. Όσο μεγαλύτερη η έκταση της ζημίας, τόσο χαμηλότερη η θα είναι η ένδειξη, ανεξάρτητα από την απόσταση της ατέλειας στον αισθητήρα.

Οι Diaz Valdez και Soutis μελέτησαν την έναρξη της ασυνέχειας σε ένα σύνθετο φύλλο πλαστικού. Η μέθοδος RUS χρησιμοποιεί δύο μετατροπείς, έναν ενεργοποιητή για να διεγείρει τη δομή με ένα ημιτονοειδές σήμα, και έναν αισθητήρα για να ανιχνεύσει το εύρος της διέγερσης. Κατόπιν επιτυγχάνεται μια διέγερση. Το φύλλο πλαστικού εξετάζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο RUS σε ένα εύρος συχνότητας 8-13 kHz, και μετράται η ακριβής περιοχή ασυνέχειας με τη χρησιμοποίηση των υπερηχητικών σαρωτών. Με την αύξηση της ασυνέχειας οι ιδιομορφικές συχνότητες είχαν ένδειξη μείωσης της ακαμψίας στη δομή.

Ο Xu χρησιμοποίησε οπτικές ίνες για να ανιχνεύει τις ατέλειες σε μια δομή. Σε ένα συνηθισμένο σχέδιο ανίχνευσης ζημίας οπτικών ινών, οι ίνες ενσωματώνονται σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Η ζημία στο σύνθετο οδηγεί στο σπάσιμο των ινών, μειώνοντας σημαντικά την τιμή της τάσης που διαβιβάστηκε στο υλικό. Για να ελεγχθεί αποτελεσματικά μια δομή πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός ενσωματωμένων ινών με αποτέλεσμα, αυξανόμενες δαπάνες συστημάτων και μειωμένη ενδεχομένως ενέργεια. Στη μέθοδο Xu, μια οπτική ίνα ενσωματώνεται κατά μήκος της δοκού. Με τη φόρτιση της δοκού, φορτίζεται και η ίνα που είναι ενσωματωμένη στη δομή και παραμορφώνεται. Η παραμόρφωση της ίνας είναι ανάλογη προς την εσωτερική τάση κατά μήκος της δοκού. Εάν παρουσιαστεί μια ασυνέχεια στην δοκό, η εσωτερική τάση θα αλλάξει σε σχέση με την τάση μιας άθικτης δοκού. Όταν ένα φορτίο κινηθεί κατά μήκος της δοκού, η εσωτερική τάση μπορεί να βρεθεί ως συνάρτηση της θέσης των φορτίσεων. Η πρώτη παράγωγος της εσωτερικής τάσης θα δώσει τις κορυφές (peaks) στα σημεία ασυνέχειας. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι θέσεις ασυνέχειας αποκαλύπτονται βρίσκοντας την πρώτη παράγωγο της εσωτερικής τάσης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα με δύο και τρία δισδιάστατα πρότυπα πεπερασμένων στοιχείων που

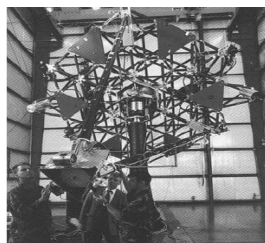
δημιουργήθηκαν για να συγκριθούν με τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν λιγότερο ευαίσθητα στις ατέλειες και συχνά οι διαφορές με τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν μεγάλες.

Όπως περιγράφεται από τον Xu, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να μοντελοποιηθεί η ζημία στις σύνθετες δομές. Ο Nag (2002) προσπάθησε να απλοποιήσει αυτά τα πρότυπα χρησιμοποιώντας ένα φασματικό στοιχείο σε ρόλο ατέλειας. Ένα τέτοιο φασματικό στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιπροσωπεύσει μια ασυνέχεια σε ένα πρότυπο δοκού, ανεξάρτητα από το μήκος της δοκού. Οι φασματικές μέθοδοι στοιχείων είναι υπολογιστικά περισσότερο αποδοτικοί από τα πρότυπα πεπερασμένων στοιχείων και απαιτούνται μόνο δύο κόμβοι μέτρησης για να βρεθεί η παρουσία μιας ασυνέχειας.

Χρησιμοποιώντας μια σειρά από PZTs σε μια σύνθετη πλάκα ή κατασκευή, για την εύρεση ζημίας, μπορούν να συνδυαστούν πολλαπλάσιες τεχνικές ανάλυσης και ανίχνευσης. Οι Dugnani και Malkin (2003) χρησιμοποίησαν δύο μεθόδους ανάλυσης δεδομένων για να αναλύσουν τα στοιχεία σε μια σύνθετη δομή. Ο στόχος της ανίχνευσης ζημίας ήταν να χαρακτηριστεί η θέση και η έκταση της ζημίας στη δομή. Ο Sohn (2004) χρησιμοποίησε διαφορετικές μεθόδους για να ανιχνεύσει τη ζημία σε μια σύνθετη δομή με μια ενσωματωμένη σειρά πιεζοκεραμικών PZT. Χρησιμοποίησε τα κύματα Lamb για να εντοπίσει την περιοχή της ατέλειας. Για να ενισχυθούν περαιτέρω τις ικανότητες των μεθόδων κυμάτων Lamb, χρησιμοποιείται η μέθοδος ακουστικής χρονικής αντιστροφής (TRA). Το TRA δίνει μέσα το αρχικό σήμα ώθησης με την ανάλυση μικρών κυμάτων. Εάν μια ατέλεια απαντηθεί στην πορεία διάδοσης κυμάτων, το κύμα που επιστρέφει είναι μικρότερου εύρους λόγω της ύπαρξης της ατέλειας και το ελαττωματικό αναπαραγμένο σήμα μπορεί να συγκριθεί με την αρχικό σήμα για να προσδιορίσει τη ζημία. Μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος σύνθετης αντίστασης και έχει σκοπό τον προσδιορισμό τη δριμύτητα της ζημίας στη σύνθετη πλάκα. Τρεις διαφορετικές τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν για να εξαγάγουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα από τις σύνθετες αντιστάσεις: συντελεστές συσχετισμού, μοντέλο με αυτοανάδρομη περιοχή συχνότητας με εξωγενή εισαγωγών *time-series* (ARX) που διαμορφώνουν και οι φασματικές στιγμές. Κάθε μέθοδος προσδιόρισε σωστά το εύρος του αντίκτυπου στη δομή.

Η μέθοδος σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Bois και Hochard (2003 ..2004) σε μία προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί το επίπεδο διάχυτης ζημίας στις σύνθετες δομές. Οι Bois και Hochard υποστηρίζουν ότι, με την παρατήρηση του επιπέδου απόσβεσης των ιδιομορφών σε μια καμπύλη σύνθετης αντίστασης, μπορεί να εξαχθεί το ποσό ζημίας. Με την ύπαρξη περισσότερης ζημίας, οι φυλλόμορφες μειώσεις ακαμψίας χαμηλώνουν τη συχνότητα και το εύρος των αιχμών. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με τους μετατροπείς PZT σε δύο διαφορετικά δείγματα, ένα που έχει υποστεί ζημία και ένα άθικτο. Οι Bois και Hochard μπόρεσαν να υπολογίσουν το ποσοστό ζημίας, παρατηρώντας το επίπεδο απόσβεσης των αιχμών σε ένα διάγραμμα σύνθετης αντίστασης. Εντούτοις, ειδικά με τα σύνθετα υλικά, ο αριθμός αιχμών σε ένα δεδομένο φάσμα συχνότητας μπορεί να ποικίλει και καθίσταται δύσκολος ο διαχωρισμός τους. Καθώς προκαλείται μεγαλύτερη ζημία η συχνότητα και το εύρος των αιχμών στο διάγραμμα μειώνονται. Οι μετρήσεις γίνονται με πιεζοκεραμικούς αισθητήρες σε δύο δοκίμια, ένα ακέραιο και σε ένα με ατέλειες. Κατόπιν γίνονται συγκρίσεις των διαγραμμάτων τους. Τα σύνθετα υλικά είναι πολύ επιρρεπή, λόγω της επεξεργασίας τους, σε πολλές δευτερεύουσες ατέλειες και παρουσιάζονται με τις μετρήσεις σύνθετης αντίστασης υψηλής συχνότητας. Οι Bois και Hochard μοντελοποίησαν τη μέθοδο

σύνθετης αντίστασης με ένα σύνθετο φύλλο πλαστικού και ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Τα πειράματα και οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται σε ένα φάσμα συχνότητας από 500 έως 10.000 Hz. Τα πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα δεν συγκρίνονται άμεσα μέσα στον ίδιο αριθμό, αλλά το λάθος μεταξύ της προσομοίωσης και των πειραμάτων είναι περίπου 15 τοις εκατό, ακόμα κι αν οι θέσεις και τα εύρη συχνότητας φαίνονται να διαφέρουν πολύ.



3.3.5. Έλεγχος δόνησης

Ο έλεγχος δόνησης είναι μια άλλη σημαντική μέθοδος που χρησιμοποιείται στην αεροδιαστημική. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι τα έξυπνα υλικά που έχουν την ευρύτερη χρήση

Εικόνα 16 Πειραματική διάταξη ελέγχου δόνησης (Littlefield Andrew George)

στις εφαρμογές ελέγχου δόνησης, λόγω του υψηλού εύρους ζώνης τους. Έχουν γίνει έρευνες σε δονήσεις δοκών χρησιμοποιώντας πιεζοπολυμερή και πιεζοκεραμικά υλικά.

Τα πειράματα ελέγχου δόνησης έχουν λάβει μέρος με την χρήση οπτικών ινών ως αισθητήρες και με πιεζοκεραμικά υλικά ως ενεργοποιητές. Σε πολλές εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί μαγνητοσυστολικά υλικά για να αποσβέσουν δονήσεις.

Η κατασκευή που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 20* είναι η δοκιμή ASTREX στο εργαστήριο USAF Phillips που είναι ένας προσομοιωτής αποσυμπιεστή ακτίνων ενός διαστημικού όπλου. Ολόκληρη η δομή τοποθετείται σε ένα ρουλεμάν αέρα και μπορεί να περιστραφεί με πολύ μικρή δύναμη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ

Τα πιεζοκεραμικά υλικά (PZT) είναι μεταξύ των ευρύτατα χρησιμοποιημένων και μελετημένων ενεργών υλικών. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στην ιστορία, την κατασκευή, τη χρήση, και τη διαμόρφωση των PZT υλικών.

4.1.Πιεζοηλεκτρικά κεραμικά

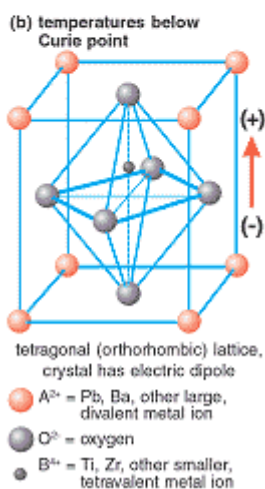
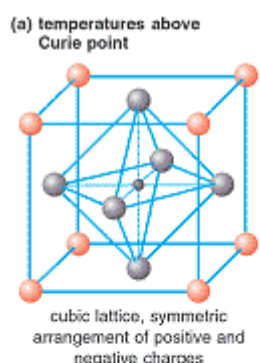
Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά προέρχονται από τα σιδηροηλεκτρικά υλικά. Τα σιδηροηλεκτρικά υλικά, αποτελούνται από πολλές μικρές περιοχές, κάθε μία των οποίων περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό μορίων και έχουν φορτίο έτσι ώστε να είναι τυχαία προσανατολισμένες μέσα στο υλικό. Εάν επιβληθεί ένα δυναμικό, ανεξάρτητα από τη φορά του, οι περιοχές αυτές τείνουν να προσανατολιστούν κατά τη διεύθυνση του πεδίου και επειδή οι περιοχές αυτές είναι μακρύτερες κατά τη διεύθυνση προσανατολισμού, παρά κατά το πάχος, το υλικό διαστέλλεται.

Για να γίνει πιεζοηλεκτρικό κεραμικό ένα σιδηροηλεκτρικό υλικό, πρέπει να υποστεί πρώτα μια επεξεργασία πολώσεως με την επίδραση ενός ισχυρού συνεχούς ρεύματος, έτσι ώστε όλες οι κυψελίδες του κρυσταλλικού πλέγματός του να προσανατολιστούν κατά μία ορισμένη διεύθυνση. Εάν στη συνέχεια στο υλικό αυτό επιβληθεί ένα εναλλασσόμενο δυναμικό, μικρότερο συγκρινόμενο με το δυναμικό πολώσεως, οι προσανατολισμένες κυψελίδες επεκτείνονται περεταίρω λιγότερο ή περισσότερο καθώς το εναλλασσόμενο δυναμικό μεταβάλλεται. Κατ'αυτόν τον τρόπο το πολωμένο υλικό πάλλεται με συχνότητα που καθορίζεται από το πάχος του.

Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά κατασκευάζονται από λεπτές σκόνες των συστατικών μεταλλικών οξειδίων, αναμιγνύονται στις συγκεκριμένες αναλογίες, κατόπιν θερμαίνονται για να διαμορφώσουν μια ομοιόμορφη σκόνη. Η σκόνη αναμιγνύεται με έναν οργανικό σύνδεσμο και διαμορφώνεται σε δομικά στοιχεία και στην επιθυμητή μορφή (δίσκοι, ράβδοι, πλάτα, κ.λπ.). Τα στοιχεία θερμαίνονται σύμφωνα με ένα πρόγραμμα συγκεκριμένου χρόνου και θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια του οποίου τα μόρια της σκόνης συμπυκνώνονται και το υλικό επιτυγχάνει μια πυκνή κρυστάλλινη δομή. Τα στοιχεία ψύχονται, κατόπιν διαμορφώνονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές, και τα ηλεκτρόδια εφαρμόζονται στις κατάλληλες επιφάνειες για την πόλωσή τους.

Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά έχουν τον γενικό τύπο ABO_3 , όπου το Α παριστάνει ένα δισθενές ιόν, όπως είναι ο μόλυβδος Pb, και το Β παριστάνει ένα τετρασθενές ιόν, όπως είναι το τιτάνιο Ti. Κατασκευάζονται εύκολα και παίρνουν οποιοδήποτε σχήμα. Είναι χαμηλού κόστους και προσφέρονται σε οποιοσδήποτε διαστάσεις. Είναι ισχυρά πιεζοηλεκτρικά υλικά, ανθεκτικά, αδρανή σε χημικές ουσίες και δεν επηρεάζονται από την υγρασία.

Η μεγάλη αξία των πιεζοηλεκτρικών κεραμικών, έγκειται στο ότι μπορούμε να κατασκευάσουμε πιεζοηλεκτρικούς δίσκους μεγάλων διαστάσεων, ενώ με τους κρυστάλλους χαλαζία η κατασκευή των αντίστοιχων πιεζοηλεκτρικών δίσκων είναι επίπονη, μέχρι αδύνατη, αλλά και αρκετά πιο δαπανηρή.



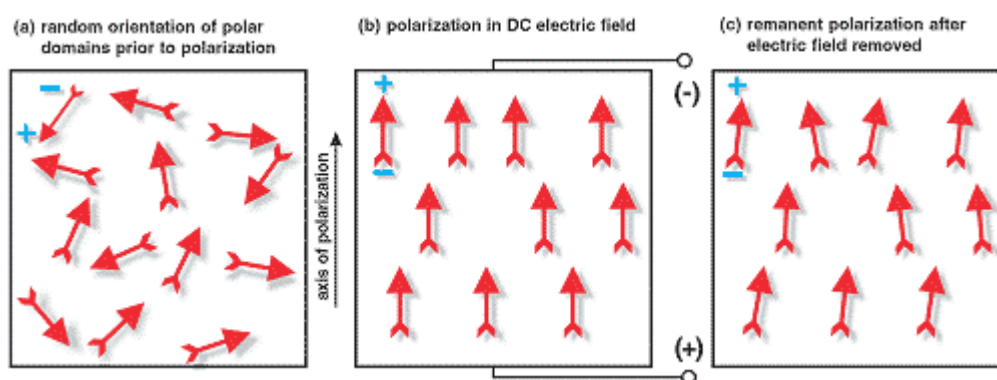
Ένα κεραμικό αποτελείται από ένα σύνολο κρυστάλλων, τυχαία προσανατολισμένων, δεν παρουσιάζει πιεζοηλεκτρισμό και είναι ισότροπο υλικό. Το κεραμικό αυτό γίνεται πιεζοηλεκτρικό κατά την επιθυμητή διεύθυνση, με την επίδραση ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Μετά την απομάκρυνση του πεδίου, το κεραμικό είναι πολωμένο (οι κρύσταλλοι έχουν προσανατολιστεί κατά τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου) και συνεπώς καθίσταται ανισότροπο. Έτσι προκύπτουν τα μόνιμα πιεζοηλεκτρικά και παραμένουν πολωμένα εφόσον δε θερμανθεί πέρα του σημείου Curie.

Επάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, το σημείο Curie, κάθε κρύσταλλος του κεραμικού στοιχείου διαμορφώνεται σε απλή κυβική συμμετρία χωρίς πόλωση διπόλων (Εικόνα 21α). Στις θερμοκρασίες κάτω από το σημείο Curie, εντούτοις, κάθε κρύσταλλος έχει την τετραεδρική ή ρομβοεδρική συμμετρία και μια πόλωση διπόλων (Εικόνα 21β). Οι γειτνιασμένες με δίπολα περιοχές διαμορφώνουν και τις περιοχές της τοπικής ευθυγράμμισης. Η ευθυγράμμιση δίνει μια καθαρή πόλωση στην περιοχή. Η κατεύθυνση της πόλωσης μεταξύ των γειτονικών περιοχών είναι τυχαία, παρόλα αυτά, το κεραμικό στοιχείο δεν έχει καμία γενική πόλωση (Εικόνα 21α).

Εικόνα 17 Κυβική κυψελίδα πάνω και κάτω από τη θερμοκρασία Curie (Piezoelectricity)

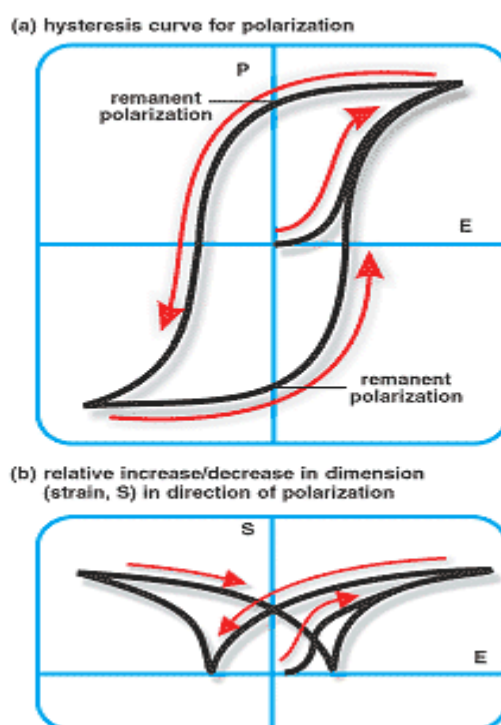
Οι ουδέτερες περιοχές σε ένα κεραμικό στοιχείο ευθυγραμμίζονται με την έκθεση του στοιχείου σε ένα ισχυρό, άμεσο τρέχον ηλεκτρικό πεδίο, συνήθως σε μια

θερμοκρασία ελαφρώς κάτω από το σημείο Curie (Εικόνα 22). Μέσω αυτής της επεξεργασίας πόλωσης, οι περιοχές που ευθυγραμμίζονται με το ηλεκτρικό πεδίο, επεκτείνονται εις βάρος των περιοχών που δεν ευθυγραμμίζονται με τον τομέα, και το στοιχείο μακραίνει στην κατεύθυνση του τομέα.



Εικόνα 18 Πόλωση πιεζοκεραμικού (Piezoelectricity)

Όταν το ηλεκτρικό πεδίο απομακρυνθεί τα περισσότερα από τα δίπολα διατηρούν μια διαμόρφωση σχετικά κοντά με την διαμόρφωση όπως αυτήν που παρουσιάζεται υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου (Εικόνα 22γ). Το στοιχείο έχει τώρα μια μόνιμη πόλωση και είναι μόνιμα επιμηκυμένο.



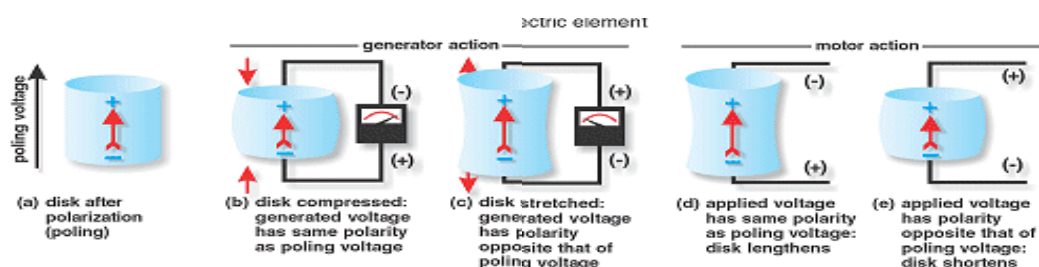
Εικόνα 19 Καμπύλη υστέρησης στην πόλωση του πιεζοκεραμικού (Piezoelectricity)

Αντίστοιχα με τα χαρακτηριστικά των σιδηρομαγνητικών υλικών, η σιδηροηλεκτρική υστέρηση των υλικών απεικονίζεται στην Εικόνα 23 και παρουσιάζει μια χαρακτηριστική καμπύλη υστέρησης που δημιουργείται με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου σε ένα πιεζοηλεκτρικό κεραμικό στοιχείο μέχρι της επίτευξης μέγιστης πόλωσης, P_s , μειώνοντας το πεδίο σε μηδέν (στο σημείο αυτό καθορίζεται η

μόνιμη πόλωση), κατόπιν αντιστρέφει την πολικότητα του πεδίου για να επιτύχει μια αρνητική μέγιστη πόλωση (την αρνητική μόνιμη πόλωση), και επανα- αντιστρέφει τον τομέα για να αποκαταστήσει τη θετική μόνιμη πόλωση. Η επισήμανση κάτω από την καμπύλη υστέρησης παρουσιάζει τη σχετική αλλαγή στη διάσταση του κεραμικού στοιχείου κατά μήκος της κατεύθυνσης της πόλωσης, που αντιστοιχεί στην αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο. Η σχετική αύξηση ή μείωση στη διεύθυνση που βρίσκεται παράλληλη στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου συνοδεύεται κατά αντιστοιχία, στη μείωση ή αύξηση περίπου κατά 50% της διάστασης που βρίσκεται κάθετα στην διεύθυνση εφαρμογής του ηλεκτρικού πεδίου.

Η μηχανική συμπίεση ή η έκταση σε ένα πολωμένο κεραμικό υλικό δημιουργεί μια τάση. Η συμπίεση κατά μήκος της κατεύθυνσης της πόλωσης, ή η έκταση στη διεύθυνση της καθέτου της πόλωσης, παράγει την τάση της ίδιας πολικότητας με τη τάση πόλωσης του υλικού (Εικόνα 23β). Η έκταση κατά μήκος της κατεύθυνσης της πόλωσης, ή η συμπίεση σε διεύθυνση καθέτου στην κατεύθυνση της πόλωσης, παράγει μια τάση με πολικότητα αντίθετη από την πολικότητα της τάσης πόλωσης (Εικόνα 23γ). Αυτές οι ενέργειες είναι ενέργειες γεννητριών και το κεραμικό στοιχείο μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια της συμπίεσης ή της έντασης σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η συμπεριφορά του πιεζοκεραμικού βρίσκει εφαρμογές σε συσκευές ανάφλεξης καυσίμων, σε αισθητήρες δύναμης και άλλων προϊόντων. Οι τιμές για τη συμπίεση και την ηλεκτρική τάση, που παράγεται με την εφαρμογή τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό κεραμικό στοιχείο είναι γραμμικά ανάλογες μέχρι μια συγκεκριμένη εφαρμοζόμενη δύναμη. Το ίδιο πράγμα ισχύει για την εφαρμοσμένη ηλεκτρική τάση και την παραγόμενη μηχανική τάση.

Εάν ένα δυναμικό της ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης εφαρμοστεί σε ένα κεραμικό στοιχείο, στην κατεύθυνση της τάσης πόλωσης, το στοιχείο θα επιμηκυνθεί και η διάμετός του θα γίνει μικρότερη (σχήμα 1.4d). Εάν εφαρμοστεί μια τάση αντίθετης πολικότητας από αυτήν της τάσης πόλωσης, το στοιχείο θα γίνει πιο κοντό και πλατύ (σχήμα 1.κ). Εάν εφαρμοστεί μια εναλλασσόμενη τάση, το στοιχείο θα μακραίνει και θα κονταίνει κυκλικά, στη συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης. Αυτό το φαινόμενο παραπέμπει σε λειτουργία μηχανής - η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Η αρχή αυτή χρησιμοποιείται στις πιεζοηλεκτρικές μηχανές, σε συσκευές παραγωγής ήχου ή υπέρηχου και σε πολλά άλλα προϊόντα.



Εικόνα 20 Πιεζοηλεκτρικό ως γεννήτρια και ως μηχανή (Piezoelectricity)

4.2. Ιστορία των πιεζοκεραμικών

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1880 από τους Pierre και Jacques Curie. Σε εκείνο το έτος δημοσίευσαν τα πειράματα που καταδεικνύουν την άμεση πιεζοηλεκτρική επίδραση στα κρύσταλλα tourmaline, του χαλαζία, του τοπαζίου και του

άλατος Rochelle. Όπως προαναφέρθηκε το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η δυνατότητα ενός υλικού να αναπτύξει μια ηλεκτρική φόρτιση όταν υποβάλλεται σε μια μηχανική τάση. Η αντίστροφη πιεζοηλεκτρική επίδραση, που παράγει μια τάση όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο, προβλέφθηκε από τον Lippman το 1881. Εκείνο το έτος οι αδελφοί Curie πιστοποίησαν την πλήρη αντιστρεψιμότητα αυτών των παραμορφώσεων στα κρύσταλλα.

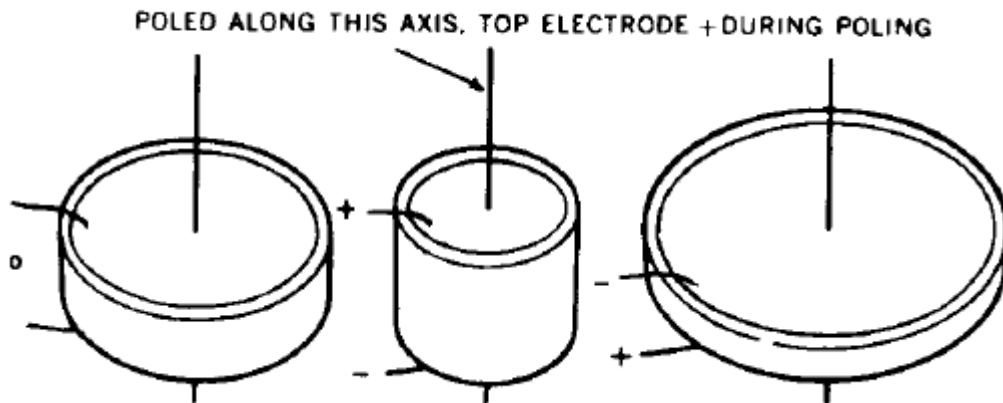
Το 1894, ο Woldemar Voigt προχώρησε ένα βήμα παρακάτω, με το να βρει το πλήρες θερμοδυναμικό μοντέλο του φαινομένου. Ο Voigt καθόρισε τις είκοσι φυσικά εμφανιζόμενες κατηγορίες κρυστάλλου που έχουν τις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και τους 18 πιεζοηλεκτρικούς συντελεστές που απαιτούνται για να προσδιοριστεί το μοντέλο.

Η πρώτη πρακτική χρήση του πιεζοηλεκτρισμού έγινε από τον Paul Langevin το 1917. Ο Langevin χρησιμοποίησε κρυστάλλους χαλαζία για να δημιουργήσει έναν υπερηχητικό υποβρύχιο ανιχνευτή. Παρά τη μικρή απόδοση και τις δυσκολίες παραγωγής που συνδέθηκαν με τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους της εποχής, αναπτύχθηκαν πολλές εφαρμογές. Μεταξύ αυτών ήταν μικρόφωνα, επιταγχοσιόμετρα, βελόνες φωνογράφων, φίλτρα σημάτων, και μετρητές πίεσης.

Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών έγινε ραγδαία με την ανακάλυψη ότι η πολικότητα ορισμένων υλικών θα μπορούσε να προκαλέσει μια πιεζοηλεκτρική επίδραση σε αυτά τα υλικά. Η πιεζοηλεκτρική επίδραση που επιτεύχθηκε σε τεχνητά υλικά βρέθηκε να είναι πολύ ισχυρότερη από αυτήν που παρατηρήθηκε στους φυσικούς κρυστάλλους. Με τον τρόπο αυτό αναπτύχθηκε το 1942 το τιτανικό βάριο και χρησιμοποιήθηκε, ευρέως, σε πειράματα. Το PZT αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '50, παρουσίασε πολύ ισχυρότερη πιεζοηλεκτρική επίδραση και χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα ως πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής. Αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία, αυτές οι δύο οικογένειες υλικών θα μπορούν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες να λάβουν τις επιθυμητές ιδιότητες. Αυτό επιτρέπει στο υλικό να προσαρμόζεται στην εκάστοτε εφαρμογή.

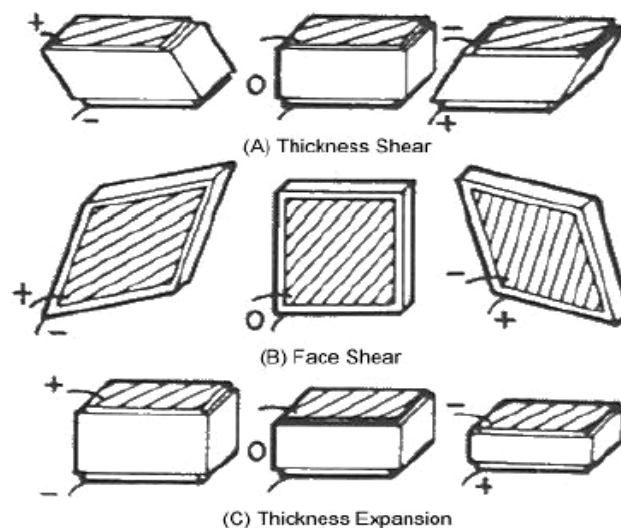
4.3. Κατεργασία των πιεζοκεραμικών υλικών

Τα πιεζοκεραμικά υλικά διαμορφώνονται σε μια διαδικασία δύο βημάτων: συμπίκνωση και πολικότητα (Moulsonand & Herbert, 1990). Το κεραμικό υλικό διαμορφώνεται με την τοποθέτηση κονιοποιημένου κεραμικού σε μια φόρμα και τη συμπίκνωση του σε υψηλές θερμοκρασίες, χαρακτηριστικά γύρω στους 800 °C. Απομακρύνεται, έπειτα, από το φούρνο και τα ηλεκτρόδια είναι καλυμμένα στις επιφάνειές πολικότητας τους. Αυτό γίνεται ενώ είναι ακόμα επάνω από τη θερμοκρασία Curie. Η θερμοκρασία Curie είναι η θερμοκρασία στην οποία η δομή κρυστάλλου του υλικού μετατρέπεται από μια μη συμμετρική σε συμμετρική μορφή (Piezo Systems, 1996), και η πόλωση στο υλικό θα χαθεί.



Εικόνα 21 Πόλωση κυλινδρικού πιεζοκεραμικού (Littlefield Andrew George)

Το επόμενο βήμα είναι να πολωθεί το κεραμικό. Αυτό γίνεται με την τοποθέτηση τον κεραμικού σε ένα λουτρό πετρελαίου και εφαρμογή κατά μήκος του ενός υψηλού δυναμικού. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι της τάξεως από το ένα έως τέσσερα megavolts ανά μέτρο. Το πετρέλαιο ψύχεται αργά έως ότου φτάσει 50 °C κάτω από τη θερμοκρασία Curie. Τα ηλεκτρικά δίπολα μέσα στο υλικό ευθυγραμμίζονται έτσι ώστε ο αρνητικός πόλος τους ευθυγραμμίζεται με τη θετική πολική τάση και ο θετικός πόλος τους ευθυγραμμίζεται με την αρνητική πολική τάση. Αυτή η ευθυγράμμιση αναγκάζει και τα μεμονωμένα μόρια να ευθυγραμμιστούν σε έναν ενιαίο κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και να προκαλέσει μια μόνιμη δομική παραμόρφωση, αναγκάζοντας το υλικό να επιμηκυνθεί στην κατεύθυνση του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου.



Εικόνα 22 Πόλωση κυβικού πιεζοκεραμικού (Littlefield Andrew George)

Εντούτοις, η ευθυγράμμιση δεν είναι πλήρης, και όταν εφαρμόζεται στη συνέχεια μια χαμηλότερη τάση, τα δίπολα αποκρίνονται με την προσπάθεια να προσανατολιστούν περαιτέρω. Εάν η τάση που εφαρμόζεται είναι της ίδιας πολικότητας με τη πολική τάση, το κεραμικό υλικό επιμηκύνεται κατά μήκος της κατεύθυνσης παραμόρφωσης. Εάν η εφαρμοσμένη τάση είναι της αντίθετης πολικότητας, το κεραμικό υλικό προσπαθεί να συρρικνωθεί. Αυτό μπορεί να φανεί στην Εικόνα 26.

4.4. Καταστατικές εξισώσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές διαμορφώσεις παραμόρφωσης για τις πιεζοηλεκτρικές πλάκες. Συνήθως η παραμόρφωση είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων ενεργειών. Αυτές οι παραμορφώσεις είναι το αποτέλεσμα της σχέσης μεταξύ του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου και της απόκρισης του πιεζοηλεκτρικού κεραμικού. Η σχέση που θα διατυπωθεί εξαρτάται από τη μορφή και τη σύνθεση του πιεζοηλεκτρικού, τις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητές του, τη θέση των ηλεκτροδίων, τη θέση των πολικών του αξόνων και την πολικότητα του εφαρμοσμένου πεδίου. Επίσης, περιγράφεται από καταστατικές εξισώσεις για ένα πιεζοκεραμικό υλικό. Στη συμπιεσμένη μορφή μητρών αυτές οι εξισώσεις είναι:

$$S_p = s_{pq}^E T_q + d_{kp} E_k$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ik}^T E_k$$

Όπου p, q, k , παίρνουν τις τιμές 1, 2, 3, συνεισφέροντας στους τρεις άξονες του υλικού, και:

T_q = συντελεστής πίεσης

s_{pq}^E = η ελαστική μήτρα συμμόρφωσης

S_p = μηχανικός συντελεστής πίεσης

d_{kp} = η πιεζοηλεκτρική σταθερή μήτρα πίεσης

E_k = πυκνότητα ηλεκτρικών πεδίων

D_i = η ηλεκτρική μετατόπιση

ε_{ik}^T = η άδεια μήτρα

Αυτοί οι συντελεστές έχουν δύο δείκτες. Ο πρώτος δείκτης αναφέρεται στην εφαρμοσμένη τάση και ο δεύτερος δείκτης αναφέρεται στην κατεύθυνση αυτής της τάσης. Οι υλικές σταθερές έχουν τους δείκτες, οι οποίοι δείχνουν τις ηλεκτρικές ή μηχανικές οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται όταν εξετάστηκε η σταθερά. Αυτοί οι δείκτες είναι:

T= σταθερή πίεση, κανένας περιορισμός πίεσης

E= σταθερό ηλεκτρικό πεδίο, σύντομο κύκλωμα των ηλεκτροδίων

D= σταθερή ηλεκτρική μετατόπιση, ανοικτό κύκλωμα των ηλεκτροδίων

S= σταθερή πίεση, μηχανικός όρος

Οι σταθερές που σχετίζουν τη μηχανική τάση παράγοντας το εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο είναι d_{kp} ή πιεζοηλεκτρικοί συντελεστές πίεσης. το g_{kp} μπορεί επίσης να αντιμετωπισθεί σχετίζοντας το δυναμικό του ηλεκτροδίου με την εφαρμοσμένη μηχανική τάση. Η πρώτη σχέση είναι χρήσιμη όταν εφαρμόζεται το έμμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και έχει τις χαρακτηριστικές μονάδες των *meters/Volt*. Η δεύτερη σχέση χρησιμοποιείται για το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και έχει τις χαρακτηριστικές μονάδες των *Coulomb/Newton*.

Οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να γραφτούν με πολλές διαφορετικές μορφές.. Μια σχέση της πίεσης και της ηλεκτρικής μετατόπισης δίνεται κατωτέρω:

$$S_p = s_{pq}^D T_q + g_{kp} D_k$$

$$E_i = -g_{iq} T_q + \beta_{ik}^T D_k$$

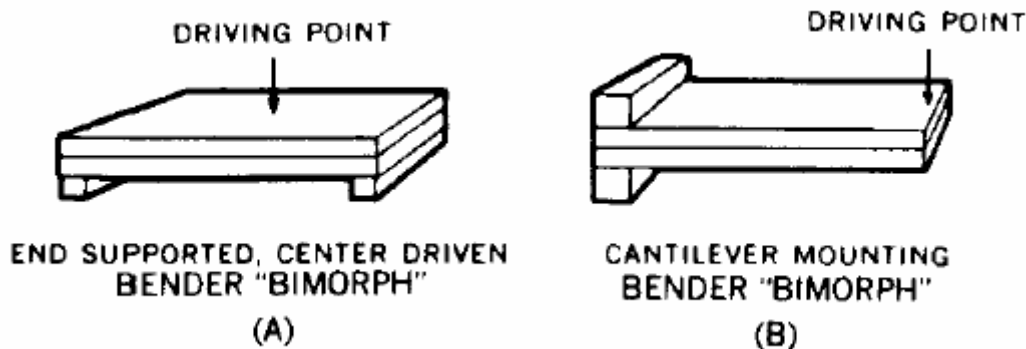
Αυτή σχέση εισάγει τις νέες σταθερές, g_{kp} , ή σταθερές τάσης. Αυτές οι σταθερές σχετίζουν το ηλεκτρικό πεδίο με την κατάσταση της μηχανικής τάσης. Οι μεγάλες σταθερές g_{kp} δείχνουν τη μεγάλη παραγωγή τάσης ανά μονάδα πίεσης, η οποία είναι μια ποιότητα ενδεικτική ενός καλού αισθητήρα. Το πολυμερές πιεζοηλεκτρικό, όπως PVDF, έχει σταθερές υψηλής τάσης και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται συχνά ως αισθητήρες.

4.5. Διαμορφώσεις πιεζοκεραμικών

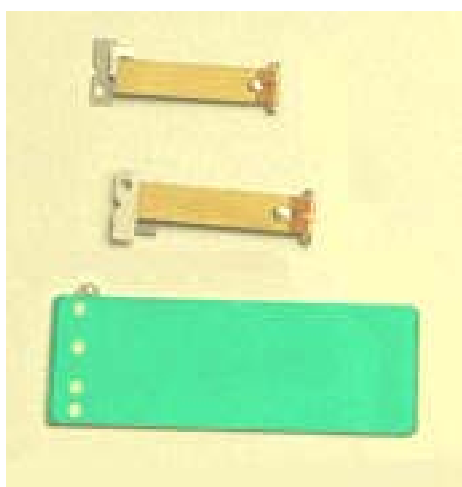
Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά είναι διαθέσιμα σε διάφορες διαμορφώσεις-μορφές. Οι πιο κοινές διαμορφώσεις, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό θέσης, περιλαμβάνουν δίμορφες διαμορφώσεις, άμορφες διαμορφώσεις, και stacks. Νεότερες διαμορφώσεις περιλαμβάνουν τις διαμορφώσεις τύπου *Rainbow wafers* και *Thunder wafers* (Ashley, 1995). Για τον έλεγχο δόνησης και μορφής τα πιεζοκεραμικά ενσωματώνονται συνήθως στο υλικό ή τοποθετούνται στην επιφάνεια του υλικού.

4.5.1. Δίμορφη διαμόρφωση

Οι δίμορφες διαμορφώσεις είναι μεταξύ των παλαιότερων διαμορφώσεων. Εισήχθησαν αρχικά έξι δεκαετίες πριν, από τον C. B. Sawyer (Morgan Matroc TP-218). Αποτελούνται από δύο πιεζοηλεκτρικά στρώματα που συνδέονται το ένα με το άλλο. Φυσιολογικά διαμορφώνονται έτσι ώστε όταν ένα στρώμα επιμηκύνεται τότε το άλλο συμπιέζεται. Με αυτή τη διαμόρφωση μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη καμπτική μετατόπιση. Μια δίμορφη διαμόρφωση παρουσιάζεται στην *Εικόνα 27*.



Εικόνα 23 Διαμόρφωση δίμορφων (Littlefield Andrew George)



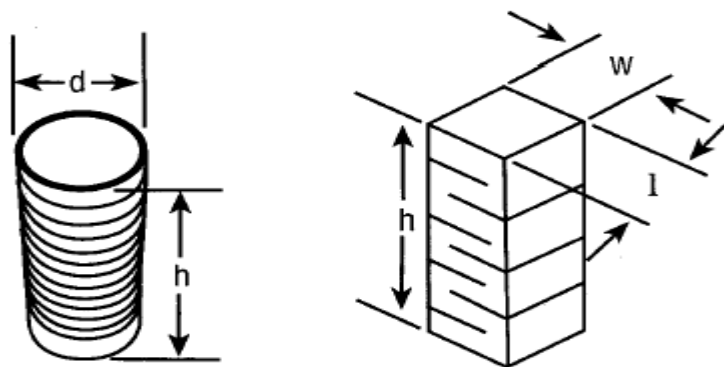
Εικόνα 24 Δίμορφα σε παραγωγή

Τα *Unimorphs* είναι ένας τύπος δίμορφης διαμόρφωσης όπου χρησιμοποιείται μόνο ένα ενιαίο στρώμα πιεζοηλεκτρικού. Το δεύτερο στρώμα αντικαθίσταται από έναν μη ενεργό στρώμα. Το *Unimorphs* είναι πιο δύσκαμπτα από τα δίμορφα μοντέλα, αλλά τα δίμορφα μοντέλα μπορούν να λάβουν πολύ μεγαλύτερες καμπτικές μετατοπίσεις. Οι πρόβολοι που καλύπτονται εντελώς με τα πιεζοηλεκτρικά, όπως εκείνοι Bailey (1985), δεν είναι τίποτα περισσότερο από μεγάλα *unimorphs*. Άλλες παραλλαγές των δίμορφων διαμορφώσεων περιλαμβάνουν πολύμορφα στα οποία γίνονται τρύπες με τρυπάνι μέσω του κεραμικού για να διαμορφωθεί η πόλωση του υλικού. Αυτή η διαμόρφωση πόλωσης και η ανομοιογένεια των δομών μολύβδου βρίσκεται πλέον σε μεγάλη βιομηχανική εφαρμογή.

Τα δίμορφα μπορούν να συνδυαστούν μηχανικά με τους υλικούς πόλους και είτε ευθυγραμμίζονται είτε αντιτάσσονται και μπορούν να συνδυαστούν ηλεκτρικά είτε παράλληλα είτε σε σειρές. Τα δίμορφα έχουν βρει χρήση στον τομέα των υπερήχων, του φιλτραρίσματος κυμάτων, των ηλεκτρομηχανικών ηλεκτρονόμων (ρελέ), και των συστημάτων οικιακών ηχείων.

4.5.2. Σωροί (Stacks)

Οι διαμορφώσεις τύπου σωρού (*stacks*) αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα πιεζοκεραμικών που συνδέονται μεταξύ τους ώστε να είναι μηχανικά σε σειρά και ηλεκτρικά παράλληλα. Η *stack* διαμόρφωση συνδέεται με καλώδιο έτσι ώστε όταν εφαρμόζεται σε αυτόν ένα ηλεκτρικό δυναμικό, το δυναμικό αυτό να εφαρμόζεται ταυτόχρονα σε όλα τα στρώματα. Η πίεση που προκαλείται σε κάθε στρώμα υπολογίζεται και το άθροισμα των επιμέρους πιέσεων είναι και η πίεση όλου του σωρού.

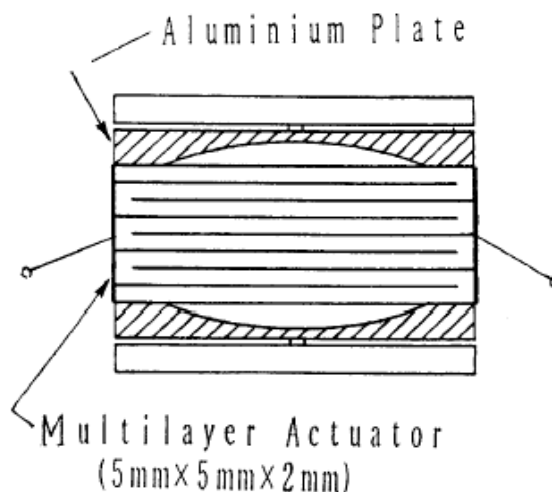


Εικόνα 25 Διαμόρφωση τύπου σωρού (Littlefield Andrew George)

Οι σωροί είναι ικανοί στο να υπολογίζουν επιμήκυνση της τάξης των μικρών, δύναμης της τάξης Kilonewtons και έχουν χρόνο απόκρισης της τάξης των δέκα μικροδευτερολέπτων. Η θερμοκρασία χρήσης των πιεζοηλεκτρικών σωρών (stacks) περιορίζεται στη μισή θερμοκρασία Curie των επιμέρους πιεζοηλεκτρικών. Επάνω από αυτό το σημείο το υλικό αρχίζει να χάνει την πολικότητά του. Δύο κοινές διαμορφώσεις σωρών παρουσιάζονται στην *Εικόνα 29*.

4.5.3. Ενεργοποιητές ημισεληνιακής μορφής (Moonie)

Οι ενεργοποιητές Moonie προτάθηκαν αρχικά από τον Q. C. Xu in 1991 (Uchino, 1993) για χρήση στους υδροφωνικούς αισθητήρες. Αποτελούνται από ένα πολυστρωματικό πιεζοκεραμικό που βρίσκεται μεταξύ δύο μεταλλικών καλυμμάτων. Το διάστημα σχήματος φεγγαριού μεταξύ του κεραμικού υλικού και των μεταλλικών κυπέλων δίνει το όνομά του. Η γεωμετρία ενός τέτοιου ενεργοποιητή φαίνεται στην *Εικόνα 30*.



Εικόνα 26 Διαμόρφωση ημισεληνιακού τύπου (Littlefield Andrew George)

Ο ενεργοποιητής αυτής της μορφής μπορεί να μετατοπιστεί οκτώ φορές περισσότερο από ένα πολυστρωματικό σωρό (stack) του ίδιου όγκου.

4.5.4. Διαμορφώσεις τύπου *Rainbow and Thunder Wafers*

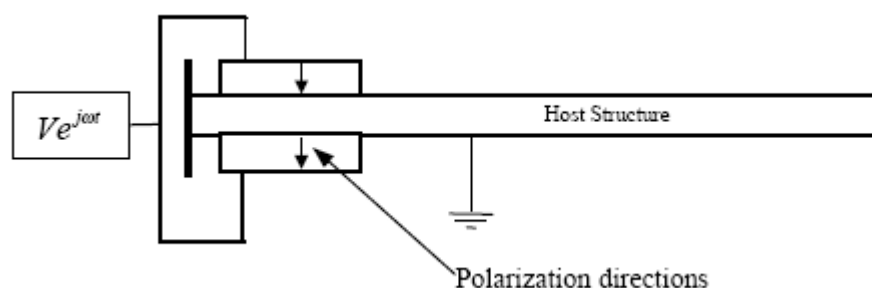
Οι διαμορφώσεις τύπου *Rainbow (Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)* (Heartling, 1994) and *Thunder wafers* είναι δύο νέες διαμορφώσεις που παρουσιάζουν ελπιδοφόρες βελτιώσεις πέρα από τις παραδοσιακές διαμορφώσεις. Τα *Rainbow wafers* είναι κεραμικά τύπου (PLZT) που έχουν τη μια πλευρά τους ανενεργή. Αυτό αναγκάζει το PLZT να έχει μια διαμόρφωση είτε θόλου είτε μια μορφή κελύφων, ανάλογα με την αρχική τους μορφή. Αυτοί ενεργούν παρόμοια με τα *unimorphs* και είναι ικανοί να επιμηκυνθούν ή συσπειρωθούν για τουλάχιστον 0,050 ίντσες όταν εφαρμόζονται ηλεκτρικά πεδία μεταξύ 300 και 500V (Ashley, 1995). Μπορούν να ασκήσουν πιέσεις σχεδόν 600 kilopascals και μπορούν να συσσωρευτούν για να επιτύχουν υψηλότερες μετατοπίσεις. Μια διαμόρφωση *Thunder wafer* είναι μια πιεζοηλεκτρική πλάκα που συνδέεται με ένα μέταλλο που υποστηρίζεται με μια κόλλα πολυαμιδίου. Η συσκευή υποβάλλεται σε θερμικό πεδίο λόγω του κακού θερμικού συνδυασμού μεταξύ του πιεζοηλεκτρικού και της υποστήριξης και αναγκάζει σε μια διαμόρφωση θόλου.

Μια Thunder wafer με διάμετρο επτά εκατοστών μπορεί να παραγάγει μια μετατόπιση ενός εκατοστού χωρίς την επιβολή φορτίου. Καμία από αυτές τις διαμορφώσεις δεν είναι ευρέως διαθέσιμη αυτή τη στιγμή.

4.5.5. Διαμόρφωση που τοποθετείται στην επιφάνεια και που ενσωματώνεται

Οι διαμορφώσεις ενεργοποιητών που παρουσιάζονται παραπάνω, χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για τον προσδιορισμό θέσης. Οι τομείς του ελέγχου δόνησης και μορφής τείνουν να χρησιμοποιήσουν τη διαμόρφωση ενεργοποιητών που τοποθετούνται στην επιφάνεια ή αυτών που ενσωματώνονται στη δομή των υλικών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η θέση του ενεργοποιητή, ο προσανατολισμός της πόλωσης και η πολικότητα της εφαρμοσμένης διέγερσης καθορίζουν εάν η φόρτιση είναι καθαρά κάμπτική ή εφελκυστική και θλιπτική.

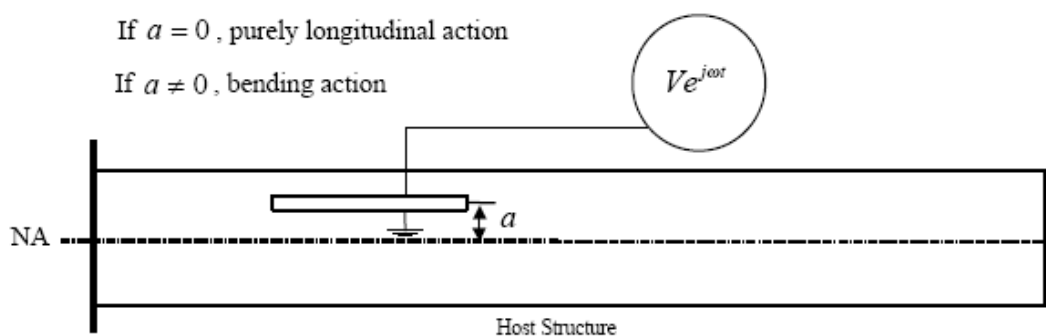
Για διαμορφώσεις που συνδέονται στην επιφάνεια του υλικού, η παραμόρφωση του πιεζοκεραμικού περιορίζεται στο να ταιριάζει με την παραμόρφωση της δομής στην επιφάνεια επαφών. Η άλλη πλευρά του πιεζοκεραμικού είναι χωρίς περιορισμούς.



Εικόνα 27 Σχηματική παράσταση ενεργοποιητών σε ζεύγη (Littlefield Andrew George)

Αρκετά συχνά αυτοί οι ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται ανά ζεύγη, με την αντίθετη πλευρά της κατασκευής. Αυτή η διαμόρφωση φαίνεται στην *Εικόνα 31*. Εάν η κατεύθυνση πόλωσης των ενεργοποιητών είναι της ίδιας φοράς (το θετικό ηλεκτρόδιο του ενός ενεργοποιητή και το αρνητικό ηλεκτρόδιο του άλλου βρίσκονται στην ίδια πλευρά), η διέγερση των ενεργοποιητών προκαλεί κάμπτική ροπή στο υλικό. Εάν οι

πολικότητες αντιτάσσονται προκαλείται έκταση. Εάν οι πολικότητες ούτε ευθυγραμμίζονται ούτε αντιτάσσονται, ή εάν εφαρμόζονται διαφορετικού δυναμικού ηλεκτρικά πεδία συντελείται ένας συνδυασμός κάμψης και έκτασης.



Εικόνα 28 Σχηματική παράσταση ενσωματωμένου ενεργοποιητή (Littlefield Andrew George)

Η ενσωμάτωση του ενεργοποιητή στο υλικό επιτρέπει στο σχεδιαστή να το τοποθετήσει ακριβώς στη θέση που επιθυμεί, για να πάρει την επιθυμητή επίδραση. Η ενσωματωμένη διαμόρφωση μπορεί να φανεί στην *Εικόνα 32*. Ο ενεργοποιητής περιορίζεται για να ταιριάζει με την παραμόρφωση δομών και στις ανώτερες και στις κατώτατες επιφάνειες.

4.6. Προβλήματα εφαρμογής πιεζοκεραμικών

Την χρήση των πιεζοκεραμικών ενεργοποιητών μπορεί να την επηρεάσουν πολλοί παράγοντες. Μεταξύ αυτών είναι η υστέρηση, η θερμοκρασία Curie, η γήρανση, η μη γραμμική απόκριση, τα αποτελέσματα ερπυσμού, παραλλαγές με τη μηχανική τάση και επιπτώσεις από την ενσωμάτωση τους στα σύνθετα υλικά. Παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένα από αυτά τα προβλήματα, συνοπτικά.

4.6.1. Αποπόλωση

Η πόλωση του κεραμικού μπορεί να θεωρηθεί μόνιμη, αλλά μπορεί να χαθεί υπό ορισμένους όρους. Η θερμοκρασία και τα υψηλά ηλεκτρικά επίπεδα είναι παράγοντες που μπορούν να αναγκάσουν τα κεραμικά να χάσουν την πόλωσή τους.

Κάθε πιεζοκεραμικό έχει μια θερμοκρασία χρήσης του, γνωστή και ως θερμοκρασία Curie. Σε αυτήν τη θερμοκρασία η δομή του κρυστάλλου από μη συμμετρική μετατρέπεται σε συμμετρική.. Εάν το πιεζοκεραμικό υλικό υπερβεί αυτήν την θερμοκρασία η πόλωση του χάνεται.

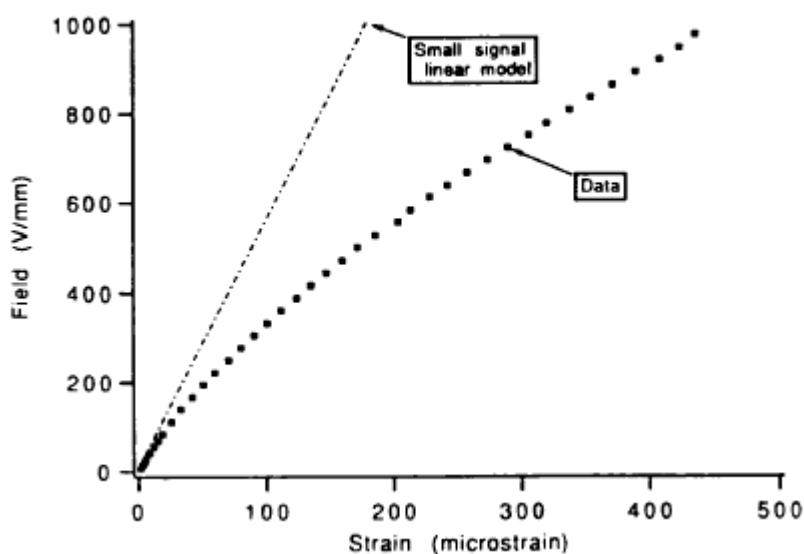
Τα πιεζοκεραμικά μπορούν να χάσουν την πολικότητά τους και σε περίπτωση που βρεθούν κάτω από ισχυρά ηλεκτρικά πεδία.. Όλα τα πιεζοκεραμικά έχουν κάποιο περιορισμό, όσον αφορά το ηλεκτρικό πεδίο κάτω από το οποίο μπορούν να λειτουργήσουν ομαλά. Εάν ένα συνεχές ηλεκτρικό πεδίο, μεγαλύτερο από το πεδίο που εφαρμόζεται, εφαρμοστεί με κατεύθυνση αντίθετη με την πολικότητα του υλικού, τότε το υλικό αποπολώνεται και πολώνεται ξανά σε κατεύθυνση αντίθετη της αρχικής κατεύθυνσης πόλωσής του. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο που θα εφαρμοστεί είναι σε κατεύθυνση ίδια με την κατεύθυνση πόλωσης του πιεζοκεραμικού, το υλικό δεν

αποπολώνεται, αλλά μπορούν να προκληθούν σπασίματα στο υλικό αυτό. Αυτά τα ηλεκτρικά πεδία είτε μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα είτε μπορούν να προκληθούν έμμεσα από μεγάλη τάση που θα εφαρμοστεί σ' αυτό. Τάσεις της τάξης από 10 MPa σε 100 MPa έχει βρεθεί ότι προκαλούν αποπόλωση (Moulson και Herbert, 1990).

Το φαινόμενο ενός πιεζοκεραμικού υλικού που μπορεί να αποπολωθεί ή να αλλάξει την πολικότητά του, μπορεί να αποφευχθεί. Για να γίνει αυτό αρκεί απλά μια υψηλή συνεχής τάση στην κατεύθυνση της επιθυμητής πολικότητας. Γενικά, 15 έως 30 λεπτά είναι αρκετά για να επιτύχουν την επιθυμητή πολικότητα.

4.6.2. Μη γραμμική απόκριση και γήρανση

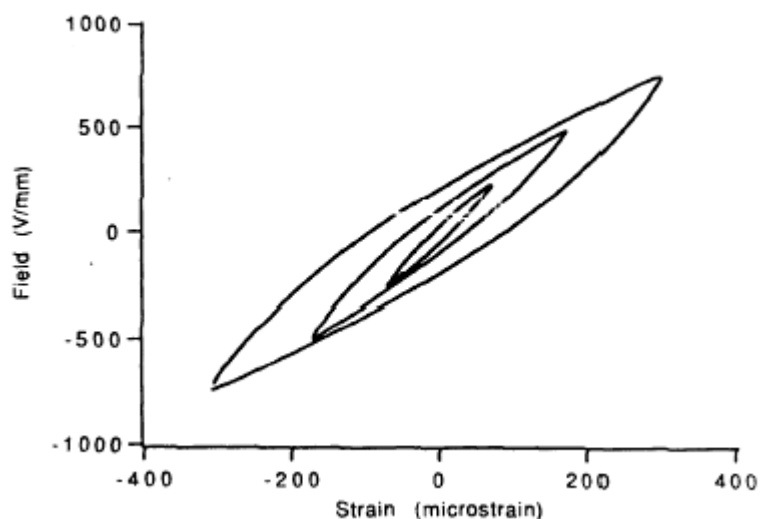
Οι καταστατικές εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω παρουσιάζουν μια γραμμική σχέση μεταξύ εφαρμοσμένου πεδίου και της τάσης που προκαλείται. Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 33*, αυτό είναι μια προσέγγιση που ισχύει μόνο για τις χαμηλές ηλεκτρικές τάσεις και πιέσεις. Οι περισσότερες τιμές δ_{ij} δίνονται δεδομένου ότι η κλίση αυτής της καμπύλης είναι σταθερή ή ισχύουν μόνο για μικρές περιοχές τιμών. Εάν μελετάται η περιοχή που βρίσκεται έξω από τη γραμμική περιοχή, πρέπει να βρεθεί μια νέα τιμή για το δ_{ij} με την γραμμικοποίηση των στοιχείων στο πεδίο ενδιαφέροντος.



Εικόνα 29 Επίδραση «γήρανσης» (Littlefield Andrew George)

Οι ιδιότητες της κεραμικής μεταβάλλονται λογαριθμικά και όχι γραμμικά με το χρόνο. Αυτή η επίδραση καλείται γηράσκουσα και έχει ως αποτέλεσμα να μην ισχύει η γραμμική σχέση μεταξύ των στοιχείων. Μετά από χρόνο, θα πρέπει να υπολογιστεί ένα νέο δ_{ij} από μια νέα γραμμική καμπύλη. Η γήρανση μπορεί επίσης να επιταχυνθεί από την έκθεση της κατασκευής σε υψηλές θερμοκρασίες.

4.6.3. Υστέρηση



Εικόνα 30 Βρόγχος υστέρησης (Littlefield Andrew George)

Στο σχήμα φαίνεται η υστέρηση του ηλεκτρικού πεδίου με την τάση για τρεις διαφορετικές τιμές εφαρμοζόμενων ηλεκτρικών πεδίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση του ηλεκτρικού πεδίου τόσο μεγαλύτερη υστέρηση παρατηρείται. Αυτή η υστέρηση μπορεί να είναι ένα πολύ μεγάλο πρόβλημα στις εφαρμογές προσδιορισμού θέσης, αφού μπορεί να λάβει τιμές τουλάχιστον 30% του πλήρους εύρους του ενεργοποιητή. Για τα προβλήματα δόνησης, η υστέρηση μπορεί να θεωρηθεί ως διαφορά φάσης. Αυτή η διαφορά φάσης δεν θα προκαλέσει αστάθεια εφ' όσον τα περιθώρια φάσης είναι ικανοποιητικά. Για τις στατικές εφαρμογές η υστέρηση πρέπει να προσεχθεί πολύ περισσότερο.

4.6.4. Προβλήματα με την ενσωμάτωση πιεζοκεραμικών

Η δομή των περισσότερων σύνθετων υλικών επιτρέπει την ενσωμάτωση πιεζοκεραμικών υλικών. Η ενσωμάτωση του ενεργοποιητή επιτρέπει στο σχεδιαστή να τον τοποθετήσει ακριβώς στη θέση όπου το θέλει για να πάρει την επιθυμητή επίδραση. Η τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών στην επιφάνεια των υλικών επιτρέπει στο μελετητή να τελειοποιήσει τη γενική δομή.

Μερικά προβλήματα με τα πιεζοκεραμικά προκύπτουν, εν τούτοις, όταν ενσωματώνονται στα υλικά. Το πρώτο πρόβλημα εντοπίζεται στο ότι η θερμοκρασία αποκατάστασης για τα σύνθετα υλικά μπορεί να είναι επάνω από τη θερμοκρασία Curie του πιεζοκεραμικού. Για την αντιμετώπισή του, απαιτείται η χρήση χαμηλότερης θερμοκρασίας για την αποκατάσταση στα σύνθετα, αλλά περιορίζει τη θερμοκρασία της δομής.

Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι η ενσωμάτωση του πιεζοηλεκτρικού γίνεται συνήθως με την αποκοπή ενός τμήματος του σύνθετο στρώματος. Αυτό σημαίνει ότι μερικές από τις ίνες δεν είναι πλέον συνεχείς, διακόπτοντας κατά συνέπεια την πορεία των φορτίων στο υλικό. Έτσι η συμπεριφορά του υλικού με την ενσωμάτωση του πιεζοηλεκτρικού είναι διαφορετική από ότι το ακέραιο υλικό.

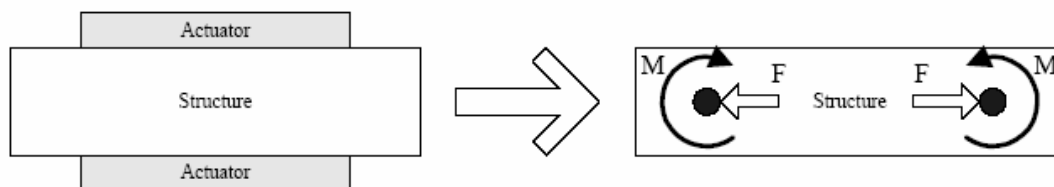
Επίσης, ένα πρόβλημα δημιουργείται λόγω της εύθραυστης φύσης του πιεζοκεραμικού. Πρέπει η επιλογή του πιεζοκεραμικού να είναι τέτοια ώστε να διασφαλιστεί ότι θα αντέξει της διαδικασίας κατασκευής και της λειτουργίας της δομής. Η ευθραυστότητά τους περιορίζει τις κυρτότητες στις επιφάνειες λόγω της των φορτίσεων που μπορούν να επιβληθούν πάνω στο κεραμικό. Αυτό μπορεί να υπερνικηθεί με τη χρησιμοποίηση των πιεζοπολυμερών, αλλά όπως αναφέρθηκε ήδη αυτά δεν έχουν την ακαμψία που απαιτείται συνήθως για ενεργοποιητές.

4.7. Μοντελοποίηση των πιεζοκεραμικών

Η εκτέλεση μιας εφαρμογής μπορεί μόνο να είναι τόσο καλή ανάλογα με το πρότυπο που σχεδιάστηκε για αυτήν την εφαρμογή. Για αυτόν τον λόγο, επιδιώκονται τα πιο ακριβή και εύχρηστα πρότυπα για την εκάστοτε εφαρμογή. Εντούτοις, τα περισσότερα από τα υπάρχοντα πρότυπα είναι είτε ανακριβή είτε περίπλοκα στη χρήση τους. Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστεί μια περίληψη τεσσάρων μεθόδων για τα πρότυπα. Μια πολύ πλήρης και συνοπτική άποψη αυτής της περιοχής παρουσιάστηκε από τον Lalande (1995).

4.7.1. Μέθοδος στατικής ισοδύναμης δύναμης (SEF)

Τα πρότυπα ενεργοποιητή που προέρχονται από τη μέθοδο SEF είναι ευρύτατα χρησιμοποιημένη αν και έχουν αποδειχθεί ότι υπολογίζουν λανθασμένα κατά κάποιο ποσοστό τις ηχηρές συχνότητες συστημάτων, την δύναμη και την πίεση του ενεργοποιητή (Liang et Al, 1993b Zhou et Al, 1996 Fairweather 1998).

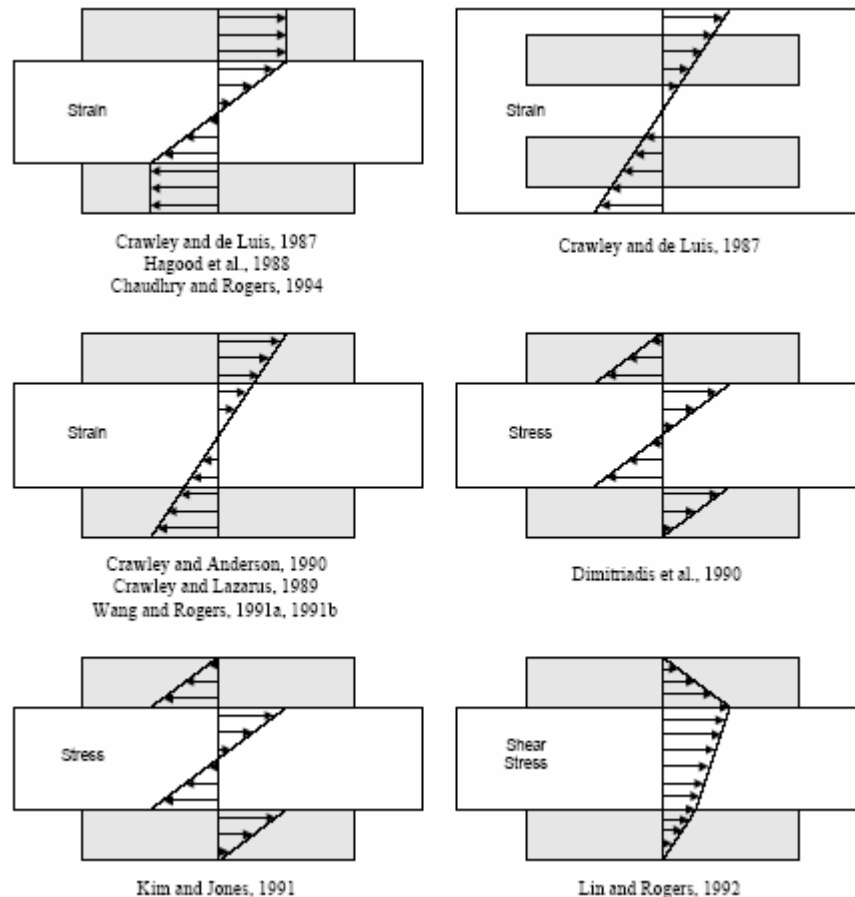


Εικόνα 31 Διάγραμμα στατικής ισοδύναμης δύναμης (Littlefield Andrew George)

Παρόλα αυτά ο λόγος για την αποδοχή τους είναι η εύκολη διατύπωσή τους.

Σε αυτήν την προσέγγιση, ο ενεργοποιητής αντικαθίσταται με μια ισοδύναμη δύναμη ή ροπή διατηρώντας την ισορροπία της δομής. Αυτή η δύναμη υπολογίζεται για ένα επίπεδο μονάδων διέγερσης ενεργοποιητών.

Η δομή η ίδια θεωρείται ως μια ελαστική ακαμψία ενάντια στην οποία ενεργεί ο ενεργοποιητής



Εικόνα 32 Διαγραμματικά μοντέλα ισοδύναμης δύναμης (Littlefield Andrew George)

Η μέθοδος αντλεί το όνομά της από αυτήν την αντικατάσταση του ενεργοποιητή με μια ισοδύναμη δύναμη που υπολογίζεται από τη στατική ισορροπία της δομής. Αυτή η αντικατάσταση του ενεργοποιητή με τις ισοδύναμες δυνάμεις μπορούν να φανούν στο σχήμα.

Στο μοντέλο δε συμπεριλαμβάνεται η ακαμψία, η μάζα ή η συχνότητα του ενεργοποιητή. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί μόνο στις απλές δομές δοκών και πλακών, αφού η εφαρμογή του μοντέλου σε πιο σύνθετη δομή θα ήταν πολύ πιο επίπονη.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά πρότυπα SEF. Οι διαφορές μεταξύ τους προέρχονται από την μορφή της κατανομής της τάσης. Η Εικόνα 36 παρουσιάζει τα διαφορετικά μοντέλα ανάλογα με την κατανομή τάσεων. Ο Lalande δίνει μια επισκόπηση αυτών των διαφορετικών προτύπων και συνοψίζει τις υποθέσεις που γίνονται σε καθεμία. Επισημαίνει επίσης τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και οποιαδήποτε λάθη που γίνονται σε κάθε πρότυπο. Η Εικόνα 37 από τον Lalande δίνει την ισοδύναμη δύναμη και ροπή για κάθε ένα από τα πρότυπα.

Εικόνα 33 Πίνακας ισοδύναμων στατικών δυνάμεων και ροπών (Littlefield Andrew

Analytical Model	Equivalent Force	Equivalent Moment
Beams		
Crawley and de Luis (1987)	$2 \frac{E_s t_s}{2 + \Psi} \Lambda$	$\frac{E_s t_s^2}{6 + \Psi} \Lambda$
Chaudhry and Rogers (1994)	$2 \frac{E_s t_s}{2 + \Psi} \Lambda$	$\frac{E_s t_s^2}{6 + \Psi + \frac{2}{T^2}} \Lambda$
Crawley and Anderson (1989)	$2 \frac{E_s t_s}{2 + \Psi} \Lambda$	$\frac{E_s t_s^2 \left(1 + \frac{1}{T}\right)}{6 + \Psi + \frac{12}{T} + \frac{8}{T^2}} \Lambda$
Wang and Rogers (1991)	$2 \frac{E_s t_s}{6 + \Psi} \Lambda$	$(t_a + t_s) \frac{E_s t_s}{6 + \Psi} \Lambda$
Plates		
Hagood et al. (1988)	$\frac{E_s t_s}{1 - \nu} \frac{2}{2 + \Psi} \Lambda$	$\frac{E_s t_s^2}{1 - \nu} \frac{\Lambda}{6 + \Psi}$
Crawley and Lazarus (1989)	$\frac{E_s t_s}{1 - \nu} \frac{2}{2 + \Psi} \Lambda$	$\frac{E_s t_s^2 \Lambda}{1 - \nu} \frac{1 + \frac{1}{T}}{6 + \Psi + \frac{12}{T} + \frac{8}{T^2}}$
Dimitriadis et al. (1991)	N/A	$\frac{\left(\frac{E_s t_s^2 \Lambda}{1 - \nu}\right) \left(1 + \frac{1}{T}\right)}{6 \left(1 + \frac{1}{T}\right) + \Psi \left(1 + \frac{6}{T^2} + \frac{8}{T^3}\right)}$
Kim and Jones (1991)	N/A	$\frac{E_s t_s^2 \Lambda}{1 - \nu} \frac{1 + \frac{1}{T}}{6 + \Psi + \frac{12}{T} + \frac{8}{T^2}}$
Wang and Rogers (1991)	$\frac{E_s t_s}{1 - \nu} \frac{2}{6 + \Psi} \Lambda$	$\frac{E_s t_s^2}{1 - \nu} \frac{\left(1 + \frac{1}{T}\right)}{6 + \Psi} \Lambda$
Wang and Rogers (1991b)	$2 \frac{E_s t_a}{1 - \nu} \Lambda$	$\frac{E_s t_a^2}{1 - \nu} (1 + T) \Lambda$
Lin and Rogers (1992)	$\frac{\Psi E_a^2 t_a^3 h \Lambda}{K_1} \left(K_{10} + K_{11} \frac{\cosh(\eta_1 x)}{\cosh(\eta_1 \ell)} \right)$	$\frac{\Psi E_a^2 t_a^3 h \Lambda}{6 K_0} \left(K_8 + K_9 \frac{\cosh(\eta_2 x)}{\cosh(\eta_2 \ell)} \right)$

Where $T = \frac{t_s}{t_a}$ and $\Psi = \frac{E_s t_s}{E_a t_a}$.

(George)

4.7.2. Μοντέλα που διέπονται από τις βασικές αρχές

Η χρήση των βασικών αρχών επιτρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι μηχανικές, όσο και ηλεκτρικές ιδιότητες του ενεργοποιητή. Ποιες ιδιότητες και σε ποιο βαθμό, εξαρτάται από την αρχή που εφαρμόζεται. Το μειονέκτημα σε αυτήν την προσέγγιση είναι ότι για οτιδήποτε πιο σύνθετο από μια απλή δοκό αυτά τα πρότυπα γίνονται πολύ πολύπλοκα. Αυτό δεν καθιστά τις μεθόδους κατάλληλες για τις χαρακτηριστικές μελέτες σχεδίου, όπως η βέλτιστη τοποθέτηση των ενεργοποιητών στη δομή ενός υλικού. Επιπλέον, η δυναμική της δομής και του ενεργοποιητή λύνονται ταυτόχρονα, έτσι για κάθε αλλαγή στην τοποθέτηση ενεργοποιητών, πρέπει να λυθεί εξ αρχής ολόκληρο το πρόβλημα.

Η ενεργειακή μέθοδος Rayleigh- Ritz έχει χρησιμοποιηθεί από τον Hagood (1990) και Akella (1994). Το πρότυπο του Hagood περιλαμβάνει τη δυναμική ενός ηλεκτρικού δικτύου, που συνδέεται στα ηλεκτρόδια μπαλωμάτων και παρήγαγε μια καταστατική εξίσωση που ελέγχει την ανάπτυξη συστημάτων.

Η θεωρία δοκών Bernoulli- Euler χρησιμοποιήθηκε από τους Pan, Hansen, και Snyder (1991), για να αναπτύξει ένα δυναμικό πρότυπο δοκών που ενσωμάτωνε στις εξισώσεις την ακαμψία του ενεργοποιητή μπαλωμάτων και το φορτίο τους, αλλά θεωρήθηκε αμελητέο το ηλεκτρικό δυναμικό. Έπειτα, σύγκριναν τα αποτελέσματά τους με τις πειραματικές μετρήσεις και με το πρότυπο SEF Crawley και de Luis (1987). Τα αποτελέσματα του δυναμικού προτύπου ήταν σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις, ενώ τα αποτελέσματα του προτύπου SEF διαφέρανε αρκετά.

4.7.3. Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Μια προσέγγιση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ενεργοποιητή και της δομής γίνεται με τη χρήση των πεπερασμένων μεθόδων στοιχείων (FEM) έτσι ώστε να συμπεριληφθούν οι ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών στα προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Ο Lalande (1995) ανέπτυξε τρεις τρόπους σύμφωνα με τους οποίους μπορούν να εξαχθούν μοντέλα επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία: τα άμεσα διαμορφωμένα πεπερασμένα στοιχεία για συγκεκριμένες εφαρμογές, κατηγορίες που χρησιμοποιούν μια θερμοελαστική αναλογία και τέλος αυτή η κατηγορία που χρησιμοποιούν εμπορικά διαθέσιμο FEA με κώδικες που έχουν τις πιεζοηλεκτρικές διατυπώσεις στοιχείων.

Αν και οι κώδικες FEM είναι ελεύθεροι να χρησιμοποιηθούν, είναι πολύ χρονοβόροι για κάποιον που επιθυμεί να τους κωδικοποιήσει και να τους διορθώσει. Απαιτούν έναν υψηλό βαθμό οικειότητας με το FEM, που οι περισσότεροι μελετητές στερούνται, έτσι τις περισσότερες φορές καθίσταται δύσκολη η χρήση των FEM. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση FEM μπορεί να προκαλέσει μια απώλεια διορατικότητας στο πρόβλημα και τελικά, κάθε φορά που αλλάζει η θέση του πιεζοηλεκτρικού στη δομή πρέπει να γίνεται κάθε φορά νέα επίλυση.

Η θερμοελαστική αναλογία μεταχειρίζεται τον πιεζοηλεκτρισμό ως πρόβλημα θερμικής επέκτασης και χρησιμοποιεί τα υπάρχοντα θερμοελαστικά στοιχεία. Κατά αναλογία το ηλεκτρικό δυναμικό μπορεί να αντικατασταθεί με ισοδύναμο μέγεθος θερμοκρασίας και το ρεύμα με το ισοδύναμο της ροής θερμότητας. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε εμπορικό κώδικα που υποστηρίζει τη θερμική φόρτωση και μπορεί να ενσωματώσει οποιαδήποτε γεωμετρία που μπορεί να χειριστεί το πρόγραμμα. Οι Mollenhauer και Griffin (1994) κατέδειξαν την προσέγγιση της θερμοελαστικής αναλογίας και έδειξαν ότι είναι ακριβές για τα στατικά προβλήματα παραμόρφωσης. Τα δυναμικά προβλήματα μπορούν μόνο να μελετηθούν εάν η εφαρμογή χαρακτηρίζεται από αρμονική θερμική ανάλυση.

Η τελευταία κατηγορία χαρακτηρίζεται από το ότι χρησιμοποιεί τους εμπορικά διαθέσιμους κώδικες FEM που έχουν τις πιεζοηλεκτρικές διαμορφώσεις στοιχείων. Τα υπάρχοντα δομικά πρότυπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με την προσθήκη των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που αντιπροσωπεύουν τον ενεργοποιητή.

Γενικά οι μέθοδοι FEM, λόγω της μη ευελιξίας τους και της μη ύπαρξης ταχύτερων προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων είναι δύσκολα στην εφαρμογή τους.

4.7.4. Μέθοδος σύνθετης αντίστασης

Η μέθοδος της σύνθετης αντίστασης είναι η πιο πρόσφατη τεχνική για να μοντελοποιηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ ενεργοποιητή και δομής. Η τεχνική συνοψίζεται στα ακόλουθα έξι βήματα από τον Fairweather (1998).

1. Στον ενεργοποιητή εφαρμόζεται μία κίνηση χαμηλής συχνότητας. Για τους μακριούς, λεπτούς ενεργοποιητές με τα δευτερεύοντα ηλεκτρόδια, εφαρμόζεται μια εκτεταμένη ταλάντωση. Αυτός είναι ο τρόπος που χρησιμοποιείται συνήθως για τους ενεργοποιητές σε δοκούς. Για τους λεπτούς ορθογώνιους ενεργοποιητές με τα ηλεκτρόδια στα δύο μεγαλύτερα πρόσωπα, η κίνηση εφαρμόζεται με μια διαμήκη παραμόρφωση σε δύο διαστάσεις και το πάχος του ενεργοποιητή μικραίνει. Αυτή είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τους ενεργοποιητές που βρίσκονται σε πλάκες.

2. Διατυπώνονται οι συνοριακές συνθήκες της ταλάντωσης σε σχέση με την κατάλληλη μηχανική σύνθετη αντίσταση του υλικού στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο ενεργοποιητής

3. Η απόκριση του ενεργοποιητή καθορίζεται σε σχέση με τη σύνθετη αντίσταση της δομής.

4. Έπειτα καθορίζεται η μηχανική σύνθετη αντίσταση της δομής.

5. Οι μηχανικές σύνθετες αντιστάσεις χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την απόκριση του ενεργοποιητή, η οποία περιλαμβάνει την τάση και τη μετατόπιση του ενεργοποιητή.

6. Η τάση του ενεργοποιητή χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τη δύναμη που εφαρμόζεται από τον ενεργοποιητή στη δομή. Στη συνέχεια υπολογίζεται η απόκριση της δομής από την εφαρμογή της δύναμης.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι οι ενεργοποιητές μπορούν να δοκιμαστούν σε πολλαπλές θέσεις με μόνο μια λύση του προβλήματος δόνησης της δομής. Αυτό γίνεται επειδή οι μηχανικές σύνθετες αντιστάσεις της δομής διαμορφώνονται χωρίς την παρουσία του ενεργοποιητή στο πρότυπο. Αυτή η δυνατότητα να δοκιμαστούν εύκολα οι ενεργοποιητές σε πολλαπλές θέσεις βοηθά σε μια ευελιξία της μεθόδου σε αυτό που συμβαίνει και να προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες της έρευνας. Επιπλέον, αυτή η τεχνική έχει αποδειχθεί ότι έχει πολύ καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις σε αντιδιαστολή με τις απλούστερες προβλέψεις SEF (Fairweather 1998, Zhou 1996, Sermoneta 1995, Rossi 1993). Η συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα επιτρέπει στη χρησιμοποίηση της μεθόδου αυτής για πολλές εφαρμογές.

Εντούτοις με αυτήν την προσέγγιση παρουσιάζονται και προβλήματα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα της εφαρμογής παρουσιάζεται στον προσδιορισμό των μηχανικών σύνθετων αντιστάσεων. Μέχρι σήμερα, οι μηχανικές σύνθετες αντιστάσεις υπολογίζονταν με αναλυτικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος της ταλάντωσης.

Αυτό περιορίζει τη δυνατότητα εφαρμογής μεθόδων σε μια απλή γεωμετρία, για την οποία, μπορεί να υπολογιστεί εύκολα η σύνθετη αντίσταση. Πρόσφατα, ο Fairweather (1998) προσδιόρισε τις τιμές των σύνθετων αντιστάσεων μέσω της ανάλυσης της δομής των πιεζοηλεκτρικών με προγράμματα FEM. Βρίσκοντας τη συχνότητα απόκρισης κατάφερε να υπολογίσει τις μηχανικές σύνθετες αντιστάσεις των κεραμικών υλικών.

Τα βασικά της μοντελοποίησης της σύνθετης αντίστασης σχεδιάστηκαν από τον Liang (1993), και έγινε σύγκριση μεταξύ της διαμόρφωσης σύνθετης αντίστασης και της μεθόδου SEF για ένα σύστημα ελατήριο-μάζας-αποσβεστήρα. Ο Liang (1993b) επέκτεινε τη μέθοδο σε έναν σύστημα με πολλαπλάσιο βαθμό ελευθερίας με την εξέταση της δυναμικής διαμόρφωσης μιας δοκού. Ο Zhou (1993) εφάρμοσε τη μέθοδο σε μια ελεύθερη κυλινδρική δομή και την σύγκρινε με ένα δισδιάστατο πρότυπο SEF. Ο Lalande (1995) μελέτησε τις δομές δαχτυλιδιών και κελύφων και συμπεριέλαβε στο μοντέλο και τις επιδράσεις της διατμητικής τάσης στο υλικό, τις οποίες ο Zhou (1993) δεν είχε συμπεριλάβει στις εφαρμογές του.

Ο Fairweather (1998) ανέπτυξε έναν τρόπο να προσδιοριστούν οι μηχανικές σύνθετες αντιστάσεις από το αποτελέσματα μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEA. Αυτό επιτρέπει στη μέθοδο σύνθετης αντίστασης για να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε δομή και να υπολογιστεί η τιμή της ακριβώς από την επίλυση FEA.

Η δυνατότητα της μεθόδου της σύνθετης αντίστασης για την εύρεση της απόκρισης μιας δοκού με τη χρήση πολλαπλών ενεργοποιητών παρουσιάστηκε από τον Sermoneta (1995). Από τον Lomenzo (1993) παρουσιάστηκε μια μέθοδος για να καθορίσει τη σύνθετη αντίσταση ενός πιεζοκεραμικού ενεργοποιητή τύπου σωρών. Αυτό αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα, δεδομένου ότι οι ενεργοποιητές σωρών χρησιμοποιούνται ευρέως στις ενεργές δομές που παράγουν υψηλές μετατοπίσεις και υψηλές δυνάμεις.

Η μέθοδος σύνθετης αντίστασης τέθηκε σε μια πρακτική χρήση από τον Sumali και Cudney (1994) στο σχέδιο ενός ενεργού υποστηρίγματος μηχανών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Αυτό το κεφάλαιο θα αναπτύξει τις απαραίτητες εξισώσεις που προκύπτουν από την απόκριση μιας πλάκας σε έναν ενεργοποιητή. Κατ' αρχάς, η ταλάντωση του πιεζοκεραμικού θα μοντελοποιηθεί αναλυτικά. Κατόπιν θα παρουσιαστεί μια μέθοδος προσδιορισμού των στιγμιαίων σύνθετων αντιστάσεων. Αυτές οι σύνθετες αντιστάσεις μπορούν έπειτα να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν τη ροπή που ασκείται από το πιεζοκεραμικό μπάλωμα και τη μετατόπιση του μπαλώματος.

Αυτή η ανάπτυξη προέρχεται από την εργασία Fairweather (1998), η οποία αποτέλεσε και τη βάση των εργασιών των Zhou (1996) και Norton (1989).

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την παράγραφο:

Variable Name	Symbol	Units
Complex modulus of elasticity of the piezoceramic	Y_{11}^E	Pa
Poisson ratio of the piezoceramic	ν_p	-
Density of the piezoceramic material	ρ_p	kg/m^3

Piezoelectric strain coefficient	d_{31}	m/V
Piezoelectric strain coefficient	d_{32}	m/V
Thickness of the piezoceramic	h_p	m
Thickness of the plate	t_p	m
Length of the piezoceramic	a_p	m
Width of the piezoceramic	b_p	m
Electric field applied to the piezoceramic	E_3	V/m
Cross sectional area of piezoceramic in YZ plane	A_x	m ²
Cross sectional area of piezoceramic in XZ plane	A_y	m ²
Mechanical Impedance	Z_{ii}	Nxsec/m
Mechanical Admittance	Y_{ii}	m/Nxsec
In-plane force admittance	Q_{kl}	
Elastic Compliance Matrix	s_{ij}	1/Mpa
Spatial frequency of the oscillations	Ω	
Mass Matrix	$[M]$	
Stiffness Matrix	$[K]$	
Identity Matrix	$[I]$	
Matrix of eigenvectors	$[\Phi]$	
Matrix of eigenvalues	$[I]$	
Displacement of piezoceramic in X-direction	$u(x_p, y_p, t)$	m
Displacement of piezoceramic in Y-direction	$v(x_p, y_p, t)$	m

Εικόνα 34 Πίνακας συμβόλων

5.1. Διέγερση του πιεζοκεραμικού ενεργοποιητή

Ο πιεζοκεραμικός ενεργοποιητής υποβάλλεται σε μια εξωτερική διέγερση σε δύο διαστάσεις. Οι οριακές συνθήκες εκφράζονται συναρτήσει των μηχανικών τάσεων που εφαρμόζονται στον ενεργοποιητή. Αυτές οι τάσεις εκφράζονται σε σχέση με τη μηχανική σύνθετη αντίσταση της δομής του υλικού στο οποίο βρίσκεται ο ενεργοποιητής. Οι λύσεις για την εύρεση της μετατόπισης ενεργοποιητών καθορίζονται χρησιμοποιώντας τις καταστατικές εξισώσεις του κεραμικού.

Στην *Εικόνα 39*, απεικονίζεται σχηματικά το πιεζοκεραμικό μάλωμα που δένεται σε μια δομή μέσω των μηχανικών στοιχείων σύνθετης αντίστασης.

Η δύναμη που ασκείται από τον ενεργοποιητή στη δομή γράφεται σε σχέση με τη μηχανική σύνθετη αντίσταση όπως:

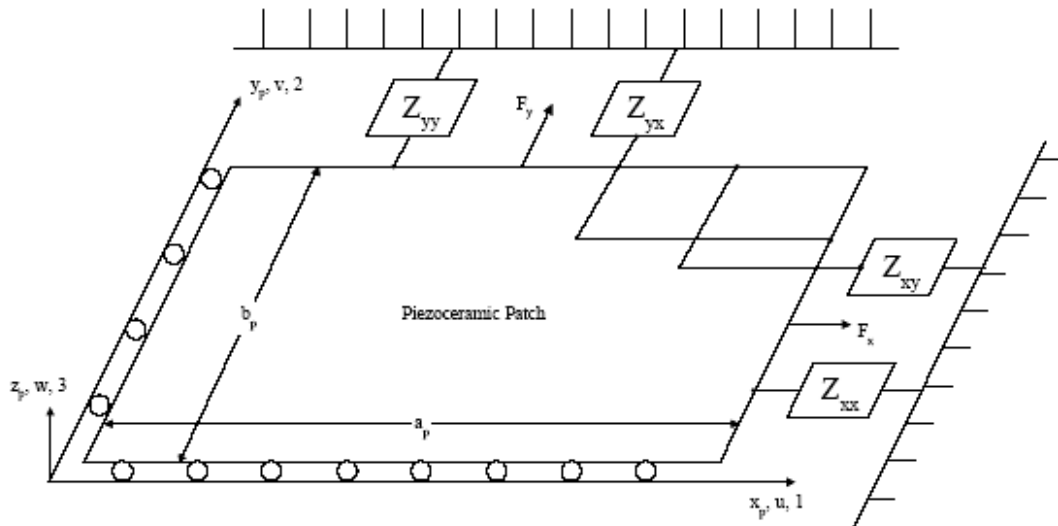
$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Η τάση που προκαλείται από αυτήν την δύναμη γράφεται ως:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x_p} \\ \sigma_{y_p} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{1}{A_x} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Η παραμόρφωση που αναπτύσσεται στον ενεργοποιητή προκύπτει από τη μηχανική δύναμη και την ηλεκτρική τάση της πιεζοηλεκτρικής επίδρασης. Αυτή η παραμόρφωση περιγράφεται από τις συστατικές εξισώσεις όπως:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{x_p} \\ \varepsilon_{y_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x_p} \\ \frac{\partial v}{\partial y_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x_p} \\ \sigma_{y_p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{bmatrix} E_3 \quad (5.3)$$



Εικόνα 35 Διαγραμματική παράσταση πιεζοκεραμικού (Littlefield Andrew George)

Εάν το πιεζοκεραμικό υλικό του ενεργοποιητή είναι και ομοιογενές και ισотροπικό, η ελαστική συμμόρφωση γράφεται έπειτα:

$$s_{ii} = \frac{1}{Y_{11}^E} \quad (5.4)$$

$$s_{ij} = -\frac{\nu_p}{Y_{11}^E} \quad i \neq j$$

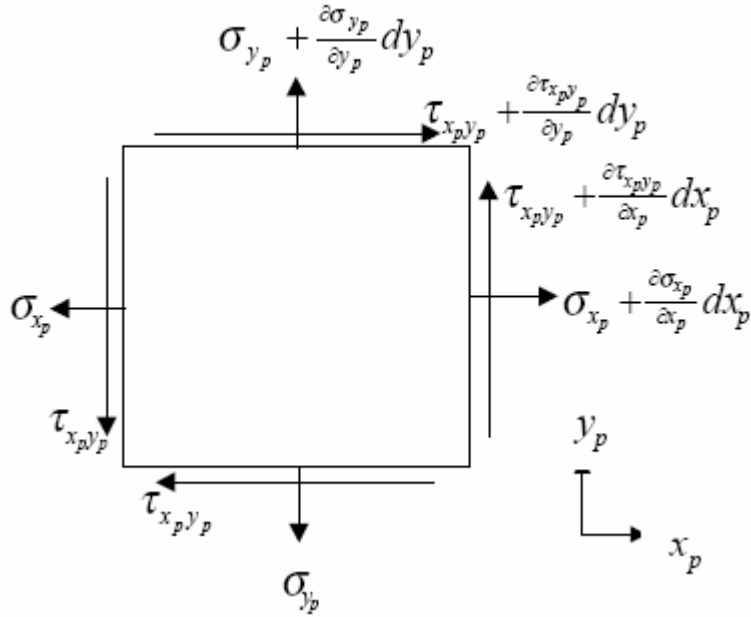
Και οι καταστατικές εξισώσεις ξαναγράφονται όπως:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x_p} \\ \frac{\partial v}{\partial y_p} \end{bmatrix} = \frac{1}{Y_{11}^E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_p \\ -\nu_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x_p} \\ \sigma_{y_p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{bmatrix} E_3 \quad (5.5)$$

Εάν από την εξίσωση (5.2) αντικατασταθεί η μηχανική τάση στην (5.5), οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να εκφραστούν σε σχέση με τη σύνθετη αντίσταση της δομής του υλικού:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x_p} \\ \frac{\partial v}{\partial y_p} \end{bmatrix} = -\frac{1}{Y_{11}^E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_p \\ -\nu_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{A_x} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{bmatrix} E_3 \quad (5.6)$$

Στην εξίσωση (5.6), η τάση στο κεραμικό γράφεται σε σχέση με την ταχύτητα του κεραμικού και το εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο. Για την εξίσωση (5.6) πρέπει να προσδιοριστούν οι χρονικά μεταβαλλόμενες μετατοπίσεις $u(x_p, y_p, t)$ και $v(x_p, y_p, t)$. Για να λάβει αυτές τις εκφράσεις, εξετάζεται ένα στοιχειώδες τμήμα της περιοχής (Εικόνα 36)



Εικόνα 36 Εφαρμογή τάσεων σε στοιχειώδες σωματίδιο (Littlefield Andrew George)

Το άθροισμα των δυνάμεων στις κατευθύνσεις x_p και y_p οδηγεί στις ακόλουθες δυναμικές εξισώσεις κίνησης:

$$\sum F_{x_p} = -\sigma_{x_p} h_p dy_p + \left(\sigma_{x_p} + \frac{\partial \sigma_{x_p}}{\partial x_p} dx_p \right) h_p dy_p - \tau_{x_p y_p} h_p dx_p + \left(\tau_{x_p y_p} + \frac{\partial \tau_{x_p y_p}}{\partial y_p} dy_p \right) h_p dx_p = \rho_p h_p dx_p dy_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5.7)$$

$$\sum F_{y_p} = -\sigma_{y_p} h_p dx_p + \left(\sigma_{y_p} + \frac{\partial \sigma_{y_p}}{\partial y_p} dy_p \right) h_p dx_p - \tau_{x_p y_p} h_p dy_p + \left(\tau_{x_p y_p} + \frac{\partial \tau_{x_p y_p}}{\partial x_p} dx_p \right) h_p dy_p = \rho_p h_p dx_p dy_p \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (5.8)$$

Αυτές οι διαφορικές εξισώσεις απλοποιούνται στην ακόλουθη μορφή (Zhou, Liang και Rogers, 1996):

$$\frac{\partial \sigma_{x_p}}{\partial x_p} + \frac{\partial \tau_{x_p y_p}}{\partial y_p} = \rho_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial \sigma_{y_p}}{\partial y_p} + \frac{\partial \tau_{x_p y_p}}{\partial x_p} = \rho_p \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (5.10)$$

Οι εκφράσεις για τις κανονικές πιέσεις σ_{x_p} και σ_{y_p} καθορίζονται από τις καταστατικές εξισώσεις που δίνονται στην (5.5):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x_p} \\ \sigma_{y_p} \end{bmatrix} = \frac{\bar{Y}_{11}^E}{(1-\nu_p)} \begin{bmatrix} 1 & \nu_p \\ \nu_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x_p} \\ \frac{\partial v}{\partial y_p} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{bmatrix} E_3 \quad (5.11)$$

Μια έκφραση για την διατμητική τάση λαμβάνεται από τον ορισμό της:

$$\tau_{x_p y_p} = \bar{G} \gamma_{x_p y_p} = \frac{\bar{Y}_{11}^E}{2(1+\nu_p)} \left(\frac{\partial u}{\partial y_p} + \frac{\partial v}{\partial x_p} \right) \quad (5.12)$$

Υποθέτουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στο κεραμικό υλικό είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στα ηλεκτρόδια του μπαλώματος. Παραγωγίζοντας τις εξισώσεις (5.11) και (5.12) και η αντικατάσταση των αποτελεσμάτων στις εξισώσεις (5.9) και (5.10) οδηγούν στις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις της κίνησης για το πιεζοκεραμικό μπάλωμα:

$$\frac{Y^E}{1-\nu_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x_p^2} + \frac{Y^E}{2(1-\nu_p)} \frac{\partial^2 v}{\partial x_p \partial y_p} + \frac{Y^E}{2(1+\nu_p)} \frac{\partial^2 u}{\partial y_p^2} = \rho_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4.13)$$

$$\frac{Y^E}{1-\nu_p^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x_p^2} + \frac{Y^E}{2(1-\nu_p)} \frac{\partial^2 u}{\partial x_p \partial y_p} + \frac{Y^E}{2(1+\nu_p)} \frac{\partial^2 v}{\partial x_p^2} = \rho_p \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (4.14)$$

Αυτό το ζεύγος εξισώσεων περιγράφει ένα κλασσικό πρόβλημα ελαστικότητας, που αποδείχθηκε από τον Love (1944) ότι για να έχει μια πλήρη αναλυτική λύση θα πρέπει η περιοχή του υλικού να οριοθετείται από ένα κύκλο.

Εντούτοις, τα ορθογωνικά ή τετραγωνικά μπαλώματα που αναλύονται εδώ καθιστούν τις λύσεις των εξισώσεων (5.13) και (5.14) πιο σύνθετες. Έχουν υπάρξει διάφορες λύσεις που δίνονται για αυτό το πρόβλημα εάν υπάρχουν ελεύθερες οριακές συνθήκες στην πλάκα (Petrz vlka, 1935 Bechmann, 1941 και Eckstein, 1944).

Οι οριακές συνθήκες στο μπάλωμα περιγράφονται σε σχέση με την σύνθετη αντίσταση της δομής των πλακών με την οποία είναι συνδεδεμένο το μπάλωμα. Αυτό καθιστά τη λύση του προβλήματος πολυπλοκότερη, δεδομένου ότι οι συνοριακές συνθήκες ποικίλουν και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποσυνδέσουν τις εξισώσεις. Αυτό που απαιτείται είναι ένας τρόπος για να αποσυνδεθούν οι εξισώσεις.

Οι Zhou, Liang και Rogers (1996) πρότειναν μια λύση σε αυτό το πρόβλημα. Αμέλησαν την επίδραση της διατμητικής τάσης και οι εξισώσεις (5.13) και (5.14) έλαβαν την παρακάτω μορφή:

$$\frac{Y^E}{1-\nu_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x_p^2} = \rho_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5.15)$$

$$\frac{Y^E}{1-\nu_p^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x_p^2} = \rho_p \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (5.16)$$

και χρησιμοποιώντας έπειτα τη μέθοδο του διαχωρισμού των μεταβλητών προσέγγισαν μια λύση για κάθε συχνότητα.

Για να εξαχθούν οι εξισώσεις (5.15) και (5.16) από τις εξισώσεις (5.13) και (5.14), έπρεπε να γίνει και μια άλλη θεώρηση. Ο Fairweather (1998) υποστήριξε ότι πρέπει επίσης να υποθεθεί ότι οι κανονικές πιέσεις επίδρασης Poisson πρέπει να είναι αμελητέες. Με την εξέταση των εξισώσεων (5.13) και (5.14) δείχνουν ότι η υπόθεση είναι πλήρης.

Η ίδια υπόθεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τις δύο εξισώσεις, οπότε αρκεί να εξεταστεί μια εξίσωση από τις δύο. Αρχίζοντας με την εξίσωση (5.9), υποθέτουμε ότι υπάρχει ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο και αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (5.11) και (5.12) στη εξίσωση (5.13), λαμβάνεται:

$$\frac{Y^E}{1-\nu_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{Y^E \nu_p}{2(1-\nu_p^2)} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{Y^E}{2(1+\nu_p)} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{Y^E}{2(1+\nu_p)} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \rho_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5.17)$$

Οι πρώτοι δύο όροι προέρχονται από την αντικατάσταση της εξίσωσης (5.11) και οι δεύτεροι δύο από την εξίσωση (5.12). Ο πρώτος όρος είναι ο όρος που διατηρείται μέσα στην εξίσωση (5.15). Ο τέταρτος όρος είναι προφανής ως έναν από τους όρους όπου από την εξίσωση (5.13) προκύπτει η εξίσωση (5.15). Αυτό που συμβαίνει στους δεύτερους και τρίτους όρους είναι ο συνδυασμός που προκύπτει από την υπόθεση.

Συνδυασμένοι κάνουν το δεύτερο όρο στη εξίσωση (5.13). Η υπόθεση απαλείφει τον τρίτο όρο. Ο δεύτερος όρος δεν παραμένει αυτούσιος στην εξίσωση και ο λόγος είναι το εύρος του. Εάν εξεταστούν οι όροι είναι προφανές ότι περιέχουν τα ίδια

διαφορικά της ίδιας μεταβλητής. Η διαφορά είναι οι συντελεστές τους. Η εξέταση αυτών των συντελεστών δείχνει ότι είναι του ίδιου μεγέθους πέρα από τη σειρά των αποδεκτών τιμών v_p . Όταν το $v_p = 1/3$ οι όροι είναι ακριβώς ίσοι στο μέγεθος. Δεδομένου ότι η συμβολή του τρίτου όρου θεωρείται αμελητέα, η συμβολή του δεύτερου όρου θεωρείται, επίσης, αμελητέα. Κατά συνέπεια κατ' αυτό τον τρόπο, η υπόθεση, ότι η μεταβολή της διατμητικής τάσης είναι αμελητέα, επιτρέπει τη μετάβαση από την εξίσωση (5.13) στην εξίσωση (5.15).

Οι λύσεις των εξισώσεων (5.15) και (5.16) βρίσκονται μέσω της μεθόδου διαχωρισμού των μεταβλητών. Η διαδικασία είναι ίδια για κάθε εξίσωση, για αυτό θα παρουσιαστεί διεξοδικά μόνο η επίλυση της (5.15). Υποθέτουμε ότι υπάρχει μια λύση του τύπου $u(x_p, t) = \phi(x_p)q(t)$. Αντικαθιστώντας αυτήν την λύση στην διαφορική εξίσωση και καθορίζοντας μια σταθερά χωρισμού, το K , παράγεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\phi''(x_p)}{\phi(x_p)} = \frac{\rho_p(1-v_p^2)}{Y^E} \frac{q''(t)}{q(t)} = K \quad (5.18)$$

Η σταθερά χωρισμού λύνεται για με τη λήψη της χρονικής περιόδου στη περιοχή της συχνότητας:

$$K = -\omega^2 \frac{\rho_p(1-v_p^2)}{Y^E} \quad (5.19)$$

Αυτό χρησιμοποιείται για να χωρίσει τη διαφορική εξίσωση στις συνήθεις ομοιογενείς διαφορικές εξισώσεις:

$$\phi''(x_p) + \frac{\omega^2 \rho_p(1-v_p^2)}{Y^E} \phi(x_p) = 0 \quad (5.20)$$

$$q''(t) + \omega^2 q(t) = 0 \quad (5.21)$$

Η εξίσωση για το $v(y_p, t)$ χωρίζεται χρησιμοποιώντας μια παρόμοια διαδικασία. Υποθέτουμε τις λύσεις της μορφής:

$$u(x_p, t) = \phi(x_p)q(t) = (A \sin(\Omega x_p) + B \cos(\Omega x_p))e^{j\omega t} \quad (5.22)$$

$$v(y_p, t) = \phi(y_p)q(t) = (C \sin(\Omega y_p) + D \cos(\Omega y_p))e^{j\omega t} \quad (5.23)$$

Η σταθερά Ω είναι η χωρική συχνότητα των ταλαντώσεων και δίνεται:

$$\Omega = \sqrt{\frac{\rho_p(1-v_p^2)}{Y^E}} \quad (5.24)$$

Οι συνοριακές συνθήκες του πιεζοκεραμικού μπαλώματος είναι:

$$u(0,t)=0 \quad v(0,t)=0 \quad (5.25)$$

που οδηγεί στο $B=D=0$

Οι συντελεστές A και C καθορίζονται με την αντικατάσταση των υποτιθέμενων λύσεων στις καταστατικές εξισώσεις που δίνονται από την εξίσωση (5.6) και αντικαθιστώντας τα $x_p = a_p$ και $y_p = b_p$:

$$\begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega \cos(\Omega a_p) + \frac{j\Omega Z_{xx} \sin(\Omega a_p)}{Y^E A_x} - \frac{j\omega v_p Z_{yx} \sin(\Omega a_p)}{Y^E A_y} & \frac{j\Omega Z_{xy} \sin(\Omega b_p)}{Y^E A_x} - \frac{j\omega Z_{yy} \sin(\Omega b_p)}{Y^E A_y} \\ \frac{j\omega Z_{yx} \sin(\Omega a_p)}{Y^E A_y} - \frac{j\omega v_p Z_{xx} \sin(\Omega a_p)}{Y^E A_x} & \Omega \cos(\Omega b_p) + \frac{j\omega Z_{yy} \sin(\Omega b_p)}{Y^E A_y} - \frac{j\omega v_p Z_{xy} \sin(\Omega b_p)}{Y^E A_x} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{bmatrix} E_3 \quad (5.26)$$

Η αντικατάσταση των λύσεων των μετατοπίσεων των εξισώσεων (5.22) και (5.23) στην εξίσωση (5.1) δίνει τη δύναμη σε σχέση με τη σύνθετη αντίσταση της δομής:

$$\begin{bmatrix} F_{a_p} \\ F_{b_p} \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \sin(\Omega a_p) & 0 \\ 0 & C \sin(\Omega b_p) \end{bmatrix} e^{j\omega t} \quad (5.27)$$

όπου οι συντελεστές A και C δίνονται από την εξίσωση (5.26). Η ροπή που ασκείται από το μπάλωμα στη δομή βρίσκεται με τη χρησιμοποίηση της γεωμετρικής σχέσης μεταξύ της δύναμης και της ροπής.

$$\begin{bmatrix} M_{a_p} \\ M_{b_p} \end{bmatrix} = -j\omega(t_p + h_p) \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \sin(\Omega a_p) & 0 \\ 0 & C \sin(\Omega b_p) \end{bmatrix} e^{j\omega t} \quad (5.28)$$

Αφού καθορίστηκαν η δύναμη και η ροπή που ασκούνται από το μπάλωμα πιεζοκεραμικού σε σχέση με τη μηχανική σύνθετη αντίσταση της δομής, πρέπει να καθοριστούν και οι μηχανικές σύνθετες αντιστάσεις.

5.2. Προσδιορισμός των σύνθετων αντιστάσεων από FEA

Καθορίζοντας τις σύνθετες αντιστάσεις, το επόμενο βήμα είναι να αναπτυχθούν και να εξαχθούν οι λειτουργίες απόκρισης συχνότητας. Για να γίνει αυτό, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια σχέση μεταξύ των βαθμών ελευθερίας ενός κόμβου και των δυνάμεων, των ροπών, των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων που συνδέονται με εκείνο τον κόμβο.

Σε ένα σύστημα που δεν παρατηρείται απόσβεση ισχύει:

$$[M]\ddot{x} + [K]x = f(t) \quad (5.29)$$

όπου το x και το $f(t)$ είναι διανύσματα που περιγράφουν τις φυσικές θέσεις και μεταβλητού χρόνου συναρτήσεις δύναμης που εφαρμόζονται σε κάθε βαθμό ελευθερίας. Θεωρείται ότι το μητρώο μάζας δεν είναι μοναδιαίο και ότι το μητρώο μάζας και το μητρώο δυσκαμψίας είναι συμμετρικά.

Λαμβάνοντας την εξίσωση στην περιοχή Laplace:

$$[M]s^2 X(s) + [K]X(s) = F(s) \quad (5.30)$$

Και ισχύει:

$$[M] = [M]^T$$

$$[K] = [K]^T$$

με μετασχηματισμό $x = [M]^{-\frac{1}{2}} z$ παίρνουμε την εξίσωση:

$$[M]^{\frac{1}{2}} s^2 Z(s) + [K][M]^{-\frac{1}{2}} Z(s) = F(s) \quad (5.31)$$

Πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση (4.32) με $[M]^{-\frac{1}{2}}$ από αριστερά:

$$\left([I]s^2 + [M]^{-\frac{1}{2}} [K][M]^{-\frac{1}{2}} \right) Z(s) = [M]^{-\frac{1}{2}} F(s) \quad (5.32)$$

Όπου το $[I]$ είναι μοναδιαίο μητρώο. Οι ιδιοτιμές μπορούν να υπολογιστούν από τις ρίζες της εξίσωσης:

$$\left([I]\lambda + [M]^{-\frac{1}{2}} [K][M]^{-\frac{1}{2}} \right) = 0 \quad (5.34)$$

Σημειώνεται επίσης ότι $\omega = \sqrt{-\lambda}$. Τα ιδιοδιανύσματα του συστήματος δίνονται από την εξίσωση:

$$\left([I]\lambda_i + [M]^{-\frac{1}{2}} [K][M]^{-\frac{1}{2}} \right) \phi_i = 0 \quad (5.35)$$

Εάν μια μήτρα από αυτά τα ιδιοδιανύσματα ορίζεται ως:

$$[\phi] = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (5.36)$$

Ο πίνακας των ιδιοτιμών θα προσδιοριστεί ως:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} -\omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\omega_2^2 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -\omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Η εξίσωση 4.35 μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$[M]^{-\frac{1}{2}}[K][M]^{-\frac{1}{2}}[\Phi] = -[\Phi][\Lambda] \quad (5.38)$$

Θεωρώντας ότι ισχύει $[\Phi]^{-1} = [\Phi]^T$, πολλαπλασιάζουμε την εξίσωση με $[\Phi]^T$ από αριστερά και στην παραπάνω εξίσωση έχουμε τα αποτελέσματα:

$$[\Phi]^T[M]^{-\frac{1}{2}}[K][M]^{-\frac{1}{2}}[\Phi] = -[\Lambda] \quad (5.39)$$

Εάν γίνει μετασχηματισμός συντεταγμένων με $z = [\Phi]q$, τότε η εξίσωση (5.33) μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως:

$$Q(s)s^2 + [\Phi]^T[M]^{-\frac{1}{2}}[K][M]^{-\frac{1}{2}}[\Phi]Q(s) = [\Phi]^T[M]^{-\frac{1}{2}}F(s) \quad (5.40)$$

Και αντικαθιστώντας τα αποτελέσματα της εξίσωσης (5.39):

$$Q(s)s^2 - [\Lambda]Q(s) = [\Phi]^T[M]^{-\frac{1}{2}}F(s) \quad (5.41)$$

Και λαμβάνοντας ένα κανονικοποιημένο ιδιοδιάνυσμα μάζας ως:

$$[\Phi]_n = [M]^{-\frac{1}{2}}[\Phi] \quad (5.42)$$

Και αφού ισχύει $(AB)^T = B^T A^T$ και $M = M^T$ τότε:

$$[\Phi]_n^T = [\Phi]^T[M]^{-\frac{1}{2}} \quad (5.43)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5.41):

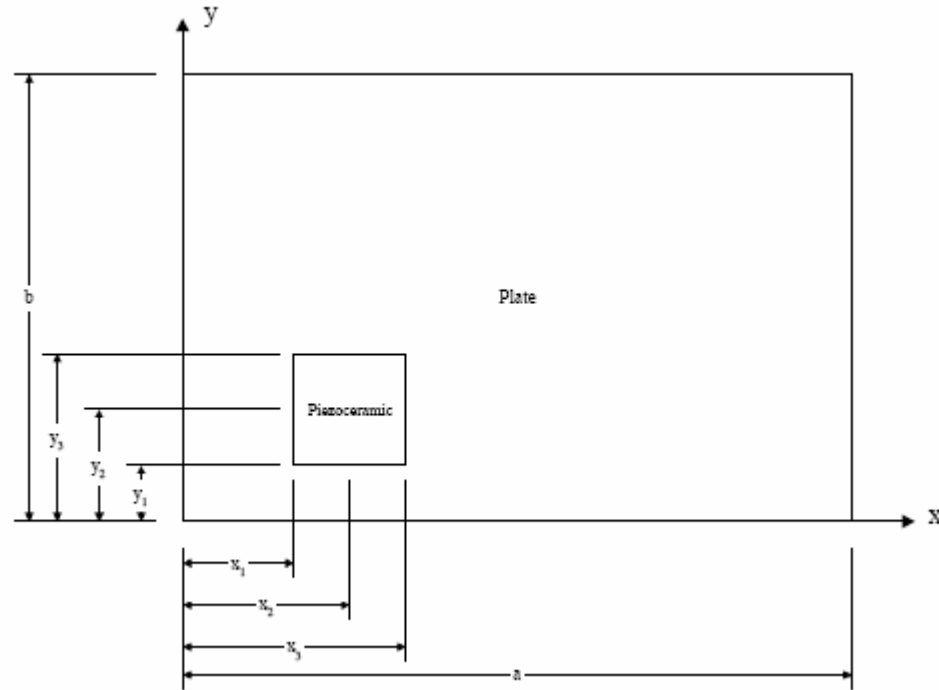
$$Q(s)s^2 - [\Lambda]Q(s) = [\Phi]_n^T F(s) \quad (5.44)$$

Και από την εξίσωση (5.44):

$$Q(s)([I]s^2 - [\Lambda])^{-1}[\Phi]_n^T F(s) \quad (5.45)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση μετασχηματισμού $X(s) = [M]^{-\frac{1}{2}} [\Phi] Q(s) = [\Phi]_n Q(s)$, μετασχηματίζουμε την εξίσωση (5.45) στο αρχικό σύστημα συντεταγμένων:

$$X(s) = [\Phi]_n ([I]s^2 - [\Lambda])^{-1} [\Phi]_n^T F(s) \quad (5.46)$$



Εικόνα 37 Πιεζοκεραμικό σε πλάκα (Littlefield Andrew George)

Αυτή είναι η εξίσωση που συσχετίζει το διάνυσμα μετατοπίσεων στις φυσικές συντεταγμένες με την εφαρμοζόμενη δύναμη στις φυσικές συντεταγμένες. Για μια συγκεκριμένη φυσική συντεταγμένη μετατόπισης $X_i(s)$ και δύναμης $F_k(s)$

$$\frac{X_j(s)}{F_k(s)} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{[\Phi(j,i)]_{n_x} [\Phi(k,i)]_{n_f}}{s^2 + \omega_i^2} \quad (5.47)$$

Διαφορίζοντας την εξίσωση (5.47) προκύπτει η μηχανική σύνθετη αγωγιμότητα το αντίστροφο της μηχανικής σύνθετης αντίστασης, της δομής:

$$\frac{V_j(s)}{F_k(s)} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{[\Phi(j,i)]_{n_x} [\Phi(k,i)]_{n_f} s}{s^2 + \omega_i^2} \quad (5.48)$$

Η εξίσωση για τη μηχανική σύνθετη αγωγιμότητα ισχύει γενικά, χωρίς καμία απαίτηση για τον τύπο της δομής. Για τις διάφορες δομές εφαρμόζουμε διαφορετικές συνοριακές συνθήκες, ανάλογα με τη φύση της δομής. Έτσι και η σύνθετη αντίσταση για μια πλάκα λαμβάνεται από την εξίσωση (5.48).

Στην *Εικόνα 41* παρουσιάζεται ένα πιεζοκεραμικό μπάλωμα που συνδέεται με μια δομή πλακών. Εισάγοντας τα ιδιοδιανύσματα που συνδέονται με την περιστροφή λόγω της εφαρμοζόμενης δύναμης και την παραγωγή ταχύτητας στην εξίσωση (4.48), λαμβάνουμε τη συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής και της εφαρμοσμένης ροπής. Παραδείγματος χάριν, εάν τα ιδιοδιανύσματα που σχετίζονται με την περιστροφή γύρω από τον y άξονα (x_1, y_2) , αντικατασταθούν και στην είσοδο και στην έξοδο, λαμβάνεται μια σύνθετη αγωγιμότητα για τον y-άξονα της δομής στο κέντρο της αριστερής άκρης του μπαλώματος.

$$\frac{s\theta_{(x_1, y_2)}(s)}{m_{(x_1, y_2)}(s)} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{|\Phi(R2_{(x_1, y_2)}, i)|_{n_x} |\Phi(R2_{(x_1, y_2)}, i)|_{n_F} s}{s^2 + \omega_i^2} \quad (5.49)$$

Χρησιμοποιώντας την αρχή της υπέρθεσης, λαμβάνονται η εξίσωση μεταφοράς της σύνθετης αγωγιμότητας μεταξύ της διαφορικής ταχύτητας περιστροφής για τον y-άξονα στα σημεία (x_1, y_2) και (x_3, y_2) , και οι ροπές στα ίδια σημεία :

$$\frac{s[\theta_{(x_1, y_2)}(s) - \theta_{(x_3, y_2)}(s)]}{m_{(x_1, y_2)}(s) - m_{(x_3, y_2)}} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{|\Phi(R2_{(x_1, y_2)}, i) - \Phi(R2_{(x_3, y_2)}, i)|_{n_x} |\Phi(R2_{(x_1, y_2)}, i) - \Phi(R2_{(x_3, y_2)}, i)|_{n_F} s}{s^2 + \omega_i^2} = H_{xx} \quad (5.50)$$

Η εξίσωση μεταφοράς της σύνθετης αγωγιμότητας μεταξύ της διαφορικής ταχύτητας περιστροφής στα σημεία (x_1, y_2) και (x_3, y_2) και η αντιτιθέμενη ροπή στα σημεία (x_2, y_1) και (x_2, y_3) ως:

$$\frac{s[\theta_{(x_1, y_2)}(s) - \theta_{(x_3, y_2)}(s)]}{m_{(x_2, y_2)}(s) - m_{(x_2, y_3)}} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{|\Phi(R2_{(x_1, y_2)}, i) - \Phi(R2_{(x_3, y_2)}, i)|_{n_x} |\Phi(R2_{(x_2, y_1)}, i) - \Phi(R2_{(x_2, y_3)}, i)|_{n_F} s}{s^2 + \omega_i^2} = H_{xy} \quad (5.51)$$

Η διαφορική γωνιακή ταχύτητα μεταξύ των σημείων (x_1, y_2) και (x_3, y_2) μπορεί έπειτα να γραφτεί σε σχέση με τις μηχανικές σύνθετες αγωγιμότητες όπως:

$$s|\theta_{(x_1, y_2)}(s) - \theta_{(x_3, y_2)}(s)| = H_{xx}|m_{(x_1, y_2)}(s) - m_{(x_3, y_2)}(s)| + H_{xy}|m_{(x_2, y_1)}(s) - m_{(x_2, y_3)}(s)| \quad (5.52)$$

Με τις παρακάτω διευκρινήσεις:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_x(s) &= \theta_{(x_1, y_2)}(s) - \theta_{(x_3, y_2)}(s) \\ \Delta\theta_y(s) &= \theta_{(x_2, y_1)}(s) - \theta_{(x_2, y_3)}(s) \\ \Delta m_y(s) &= m_{(x_1, y_{21})}(s) - m_{(x_3, y_2)}(s) \\ \Delta m_x(s) &= m_{(x_2, y_1)}(s) - m_{(x_2, y_3)}(s) \end{aligned} \quad (5.53)$$

κατόπιν η εξίσωση μητρών που συνδέει τις διαφορικές περιστροφικές ταχύτητες με τη μηχανική σύνθετη αγωγιμότητα και τις εφαρμοσμένες αντιτιθέμενες ροπές γράφονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} s\Delta\theta_x(s) \\ s\Delta\theta_y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_x(s) \\ \Delta m_y(s) \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

Πολλαπλασιάζοντας, από αριστερά, την προηγούμενη έκφραση με το αντίστροφο της μηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας-εμπέδηση, η μήτρα παράγει την ακόλουθη σχέση μεταξύ της γωνιακής ταχύτητας και της εφαρμοσμένης ροπής:

$$\begin{bmatrix} \Delta m_x(s) \\ \Delta m_y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s\Delta\theta_x(s) \\ s\Delta\theta_y(s) \end{bmatrix} \quad (5.55)$$

Η δύναμη που εφαρμόζεται στη δομή γράφεται σε σχέση με τη ροπή που ασκείται από το πιεζοκεραμικό ως $\Delta m_k(s) = -\Delta F_k(s)(t_p + h_a)$ και η περιστροφική ταχύτητα της πλάκας γράφεται σε σχέση με τη γραμμική ταχύτητα του πιεζοκεραμικού

μπαλώματος ως $s\Delta\theta_x(s) = s \frac{2}{(t_p + h_p)} \Delta u(s)$. Η εξίσωση (5.55) ξαναγράφεται ως:

$$\begin{bmatrix} \Delta F_{x_p}(s) \\ \Delta F_{y_p}(s) \end{bmatrix} = \frac{2}{(t_p + h_a)^2} \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s\Delta u(s) \\ s\Delta v(s) \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

Το πρότυπο μπαλωμάτων υπέθεσε μια γραμμική μετατόπιση, και συνεπώς ταχύτητα, στην x-διεύθυνση κατά μήκος της ευθείας $x_p = 0$ και στην y-διεύθυνση σύμφωνα με την ευθεία $y_p = 0$. Επιπλέον, η εξίσωση (5.27) δείχνει ότι η δύναμη F_x , είναι μηδέν όταν αξιολογείται σύμφωνα με τη γραμμή $x_p = 0$ και η δύναμη, F_y είναι μηδέν όταν αξιολογείται σύμφωνα με τη γραμμή $y_p = 0$. Από τις παρατηρήσεις αυτές, η παραπάνω εξίσωση λαμβάνει την απλοποιημένη μορφή:

$$\begin{bmatrix} F_{x=x_p}(s) \\ \Delta F_{y=y_p}(s) \end{bmatrix} = \frac{2}{(t_p + h_a)^2} \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} su_{x=x_p}(s) \\ sv_{y=y_p}(s) \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

η όποια αναγνωρίζεται ως περιοχή συχνότητας ισοδύναμη της εξίσωσης (5.1) όπου:

$$\begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \frac{2}{(t_p + h_a)^2} \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} \\ Q_{yx} & Q_{yy} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5.58)$$

Στην εξίσωση (5.58) το Q_{kl} συσχετίζεται με το H_{kl} με τη σχέση $Q_{kl} = \frac{(t_p + h_a)^2}{2} H_{kl}$. Χρησιμοποιώντας την σχέση αυτή, οι ροπές που ασκούνται από το πιεζοκεραμικό μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση (5.28) βασισμένες στις σύνθετες αντιστάσεις που καθορίζονται από τις ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του FEA.

5.3. Προσδιορισμός της απόκρισης της δομής

Όταν σύνθετες αντιστάσεις της δομής, είναι συναρτημένες με τις ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του s , πρέπει να αναπτύξουμε μια εξίσωση που θα μας δώσει τη μετατόπιση στην κατεύθυνση z . Η κύρια διαφορική εξίσωση για αυτόν τον τύπο κίνησης δίνεται από Soedel (1981) ως εξής:

$$D \left(\frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^4} \right) + \rho h \ddot{w}(x, y, t) = -Q(x, y, t) \quad (5.59)$$

Όπου το D αντιπροσωπεύει την ακαμψία της πλάκας (πιάτου), το x είναι το πάχος του πλάκας, το ρ είναι η πυκνότητα του υλικού της πλάκας, το $w(x, y, t)$ είναι η εγκάρσια μετατόπιση της πλάκας, και το $Q(x, y, t)$ είναι η διανεμημένη συνάρτηση φόρτισης. Για να λυθεί η εξίσωση (5.59), εξετάζεται η ομοιογενής μορφή της διαφορικής εξίσωσης και χρησιμοποιείται μια προσέγγιση διαχωρισμού των μεταβλητών έτσι ώστε η απόκριση $w(x, y, t)$, να γραφτεί με την παρακάτω μορφή:

$$w(x, y, t) = q(t)\phi(x, y) \quad (5.60)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω θεώρηση στην ομοιογενή μορφή της εξίσωσης (4.59) προκύπτει:

$$\frac{D \left(\frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^4} \right)}{\phi(x, y)} = -\frac{\rho h \ddot{q}(t)}{q(t)} = k \quad (5.61)$$

Όπου ο σταθερός συντελεστής διαχωρισμού k είναι:

$$k = \rho h \omega_n^2$$

Αυτό μας δίνει τον ακόλουθο διαχωρισμό στις δύο ακόλουθες χρονικές και χωρικές περιοχές:

$$D \left(\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^4} \right) - \rho h \omega_n^2 \phi(x, y) = 0 \quad (5.63)$$

$$\rho h \ddot{q}(t) + \rho h \omega_n^2 q(t) = 0 \quad (5.64)$$

Οι συνοριακές συνθήκες ικανοποιούνται από ιδιοσυναρτήσεις της μορφής $\phi_{mn}(x, y)$, καθορίζονται από την ανάλυση ιδιομορφών FEA. Αυτό είναι κύριο όφελος της προσέγγισης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε συνοριακή συνθήκη που μπορεί να διατυπωθεί από FEA.

Η συνάρτηση της δύναμης δίνεται από τη συνάρτηση:

$$Q(x, y, t) = Q_s(x, y) Q_t e^{j\omega t} \quad (5.65)$$

Κατόπιν για κάθε μια από τις χωρικές ιδιομορφές υπάρχει μια χρονική λύση της μορφής:

$$q_{mn}(t) = A_{mn} e^{j\omega t + \phi_{mn}} \quad (5.66)$$

Η πλήρης απόκριση δόνησης της πλάκας από την εξίσωση (5.60) ξαναγράφεται ως:

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn}(t) \phi_{mn}(x, y) \quad (5.67)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω στην εξίσωση (5.59):

$$D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn}(t) \left(\frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^4} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \rho h \phi_{mn}(x, y) q_{mn}(t) = -Q_s(x, y) Q_t e^{j\omega t} \quad (5.68)$$

Για την επίλυση σύμφωνα με τον Norton (1989):

1. Γίνεται πολλαπλασιασμός μέσω της εξίσωσης με μια ορθογώνια συνάρτηση βάσης
2. Γίνεται αντικατάσταση των κατάλληλων αποτελεσμάτων από τον προηγούμενο χωρισμό των μεταβλητών
3. Γίνεται η ενσωμάτωση εκτός από το μήκος και του πλάτος του πιάτου.
4. Χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες ορθογωνικότητας για να αποβληθούν οι όροι

Έτσι παράγεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$q_{mn}(t) + \omega_{mn}^2 q_{mn}(t) = - \frac{Q_t e^{j\omega t}}{\rho h \int_0^a \int_0^b \phi_{mn}^2(x, y) dx dy} \int_0^a \int_0^b \phi_{mn}(x, y) Q_s(x, y) dx dy \quad (5.69)$$

Καθορίζεται το ολοκλήρωμα ιδιομορφικής δύναμης:

$$F_{mn} = -\frac{1}{\rho h \int_0^a \int_0^b \phi_{mn}^2(x, y) dx dy} \int_0^a \int_0^b \phi_{mn}(x, y) Q_s(x, y) dx dy \quad (5.70)$$

Κατόπιν η εξίσωση (5.69) μπορεί να ξαναγραφεί όπως παρακάτω:

$$\ddot{q}_{mn}(t) + \omega_{mn}^2 q(t) = F_{mn} Q_t e^{j\omega t} \quad (5.71)$$

Κάθε ιδιομορφική εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$q_{mn}(t)(\omega_{mn}^2 - \omega^2) = F_{mn} Q_t e^{j\omega t} \quad (5.72)$$

Λύνοντας την εξίσωση (5.66) ως προς τον άγνωστο A_{mn} :

$$A_{mn} = \frac{F_{mn} Q_t}{(\omega_{mn}^2 - \omega^2) e^{j\omega t}} \quad (5.73)$$

Η αντικατάσταση αυτού του αποτελέσματος στην εξίσωση (5.67) δίνει την απόκριση δόνησης όπως:

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_{mn} \phi_{mn}(x, y)}{(\omega_{mn}^2 - \omega^2)} Q_t e^{j\omega t} \quad (5.74)$$

Εάν το χρονικό εύρος, Q_t , είναι γνωστό, η μόνη απροσδιόριστη ποσότητα είναι η F_{mn} , δεδομένου ότι τα ιδιοδιανύσματα προέρχονται από την ανάλυση FEA. Ο παράγοντας που πολλαπλασιάζει το ολοκλήρωμα στην εξίσωση (5.70) είναι από την κανονικοποίηση της μάζας. Ο παράγοντας $\phi_{mn}(x, y)$ επιλέγεται να είναι το ιδιοδιάνυσμα ομαλοποιημένης μάζας.

$$Q_s(x, y) = \left(\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} \right)$$

Η κατανομή φορτίων δίνεται από την εξίσωση, όπου οι συναρτήσεις ροπής δίνονται από τις παρακάτω εκφράσεις:

$$M_x = \bar{M}_x (\delta'(x - x_1) - \delta'(x - x_3)) (h(y - y_1) - h(y - y_3)) \quad (5.75)$$

$$M_y = \bar{M}_y (\delta'(y - y_1) - \delta'(y - y_3)) (h(x - x_1) - h(x - x_3)) \quad (5.76)$$

Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (5.70) ξαναγράφεται με αυτές τις αντικαταστάσεις και έχουν την μορφή:

$$\begin{aligned}
F_{mn} = & - \int_0^b \int_0^a \phi_{mn}(x, y) \left[\bar{M}_x (\delta'(x - x_1) - \delta'(x - x_3)) (h(y - y_1) - h(y - y_3)) \right] dx dy - \\
& \int_0^a \int_0^b \phi_{mn}(x, y) \left[\bar{M}_y (\delta'(y - y_1) - \delta'(y - y_3)) (h(x - x_1) - h(x - x_3)) \right] dy dx
\end{aligned}
\quad (5.77)$$

Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της συνάρτησης Dirac, υποθέτοντας ότι ο ενεργοποιητής είναι μέσα στα όρια της δομής, $0 \leq x_1 \leq x_3 \leq a$ και $0 \leq y_1 \leq y_3 \leq b$, και ότι η ροπή παραμένει σταθερή κατά μήκος του ενεργοποιητή, η εξίσωση (5.77), μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned}
F_{mn} = & - \bar{M}_x \int_{y_1}^{y_3} \left(- \frac{\partial \phi_{mn}(x, y)_n}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + \frac{\partial \phi_{mn}(x, y)_n}{\partial x} \Big|_{x=x_3} \right) dy \\
& - \bar{M}_y \int_{x_1}^{x_3} \left(- \frac{\partial \phi_{mn}(x, y)_n}{\partial y} \Big|_{y=y_1} + \frac{\partial \phi_{mn}(x, y)_n}{\partial y} \Big|_{y=y_3} \right) dx
\end{aligned}
\quad (5.78)$$

Για να εκτελέσει αυτήν την ολοκλήρωση είναι απαραίτητο να υπάρξει μια σχέση για τα χωρικά παράγωγα ιδιοδιανυσμάτων στις περιοχές ενδιαφέροντος.

Κάτω από τη υπόθεση Kirchhoff, τα περιστροφικά ιδιοδιανύσματα R1 και R2 (MacNeal, 1994) δίνονται από τις σχέσεις:

$$R1 = - \frac{\partial \phi(x, y)_n}{\partial y} \quad (5.79)$$

$$R2 = - \frac{\partial \phi(x, y)_n}{\partial x} \quad (5.80)$$

Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων MSC/Nastran εκθέτει ότι στα ιδιαίτερα σημεία (κόμβοι) κατά μήκος του ενεργοποιητή, θα ήταν κατάλληλο ένα πολυώνυμο έκτου βαθμού έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η ολοκλήρωση. Εναλλακτικά η ολοκλήρωση θα μπορούσε να έχει πραγματοποιηθεί αριθμητικά στις τιμές στους κόμβους.

Το πολυώνυμο ολοκληρώνεται για να λάβει τη μεμονωμένη ιδιομορφική προβολή δύναμης σε σχέση με τους όρους \bar{M}_x και \bar{M}_y :

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(E_{x_n} \bar{M}_x + E_{y_n} \bar{M}_y \right) \phi_{mn}(x, y)_n}{(\omega_{mn}^2 - \omega^2)} e^{j\omega t} \quad (5.81)$$

όπου E_{x_n} και E_{y_n} είναι τα αποτελέσματα της χωρικής ολοκλήρωσης των περιστροφών για τον x-άξονα και τον y-άξονα αντίστοιχα.

5.4. Κεντρικά σημεία και συναρτήσεις μορφής

Το Msc/Nastran εκθέτει τα ιδιοδιανύσματα στους κόμβους. Αυτά αποτελούν διακριτά σημεία κατά μήκος των πλευρών του ενεργοποιητή. Τα ιδιοδιανύσματα που χρησιμοποιούνται στην παράγραφο 5.2 αναφέρονται στα κεντρικά σημεία των πλευρών μπαλωμάτων. Παρακάτω θα παρουσιαστεί στο τι συμβαίνει στα εσωτερικά σημεία των πλευρών.

Για να απαντηθούν τα ερωτήματα αυτά, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις μορφής για τα μη κεντρικά σημεία των πλευρών. Σε αυτήν την περίπτωση είναι κατάλληλο ένα πολυώνυμο έκτου βαθμού για τα ιδιοδιανύσματα στους κόμβους κατά μήκος των πλευρών μπαλωμάτων. Για τις συναρτήσεις μορφής χρησιμοποιείται το ίδιο πολυώνυμο που χρησιμοποιήθηκε και για τα ακραία σημεία των πλευρών του πιεζοηλεκτρικού.

Σε παρακάτω ενότητα θα γίνουν συγκρίσεις μεταξύ της χρησιμοποίησης ιδιοδιανυσμάτων μόνο στα κεντρικά σημεία και της χρησιμοποίησης των συναρτήσεων μορφής που θα αντιπροσωπεύουν ιδιοδιανύσματα κατά μήκος της πλευράς μπαλωμάτων. Θα αποδειχθεί ότι με τις συναρτήσεις μορφής πετυχαίνονται καλύτερα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΝΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ-ΕΜΠΕΔΗΣΗ

Στην εργασία αυτή θα μετρηθεί η σύνθετη αντίσταση ενός πιεζοκεραμικού στοιχείου και θα εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τις ιδιότητες του υπό μέτρηση υλικού. Παρακάτω θα παρουσιαστεί η θεωρία που σχετίζεται με την εμπέδηση και τους τρόπους που μπορεί να επιτευχθεί η μέτρησή της.

6.1 Σύνθετη αντίσταση-εμπέδηση

Η σύνθετη αντίσταση είναι η βασική ηλεκτρική παράμετρος, που χρησιμοποιείται να χαρακτηρίσει ηλεκτρικά κυκλώματα και υλικά. Σαν όρος, προσδιορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής τάσης που εφαρμόζεται σε μια συσκευή ή κύκλωμα προς το ρεύμα που το διαρρέει. Είναι, δηλαδή, η συνολική αντίσταση που έχει ένα κύκλωμα στη ροή ενός εναλλασσόμενου ρεύματος σε συγκεκριμένη συχνότητα και γενικά αντιπροσωπεύεται με μια πολύπλοκη ποσότητα, που μπορεί να παρουσιαστεί γραφικά. Τα βασικά στοιχεία, από τα οποία μπορεί να αποτελείται η ηλεκτρική εμπέδηση είναι η αγωγιμότητα L , χωρητικότητα C και από την αντίσταση R .

Στην πραγματικότητα τα ηλεκτρικά μέρη και οι συσκευές δεν είναι απλά επαγωγικές, χωρητικές ή αντιστάσεις, αλλά ένας συνδυασμός και των τριών. Μέσω αυτών των παραμέτρων, μπορούν να υπολογιστούν κάποιες άλλες ιδιότητες των υλικών όπως Z , Y , X , G , B , D κλπ.

6.1.1 Διευκρινήσεις-ορισμοί

Η μαθηματική έκφραση της αντίστασης για ένα συνεχές ρεύμα ορίζεται ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης τάσης προς το ρεύμα. Από τον νόμο του Ohm. Η εναλλασσόμενη τάση, είναι η τάση που εναλλάσσει την πολικότητα. Όταν μια εναλλασσόμενη τάση εφαρμοστεί σε ένα κύκλωμα που περιέχει μόνο αντιστάσεις, η ωμική αντίσταση προσδιορίζεται από το νόμο του Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (6.1.1)$$

Η τυχόν ύπαρξη επαγωγιμότητας ή χωρητικότητας μεταβάλλει τις ιδιότητες της ροής του ρεύματος. Η ύπαρξη της επαγωγιμότητας ή της χωρητικότητας προκαλεί μια διαφορά φάσης στο ρεύμα. Παρόλα αυτά ο νόμος του Ohm ισχύει και στην περίπτωση αυτή αντικαθιστώντας το μέγεθος της εμπέδησης Z αντί της ωμικής αντίστασης R . Έτσι ο νόμος του Ohm, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (6.1.2)$$

Όπου Z είναι ένα σύνθετο μέγεθος, ένας μιγαδικός αριθμός, ο οποίος αποτελείται από ένα πραγματικό μέγεθος R και ένα φανταστικό jX .

Στην περίπτωση αυτή υπάρχει και διαφορά φάσης του ρεύματος με την τάση. Η διαφορά φάσης μπορεί να παρουσιαστεί σε ένα διανυσματικό διάγραμμα, στο οποίο παρουσιάζεται η εμπέδηση Z , το πραγματικό μέρος της εμπέδησης R_s , το φανταστικό μέρος jX_s και η γωνία φάσης θ . Το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της εμπέδησης, μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκονται σε σειρά. Το αντίστροφο της σύνθετης αντίστασης-εμπέδησης είναι η σύνθετη αγωγιμότητα Y , το οποίο μέγεθος είναι ένας σύνθετος αριθμός με πραγματικό μέρος G_p (conductance) και φανταστικό μέγεθος jB_p (susceptance) με διαφορά φάσης ϕ . Για τη διαφορά φάσης ϕ ισχύει $\phi = -\theta$. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα για την admittance θα είναι το B_p και το G_p παράλληλα. Επίσης είναι κατανοητό ότι:

$$G_p \neq \frac{1}{R_s} \quad (6.1.3)$$

Και

$$B_p \neq -\frac{1}{X_s} \quad (6.1.4)$$

Για εναλλασσόμενο ρεύμα ισχύει:

$$Z = \frac{V}{I} = R + jX \quad (6.1.5)$$

Σχέσεις και μεγέθη:

1. Z : εμπέδηση-σύνθετη αντίσταση

Μονάδα μέτρησης: ohm, Ω

$$Z = R_s + jX_s = \frac{1}{Y} = |Z|e^{j\theta} \quad (6.1.6)$$

2. $|Z|$: μέτρο της εμπέδησης

Μονάδα μέτρησης: ohm, Ω

$$|Z| = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \frac{1}{|Y|} \quad (6.1.7)$$

3. R_s : αντίσταση-Πραγματικό μέρος του Z

Μονάδα μέτρησης: ohm, Ω

$$R_s = \frac{G_p}{G_p^2 + B_p^2} = \frac{R_p}{1 + Q^2} \quad (6.1.8)$$

4. X_s : Reactance-Φανταστικό μέρος του Z

Μονάδα μέτρησης: ohm, Ω

$$X_s = -\frac{B_p}{G_p^2 + B_p^2} \quad (6.1.9)$$

5. Y : Σύνθετη αγωγιμότητα

Μονάδα μέτρησης: siemens, S

$$Y = G_p + jB_p = \frac{1}{Z} = |Y|e^{j\phi} \quad (6.1.10)$$

5. $|Y|$: Μέτρο σύνθετης αγωγιμότητας

Μονάδα μέτρησης: siemens, S

$$|Y| = \sqrt{G_p^2 + B_p^2} = \frac{1}{|Z|} \quad (6.1.11)$$

6. G_p : Πραγματικό μέρος του Y

Μονάδα μέτρησης: siemens, S

$$G_p = \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (6.1.12)$$

7. B_p : Susceptance

Μονάδα μέτρησης: siemens, S

$$B_p = -\frac{X_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (6.1.13)$$

8. C_s : Χωρητικότητα σειράς

Μονάδα μέτρησης: farad, F

$$C_s = -\frac{1}{\omega X_s} = C_p (1 + D^2) \quad (6.1.14)$$

8. C_p : Χωρητικότητα παράλληλης

Μονάδα μέτρησης: farad, F

$$C_p = \frac{B}{\omega} = \frac{C_s}{1 + D^2} \quad (6.1.15)$$

9. L_s : Επαγωγικότητα σειράς

Μονάδα μέτρησης: henry, H

$$L_s = \frac{X}{\omega} = L_p \frac{Q^2}{1 + Q^2} \quad (6.1.16)$$

10. L_p : Επαγωγικότητα παράλληλης

Μονάδα μέτρησης: henry, H

$$L_p = -\frac{1}{\omega B_p} = L_s (1 + \frac{1}{Q^2}) \quad (6.1.17)$$

11. R_p : Παράλληλη αντίσταση

Μονάδα μέτρησης: Ohm, Ω

$$R_p = \frac{1}{G_p} = R_s (1 + Q^2) \quad (6.1.18)$$

12. Q : Συντελεστής ποιότητας

Μονάδα μέτρησης:

$$Q = -\frac{1}{D} = \frac{X_s}{R_s} = \frac{G_p}{B_p} = \tan \theta \quad (6.1.19)$$

13. D : Συντελεστής dissipation

Μονάδα μέτρησης:

$$D = -\frac{1}{Q} = \frac{R_s}{X_s} = \frac{B_p}{G_p} = \tan(90^\circ - \theta) = \tan \delta \quad (6.1.20)$$

14. θ : γωνία φάσης Z

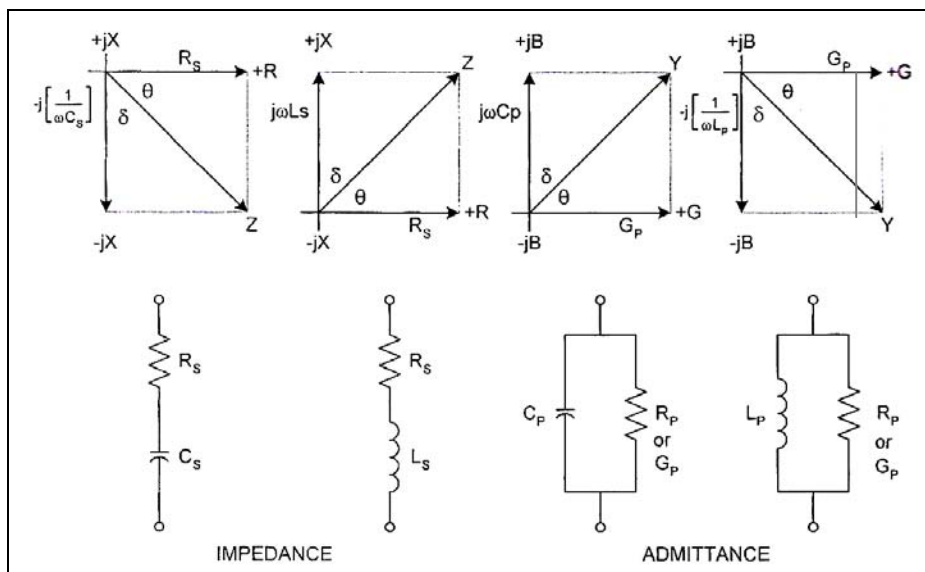
Μονάδα μέτρησης: μοίρες

$$\theta = -\phi \quad (6.1.21)$$

15. ϕ : γωνία φάσης Y

Μονάδα μέτρησης: μοίρες

$$\phi = -\theta \quad (6.1.22)$$



Εικόνα 38 Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας (LCR Measurement Primer-Quadtech)

Σε σειρά και παράλληλα

Σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη συχνότητα η κάθε εμπέδηση μπορεί να αναπαρίσταται με ένα συνδυασμό ιδανικής αντίστασης και ενός στοιχείου που θα είναι ιδανικά επαγωγικό ή χωρητικό. Ο συνδυασμός των δύο θα είναι είτε σε σειρά ή σε παράλληλη σύνδεση.

Η σύνθετη αντίσταση δύο συσκευών, που βρίσκονται σε σειρά θα είναι το άθροισμα των εμπεδήσεων ή θα μπορεί να προσομοιωθεί με μια σύνθετη αντίσταση, που θα αποτελείται με μια ιδανική αντίσταση ίση με το άθροισμα των επί μέρους αντιστάσεων των συσκευών και ένα ιδανικό στοιχείο με επαγωγικό ή χωρητικό στοιχείο που θα αποτελείται από το άθροισμα των επί μέρους επαγωγικών ή χωρητικών αντιστάσεων, αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας τον δείκτη s για τη σύνδεση σε σειρά :

$$1. \quad Z = R_s + jX_s = R_s + j\omega L = R_s - \frac{j}{\omega C} \quad (6.1.23)$$

Είναι προφανές, ότι με τη μεταβολή της συχνότητας θα μεταβάλλεται και η τιμή της σύνθετης αντίστασης.

Η σύνθετη αγωγιμότητα Y , είναι το αντίστροφο της εμπίδησης Z και εκφράζεται με την εξίσωση:

$$2. \quad Y = \frac{1}{Z} \quad (6.1.24)$$

Στην πραγματικότητα εκφράζει ένα μιγαδικό αριθμό με πραγματικό μέγεθος το conductance G και ένα φανταστικό μέγεθος, το susceptance B . Το μέγεθος Y μπορεί να παρασταθεί με μια παράλληλη σύνδεση με ένα ιδανικό G και ένα ιδανικό B όπου θα έχουν χαρακτήρα είτε επαγωγικό, είτε χωρητικό. Χρησιμοποιώντας τον δείκτη p για παράλληλη σύνδεση:

$$3. \quad Y = G_p + jB_p = G_p + j\omega C_p = G_p - \frac{j}{\omega L} \quad (6.1.25)$$

Παρατηρείται ότι η επαγωγική B είναι αρνητική. Επίσης ότι σε γενική ισχύ παρατηρείται ότι:

$$G_p \neq \frac{1}{R_s} \quad (6.1.26)$$

Και

$$B_p \neq \frac{1}{X_s} \quad (6.1.27)$$

Αφού παρατηρείται:

$$4. \quad Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_s + jX_s} = \left[\frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} - \left(j \frac{X_s}{R_s^2 + X_s^2} \right) \right] = G_p + jB_p \quad (6.1.28)$$

Παρατηρείται επίσης ότι:

$$G_p = \frac{1}{R_s} \text{ εάν } X_s = 0 \text{ και } (6.1.29)$$

$$B_p = \frac{1}{X_s} \text{ εάν } R_s = 0 (6.1.30)$$

Δηλαδή όταν μόνο η σύνθετη αντίσταση είναι μόνο επαγωγική ή χωρητική.

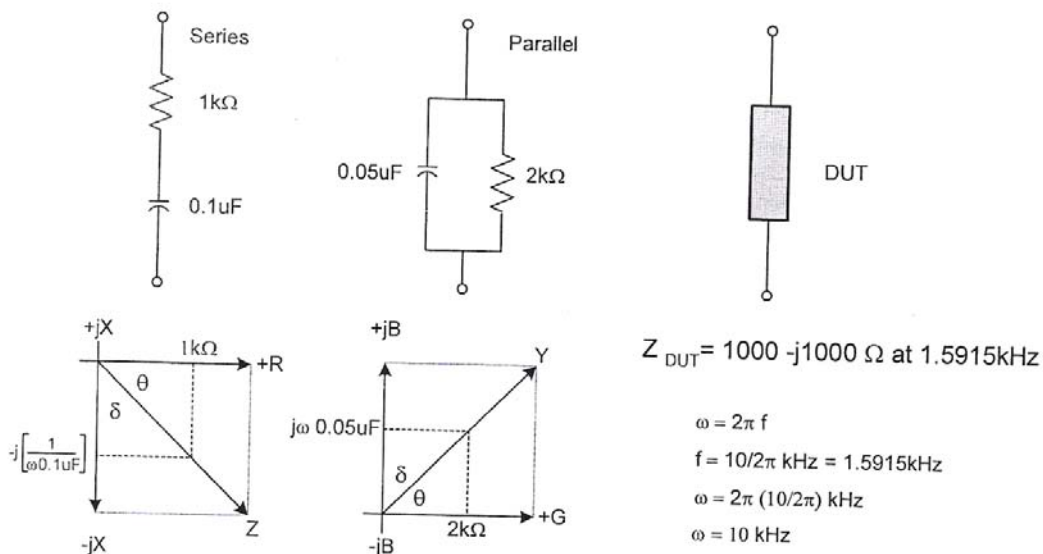
Χρησιμοποιούνται δύο άλλα μεγέθη όπως τα D και Q, που είναι χρήσιμα για την απλοποίηση των εξισώσεων, αλλά και να παρουσιάσουν κατά πόσο μια συσκευή παρουσιάζει συμπεριφορά καθαρής αντίστασης ή επαγωγικής ή χωρητικής αντίστασης. Το μέγεθος D, χαρακτηρίζεται ως ο λόγος του πραγματικού μέρους μιας σύνθετης αντίστασης προς το φανταστικό της μέγεθος. Το μέγεθος Q είναι το αντίστροφο του μεγέθους D.

$$D = \frac{R_s}{X_s} = \frac{G_p}{B_p} = \frac{1}{Q} \quad (6.1.31)$$

Μικρή τιμή του μεγέθους D ή μεγάλη τιμή του μεγέθους Q σημαίνει ότι ο επαγωγική ή χωρητική αντίσταση είναι σχεδόν καθαρή, χωρίς καταναλωτή-ωμική αντίσταση. Μεγάλη τιμή του D ή μικρή τιμή του Q σημαίνει ότι υπερσυνεί η ωμική αντίσταση. Για τις επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις το Q και D είναι θετικά όταν το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης είναι θετικά. Για ωμικές αντιστάσεις το Q είναι θετικό όταν η σύνθετη αντίσταση είναι επαγωγική και αρνητικό όταν έχει συμπεριφορά χωρητική. Τα μεγέθη D και Q είναι ανεξάρτητα από το ισοδύναμο σύστημα που αντιπροσωπεύει μια συσκευή.

Τα ισοδύναμα συστήματα σε σειρά και παράλληλα έχουν την ίδια τιμή της σύνθετης αντίστασης, εφόσον η συχνότητα παραμένει σταθερή. Εάν μεταβληθεί η συχνότητα η σύνθετη αντίσταση αλλάζει τιμή.

Εικόνα 39 Ισοδύναμη αντίσταση ακροδεκτών (LCR Measurement Primer-Quadtech)



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία συμπεριελάμβανε την εύρεση της σύνθετης αντίστασης ή αγωγιμότητας ενός πιεζοκεραμικού. Το πιεζοκεραμικό ήταν συναρμοσμένο με κατάλληλη κόλληση και σε συγκεκριμένη θέση σε μια μεταλλική πλάκα. Η πλάκα πακτώθηκε στη μία άκρη της, κατάλληλα, με συνδέσεις σφικτής συναρμογής όπως φαίνεται παρακάτω. Στο πιεζοκεραμικό κολλήθηκαν κατάλληλα δύο ακροδέκτες από εύκαμπτο καλώδιο. Το καλώδιο ήταν πολύ ελαφρύ, έτσι ώστε η πλάκα να μην φορτίζεται από το βάρος του και να μην δημιουργούνται μηχανικές τάσεις στο πιεζοκεραμικό. Ο ακροδέκτης που συνδέθηκε με τη μεγαλύτερη επιφάνεια του πιεζοκεραμικού χαρακτηριζόταν από θετική πολικότητα, ενώ ο ακροδέκτης που κολλήθηκε στην άκρη του πιεζοκεραμικού χαρακτηρίζεται από αρνητική πολικότητα.

Η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης ή αγωγιμότητας έγινε με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος έγινε με άμεση μέτρηση της σύνθετης αντίστασης ή της σύνθετης αγωγιμότητας και έγινε με μια συσκευή ανάλυσης σύνθετης αντίστασης (*impedance analyzer*) μοντέλο *Quadtech 7600*. Ο έμμεσος τρόπος έγινε μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης και βρέθηκε η τιμή της σύνθετης αντίστασης με έμμεσο τρόπο και όχι με απευθείας μέτρησης του μέτρου της. Στην μία περίπτωση οι ακροδέκτες του συστήματος πλάκας-πιεζοκεραμικού συνδέθηκαν με τους ακροδέκτες του *impedance analyzer*, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι ακροδέκτες συνδέθηκαν σε ένα κύκλωμα σε σειρά με μία αντίσταση. Αναλυτικά, η επίλυση του ηλεκτρικού κυκλώματος θα παρατεθεί παρακάτω.

Επίσης «έγινε» οπή και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της ακέραιας πλάκας με την πλάκα που είχε την οπή (Μη καταστροφικός έλεγχος) με τον έμμεσο τρόπο μέτρησης.

Η στήριξη όσον αφορά τα αποτελέσματα διαδραμάτιζε σημαντικό ρόλο και για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ακέραιας πλάκας με την πλάκα με οπή, η στήριξη αυτή έπρεπε να παραμείνει αμετάβλητη. Η λογική διαδικασία που έπρεπε να ακολουθηθεί ήταν: Στήριξη της ακέραιας πλάκας και λήψη των αποτελεσμάτων. Κατόπιν θα έπρεπε να λυθεί η πλάκα από την στήριξή της και να γίνει η οπή στο μηχανουργείο. Έπειτα θα έπρεπε να στηριχθεί ακριβώς στα ίδια σημεία για να μετρηθούν τα μεγέθη της πλάκας με οπή. Επειδή, αυτό ήταν επίφοβο για την μη στήριξη στα ίδια ακριβώς σημεία και για τη λήψη, κατά συνέπεια, λανθασμένων αποτελεσμάτων ακολουθήθηκε η παρακάτω μέθοδος: Στην πλάκα έγινε οπή εξαρχής και καλύφθηκε με κυλινδρικό δοκίμιο ίδιου υλικού με την πλάκα και ύψους ίσου με το πάχος της πλάκας, ώστε να καλυφθεί η οπή που δημιουργήθηκε. Το δοκίμιο εφάρμοζε σφηνωτά στην πλάκα

και καλύφθηκε, επίσης, με εποξειδική κόλλα (με την κόλλα που χρησιμοποιήθηκε και στην περίπτωση κόλλησης του πιεζοκεραμικού στην πλάκα) και έτσι δημιουργήθηκε μια «ιδεατά» ακέραια πλάκα. Έπειτα έγινε η στερέωση της πλάκας και λήφθηκαν οι μετρήσεις. Για την λήψη των μετρήσεων στην πλάκα με την οπή, αρκούσε η αφαίρεση από την ακέραια πλάκα του κυλινδρικού δοκιμίου, χωρίς να μεταβληθεί το σημείο στήριξής της. Παρακάτω η χρήση του όρου ακέραια πλάκα θα νοείται η πλάκα που η οπή της έχει καλυφθεί, κατάλληλα, με το κυλινδρικό δοκίμιο.



Εικόνα 40 Φωτογραφία Quadtech 7600

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι τρόποι και τα αποτελέσματα που πάρθηκαν κατά τις δύο μεθόδους, καθώς και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών.

7.2. Άμεση μέτρηση-Impedance Analyser Quadteck 7600

7.2.1. Ο Impedance Analyser Quadteck 7600

Η εταιρία *Quadtech* κατασκευάζει πολλές συσκευές για τη μέτρηση και την ανάλυση των παραμέτρων ορισμένων στοιχείων. Η σειρά 7600 είναι μια αυτόματη συσκευή που σχεδιάστηκε για την ακριβή μέτρηση των περαμέτρων που σχετίζονται με την αντίσταση, τη χωρητικότητα, την επαγωγικότητα και τους συντελεστές που έχουν σχέση με αυτά τα μεγέθη. Χρησιμοποιείται, επίσης, για καλιμπράρισμα και αντικαθιστούν συσκευές που έχουν υψηλό κόστος, δυσχρηστία στο χειρισμό τους, ηλεκτρικές γέφυρες κλπ.

Μετρητική ικανότητα

Οι μετρήσεις που γίνονται με τη συσκευή είναι πολύ ακριβείς και δεν αποκλίνουν από τα δεδομένα του *National Institute of Standards and Technology*. Υπάρχουν πολλοί τρόποι που μπορεί να μετρηθεί ένα μέγεθος με τη συσκευή αυτή. Μπορεί μερικοί από αυτούς να είναι ταχύτεροι από άλλους, αλλά υστερούν σε ακρίβεια. Για ευθείς μετρήσεις

η ανάλυση της συσκευής είναι 0.1 ppm και όταν η μέτρηση γίνεται μία/δευτερόλεπτο παρουσιάζεται μια απόκλιση 10ppm σε συχνότητα 1KHz. Χρησιμοποιώντας μια λειτουργία *Averaging mode* η τυπική απόκλιση μπορεί να μειωθεί κατά 1/τετραγωνική ρίζα του N, όπου N είναι ο μέσος αριθμός μετρήσεων. Η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας μια λειτουργία στο μενού της συσκευής λεγόμενη *median mode*. Σε αυτή τη λειτουργία οι μετρήσεις που γίνονται είναι τρεις, αντί μία και απορρίπτονται οι μεγάλες αποκλίσεις μικρών ή μεγάλων τιμών. Χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό *averaging mode* και *median mode* όχι μόνο αυξάνουμε την ακρίβεια της μέτρησης, αλλά αποφεύγουμε και τυχόν συνυπολογισμό θορύβων στη μέτρηση. Στην συσκευή αυτή υπάρχουν δυνατότητες διόρθωσης τυχόν λάθους και να συνυπολογιστούν οι διορθώσεις στα υπό μέτρηση μεγέθη. Επίσης με τη συσκευή αυτή μπορούν να μετρηθούν παραπάνω από μία παράμετροι, μία βασική και μία δευτερεύουσα.. Προφανώς, συσκευές όπως η παραπάνω, έχουν το στοιχειώδες πλεονέκτημα της ταχύτητας, της ακρίβειας και της δυνατότητας τα στοιχεία της μέτρησης να μεταβιβαστούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης

- Η σύνθετη αντίσταση των ακροδεκτών

Οι μετρήσεις μεγάλων σύνθετων αντιστάσεων αυξάνουν το σφάλμα στις μετρήσεις, επειδή είναι δύσκολο να υπολογιστεί το ρεύμα που διαρρέει τους ακροδέκτες (DUT-Device Under Test) της συσκευής.

Για παράδειγμα, αν η σύνθετη αντίσταση είναι μεγαλύτερη του 1MΩ και η τάση είναι 1V οι ακροδέκτες τότε το ρεύμα που θα διαρρέει τους ακροδέκτες θα είναι μικρότερο του 1mA. Η αδυναμία να μετρηθεί το ρεύμα αυτής της τάξεως προκαλεί σφάλμα στις μετρήσεις. Αντίστοιχα, αν οι μετρήσεις γίνονται σε μικρού μεγέθους σύνθετες αντιστάσεις, η τάση στους ακροδέκτες είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί και επομένως δημιουργούνται σφάλματα στις μετρήσεις, αφού δεν μπορεί να υπεισέλθει το σφάλμα αυτό σαν παράγοντας διόρθωσης.



Εικόνα 41 Φωτογραφία ακροδεκτών Quadteck 7600

Οι περισσότερες συσκευές έχουν εσωτερική αντίσταση σε σειρά με την πηγή περίπου 5Ωms. Όταν η σύνθετη αντίσταση των ακροδεκτών πλησιάζει την τιμή της εσωτερικής αντίστασης, η τάση κατά μήκος των ακροδεκτών μειώνεται αναλογικά. Όταν η σύνθετη αντίσταση των ακροδεκτών είναι σημαντικά μικρότερη από την εσωτερική αντίσταση της συσκευής η τάση κατά μήκος των ακροδεκτών γίνεται πολύ μικρή και δύσκολο να μετρηθεί, οπότε και αυξάνεται το σφάλμα της μέτρησης.

- Η συχνότητα

Η σύνθετη αντίσταση εξαρτάται από τη συχνότητα και ανάλογα με την τιμή της συχνότητας παρουσιάζονται περισσότερα ή λιγότερα σφάλματα στη μέτρηση. Για παράδειγμα μια μέτρηση ενός πυκνωτή χωρητικότητας 1μF σε συχνότητα 1KHz θα έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τη μέτρηση της ίδιας χωρητικότητας πυκνωτή σε συχνότητα 1MHz. Μέρος αυτού του φαινομένου αποτελεί και το γεγονός ότι η σύνθετη αντίσταση ενός χωρητικού στοιχείου μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας και αυτό επηρεάζει και την σύνθετη αντίσταση της συσκευής.

- Ακρίβεια μετρήσεων και ταχύτητα

Η ακρίβεια μέτρησης και η ταχύτητα, όπως προαναφέρθηκε, είναι αντιστρόφως ανάλογες. Όσο περισσότερος χρόνος γίνεται μια μέτρηση, τόσο πιο ακριβής θα είναι η μέτρηση αυτή. Η ακρίβεια της μέτρησης πετυχαίνεται, γενικά, σε 1sec για μετρήσεις 1KHz. Για χαμηλότερες συχνότητες, ο χρόνος μέτρησης μπορεί να είναι χαμηλότερος γιατί η μέτρηση ολοκληρώνεται από ένα πλήρη κύκλο της τάσης.

- Από τους συντελεστές D και Q

Η σημαντικότητα των συντελεστών αυτών είναι ότι δίνουν το λόγο της καθαρής αντίστασης προς την επαγωγική και χωρητική αντίσταση. Ο ένας συντελεστής είναι αντιστροφος από τον άλλο. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος Q παριστάνει την γωνία της φάσης και αντίστοιχα ο συντελεστής D την συμπληρωματική της γωνία. Αυτό σημαίνει ότι για τα στοιχεία που έχουν σχετικά καθαρά ωμική συμπεριφορά ή σχετικά καθαρά επαγωγική/χωρητική συμπεριφορά το ημίτονο ή το συνημίτονο σε κάθε περίπτωση του ενός ή του άλλου συντελεστή θα απειρίζεται με αποτέλεσμα να υπάρχουν σφάλματα στις μετρήσεις.

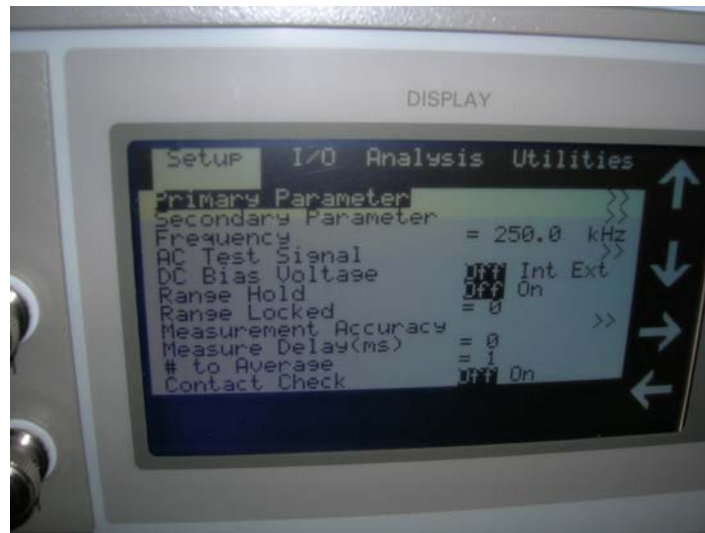
7.2.2. Διαδικασία μέτρησης-Αποτελέσματα

Όπως προαναφέρθηκε σκοπός της εργασίας ήταν η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του πιεζοκεραμικού με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση του υπό μέτρηση υλικού και τις ιδιότητές του.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου το πιεζοκεραμικό συγκολλάται πάνω σε μια πλάκα σε καθορισμένη θέση, με κατάλληλη κόλλα, που αποτελείται από δύο υλικά, το ένα είναι η κόλλα και το άλλο ο διαλύτης. Το πιεζοκεραμικό, πριν την προσθήκη της κόλλας, καλύφθηκε με κατάλληλο κάλυμμα για να προστατευτεί από τυχόν διαρροή της κόλλας στο επάνω μέρος του. Μετά το πέρας μίας εβδομάδας, για τη σωστή συναρμογή του πιεζοκεραμικού με τη μεταλλική πλάκα και το «στέγνωμα της κατασκευής, αφαιρέθηκε το κάλυμμα και έγινε η κόλληση των ηλεκτροδίων πάνω στο κεραμικό. Τα ηλεκτρόδια κολλήθηκαν με κόλληση αλουμινίου (καλάι), το

ένα στο θετικό πόλο του πιεζοκεραμικού και το άλλο στον αρνητικό του πόλο. Η πλάκα μετάλλου πακτώθηκε κατάλληλα με συσκευές μέγγενης σε σταθερό σημείο. Κατόπιν στους ακροδέκτες του πιεζοκεραμικού προσαρμόστηκαν ακροδέκτες τύπου BNC για να μπορεί να γίνει η σύνδεση με τη συσκευή *impedance analyzer*.

Αφού έγινε η σύνδεση των ακροδεκτών της συσκευής μέτρησης της σύνθετης αντίστασης και του πιεζοκεραμικού έγινε η εισαγωγή στο λογισμικό της. Η χρήση του λογισμικού ήταν εύκολη και αρκετά κατανοητή, με μενού που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 46*. Στην αρχή ζητήθηκαν να δοθούν τα στοιχεία σύμφωνα με την οποία θα γινόταν η μέτρηση.



Εικόνα 42 Μενού του Quadtech 7600

Στο μενού *Setup/ Primary Parameter*, ορίστηκε βασική παράμετρος μέτρησης το μέτρο της σύνθετης αγωγιμότητας $|Y|$ (το αντίστροφο της σύνθετης αντίστασης), ενώ δεν ορίστηκε δευτερεύων παράγοντας μέτρησης.



Εικόνα 43 Επιλογή κύριας παραμέτρου μέτρησης

Κατόπιν επιλέχτηκε ο τρόπος μέτρησης και ορίστηκε από το χρήστη από το μενού *Analysis* η επιλογή *parameter sweep*.



Εικόνα 44 Επιλογή παραμέτρων από *Parameter sweep*

Σε αυτό το μενού ορίστηκε το εύρος των συχνοτήτων. Η σκέψη του μελετητή ήταν να σαρωθεί ολόκληρο το εύρος των συχνοτήτων και ανάλογα με τη μορφή του διαγράμματος να επικεντρωθεί σε μια περιοχή. Κατά αυτόν τον τρόπο επιλέχτηκε ένα εύρος από 10Hz έως 2MHz με 200 βήματα μέτρησης, όσες δηλαδή και οι δυνατότητες που πρόσφερε η συσκευή. Επιλέχτηκε, επίσης από το μενού *Analysis* η μορφή των αποτελεσμάτων να δοθεί σε μορφή αρχείου ASCII.



Εικόνα 45 Το κομβίο εκκίνησης μέτρησης

Κατόπιν με το κομβίο *start* ξεκίνησε η διαδικασία σάρωσης και εμφανίστηκε στην οθόνη της συσκευής ένα διάγραμμα μεταβολής της αγωγιμότητας με την μεταβολή της συχνότητας. Με το πέρας της διαδικασίας έγινε σώσιμο (save) των αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα, αρχείο τύπου ASCII και σε επεξεργασία στον υπολογιστή πάρθηκαν τα αποτελέσματα και το διάγραμμα, που φαίνεται παρακάτω.

f[Hz]	Y[S]	Z[Ω]
1.00E+01	4.39E-07	2.28E+06
1.06E+01	5.15E-07	1.94E+06
1.13E+01	5.15E-07	1.94E+06
1.20E+01	5.33E-07	1.87E+06
1.27E+01	5.75E-07	1.74E+06
1.35E+01	5.84E-07	1.71E+06

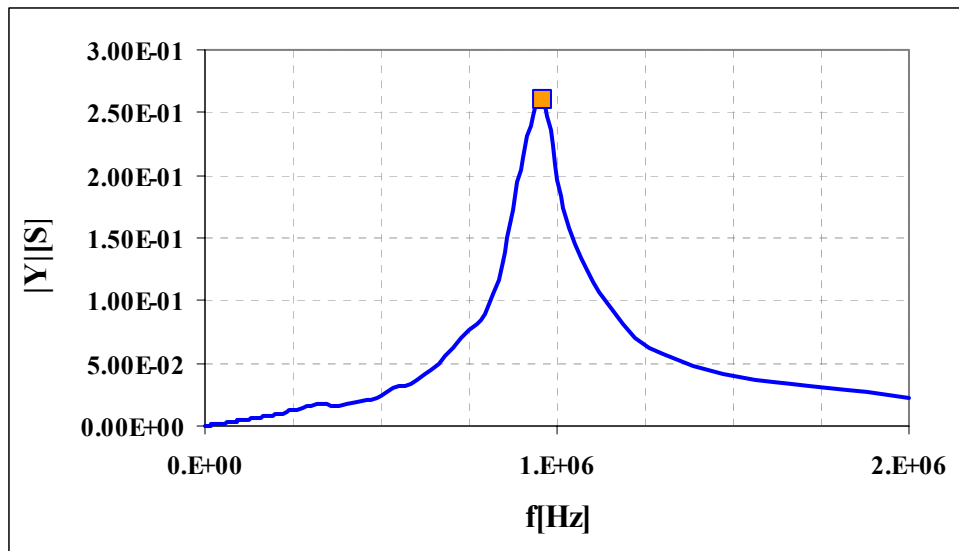
1.44E+01	5.52E-07	1.81E+06
1.53E+01	7.47E-07	1.34E+06
1.63E+01	6.98E-07	1.43E+06
1.73E+01	7.12E-07	1.41E+06
1.84E+01	7.87E-07	1.27E+06
1.96E+01	8.30E-07	1.20E+06
2.08E+01	9.35E-07	1.07E+06
2.21E+01	9.69E-07	1.03E+06
2.36E+01	1.08E-06	9.25E+05
2.50E+01	1.09E-06	9.13E+05
2.66E+01	1.12E-06	8.92E+05
2.83E+01	1.27E-06	7.87E+05
3.01E+01	1.33E-06	7.50E+05
3.20E+01	1.32E-06	7.58E+05
3.41E+01	1.46E-06	6.85E+05
3.62E+01	1.52E-06	6.58E+05
3.85E+01	1.68E-06	5.94E+05
4.09E+01	1.85E-06	5.42E+05
4.35E+01	2.09E-06	4.79E+05
4.63E+01	2.37E-06	4.22E+05
4.92E+01	1.73E-06	5.80E+05
5.23E+01	2.11E-06	4.73E+05
5.57E+01	2.60E-06	3.84E+05
5.92E+01	2.62E-06	3.82E+05
6.29E+01	2.67E-06	3.74E+05
6.69E+01	2.98E-06	3.36E+05
7.11E+01	3.12E-06	3.21E+05
7.56E+01	3.30E-06	3.03E+05
8.04E+01	3.56E-06	2.81E+05
8.55E+01	3.76E-06	2.66E+05
9.09E+01	3.96E-06	2.53E+05
9.67E+01	4.24E-06	2.36E+05
1.03E+02	4.50E-06	2.22E+05
1.09E+02	4.79E-06	2.09E+05
1.16E+02	5.06E-06	1.98E+05
1.24E+02	5.40E-06	1.85E+05
1.31E+02	5.72E-06	1.75E+05
1.40E+02	6.08E-06	1.65E+05
1.49E+02	6.49E-06	1.54E+05
1.58E+02	6.87E-06	1.45E+05
1.68E+02	7.31E-06	1.37E+05

1.79E+02	7.79E-06	1.28E+05
1.90E+02	8.26E-06	1.21E+05
2.02E+02	8.76E-06	1.14E+05
2.15E+02	9.30E-06	1.07E+05
2.28E+02	9.89E-06	1.01E+05
2.43E+02	1.05E-05	9.52E+04
2.58E+02	1.12E-05	8.95E+04
2.74E+02	1.18E-05	8.46E+04
2.92E+02	1.26E-05	7.91E+04
3.10E+02	1.35E-05	7.43E+04
3.30E+02	1.43E-05	7.01E+04
3.51E+02	1.52E-05	6.59E+04
3.73E+02	1.61E-05	6.21E+04
3.97E+02	1.71E-05	5.85E+04
4.22E+02	1.82E-05	5.50E+04
4.48E+02	1.93E-05	5.18E+04
4.77E+02	2.05E-05	4.87E+04
5.07E+02	2.18E-05	4.58E+04
5.39E+02	2.32E-05	4.31E+04
5.73E+02	2.46E-05	4.06E+04
6.09E+02	2.62E-05	3.82E+04
6.48E+02	2.78E-05	3.60E+04
6.89E+02	2.96E-05	3.38E+04
7.32E+02	3.14E-05	3.18E+04
7.79E+02	3.34E-05	3.00E+04
8.28E+02	3.55E-05	2.82E+04
8.80E+02	3.77E-05	2.65E+04
9.36E+02	4.02E-05	2.49E+04
9.95E+02	4.27E-05	2.34E+04
1.06E+03	4.54E-05	2.20E+04
1.12E+03	4.82E-05	2.08E+04
1.20E+03	5.12E-05	1.95E+04
1.27E+03	5.44E-05	1.84E+04
1.35E+03	5.78E-05	1.73E+04
1.44E+03	6.14E-05	1.63E+04
1.53E+03	6.53E-05	1.53E+04
1.63E+03	6.94E-05	1.44E+04
1.73E+03	7.38E-05	1.36E+04
1.84E+03	7.84E-05	1.28E+04
1.95E+03	8.33E-05	1.20E+04
2.08E+03	8.85E-05	1.13E+04

2.21E+03	9.41E-05	1.06E+04
2.35E+03	1.00E-04	9.99E+03
2.50E+03	1.06E-04	9.41E+03
2.66E+03	1.13E-04	8.86E+03
2.82E+03	1.20E-04	8.34E+03
3.00E+03	1.27E-04	7.85E+03
3.19E+03	1.35E-04	7.38E+03
3.39E+03	1.44E-04	6.94E+03
3.61E+03	1.53E-04	6.54E+03
3.84E+03	1.63E-04	6.15E+03
4.08E+03	1.73E-04	5.79E+03
4.34E+03	1.84E-04	5.45E+03
4.61E+03	1.95E-04	5.13E+03
4.90E+03	2.07E-04	4.82E+03
5.21E+03	2.21E-04	4.53E+03
5.54E+03	2.34E-04	4.27E+03
5.89E+03	2.49E-04	4.02E+03
6.27E+03	2.65E-04	3.78E+03
6.66E+03	2.81E-04	3.56E+03
7.08E+03	2.99E-04	3.34E+03
7.53E+03	3.17E-04	3.15E+03
8.01E+03	3.37E-04	2.96E+03
8.52E+03	3.58E-04	2.79E+03
9.05E+03	3.81E-04	2.63E+03
9.63E+03	4.05E-04	2.47E+03
1.02E+04	4.30E-04	2.32E+03
1.09E+04	4.56E-04	2.19E+03
1.16E+04	4.86E-04	2.06E+03
1.23E+04	5.16E-04	1.94E+03
1.31E+04	5.49E-04	1.82E+03
1.39E+04	5.83E-04	1.72E+03
1.48E+04	6.19E-04	1.61E+03
1.57E+04	6.59E-04	1.52E+03
1.67E+04	7.02E-04	1.42E+03
1.78E+04	7.48E-04	1.34E+03
1.89E+04	7.91E-04	1.26E+03
2.01E+04	8.42E-04	1.19E+03
2.14E+04	8.94E-04	1.12E+03
2.27E+04	9.50E-04	1.05E+03
2.42E+04	1.01E-03	9.91E+02
2.57E+04	1.08E-03	9.30E+02

2.73E+04	1.14E-03	8.76E+02
2.90E+04	1.21E-03	8.28E+02
3.09E+04	1.29E-03	7.74E+02
3.28E+04	1.38E-03	7.26E+02
3.49E+04	1.45E-03	6.87E+02
3.71E+04	1.55E-03	6.45E+02
3.95E+04	1.64E-03	6.09E+02
4.20E+04	1.75E-03	5.73E+02
4.46E+04	1.86E-03	5.37E+02
4.74E+04	1.97E-03	5.07E+02
5.04E+04	2.10E-03	4.76E+02
5.36E+04	2.21E-03	4.52E+02
5.70E+04	2.38E-03	4.21E+02
6.06E+04	2.50E-03	4.00E+02
6.45E+04	2.69E-03	3.72E+02
6.85E+04	2.85E-03	3.51E+02
7.29E+04	3.06E-03	3.27E+02
7.75E+04	3.23E-03	3.10E+02
8.24E+04	3.42E-03	2.92E+02
8.76E+04	3.65E-03	2.74E+02
9.31E+04	3.89E-03	2.57E+02
9.90E+04	4.16E-03	2.41E+02
1.05E+05	4.50E-03	2.22E+02
1.12E+05	4.74E-03	2.11E+02
1.19E+05	4.99E-03	2.01E+02
1.27E+05	5.33E-03	1.88E+02
1.35E+05	5.70E-03	1.76E+02
1.43E+05	6.12E-03	1.63E+02
1.52E+05	6.53E-03	1.53E+02
1.62E+05	6.94E-03	1.44E+02
1.72E+05	7.39E-03	1.35E+02
1.83E+05	7.90E-03	1.27E+02
1.94E+05	8.51E-03	1.17E+02
2.07E+05	9.06E-03	1.10E+02
2.20E+05	1.02E-02	9.81E+01
2.34E+05	1.16E-02	8.61E+01
2.48E+05	1.23E-02	8.13E+01
2.64E+05	1.30E-02	7.71E+01
2.81E+05	1.39E-02	7.20E+01
2.99E+05	1.54E-02	6.51E+01
3.18E+05	1.81E-02	5.51E+01

3.38E+05	1.82E-02	5.49E+01
3.59E+05	1.60E-02	6.25E+01
3.82E+05	1.53E-02	6.53E+01
4.06E+05	1.78E-02	5.62E+01
4.32E+05	1.91E-02	5.25E+01
4.59E+05	2.14E-02	4.67E+01
4.88E+05	2.30E-02	4.35E+01
5.19E+05	2.73E-02	3.66E+01
5.52E+05	3.26E-02	3.07E+01
5.86E+05	3.30E-02	3.03E+01
6.24E+05	4.20E-02	2.38E+01
6.63E+05	5.01E-02	1.99E+01
7.05E+05	6.20E-02	1.61E+01
7.50E+05	7.73E-02	1.29E+01
7.97E+05	8.87E-02	1.13E+01
8.47E+05	1.30E-01	7.69E+00
9.01E+05	2.13E-01	4.69E+00
9.58E+05	2.61E-01	3.84E+00
1.02E+06	1.74E-01	5.76E+00
1.08E+06	1.25E-01	8.00E+00
1.15E+06	9.44E-02	1.06E+01
1.22E+06	6.95E-02	1.44E+01
1.30E+06	5.71E-02	1.75E+01
1.38E+06	4.78E-02	2.09E+01
1.47E+06	4.13E-02	2.42E+01
1.56E+06	3.75E-02	2.67E+01
1.66E+06	3.36E-02	2.97E+01
1.77E+06	3.09E-02	3.23E+01
1.88E+06	2.72E-02	3.67E+01
2.00E+06	2.28E-02	4.38E+01



Εικόνα 46 Αποτελέσματα σάρωσης από 10Hz έως 2MHz

Κατόπιν, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει επικέντρωση σε μια περιοχή συχνοτήτων 200KHz έως 2MHz και ακολουθώντας τη διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω έγινε εξαγωγή των παρακάτω αποτελεσμάτων και του διαγράμματος:

f[Hz]	Y[S]	Z[Ω]
2.00E+05	8.91E-03	1.12E+02
2.02E+05	9.00E-03	1.11E+02
2.05E+05	9.28E-03	1.08E+02
2.07E+05	9.06E-03	1.10E+02
2.09E+05	9.38E-03	1.07E+02
2.12E+05	9.53E-03	1.05E+02
2.14E+05	9.62E-03	1.04E+02
2.17E+05	9.70E-03	1.03E+02
2.19E+05	1.02E-02	9.82E+01
2.22E+05	9.97E-03	1.00E+02
2.25E+05	1.03E-02	9.74E+01
2.27E+05	1.05E-02	9.50E+01
2.30E+05	1.06E-02	9.48E+01
2.32E+05	1.09E-02	9.14E+01
2.35E+05	1.05E-02	9.49E+01
2.38E+05	1.13E-02	8.86E+01
2.41E+05	1.10E-02	9.05E+01
2.43E+05	1.16E-02	8.64E+01
2.46E+05	1.21E-02	8.28E+01
2.49E+05	1.23E-02	8.12E+01
2.52E+05	1.18E-02	8.51E+01
2.55E+05	1.19E-02	8.39E+01

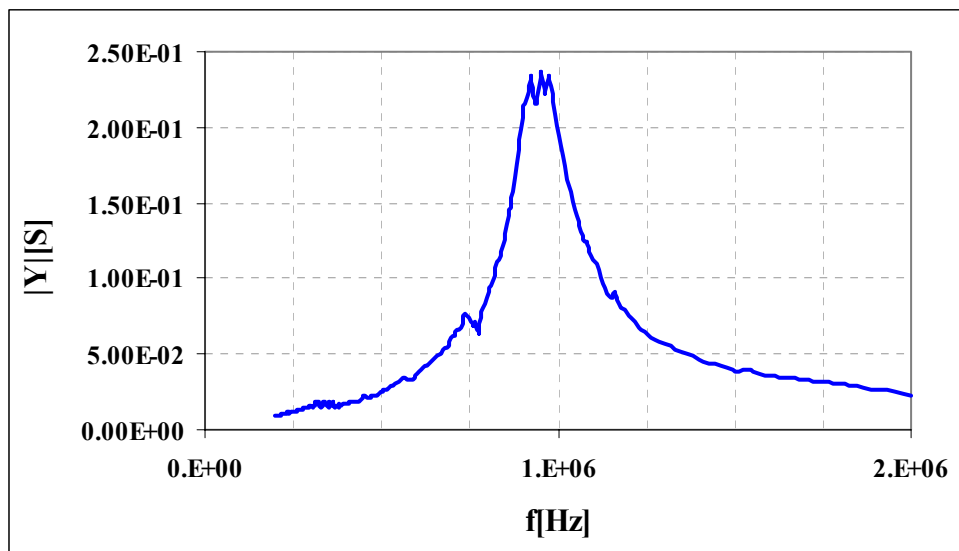
2.58E+05	1.25E-02	8.02E+01
2.61E+05	1.28E-02	7.82E+01
2.64E+05	1.30E-02	7.71E+01
2.67E+05	1.33E-02	7.54E+01
2.70E+05	1.31E-02	7.62E+01
2.73E+05	1.33E-02	7.51E+01
2.77E+05	1.37E-02	7.29E+01
2.80E+05	1.40E-02	7.15E+01
2.83E+05	1.45E-02	6.91E+01
2.86E+05	1.49E-02	6.71E+01
2.90E+05	1.47E-02	6.82E+01
2.93E+05	1.50E-02	6.65E+01
2.96E+05	1.63E-02	6.12E+01
3.00E+05	1.62E-02	6.16E+01
3.03E+05	1.50E-02	6.68E+01
3.07E+05	1.59E-02	6.30E+01
3.10E+05	1.65E-02	6.07E+01
3.14E+05	1.71E-02	5.86E+01
3.18E+05	1.81E-02	5.53E+01
3.21E+05	1.71E-02	5.86E+01
3.25E+05	1.68E-02	5.94E+01
3.29E+05	1.46E-02	6.86E+01
3.33E+05	1.72E-02	5.83E+01
3.37E+05	1.82E-02	5.49E+01
3.41E+05	1.87E-02	5.35E+01
3.45E+05	1.57E-02	6.39E+01
3.49E+05	1.50E-02	6.68E+01
3.53E+05	1.88E-02	5.32E+01
3.57E+05	1.63E-02	6.12E+01
3.61E+05	1.79E-02	5.58E+01
3.65E+05	1.64E-02	6.09E+01
3.69E+05	1.52E-02	6.59E+01
3.74E+05	1.52E-02	6.56E+01
3.78E+05	1.48E-02	6.77E+01
3.82E+05	1.65E-02	6.05E+01
3.87E+05	1.58E-02	6.33E+01
3.91E+05	1.73E-02	5.77E+01
3.96E+05	1.72E-02	5.82E+01
4.00E+05	1.73E-02	5.78E+01
4.05E+05	1.78E-02	5.62E+01
4.10E+05	1.85E-02	5.39E+01

4.15E+05	1.84E-02	5.45E+01
4.19E+05	1.89E-02	5.29E+01
4.24E+05	1.84E-02	5.44E+01
4.29E+05	1.87E-02	5.34E+01
4.34E+05	1.91E-02	5.25E+01
4.39E+05	1.99E-02	5.02E+01
4.44E+05	2.02E-02	4.95E+01
4.50E+05	2.12E-02	4.71E+01
4.55E+05	2.20E-02	4.55E+01
4.60E+05	2.16E-02	4.63E+01
4.65E+05	2.14E-02	4.67E+01
4.71E+05	2.15E-02	4.65E+01
4.76E+05	2.20E-02	4.54E+01
4.82E+05	2.25E-02	4.44E+01
4.87E+05	2.30E-02	4.34E+01
4.93E+05	2.39E-02	4.18E+01
4.99E+05	2.46E-02	4.06E+01
5.05E+05	2.55E-02	3.92E+01
5.11E+05	2.61E-02	3.83E+01
5.17E+05	2.64E-02	3.79E+01
5.23E+05	2.76E-02	3.62E+01
5.29E+05	2.89E-02	3.46E+01
5.35E+05	2.93E-02	3.42E+01
5.41E+05	3.05E-02	3.28E+01
5.47E+05	3.15E-02	3.17E+01
5.54E+05	3.34E-02	3.00E+01
5.60E+05	3.49E-02	2.86E+01
5.67E+05	3.46E-02	2.89E+01
5.73E+05	3.36E-02	2.97E+01
5.80E+05	3.26E-02	3.07E+01
5.87E+05	3.30E-02	3.03E+01
5.93E+05	3.61E-02	2.77E+01
6.00E+05	3.71E-02	2.69E+01
6.07E+05	3.84E-02	2.60E+01
6.14E+05	4.00E-02	2.50E+01
6.22E+05	4.19E-02	2.38E+01
6.29E+05	4.29E-02	2.33E+01
6.36E+05	4.41E-02	2.27E+01
6.44E+05	4.68E-02	2.14E+01
6.51E+05	4.70E-02	2.13E+01
6.59E+05	4.85E-02	2.06E+01

6.66E+05	4.97E-02	2.01E+01
6.74E+05	5.24E-02	1.91E+01
6.82E+05	5.43E-02	1.84E+01
6.90E+05	5.60E-02	1.79E+01
6.98E+05	6.10E-02	1.64E+01
7.06E+05	6.19E-02	1.62E+01
7.14E+05	6.67E-02	1.50E+01
7.22E+05	6.73E-02	1.49E+01
7.31E+05	7.32E-02	1.37E+01
7.39E+05	7.70E-02	1.30E+01
7.48E+05	7.36E-02	1.36E+01
7.57E+05	6.90E-02	1.45E+01
7.65E+05	7.20E-02	1.39E+01
7.74E+05	6.34E-02	1.58E+01
7.83E+05	7.81E-02	1.28E+01
7.93E+05	8.38E-02	1.19E+01
8.02E+05	9.18E-02	1.09E+01
8.11E+05	9.49E-02	1.05E+01
8.21E+05	1.02E-01	9.80E+00
8.30E+05	1.11E-01	9.02E+00
8.40E+05	1.15E-01	8.68E+00
8.50E+05	1.30E-01	7.72E+00
8.59E+05	1.42E-01	7.07E+00
8.69E+05	1.49E-01	6.71E+00
8.80E+05	1.67E-01	6.00E+00
8.90E+05	1.85E-01	5.41E+00
9.00E+05	2.12E-01	4.73E+00
9.11E+05	2.20E-01	4.55E+00
9.21E+05	2.35E-01	4.26E+00
9.32E+05	2.24E-01	4.47E+00
9.43E+05	2.15E-01	4.65E+00
9.54E+05	2.37E-01	4.23E+00
9.65E+05	2.23E-01	4.49E+00
9.76E+05	2.34E-01	4.28E+00
9.87E+05	2.17E-01	4.61E+00
9.99E+05	2.01E-01	4.98E+00
1.01E+06	1.88E-01	5.31E+00
1.02E+06	1.74E-01	5.74E+00
1.03E+06	1.58E-01	6.33E+00
1.05E+06	1.46E-01	6.84E+00
1.06E+06	1.37E-01	7.29E+00

1.07E+06	1.26E-01	7.95E+00
1.08E+06	1.25E-01	8.01E+00
1.10E+06	1.15E-01	8.68E+00
1.11E+06	1.10E-01	9.06E+00
1.12E+06	1.01E-01	9.91E+00
1.13E+06	9.43E-02	1.06E+01
1.15E+06	8.75E-02	1.14E+01
1.16E+06	9.10E-02	1.10E+01
1.17E+06	8.35E-02	1.20E+01
1.19E+06	7.92E-02	1.26E+01
1.20E+06	7.53E-02	1.33E+01
1.22E+06	7.18E-02	1.39E+01
1.23E+06	6.79E-02	1.47E+01
1.24E+06	6.51E-02	1.54E+01
1.26E+06	6.27E-02	1.59E+01
1.27E+06	6.02E-02	1.66E+01
1.29E+06	5.85E-02	1.71E+01
1.30E+06	5.67E-02	1.76E+01
1.32E+06	5.49E-02	1.82E+01
1.33E+06	5.30E-02	1.89E+01
1.35E+06	5.16E-02	1.94E+01
1.37E+06	4.97E-02	2.01E+01
1.38E+06	4.84E-02	2.07E+01
1.40E+06	4.66E-02	2.14E+01
1.41E+06	4.52E-02	2.21E+01
1.43E+06	4.42E-02	2.26E+01
1.45E+06	4.30E-02	2.32E+01
1.46E+06	4.19E-02	2.39E+01
1.48E+06	4.07E-02	2.46E+01
1.50E+06	3.99E-02	2.50E+01
1.52E+06	3.88E-02	2.58E+01
1.53E+06	3.95E-02	2.53E+01
1.55E+06	3.82E-02	2.62E+01
1.57E+06	3.72E-02	2.69E+01
1.59E+06	3.63E-02	2.75E+01
1.61E+06	3.56E-02	2.81E+01
1.62E+06	3.50E-02	2.86E+01
1.64E+06	3.44E-02	2.91E+01
1.66E+06	3.38E-02	2.96E+01
1.68E+06	3.31E-02	3.02E+01
1.70E+06	3.27E-02	3.06E+01

1.72E+06	3.22E-02	3.11E+01
1.74E+06	3.17E-02	3.15E+01
1.76E+06	3.12E-02	3.20E+01
1.78E+06	3.06E-02	3.27E+01
1.80E+06	3.02E-02	3.32E+01
1.82E+06	2.93E-02	3.41E+01
1.84E+06	2.86E-02	3.49E+01
1.87E+06	2.77E-02	3.60E+01
1.89E+06	2.70E-02	3.71E+01
1.91E+06	2.67E-02	3.74E+01
1.93E+06	2.59E-02	3.86E+01
1.95E+06	2.48E-02	4.04E+01
1.98E+06	2.37E-02	4.23E+01
2.00E+06	2.28E-02	4.38E+01



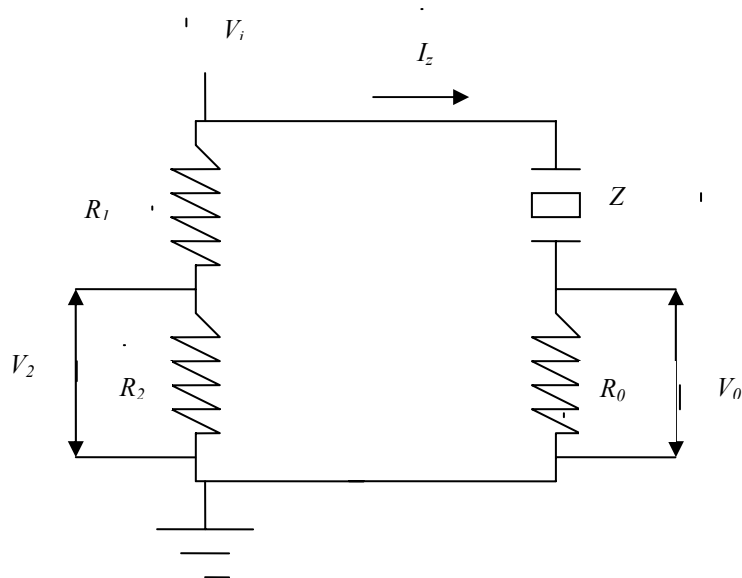
Εικόνα 47 Αποτελέσματα σάρωσης από 200KHz έως 2MHZ

Η παραπάνω μέτρηση επαναλήφθηκε και επαληθεύτηκε η επαναληψιμότητα της μέτρησης με αμελητέες αποκλίσεις.

7.3. Έμμεση μέτρηση

7.3.1. Ηλεκτρικό κύκλωμα-Θεωρία

Η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης έγινε με έμμεσο τρόπο στην περίπτωση αυτή. Έχοντας ένα κύκλωμα με τρεις αντιστάσεις και μια γεννήτρια εναλασσόμενου ρεύματος. Το κύκλωμα αποτελείται από μία αντίσταση $R_1=6,62K\Omega$, μία αντίσταση $R_2=493\Omega$ και μία αντίσταση $R_0=45m\Omega$. Όλες οι αντιστάσεις συνδέονται σε σειρά και με το πιεζοκεραμικό που βρίσκεται συναρμοσμένο πάνω στη μεταλλική πλάκα. Παρακάτω εμφανίζεται και η διάταξη του ηλεκτρικού κυκλώματος:



Εικόνα 48 Κυκλωματικό διάγραμμα

Οι αντιστάσεις μεταλλικού φίλμ σε συχνότητες άνω των 20KHz παρουσιάζουν, συνήθως επαγωγική αντίσταση, οπότε στην πειραματική διάταξη θα χρησιμοποιηθούν αντιστάσεις άνθρακος, που παρουσιάζουν καθαρά ωμική συμπεριφορά. Η γεννήτρια εφαρμόζει τάση V_i .

Η επίλυση του κυκλώματος του σχήματος δίνει:

$$V_2 = V_i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Επιλύνοντας ως προς V_i :

$$V_i = V_2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Επίσης θα ισχύει:

$$V_i = V_0 + zI_z$$

Επίσης για το ρεύμα που διαρρέει το πιεζοκεραμικό θα ισχύει:

$$I_z = \frac{V_0}{R_0}$$

Άρα

$$Z = \frac{V_2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - V_0}{\frac{V_0}{R_0}}$$

Οπότε

$$Z = \frac{V_2}{V_0} R_0 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - R_0$$

Από τον παραπάνω τύπο και θεωρώντας γνωστές τις αντιστάσεις και τις τάσεις στα άκρα δύο αντιστάσεων, μπορεί να υπολογιστεί η σύνθετη αντίσταση του πιεζοκεραμικού.

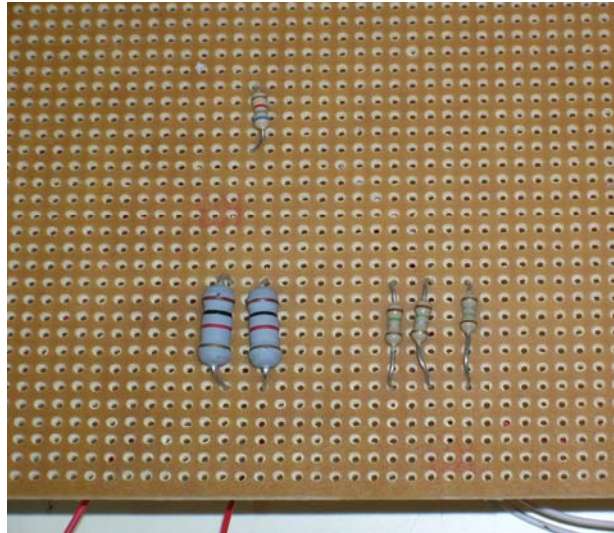
7.3.2. Διαδικασία μέτρησης-Αποτελέσματα



Εικόνα 49 Το πιεζοηλεκτρικό πάνω στην μεταλλική πλάκα

Παραπάνω περατέθηκε ο τρόπος με τον οποίο έγινε η συναρμογή του πιεζοκεραμικού με τη μεταλλική πλάκα. Το κύκλωμα κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αγοράστηκε μια ηλεκτρονική πλάκα, πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν οι αντιστάσεις και συνδέθηκαν με εύκαμπτο, λεπτό καλώδιο.

Έγινε η τοποθέτηση των αντιστάσεων πάνω στην πλάκα, σύμφωνα με το σχέδιο που φαίνεται παραπάνω και συνδέθηκαν κατάλληλα οι ακροδέκτες τους έτσι ώστε να σχηματιστεί το κύκλωμα. Κατόπιν κολλήθηκαν οι ακροδέκτες με εύκαμπτο, πολύ λεπτό καλώδιο και έγιναν οι αναμονές από τις οποίες θα συνδεθεί η μετρητική διάταξη των τάσεων (Εικόνα 50).



Εικόνα 50 Πλακέτα σύνδεσης αντιστάσεων πειραματική αντίστασης

Το κύκλωμα συνδέθηκε με μια γεννήτρια όπως φαίνεται στην *Εικόνα 51*. Η γεννήτρια αφού συνδέθηκε στο ηλεκτρικό ρεύμα και ενισχύθηκε η τάση της από ενισχυτή (*Εικόνα 52*), ρυθμίστηκαν οι παράμετροι της λειτουργίας της όπως εφαρμοζόμενη τάση και συχνότητα σε *manual* χειρισμό.



Εικόνα 51 Η γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος



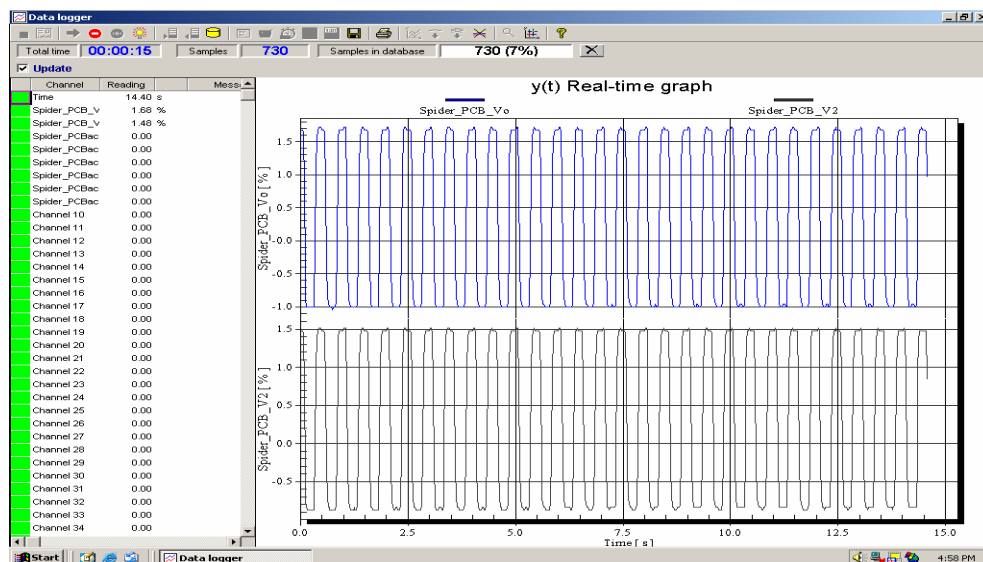
Εικόνα 52 Ενισχυτής τάσης

Οι τάσεις V_0 και V_2 μετρήθηκαν μέσω του προγράμματος *Catman 4.5*, που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 54* παρακάτω, και η σύνδεση των ακροδεκτών έγινε σε κάρτα λήψης δεδομένων τύπου *Spinder 8* (*Εικόνα 53*). Για τη σύνδεση των αναμονών των ακροδεκτών μέτρησης των τάσεων V_0 και V_2 , στους ακροδέκτες προσαρμόστηκαν δέκτες *BNC*, ώστε να γίνει η σύνδεσή τους με τα κανάλια της κάρτας. Επιλέχτηκαν τα κανάλια 2 και 4 από τα 8 κανάλια που διαθέτει η κάρτα.

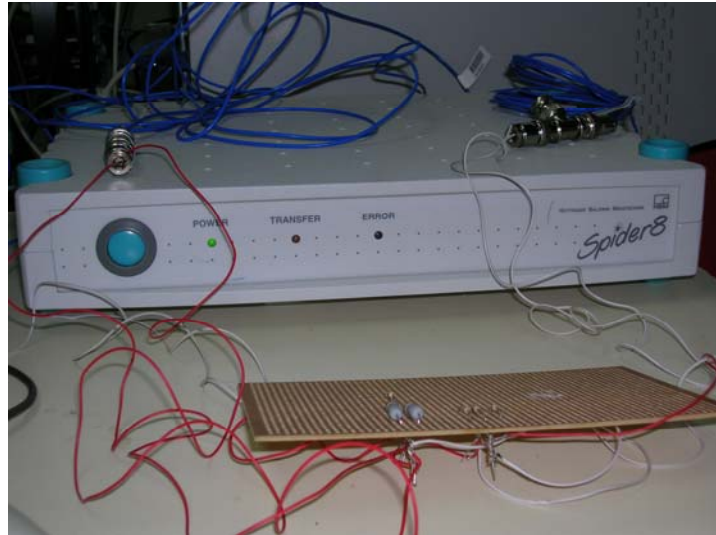


Εικόνα 53 Η κάρτα Spider 8

Αφού έγινε η σύνδεση των στοιχείων του κυκλώματος και του κυκλώματος με την κάρτα *Spider 8* μέσω του λογισμικού προγράμματος *Catman 4.5* σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, έγινε η ρύθμιση των καναλιών. Από την επιλογή του προγράμματος *Catman 4.5* στο μενού *I/O Definitions* ορίστηκαν ότι τα κανάλια θα μετράνε τάση, ηλεκτρικό μέγεθος και επιλέχτηκε τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται σε γράφημα. Καθώς τέθηκε σε λειτουργία το κύκλωμα τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στην οθόνη του υπολογιστή και με το πέρας των προσδιορισθέντων βημάτων επιλέχτηκε τα αποτελέσματα να παρθούν και σε αρχείο *ASCII*. Τα αποτελέσματα ήταν η τάση των καναλιών σε σχέση με το πέρας του χρόνου. Η μορφή των αποτελεσμάτων φαίνεται στην *Εικόνα 54*.

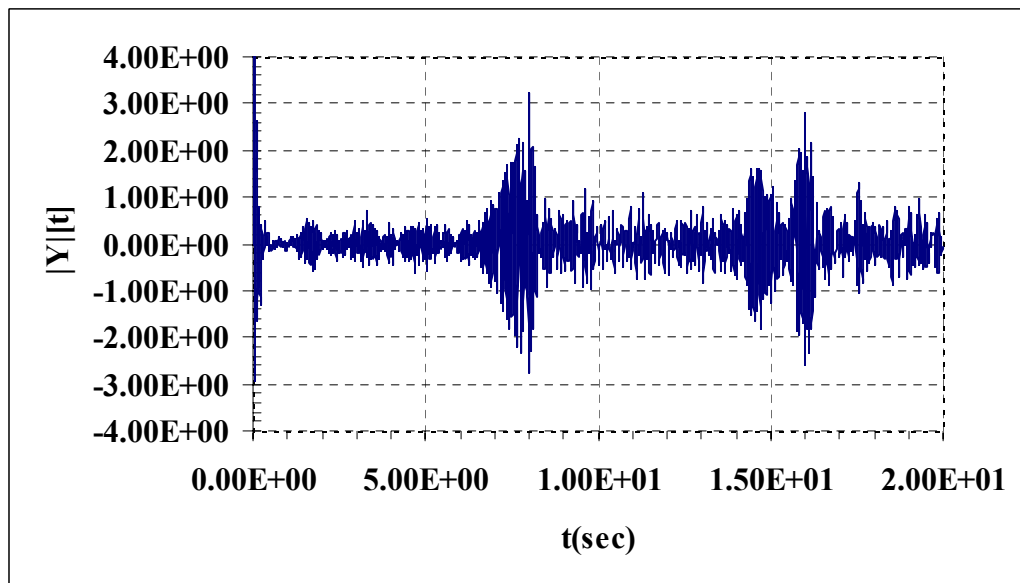


Εικόνα 54 Το πρόγραμμα *Catman 4.5*-Αποτελέσματα μετρήσεων



Εικόνα 55 Σύνδεση κάρτας με το ηλεκτρικό κύκλωμα

Τα αποτελέσματα των τάσεων σε σχέση με τον χρόνο εισάγονται σε φύλλο του Excell και με την σχέση $Z = \frac{V_2}{V_0} R_0 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - R_0$ βρίσκεται η τιμή της σύνθετης αντίστασης σε σχέση με το χρόνο. Το ζητούμενο μέγεθος της αγωγιμότητας είναι το αντίστροφο της σύνθετης αντίστασης. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται παρακάτω.



Εικόνα 56 Αποτελέσματα μετά από εφαρμογή εξισώσεων

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι συνάρτηση της αγωγιμότητας σε σχέση με το χρόνο. Μέσω του προγράμματος Matlab (Παράρτημα II) θα γίνει μετασχηματισμός Fourier για να παρουσιαστεί το φάσμα της αγωγιμότητας (διάγραμμα της αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας) και να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με αυτά του Impedance Analyser.

f[Hz]	Y[S]
2.10E+05	1.20E-02
2.12E+05	1.22E-02
2.15E+05	1.25E-02
2.17E+05	1.22E-02
2.20E+05	1.27E-02
2.22E+05	1.29E-02
2.25E+05	1.30E-02
2.28E+05	1.31E-02
2.30E+05	1.37E-02
2.33E+05	1.35E-02
2.36E+05	1.39E-02
2.38E+05	1.42E-02
2.41E+05	1.42E-02
2.44E+05	1.48E-02
2.47E+05	1.42E-02
2.50E+05	1.52E-02
2.53E+05	1.49E-02
2.56E+05	1.56E-02
2.59E+05	1.63E-02
2.62E+05	1.66E-02
2.65E+05	1.59E-02
2.68E+05	1.61E-02
2.71E+05	1.68E-02
2.74E+05	1.73E-02
2.77E+05	1.75E-02
2.80E+05	1.79E-02
2.84E+05	1.77E-02
2.87E+05	1.80E-02
2.90E+05	1.85E-02
2.94E+05	1.89E-02
2.97E+05	1.95E-02
3.01E+05	2.01E-02
3.04E+05	1.98E-02
3.08E+05	2.03E-02
3.11E+05	2.20E-02
3.15E+05	2.19E-02
3.18E+05	2.02E-02
3.22E+05	2.14E-02
3.26E+05	1.48E-02
3.30E+05	1.53E-02
3.34E+05	1.62E-02
3.37E+05	1.53E-02
3.41E+05	1.51E-02
3.45E+05	1.17E-02
3.49E+05	1.37E-02
3.53E+05	1.46E-02
3.58E+05	1.50E-02

3.62E+05	1.25E-02
3.66E+05	1.20E-02
3.70E+05	1.50E-02
3.74E+05	1.31E-02
3.79E+05	1.43E-02
3.83E+05	1.31E-02
3.88E+05	1.21E-02
3.92E+05	1.22E-02
3.97E+05	1.18E-02
4.01E+05	1.32E-02
4.06E+05	1.26E-02
4.11E+05	1.39E-02
4.16E+05	1.37E-02
4.20E+05	1.39E-02
4.25E+05	1.42E-02
4.30E+05	1.48E-02
4.35E+05	1.47E-02
4.40E+05	1.51E-02
4.45E+05	1.47E-02
4.51E+05	1.50E-02
4.56E+05	1.52E-02
4.61E+05	1.59E-02
4.67E+05	1.62E-02
4.72E+05	1.70E-02
4.77E+05	1.76E-02
4.83E+05	1.73E-02
4.89E+05	1.71E-02
4.94E+05	1.72E-02
5.00E+05	1.76E-02
5.06E+05	1.80E-02
5.12E+05	1.84E-02
5.18E+05	1.91E-02
5.24E+05	1.97E-02
5.30E+05	2.04E-02
5.36E+05	2.09E-02
5.42E+05	2.11E-02
5.49E+05	2.21E-02
5.55E+05	2.31E-02
5.61E+05	2.76E-02
5.68E+05	2.87E-02
5.75E+05	2.97E-02
5.81E+05	3.15E-02
5.88E+05	3.29E-02
5.95E+05	3.26E-02
6.02E+05	3.17E-02
6.09E+05	3.07E-02
6.16E+05	3.11E-02
6.23E+05	3.40E-02
6.30E+05	3.50E-02

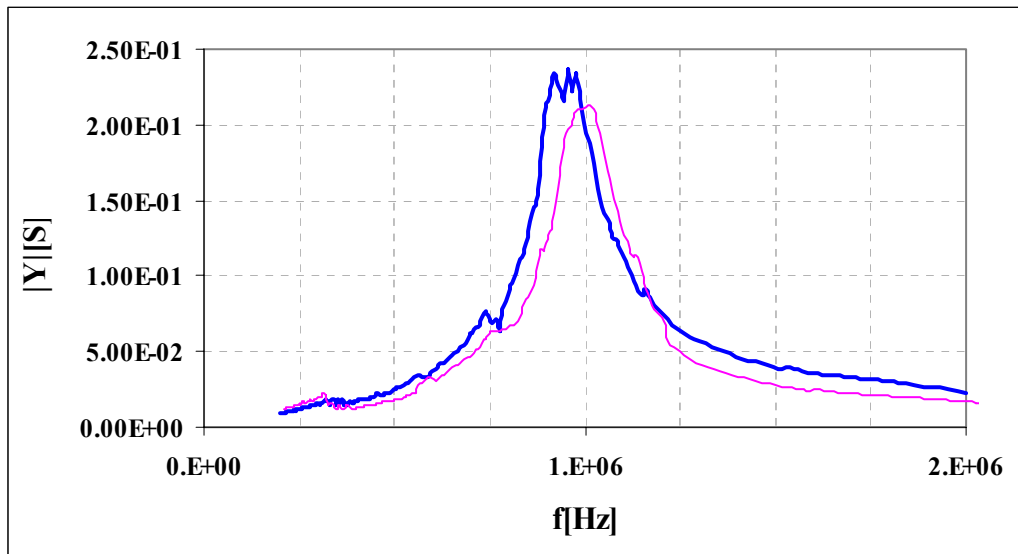
6.38E+05	3.62E-02
6.45E+05	3.77E-02
6.53E+05	3.95E-02
6.60E+05	4.05E-02
6.68E+05	4.16E-02
6.76E+05	4.41E-02
6.84E+05	4.43E-02
6.91E+05	4.58E-02
7.00E+05	4.69E-02
7.08E+05	4.94E-02
7.16E+05	5.12E-02
7.24E+05	5.28E-02
7.33E+05	5.75E-02
7.41E+05	5.83E-02
7.50E+05	6.29E-02
7.59E+05	6.35E-02
7.67E+05	6.40E-02
7.76E+05	6.41E-02
7.85E+05	6.50E-02
7.94E+05	6.51E-02
8.04E+05	6.79E-02
8.13E+05	6.80E-02
8.23E+05	7.03E-02
8.32E+05	7.54E-02
8.42E+05	8.26E-02
8.52E+05	8.54E-02
8.62E+05	9.18E-02
8.72E+05	9.98E-02
8.82E+05	1.18E-01
8.92E+05	1.17E-01
9.02E+05	1.27E-01
9.13E+05	1.34E-01
9.23E+05	1.50E-01
9.34E+05	1.66E-01
9.45E+05	1.90E-01
9.56E+05	1.98E-01
9.67E+05	2.00E-01
9.78E+05	2.09E-01
9.90E+05	2.10E-01
1.00E+06	2.11E-01
1.01E+06	2.13E-01
1.02E+06	2.11E-01
1.04E+06	1.95E-01
1.05E+06	1.81E-01
1.06E+06	1.70E-01
1.07E+06	1.57E-01
1.09E+06	1.42E-01
1.10E+06	1.32E-01
1.11E+06	1.23E-01

1.12E+06	1.13E-01
1.14E+06	1.12E-01
1.15E+06	1.04E-01
1.16E+06	8.83E-02
1.18E+06	8.07E-02
1.19E+06	7.55E-02
1.20E+06	7.00E-02
1.22E+06	5.73E-02
1.23E+06	5.26E-02
1.25E+06	4.99E-02
1.26E+06	4.74E-02
1.28E+06	4.52E-02
1.29E+06	4.28E-02
1.31E+06	4.10E-02
1.32E+06	3.95E-02
1.34E+06	3.79E-02
1.35E+06	3.69E-02
1.37E+06	3.57E-02
1.38E+06	3.46E-02
1.40E+06	3.34E-02
1.42E+06	3.25E-02
1.43E+06	3.13E-02
1.45E+06	3.05E-02
1.47E+06	2.94E-02
1.48E+06	2.85E-02
1.50E+06	2.79E-02
1.52E+06	2.71E-02
1.54E+06	2.64E-02
1.55E+06	2.56E-02
1.57E+06	2.52E-02
1.59E+06	2.45E-02
1.61E+06	2.49E-02
1.63E+06	2.40E-02
1.65E+06	2.34E-02
1.67E+06	2.29E-02
1.69E+06	2.24E-02
1.71E+06	2.20E-02
1.72E+06	2.17E-02
1.74E+06	2.13E-02
1.77E+06	2.09E-02
1.79E+06	2.06E-02
1.81E+06	2.03E-02
1.83E+06	2.00E-02
1.85E+06	1.97E-02
1.87E+06	1.93E-02
1.89E+06	1.90E-02
1.91E+06	1.85E-02
1.94E+06	1.80E-02
1.96E+06	1.75E-02

1.98E+06	1.70E-02
2.00E+06	1.68E-02

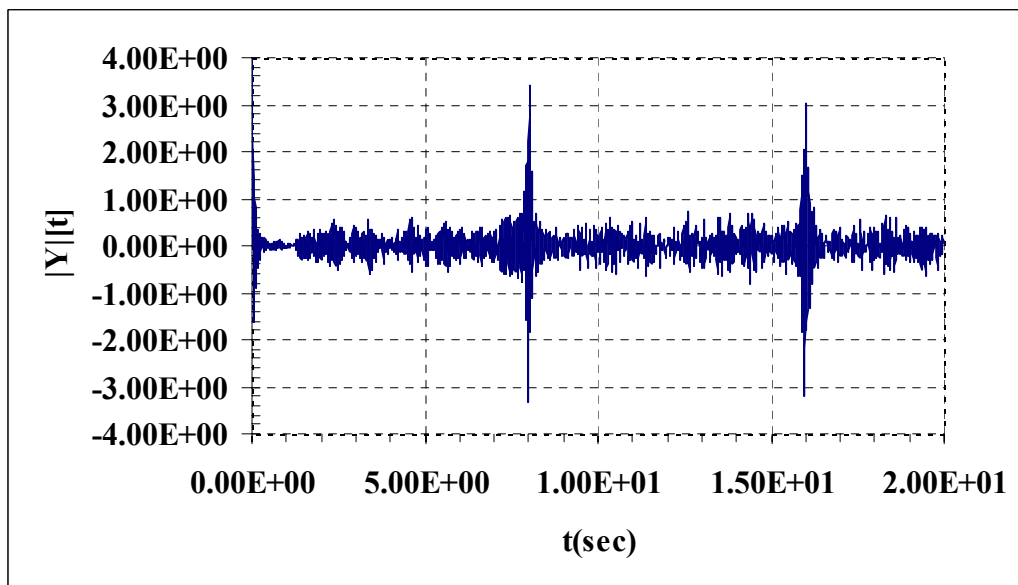
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

Μέτρηση με Impedance Analyser-Μέτρηση με έμμεση μέθοδο



Εικόνα 57 Συγκριτικά αποτελέσματα άμεσης και έμμεσης μέτρησης

Στην συνέχεια αφαιρείται το υλικό, που έχει κολληθεί στην πλάκα και δημιουργείται η οπή, και μετρώντας τις τάσεις στις άκρες των ακροδεκτών και με τη βοήθεια της σχέσης $Z = \frac{V_2}{V_0} R_0 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - R_0$ βρίσκουμε την εμπίδηση και κατά συνέπεια την αγωγιμότητα συναρτήσει του χρόνου.



Εικόνα 58 Αποτελέσματα μετά από εφαρμογή εξισώσεων

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι συνάρτηση της αγωγιμότητας σε σχέση με το χρόνο. Μέσω του προγράμματος Matlab (Παράρτημα II) θα γίνει μετασχηματισμός Fourier για να παρουσιαστεί το φάσμα της αγωγιμότητας (διάγραμμα της αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας) και θα συγκριθεί με το αντίστοιχο φάσμα της αέρας πλάκας με αυτή χωρίς την ύπαρξη της οπής.

f[Hz]	Y[S]
2.00E+05	3.73E-03
2.03E+05	3.77E-03
2.06E+05	3.88E-03
2.09E+05	3.79E-03
2.12E+05	3.93E-03
2.14E+05	3.99E-03
2.17E+05	4.03E-03
2.19E+05	4.06E-03
2.22E+05	4.26E-03
2.24E+05	4.17E-03
2.27E+05	4.30E-03
2.29E+05	4.30E-03
2.32E+05	4.60E-03
2.34E+05	4.50E-03
2.37E+05	4.60E-03
2.39E+05	4.70E-03
2.42E+05	4.80E-03
2.44E+05	4.60E-03
2.47E+05	4.90E-03
2.49E+05	4.70E-03
2.52E+05	4.90E-03
2.55E+05	4.80E-03
2.58E+05	4.90E-03
2.61E+05	5.00E-03
2.64E+05	5.10E-03
2.67E+05	4.90E-03
2.70E+05	4.99E-03
2.73E+05	4.89E-03
2.76E+05	4.95E-03
2.80E+05	5.05E-03
2.83E+05	5.10E-03
2.86E+05	5.20E-03
2.89E+05	5.00E-03
2.93E+05	4.99E-03
2.96E+05	5.11E-03
3.00E+05	5.15E-03

3.03E+05	5.21E-03
3.07E+05	5.25E-03
3.10E+05	5.31E-03
3.14E+05	5.40E-03
3.18E+05	5.51E-03
3.21E+05	5.61E-03
3.25E+05	5.59E-03
3.29E+05	5.60E-03
3.33E+05	5.45E-03
3.36E+05	5.50E-03
3.40E+05	5.61E-03
3.44E+05	5.67E-03
3.48E+05	5.68E-03
3.52E+05	5.69E-03
3.56E+05	5.70E-03
3.61E+05	5.71E-03
3.65E+05	5.80E-03
3.69E+05	5.81E-03
3.73E+05	5.79E-03
3.78E+05	5.85E-03
3.82E+05	5.91E-03
3.87E+05	6.00E-03
3.91E+05	6.10E-03
3.96E+05	5.98E-03
4.00E+05	6.05E-03
4.05E+05	6.10E-03
4.10E+05	6.07E-03
4.14E+05	6.15E-03
4.19E+05	6.18E-03
4.24E+05	6.20E-03
4.29E+05	6.21E-03
4.34E+05	6.25E-03
4.39E+05	6.27E-03
4.44E+05	6.48E-03
4.49E+05	6.78E-03
4.55E+05	7.20E-03
4.60E+05	7.34E-03
4.65E+05	7.67E-03
4.71E+05	7.89E-03
4.76E+05	8.01E-03
4.82E+05	8.23E-03
4.87E+05	8.46E-03

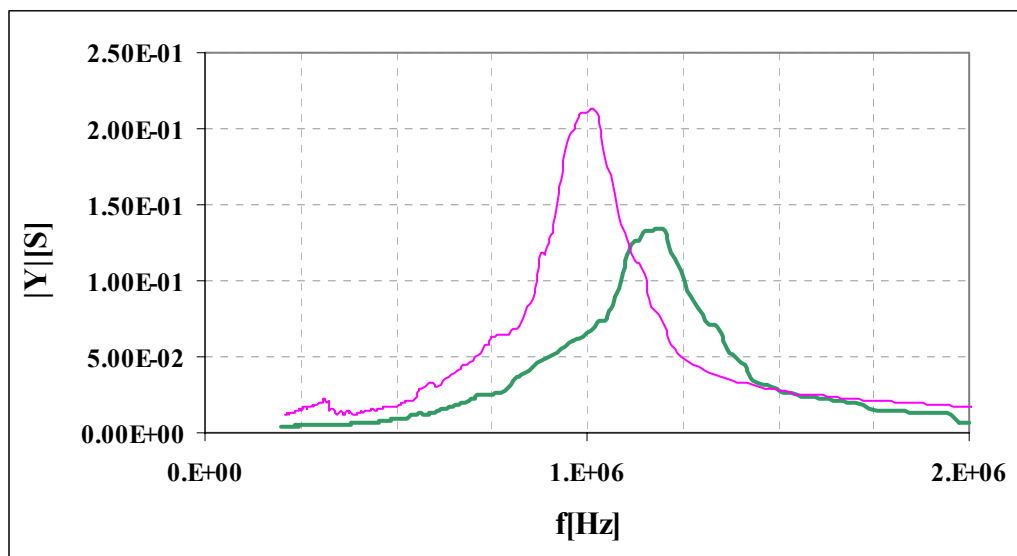
4.93E+05	8.60E-03
4.99E+05	8.70E-03
5.05E+05	8.91E-03
5.10E+05	9.01E-03
5.16E+05	9.20E-03
5.22E+05	9.00E-03
5.28E+05	9.01E-03
5.34E+05	1.08E-02
5.41E+05	1.12E-02
5.47E+05	1.16E-02
5.53E+05	1.23E-02
5.60E+05	1.28E-02
5.66E+05	1.27E-02
5.73E+05	1.24E-02
5.80E+05	1.20E-02
5.86E+05	1.21E-02
5.93E+05	1.33E-02
6.00E+05	1.36E-02
6.07E+05	1.41E-02
6.14E+05	1.47E-02
6.21E+05	1.54E-02
6.29E+05	1.58E-02
6.36E+05	1.62E-02
6.43E+05	1.72E-02
6.51E+05	1.73E-02
6.58E+05	1.78E-02
6.66E+05	1.83E-02
6.74E+05	1.93E-02
6.82E+05	2.00E-02
6.89E+05	2.06E-02
6.98E+05	2.24E-02
7.06E+05	2.27E-02
7.14E+05	2.45E-02
7.22E+05	2.48E-02
7.31E+05	2.50E-02
7.39E+05	2.50E-02
7.48E+05	2.54E-02
7.56E+05	2.54E-02
7.65E+05	2.65E-02
7.74E+05	2.65E-02
7.83E+05	2.74E-02
7.92E+05	2.94E-02

8.01E+05	3.22E-02
8.11E+05	3.50E-02
8.20E+05	3.69E-02
8.30E+05	3.80E-02
8.39E+05	3.92E-02
8.49E+05	4.11E-02
8.59E+05	4.31E-02
8.69E+05	4.57E-02
8.79E+05	4.71E-02
8.89E+05	4.91E-02
9.00E+05	5.01E-02
9.10E+05	5.12E-02
9.21E+05	5.24E-02
9.32E+05	5.48E-02
9.42E+05	5.71E-02
9.53E+05	5.95E-02
9.64E+05	6.10E-02
9.76E+05	6.25E-02
9.87E+05	6.37E-02
9.99E+05	6.57E-02
1.01E+06	6.73E-02
1.02E+06	6.91E-02
1.03E+06	7.43E-02
1.05E+06	7.35E-02
1.06E+06	8.02E-02
1.07E+06	8.45E-02
1.08E+06	9.45E-02
1.10E+06	1.05E-01
1.11E+06	1.20E-01
1.12E+06	1.25E-01
1.13E+06	1.26E-01
1.15E+06	1.32E-01
1.16E+06	1.32E-01
1.17E+06	1.33E-01
1.19E+06	1.34E-01
1.20E+06	1.33E-01
1.22E+06	1.23E-01
1.23E+06	1.14E-01
1.24E+06	1.07E-01
1.26E+06	9.88E-02
1.27E+06	8.96E-02
1.29E+06	8.29E-02

1.30E+06	7.78E-02
1.32E+06	7.14E-02
1.33E+06	7.08E-02
1.35E+06	6.53E-02
1.36E+06	5.56E-02
1.38E+06	5.09E-02
1.40E+06	4.75E-02
1.41E+06	4.41E-02
1.43E+06	3.61E-02
1.45E+06	3.31E-02
1.46E+06	3.14E-02
1.48E+06	2.99E-02
1.50E+06	2.85E-02
1.51E+06	2.70E-02
1.53E+06	2.58E-02
1.55E+06	2.49E-02
1.57E+06	2.39E-02
1.59E+06	2.32E-02
1.60E+06	2.25E-02
1.62E+06	2.18E-02
1.64E+06	2.10E-02
1.66E+06	2.05E-02
1.68E+06	1.97E-02
1.70E+06	1.92E-02
1.72E+06	1.85E-02
1.74E+06	1.54E-02
1.76E+06	1.50E-02
1.78E+06	1.46E-02
1.80E+06	1.42E-02
1.82E+06	1.38E-02
1.84E+06	1.36E-02
1.87E+06	1.32E-02
1.89E+06	1.34E-02
1.91E+06	1.30E-02
1.93E+06	1.26E-02
1.95E+06	1.24E-02
1.98E+06	7.18E-03
2.00E+06	7.05E-03

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προβόλου χωρίς και με τη σπή φαίνεται παρακάτω:

Ακέραιος πρόβολος-Πρόβολος με σπή



Εικόνα 59 Συγκριτικά ακέραιου πρόβολου και πρόβολου με οπή

7.4. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε μια πρακτική μέθοδος για να λαμβάνονται μετρήσεις σύνθετης αντίστασης ή αγωγιμότητας με μεγάλη ευελιξία. Κατασκευάστηκε μια διάταξη για τη μέτρηση της αγωγιμότητας, με την οποία μπορούν να ληφθούν αποτελέσματα χωρίς τη χρήση της «τυπικής» συσκευής του Impedance Analyser. Με τη μέτρηση του ρεύματος (των τάσεων) ενός διαιρέτη τάσης σε ένα απλοποιημένο ηλεκτρικό κύκλωμα και με τη βοήθεια ενός προγράμματος ανάλυσης μετασχηματισμού Fourier, μπορεί να βρεθεί η αγωγιμότητα ενός πιεζοκεραμικού.

Η πειραματική έρευνα έγινε με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα της αυτοσχέδιας διάταξης με τα αποτελέσματα από τον Impedance analyser, παρέχοντας την πληροφορία ότι αποκλίσεις υπάρχουν, αλλά με την βελτίωση του αυτοσχέδιου συστήματος, θα μπορούν να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα με τη χρήση της μεθόδου αυτής σε μη καταστροφικό έλεγχο υλικών.

Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν σχετικά παρόμοια συμπεράσματα με μια απόκλιση της αγωγιμότητας της τάξης του 5-10% και μια απόκλιση από τη συχνότητα συντονισμού της τάξης του 5%.

Η αγωγιμότητα του συστήματος βρέθηκε χρησιμοποιώντας γραμμικές σχέσεις από τις παραμέτρους του ηλεκτρικού κυκλώματος και με τη χρήση ενός προγράμματος μετασχηματισμού σε συνάρτηση Fourier.

Ο μη καταστροφικός έλεγχος μπορεί να γίνει σε σύγκριση από το φάσμα της συνάρτησης της αγωγιμότητας ενός δοκιμίου που παρουσιάζει ατέλεια με το φάσμα της

αγωγιμότητας ενός δοκιμίου χωρίς ατέλεια. Το μέγιστο εύρος της αγωγιμότητας θα μειώνεται με την αύξηση του βάθους της ρωγμής. Η ύπαρξη περισσότερων ρωγμών σε διαφορετικά σημεία θα έχει επίδραση στην ομαλότητα της καμπύλης. Παρόλα αυτά για την καλύτερη και για την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων τα πιεζοκεραμικά ή πιεζοηλεκτρικά θα πρέπει να βρίσκονται σε κατάλληλες θέσεις πάνω στη δοκό.

Έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές καινοτόμες τεχνολογίες για να αντικαταστήσουν τις δυσπρόσιτες οικονομικά συσκευές και να συμβαδίσουν στην ακρίβεια των μετρήσεων των συσκευών αυτών. Μια μελλοντική εργασία, εκτός από την βελτιστοποίηση της διάταξης, είναι και η δημιουργία ασύρματου δικτύου λήψης-αποστολής των πληροφοριών-δεδομένων. Με τη κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος, ο χρήστης θα μπορεί να διαχειριστεί πληροφορίες από ένα ή περισσότερα πιεζοηλεκτρικά που θα βρίσκονται στη δομή του υπό εξέταση υλικού. Επιπλέον, με τη χρήση του ασύρματου συστήματος μη καταστροφικού ελέγχου των υλικών θα μπορούν να μεταφερθούν περισσότερα δεδομένα με μεγαλύτερες ταχύτητες αφού η ενσύρματη σύνδεση περιορίζει τον αριθμό των ληφθέντων δεδομένων λόγω της μικρής ταχύτητας απόκρισής της. Ως επί τω πλείστω, με την κατασκευή ασύρματης διάταξης εξοικονομείται ενέργεια από το σύστημα, ενώ οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν πιο άμεσα χωρίς τη χρονοβόρα διαδικασία της σύνδεσης της μετρητικής διάταξης με την πειραματική.

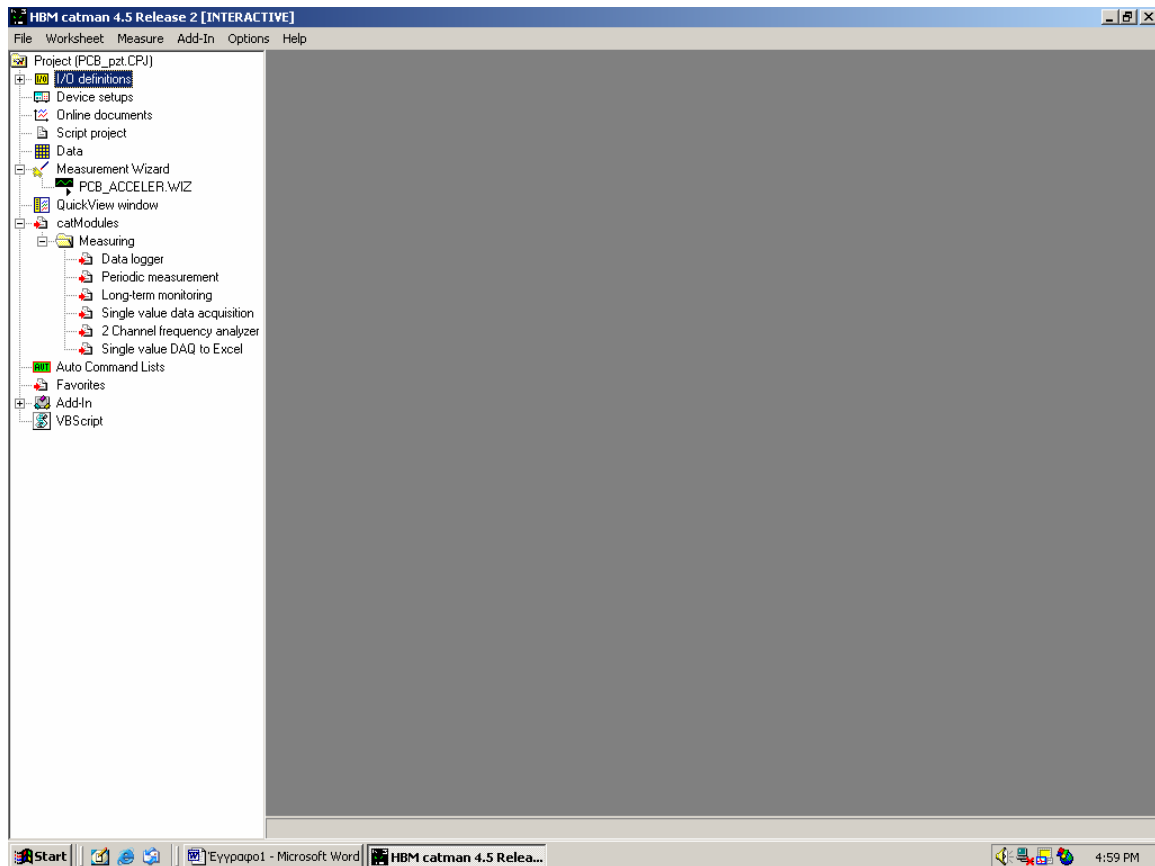
Η ασύρματη συσκευή θα είναι ευκολότερη και πιο ευέλικτη από τις «παραδοσιακές» μεθόδους μέτρησης της αγωγιμότητας. Όλες οι λειτουργίες του παρόντος συστήματος θα εμπεριέχονται σε ένα μικρό chip, που θα επιτρέπει τη μελέτη πολυπλοκότερων δομών από αυτών μια απλής δοκού ή πλάκας και θα απαλοίφει την πολυπλοκότητα των ηλεκτρικών συστημάτων και κυκλωμάτων. Θα μπορούν να ληφθούν περισσότερα δείγματα από τις περιοχές ενδιαφέροντος και θα μπορεί να ελέγχεται και η τυχόν αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία επηρεάζει την ορθότητα των μετρήσεων.

Η παρούσα εργασία έδωσε την ευκαιρία στον μελετητή να ασχοληθεί με τη συμπεριφορά των πιεζοκεραμικών στοιχείων, να εισαχθεί στην έννοια της σύνθετης αντίστασης και αγωγιμότητας και στα πρώτα στάδια ενός μη καταστροφικού ελέγχου στα υλικά. Κατασκευάστηκε μια διάταξη που μπορεί να μην είναι ισοδύναμη μιας ήδη υπάρχουσας διάταξης, αλλά με τη βελτίωσή της, μπορεί να αποδόσει αρκετά κοντά στην ιδανική λειτουργία μιας συσκευής του εμπορίου.

Παράρτημα 1

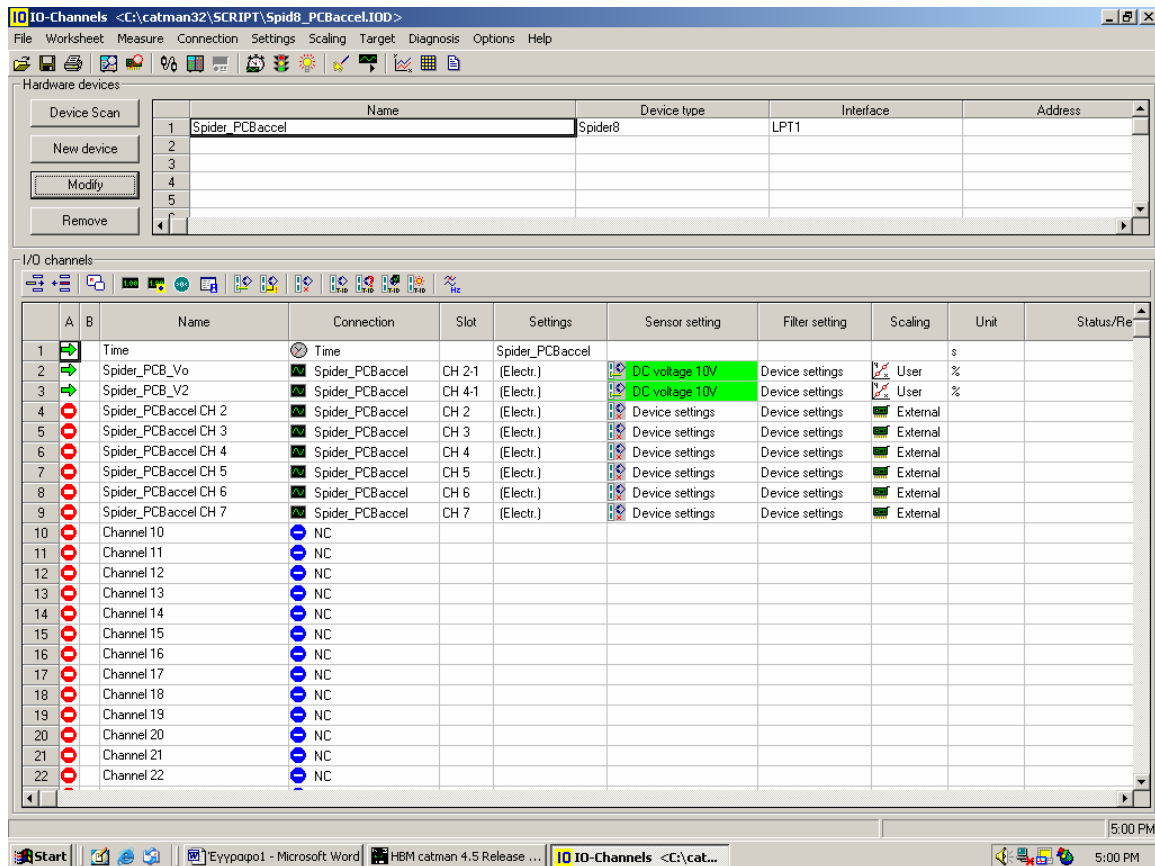
Χρήση του προγράμματος Catman 4.5

Το πρόγραμμα Catman 4.5 χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων από την κάρτα Spider 8 στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Είναι το λογισμικό με το οποίο ορίζουμε παραμέτρους μέτρησης για την κατάλληλη απόδοση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 60 Κύριο μενού προγράμματος Catman 4.5

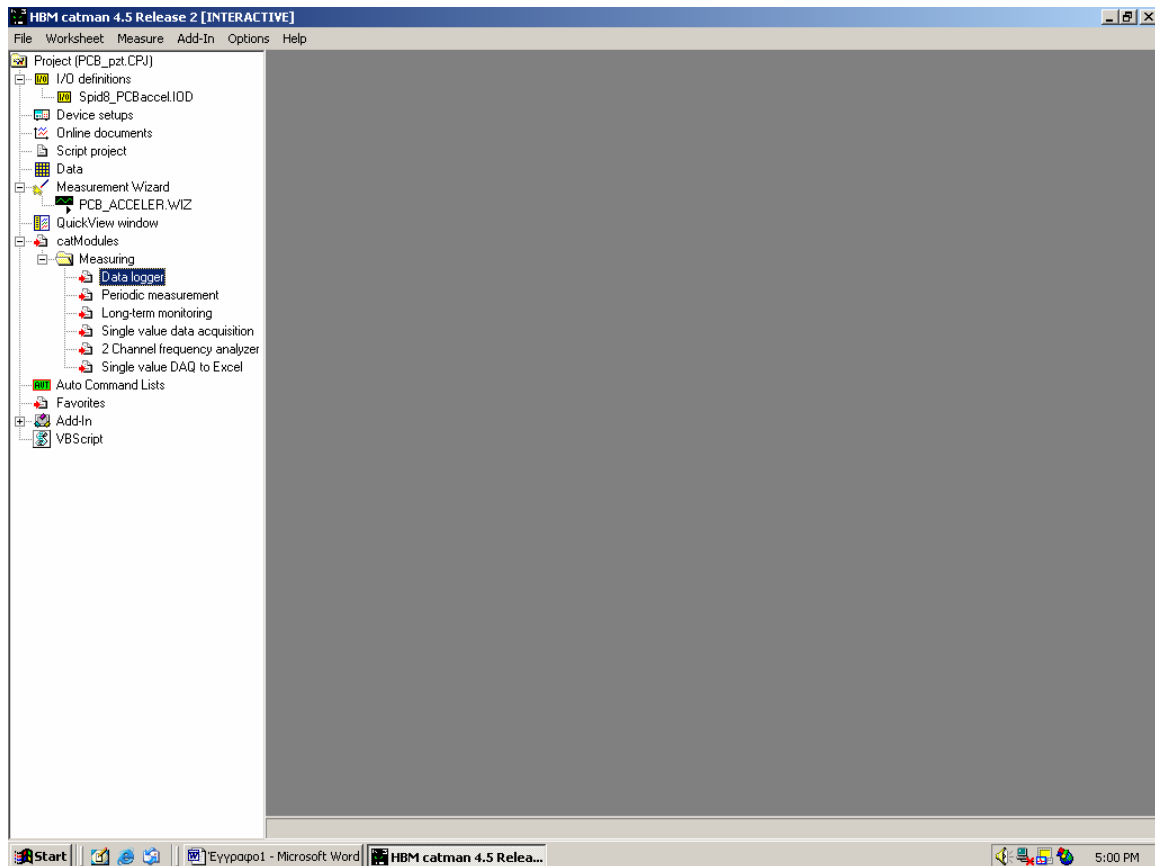
Στην πρώτη οθόνη προβολής παρουσιάζεται το κύριο μενού. Από την επιλογή *I/O Definitions* ορίζουμε τα μεγέθη μέτρησης και τα κανάλια της κάρτας που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο προσδιορισμός των παραμέτρων και των καναλιών.



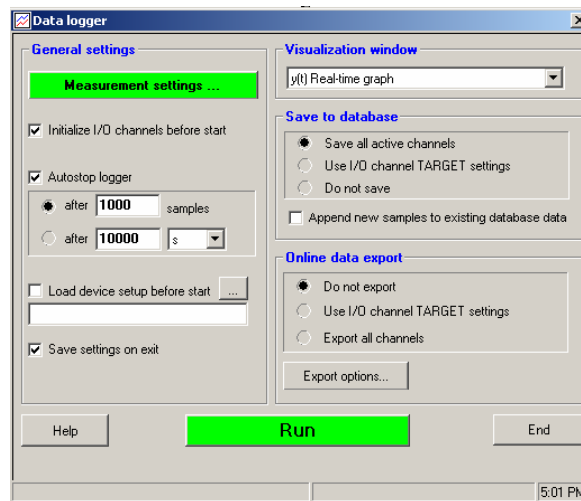
Εικόνα 61 Ορισμός παραμέτρων και καναλιών μέτρησης

Ορίστηκαν τα μεγέθη υπό μέτρηση και τα κανάλια εν ενεργεία (τα ενεργά κανάλια της κάρτας που επιλέχτηκαν είναι τα channel 2 και channel 4), και ορίστηκε ότι τα υπό μέτρηση μεγέθη θα είναι ηλεκτρική τάση (σε ποσοστό της %).

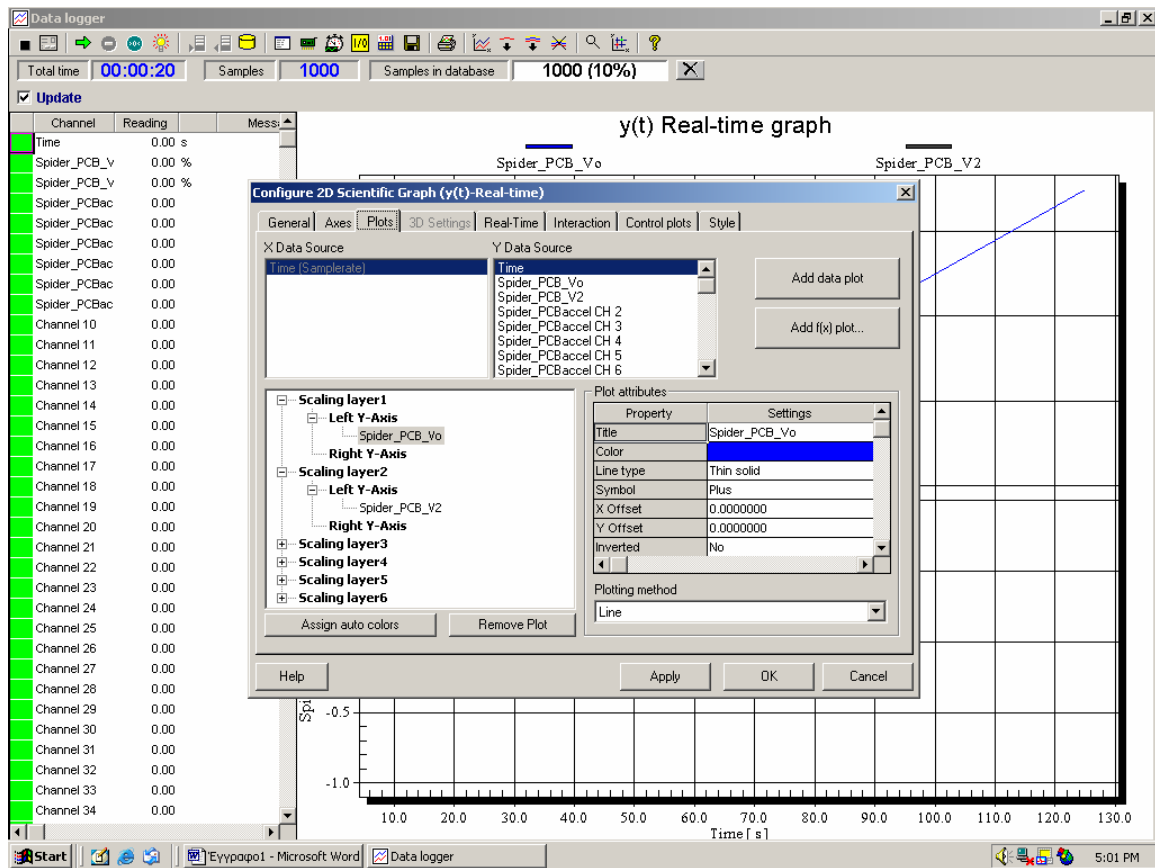
Από το μενού *Measuring* έγινε η επιλογή *Data logger* και ορίστηκαν τα βήματα μέτρησης και η μέθοδος απικόνεισης των γραφημάτων και έγινε η έναρξη της καταγραφής.



Εικόνα 62 Μενού Measuring και Data Logger για τη διαδικασία μέτρησης

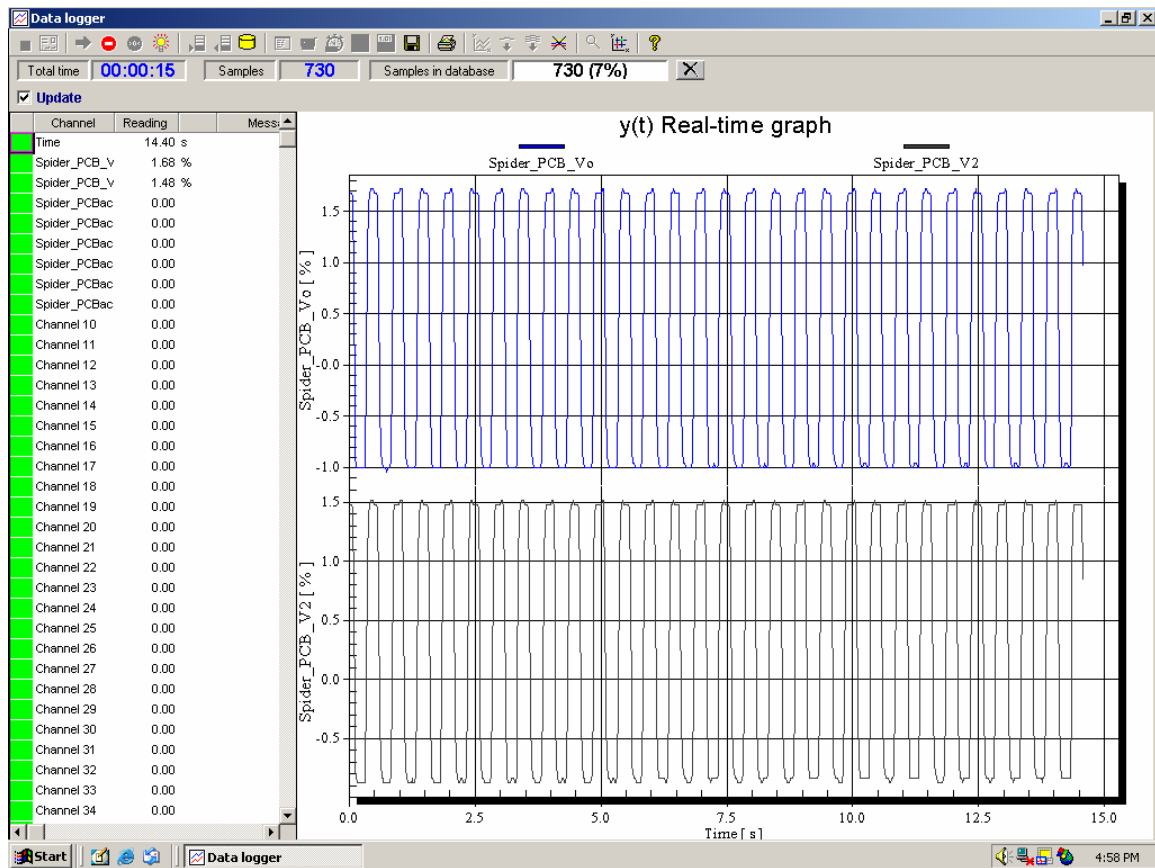


Εικόνα 63 Ορισμός βημάτων μέτρησης και επιλογή τύπου γραφήματος



Εικόνα 64 Επιλογή μορφής γραφήματος

Μια μορφή αποτελεσμάτων είναι αυτή που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 61*.



Εικόνα 65 Αποτελέσματα μετρήσεων-μεταβολή τάσεων με το χρόνο

Παράρτημα 2

Χρήση του προγράμματος Matlab

Τα αποτελέσματα μέσω της κάρτας Spider δίνουν την τάση και κατά συνέπεια και τη σύνθετη αγωγιμότητα με τον τρόπο που παρατέθηκε παραπάνω σε σχέση με τον χρόνο. Για να δοθούν τα αποτελέσματα αυτά σε σχέση με την συχνότητα θα χρησιμοποιηθεί το Πρόγραμμα Matlab.

Στο Matlab συντάχτηκε ο κώδικας Fourier για το μετασχηματισμό του αρχικού διαγράμματος σε FFT-διάγραμμα :

```
Y=input('Admittance Vector: ');
dt=input('Time step dt[sec]: ');
fmin=input('Lower frequency fmin[Hz]: ');
fmax=input('Higher frequency fmax[Hz]: ');
df=input('Frequency step df[Hz]: ');

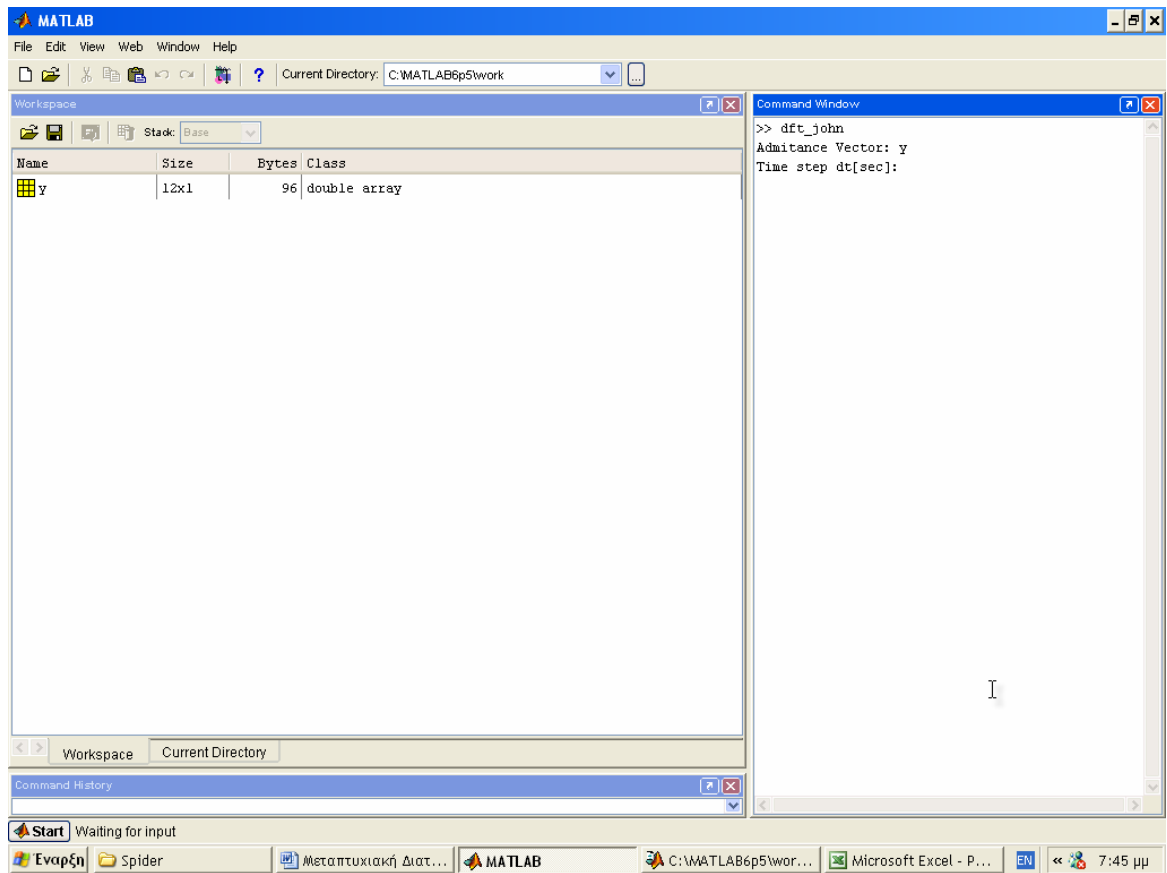
% Initialization
N=length(Y);
t=0:dt:(N-1)*dt;
f=fmin:df:fmax;
M=length(f);
FA=zeros(size(f));

% DFT (Discrete Fourier Transform) calc
for k=1:M
    c=0;
    for i=1:N
        c=c+Y(i)*exp(sqrt(-1)*(i-1)*dt*2*pi*f(k));
    end
    FA(k)=c;
end

% Post Processing
FAamp=sqrt(real(FA).^2+imag(FA).^2);

% Plots
subplot(2,1,1)
plot(t,Y,'linewidth',1.5);
grid on
xlabel('Time t[sec]');
ylabel('Admittance [siemens]');

subplot(2,1,2)
plot(f,FAamp,'linewidth',1.5);
grid on
xlabel('frequency f[Hz]');
ylabel('Fourier Amplitude FA_a_m_p[siemens*sec]');
```



Εικόνα 66 Το πρόγραμμα Matlab 6.5 με την εκτέλεση του κώδικα

Βιβλιογραφία

Akella, P., Chen, X., Cheng, W., Hughes, D., Wen, J., “Modeling and Control of Smart Structures with Bonded Piezoelectric Sensors and Actuators,” *Smart Materials and Structures*, Κεφ 3, 1994, pp. 344-353.

Allik, H., and Hughes, T. J. R., “Finite Element Method for Piezoelectric Vibration,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Κεφ. 2, 1970, pp. 151 - 157.

Anderson, E. H., Moore, D. M., and Fanson, J. L., “Development of an Active Member using Piezoelectric and Electrostrictive Actuation for Control of Precision Structures,” *Jet Propulsion Lab*

Asanuma, H., Ichikawa, K., and Kishi, T., “Health Monitoring of a Continuous Fiber Reinforced Aluminum Composite with Embedded Optical Fiber,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 7, Μάιος 1996, 307 - 311.

Ashley, S., “Getting a Microgrip in the Operating Room,” *Mechanical Engineering*, Σεπτέμβριος 1996, pp. 91 – 93

Ashley, S., “Helicopter Rotor Does the Twist,” *Mechanical Engineering*, Σεπτέμβριος 1996, pp. 25 - 26.

Ashley, S., “Shape-Memory Valve Prevents Scalding,” *Mechanical Engineering*, Αύγουστος 1996, σελίδα. 12.

Ashley, S., “Smart Skis and other Adaptive Structures,” *Mechanical Engineering*, Νοέμβριος 1995, pp. 76 - 81.

Bailey, T., and Hubbard, J. E., “Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam,” *Journal of Guidance*, Κεφ. 8, No. 5, Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 1985, pp. 605 - 611.

Bailey, T., Gruzen, A., Madden, P., “RCS/Piezoelectric Distributed Actuator Study,” *Final Report for USAF Astronautics Laboratory (AFAL) Σύμβαση F04611-85-K- 0050*, Αύγουστος 1988.

Bar-Cohen, Y., 1986, “NDE of Fiber-Reinforced Composite Materials-A Review,” *Materials Evaluation*, Κεφ. 44, pp. 446-454.

Basheer, M.R., Rao, V., and Derriso, M., 2003, “Self Organizing Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring,” *Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Σεπτέμβριος 15-17, Stanford, CA, pp. 1193-1207.

Baz, A., and Poh, S., “Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators,” *Journal of Sound and Vibration*, Κεφ. 126, No. 2, 1988, pp. 327 - 343.

Bechmann, R., *Zeitschrift für Physik*, Κεφ. 118, 1941, σελίδα 515

Bois, C., and Hochard, C., 2003, "Damage Monitoring in CFRP Laminated Composites Using Dynamic Measurements," Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Σεπτέμβριος 15-17, Stanford, CA, pp. 742-748.

Bois, C., and Hochard, C., 2004, "Monitoring of Laminated Composites Delamination Based on Electro-mechanical Impedance Measurement," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 15, No. 1, pp. 59-67.

Cady, W.G., *Piezoelectricity, Volume Two*, Dover Books, 1946.

Callister, Jr., W.D., 1997, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

Chandrashekhara, K., and Agarwal, A.N., "Dynamic modeling of piezoelectric plates using finite element method," *Proceedings, SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, Albuquerque, NM, Κεφ. 1917, SPIE Publishing, Bellingham, WA, 1993, pp. 451-460.

Chaudhry, Z., Lalande, F., Ganino, A., and Rogers, C.A., 1995, "Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors," 45th AIAA/ASME//ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, New Orleans, LA, pp. 2243-2248.

Chaudhry, Z., and Rogers, C.A., "The pin-force model revisited", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 5, 1994, pp. 347-354.

Chien, P., Chang, Y., and Chang, M., "Vibration Suppression in a Flexible Structure Based on Fiber Optics Michelson Interferometric Sensor," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 7, Ιανουάριος 1996, pp. 65 - 70.

Collins, S. A., Miller, D. W., and von Flotow, A., "Piezopolymer Spatial Filters for Active Structural Control," *Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, 1991.

Crawley, E. F., "Intelligent Structures for Aerospace: A Technology Overview and Assessment," *AIAA Journal*, Κεφ. 32, No. 8, Αύγουστος 1994, pp. 1689 - 1699.

Crawley, E. F., and Anderson, E. H., "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," *AIAA paper 89-1388-CP*, 1989.

Crawley, E. F., and de Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Κεφ. 25, No. 10, 1987, pp. 1373 - 1385.

Crawley, E.F., and Lazarus, K.B., "Induced Strain Actuation of Isotropic and Anisotropic Plates," *AIAA Journal*, Κεφ. 29, No. 6, 1989, pp. 944-951.

Culshaw, B., Michie, C., Gardiner, P., and McGown, A., "Smart Structures and Applications in Civil Engineering," *Proceedings of the IEEE*, Κεφ. 84, No. 1 Ιανουάριος 1996, pp. 78 - 86.

de Luis, J. and Crawley, E. F., "Experimental Results of Active Control on a Prototype Intelligent Structure," *AIAA paper 90-1163-CP*, 1990, pp. 2340-2350.

Denoyer, K. K., and Kwak, M. K., "Dynamic Modeling and Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators," *USAF Phillips Lab*

Detwiler, D.T., Shen, M.H., and Venjayya, V.B., "Two-dimensional finite element analysis of laminated composite plates containing distributed piezoelectric actuators and sensors," *AIAA/ASME Forum on Adaptive Structures*, Hilton Head, SC, 1994, pp. 451-460.

Diaz Valdes, S.H., and Soutis, C., 1999, "Delamination Detection in Composite Laminates from Variations of their Modal Characteristics," *Journal of Sound and Vibration*, Κεφ. 228-1, pp. 1-9.

Dimitriadis, E.K., Fuller, C.R., Rogers, C.A., "Piezoelectric actuators for distributed vibration excitation of thin plates," *Journal of Vibration and Acoustics*, Κεφ. 113, Ιανουάριος 1991, pp. 100-107.

Doebling, S.W., Farrar, C.R., and Prime, M.B., 1998, "A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods," *The Shock and Vibration Digest*, Κεφ. 30, No. 2, pp. 91-105.

Dugnani, R., and Malkin, M., 2003, "Damage Detection on a Large Composite Structure," Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Σεπτέμβριος 15-17, Stanford, CA, pp. 301-309.

Eckstein, H., "Free Vibrations of Anisotropic Bodies", *Physical Review*, Κεφ. 66, Σεπτέμβριος 1 και 15, 1944, pp. 108-118.

Fairweather, James, "Designing with Active Materials: an Impedance Based Approach," Doctoral Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 1998.

Garcia, E., and Inman, D. J., "Advantages of Slewing an Active Structure," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 1, Ιούλιος 1990, pp. 261 - 272.

Giurgiutiu, V., Zagrai, A., and Bao, J.J., 2002, "Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring," *International Journal of Structural Health Monitoring*, Κεφ. 1, pp. 41-61.

Grisso, B.L., Leo, D.J., and Inman, D.J., 2004a, "Temperature Influences on the Wave Propagation Technique for use in Supplementing Impedance-Based Structural Health Monitoring," Proceedings of SPIE's 9th International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, Μάρτιος 14-18, San Diego, CA, Κεφ. 5394, pp. 222-232.

Grisso, B.L., Peairs, D.M., and Inman, D.J., 2004b, "Impedance-based Health Monitoring of Composites," Proceedings of IMAC XXII, Ιανουάριος 26-29, Dearborn, MI.

Grisso, B.L., Peairs, D.M, and Inman, D.J., 2004c, "Detecting Damage in Graphite/Epoxy Composites using Impedance-based Structural Health Monitoring" Proceedings of the International Conference on Advances in Experimental Mechanics, Σεπτέμβριος 6-8, York, UK, pp. 185-190.

Ha, S. K., Keilers, C., and Chang, F., "Analysis of Laminated Composites Containing Distributed Piezoelectric Ceramics," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 2, Ιανουάριος 1991, pp. 59 - 71.

Ha, S. K., Keilers, C., and Chang, F., "Finite Element Analysis of Composite Structures Containing Distributed Sensors and Actuators," *AIAA Journal*, Κεφ. 30, No. 3, Μάρτιος 1992.

Ha, S. K., Keilers, C., Chang, F., "Finite Element Modeling of Response of Laminated Composites with Embedded Piezoelectric Actuators," *Proceedings, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 31st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Long Beach, CA, AIAA Publishing, Washington, DC, 1990, pp. 2323- 2330.

Hadjiprocopiou, M., Reed, G. T., Holloway, L., Thorne, A. M., and Garden, H., "Experimental Results and Finite Element Modeling of an Embedded Polarimetric Sensor," *Composites*, Κεφ. 26, Νοέμβριος. 11, 1995, pp. 775 - 783.

Hagood, N. W., Aldrich, J. B., von Flotow, A. N., "Design of Passive Piezoelectric Damping for Space Structures," *NASA Contractor Report 4625*, Σεπτέμβριος 1994.

Hagood, N. W., and von Flotow, A., "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," *Journal of Sound and Vibration*, Κεφ. 146, No. 2, 1991, pp. 243 - 268.

Hagood, N. W., Chung, W. H., and von Flotow, A., "Modeling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 1, Ιούλιος 1990, pp. 327 - 354.

Hagood, N. W., Crawley, E. F., de Luis, J., Anderson, E. H., "Development of Integrated Components for Control of Intelligent Structures," *American Control Conference*, Atlanta, GA, 1988, pp. 1890 – 1896.

Hanagud, S., and Babu, G. L. N., "Smart Structures in the Control of Airframe Vibrations," *Journal of the American Helicopter Society*, Απρίλιος 1994, pp. 69 - 72.

Hanagud, S., Obal, M., W., and Calise, A. J., "Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Κεφ. 15, No. 5, Σεπτέμβριος - Οκτώβριος 1995, pp. 1199 - 1206.

Heartling, G., "Rainbow Ceramics - A New Type of Ultra-High-Displacement Actuator," *American Ceramic Society Bulletin*, Κεφ. 73, No. 1, 1994, pp. 93-96.

Hedayat, A., Rechtien, J., and Mukherjee, K., "The Effect of Surface Constraint on the Phase Transformation of Nitinol," *Journal of Material Science*, Κεφ. 27, 1992, pp. 5306 - 5314.

Heiken, G.H., Vaniman, D.T., and French, B.M., 1991, *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*, Cambridge University Press, New York, NY.

Holmes, M. H., *Introduction to Perturbation Methods*, Springer-Verlag New York, Inc., 1995.

Hwang, W.S., and Park, H.C., "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," *AIAA Journal*, Κεφ. 31, No. 5, 1993, pp.930-937.

Hyer, M.W., 1998, *Stress Analysis of Fiber Reinforced Composite Materials*, The McGraw Hill Companies, Inc., New York, NY.

Ikegami, R., Wilson, D. G., Laakso, J. H., "Advanced Composites with Embedded Sensors and Actuators (ACESA)," *Final Report for USAF Astronautics Laboratory (AFSC) Contract F04611-88-C-0053, Boeing Report 4001*, Ιούλιος 1990.

Inman, D.J., 2001, *Engineering Vibration*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Islam, A. S., and Craig, K. C., "Damage Detection in Composite Structures using Piezoelectric Materials," *Smart Materials and Structures*, Κεφ. 3, 1994, pp. 318 - 328.

Johnson, B. G., "Development of Advanced Electromagnetic Actuators," *USAF Astronautics Laboratory (AFSC) SBIR Report for Contract No. F04611-89-C-0009*, Απρίλιος 1992.

Joshi, S., "Non-Linear Constitutive Relations for Piezoceramic Materials," *Smart Materials and Structures*, Vol. 1, No. 1, 1992, pp. 80-83. Kienholz, D. A., "Modular Piezoelectric Damping Element for Flexible Structures," *USAF*

Phillips Laboratory, *OLAC-PL/VTSS SBIR Report for Contract No.F29601-92-C- 0080*, Μάιος 1993.

Kabeya, K., Jiang, Z., and Cudney, H.H., 1998, "Structural Health Monitoring by Impedance and Wave Propagation Measurement," *Proceedings of the 4th International Symposium on Motion and Vibration Control*, Αύγουστος 25-28, Zurich, Switzerland, pp. 207-212.

Kander, R.G., 1991, "A Study of Damage Accumulation in Unidirectional Glass Reinforced Composites via Acoustic Emission Monitoring," *Polymer Composites*, Κεφ. 12, No. 4, pp. 237- 245.

Kessler, S.S. and Spearing, S.M., 2002a, "Design of of a piezoelectric-based structural health monitoring system for damage detection in composite materials," *Proceedings of SPIE's 9th International Symposium on Smart Structures and Materials*, Μάρτιος 17-21, San Diego, CA, Κεφ. 4701, pp. 86-96.

Kessler, S.S. and Spearing, S.M., 2002b, "In-Situ Sensor-Based Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring," *Proceedings of the*

AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 43rd Structures, Structural Dynamics, & Materials Conference, Απρίλιος 22-25, Denver, CO.

Kim S.J., Jones J.D., "Optimization of Piezo-Actuator/Substructure Coupling for Active Noise and Vibration Control," *Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, edited by Fuller C.R., Rogers C.A., Virginia Polytechnic Institute, 1991, pp. 78-91.

Lalande, F., "Modeling of the Induced Strain Actuation of Shell Structures," Doctoral Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 1995.

LaPeter, C., Cudney, H.H., "Design Methodology for Piezoelectric Actuators," AD-Vol. 24/AMD-Vol. 123, *Smart Structures and Materials*, 1991, pp. 139-143.

Lazarus, K. B., and Crawley, E.F., "Multivariable High - Authority Control of Plate – Like Active Structures," *AIAA Paper No. 92-2529*, 33rd SDM Conf, 1992.

LCR Measurement Primer-Quadtech

Liang, C., and Rogers, C.A., "Behavior of Shape Memory Alloy Actuators Embedded in Composites," *Proceedings of the 1989 International Composites Conference*, Beijing, Κίνα, 1-4 Αύγουστος 1989, pp. 475-482.

Liang, C., Sun, F.P., Rogers, C.A., "Dynamic Output Characteristics of Piezoelectric Actuators," *SPIE*, Κεφ. 1916, 1993a, pp. 341-352.

Liang, C., Sun, F.P., Rogers, C.A., "An Impedance Method for Dynamic Analysis of Active Material Systems," *Collection of Technical Papers- AIAA/ASME Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference from the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 1993b, pp. 3587-3599.

Liang, C., Sun, F.P., Rogers, C.A., "Electro-mechanical impedance modeling of active material systems", *Proceedings of the Smart Structures and Materials Conference*, Orlando, SPIE Κεφ. 2192, 1994, pp. 232-253.

Liang, C., Sun, F.P., Rogers, C.A., "Determination of Design of Optimal Actuator Location and Configuration Based on Actuator Power Factor," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 6, Ιούλιος 1995, pg. 456-464.

Lin, M.W., Abatan, A.O., Rogers, C.A., "Application of Commercial Finite Element Codes for the Analysis of Induced Strain-Actuated Structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 5, Νοέμβριος 1994, pg. 869-875.

Lin, M.W., and Rogers, C.A., "Formulation of Beam Structure with Induced Strain Actuators Based on an Approximated Linear Shear Stress Field," *Proceedings, Recent Advances in Active Noise and Vibration Control*, Blacksburg, VA. Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, 1992, pp. 363-376.

Littlefield Andrew George "Application of the Impedance Method of Modeling Active Materials to Plate Structure (May 2000)

Lomenzo R.A., Sumali H., Cudney H.H., "Maximizing Mechanical Power Transfer from Piezoceramic Stacked Actuators to Structures," Carman, G.P., and Garcia, E., *Adaptive Structures and Material Systems*, AD- Vol.35, ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, La., Νοέμβριος. 28 - Δεκέμβριος. 3, 1993, pp. 229-245.

Lynch, J.P., Sundararajan, A., Law, K.H., Sohn, H., and Farrar, C.R., 2004a, "Design of a Wireless Active Sensing Unit for Structural Health Monitoring," Proceedings of SPIE's 11th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, March 14-18, San Diego, CA. Κεφ. 5394, pp. 157-168.

Lynch, J.P., Sundararajan, A., Law, K.H., Kiremidjian, A.S., and Carryer, E., 2004b, "Embedding Damage Detections Algorithms in a Wireless Sensing Unit for Operational Power Efficiency," *Smart Materials and Structures*, Κεφ. 13, pp. 800-810.

Love, A.E.H., *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, Dover Publications, 4th Edition, New York, 1944.

MacNeal, R.H., *Finite Elements: Their Design and Performance*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1994.

McDearmon, G. F., "The Addition of Piezoelectric Properties to Structural Finite Element Programs by Matrix Manipulations," *Journal of the Acoustic Society of America*, Κεφ. 76, No. 3, Σεπτέμβριος 1984, pp. 666 - 669.

Measures, Raymond M., "Advances Toward Fiber Optic Based Smart Structures," *Optical Engineering*, Κεφ. 31, No. 1, Ιανουάριος 1992, pp. 34 - 47.

Miller, S. E., and Hubbard, J., "Smart Components for Structural Vibration Control," *Paper No. FA7 - 11:15*, pp.1897 - 1902.

Mollenhauer, D.H., Hayden-Griffin, O., "Induced Strain Actuation of Surface Bonded Piezoceramic Patches: A Numerical and Experimental Study," *Journal of Intelligent*

Material Systems and Structures, Κεφ. 5, Μάιος 1994, pp. 355-362.

Morgan Matroc, Inc., "Guide to Modern Piezoelectric Ceramics," 1993.

Morgan Matroc, Inc., TP-218, "Flexure Mode Piezoelectric Transducers."

Moulson, A.J., and Herbert, J.M., *Electroceramics: Materials, Properties and Applications*, Chapman and Hall, 1990.

Nagaya, K., and Ryu, H., "Deflection Shape Control of a Flexible Beam by Using Shape Memory Alloy Wires under the Genetic Algorithm Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 7, Μάιος 1996, pp. 336 - 341.

NASA Technical Memorandum 107861, "A State of the Art Assessment of Active Structures," Σεπτέμβριος 1992.

Neumann, D., "Adaptronik - The Governmental German Activities in the Field of Smart Structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 7, Μάρτιος. 1996, pp. 246 -248.

Norton, M.P., *Fundamental of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, Cambridge University Press, 1989.

O'Brien, T.K., Johnston, N.J., Raju, I.S., Morris, D.H., and Simonds, R.A., 1987, "Comparisons of Various Configurations of the Edge Delamination Test for Interlaminar Fracture Toughness," *Toughened Composites ASTM STP 937*, pp. 199-221.

Osmont, D., Dupont, M., Gouyon, R., Lemistre, M, and Balageas, D., 2000, "Damage and Damaging Impact Monitoring by PZT Sensors-Based HUMS," *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation*, Κεφ. 3986, pp. 85-92.

Pan J., Hansen C.H., Snyder S.D., "A Study of the Response of a Simply Supported Beam to Excitation by a Piezoelectric Actuator," *Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, edited by Fuller C.R., Rogers C.A., Virginia Polytechnic Institute, 1991, pp. 39-49.

Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R., and Inman, D.J., 2003, "Overview of Piezoelectric Impedance- Based Health Monitoring and Path Forward," *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, Issue 6, pp. 451-463.

Paula, G., "Detecting Pipe Corrosion," *Mechanical Engineering*, Oct 1996, pg. 10.

Paula, G., "MEMS Sensors Branch Out," *Mechanical Engineering*, Oct 1996, pp. 64 - 68.

Peairs, D.M., Grisso, B.L., Margasahayam, R.N., Page, K.R., and Inman, D.J., 2004a, "Impedance-based Health Monitoring of Space Shuttle Ground Structures," *Proceedings of SPIE's 9th International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics*, Μάρτιος 14- 18, San Diego, CA, Κεφ. 5394, pp. 99-107.

Peairs, D.M., Park, G., and Inman, D.J., 2004b, "Improving Accessibility of the Impedance-based Structural Health Monitoring Method," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 15, No. 2, pp. 129-140.

Petrž ilka, V., "Längsschwingungen von rechteckigen quarzplatten", *Zeitschrift für Physik*, Κεφ. 97, 1935, pp. 436-454.

Piefort Vincent "Thesis submitted in candidature for the degree of Doctor in Applied Sciences" Academic Year 2000-2001

Piezo Systems, Inc., <http://www.piezo.com/histry.html>, 1996.

Poh, S., and Baz, A., "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 1, Ιούλιος 1990, pp. 273 - 288.

Prosser, W.H., Jackson, K.E., Kellas, S., Smith, B.T., McKeon, J., and Friedman, A., 1995, "Advanced, Waveform Based Acoustic Emission Detection of Matrix Cracking in Composites," *Materials Evaluation*, Κεφ. 53, No. 9, pp. 1052-1058.

Pyles, R., 2003, *Aging Aircraft: USAF Workload and Material Consumption Life Cycle Patterns*, RAND, Arlington, VA.

Raju, V., Park, G., and Cudney, H., 1998, "Impedance-based Health Monitoring Technique of Composite Reinforced Structures," Proceedings of 9th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Οκτώβριος 14-16, Cambridge, MA, pp. 448-457.

Rogers, C. A., Liang, C., and Fuller, C. R., "Modeling of Shape Memory Alloy Hybrid Composites for Structural Acoustic Control," *Journal of the Acoustic Society of America*, Κεφ. 89, No. 1, Ιανουάριος 1991, pp. 210 - 220.

Rossi, A., Liang, C., and Rogers, C.A., "Impedance Modeling of Piezoelectric Actuator-Driven Systems: An Application to Cylindrical Ring Structures", *Proceedings, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, La Jolla, CA, AIAA Publishing, Washington, DC, 1993, pp. 3618-3624.

Rutherford, A.C., Park, G. Sohn, H., and Farrar, C.R., 2004, "Structural Health Monitoring Using Macro-Fiber Composites and Impedance Methods," 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Απρίλιος 19-22, Palm Springs, CA.

Sazonov, E., Jonoyan, K., and Jha, R., 2004, "Wireless Intelligent Sensor Network for Autonomous Structural Health Monitoring," Proceedings of SPIE's 11th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Μάρτιος 14-18, San Diego, CA, pp. 5384-5394.

Seo, D. C., and Lee, J. J., "Effect of Embedded Fiber Sensors on Transverse Spacing of Smart Composite Structures," *Composite Structures*, Κεφ. 32, 1995, pp. 51 -58.

Seo, D. C., Lee, J. J., and Yun, S. J., "The Mechanical Characteristics of Smart Composite Structures with Embedded Optical Fiber Sensors," *Composite Structures*, Κεφ. 32, 1995, pp. 39 -50

Sermoneta, A., Liang, C., Sun, F., and Rogers, C.A., "Dynamic Analysis of Active Structures Under Multiple Actuator Excitations using an Impedance Approach," *SPIE*, Κεφ. 2443, 1995, pp. 448-457.

Shah, D.K., Chan, W.S., and Joshi, S.P., "Structural Response of Plates with Piezoceramic Layers," *Proceedings, SPIE Conference on Smart Structure and Materials*, Albuquerque, NM, Vol. 1917, SPIE Publishing, Bellingham, WA, 1993b, pp. 428-439.

Shah, D.K., Chan, W.S., and Joshi, S.P., "Finite Element Analysis of Plates with Piezoelectric Layers," *Proceedings, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 34th Structures*,

Structural Dynamics and Materials Conference, La Jolla, CA, AIAA Publishing, Washington, DC, 1993, pp. 3189-3197.

Shape Memory Applications, Inc. Company Literature and Web Site.

Siggerud, K., 2002, "Highway Infrastructure: Physical Conditions of the Interstate Highway System Have Improved, but Congestions and Other Pressures Continue," Testimony before the Subcommittee on Highways and Transit, Committee of Transportation and Infrastructure, United States House of Representatives.

Sodano, H.A., Park, G., and Inman, D.J., 2003a, "An Investigation into the Performance of Macro-Fibers Composites for Sensing and Structural Vibration Applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Kεφ. 18, pp. 683-697.

Sodano, H.A., Park, G., Leo, D.J., and Inman, D.J., 2003b, "Use of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Charging Batteries," *Proceeding of SPIE's 10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Kεφ. 5050.

Sohn, H., Farrar, C.R., Hamez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., and Nadler B.R., 2003a, "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001," Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.

Sohn, H., Park, G., Wait, J.R., and Limback, N.P., 2003b, "Wavelet Based Analysis for Detecting Delamination in Composite Plates," *Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring*, September 15-17, Stanford, CA, pp. 567-574.

Sohn, H., Wait, J.R., Park, G., and Farrar, C.R., 2004, "Multi-Scale Structural Health Monitoring for Composite Structures," *Proceedings of the Second European Workshop on Structural Health Monitoring*, Ιούλιος 7-9, Munich, Germany, pp. 721-729.

Spencer, Jr., B.F., Ruiz-Sandoval, M.E., and Kurata, N., 2004, "Smart Sensing Technology: Opportunities and Challenges," in press *Journal of Structural Control and Health Monitoring*.

Spillman, W. B., Jr., "Sensing and Processing for Smart Structures," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 84, No. 1, Ιανουάριος 1996, pp. 68 - 77.

Stoeckel, D., "Fabrication and Properties of Nickel - Titanium Shape Memory Alloy Wires," *Wire Journal International*, Απρίλιος 1989, pp. 30 - 40.

Subramanian, S., Lesko, J.J., Reifsnider, K.L., and Stinchcomb, W.W., 1994, "Damage Mechanism and Failure Modes in Cross-Ply Laminates Under Monotonic Tensile Loading: The Influence of Fiber Sizing," *Applied Composite Materials*, Kεφ. 1, pp. 283-300.

Sumali, H., and Cudney, H.H., "An Active Engine Mount with a Piezoelectric Stacked Actuator," *Collection of Technical Papers- AIAA/ASME Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference from the 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 1994, pp. 1233-1241.

Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C.A., 1995, "Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 6, pp. 134-139.

Takagi, T., "Recent Research on Intelligent Materials," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 7, Μάιος 1996, pp. 346 - 352.

Tanaka, M., Chonan, S., and Jiang, Z. W., "Force Control of a Flexible Finger with Distributed Sensors and Piezoelectric Actuators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 7, Μάιος 1996, pp. 301 - 306.

Tanner, N.A., Wait, J.R., Farrar, C.R., and Sohn, H., 2003, "Structural Health Monitoring Using Modular Wireless Sensors," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 14, No. 1, pp. 43-55.

Tennyson, R., 2004, "SHM System for Detecting Foreign Object Impact Damage on Spacecraft," Proceedings of the Second European Workshop on Structural Health Monitoring, Ιούλιος 7-9, Munich, Germany, pp. 399-406.

Thier, M., Mick, A., Drescher, D., and Bourauel, C., "Deformation Behavior of NiTi Shape Memory Alloys in Bending," *Journal of Material Science*, Κεφ. 26, 1991, pp. 6473 - 6478.

Thompson, S. P., and Loughlan, J., "The Active Buckling Control of Some Composite Column Strips Using Piezoceramic Actuators," *Composite Structures*, Κεφ. 32, 1995, pp. 59 - 67.

Tiersten, H. F., *Linear Piezoelectric Plate Vibrations*, Plenum Press, New York, 1969.

Toupin, R. A., "The Elastic Dielectric," *Journal of Rational Mechanical Analysis*, Κεφ. 5, No. 6, Ιούνιος 1956, pp. 849 - 915.

Tzou H.S., and Ye, R., "Analysis of Laminated Piezoelastic Shell Systems with °C. Piezoelectric Triangle Finite Elements," *Proceedings, ASME Winter Annual Meeting Adaptive Structures Symposium*, Chicago, IL, AD-Vol. 45, ASME Technical Publishing, NY, NY, 1994, pp. 113-124.

Uchino, K., "Recent Development of Piezoelectric Actuators for Adaptive Structures.," *Third International Conference on Adaptive Structures*, Wada, B., Natori, M., Breitbach, E., Editors, SPIE Κεφ. 2040, 1993, pp. 245- 257.

Udd, E., "Fiber Optic Smart Structures." *Proceedings of the IEEE*, Κεφ. 84, No. 1, Jan 1996, pp. 60 - 67.

Udd, E., "Fiber Optic Smart Structures." *Proceedings of the IEEE*, Κεφ. 84, No. 6, Ιούνιος 1996, pp. 884 - 894.

Uttamchandani, D., "Fibre-optic Sensors and Smart Structures: Developments and Prospects," *Electronics & Communication Engineering Journal*, Οκτώβριος 1994, pp. 237 - 246.

Valenti, M., "Probing Composites to Keep Them Smart," *Mechanical Engineering*, Αύγουστος 1996, pp. 10 - 11.

Wang, B. and Rogers, C. A., "Laminate Plate Theory for Spatially Distributed Induced Strain Actuators," *Journal of Composite Materials*, Κεφ. 25, Απρίλιος 1991, pp. 433 - 452.

Wang, B. T., Rogers, C. A., "Modeling of Finite Length Spatially Distributed Induced Strain Actuators for Laminate Beams and Plates", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 2, No.1, 1991b, pp. 38-58.

Xu, Y., Leung, C.K.Y., Yang, Z., Tong, P., and Lee, S.K.L., 2003, "A New Fiber Optic Based Method for Delamination Detection in Composites," *Structural Health Monitoring*, Κεφ. 2-3, pp. 205-223.

Yu Y.Y., "Some recent advances in linear and nonlinear dynamical modeling of elastic and piezoelectric plates," Carman, G.P., and Garcia, E., Adaptive Structures and Material Systems, AD- Κεφ.35, 1993 ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, La., Νοέμβριος. 28 - Δεκέμβριος 3, 1993, pp. 185-195.

Yuan, S., Wang, L., Wang, X., and Chang, M., 2004, "A New Damage Signature for Composite Structural Health Monitoring," Proceedings of the Second European Workshop on Structural Health Monitoring, Ιούλιος 7-9, Munich, Germany, pp. 1058-1064.

Zagrai, A.N. and Giurgiutiu, V., 2001, "Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Plates," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Κεφ. 12, pp. 709-718.

Zhou S., Liang C., and Rogers C.A., "Impedance Modeling of Two-Dimensional Piezoelectric Actuators Bonded on a Cylinder," edited by Carman, G.P., and Garcia, E., *Adaptive Structures and Material Systems*, AD- Κεφ.35, 1993 ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, La., Nov. 28 - Dec. 3, 1993, pp. 247-255.

Zhou, S., Liang, C., and Rogers, C.A., "A Dynamic Model of Piezoelectric Actuator-Driven Thin Plates," *Proceeding of the Smart Structures and Materials Conference*, Orlando, SPIE Κεφ. 2190, 1994, pp. 550-562.

Zhou, S., Liang, C., and Rogers, C.A., "An Impedance-Based System Modeling Approach for Induced Strain Actuator-Driven Structures," *Journal of Vibration and Acoustics*, Κεφ. 118, Ιούλιος 1996, pp. 323-331.

Zhou, S., Liang, C., Rogers, C.A., "Integration and Design of Piezoelectric Patch Actuators," *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Κεφ. 6, Ιανουάριος 1995, pp. 125-133.

Σπιτάς Βασίλειος. Διδάκτορας Πολυτεχνείου Κρήτης/Γενικό Τμήμα

Ευχαριστήριο:

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου, κ Κωνσταντίνο Προβιδάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή Γενικού Τμήματος, Πολυτεχνείου Κρήτης, που εκτός από τις πολύτιμες γνώσεις του, την αμέριστη συμπαράστασή του και που παρόλες τις υποχρεώσεις του επέδειξε αντοχή και ανοχή στο πρόσωπό μου. Αποτελεί εξαίρετο επιστήμονα και άνθρωπο.

Επίσης, ευχαριστώ τον μεταπτυχιακό φοιτητή του Γενικού Τμήματος Λιαράκο Ευάγγελο, για τη συμπαράστασή του και τη βοήθειά του που μου παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου διατριβής.