

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής & Βελτιστοποίησης



Διπλωματική εργασία

*ΜΑΣΤΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΠΙΕЗОΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ
ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ*

*ΠΑΝΙΕΡΑΚΗ
ΑΡΓΥΡΩ*

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

A.M. 2011010123

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Βασίλης Μουστάκης, Μαρία Σταυρουλάκη

Χανιά, Μάρτιος 2018

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης για την απόκτηση του διπλώματος μηχανικού. Υλοποιήθηκε με την υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη του οποίου χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση της. Συνάμα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Γεώργιο Ταϊρίδη, για την ανεξάντλητη υπομονή του, τις γνώσεις και συμβουλές του και κυρίως για τον τόσο πολύτιμο προσωπικό χρόνο που μου αφιέρωσε για τη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος την καθηγήτρια κα Γεωργία Φουτσιτζή για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε και τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε στη δημιουργία του κώδικα της παρούσας εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ πολύ όλους μου τους φίλους για τις υπέροχες στιγμές που μου χαρίζουν, αλλά και ειδικότερα τον φίλο μου Κωνσταντίνο Μεσσή που αφιέρωσε πολύ από το χρόνο του για την παρούσα εργασία. Επίσης, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Κωνσταντίνο Παπαθανασίου για την απεριόριστη αγάπη του, στήριξη του και βοήθεια του σε κάθε τομέα, ακόμη και στη διεξαγωγή της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω άπειρες ευχαριστίες στην οικογένεια μου και τη φίλη μου Χαρά, που βρίσκονται πάντα δίπλα μου, με στηρίζουν σε όλες τις στιγμές και μου χαρίζουν συνεχώς καινούργιες, ακόμη πιο όμορφες.

Περιεχόμενα

Κατάλογος εικόνων	5
Περίληψη	7
Abstract	8
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 2. Ενέργεια	11
2.1. Κλασσικές πηγές ενέργειας.....	11
2.2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	11
2.2.1. Ηλιακή ενέργεια.....	12
2.2.2. Αιολική / Υδροηλεκτρική / Γεωθερμική ενέργεια/Βιομάζα/Ενέργεια από τη θάλασσα/ Ωσμωτική ενέργεια	12
Κεφάλαιο 3. Μάστευση ενέργειας	15
3.1. Μάστευση ενέργειας μέσω μηχανικών ταλαντώσεων.....	15
3.3. Συλλογή ενέργειας.....	16
3.2. Τεχνολογικές εφαρμογές	17
3.4. Αποθήκευση και εφαρμογή της ενέργειας.....	17
3.5. Πιεζοηλεκτρισμός	18
3.5.2. Ευθύ και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	19
3.5.1. Η ανακάλυψη του πιεζοηλεκτρισμού.....	20
3.5.3. Πιεζοηλεκτρικές τεχνολογικές εφαρμογές	21
Κεφάλαιο 4. Στοιχεία δυναμικής κατασκευών	22
4.1. Δυναμικά συστήματα.....	22
4.2. Εξισώσεις κίνησης.....	22
4.3. Ιδιομορφική ανάλυση.....	25
4.3.1. Ιδιοσυχνότητες-Ιδιοτιμές.....	25
4.3.2. Ιδιοδιανύσματα- Ιδιομορφές	27
Κεφάλαιο 5. Αναφορά σε αντίστοιχη έρευνα για δοκό	29
5.1. Το μοντέλο της δοκού	29
5.2. Μάστευση ενέργειας μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης	33
Κεφάλαιο 6. Μοντέλο: σύνθετη ευφυής πλάκα	36
6.1. Σύνθετες ευφυνείς κατασκευές με πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	36
6.2. Πεπερασμένα στοιχεία	36

6.2.1. Η ιστορία της μεθόδου.....	36
6.2.2. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	37
6.3. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε	37
6.4. Υλοποίηση μάστευσης ενέργειας.....	41
Κεφάλαιο 7. Αριθμητικά αποτελέσματα	42
7.1. Α' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία 25, 26, 31, 32	43
7.1.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα.....	45
7.1.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα.....	47
7.1.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα.....	49
7.2. Β' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία 1,2,7,8	51
7.2.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα.....	52
7.2.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα.....	53
7.2.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα.....	54
7.3. Γ' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία 13,14,19,20	55
7.3.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα.....	57
7.3.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα.....	58
7.3.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα.....	59
7.4. Δ' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία 7,13,19,25	60
7.4.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα.....	62
7.4.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα.....	63
7.4.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα.....	64
7.5. Ε' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικό στοιχείο 31	65
7.5.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα.....	67
7.5.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα.....	68
7.5.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα.....	69
7.6. Ζ' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικό στοιχείο 1.....	70
7.6.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα.....	71
7.6.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα.....	72
7.6.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα.....	73
7.7. Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	74
Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα	75
Κεφάλαιο 9. Βιβλιογραφία	77

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 3-1. Απλοποιημένη δομή της στοιχειώδους κυψελίδας του χαλαζία. Αριστερά απεικονίζεται η θέση των ιόντων Si και O σε σχέση με τους κρυσταλλογραφικούς άξονες και δεξιά οι τρεις άξονες 2ης τάξης συμμετρίας και ο ένας άξονας 3ης τάξης συμμετρίας.....	19
Εικόνα 3-2. Ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εντός της δομής της στοιχειώδους κυψελίδας του χαλαζία. Αριστερά απεικονίζεται το διάμηκες πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ενώ δεξιά, το εγκάρσιο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.	20
Εικόνα 4-1. Δυναμικό Σύστημα ενός Βαθμού Ελευθερίας	22
Εικόνα 6-1. Πολυστρωματική σύνθετη πλάκα με ενσωματωμένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές.	37
Εικόνα 7-1. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 25,26,31,32.....	43
Εικόνα 7-2. 1η ιδιομορφή, Α' περίπτωση	Εικόνα 7-3. 2η ιδιομορφή, Α' περίπτωση..... 44
Εικόνα 7-4. 3η ιδιομορφή, Α' περίπτωση	Εικόνα 7-5. 4η ιδιομορφή, Α' περίπτωση..... 44
Εικόνα 7-6. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Α' περίπτωση.....	45
Εικόνα 7-7. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Α' περίπτωση, 2ο ιδιοδιανυσμα.....	47
Εικόνα 7-8. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Α' περίπτωση, 3ο ιδιοδιανυσμα.....	49
Εικόνα 7-9. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 1,2,7,8.....	51
Εικόνα 7-10. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Β' περίπτωση, 1ο ιδιοδιανυσμα.....	52
Εικόνα 7-11. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Β' περίπτωση, 2ο ιδιοδιανυσμα.....	53
Εικόνα 7-12. αφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Β' περίπτωση, 3ο ιδιοδιανυσμα	54
Εικόνα 7-13. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 13,14,19,20.....	55
Εικόνα 7-14. 1η ιδιομορφή, Γ' περίπτωση	Εικόνα 7-15. 2η ιδιομορφή, Γ' περίπτωση 56
Εικόνα 7-16. 3η ιδιομορφή, Γ' περίπτωση	Εικόνα 7-18. 4η ιδιομορφή, Γ' περίπτωση 56
Εικόνα 7-19. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Γ' περίπτωση, 1ο ιδιοδιανυσμα.....	57
Εικόνα 7-20. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Γ' περίπτωση, 2ο ιδιοδιανυσμα.....	58
Εικόνα 7-21. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Γ' περίπτωση, 3ο ιδιοδιανυσμα.....	59
Εικόνα 7-22. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 7,13,19,25.....	60
Εικόνα 7-23. 1η ιδιομορφή, Δ' περίπτωση	Εικόνα 7-24. 2η ιδιομορφή, Δ' περίπτωση..... 61
Εικόνα 7-25. 3η ιδιομορφή, Δ' περίπτωση	Εικόνα 7-26. 4η ιδιομορφή, Δ' περίπτωση..... 61
Εικόνα 7-27. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Δ' περίπτωση, 1ο ιδιοδιανυσμα.....	62
Εικόνα 7-28. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Δ' περίπτωση, 2ο ιδιοδιανυσμα.....	63
Εικόνα 7-29. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Δ' περίπτωση, 3ο ιδιοδιανυσμα.....	64

Εικόνα 7-30. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικό στο στοιχείο 31	65
Εικόνα 7-31. 1η ιδιομορφή, Ε' περίπτωση	Εικόνα 7-32. 2η ιδιομορφή, Ε' περίπτωση.....
66	66
Εικόνα 7-33. 3η ιδιομορφή, Ε' περίπτωση	Εικόνα 7-34. 4η ιδιομορφή, Ε' περίπτωση.....
66	66
Εικόνα 7-35. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ε' περίπτωση, 1ο ιδιοδιανυσμα.....	67
Εικόνα 7-36. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ε' περίπτωση, 2ο ιδιοδιανυσμα.....	68
Εικόνα 7-37. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ε' περίπτωση, 3ο ιδιοδιανυσμα.....	69
Εικόνα 7-38. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικό στο στοιχείο 1	70
Εικόνα 7-39. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ζ' περίπτωση, 1ο ιδιοδιανυσμα.....	71
Εικόνα 7-40. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ζ' περίπτωση, 2ο ιδιοδιανυσμα.....	72
Εικόνα 7-41. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ζ' περίπτωση, 3ο ιδιοδιανυσμα.....	73

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η μάζευση ενέργειας από μηχανικές ταλαντώσεις με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών. Το εξεταζόμενο μηχανικό μοντέλο αποτελεί μια σύνθετη πλάκα η οποία περιλαμβάνει πιεζοηλεκτρικά ελάσματα και υπάρχει πάκτωση στο αριστερό της άκρο. Η διακριτοποίηση του μοντέλου γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι προσομοιώσεις έγιναν στο προγραμματιστικό περιβάλλον «Matlab». Στόχο της εργασίας αποτελεί η αύξηση και συλλογή της παραγόμενης ισχύος (σε Joules) μέσω μηχανικών ταλαντώσεων με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε διαφορετικές θέσεις της κατασκευής. Έτσι οι προγραμματιστικές δοκιμές που έγιναν αφορούν την μετακίνηση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων μέσω διαφορετικών σεναρίων. Επίσης εκτός από την αλλαγή των θέσεων, έγινε διερεύνηση και στην αλλαγή του αριθμού των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Η διερεύνηση των διαφορετικών σεναρίων σκοπεύει στην αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για περαιτέρω χρήση της, ενώ ταυτοχρόνως γίνεται η συλλογή της ενέργειας αυτής.

Abstract

In the present diploma thesis, we study the energy harvesting of mechanical vibrations using piezoelectric materials. The examined electromechanical model is a composite plate which lower and upper layers comprise piezoelectric plates and it's fixed at its left end. The model is distinguished by the finite element method. The simulations were made in the "Matlab" programming environment. The purpose of the thesis is to increase and collect the generated energy (in Joules) from mechanical vibrations using piezoelectric elements at different locations of the plate. Moreover, the number of piezoelectric elements is also changing. The exploration of different scenarios is aiming in increasing the modal strain energy (MSE) for further use or storage.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής δημιουργεί καθημερινά όλο και μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες. Συνάμα το ενεργειακό πρόβλημα δημιουργεί περαιτέρω οικονομικά και κοινωνικά προβλήματα. Κατά συνέπεια η επίλυση του ή έστω η μείωση του θα οδηγούσε σε ένα συλλογικά υψηλότερο βιοτικό επίπεδο ζωής στον πλανήτη. Έτσι οδηγούμαστε όλο και πιο επιτακτικά στην αναζήτηση νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας.

Ως μελλοντικοί μηχανικοί, οφείλουμε να παροτρύνουμε την επιστημονική κοινότητα σε συστράτευση για την εξεύρεση λύσεων. Το επιστημονικό πεδίο της Μηχανικής και η κοινότητά του δύναται να παίξει καταλυτικό ρόλο στις προσπάθειες αυτές. Η επιστημονική γνώση και η εκτενής έρευνα στον κλάδο της φυσικής θα μπορούσε να ανοίξει νέους ορίζοντες στον κλάδο της ενέργειας. Διαφαίνεται ότι υπάρχει τεράστιο εύρος τεχνολογικών εφαρμογών και λύσεων για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας.

Παρατηρώντας γύρω μας και αξιολογώντας την επιστημονική γνώση επ' αυτού αναγνωρίζουμε πως υπάρχει ανεξάντλητη, αχρησιμοποίητη ενέργεια από το φυσικό περιβάλλον. Η συλλογή ενέργειας συχνά αποκαλείται μάστευση ενέργειας (energy harvesting). Η μάστευση ενέργειας περιλαμβάνει ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών, καθώς και ένα πολύ ευρύ φάσμα μεθόδων μάστευσης. Παρατηρώντας τη φύση, στρέφοντας παραδείγματος χάριν το βλέμμα μας στη θάλασσα βλέπουμε ξεκάθαρα τη δυνατότητα να συλλέξουμε ενέργεια από τη συνεχόμενη ταλάντωση των κυμάτων. Σκοπό, λοιπόν αποτελεί η αξιοποίηση και συλλογή αυτής της ανεξάντλητης ροής ενέργειας.

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζεται σε μια σπάνια μηχανική ιδιότητα συγκεκριμένων υλικών και θα αναζητήσουμε τρόπους αξιοποίησης της για την μάστευση (ή αλλιώς συλλογή) ενέργειας. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά γνωστά εκ των αρχαιοτάτων χρόνων έχουν εκτός των άλλων την ιδιότητα να μετατρέπουν την μηχανική ταλάντωση σε ηλεκτρική ενέργεια. Όπως αναφέραμε και παραπάνω ταλαντώσεις, δονήσεις, παλμοί υπάρχουν παντού γύρω μας, ακόμη και μέσα στο ίδιο μας το σώμα. Ταλάντωση μπορεί να προκληθεί σε μία κατασκευή από τον άνεμο, από τη βροχή, από το βηματισμό ανθρώπων, από την κίνηση των αυτοκινήτων κτλ.

Η φαινομενικά ασήμαντη παραγωγή ενέργειας που απαντάται στην χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών, μπορεί να φανεί ιδιαίτερος χρήσιμη σε περιπτώσεις δύσκολης ή ανέφικτης σύνδεσης μιας εκάστοτε τεχνολογικής εφαρμογής μέσω καλωδίου στο ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι η συντονισμένη χρήση τους θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείζονα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να αναφερθεί ως παράδειγμα, το Ισραήλ και ένας ολόκληρος δρόμος ο οποίος φωτίζεται μέσω της χρήσης πιεζοηλεκτρικών υλικών για τη μετατροπή των ταλαντώσεων που προκαλούνται από την κίνηση των αυτοκινήτων σε ηλεκτρική ενέργεια (1). Σκοπό μας λοιπόν αποτελεί η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο υποβαλλόμενο σε ταλάντωση, και μέσω της άμεσης επεξεργασίας των αποτελεσμάτων θα επιτρέψει τη συλλογή του μέγιστου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας. Η διενέργεια κατάλληλων δοκιμών ή/και αλλαγών θα δώσει τη δυνατότητα για περεταίρω μελέτη και αξιολόγηση των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Το προγραμματιστικό περιβάλλον του μοντέλου θα αποτελέσει το περιβάλλον της “Matlab” και η υπολογιστική

προσέγγιση που θα ακολουθήσουμε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων η οποία θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια της εργασίας. Το αντικείμενο της έρευνας έχει έναν βαθμό καινοτομίας καθώς ο αριθμός των αναφορών που γίνονται στη βιβλιογραφία δεν είναι πολύ μεγάλος. Το μοντέλο εξάχθηκε από μια ερευνητική μελέτη σε πλάκα και στη συνέχεια προγραμματίστηκε για να χρησιμοποιηθεί για μάστευση ενέργειας σε σύγχρονες κατασκευές.

Κεφάλαιο 2. Ενέργεια

Κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα καταναλώνει τεράστια ποσά ενέργειας. Η καθημερινή μας ζωή είναι άδυστα συνυφασμένη με την κατανάλωση ενέργειας. Η ενέργεια συναντάται στην κίνηση, τη θερμότητα, στον ηλεκτρισμό, στους χημικούς δεσμούς, στον άνεμο, στον άνθρακα, στην ξυλεία, στην μάζα, ακόμη και στα τρόφιμα. (2)

Οι μορφές ενέργειας χωρίζονται στις κλασσικές μορφές ενέργειας και στις ανανεώσιμες (ΑΠΕ).

2.1. Κλασσικές πηγές ενέργειας

Τον παραδοσιακό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η καύση ουσιών, η οποία ουσιαστικά παράγει θερμότητα δηλαδή θερμική ενέργεια, την οποία μετατρέπουμε σε ηλεκτρική. Ουσίες προς καύση αποτελούν ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το κάρβουνο. Αυτές τις μορφές ενέργειας ορίζουμε και ως κλασσικές. Με τον όρο κλασσικές μορφές ενέργειας ορίζουμε τις πηγές της ενέργειας που προέρχονται από κάποιο φυσικό πόρο που δεν ανανεώνεται/ αντικαθίσταται από το φυσικό περιβάλλον ή δεν αντικαθίσταται σε προσμετρήσιμο χρονικό πλαίσιο.

Τις συμβατικές πηγές ενέργειας αποτελούν το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο. Παρόλο που έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικοί παράγοντες οικονομικής προόδου, την ίδια στιγμή είναι ιδιαίτερος καταστροφικές για το περιβάλλον και αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. (3)

2.2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζουμε τις μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες, μέσω των οποίων υπάρχει διαρκής διάθεσή τους από το φυσικό περιβάλλον. Αναλυτικότερα ανανεώσιμη θεωρείται η αιολική ενέργεια, η ηλιακή, η γεωθερμική, η υδροθερμική, η αεροθερμική, η υδροηλεκτρική, η ενέργεια από τα κύματα των ωκεανών, η ενέργεια από βιομάζα, από βιοαέρια και από αέρια επεξεργασίας λυμάτων.

Η δυναμική των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μεγάλη, καθώς εκτιμάται ότι θα μπορούσαν να καλύψουν την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Οι ΑΠΕ προάγουν βιώσιμη ενεργειακή απόδοση, βάσει των εγχώριων διαθέσιμων πόρων. Συγχρόνως, η τιμή του πετρελαίου και της βενζίνης διαρκώς διακυμαίνεται, αλλά μια ριζική αλλαγή σε συστήματα ενέργειας βασισμένα στις ΑΠΕ θα μπορούσε να μειώσει δραστικά το ενεργειακό κόστος. [Οδηγία Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, 2009/28/ΕΚ.] (4)

2.2.1. Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια έχει βασική χρήση σε θερμικές εφαρμογές όπως οι ηλιακοί θερμοσίφωνες και οι φούρνοι.

Φωτοβολταϊκά

Βασική χρήση της ηλιακής ενέργειας αποτελούν επίσης και τα φωτοβολταϊκά, τα οποία εντάσσονται στην κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ως φωτοβολταϊκά ορίζουμε τη βιομηχανική διάταξη πολλών φωτοβολταϊκών κυττάρων σε σειρά. Αναλυτικότερα πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς που ενώνονται για τη δημιουργία ηλεκτρικού κυκλώματος σε σειρά και κατασκευάζονται συνήθως από Πυρίτιο. Κατά αυτόν τον τρόπο, που καλείται και ως "Φωτοβολταϊκό φαινόμενο", οι ημιαγωγοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν ηλεκτρική τάση. (5), (6), (7)

Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε το 1839 και χρησιμοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '50 σε διαστημικές εφαρμογές. Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα έχουν τη δυνατότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το Φ/Β πλαίσιο ή ηλιακή γεννήτρια ρεύματος και τα ηλεκτρονικά συστήματα που διαχειρίζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη Φ/Β συστοιχία, αποτελούν ένα τυπικό Φ/Β σύστημα. Επίσης, για αυτόνομα συστήματα υπάρχει επίσης το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες. Συνηθέστερα, μία τυπική Φ/Β συστοιχία αποτελείται από ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Έτσι, όταν τα Φ/Β πλαίσια εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν ποσοστό 14% περίπου της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και η μετατροπή αυτή γίνεται αθόρυβα, αξιόπιστα και χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. (8)

2.2.2. Αιολική / Υδροηλεκτρική / Γεωθερμική ενέργεια/Βιομάζα/Ενέργεια από τη θάλασσα/ Ωσμωτική ενέργεια

Αιολική

Η αιολική ενέργεια είναι ευρέως διαδεδομένη από το παρελθόν, παραδείγματος χάριν σε άντληση νερού από πηγάδια ή σε άλεση μέσω ανεμόμυλου, έως τις μέρες μας όπου η βασική της χρήση απαντάται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ανεμογεννήτριες

Στις μέρες μας εξέλιξη των αιολικών μηχανών αποτελεί η ανεμογεννήτρια. Η ανεμογεννήτρια είναι μια αιολική μηχανή που μετατρέπει τον άνεμο από κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελείται από μία στήλη κάθετη προς το έδαφος και από μία τουρμπίνα στην κορυφή της.

Συνήθης είναι η χρήση μικρών ανεμογεννητριών για διάφορες εφαρμογές όπως η φόρτιση μπαταριών, για συμπληρωματική ενέργεια σε σκάφη και τροχόσπιτα ή για τροφοδοσία ρεύματος σε πινακίδες. Παράλληλα, μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για παροχή ρεύματος σε σπίτια και πλήθος τέτοιων ανεμογεννητριών συγκροτούν τα αιολικά πάρκα, που αποτελούν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. (9), (10), (11), (12)

Υδροηλεκτρική

Όσον αφορά στην υδραυλική ενέργεια, θεωρείται η πιο διαδεδομένη μορφή ενέργειας στον κλάδο των ανανεώσιμων και απαντάται σε υδροηλεκτρικά έργα.

Γεωθερμική

Η γεωθερμική ενέργεια έχει προέλευση τη θερμότητα που παράγεται στο κέντρο της γης. Πιο συγκεκριμένα παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης και στα σημεία που είναι εκμεταλλεύσιμη, ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια μέσω θερμοπιδάκων ή μέσω πηγών ζεστού νερού. Η χρήση της μπορεί να είναι απευθείας σε θερμικές εφαρμογές αλλά και για την παραγωγή ηλεκτρισμού. (13)

Βιομάζα

Μια άλλη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας είναι η βιομάζα, η οποία χρησιμοποιεί υδατάνθρακες φυτών, που έχουν κύρια προέλευση τα απόβλητα της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης. Σκοπό έχει την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό κατά τη φωτοσύνθεση. Επιπρόσθετα γίνεται και με χρήση αστικών αποβλήτων και απορριμμάτων, η οποία παράγει βιο-αιθανόλη και βιοαέριο, καύσιμα τα οποία είναι προσφιλέστερα προς το περιβάλλον σε σχέση με τα κλασσικά.

Ενέργεια από τη θάλασσα

Αξιοσημείωτη πηγή ενέργειας είναι η ενέργεια που παράγεται μέσω της θάλασσας, δηλαδή ενέργεια από παλίρροιες, κύματα και ωκεανούς. Η ενέργεια από παλίρροιες εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Ο τρόπος παραγωγής ενέργειας γίνεται καθώς το νερό αποθηκεύεται όταν ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Η ενέργεια από κύματα παράγεται μέσω της κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας. Τέλος, η ενέργεια από τους ωκεανούς, η οποία βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. (14)

Ωσμωτική ενέργεια

Υπάρχει μια ακόμη αξιοσημείωτη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, η οποία καλείται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια). Γίνεται μέσω της ανάμειξης γλυκού και θαλασσινού νερού, από την οποία απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

Όλα αυτά μας οδηγούν σε αναζήτηση νέων τρόπων συλλογής ενέργειας, όπως η μάστευση ενέργειας. Παρακάτω αναλύεται αναλυτικότερα ο όρος αυτός και οι αρχές που τον απαρτίζουν.

Κεφάλαιο 3. Μάστευση ενέργειας

Η διαδικασία κατά την οποία ενέργεια προερχόμενη από εξωτερικές πηγές (όπως η ηλιακή, η θερμική, η αιολική, η κινητική ενέργεια κτλ), συγκεντρώνεται και συλλέγεται σε ασύρματες μικροσυσκευές ή αισθητήρες ονομάζεται μάστευση ενέργειας ή ισχύος ή ακόμη και σάρωση ενέργειας. Οι συσκευές μάστευσης παρέχουν μικρά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά πολλές φορές χρήσιμα σε μικρο-εφαρμογές, όπου η ενσύρματη ηλεκτροδότηση είναι ανέφικτη ή η αλλαγή μπαταριών θα καθιστούσε επικίνδυνη τη χρήση τους. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν εκτενέστερα τα τρέχοντα μέσα και οι μέθοδοι μάστευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ανεξάρτητες πηγές ενέργειας. Η τυπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί τη συνεχή εισαγωγή καυσίμων όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο για τη διατήρηση της διαδικασίας. Αντιθέτως, για την παραγωγή αιολικής, υδροηλεκτρικής, γεωθερμικής και ηλιακής ενέργειας, το φυσικό περιβάλλον παρέχει συνεχόμενη εισροή ενέργειας μέσω της οποίας δεν υφίσταται ούτε κατανάλωση καυσίμου, ούτε έκλυση απορριμμάτων. Επιπροσθέτως, οι μονάδες παραγωγής ενέργειας καύσης άνθρακα εμπεριέχουν το κόστος εγκατάστασης του εργοστασίου, καθώς και το ημερήσιο κόστος καύσης του άνθρακα. Τουναντίον οι εγκαταστάσεις αιολικής, υδροηλεκτρικής, γεωθερμικής και ηλιακής ενέργειας έχουν επίσης κόστος εγκατάστασης, αλλά δεν έχουν ημερήσια δαπάνη για αναλώσιμα δεδομένου ότι δεν υπάρχουν. Εκτός από τις προαναφερθείσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι πιο πρόσφατες μέθοδοι περιλαμβάνουν τη μάστευση ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών υλικών και ηλεκτροστρεπτικής ισχύος. Αυτές οι δύο μέθοδοι είναι επίσης ανανεώσιμες υπό την έννοια ότι δεν απαιτούν κατανάλωση καυσίμου, αλλά στις μέρες μας η χρήση τους διαφέρει από εκείνη της αιολικής, υδροηλεκτρικής, γεωθερμικής και ηλιακής ενέργειας. Το παρόν κεφάλαιο θα εξετάσει τη χρησιμότητα και τις προκλήσεις που συνδέονται με την αποτελεσματική εφαρμογή κάθε μεθόδου μάστευσης «ανανεώσιμης ενέργειας». (15)

Η κινητήρια δύναμη της αναζήτησης ολοένα και καλύτερων μεθόδων και συσκευών μάστευσης ενέργειας πηγάζει από την βαθύτερη επιθυμία για την αυτόνομη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών, χωρίς καμία εξάρτηση από παρόχους ηλεκτροδότησης ή φυσικούς περιορισμούς (π.χ. καλώδια). Ιστορικά η μάστευση ενέργειας χρονολογείται από τη φτερωτή και τον ανεμόμυλο και συνεχίζεται με την αέναη ανθρώπινη αναζήτηση για αξιοποίηση της ενέργειας από τη θερμότητα, τις δονήσεις κτλ. Εξίσου όμως σημαντικό κίνητρο αποτελεί και η αντιμετώπιση ή έστω μείωση της υπερθέρμανσης και γενικότερα της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη μας.

3.1. Μάστευση ενέργειας μέσω μηχανικών ταλαντώσεων

Μία από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους μάστευσης ενέργειας είναι η χρήση μηχανικών ταλαντώσεων για τη μετατροπή μηχανικής ενέργειας με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών συσκευών ή μέσω της μετατόπισης ενός ηλεκτρομαγνητικού πηνίου. Συνηθέστερα, η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από μηχανικούς κραδασμούς εκμεταλλεύεται την ταλάντωση που δημιουργείται γύρω από τη συσκευή συλλογής ενέργειας και στη συνέχεια τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, προκειμένου να τροφοδοτήσει άλλες συσκευές.

Η έρευνα στις ακόλουθες ενότητες εξετάζει μηχανικούς κραδασμούς για την ποσοτικοποίηση της αποδοτικότητας και της ποσότητας ισχύος που δύναται να παραχθεί, καθώς και για την τροφοδότηση διαφόρων ηλεκτρονικών συστημάτων, όπως ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα έως ασύρματους πομπούς. Οι Williams και Yates (16) πρότειναν μια συσκευή, η οποία παράγει ηλεκτρισμό όταν ενσωματώνεται σε ένα δονητικό περιβάλλον. Για την εκτίμησή της επιλέχθηκε ένας ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αρμονική ανάλυση της γεννήτριας προκειμένου να αξιολογηθεί η βιωσιμότητα της συσκευής και να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός. Από την ανάλυση προέκυψε ότι η ποσότητα της παραγόμενης ισχύος ήταν ανάλογη προς τον κύβο της συχνότητας των κραδασμών. Αυτό έδειξε ότι η γεννήτρια ήταν πιθανό να έχει χαμηλή συχνότητα σε χαμηλές συχνότητες. Διαπιστώθηκε επίσης ότι απαιτείται χαμηλός συντελεστής απόσβεσης για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας, συνεπώς το σχέδιο πρέπει να επιτρέπει μεγάλες εκτροπές της μάζας. Για μια τυπική συσκευή η προβλεπόμενη παραγωγή ισχύος ήταν 1 W σε συχνότητα διέγερσης 70 Hz και 0,1 mW στα 330 Hz (υποθέτοντας μια εκτροπή 50 m). (17)

3.3. Συλλογή ενέργειας

Ενέργεια «χάνεται» καθημερινά σε κάθε βιομηχανική τεχνολογική διεργασία, όπως παραδειγματικά στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλυτικότερα σχεδόν όλη η παγκόσμια ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από θερμικές μηχανές, οι οποίες είναι εναέριοι ή ατμοκίνητοι στρόβιλοι που μετατρέπουν τη θερμότητα σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελεσματικά, περίπου τα δύο τρίτα της ενεργειακής εισόδου δεν μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια αλλά σε θερμότητα που εκλύεται στο περιβάλλον (20). Συνάμα μεγάλη απώλεια ενέργειας παρουσιάζουν και συσκευές όπως οι υπολογιστές, συσκευές μικροκυμάτων (που στην πραγματικότητα περιλαμβάνουν όλες τις ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούμε). Η απώλεια ενέργειας πραγματοποιείται με τη μορφή θερμότητας ή/και κραδασμών.

Συμπερασματικά, οι κραδασμοί, η κίνηση και ο ήχος μπορούν να συλλεχθούν και να μετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά υλικά, ενώ ταυτόχρονα, η θερμότητα μπορεί να συλλεχθεί και να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας θερμοηλεκτρικά και πυροηλεκτρικά υλικά.

Η συλλογή της ενέργειας για τροφοδότηση αισθητήρων γίνεται μέσω της τεχνολογίας MEMS3. Τέτοιου είδους συστήματα έχουν πολύ μικρές ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά υπόκεινται σε περιορισμούς των εφαρμογών τους εξαιτίας της εξάρτησής τους από μπαταρίες. Αντιθέτως η συλλογή ή μάζευση ενέργειας από ανεξάντλητες φυσικές πηγές, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η θερμότητα ή οι περιβαλλοντικές δονήσεις θα επέτρεπαν μια αδιάκοπη λειτουργία. Η διεξαγωγή πλήθους μελετών έχει δείξει ότι οι τυπικές πυκνότητες ισχύος που διατίθεται από τις συσκευές μάζευσης ενέργειας εξαρτώνται από την εφαρμογή, και τον ίδιο το σχεδιασμό της γεννήτριας. Γενικότερα τυπικές τιμές είναι μερικά $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ για συσκευές βασιζόμενες στην κίνηση του ανθρωπίνου σώματος και εκατοντάδες $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ για γεννήτριες από την κίνηση μηχανημάτων.

3.2. Τεχνολογικές εφαρμογές

Ολοένα και μεγαλύτερη είναι η χρήση συσκευών μάστευσης ενέργειας σε εμπορικές, ακόμη και στρατιωτικές εφαρμογές. Οι συσκευές αυτές μετατρέπουν την ανεξάντλητη φυσική ενέργεια που μας παρέχεται από το περιβάλλον σε ηλεκτρική ενέργεια για την εκάστοτε χρήση της. Συναντώνται επίσης, σε συστήματα μετατροπής της κινητικής ενέργειας κυμάτων του ωκεανού, σε ηλεκτρική ενέργεια για την περαιτέρω χρήση της π.χ. σε αυτόνομους ωκεανογραφικούς αισθητήρες παρακολούθησης. Από παράδειγμα αποτελεί μια επαναστατική μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εγκαταστάθηκε πιλοτικά στο λιμάνι του Ηρακλείου στην Κρήτη για τη συλλογή της ενέργειας των κυμάτων της θάλασσας. (18). Μελλοντικά, δεν θα μπορούσαμε να αποκλείσουμε τη χρήση συσκευών υψηλής ισχύος εξόδου ή συστάδες παρόμοιων συσκευών για τη σύσταση αξιόπιστων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μια περαιτέρω εφαρμογή αποτελούν οι συσκευές μάστευσης ενέργειας για τον επαναφόρτιση κινητών τηλεφώνων, φορητών υπολογιστών, συσκευών ασύρματης επικοινωνίας κτλ. Λόγου χάρη πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες εφαρμόζονται σε υποδήματα για την επαναφόρτιση κινητού τηλεφώνου (19). Θέμα για περαιτέρω διερεύνηση αποτελεί η αντοχή και ευαισθησία όλων των παραπάνω συσκευών στη μακροχρόνια έκθεσή τους στο φυσικό περιβάλλον και σε πολλαπλούς παράγοντες φθοράς.

Επίσης, πολλές εφαρμογές της καθημερινής ζωής που χρησιμοποιούν ενέργεια από το σύστημα συλλογής ενέργειας είναι πλέον πρακτικές. Τα ασύρματα συστήματα δίκτυα αισθητήρων όπως τα συστήματα ZigBee συχνά τροφοδοτούνται από πηγές ενέργειας που καταναλώνουν ενέργεια. Για παράδειγμα, όταν ένας ασύρματος κόμβος τοποθετείται σε μια απομακρυσμένη περιοχή όπου μία πρίζα τοίχου ή μια μπαταρία είτε είναι αναξιόπιστη είτε δεν είναι διαθέσιμη, η μάστευση ενέργειας μπορεί να αυξήσει ή να τροφοδοτήσει τη συσκευή με ενέργεια. Ταυτόχρονα, εάν ένας κόμβος απομακρυσμένου ελέγχου ο οποίος τροφοδοτείται διαμέσου της μάστευσης ενέργειας μπορεί να λειτουργεί ως αυτοδύναμο ηλεκτρονικό σύστημα. Τέλος, η περίπτωση πολλαπλών πηγών ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας και αξιοπιστίας οποιουδήποτε συστήματος. (15)

3.4. Αποθήκευση και εφαρμογή της ενέργειας

Η συλλογή ενέργειας, η οποία είναι γνωστή και ως μάστευση ενέργειας, χρησιμοποιεί ενέργεια από το περιβάλλον για την τροφοδοσία μικρών ηλεκτρονικών ή ηλεκτρικών συσκευών. Η έννοια εμπεριέχει τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, θερμοηλεκτρισμό, πιεζοηλεκτρισμό και ηλεκτροδυναμική, για τη χρήση τους σε εύρος εφαρμογών. Στις μέρες μας, η τεχνολογία έχει φτάσει σε κρίσιμο σημείο, εφόσον τα ηλεκτρονικά χαμηλής ισχύος και η αποτελεσματικότερη συλλογή και αποθήκευση ενέργειας είναι πλέον αρκετά προσιτή, αξιόπιστη και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και κατά αυτόν τον τρόπο είναι εφικτός ένας τεράστιος αριθμός εφαρμογών. Από τους φορητούς υπολογιστές για την Αφρική, τους ασύρματους διακόπτες φωτισμού που λειτουργούν από τη δύναμη του δακτύλου (21) έως τους ασύρματους αισθητήρες σε πεδία

πετρελαίου για την παρακολούθηση της ισχύος του εξοπλισμού μέσω δονήσεων διαφαίνεται η ανάδυση ολοένα και περισσότερων χρήσεων και εφαρμογών. (20)

Την παραγόμενη ενέργεια μπορούμε να αποθηκεύσουμε σε πυκνωτές, μπαταρίες ή υπερπυκνωτές. Όταν υπάρχει απαίτηση για μεγάλα ποσά ενέργειας χρησιμοποιούνται οι πυκνωτές. Από την άλλη όταν απαιτείται σταθερή ροή ενέργειας χρησιμοποιούμε μπαταρίες επειδή παρουσιάζουν λιγότερη διαρροή ενέργειας.

Το ενδιαφέρον για τη μάστευση ενέργειας χαμηλής ισχύος οφείλεται στη χρήση της για αυτόνομα δίκτυα αισθητήρων (22). Σε τέτοιες εφαρμογές η ενέργεια που παράγεται στο σύστημα αποθηκεύεται σε έναν αρχικό πυκνωτή και στη συνέχεια σε έναν δεύτερο ή μια μπαταρία για τη χρήση της από τον μικροεπεξεργαστή. Έτσι η ισχύς χρησιμοποιείται από τον αισθητήρα, ενώ δεδομένα μεταδίδονται διαμέσου ασυρμάτων δικτύων. (23)

Ωστόσο, είναι μακρύς ο δρόμος για την επίτευξη αυτόνομων τροφοδοτημένων ασύρματων αισθητήρων, όπως παραδειγματικά για την παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών, τις διαρροές ρύπανσης και ακόμη και μέσα στο ανθρώπινο σώμα ή στο σκυρόδεμα κτιρίων. Τέτοιου είδους εφαρμογές θα έχουν ευρεία διάδοση στο μέλλον. Ακόμη και στις μέρες μας, μπορούν να προβλεφθούν συσκευές που έχουν διάρκεια ζωής εκατοντάδων ετών χωρίς συντήρηση. Στο μεταξύ, η «γέννηση» βιονικού ανθρώπου που εμπεριέχει συσκευές συντήρησης χωρίς την ανάγκη αυτοσυντήρησης αποτελεί μελλοντικό στόχο. Κατά το IDTechEx εξακριβώνεται ότι το 2010 το σύνολο της αγοράς συσκευών για τη μάστευση ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων όλων, δηλαδή από ρολόγια χειρός έως ασύρματους αισθητήρες, ανέρχεται σε 605 εκατομμύρια δολάρια και θα αυξηθεί στα 4,4 δισεκατομμύρια δολάρια το 2020. (24)

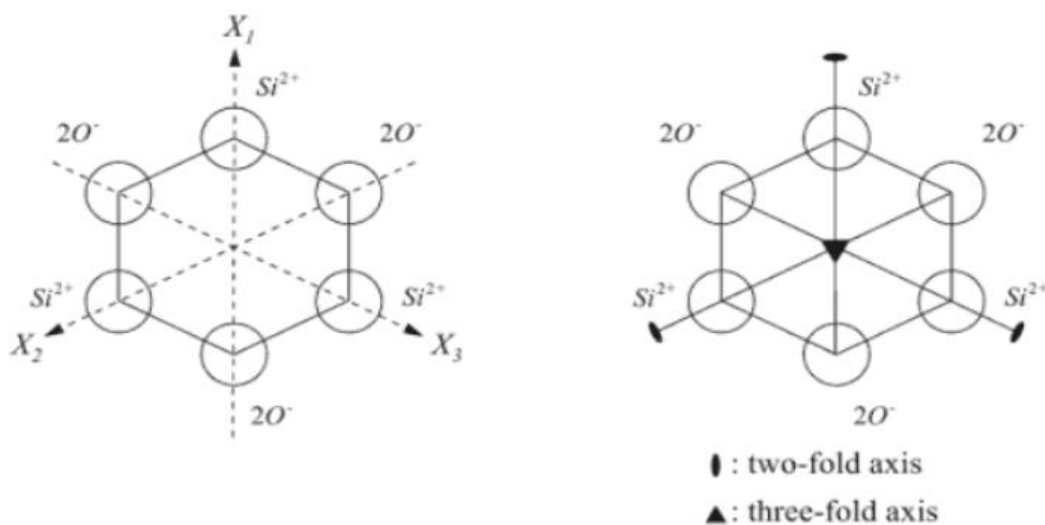
Το τρόπος με τον οποία λειτουργούν οι παραπάνω τεχνολογίες, ποιες έχουν τις περισσότερες δυνατότητες, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της καθεμίας, ακόμη και οι χώρες με τα πιο ενεργά προγράμματα αποτελούν αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας, που στην παρούσα διπλωματική δεν θα αναλυθούν εκτενέστερα. (24) (25)

3.5. Πιεζοηλεκτρισμός

Ως πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ορίζουμε τη μετατροπή της μηχανικής καταπόνησης σε ηλεκτρική τάση. Είναι διαθέσιμη μια πληθώρα πηγών μηχανικών καταπονήσεων. Για παράδειγμα χαμηλής τάσης σεισμικές δονήσεις, η ανθρώπινη κίνηση, ο θόρυβος κτλ. Συνηθέστερα το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο λειτουργεί στο εναλλασσόμενο ρεύμα, απαιτώντας αποτελεσματική χρήση χρονικά μεταβαλλόμενων εισόδων σε μηχανικό συντονισμό.

3.5.2. Ευθύ και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

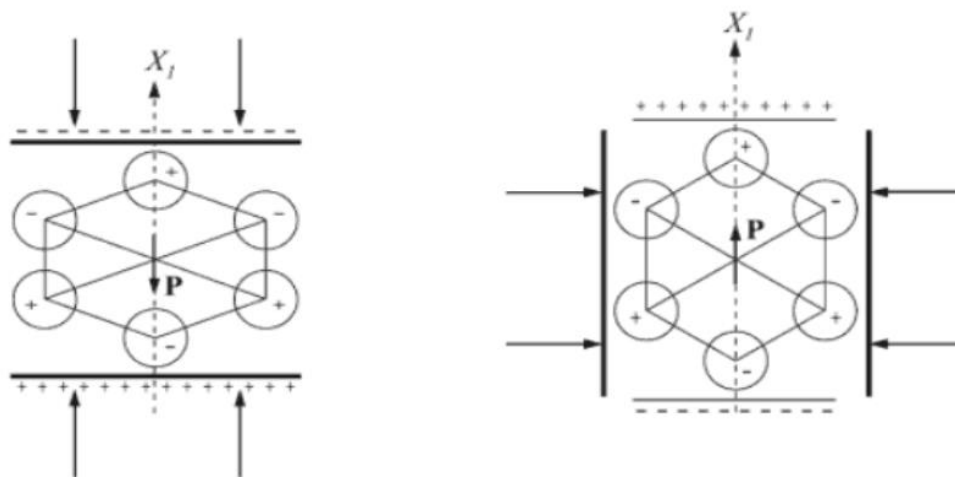
Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπως προαναφέρθηκε παρουσιάζει ευθείες αλλά και αντιστρεπτές διαδικασίες (γνωστό ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο). Μελετώντας το φαινόμενο σε μικροκλίμακα συμπεραίνουμε πως λαμβάνει χώρα σε εκείνες τις κρυσταλλικές δομές που δεν έχουν κέντρο συμμετρίας ως προς τα θετικά και αρνητικά φορτισμένα ιόντα του κρυσταλλικού πλέγματος. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εμφάνιση πιεζοηλεκτρικού φαινομένου θεωρείται η ύπαρξη πολικών αξόνων εντός της κρυσταλλικής δομής, όπου ως πολικός άξονας ορίζεται η διεύθυνση κατά μήκος της οποίας υπάρχει ηλεκτρική διπολική ροπή που οφείλεται στη κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στο χημικό δεσμό. Για καλύτερη κατανόηση, θεωρούμε παρακάτω τη στοιχειώδη (μοναδιαία) κυψελίδα του κρυστάλλου α- χαλαζία όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (26).



Εικόνα3-1. Απλοποιημένη δομή της στοιχειώδους κυψελίδας του χαλαζία. Αριστερά απεικονίζεται η θέση των ιόντων Si και O σε σχέση με τους κρυσταλλογραφικούς άξονες και δεξιά οι τρεις άξονες 2ης τάξης συμμετρίας και ο ένας άξονας 3ης τάξης συμμετρίας.

Η παραπάνω κυψελίδα απαρτίζεται από αρνητικά φορτισμένα ιόντα (ανιόντα) οξυγόνου και θετικά φορτισμένα ιόντα (κατιόντα) πυριτίου. Αποτελείται από τρεις άξονες X_1 , X_2 , X_3 , 2ης τάξης περιστροφικής συμμετρίας στο επίπεδο σχεδίασης και ένα άξονα Z , 3ης τάξης περιστροφικής συμμετρίας, κάθετο στο επίπεδο σχεδίασης. Ο κρύσταλλος είναι ηλεκτρικά ουδέτερος στην απαραμόρφωτη αυτή κατάσταση και έχει μηδενική συνισταμένη ηλεκτρική πόλωση. Στην περίπτωση όμως παραμόρφωσης της δομής του κρυστάλλου, όπως παραδείγματος χάριν κατά μήκος του πολικού άξονα X_1 , εμφανίζεται πρόσθετη ηλεκτρική πόλωση P κατά μήκος του άξονα αυτού. Πιο συγκεκριμένα η ηλεκτρική πόλωση, προέρχεται από τη μετατόπιση των ανιόντων έναντι των κατιόντων του κρυσταλλικού πλέγματος όπως διαφαίνεται στην εικόνα 3-2. Έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικού φορτίου στις εξωτερικές επιφάνειες του

κρυστάλλου που είναι κάθετες στον άξονα X_1 και συνεπώς την εμφάνιση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού πόλωσης. Αυτό ονομάζεται ευθύ διάμηκες πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η εφαρμογή όμως θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων κάθετα στον άξονα X_1 , προκαλεί πρόσθετη ηλεκτρική πόλωση με αντίθετο πρόσημο στη διεύθυνση X_1 . Η συμπεριφορά αυτή, ονομάζεται ευθύ εγκάρσιο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. (26)



Εικόνα 3-2. Ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εντός της δομής της στοιχειώδους κυψελίδας του χαλαζία. Αριστερά απεικονίζεται το διάμηκες πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ενώ δεξιά, το εγκάρσιο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Αντιστρεπτά είναι και τα δυο παραπάνω φαινόμενα, όπως παραδειγματικά η συστολή ή η διαστολή της δομής του χαλαζία που εμφανίζεται υπό την επίδραση ανάλογων προσανατολισμένων ηλεκτρικών πεδίων. Αυτό το φαινόμενο καλείται αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

3.5.1. Η ανακάλυψη του πιεζοηλεκτρισμού

Κατά το έτος 1880 τα αδέλφια Pierre και Jacques Curie ανακάλυψαν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού. Παλαιότερα είχε παρατηρηθεί η ιδιαίτερη συμπεριφορά του ορυκτού τουρμαλίνη στις περιοχές της Ινδίας και της Κεϋλάνης, όπου κατά την τοποθέτηση του ορυκτού σε ζεστή τέφρα προσελκύνονταν στην μια του πλευρά σωματίδια τέφρας ενώ στην αντίθετη απορρίπτονταν. Στη συνέχεια, έγινε αντιστροφή του φαινομένου της έλξης και της απώθησης. Κατά τον 18^ο αιώνα κρύσταλλοι τουρμαλίνης εισήχθησαν για πρώτη φορά στην Ευρώπη μέσω του εμπορίου. Οι κρύσταλλοι τουρμαλίνης ονομάστηκαν κατά το 1747 lapis electricus από τον Linne. Κατά τον επόμενο αιώνα ερευνήθηκε εκτενέστερα η σχέση της μηχανικής πίεσης και του ηλεκτρισμού, φαινόμενο το οποίο ο Becquerel πίστευε ότι ήταν αναμενόμενο στους κρυστάλλους. Ο Λόρδος Kelvin απέδειξε τη συσχέτιση μεταξύ πυροηλεκτρισμού και πιεζοηλεκτρισμού, κατά το 1877. Συγκεκριμένα, έδειξε ότι το μεγαλύτερο μέρος του πυροηλεκτρικού φορτίου της

τουρμαλίνης, αποδίδεται στο σχηματισμό πιεζοηλεκτρικής επιφανειακής φόρτισης, που προκαλείται απ' την ελαστική παραμόρφωση του κρυστάλλου κάτω από θερμοκρασιακές μεταβολές. Επιπρόσθετα, αρχικά τα αδέρφια Curie ανακάλυψαν το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο στους κρυστάλλους τουρμαλίνης, διαπιστώνοντας ότι η μηχανική παραμόρφωση σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις προκαλούσε αντίθετες ηλεκτρικές επιφανειακές φορτίσεις σε αντικείμενες κρυσταλλικές όψεις, που ήταν ανάλογες της μηχανικής παραμόρφωσης. Παρατήρηση αυτού του φαινομένου έγινε επίσης και στον χαλαζία, καθώς και σε άλλους κρυστάλλους χωρίς κέντρο συμμετρίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε πιεζοηλεκτρικό από την ελληνική λέξη «πιέζειν». Το αντίστροφο φαινόμενο αυτού αρχικά προβλέφθηκε από τον Lippmann, βασιζόμενος σε θερμοδυναμικές μελέτες. Στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους αδερφούς Curie.

3.5.3. Πιεζοηλεκτρικές τεχνολογικές εφαρμογές

Η πλειοψηφία των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών υλικών έχουν χαμηλή παραγωγή ενέργειας (σε milliwatts) για την περαιτέρω χρήση της σε φορητές συσκευές (π.χ. ρολόγια χειρός). Πιθανή πρόταση θα μπορούσε να αποτελέσει η χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών για συσκευές μάστευσης μικρο-κλίμακας, όπως μικρο-υδραυλικής ενέργειας. Σε τέτοιου είδους συσκευές ένα παλινδρομικό έμβολο που υποστηρίζεται από τρία πιεζοηλεκτρικά στοιχεία κινείται μέσω της ροής πεπιεσμένου υδραυλικού ρευστού και τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία μετατρέπουν τις διακυμάνσεις της πίεσης σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Τα συστήματα μάστευσης ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών υλικών αποτελούν μια διαρκώς εξελισσόμενη τεχνολογία καθώς ερευνάται λιγότερο από 30 έτη. Για τη μάστευση ενέργειας από κραδασμούς με σκοπό την τροφοδότηση αισθητήρων εύρος βιομηχανικών εφαρμογών εμφανίστηκαν μεταξύ του 2000 και του 2005. Επίσης πιεζοηλεκτρικά συστήματα μπορούν να μετατρέψουν την κίνηση του ανθρώπινου σώματος σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνάμα η DARPA έχει χρηματοδοτήσει προσπάθειες για την αξιοποίηση της ενέργειας από την κίνηση του ποδιού και τη κίνηση του βραχίονα, τα παπούτσια, και την αρτηριακή πίεση για εμφυτεύσιμους αισθητήρες χαμηλού επίπεδου ισχύος. Οι nanobrushes είναι ένα άλλο παράδειγμα ενός πιεζοηλεκτρικού συστήματος μάστευσης ενέργειας, οι οποίοι μπορούν να ενσωματωθούν σε είδη ένδυσης, όμως απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός για να ελαχιστοποιηθεί η δυσφορία του χρήστη. Επιπροσθέτως, η συσκευή Microbelt μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την αναπνοή. Πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ενσωματώνονται σε διαβάσεις πεζών για τη συλλογή ενέργειας από το ανθρώπινο βήμα. Ακόμη, μπορούν να ενσωματωθούν σε παπούτσια. Τέλος, ερευνητές στο MIT ανέπτυξαν το 2005 το πρώτο πιεζοηλεκτρικό σύστημα μάστευσης ενέργειας σε μικρο-κλίμακα με τη χρήση λεπτής μεμβράνης. (27)

Κεφάλαιο 4. Στοιχεία δυναμικής κατασκευών

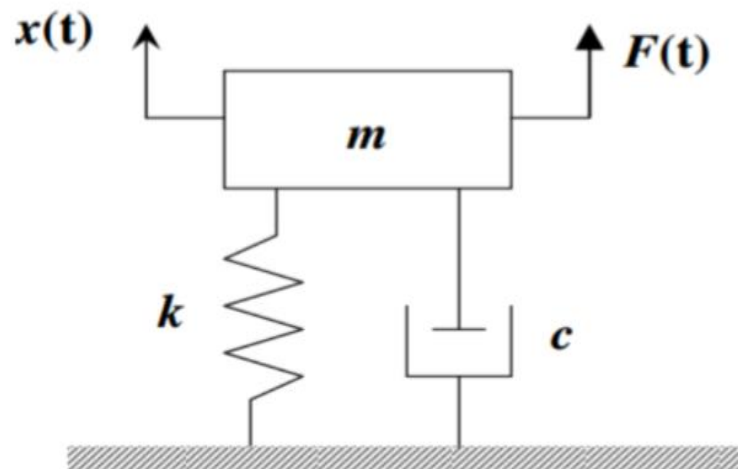
Βασικό στόχο της εργασίας αποτελούσε η μάστευση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας μέσω του μοντέλου της σύνθετης πλάκας. Ο υπολογισμός της ενέργειας γίνεται με ιδιομορφική ανάλυση, δηλαδή με τη μέθοδο των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα στο παρακάτω θεωρητικό μέρος αυτού του κεφαλαίου. Το μοντέλο της σύνθετης πλάκας προσομοιώθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της «Matlab» και στη συνέχεια οι αριθμητικές τιμές των μητρώων μάζας, δυσκαμψίας κτλ χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από την ταλάντωση της κατασκευής.

4.1. Δυναμικά συστήματα

Ως δυναμικά συστήματα ορίζουμε τα συστήματα τα οποία εξελίσσονται στην πάροδο του χρόνου. Τέτοιου είδους σύστημα μπορεί να είναι κάθε φυσικό, χημικό, οικονομικό, βιολογικό κτλ σύστημα. Έτσι κάθε χρονική στιγμή, η κατάσταση του συστήματος χαρακτηρίζεται από ένα πεπερασμένο ή άπειρο πλήθος παραμέτρων, ενώ ταυτοχρόνως το σύνολο των εφικτών καταστάσεων ορίζει τον πεπερασμένο ή άπειρο χώρο των καταστάσεων. (28)

4.2. Εξισώσεις κίνησης

Αρχικά αναλύεται ένα δυναμικό σύστημα ταλάντωσης, το οποίο αποτελείται από ελατήριο, μάζα και αποσβεστήρα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4-1):



Εικόνα 4-1. Δυναμικό Σύστημα ενός Βαθμού Ελευθερίας

Η σημασία των συμβόλων που χρησιμοποιούνται στο παραπάνω σχήμα είναι η εξής:

M , όπου ορίζεται η μάζα του σώματος,

k , η σταθερά του ελατηρίου,

c , η απόσβεση,

$x(t)$, η χρονικά μεταβαλλόμενη απόκριση του συστήματος,

$F(t)$, η χρονικά μεταβαλλόμενη εξωτερική διέγερση συστήματος.

Ο αριθμός των ανεξάρτητων κινήσεων που επιτρέπονται στο σώμα, ή στην περίπτωση μηχανισμού πολλών φορέων, ο αριθμός των πιθανών ανεξάρτητων σχετικών κινήσεων μεταξύ των τμημάτων του μηχανισμού ορίζεται από τους βαθμούς ελευθερίας του. Το παραπάνω παράδειγμα για τη βέλτιστη κατανόηση των ταλαντώσεών του, έχει ένα μονάχα βαθμό ελευθερίας. Στο παραπάνω παράδειγμα θεωρούμε το κάτω άκρο των στοιχείων ελαστικότητας και απόσβεσης (k, c) προσδεμένο σε ακίνητη και μη οριζόντια επιφάνεια, ενώ το άνω άκρο τους συνδεδεμένο με μάζα m . Χαρακτηρίζουμε το σύστημα ενός Βαθμού Ελευθερίας επειδή το κινηματικό μέγεθος του συστήματος είναι η κοινή μετατόπιση του κέντρου μάζας και των άνω άκρων των k, c . (29)

Επίσης η βαρύτητα δεν λαμβάνεται υπόψιν διότι αποτελεί μόνιμη στατική φόρτιση. Αυτό γίνεται γιατί θέτουμε ως αρχή της μετατόπισης την παραμορφωμένη από το βάρος κατάσταση ισορροπίας.

Ως φυσικές ιδιότητες του συστήματος χαρακτηρίζονται τα φυσικά στοιχεία του συστήματος, όπου στο παράδειγμα μας ορίζουμε τρία φυσικά στοιχεία, τη μάζα, την απόσβεση και τη δυσκαμψία.

Μάζα m

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εξίσωση (εξ-2), η μάζα χαρακτηρίζει την αδράνεια του σώματος και έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αδρανειακών δυνάμεων. Αναλυτικότερα, η αδρανειακή δύναμη μιας μάζας m είναι ανάλογη της επιτάχυνσης της με σταθερά αναλογίας την ίδια τη μάζα m .

$$F_m = m \ddot{x} \quad (2)$$

Απόσβεση c

Η απόσβεση ορίζεται ως η μείωση του πλάτους μιας ταλάντωσης, λόγω της τριβής, όπως φαίνεται στην εξίσωση 3. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην απώλεια ενέργειας από το ταλαντευόμενο σύστημα προς το περιβάλλον.

$$F_C = c \dot{x} \quad (3)$$

όπου το c ονομάζεται σταθερά απόσβεσης και η εξίσωση δηλώνει ότι η δύναμη απόσβεσης είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας \dot{x} , με σταθερή αναλογία την ποσότητα c .

Ελατήριο σταθεράς k

Η σταθερά ελατηρίου k εκφράζει την σκληρότητα ενός ελατηρίου και εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του ελατηρίου, δηλαδή το μήκος, πάχος σύρματος, τη διάμετρο των σπειρών, το υλικό, τη θερμοκρασία και την απόσταση μεταξύ των σπειρών. Η μεταβολή του μήκους του ελατηρίου κατά x προκαλεί εμφάνιση ελαστικής δύναμης η οποία είναι ανάλογη της μετατόπισης x με σταθερά αναλογίας την ποσότητα k , όπως περιγράφεται στην εξίσωση 4.

$$F_k = kx \quad (4)$$

Στον παρακάτω πίνακα (4-2) ακολουθεί μια σύνοψη των παρακάτω μεγεθών:

Πίνακας 4-2. Φυσικά στοιχεία συστήματος

Στοιχείο	Φυσική σημασία	Αναπτυσσόμενες δυνάμεις	Εξίσωση
M	Αδράνεια συστήματος	Αδρανειακές	$F_m = m \ddot{x}$
C	Καταστροφή Ενέργειας	Απόσβεσης	$F_C = c \dot{x}$
K	Παραμορφωσιμότητα	Ελαστικές	$F_k = kx$

Τα παραπάνω στοιχεία συνδέονται μέσω της δυναμικής ισορροπίας του συστήματος. Επίσης το σύνολο των εσωτερικών δυνάμεων ισούται αλγεβρικά με την εξωτερική ασκούμενη δύναμη σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση ισορροπίας:

$$F_k + F_C + F_m = f(t) \quad (5)$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση (εξ-5) όλες τις παραπάνω εξισώσεις των εσωτερικών δυνάμεων(εξ-2,3,4) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (6)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι Συνήθης Γραμμική Διαφορική Εξίσωση δευτέρας τάξεως η οποία περιγράφει την κίνηση του συστήματος και η επίλυση της εξίσωσης δείχνει την απόκριση του συστήματος.

4.3. Ιδιομορφική ανάλυση

Οι ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες ενός συστήματος, όπως αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω. Είναι ιδιαίτερες σημαντικές για τη δυναμική ανάλυση των κατασκευών, όσον αφορά την εσωτερική τους ταλάντωση και συμπεριφορά με την απουσία αρχικών συνθηκών ή εξωτερικών δυνάμεων. Οι ιδιοσυχνότητες ή αλλιώς φυσικές συχνότητες και οι ιδιομορφές ή αλλιώς ιδιοδιανύσματα του εκάστοτε δυναμικού συστήματος είναι τόσες όσες και οι βαθμοί ελευθερίας του. Ο υπολογισμός τους γίνεται μέσω των μητρώων μάζας και δυσκαμψίας.

4.3.1. Ιδιοσυχνότητες-Ιδιοτιμές

Η συχνότητα κατά την οποία απορροφάται από το σύστημα η μέγιστη ενέργεια και είναι το σημείο συντονισμού της κατασκευής ονομάζεται ιδιοσυχνότητα. Χαρακτηρίζει την ταλάντωση ενός συστήματος στο οποίο ασκούνται μονάχα συντηρητικές δυνάμεις και συμβολίζεται με ω . Ως συντηρητικές δυνάμεις χαρακτηρίζουμε τις δυνάμεις των οποίων το έργο είναι μηδενικό. Συνάμα η κυκλική ιδιοσυχνότητα του συστήματος εκφράζεται σε rad/sec και για μονοβάθμια συστήματα (ταλαντωτές) δίνεται από την παρακάτω σχέση (εξ-6):

$$\omega^2 = \lambda = k/m \quad (7)$$

,όπου k η σταθερά ελατηρίου,

m η μάζα του συστήματος.

Η συχνότητα εκφρασμένη σε (Hz) δίδεται:

$$f = \omega/2\pi$$

Σε μικρές ταλαντώσεις οι ιδιοτιμές υπολογίζονται μέσω των μητρώων μάζας m και δυσκαμψίας K ως εξής (εξ-7):

$$M\ddot{u}(t) - Ku(t) = 0 \quad (8)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι της μορφής $u(t)=a f(t)$ όπου a το άγνωστο και ανεξαρτήτου χρόνου διάνυσμα μετακινήσεων, και $f(t)$ η κοινή-άγνωστη χρονική συνάρτηση όλων των μετακινήσεων.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (7) και (8) προκύπτει η σχέση (9):

$$K - \lambda M = 0 \quad (9)$$

Της οποίας η προφανής λύση είναι $a=0$ ή η ορίζουσα:

$$\det (K - \lambda M) = 0$$

και η λύσης της ορίζουσας αυτής επιστρέφει τις τιμές των ιδιοτιμών λ .

Για κάθε λ που επιστρέφει η ορίζουσα αντιστοιχεί ένας πίνακας μετακινήσεων a_i όπου a καλείται το ιδιοδιάνυσμα του προβλήματος ιδιοτιμής. Για τον υπολογισμό του a_i γίνεται κανονικοποίηση από την οποία προκύπτουν τα ιδιοδιανύσματα φ_i .

$$\varphi_i = c_i a_i$$

όπου c_i αυθαίρετη σταθερά.

Συνάμα γίνεται η θεώρηση ότι το σύστημα εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση με διάνυσμα μετακινήσεων ημιτονοειδή συνάρτηση του χρόνου όπως περιγράφεται παρακάτω (εξ-10):

$$U = \varphi \sin \omega t \quad (10)$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα, φ τα ιδιοδιανύσματα.

Από τις σχέσεις (7) και (9) προκύπτει η παρακάτω σχέση (εξ-11):

$$(K - \lambda M) \varphi = 0 \quad (11)$$

Της οποίας η λύση είναι η προφανής $\varphi=0$, ή η ορίζουσα μηδέν:

$$\det (K - \lambda M) = 0$$

με λύση $\omega_i^2=\lambda_i$

όπου i ο αριθμός των ιδιοτιμών και των βαθμών ελευθερίας.

4.3.2. Ιδιοδιανύσματα- Ιδιομορφές

Ο τρόπος ταλάντωσης ενός μηχανικού συστήματος ορίζεται με την έννοια των ιδιοδιανυσμάτων. Μέσω αυτών μας δίδονται πληροφορίες για την μετακίνηση και παραμόρφωση του συστήματος. Τα ιδιοδιανύσματα συμβολίζονται με φ και υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης (11):

$$(-\omega^2 M + K)\varphi = 0$$

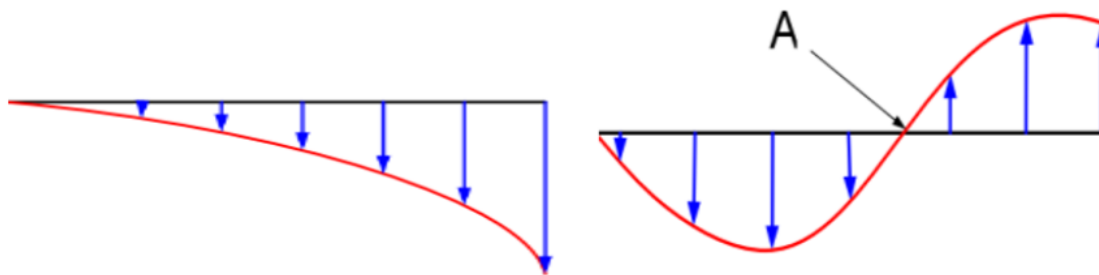
όπου M και K τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας,

ω η κυκλική ιδιοσυχνότητα,

και φ τα ιδιοδιανύσματα.

Συνηθέστερα σε τεχνολογικές εφαρμογές υπολογίζονται οι 5-20 πρώτες ιδιομορφές για δύο βασικούς λόγους. Αρχικά, επειδή οι δυνάμεις διέγερσης στη φύση διεγείρουν μόνο τις χαμηλές, δηλαδή τις πρώτες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, και έπειτα διότι οι αδρανειακές δυνάμεις έχουν μικρότερη επιρροή στη δυναμική του συστήματος όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4-3) φαίνονται οι δύο πρώτες ιδιομορφές μίας δοκού:



Εικόνα 4-3. Πρώτη και δεύτερη ιδιομορφή δοκού

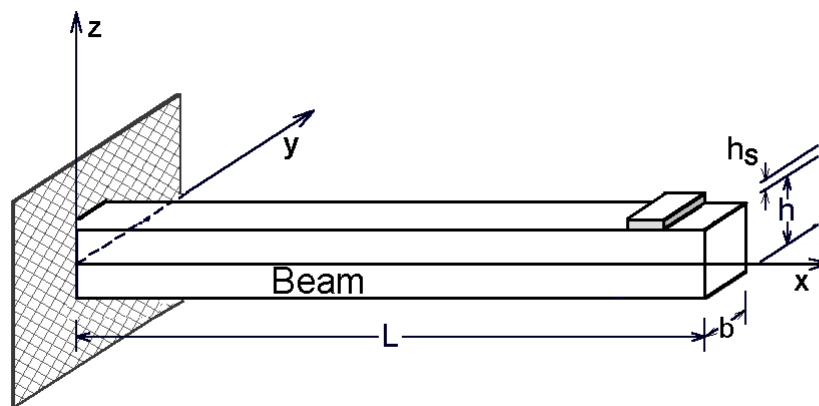
Ιδιαίτερως χρήσιμη θεωρείται η ιδιομορφική ανάλυση διότι δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά του δυναμικού συστήματος. Αναλυτικότερα, πέραν της μορφή της ταλάντωσης δείχνει και κάποια κρίσιμα σημεία (δεσμούς) της κατασκευής. Παραδειγματικά, αν προκαλέσουμε διέγερση στο σημείο Α σύμφωνα με τον δεύτερο τρόπο ταλάντωσης, δηλαδή σύμφωνα με την δεύτερη ιδιομορφή, δεν θα πάρουμε καμία πληροφορία για την ταλάντωση του συστήματος καθώς το σημείο αυτό είναι σημείο δεσμού. (30)

Κεφάλαιο 5. Αναφορά σε αντίστοιχη έρευνα για δοκό

Σε προηγούμενη εργασία έχει μελετηθεί εκτενέστερα το μοντέλο της πακτωμένης δοκού στο οποίο θα γίνει μια μικρή αναφορά. Μελετήθηκε μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM ή modal analysis) και στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός της ενέργειας για κάθε ιδιομορφή. (31)

5.1. Το μοντέλο της δοκού

Θεωρούμε ένα «έξυπνο» μοντέλο δοκού, μήκους L και με εμβαδόν διατομής A , το οποίο περιλαμβάνει πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Η δοκός είναι πακτωμένη στο αριστερό της άκρο και χρησιμοποιείται για μάζευση ενέργειας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 5-1):



Εικόνα 5-1. Μοντέλο δοκού

Οι άξονες μήκους και πάχους είναι κατά μήκος των x και z κατευθύνσεων. Ο άξονας xy επιλέχθηκε ως επίπεδο της δοκού και βρίσκεται στο κέντρο της. Κατά την δημιουργία του μοντέλου, το πιεζοηλεκτρικό τεμάχιο θα έπρεπε να είναι τέλεια συνδεδεμένο στην κατασκευή με μηδενικό πάχος επικόλλησης. Γεγονός που σημαίνει ότι οι μετατοπίσεις παραμένουν συνεχείς κατά μήκος της δοκού.

Θεωρείται ότι οι γεωμετρικές παράμετροι της δοκού επιτρέπουν τη χρήση της προσέγγισης της δοκού Timoshenko. Οι εξισώσεις πεδίου μετατόπισης για τη δοκό σε οποιοδήποτε σημείο μέσω του πάχους παρουσιάζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$u_x(x, y, z, t) = z\psi(x, t), \quad u_y(x, y, z, t) = 0, \quad u_z(x, y, z, t) = w(x, t) \quad (12)$$

όπου t συμβολίζεται ο χρόνος, w οι εγκάρσιες μετατοπίσεις του ενδιαμέσου επιπέδου της δοκού και ψ είναι η περιστροφή του άξονα x γύρω από τον άξονα y .

Υποθέτοντας μια μικρή παραμόρφωση, η σχέση μετατόπισης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\varepsilon_x = z \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \gamma_{xz} = \psi + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (13)$$

Οι γραμμικές ιδιοσυστατικές εξισώσεις που συνδέουν τα ελαστικά και τα ηλεκτρικά πεδία σε ένα πιεζοηλεκτρικό μέσο εκφράζονται από τις ευθείς και αντίστροφες πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις που δίδονται ως εξής:

$$\{D\} = [e]\{\varepsilon\} + [\xi]\{E\} \quad \{\sigma\} = [Q]\{\varepsilon\} - [e]^T\{E\} \quad (14)$$

όπου $\{\sigma\}$ είναι ο φορέας τάσης,

$\{\varepsilon\}$ είναι ο φορέας παραμόρφωσης,

$\{D\}$ είναι η ηλεκτρική μετατόπιση,

$\{E\}$ είναι η ισχύς του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου που επενεργεί στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού στρώματος,

$[Q]$ μητρώο,

$[e]$ είναι η πιεζοηλεκτρικό μητρώο και

$[\xi]$ είναι η μητρώο διαπερατότητας.

Για τη διατύπωση του απλουστευμένου μοντέλου χρησιμοποιούνται πρόσθετες υποθέσεις. Συγκεκριμένα, θεωρείται ένα σταθερό εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο για τον πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή και τα υπολειπόμενα στοιχεία σε επίπεδο υποτίθεται ότι εξαφανίζονται. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό που θεωρείται για τα επιφανειακά στρώματα είναι ορθοτροπικό με τις κατευθύνσεις της ορθοτροπίας που συμπίπτει με τους άξονες της δοκού, x , y , z , και είναι πολωμένο στην εγκάρσια κατεύθυνση z . Υποθέτοντας ότι το πλάτος στην κατεύθυνση y είναι ελεύθερο τάσεων και χρησιμοποιώντας την υπόθεση του κατακόρυφου άγκυρος, οι συστατικές εξισώσεις για αυτό το μοντέλο δοκού μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\sigma_x = \tilde{Q}_{11}\varepsilon_x - \tilde{e}_{31}E_z, \quad \tau_{xz} = \tilde{Q}_{55}\gamma_{xz}, \quad D_z = \tilde{e}_{31}\varepsilon_x + \tilde{\xi}_{33}E_z \quad (15)$$

όπου σ_x , τ_{xz} είναι η κανονική και η διατμητική τάση,

αντίστοιχα, ε_x , γ_{xz} είναι η κανονική και η διατμητική τάση,

D_z η ηλεκτρική μετατόπιση,

E_z το ηλεκτρικό πεδίο,

$\tilde{Q}_{11}, \tilde{Q}_{55}$ οι συντελεστές δυσκαμψίας,

$\tilde{\epsilon}_{31}$ η πιεζοηλεκτρική σταθερά και

$\tilde{\xi}_{33}$ η σταθερά διαπερατότητας.

Ο ελαστικός πυρήνας της δοκού θεωρείται ότι είναι μονωμένος και επιτυγχάνεται ακυρώνοντας τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές. Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου E_z μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E_z = \frac{V}{h_p} \quad (16)$$

όπου V είναι η εφαρμοζόμενη τάση κατά μήκος της κατεύθυνσης του πάχους του ενεργοποιητή και

h_p είναι το πάχος του στρώματος ενεργοποιητή.

Στην περίπτωση που το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο λειτουργεί ως αισθητήρας, ο οποίος παίζει το ρόλο του στη μάζευση ενέργειας σε αυτή τη μελέτη, η εξίσωση του αισθητήρα μπορεί να προκύψει από την τρίτη εξίσωση της ηλεκτροελαστικής σχέσης ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού (εξ-15). Μόνο τα στελέχη που παράγονται από την «ξένη» δοκό, δρουν στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, με αποτέλεσμα το φορτίο εξόδου από τον αισθητήρα να δίνεται από την εξής σχέση:

$$q(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\int_{S_{ef}} D_z dS \right)_{z=h/2} + \left(\int_{S_{ef}} D_z dS \right)_{z=h/2+h_p} \right\} \quad (17)$$

όπου το S_{ef} είναι το αποτελεσματικό ηλεκτρόδιο επιφάνειας του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

Το αποτελεσματικό ηλεκτρόδιο επιφάνειας του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι το τμήμα της επιφάνειας που καλύπτεται από ηλεκτρόδια και στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό φορτίο που δημιουργείται λόγω της εξωτερικής μηχανικής διαταραχής ανιχνεύεται μόνο αν το φορτίο συλλέγεται μέσω του αποτελεσματικού επιφανειακού ηλεκτροδίου. Σε αυτή τη μελέτη, υποτίθεται ότι ολόκληρο το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο χρησιμεύει ως αποτελεσματικό επιφανειακό

ηλεκτρόδιο. Χρησιμοποιώντας την άμεση πιεζοηλεκτρική εξίσωση (15) και λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στο στρώμα αισθητήρα, προκύπτει:

$$q(t) = \int_{S_{ef}} \tilde{e}_{31} \varepsilon_x dS = \int_{S_{ef}} \tilde{e}_{31} \left(\frac{h+h_p}{2} \right) \frac{\partial \psi}{\partial x} dS \quad (18)$$

Το ρεύμα στην επιφάνεια του pzt στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί με τη διαφοροποίηση του φορτίου σε σχέση με το χρόνο:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (19)$$

Το ρεύμα μετατρέπεται σε έξοδο τάσης ανοικτού κυκλώματος μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$V(t) = G_s i(t) \quad (20)$$

όπου G_s είναι το “κέρδος” του τρέχοντος ενισχυτή.

Οι εξισώσεις κίνησης της δοκού με συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία προέρχονται από την αρχή του Χάμιλτον:

$$\int_0^T (\delta T - \delta U + \delta W) dt = 0 \quad (21)$$

Η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης U και η κινητική ενέργεια T υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A [\sigma_x \varepsilon_x + \tau_{xz} \gamma_{xz} - E_z D_z] dA dx \quad T = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \rho [\dot{u}_x^2 + \dot{u}_z^2] dA dx \quad (22)$$

όπου dA είναι η διατομή της δοκού.

Γίνεται χρήση ενός πεπερασμένου στοιχείου δύο κόμβων με δύο μηχανικούς βαθμούς ελευθερίας, w και ψ , ανά κόμβο και χρησιμοποιώντας τυπικές τεχνικές διακριτοποίησης έχουμε:

$$\{u\} = \{w, \psi\}^T = [N]\{X\} = \left[[N_w] [N_\psi] \right]^T \{X\} \quad (23)$$

όπου $\{X\} = \{w_1, \psi_1, w_2, \psi_2\}^T$ είναι μια κυβική συνάρτηση σχήματος και $[N_\psi]$ είναι μια τετραγωνική συνάρτηση σχήματος.

Οι παραπάνω συναρτήσεις οδηγούν σε ένα ελεύθερο στοιχείο ασφάλισης διάτμησης, που ονομάζεται «εξαιρετικά συγκλίνον» στοιχείο [πηγή 10].

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις (12) - (13) και (15) στην αρχή του Χάμιλτον (21) και συλλέγοντας τους κοινούς συντελεστές και τη συμβολή όλων των πεπερασμένων στοιχείων, το ολικό μητρώο ακαμψίας $[K_{uu}]$ και μάζας $[M]$ της δοκού προέρχονται όμοια με την πηγή [10] και η γενικευμένη μετατόπιση $\{X(t)\}$ παρέχεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K_{uu}]\{X\} = \{F_m\} + \{F_{el}\} \quad (24)$$

όπου $\{F_m\}$ είναι η παγκόσμια μηχανική δύναμη και

$\{F_{el}\} = -[K_{u\varphi}]V$ είναι ο ηλεκτρικός φορέας δύναμης λόγω ενεργοποίησης.

Η εξίσωση (24) αντιπροσωπεύει τη δυναμική εξίσωση κίνησης για μια μηχανική δομή που περιλαμβάνει πιεζοηλεκτρική ακαμψία. Αυτό το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες έρευνες, που σχετίζονται με το σχεδιασμό των «έξυπνων» πιεζοηλεκτρικών κατασκευών.

5.2. Μάστευση ενέργειας μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης

Ο σχεδιασμός του «συλλέκτη» που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη βασίζεται στην τροπική ανάλυση της δομής, δηλαδή στα δομικά χαρακτηριστικά της δοκού προβόλων που περιγράφηκε παραπάνω. Τα εργαλεία ανάλυσης τρόπων και η απόσβεση της ενέργειας περιγράφονται ακολούθως.

Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος είναι αρκετά μεγάλοι, επομένως απαιτείται να μοντελοποιήσουμε το σύστημα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Επομένως, η εξίσωση (24) εκφράζεται εισάγοντας μια νέα μεταβλητή:

$$\{X\} = \sum_{i=1}^N \Phi_i \eta_i(t) = [\Phi] \{\eta\} \quad (25)$$

όπου $[\Phi]$ είναι το μητρώο modal και

$\{\eta\}$ είναι ο διανυσματικός συντελεστής συντεταγμένων.

Έτσι αντικαθιστώντας την εξίσωση (25) στην εξίσωση (24) θα έχουμε:

$$\{\ddot{\eta}\} + [\Omega^2] \{\eta\} = [\Phi]^T \{F_m\} - [\Phi]^T [K_{u\phi}] V \quad (26)$$

Χρησιμοποιώντας επίσης τη “modal” προσέγγιση, η δομική απόσβεση μπορεί εύκολα να εισαχθεί ως

$$\{\ddot{\eta}\} + [\Lambda] \{\dot{\eta}\} + [\Omega] \{\eta\} = [\Phi]^T \{F_m\} - [\Phi]^T [K_{u\phi}] V \quad (27)$$

όπου $[\Lambda]$ είναι το διαγωνικό μητρώο απόσβεσης με τον γενικό όρο $2\xi_i \omega_i$,

όπου ξ_i είναι ο λόγος απόσβεσης της τροχιάς και

ω_i η φυσική συχνότητα του στοιχείου i.

Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας

Η ποσότητα ενέργειας που παράγεται από κάθε πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε κάθε ιδιομορφή δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$E = \frac{1}{2} G \left(\frac{\Delta u}{L} \right) V_{vol} \quad (28)$$

όπου G είναι το ελαστικό μέτρο,

L είναι το συνολικό μήκος της δέσμης και

V_{vol} είναι ο όγκος της δέσμης.

Η ποσότητα Δu δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta u = \left(\varphi_i^j - \varphi_{i+1}^j \right) \frac{h}{2} \quad (29)$$

όπου φ_i^j ορίζεται το στοιχείο i του ιδιοδιανύσματος j και

h συμβολίζεται το ύψος της δοκού.

Ανάλογα με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό για τη μάζτευση ή αποθήκευση της ενέργειας, η εξίσωση (28) μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερους υπολογισμούς.

Κεφάλαιο 6. Μοντέλο: σύνθετη ευφυής πλάκα

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του μοντέλου, καθώς και του βέλτιστου πειραματικού τρόπου για την όσο το δυνατόν καλύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα, περιγράφεται ο τρόπος μοντελοποίησης του προβλήματος μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων όπως αναλύεται παρακάτω. Κατά αυτόν τον τρόπο αναλύεται το θεωρητικό μέρος της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση του μοντέλου της σύνθετης πλάκας που χρησιμοποιήθηκε και η εφαρμογή της μεθόδου εντός του μοντέλου.

6.1. Σύνθετες ευφυείς κατασκευές με πιεζοηλεκτρικά υλικά

Το μοντέλο που εξετάζουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια σύνθετη πλάκα που αποτελείται από πιεζοηλεκτρικά υλικά των οποίων τις ιδιότητες αναλύσαμε εκτενέστερα στο προηγούμενο κεφάλαιο στο πάνω και κάτω μέρος της.

6.2. Πεπερασμένα στοιχεία

6.2.1. Η ιστορία της μεθόδου

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 1909 από τον Γερμανό μαθηματικό Ritz και συνεχίστηκε από τον Ρώσο μαθηματικό Galerkin. Λόγω απουσίας του ηλεκτρονικού υπολογιστή η διάδοση και η ανάπτυξη της μεθόδου καθυστέρησε και παρέμεινε στάσιμη για πολλά χρόνια. Η ανάγκη εφαρμογής της μεθόδου γεννήθηκε στην αεροναυπηγική με σκοπό την επίλυση δύσκολων προβλημάτων για την κατασκευή αεροσκαφών. Το 1941 ο Hrenikoff εισήγαγε τη μέθοδο του πλαισίου (framework method) όπου αντικαθιστά ένα επίπεδο ελαστικό μέσο με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών. Το 1943 ο μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα στρέψης μέσω της μεθόδου Rayleigh-Ritz. Το 1956 οι Αμερικανοί Turner, Clough, Martin και Top υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων. Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου Berkeley της Καλιφόρνια της Αμερικής χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα 'Πεπερασμένα στοιχεία' (Finite elements). Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων. (32)

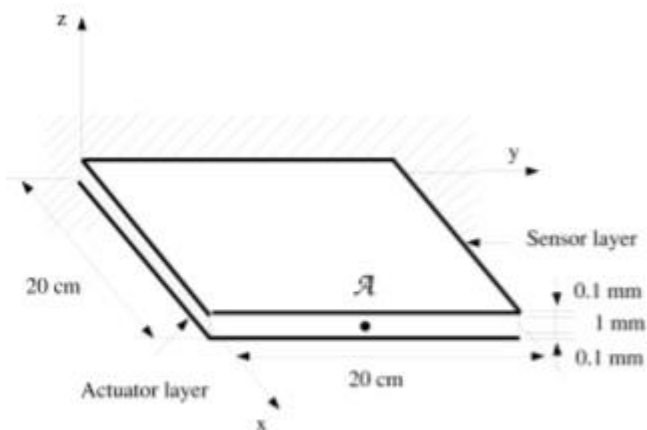
6.2.2. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Το μοντέλο της σύνθετης πλάκας τριών στρωμάτων εντός της οποίας εργαζόμαστε θεωρείται ενιαίο, δηλαδή η πλάκα έχει τη μορφή «σάντουιτς». Επιπρόσθετα η στρωματομορφή θεωρία θα μπορούσε να αποτελέσει μια ακριβέστερη και αποτελεσματικότερη θεώρηση, που συχνά χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς «έξυπνων» κατασκευών. Η θεωρία αυτή δίνει ακριβέστερη δυνατότητα μοντελοποίησης της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών μεγάλου πάχους.

6.3. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα απλό και αποτελεσματικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τον ενεργό έλεγχο των ταλαντώσεων μιας σύνθετης πλάκας που περιέχει κατανεμημένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές. Το μοντέλο βασίζεται στην θεωρία της σύνθετης πλάκας πεπερασμένων στοιχείων και στην αρχή των εικονικών μετατοπίσεων. Η στατική και δυναμική ανάλυση μιας προβολής της πλάκας εκτελείται ως αριθμητικό παράδειγμα για την επαλήθευση του παρουσιαζόμενου μοντέλου.

Το μοντέλο της σύνθετης πλάκας περιλαμβάνει έναν ελαστικό πυρήνα ο οποίος είναι κατασκευασμένος από το υλικό ανθρακονήματος T300/976 graphite-epoxy. Επίσης, στο άνω και κάτω μέρος της πλάκας προσαρμόστηκαν δύο στρώματα πιεζοηλεκτρικού υλικού (PZT G1195N piezoceramics), όπου το άνω στρώμα λειτουργεί ως διεγέρτης και το κάτω ως αισθητήρας. Η σύνθετη πλάκα φαίνεται στην Εικόνα 6-1: (33)



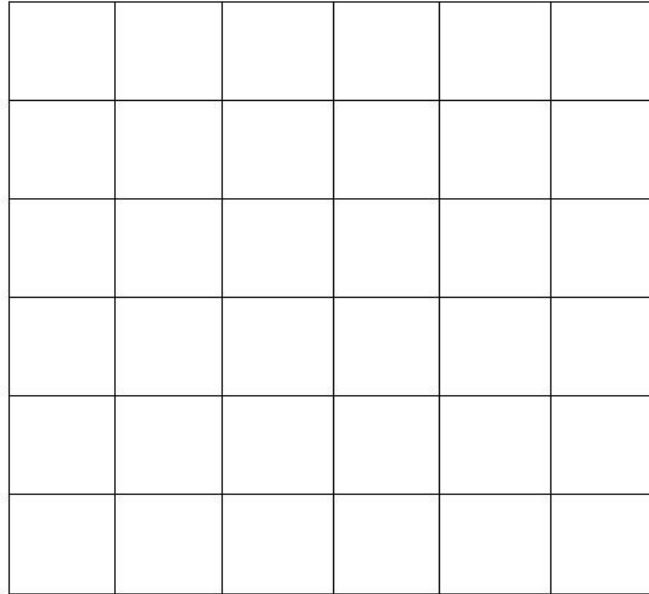
Εικόνα 6-1. Πολυστρωματική σύνθετη πλάκα με ενσωματωμένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές.

Οι υλικές σταθερές των δύο υλικών, του εποξικού γραφίτη και του πιεζοηλεκτρικού υλικού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6-2):

Πίνακας 6-2. Ιδιότητες σύνθετων υλικών PZT G1195N piezoceramics και T300/976 graphite-epoxy.

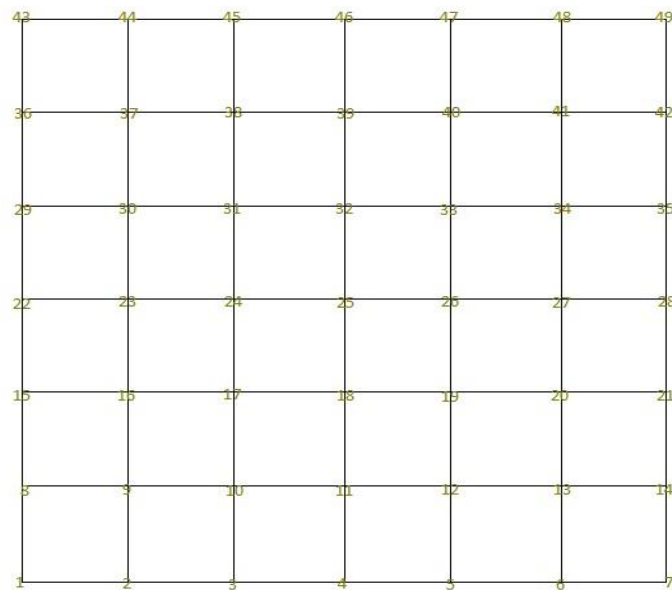
	PZT	T300/976
Young's moduli (GPa):		
E_{11}	63.0	150
$E_{22} = E_{33}$	63.0	9
Poisson's ratio:		
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.3	0.3
ν_{23}	0.3	0.3
Shear moduli (GPa):		
$G_{12} = G_{13}$	24.2	7.10
G_{23}	24.2	2.50
Density ρ (kg m⁻³)	7600	1600
Piezoelectric constants (m V⁻¹):		
$d_{31} = d_{32}$	254×10^{-12}	
Electrical permittivity (F m⁻¹):		
$\epsilon_{11} = \epsilon_{22}$	15.3×10^{-9}	
ϵ_{33}	15.0×10^{-9}	

Στη συνέχεια εκτελέστηκε διακριτοποίηση της κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όπως προαναφέρθηκε. Αναλυτικότερα, έγινε χρήση ορθογωνικών, ισοπαραμετρικών πεπερασμένων στοιχείων 4 κόμβων ανά στοιχείο με πέντε βαθμούς ελευθερίας το καθένα, 3 μεταφορικούς στις διευθύνσεις x, y, z και 2 στροφικούς γύρω από τους άξονες x και y. Έτσι έγινε διαίρεση του φορέα σε $6 \times 6 = 36$ τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία που μας οδήγησε σε ένα σύστημα 49 κόμβων στο σύνολο. Συνεπώς, οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας του συστήματος είναι $49 \times 5 = 245$, όμως, από τις συνθήκες στήριξης (πάκτωση) στο αριστερό άκρο της πλάκας δεν λαμβάνουμε υπόψιν τους 7 ακριανούς κόμβους οι οποίοι έχουν $7 \times 5 = 35$ βαθμούς ελευθερίας. Συμπερασματικά το τελικό σύστημά μας έχει 210 ενεργούς βαθμούς ελευθερίας. Στην παρούσα εργασία μας απασχολεί μονάχα η μετατόπιση κατά τον άξονα z, δηλαδή ο τρίτος από τους πέντε βαθμούς ελευθερίας κάθε κόμβου. Έτσι, το πλέγμα της διακριτοποίησης διαμορφώνεται στη μορφή που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Εικόνα 6-3):



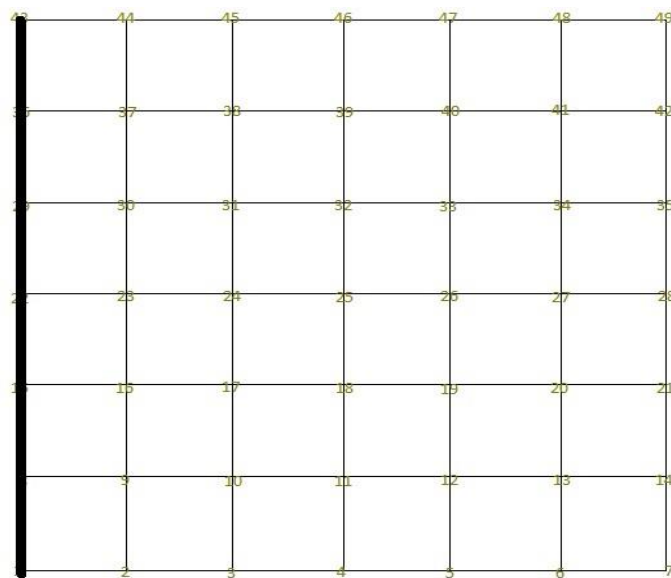
Εικόνα 6-3. Διακριτοποιημένη πλάκα με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Στην Εικόνα 6-4 φαίνεται η αρίθμηση των κόμβων της κατασκευής:



Εικόνα 6-4. Διακριτοποιημένη πλάκα με αριθμημένους τους κόμβους ανά στοιχείο

Η κατασκευή είναι πακτωμένη στην αριστερή της πλευρά. Αυτό πραγματοποιήθηκε με μηδενισμό όλων των βαθμών ελευθερίας των αριστερά ακραίων κόμβων, δηλαδή των κόμβων 1, 3, 15, 22, 29, 36 και 43 όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-5:



Εικόνα 6-5. Διακριτοποιημένη πλάκα πακτωμένη και στην αριστερή πλευρά της.

Κατά συνέπεια, το προς μελέτη μοντέλο της σύνθετης πλάκας αποτελεί ένα σύστημα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας, που δεν χαρακτηρίζεται πλέον από μία μάζα, μία απόσβεση, και μία σταθερά ελαστικότητας, (όπως στον μονοβάθμιο ταλαντωτή), αλλά από μητρώα μεγέθους αντίστοιχου του αριθμού των βαθμών ελευθερίας. Αποτελεσματικά οι εξισώσεις της κίνησης έχουν την ακόλουθη μορφή, όπως θα επεξηγηθούν αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

όπου M μητρώο μάζας,

C μητρώο απόσβεσης,

K μητρώο δυσκαμψίας,

F διάνυσμα εξωτερικής δύναμης,

x διάνυσμα μετατοπίσεως,

\dot{x} διάνυσμα ταχυτήτων και

\ddot{x} διάνυσμα επιταχύνσεων.

6.4. Υλοποίηση μάστευσης ενέργειας

Η μάστευση ενέργειας έγινε μέσω μοντελοποίησης της σύνθετης πλάκας σε περιβάλλον “Matlab”. Αρχικά υπολογίζονται και σχεδιάζονται τα ιδιοδιανύσματα (mode shapes) για το μοντέλο πλάκας (33). Η εύρεση της ενέργειας γίνεται με υπολογισμό της ενέργειας παραμόρφωσης (strain energy), αλλάζοντας τη θέση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, με αποτέλεσμα την αλλαγή της μέγιστης ενέργειας. Επίσης αλλάζοντας και την επιβαλλόμενη δύναμη, αλλάζει εξίσου η μέγιστη ενέργεια. Στη συνέχεια, με κατάλληλη τροποποίηση λήφθηκε η ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (modal strain energy), σύμφωνα με τον παρακάτω ορισμό. Η ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (modal strain energy ή MSE) ορίζεται ως το γινόμενο του μητρώου ακαμψίας για κάθε στοιχείο με τη δεύτερη δύναμη του στοιχείου του ιδιοδιανύσματος, για το στοιχείο j και την ιδιομορφή i . Συγκεκριμένα το MSE ορίζεται ως: (34)

$$MSE_{ij} = \Phi_i^T K_j \Phi_i$$

όπου MSE_{ij} είναι η ενέργεια παραμόρφωσης που αποθηκεύεται στο στοιχείο j στην ιδιομορφή i , και K_j είναι το μητρώο στοιχειώδους ακαμψίας.

Επιπλέον υπολογίζονται και σχεδιάζονται τα ιδιοδιανύσματα (mode shapes) για την υπό μελέτη πλάκα.

Κεφάλαιο 7. Αριθμητικά αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων του. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου για κάθε συνδυασμό, μας δίνουν τιμές και διαγράμματα για τις ιδιομορφές της κατασκευής, καθώς και την εμφάνιση της μέγιστης ενέργειας. Για την επίτευξη του στόχου μας λοιπόν, επιζητάμε το μέγιστο ποσό ενέργειας που μπορεί να παραχθεί βάσει των παρακάτω δοκιμών στην σύνθετη πλάκα. Έτσι, στο κεφάλαιο αυτό παρατηρούνται και αναλύονται τα αποτελέσματα της μάλιστα ενέργειας μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης για δοκιμές σε διαφορετικές θέσεις των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιοτιμές ενός συστήματος σχετίζονται μεταξύ τους σύμφωνα με την μαθηματική σχέση:

$$\omega_i^2 = \lambda_i$$

Επομένως αν βρούμε την διαφοροποίηση των ιδιοτιμών, μπορούμε να εκτιμήσουμε και την αντίστοιχη διαφοροποίηση των ιδιοσυχνοτήτων.

Στη συνέχεια, αναφέρονται οι ιδιοτιμές της πλάκας για κάθε διαφορετικό σενάριο τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Αναφέρουμε ενδεικτικά μόνο τις τέσσερις πρώτες ιδιοτιμές της πλάκας. Αυτό συμβαίνει, όπως προαναφέραμε στο κεφάλαιο 4, διότι οι χαμηλές – πρώτες ιδιοτιμές ενός συστήματος είναι πιο κρίσιμες από τις υπόλοιπες.

Όπως έχει αναφερθεί από την εισαγωγή, στόχο της εργασίας ουσιαστικά αποτελεί η συλλογή όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας (σε Joules), που παράγεται από μηχανικές ταλαντώσεις, μέσω της χρήσης πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε μια σύνθετη ευφυή κατασκευή.

7.1. Α' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία 25, 26, 31, 32

Αρχικά παρουσιάζεται η διακριτοποιημένη πλάκα και τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία απεικονίζονται με σκούρο γκρι χρώμα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αλλάζουν θέσεις βάσει του σεναρίου που έχουμε επιλέξει δοκιμαστικά.

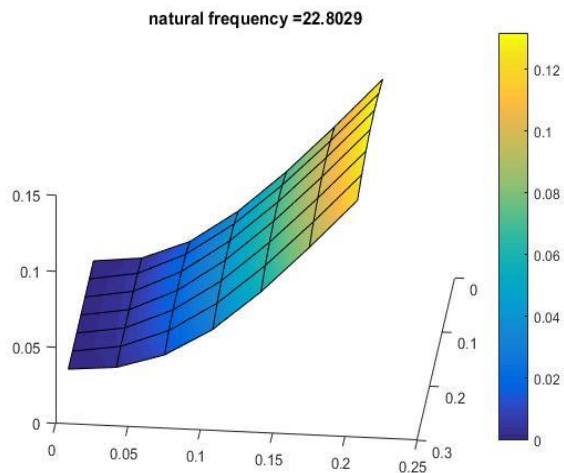
Στο πρώτο σενάριο (Α' περίπτωση) επιλέγουμε 4 γειτονικά στοιχεία για την τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών, τα οποία βρίσκονται κοντά στην πάκτωση της πλάκας (υπάρχει πάκτωση στο αριστερό άκρο) διότι θεωρούμε ότι κοντά στην περιοχή της πάκτωσης θα έχουμε και τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας. Τα στοιχεία που έχουν πιεζοηλεκτρικά στην περίπτωση αυτή είναι τα στοιχεία 25, 26, 31 και 32. (Εικόνα 7-1)

Mesh Discretization					
31	32	33	34	35	36
25	26	27	28	29	30
19	20	21	22	23	24
13	14	15	16	17	18
7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

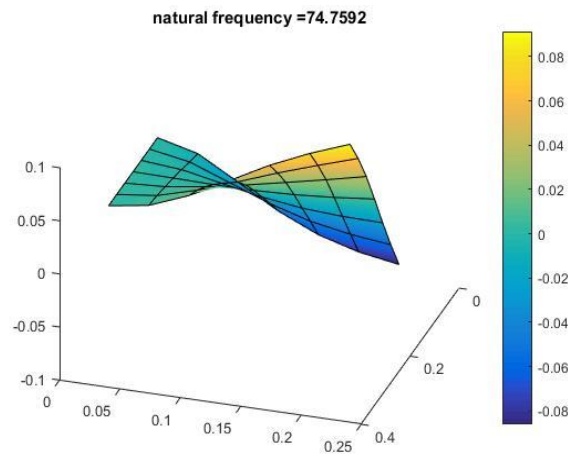
Εικόνα 7-1. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 25,26,31,32

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες της πλάκας. (Εικόνες 7-2,3,4,5)

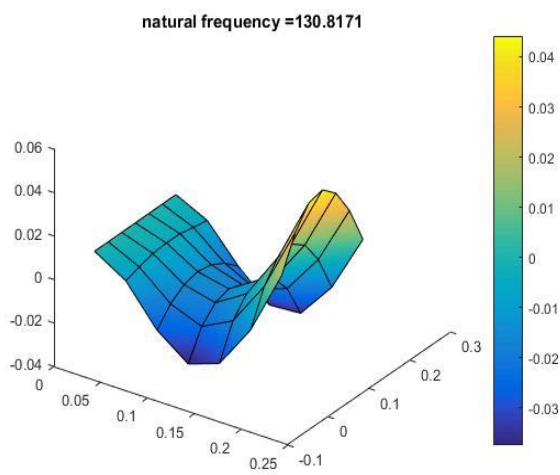
Οι ιδιομορφές της πλάκας παραμένουν ίδιες για τα 3 ιδιοδιανύσματα που γίνεται διερεύνηση.



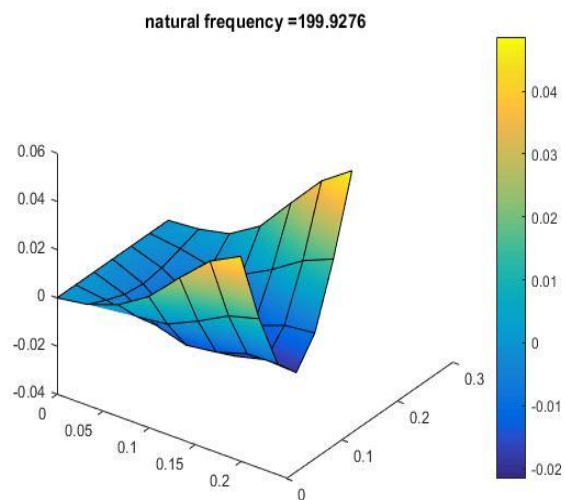
Εικόνα 7-2. 1η ιδιομορφή, Α' περίπτωση



Εικόνα 7-3. 2η ιδιομορφή, Α' περίπτωση



Εικόνα 7-4. 3η ιδιομορφή, Α' περίπτωση

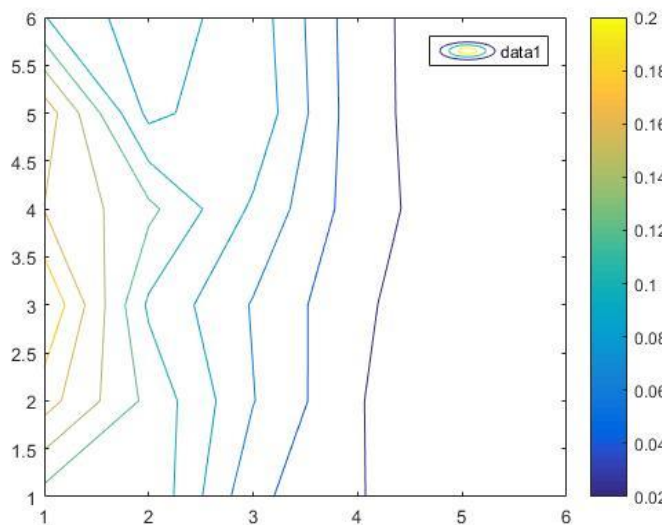


Εικόνα 7-5. 4η ιδιομορφή, Α' περίπτωση

Η φυσική συχνότητα (όπως αναφέρεται στα παραπάνω διαγράμματα: natural frequency) είναι γνωστή και ως ιδιοσυχνότητα (ω).

7.1.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα

Αλλάζοντας στον αλγόριθμο την τιμή του ιδιοδιανύσματος παρατηρείται αλλαγή στο ποσό της μέγιστης ενέργειας (σε Joules), καθώς και στο στοιχείο όπου εμφανίζεται. Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 7-6) γίνεται γραφική απεικόνιση της ενέργειας, όπου με κίτρινο χρώμα εμφανίζεται η μέγιστη ενέργεια που παράγεται ενώ με μπλέ η ελάχιστη. Η ενέργεια που παράγεται είναι ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (modal strain energy ή ‘MSE’).



Εικόνα 7-6. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Α' περίπτωση

Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.20051 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 13

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7-1) απεικονίζεται το ποσό της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης που εμφανίζεται στο κάθε στοιχείο και τονίζεται το μέγιστο ποσό και το στοιχείο όπου εμφανίζεται. Η αρίθμηση του πίνακα ξεκινάει από πάνω προς τα κάτω (αντίθετα από την εικόνα της διακριτοποιημένης πλάκας) όπου στην πρώτη γραμμή εμφανίζονται τα πρώτα έξι στοιχεία, η επόμενη γραμμή ξεκινάει από τα αριστερά με το στοιχείο 7 και καταλήγει στα δεξιά στο 12^ο στοιχείο και ομοίως συνεχίζεται η αρίθμηση.

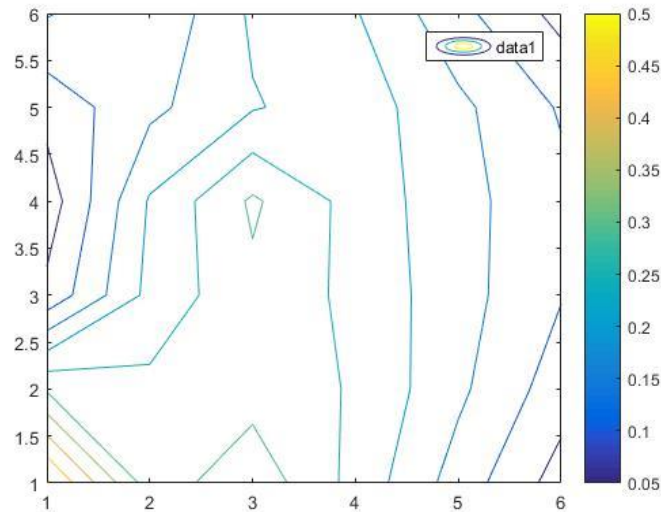
Πίνακας 7-1. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας για το 1^ο ιδιοδιάνυσμα, Α' περίπτωση διερεύνησης

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.11242	0.11736	0.04469	0.02103	0.00711	0.00215
2	0.16888	0.11481	0.06078	0.02097	0.00603	0.00312
3	0.20051	0.09653	0.05838	0.02322	0.00637	0.00227
4	0.15959	0.12517	0.07644	0.02969	0.00628	0.00194
5	0.17242	0.07439	0.09625	0.02758	0.00669	0.00239
6	0.10079	0.06687	0.09218	0.02700	0.00720	0.00184

Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 7-1) παρουσιάζεται το ποσό ενέργειας που παράγεται σε κάθε στοιχείο κατά τη διερεύνηση του συγκεκριμένου σεναρίου, δηλαδή της τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στα στοιχεία 25, 26, 31, 32. Η ενέργεια δίνεται στα Joules. Η τιμή της μέγιστης ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης που παράγεται είναι 0.20051 J και εμφανίζεται στο 13^ο στοιχείο της πλάκας.

7.1.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα

Όμοια με την περίπτωση του πρώτου ιδιοδιανύσματος, κατά την αλλαγή ιδιοδιανύσματος παρατηρείται αλλαγή στο ποσό της μέγιστης ενέργειας (σε Joules), καθώς και στο στοιχείο όπου εμφανίζεται. Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται γραφική απεικόνιση της ενέργειας, όπου με κίτρινο χρώμα εμφανίζεται η μέγιστη ενέργεια (MSE) που παράγεται ενώ με μπλε η ελάχιστη ενέργεια.



Εικόνα 7-7. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Α' περίπτωση, 2ο ιδιοδιάνυσμα

Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.51015 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 1

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7-2) απεικονίζεται το ποσό της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης που εμφανίζεται στο κάθε στοιχείο και τονίζεται το μέγιστο ποσό και το στοιχείο όπου εμφανίζεται.

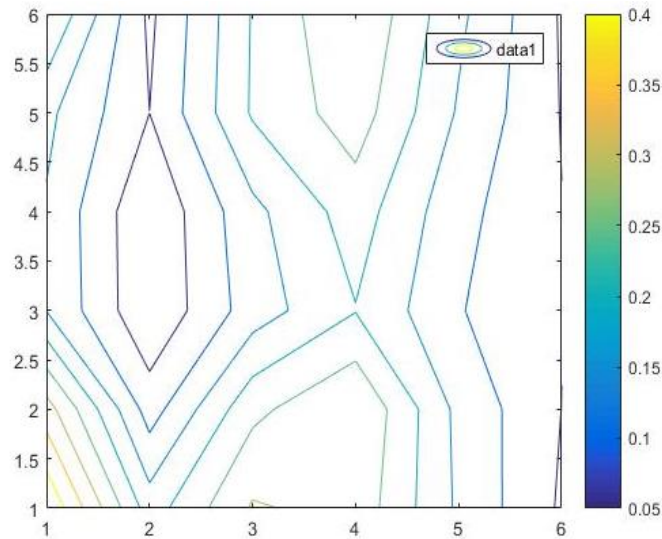
Πίνακας 7-1. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 2ο ιδιοδιάγραμμα, Α' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.51015	0.27299	0.33347	0.23366	0.12798	0.02779
2	0.29386	0.26262	0.27993	0.24512	0.16041	0.07355
3	0.06209	0.21454	0.28846	0.23621	0.16943	0.10273
4	0.02246	0.20507	0.30775	0.23171	0.16662	0.11404
5	0.06745	0.13754	0.19619	0.22620	0.16120	0.09488
6	0.51015	0.27299	0.33347	0.23366	0.12798	0.02779

Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 7-2) παρουσιάζεται η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο της σύνθετης πλάκας, βάσει του σεναρίου τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στις θέσεις 1,2,7,8. Η ποσότητα της συνολικής ενέργειας δίδεται σε Joules. Η μέγιστη ενέργεια είναι 0.51015J και εμφανίζεται στο 1^ο στοιχείο της πλάκας.

7.1.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα

Παρόμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις των άλλων δύο ιδιοδιανυσμάτων, κατά την αλλαγή ιδιοδιανύσματος παρατηρείται αλλαγή στο ποσό της μέγιστης ενέργειας (σε Joules), καθώς και στο στοιχείο όπου εμφανίζεται. (Εικόνα 7-8)



Εικόνα 7-8. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Α' περίπτωση, 3ο ιδιοδιάνυσμα

Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.44654 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας:1

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7-3) απεικονίζεται το ποσό της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης που εμφανίζεται στο κάθε στοιχείο και τονίζεται το μέγιστο ποσό και το στοιχείο όπου εμφανίζεται.

Πίνακας 7-2. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 3ο ιδιοδιάνυσμα, Α' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.44654	0.17507	0.30566	0.28251	0.14151	0.04320
2	0.32273	0.07681	0.23697	0.29970	0.13666	0.04961
3	0.14867	0.00665	0.12460	0.19796	0.10338	0.05119
4	0.14485	0.00581	0.13679	0.22462	0.11574	0.05097
5	0.16186	0.05020	0.20577	0.27629	0.14448	0.04786
6	0.25480	0.03989	0.20360	0.29947	0.16121	0.04493

Σε αυτή την τελική περίπτωση, ο πίνακας παραπάνω δείχνει την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας σε κάθε στοιχείο βάσει του Α'σεναρίου για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα. Η ενέργεια δίνεται στα Joules. Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη ενέργεια της κατασκευής εμφανίστηκε στο 1^ο στοιχείο της πλάκας και είναι 0.44654 J.

Στη συνέχεια της εργασίας αναλύονται πέντε ακόμη διαφορετικά σενάρια τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, με αλλαγή των θέσεων τους, ακόμη και του αριθμού τους. Έτσι για κάθε διαφορετικό σενάριο ακολουθείται η παραπάνω μεθοδολογία. Δηλαδή γίνεται απεικόνιση των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων της σύνθετης πλάκας η οποία ταυτίζεται και για τα τρία ιδιοδιανύσματα που διερευνώνται. Στη συνέχεια απεικονίζεται γραφικά η ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE), το ποσό της μέγιστης ενέργειας και το στοιχείο στο οποίο εμφανίζεται, καθώς και η ενέργεια που παράγεται σε κάθε στοιχείο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα τρία ιδιοδιανύσματα της πλάκας σε κάθε σενάριο.

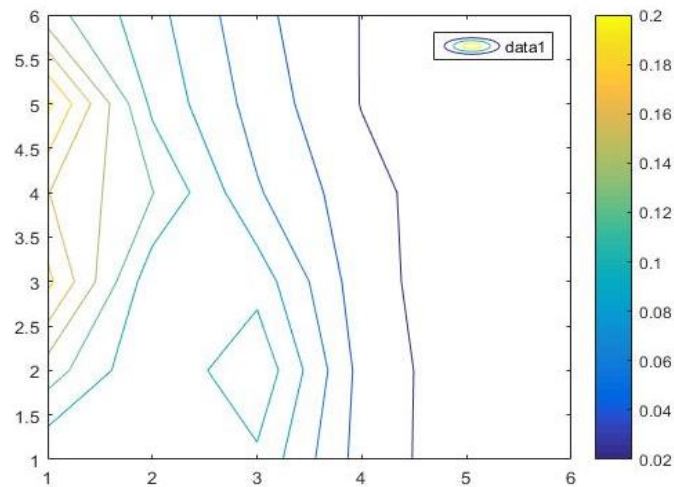
7.2. Β' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία 1,2,7,8

Mesh Discretization					
31	32	33	34	35	36
25	26	27	28	29	30
19	20	21	22	23	24
13	14	15	16	17	18
7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

Εικόνα 7-9. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 1,2,7,8

Οι ιδιομορφές της πλάκας σ' αυτήν την περίπτωση ταυτίζονται με τις ιδιομορφές της Α' περίπτωσης γι' αυτό και δεν χρίζουν απεικόνισης.

7.2.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-10. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Β' περίπτωση, 1ο ιδιοδιάνυσμα

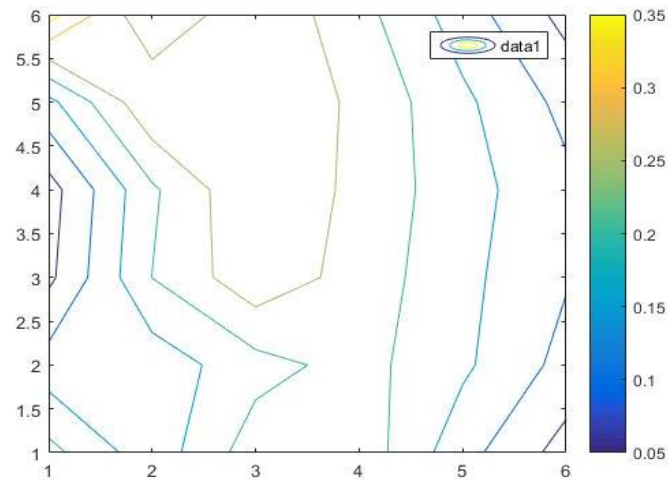
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.20541 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 25

Πίνακας 7-3. . Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 1ο ιδιοδιάνυσμα, Β' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.08253	0.08366	0.09586	0.03142	0.00766	0.00188
2	0.13021	0.08072	0.11728	0.03254	0.00717	0.00232
3	0.18550	0.08602	0.09201	0.02767	0.00732	0.00210
4	0.16071	0.12104	0.06214	0.02724	0.00568	0.00211
5	0.20541	0.09511	0.05166	0.01917	0.00615	0.00313
6	0.12879	0.08686	0.04504	0.01930	0.00635	0.00207

7.2.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-11. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Β' περίπτωση, 2ο ιδιοδιάνυσμα

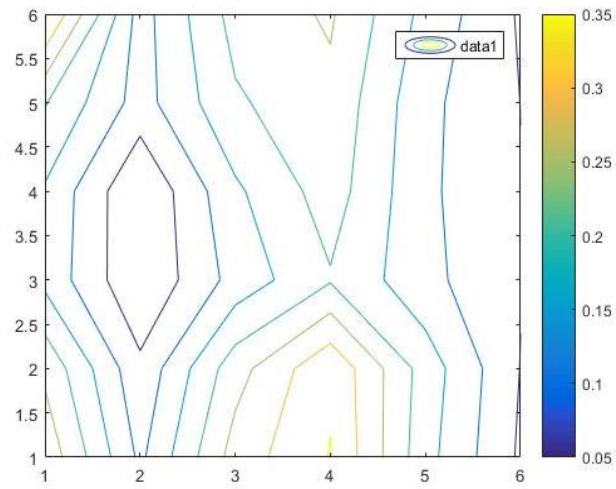
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.37112 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 31

Πίνακας 7-4. . Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 2ο ιδιοδιάνυσμα, Β' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.21588	0.11970	0.22753	0.23116	0.11820	0.02932
2	0.12182	0.12019	0.18188	0.21801	0.15916	0.08352
3	0.03881	0.20058	0.28469	0.22937	0.16324	0.10399
4	0.02876	0.19175	0.29644	0.23605	0.16983	0.11196
5	0.13515	0.29340	0.29215	0.24000	0.16039	0.08568
6	0.37112	0.20444	0.29007	0.21793	0.12488	0.03374

7.2.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-12. αφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Β' περίπτωση, 3ο ιδιοδιάνυσμα

Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.35963 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 31

Πίνακας 7-5. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 3ο ιδιοδιάνυσμα, Β' περίπτωση

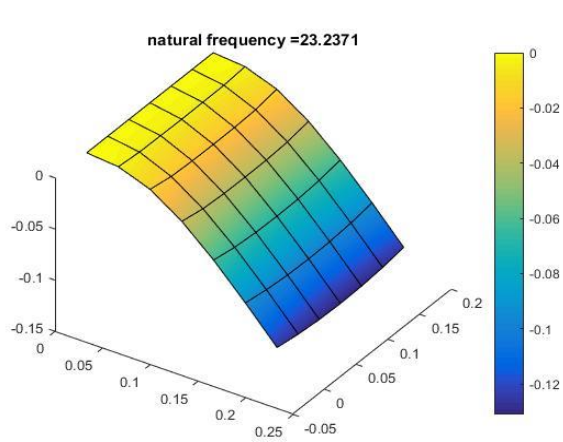
(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.28610	0.08956	0.27197	0.35235	0.16719	0.04231
2	0.23914	0.06164	0.22973	0.34223	0.17727	0.04867
3	0.13657	0.00406	0.11830	0.19538	0.11478	0.05202
4	0.14403	0.00116	0.14092	0.22423	0.10995	0.05117
5	0.20327	0.07934	0.19259	0.23791	0.11294	0.04959
6	0.35963	0.07921	0.21918	0.25620	0.13468	0.04412

7.3. Γ' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία 13,14,19,20

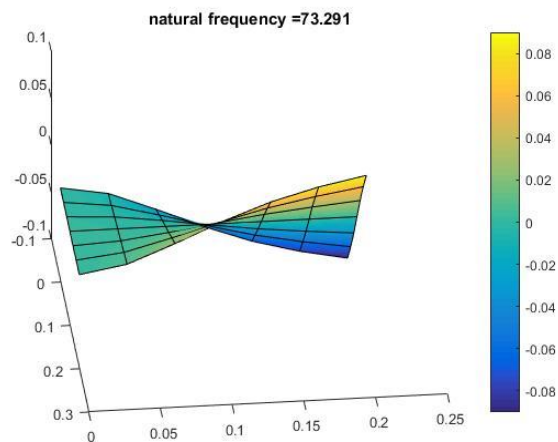
Mesh Discretization					
31	32	33	34	35	36
25	26	27	28	29	30
19	20	21	22	23	24
13	14	15	16	17	18
7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

Εικόνα 7-13. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 13,14,19,20

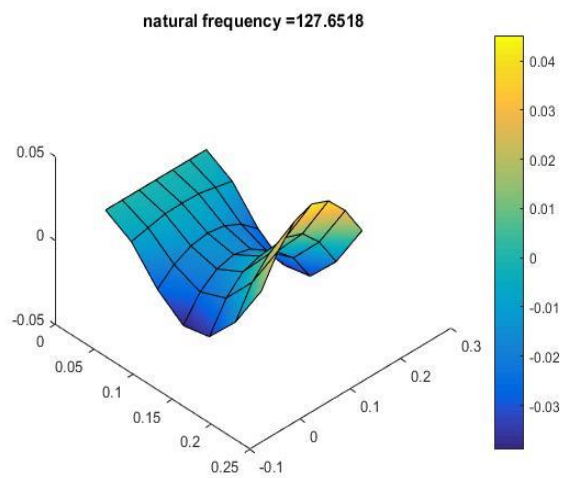
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι τεσσereis πρώτες ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες της πλάκας. (Εικόνες 7-14,15,16,17)



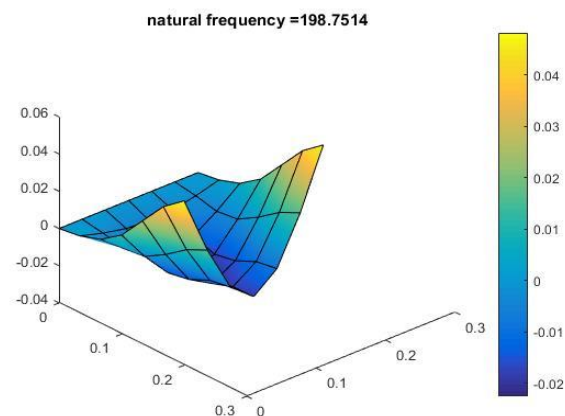
Εικόνα 7-14. 1η ιδιομορφή, Γ' περίπτωση



Εικόνα 7-15. 2η ιδιομορφή, Γ' περίπτωση

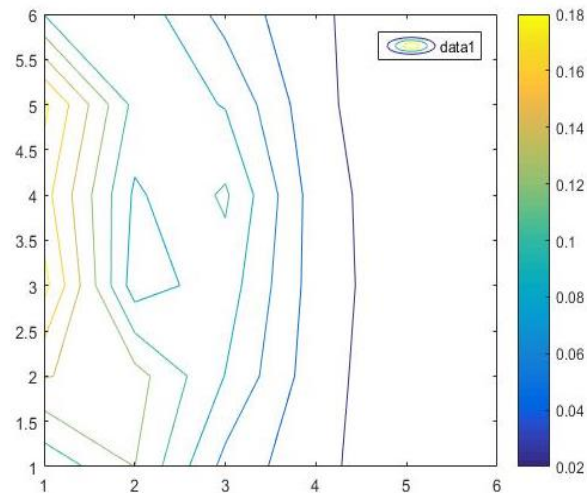


Εικόνα 7-16. 3η ιδιομορφή, Γ' περίπτωση



Εικόνα 7-17. 4η ιδιομορφή, Γ' περίπτωση

7.3.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-18. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Γ' περίπτωση, 1ο ιδιοδιάνυσμα

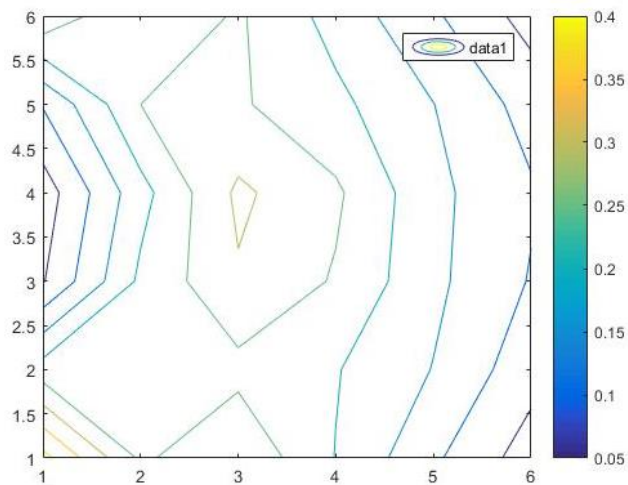
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.18694 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 13

Πίνακας 7-6. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 1ο ιδιοδιάνυσμα, Γ' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.08489	0.12018	0.05341	0.02501	0.00721	0.00189
2	0.14134	0.12832	0.07932	0.02787	0.00614	0.00228
3	0.18694	0.06929	0.09085	0.03002	0.00691	0.00174
4	0.16801	0.07653	0.10306	0.02911	0.00634	0.00154
5	0.18492	0.09380	0.07876	0.02467	0.00593	0.00231
6	0.09950	0.09322	0.05282	0.02340	0.00646	0.00181

7.3.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-19. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Γ' περίπτωση, 2ο ιδιοδιάνυσμα

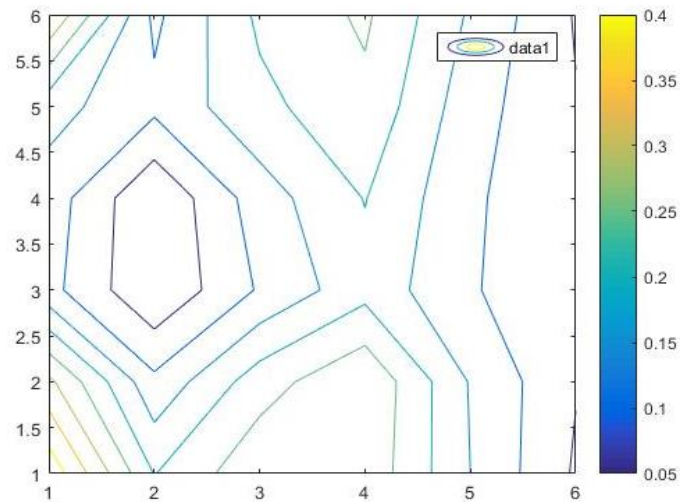
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.41703 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 1

Πίνακας 7-7. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 2ο ιδιοδιάνυσμα, Γ' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.41703	0.24151	0.29365	0.19825	0.10863	0.02564
2	0.22249	0.23033	0.23537	0.20307	0.14818	0.06932
3	0.04663	0.21020	0.29424	0.24512	0.16107	0.09659
4	0.02361	0.18256	0.30993	0.25827	0.16279	0.10584
5	0.10362	0.24999	0.25635	0.21248	0.15088	0.08074
6	0.28786	0.19983	0.25664	0.18089	0.10777	0.03039

7.3.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-20. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Γ' περίπτωση, 3ο ιδιοδιάνυσμα

Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.43621 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 1

Πίνακας 7-8. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 3ο ιδιοδιάνυσμα, Γ' περίπτωση

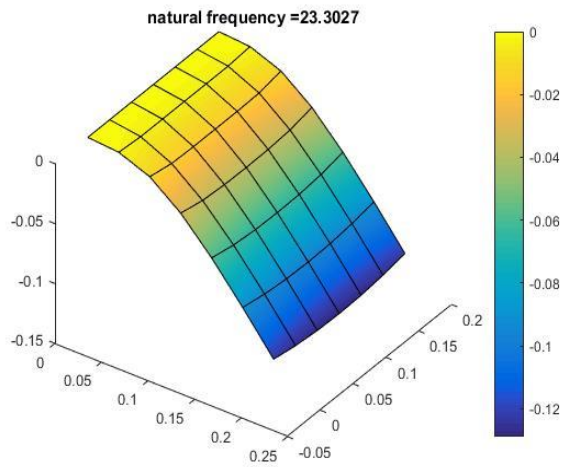
(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.43621	0.19804	0.28721	0.28564	0.14997	0.04379
2	0.31142	0.11190	0.22736	0.29407	0.14608	0.05282
3	0.11568	0.00439	0.10561	0.18292	0.10491	0.05830
4	0.12600	0.00469	0.12617	0.20200	0.10821	0.05753
5	0.16883	0.11249	0.18633	0.23763	0.12146	0.05269
6	0.35087	0.08847	0.21033	0.25824	0.14315	0.04592

7.4. Δ' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία 7,13,19,25

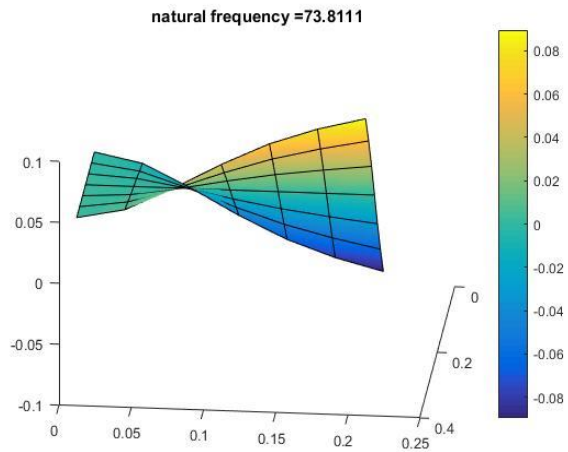
Mesh Discretization					
31	32	33	34	35	36
25	26	27	28	29	30
19	20	21	22	23	24
13	14	15	16	17	18
7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

Εικόνα 7-21. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 7,13,19,25

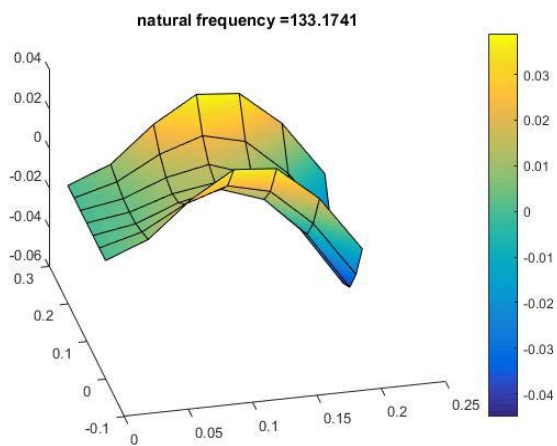
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες της πλάκας.



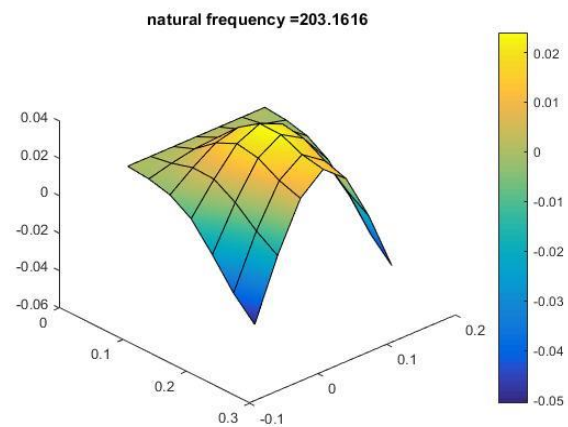
Εικόνα 7-22. 1η ιδιομορφή, Δ' περίπτωση



Εικόνα 7-23. 2η ιδιομορφή, Δ' περίπτωση

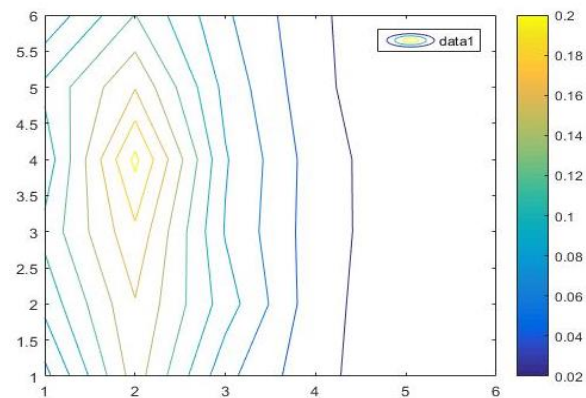


Εικόνα 7-24. 3η ιδιομορφή, Δ' περίπτωση



Εικόνα 7-25. 4η ιδιομορφή, Δ' περίπτωση

7.4.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-26. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Δ' περίπτωση, 1ο ιδιοδιάνυσμα

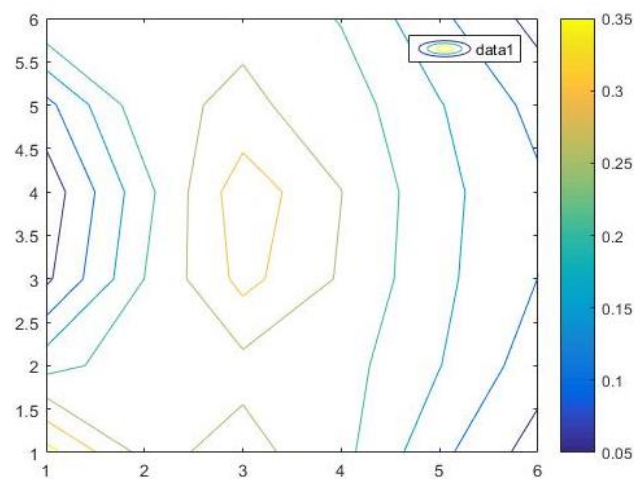
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.20512 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 20

Πίνακας 7-9. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 1ο ιδιοδιάνυσμα, Δ' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.05330	0.14974	0.06566	0.02489	0.00724	0.00194
2	0.08590	0.15854	0.09027	0.02714	0.00619	0.00239
3	0.10587	0.17581	0.07833	0.02899	0.00695	0.00182
4	0.08636	0.20512	0.08194	0.02926	0.00618	0.00162
5	0.10503	0.15876	0.07367	0.02411	0.00604	0.00242
6	0.06364	0.12048	0.06324	0.02289	0.00652	0.00186

7.4.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-27. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Δ' περίπτωση, 2ο ιδιοδιάνυσμα

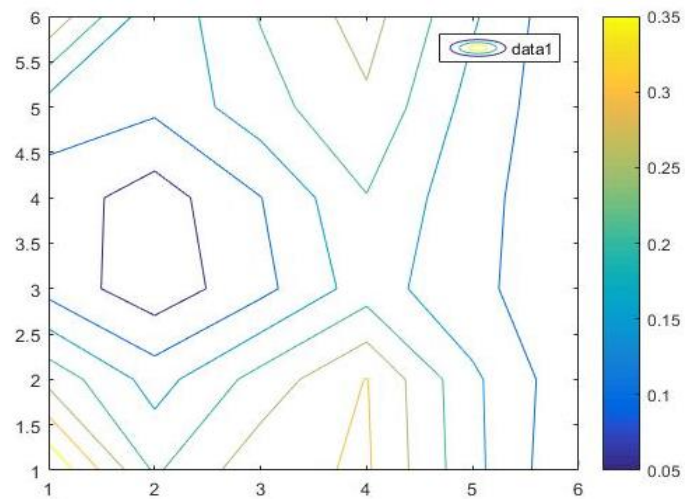
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.36964 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 1

Πίνακας 7-10. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 2ο ιδιοδιάνυσμα, Δ' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.36964	0.23383	0.26863	0.21496	0.11270	0.02626
2	0.18113	0.22888	0.23489	0.21960	0.15149	0.07284
3	0.03942	0.20052	0.31611	0.24427	0.16196	0.09948
4	0.01710	0.18388	0.33293	0.25072	0.16443	0.10853
5	0.08433	0.23471	0.26022	0.22614	0.15305	0.08451
6	0.24650	0.20308	0.238442	0.19697	0.11069	0.03162

7.4.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-28. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Δ' περίπτωση, 3ο ιδιοδιάνυσμα

Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.39787 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 1

Πίνακας 7-11. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 3ο ιδιοδιάνυσμα, Δ' περίπτωση

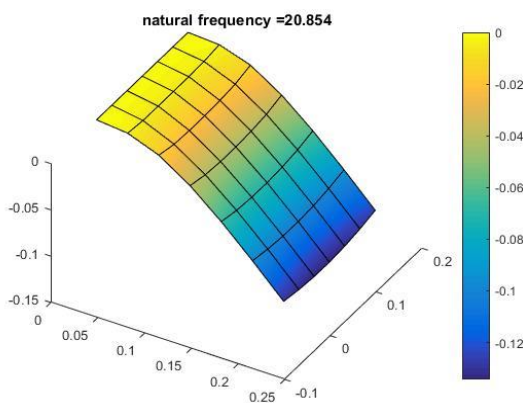
	1	2	3	4	5	6
1	0.39787	0.19293	0.28327	0.30657	0.16408	0.04886
2	0.23449	0.12887	0.21936	0.30210	0.16003	0.05995
3	0.08252	0.01698	0.08499	0.17546	0.11041	0.06829
4	0.07776	0.02490	0.09875	0.19792	0.11406	0.06762
5	0.12520	0.11003	0.18008	0.24165	0.13109	0.05967
6	0.29050	0.11210	0.20280	0.27029	0.15675	0.05147

7.5. Ε' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικό στοιχείο 31

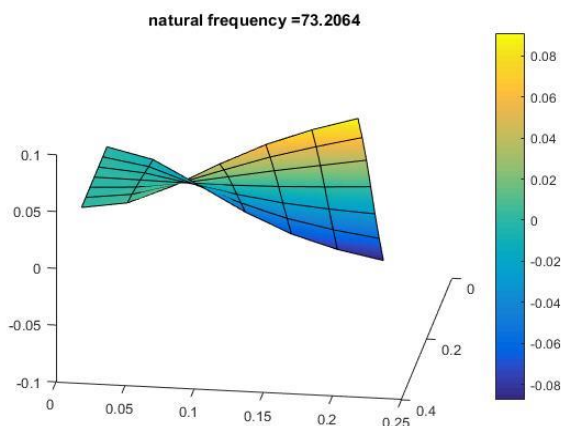
Mesh Discretization					
31	32	33	34	35	36
25	26	27	28	29	30
19	20	21	22	23	24
13	14	15	16	17	18
7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

Εικόνα 7-29. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικό στο στοιχείο 31

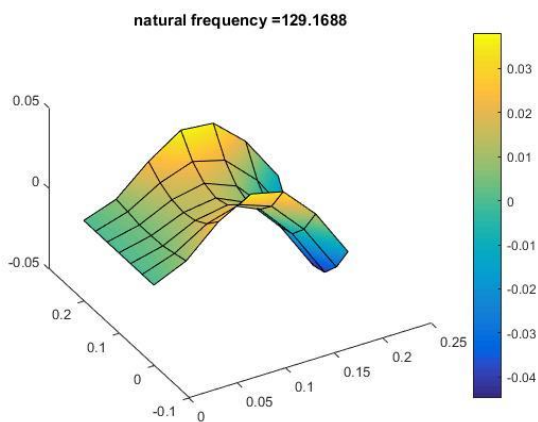
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες της πλάκας.



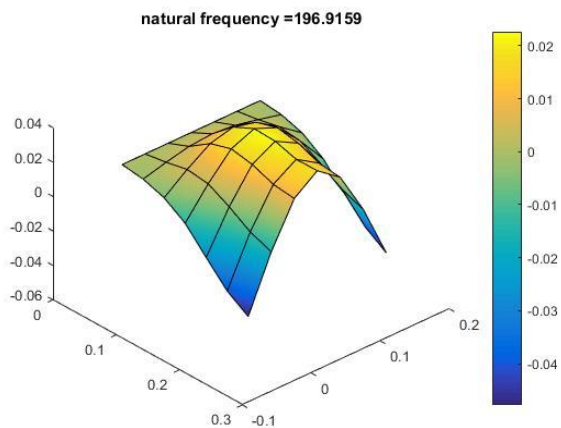
Εικόνα 7-30. 1η ιδιομορφή, Ε' περίπτωση



Εικόνα 7-31. 2η ιδιομορφή, Ε' περίπτωση

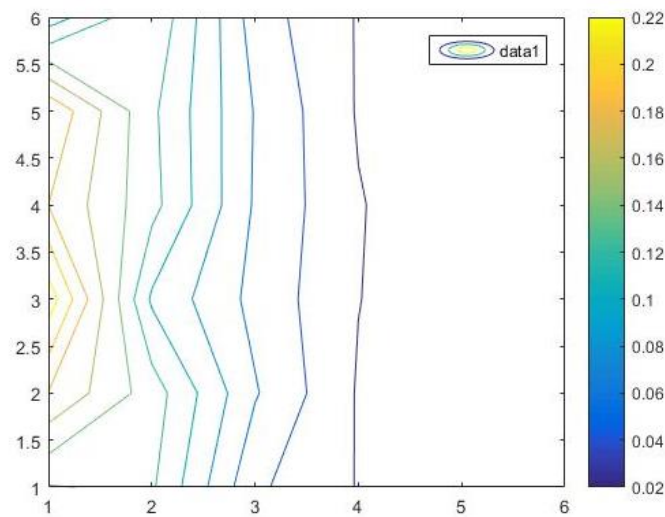


Εικόνα 7-32. 3η ιδιομορφή, Ε' περίπτωση



Εικόνα 7-33. 4η ιδιομορφή, Ε' περίπτωση

7.5.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-34. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ε' περίπτωση, 1ο ιδιοδιάνυσμα

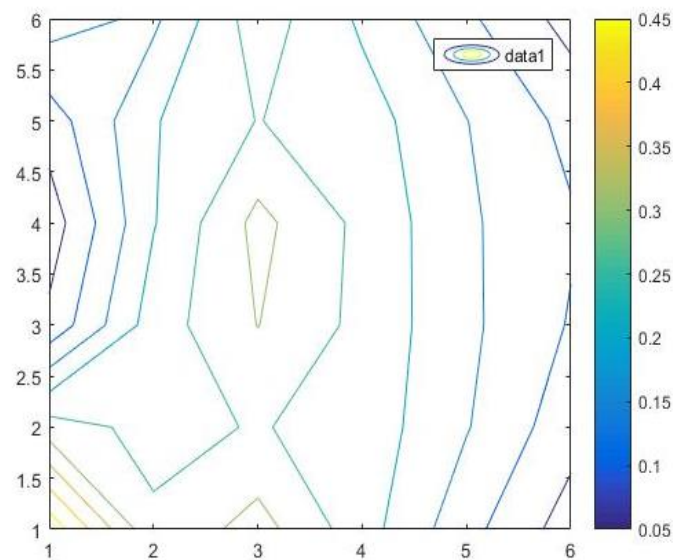
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.23169 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 13

Πίνακας 7-12. . Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 1ο ιδιοδιάνυσμα, Ε' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.11893	0.12302	0.04366	0.01897	0.00613	0.00182
2	0.17921	0.13040	0.06184	0.0828	0.00525	0.00266
3	0.23169	0.09683	0.05392	0.02048	0.00538	0.00220
4	0.17994	0.12679	0.05764	0.02125	0.00505	0.00207
5	0.19780	0.12415	0.05878	0.01830	0.00534	0.00259
6	0.08871	0.13826	0.04991	0.01851	0.00564	0.00175

7.5.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-35. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ε' περίπτωση, 2ο ιδιοδιάνυσμα

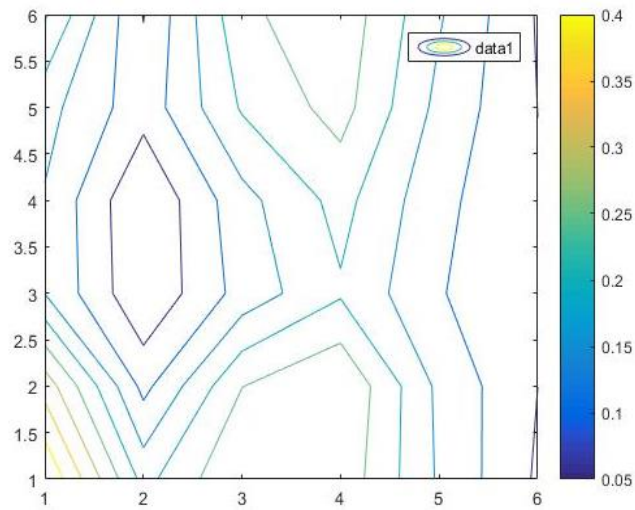
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.48608 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 1

Πίνακας 7-13. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 2ο ιδιοδιάνυσμα, Ε' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.48608	0.25884	0.32082	0.22141	0.11687	0.02592
2	0.27250	0.23495	0.25334	0.22987	0.15329	0.07015
3	0.06220	0.22513	0.30120	0.23593	0.16072	0.09608
4	0.02233	0.19675	0.31459	0.23731	0.15809	0.10577
5	0.07409	0.19625	0.25153	0.22268	0.15123	0.08570
6	0.17299	0.13956	0.27791	0.19118	0.10960	0.03130

7.5.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-36. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ε' περίπτωση, 3ο ιδιοδιάνυσμα

Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.44992 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας:1

Πίνακας 7-14. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 3ο ιδιοδιάνυσμα, Ε' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.44992	0.18316	0.29983	0.28387	0.14325	0.04304
2	0.33033	0.08490	0.24892	0.29863	0.13850	0.05007
3	0.14892	0.00547	0.11911	0.19391	0.10370	0.05272
4	0.14594	0.00175	0.13340	0.21701	0.11349	0.05283
5	0.16756	0.06969	0.20550	0.26947	0.13592	0.04964
6	0.25653	0.04807	0.23958	0.28326	0.15541	0.04577

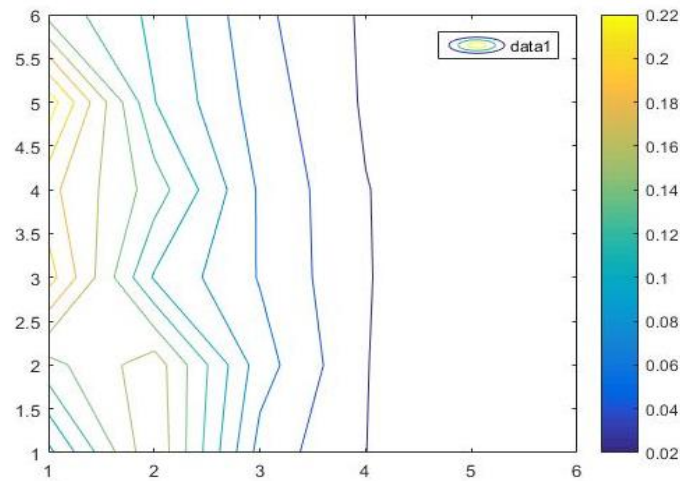
7.6. Ζ' περίπτωση, πιεζοηλεκτρικό στοιχείο 1

Mesh Discretization					
31	32	33	34	35	36
25	26	27	28	29	30
19	20	21	22	23	24
13	14	15	16	17	18
7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

Εικόνα 7-37. Διακριτοποιημένη πλάκα με πιεζοηλεκτρικό στο στοιχείο 1

Οι ιδιομορφές της Ζ' περίπτωσης ταυτίζονται με εκείνες της Ε' περίπτωσης οπότε δεν απεικονίζονται ξανά.

7.6.1. Αριθμητικά αποτελέσματα για το πρώτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-38. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ζ' περίπτωση, 1ο ιδιοδιάνυσμα.

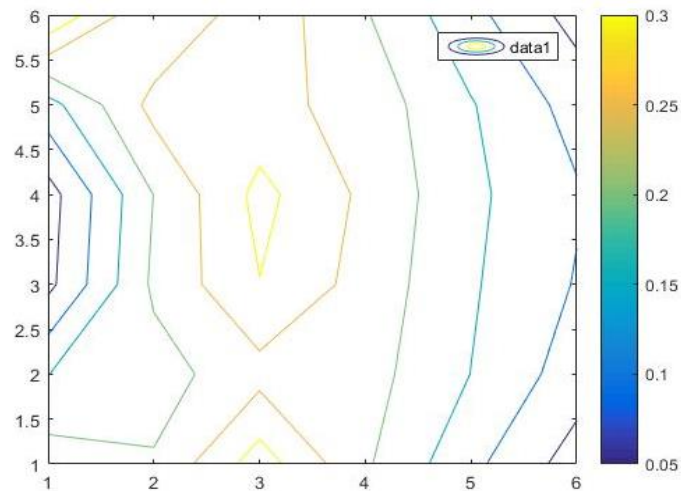
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.23196 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 25

Πίνακας 7-15. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 1ο ιδιοδιάνυσμα, Ζ' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.07421	0.17777	0.05215	0.02013	0.00627	0.00179
2	0.13264	0.17206	0.06926	0.02049	0.00533	0.00254
3	0.20906	0.09771	0.05857	0.02103	0.00569	0.00219
4	0.18614	0.13101	0.05710	0.02076	0.00490	0.00207
5	0.23196	0.10073	0.05050	0.01746	0.00521	0.00269
6	0.13336	0.09525	0.04455	0.01692	0.00556	0.00177

7.6.2. Αριθμητικά αποτελέσματα για το δεύτερο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-39. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ζ' περίπτωση, 2ο ιδιοδιάνυσμα

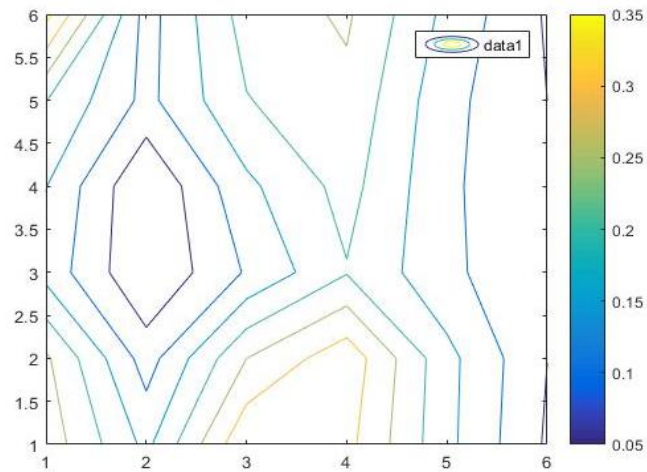
Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.34654 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 31

Πίνακας 7-16. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 2ο ιδιοδιάνυσμα, Ζ' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.22466	0.20478	0.32578	0.20684	0.11273	0.02664
2	0.14953	0.17901	0.23294	0.21958	0.14930	0.07496
3	0.03653	0.20945	0.29866	0.23109	0.15574	0.09660
4	0.02895	0.20100	0.31471	0.23970	0.16083	0.10501
5	0.13078	0.26599	0.26790	0.22907	0.15355	0.08128
6	0.34654	0.20003	0.28233	0.20402	0.11496	0.03118

7.6.3. Αριθμητικά αποτελέσματα για το τρίτο ιδιοδιάνυσμα



Εικόνα 7-40. Γραφική απεικόνιση της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, Ζ' περίπτωση, 3ο ιδιοδιάνυσμα

Μέγιστη ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης (MSE)= 0.36687 Joules

Στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας: 31

Πίνακας 7-17. Ιδιομορφική ενέργεια παραμόρφωσης κάθε στοιχείου της πλάκας στο 3ο ιδιοδιάνυσμα, Ζ' περίπτωση

(J)	1	2	3	4	5	6
1	0.27951	0.13723	0.34387	0.31519	0.16287	0.04328
2	0.25847	0.07694	0.24988	0.33304	0.16494	0.05036
3	0.13212	0.00214	0.10502	0.19682	0.11182	0.05404
4	0.15134	0.00156	0.13873	0.21775	0.10965	0.05248
5	0.20155	0.08626	0.19741	0.23786	0.11507	0.04998
6	0.36687	0.07994	0.22136	0.25717	0.13634	0.04429

7.7. Σύνοψη αποτελεσμάτων

Πίνακας 7-18. Ποσά μέγιστης ενέργειας και στοιχείο που εμφανίζονται ανά περίπτωση και ιδιοδιάνυσμα.

	Μέγιστη ενέργεια (σε Joules) για <u>1^ο</u> <u>ιδιοδιαν.</u>	Στοιχείο εμφάνισης μέγιστης ενέργειας	Μέγιστη ενέργεια (σε Joules) για <u>2^ο</u> <u>ιδιοδιαν.</u>	Στοιχείο εμφάνισης μέγιστης ενέργειας	Μέγιστη ενέργεια (σε Joules) για <u>3^ο</u> <u>ιδιοδιαν.</u>	Στοιχείο εμφάνισης μέγιστης ενέργειας
Α'περ.	0.20051	13	0.51015	1	0.43621	1
Β'περ.	0.20541	25	0.37112	31	0.35963	31
Γ'περ.	0.18694	13	0.41703	1	0.43621	1
Δ'περ.	0.20512	20	0.36964	1	0.39787	1
Ε'περ.	0.23169	13	0.48608	1	0.44992	1
Ζ'περ.	0.23196	25	0.34654	31	0.36687	31

Άρα η μέγιστη ενέργεια εμφανίζεται στο στοιχείο 1, όταν δηλαδή υπάρχουν πιεζοηλεκτρικά στα στοιχεία 25,26,31,32 (δηλαδή Α' περίπτωση) για το 2^ο ιδιοδιάνυσμα και η τιμή της είναι 0.51015 Joules.

Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε ιδιομορφική ανάλυση σε μοντέλο σύνθετης πλάκας με σκοπό τη μάζευση ενέργειας. Για την εύρεση της μέγιστης ποσότητας εξετάστηκαν οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής (συγκεκριμένα οι τέσσερις πρώτες) για διάφορα σενάρια που αφορούσαν την τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Τα δεδομένα που προέκυψαν από την ιδιομορφική ανάλυση της πλάκας ήταν πολύ χρήσιμα στην κατεύθυνση της συλλογής ενέργειας.

Αναλυτικότερα, οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες του μοντέλου υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του εμπορικά διαθέσιμου λογισμικού της Matlab χρησιμοποιώντας τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Παρατηρούμε ότι βάσει του ιδιοδιανύσματος στο οποίο αναφερόμαστε, το ποσό της μέγιστης ενέργειας (MSE) αυξάνεται, γεγονός που κρίνεται απόλυτα λογικό βάσει του τύπου:

$$MSE_{ij} = \Phi_i^T K_j \Phi_i$$

Ο οποίος μας δείχνει ότι το ποσό της ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης είναι ανάλογο του ιδιοδιανύσματος στο οποίο αναφερόμαστε. Το παραπάνω γεγονός επιβεβαιώνεται παρατηρώντας εκτενέστερα τον πίνακα της σύνοψης αποτελεσμάτων.

Επίσης κατά την παρατήρηση του πίνακα (Πίνακας 7-1) σύνοψης αποτελεσμάτων, εντοπίζεται συχνότερη εμφάνιση του μέγιστου ποσού της ενέργειας σε συγκεκριμένα στοιχεία. Ειδικότερα, τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης έχει το 1^ο στοιχείο, όπου εντοπίζεται ως στοιχείο εμφάνισης της μέγιστης ενέργειας για σε οκτώ δοκιμές, στη συνέχεια ακολουθεί το στοιχείο 31 που εμφανίζεται τέσσερις φορές, έπειτα το στοιχείο 13 που εμφανίζεται τρεις φορές και τέλος το στοιχείο 25 με μονάχα δύο φορές και το στοιχείο 20 με μία.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι αυτό δεν συμβαίνει τυχαία αλλά επειδή η μέγιστη ενέργεια εμφανίζεται στο πακτωμένο άκρο της πλάκας, εφόσον τα στοιχεία 1 και 31 είναι τα άνω και κάτω αριστερά ακραία στοιχεία (της πάκτωσης), το στοιχείο 13 είναι σχεδόν στο κέντρο του αριστερού άκρου της πλάκας και το στοιχείο 25 βρίσκεται επίσης στην ίδια στήλη.

Τα χαρακτηριστικά της κατασκευής για μάζευση ενέργειας, όπως η θέση, το σχήμα και το μέγεθος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Πρόταση για μελλοντική διερεύνηση αποτελεί η χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε όλη την επιφάνεια της πλάκας. Κατά αυτόν τον τρόπο η δυσκαμψία της πλάκας θα αυξανόταν.

Επίσης, η δομική βελτιστοποίηση (Structural optimization) για δυναμικά προβλήματα, που αφορά ιδιομορφικά χαρακτηριστικά, αποτελεί μελλοντική πρόκληση. Ακόμη, αλγόριθμοι βελτιστοποίησης εμπνευσμένοι από τη φύση και ιδιαίτερα εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms (EAs)) μπορούν να παίξουν καταλυτικό ρόλο.

Επιπλέον, η ικανότητα του προτεινόμενου μοντέλου να παράξει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μεγάλο εύρος διαφορετικών συχνοτήτων που περιγράφουν διάφορα φαινόμενα, όπως διεγέρσεις ανέμου, τυχαίες δονήσεις, ωκεάνια κύματα κλπ. μπορεί να αποτελέσει μέρος μελλοντικής έρευνας.

Κεφάλαιο 9. Βιβλιογραφία

1. Boyle, Jon. s.l. : Reuters/ Ari Rabinovitch, March 2009.
2. team, All About Energy. All About Energy. Περιβάλλον & Διαχείριση Ενέργειας. [Ηλεκτρονικό] <http://www.allaboutenergy.gr/Intro11.html>.
3. Μυριούνης Πολυχρόνης (Πτυχιακή Εργασία Τ.Ε.Ι Κρήτης - Σ.Τ.Ε. Τμ. Μηχανολογίας). Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για αυτόνομη μικρή κατοικία. Ηράκλειο : Επιβλέπων Καθηγητής Κατσαπρακάκης Δημήτρης , 2015.
4. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Βικιπαιδεία . [Ηλεκτρονικό] https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%8E%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B5%CF%82_%CF%80%CE%B7%CE%B3%CE%AD%CF%82_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82.
5. Φωτοβολταϊκά. Βικιπαιδεία. [Ηλεκτρονικό] Wikimedia CEE. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC>.
6. ENERGY STORAGE. Solar Thermal Magazine. [Ηλεκτρονικό] Solar Thermal Magazine, an Energy Group Think LLC, 2017. <http://solarthermalmagazine.com/>.
7. team, Solar-Thermal. Solar-Thermal. [Ηλεκτρονικό] 2008. http://www.solar-thermal.com/solar_vs_pv.html/.
8. Εγκύκλιοι ΚΑΠΕ για τη διαδικασία έκδοσης πιστοποιητικών και βεβαιώσεων σχετικών με το νόμο 3468/06. Ενέργειας, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης. s.l. : Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας. http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_photovol.htm.
9. Creative Commons Attribution-ShareAlike License. Wikipedia. Ανεμογεννήτρια. [Ηλεκτρονικό] Wikimedia CEE. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%B1>.
10. Telosnet. Part 1 - Early History Through 1875. [Ηλεκτρονικό] TelosNet Web Development and Darrell Dodge, 1996-2015. <http://ww.telosnet.com/wind/early.html>.
11. Laboratory, NRLE - National Renewable Energy. Wind Maps. [U.S. Department of Energy] United States : Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
12. Gipe, Paule. Wind-Works.org. News & Articles on Wind Energy. [Ηλεκτρονικό] November 2011. <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=3>.
13. Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Καστοριάς. Τι είναι η γεωθερμική ενέργεια. [Ηλεκτρονικό] 2008. <http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/alternative/geothermal.htm>.

14. Παπαθανάσης, Ηλίας. «Ενέργεια από τη θάλασσα». *Περισκόπιο της Επιστήμης*. Ιανουάριος 1997, σ. 64.
15. Energyharvesting.net. What is Energy Harvesting. [Ηλεκτρονικό] www.energyharvesting.net. <http://www.energyharvesting.net/>.
16. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. C.B.WilliamsR.B.Yates. 1-3, March–April 1996, Τόμ. 52, σσ. 8-11.
17. Mark Elliott Staley, Master of Science, 2005. DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE MAGNETOSTRICTIVE ENERGY HARVESTING DEVICE. [επιμ.] Chair / Dr. Amr Baz / Dr. Norman Wereley Dr. Alison Flatau. s.l. : Department of Aerospace Engineering, University of Maryland., 2005.
18. Κρήτη: κυματική ενέργεια θα τροφοδοτεί το λιμάνι του Ηρακλείου. econews.gr. [Ηλεκτρονικό] 11 Μαΐος 2016. <http://www.econews.gr/2016/05/11/kymatiki-energeia-irakleio-130103/>.
19. Clarke, Peter. Piezo-shoes to recharge cell phone on inventor's desert trek. eetimes. [Ηλεκτρονικό] https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1229152.
20. Physics, Institute of. IOP Institute of Physics. Energy harvesting. [Ηλεκτρονικό] The Institute of Physics is a registered charity: number 293851. <http://www.iop.org/resources/energy/>.
21. Lightning Switch. [Ηλεκτρονικό] PulseSwitch Systems, LC, a Face® Company. <http://www.lightningswitch.com/>.
22. Ferro Solutions WIRELESS POWER. [Ηλεκτρονικό] <http://www.ferrosi.com/>.
23. Perpetuum. Technology. [Ηλεκτρονικό] WARNTRAK 672265 Horizon 2020-SMEINST-2-2014. <https://perpetuum.com/technology/>.
24. IDTechEx. Energy Harvesting and Storage for Electronic Devices 2010-2020. [Ηλεκτρονικό] https://www.idtechex.com/research/reports/energy_harvesting_and_storage_for_electronic_devices_2010_2020_000243.asp.
25. team, PRLog. PRLOG Press Release Distribution. Market For Piezoelectric Ceramic And Polymer Devices To Almost Double In Five Years. [Ηλεκτρονικό] 21 July 2009. <https://www.prlog.org/10288312-market-for-piezoelectric-ceramic-and-polymer-devices-to-almost-double-in-five-years.html>.
26. Υλικών, Τμήμα. Μηχανική των πιεζοηλεκτρικών υλικών. [συγγρ. βιβλίου] Σημειώσεις Εργαστηρίου. ΕΥΦΥΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ. s.l. : Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
27. Institute, Piezo. [Ηλεκτρονικό] <http://www.piezoinstitute.com/>.
28. Πνευματικός, Σ. ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ. Πανεπιστήμιο Πατρών : Τμήμα Μαθηματικών, 2010-11.
29. Βενετσάνος, Αντωνιάδης. Εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών. ΕΜΠ : Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010-2011.

30. Ταϊρίδης, Γεώργιος. *Optimal design of smart structures with intelligent control*. Χανιά : Πολυτεχνείο Κρήτης, 2016.
31. Georgios K. Tairidis*, Georgia A. Foutsitzi+, Panagiotis Koutsianitis*, and Georgios E. Stavroulakis*. *ENERGY HARVESTING USING PIEZOELECTRIC MATERIALS ON SMART COMPOSITE STRUCTURES*. Coimbra, Portugal : The International Conference on Wind Harvesting, 2017, April 20-21. p. 313.
32. Κομνηνός, Δημήτριος. *Εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων στη επίλυση προβλημάτων με χρήση του προγράμματος ANSYS*. ΤΕΙ Σερρών : Τμήμα Μηχανολογίας, 2008.
33. *A finite-element model for piezoelectric composite laminates*. K Y Lam, X Q Peng, G R Liu and J N Reddy. 6, UK : Smart Mater, 1997, pp. 583–591.
34. *Structural Damage Detection Using Modal Strain*. Cha, Young-Jin and Oral Buyukozturk. 30, Canada, USA : Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015, pp. 347–358.