



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.  
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Αναλυτική και Πειραματική Μελέτη Απομάστευσης Ενέργειας  
σε Δοκό με Πιεζοηλεκτρικό Μεταλλάκτη υπό Κρουστικό Φορτίο**

Νικόλαος Μαργέλης

*Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος*

ΑΘΗΝΑ 2020

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την αξιοποίηση ενέργειας από την ταλάντωση μιας μονόπακτης δοκού με χρήση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος (piezoelectric patch) και πλακέτας απομάστευσης ενέργειας (harvesting module). Η μελέτη της απόκρισης του συστήματος εξετάζεται όταν σε αυτό ασκείται ένα κρουστικό φορτίο.

Για την αντιμετώπιση του φυσικού προβλήματος, διαμορφώθηκε μία βασική μεθοδολογία η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία τριών μοντέλων στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και ενός μοντέλου στο πρόγραμμα επίλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων Pspice. Τα μοντέλα αυτά γεφυρώνονται με τη χρήση μαθηματικών εξισώσεων που υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία.

Τα μοντέλα που κατασκευάζονται στο Abaqus έχουν σκοπό να διαιρέσουν τη μοντελοποίηση του συστήματος δοκού-επιθέματος σε μικρότερα τμήματα. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η άμεση αντιμετώπιση σφαλμάτων σε κάθε στάδιο της διαδικασίας. Ακόμα, τα μοντέλα αυτά αναπτύσσονται σε διάφορες εκδοχές προκειμένου να ελεγχθεί και ο ρόλος άλλων παραγόντων στην επίλυση του προβλήματος από το Abaqus, όπως είναι η επιλογή των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου και των επιλυτών.

Το μοντέλο που δημιουργείται στο Pspice έχει ως στόχο την εκτίμηση της απόκρισης του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας, όταν στο συνολικό σύστημα επιβάλλεται ένα κρουστικό φορτίο. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του υπάρχοντος κυκλώματος αλλά και για τον σχεδιασμό εναλλακτικών κυκλωμάτων.

Επομένως, στόχος αυτής της εργασίας είναι η χρήση των παραπάνω μοντέλων και των μαθηματικών εξισώσεων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της δυναμικής συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος. Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις ιδιοσυχρότητες της δοκού. Επίσης, δεδομένης της δύναμης που αναπτύσσεται κατά την κρούση, τα μοντέλα στο Abaqus θα πρέπει να προβλέπουν τη βύθιση του σημείου της κρούσης αλλά και το παραγόμενο δυναμικό όταν το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι ανοικτοκυκλωμένο. Επιπλέον, αν είναι γνωστή η ταχύτητα του επικρουστήρα που βάλλει τη δοκό λίγο πριν τη σύγκρουση, μέσω των μοντέλων, επιδιώκεται η εκτίμηση του κρουστικού φορτίου καθώς και όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη σε συνθήκες ανοικτοκυκλώματος. Έπειτα, η χρήση των πληροφοριών που παρέχουν τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τις εξισώσεις από τη βιβλιογραφία και το μοντέλο στο Pspice έχει ως σκοπό την προσέγγιση της ηλεκτρικής ενέργειας που απομαστεύεται από το ειδικό κύκλωμα κατά τη διάρκεια μιας μεμονωμένης κρούσης.

Τα συμπεράσματα, που εξάγονται από τη συγκεκριμένη εργασία, αφορούν τόσο τη λειτουργία του συστήματος κατά την άσκηση κρουστικού φορτίου, όσο και για τη διαδικασία κατασκευής των μοντέλων. Επιπλέον, παρατίθενται προτάσεις που αφορούν τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να συνεχιστεί η μελέτη του εν λόγω αντικειμένου.

## Abstract

The current postgraduate thesis examines the exploitation of the energy stored in a beam while it vibrates with the use of a piezoelectric patch and a harvesting module. The response of the system is studied when an impact force is applied on it.

The physics problem is dealt with a method that was developed during this thesis, which includes three models on the commercial finite elements package Abaqus and a model on the program Pspice. These models are connected through mathematical equations found on the international bibliography.

The models constructed on Abaqus aim at dividing the modeling of the beam-patch system in smaller parts. This way, it is guaranteed that errors are dealt with immediately at each phase of the process. Furthermore, each of the aforementioned models are developed in several versions, so that the role of different factors during the solving procedure is detected. Such factors are the choice of finite elements and the choice of solvers.

The model constructed on Pspice targets at estimating the response of the harvesting module when the whole system is under the effect of an impact load. This model can be used for the optimization of the existing harvesting module or even for designing an alternative circuit.

The target of this thesis is the use of the models mentioned above in combination with mathematical equations for the prediction of the dynamic response the whole system. The finite element models must approximate sufficiently the eigenfrequencies of the beam. Moreover, for a known impact force, the Abaqus models must predict the displacement of the point of the impact and the voltage produced by the piezoelectric patch in an open circuit. Furthermore, if the velocity of the impactor just before the collision with the beam is known, then the estimation of the impact load is pursued along with all the aforementioned variables in an open circuit. Then, the use of the information provided by the finite element models in combination with the equations from the bibliography and the Pspice model aims to approximate the energy harvested by the module during a single impact.

The conclusions derived from this thesis, concern both the response of the energy harvesting system during the application of an impact load and the procedure of developing the models. Moreover, suggestions for future work are discussed.

*Αφιερώνεται  
στην οικογένεια μου  
και τα αγαπημένα  
μου πρόσωπα  
που με στηρίζουν  
καθημερινά*

# Περιεχόμενα

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Εισαγωγή.....</b>   | <b>10</b> |
| 1.1      | Σκοπός Εργασίας.....   | 10        |
| 1.2      | Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....  | 11        |
| 1.3      | Δομή Εργασίας.....   | 13        |
| <b>2</b> | <b>Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία .....</b>   | <b>15</b> |
| 2.1      | Εισαγωγή .....   | 15        |
| 2.2      | Στοιχεία θεωρίας ταλαντώσεων .....   | 15        |
| 2.2.1    | Ταλάντωση συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας.....   | 16        |
| 2.2.2    | Ταλάντωση συστημάτων διανεμημένης μάζας.....   | 20        |
| 2.3      | Νόμος επαφής επικρουστήρα-δοκού .....  | 24        |
| 2.4      | Στοιχεία θεωρίας πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.....  | 25        |
| 2.4.1    | Καταστατικές εξισώσεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων .....   | 26        |
| 2.4.2    | Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε ηλεκτρικά κυκλώματα .....   | 29        |
| <b>3</b> | <b>Μοντελοποίηση συστήματος για απόκριση σε κρουστικό φορτίο .....</b>   | <b>32</b> |
| 3.1      | Εισαγωγή .....   | 32        |
| 3.2      | Συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογίας μοντελοποίησης .....   | 33        |
| 3.3      | Μοντελοποίηση μηχανικού υποσυστήματος .....  | 34        |
| 3.3.1    | Υπολογιστική προσέγγιση ιδιοσυχνοτήτων δοκού .....   | 35        |
| 3.3.2    | Υπολογιστική εκτίμηση της απόκρισης του μηχανικού υποσυστήματος σε διέγερση από συγκεντρωμένη κρουστική δύναμη.....          | 40        |
| 3.3.3    | Υπολογιστική εκτίμηση της απόκρισης του μηχανικού υποσυστήματος σε διέγερση από επικρουστήρα με γνωστή αρχική ταχύτητα ..... | 48        |
| 3.4      | Μοντελοποίηση ηλεκτρικού υποσυστήματος .....   | 50        |
| 3.4.1    | Πιεζοηλεκτρικό Επίθεμα .....   | 52        |
| 3.4.2    | Ανόρθωση τάσης.....  | 53        |
| 3.4.3    | Τελεστικός Ενισχυτής και transistor .....  | 54        |
| 3.4.4    | Schmitt trigger και REF .....  | 55        |
| 3.4.5    | Buck converter και voltage clipper .....   | 56        |
| 3.4.6    | Ηλεκτρικό φορτίο .....   | 56        |
| <b>4</b> | <b>Πειράματα παραγωγής ενέργειας με κρουστικό φορτίο .....</b>   | <b>57</b> |
| 4.1      | Εισαγωγή .....   | 57        |
| 4.2      | Πειράματα εύρεσης ιδιοσυχνοτήτων δοκού .....   | 58        |
| 4.2.1    | Περιγραφή διάταξης .....   | 58        |
| 4.2.2    | Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....  | 63        |
| 4.2.3    | Πειραματικές μετρήσεις .....   | 64        |
| 4.3      | Πειράματα με πιεζοηλεκτρικό επίθεμα .....  | 64        |
| 4.3.1    | Περιγραφή διάταξης .....   | 64        |
| 4.3.2    | Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....  | 71        |
| 4.3.3    | Πειραματικές μετρήσεις .....   | 72        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>5</b> | <b>Αποτελέσματα.....</b>   | <b>77</b>  |
| 5.1      | Εισαγωγή .....   | 77         |
| 5.2      | Σύγκριση μοντέλου δοκού για την εύρεση ιδιοσυχνοτήτων με πειραματικές μετρήσεις.....   | 77         |
| 5.3      | Σύγκριση απόκρισης μοντέλου δοκού-επιθέματος με πειραματικές μετρήσεις για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος.....  | 79         |
| 5.3.1    | Μοντέλο δοκού-επιθέματος με είσοδο την κρουστική δύναμη .....  | 80         |
| 5.3.2    | Μοντέλο δοκού-επιθέματος με είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση.....  | 84         |
| 5.4      | Σύγκριση εκτιμήσεων συνολικής μεθοδολογίας για την απόκριση του συστήματος απομάστευσης ενέργειας με πειραματικές μετρήσεις .....                                      | 87         |
| 5.4.1    | Προσδιορισμός ισοδύναμων ηλεκτρικών στοιχείων για την μοντελοποίηση της λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά την απομάστευση ενέργειας από μία κρούση ..... | 88         |
| 5.4.2    | Πρόβλεψη απόκρισης συνολικού συστήματος με χρήση του μοντέλου στο Pspice .....   | 91         |
| <b>6</b> | <b>Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....</b>  | <b>93</b>  |
| 6.1      | Συμπεράσματα .....   | 94         |
| 6.2      | Μελλοντική Εργασία .....   | 95         |
| <b>7</b> | <b>Βιβλιογραφία.....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>8</b> | <b>Παράρτημα Α.....</b>  | <b>100</b> |
| 8.1      | LabVIEW .....  | 100        |
| 8.2      | Ολοκληρωμένη πλατφόρμα εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων (Compact RIO) .....  | 102        |
| 8.3      | Εργασία (project) dma with encoder στο LabVIEW.....  | 102        |
| <b>9</b> | <b>Παράρτημα Β.....</b>  | <b>110</b> |
| 9.1      | Επίλυση διαφορικών εξισώσεων στο Matlab .....  | 110        |

## Κατάλογος Σχημάτων

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Σχήμα 2-1.  | Σύστημα μάζας-ελατηρίου σε κατακόρυφη ταλάντωση. ....                          | 16 |
| Σχήμα 2-2.  | Σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα. ....                                      | 17 |
| Σχήμα 2-3.  | Επίδραση λόγου απόσβεσης ζ στην απόκριση του συστήματος. ....                  | 18 |
| Σχήμα 2-4.  | Σχηματική απεικόνιση πρώτων ιδιομορφών μονόπακτης δοκού. ....                  | 23 |
| Σχήμα 2-5.  | Απεικόνιση του νόμου επαφής. ....  | 24 |
| Σχήμα 2-6.  | Ισοδύναμο κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που τροφοδοτεί μία αντίσταση. .... | 31 |
| Σχήμα 3-1.  | Διαστάσεις δοκού στο Abaqus. ....  | 35 |
| Σχήμα 3-2.  | Παράθυρο επιλογής υλικού. ....   | 36 |
| Σχήμα 3-3.  | Παράθυρο ρύθμισης Composite Layup. ....  | 37 |
| Σχήμα 3-4.  | Πλέγμα μοντέλου δοκού για εύρεση ιδιοσυχνοτήτων. ....                          | 38 |
| Σχήμα 3-5.  | Πίνακας εκτιμήσεων των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού από το Abaqus. ....            | 39 |
| Σχήμα 3-6.  | Γραφική απεικόνιση πρώτης ιδιομορφής δοκού (solid στοιχεία). ....              | 40 |
| Σχήμα 3-7.  | Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στο Abaqus. ....                         | 41 |
| Σχήμα 3-8.  | Παράθυρο επιλογής ιδιοτήτων υλικού PIC-255. ....                               | 42 |
| Σχήμα 3-9.  | Συναρμολογημένο μοντέλο (Assembly). ....                                       | 43 |
| Σχήμα 3-10. | Εφαρμογή φορτίου στο μοντέλο δοκού-επιθέματος του Abaqus. ....                 | 45 |
| Σχήμα 3-11. | Πλέγμα μοντέλου δοκού-επιθέματος. ....   | 46 |
| Σχήμα 3-12. | Γράφημα παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης στο Abaqus. ....                          | 47 |
| Σχήμα 3-13. | Συναρμολογημένο μοντέλο με μάζα και ελατήριο (Assembly). ....                  | 49 |
| Σχήμα 3-14. | Δομικό διάγραμμα κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 από την PI.51       |    |
| Σχήμα 3-15. | Μοντέλο επιθέματος-κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας στο Pspice της Orcad. .... | 52 |
| Σχήμα 3-16. | Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. ....                                 | 53 |
| Σχήμα 3-17. | Ανορθωτής τάσης. ....  | 53 |
| Σχήμα 3-18. | Transistor και τελεστικός ενισχυτής. ....                                      | 54 |
| Σχήμα 3-19. | Schmitt trigger και REF. ....  | 55 |
| Σχήμα 3-20. | Buck converter και Voltage Clipper. ....                                       | 56 |
| Σχήμα 4-1.  | Δοκός για τη διενέργηση πειραμάτων. ....                                       | 59 |
| Σχήμα 4-2.  | Σφυρί για κρούσεις με αισθητήρα δύναμης PCB 208C03. ....                       | 60 |
| Σχήμα 4-3.  | Αισθητήρας δύναμης PCB 208C03. ....  | 60 |
| Σχήμα 4-4.  | Αισθητήρας δύναμης PCB 208C03. ....  | 61 |
| Σχήμα 4-5.  | Ενισχυτής PCB 482C15. ....   | 61 |
| Σχήμα 4-6.  | Κάρτα υπολογιστή NI6036E. ....   | 62 |
| Σχήμα 4-7.  | Terminal Block BNC-2115. ....  | 62 |
| Σχήμα 4-8.  | Διάγραμμα από ανάλυση Fourier. ....  | 64 |
| Σχήμα 4-9.  | Δομή πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. ....  | 66 |
| Σχήμα 4-10. | Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πιεζοκεραμικού υλικού. ....          | 66 |
| Σχήμα 4-11. | Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 της PI. ....                            | 67 |
| Σχήμα 4-12. | Διάταξη για το πείραμα της κρούσης. ....                                       | 68 |
| Σχήμα 4-13. | (α) Κοντινή άποψη της διάταξης, (β) Πάκτωση δοκού πάνω στο πλαίσιο. ....       | 68 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Σχήμα 4-14. | Σύνδεση βραχίονα, αισθητήρα δύναμης και επικρουστήρα.....   | 69  |
| Σχήμα 4-15. | Διάγραμμα αναπτυσσόμενης δύναμης κατά τη διάρκεια μιας κρούσης (ανοικτοκύκλωμα). .....  | 73  |
| Σχήμα 4-16. | Διάγραμμα παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα κατά τη διάρκεια μιας κρούσης. ....  | 73  |
| Σχήμα 4-17. | Διάγραμμα μετατόπισης του σημείου επαφής ανάμεσα στη δοκό και τον βραχίονα κατά τη διάρκεια μιας κρούσης. ....  | 74  |
| Σχήμα 4-18. | Διάγραμμα αναπτυσσόμενης δύναμης κατά τη διάρκεια μιας κρούσης (κλειστό κύκλωμα).....   | 75  |
| Σχήμα 4-19. | Διάγραμμα ηλεκτρικής τάσης στους ακροδέκτες του πυκνωτή του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας κρούσης. ....   | 76  |
| Σχήμα 5-1.  | Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από όλες τις εκδοχές του μοντέλου με είσοδο τη δύναμη στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [m]). .....                   | 80  |
| Σχήμα 5-2.  | Εκτίμηση βύθισης σημείου κρούσης από όλες τις εκδοχές του μοντέλου με είσοδο τη δύναμη στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [m]). .....            | 81  |
| Σχήμα 5-3.  | Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο με είσοδο τη δύναμη στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm])....   | 83  |
| Σχήμα 5-4.  | Εκτίμηση βύθισης σημείου κρούσης από μοντέλο με είσοδο τη δύναμη στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]). .....                                 | 84  |
| Σχήμα 5-5.  | Εκτίμηση κρουστικής δύναμης από μοντέλο με είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]).....        | 85  |
| Σχήμα 5-6.  | Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο με είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]).....          | 86  |
| Σχήμα 5-7.  | Εκτίμηση βύθισης σημείου κρούσης από μοντέλο με είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]). ..... | 86  |
| Σχήμα 5-8.  | Εκτίμηση έντασης της πηγής ρεύματος του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος .....  | 91  |
| Σχήμα 5-9.  | Σύγκριση της τελικής εκτίμησης της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης στους ακροδέκτες του πυκνωτή του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας από το Pspice με τις πειραματικές μετρήσεις. ....        | 92  |
| Σχήμα 8-1.  | Project explorer του dma with encoder project. ....   | 104 |
| Σχήμα 8-2.  | Πρόσοψη (front panel) του dma with encoder FPGA VI.....   | 104 |
| Σχήμα 8-3.  | Δομικό διάγραμμα (block diagram) του dma with encoder FPGA VI.....  | 105 |
| Σχήμα 8-4.  | Πρόσοψη (front panel) του dma with encoder Real Time VI. ....   | 105 |
| Σχήμα 8-5.  | Δομικό διάγραμμα (block diagram) του dma with encoder Real Time VI. ....  | 106 |
| Σχήμα 8-6.  | Τμήμα ανάκτησης δεδομένων του dma with encoder Real Time VI.....  | 107 |
| Σχήμα 8-7.  | Παράθυρο προσδιορισμού χαρακτηριστικών FIFO. ....   | 108 |
| Σχήμα 8-8.  | Τεχνική παραγωγού-καταναλωτή (producer-consumer). ....  | 108 |
| Σχήμα 8-9.  | Τμήμα ανάκτησης δεδομένων του dma with encoder Real Time VI.....  | 109 |
| Σχήμα 9-1.  | Σύνταξη συνάρτησης myode για χρήση από την ode45.....   | 111 |



## Κατάλογος Πινάκων

|  |    |
|--|----|
| Πίνακας 2-1. Απόκριση συστήματος με απόσβεση ανάλογα με το λόγο απόσβεσης ζ. ....  | 18 |
| Πίνακας 3-1. Μηχανικές ιδιότητες graphite-epoxy.....   | 36 |
| Πίνακας 3-2. Ιδιότητες PIC-255. ....   | 42 |
| Πίνακας 4-1. Στοιχεία πειραματικής διάταξης για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού. ....  | 58 |
| Πίνακας 4-2. Στοιχεία πειραματικής διάταξης για τη μελέτη του συστήματος δοκού-επιθέματος. ....                                      | 65 |
| Πίνακας 5-1. Σύγκριση πειραματικής μέτρησης της πρώτης ιδιοσυχνότητας με τις εκτιμήσεις των δύο εκδοχών του μοντέλου της δοκού. .... | 78 |
| Πίνακας 5-2. Σύγκριση εκτιμήσεων των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού από τις δύο εκδοχές του μοντέλου.....                                  | 78 |
| Πίνακας 5-3. Μετατροπή μονάδων μέτρησης. ....  | 83 |

# 1 Εισαγωγή

Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι είναι υλικά που χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα τους να παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν παραμορφώνονται. Αυτή η ιδιότητα καθιστά τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ιδιαίτερος ενδιαφέροντα και χρήσιμα. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία συναντώνται σε ένα εύρος εφαρμογών, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως αισθητήρες είτε ως επενεργητές. Ακόμα, μία πολύ σημαντική εφαρμογή τους είναι η απομάστευση ενέργειας από ταλαντούμενα συστήματα. Η τελευταία αυτή χρήση τους αποτελεί και το επίκεντρο της μελέτης αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας. Συγκεκριμένα, το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η απομάστευση ενέργειας από την ταλάντωση μιας δοκού, η οποία οφείλεται σε ένα κρουστικό φορτίο.

Το σύστημα που εξετάστηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από μία μονόπακτη δοκό η οποία βάλλεται από ένα βραχίονα. Η δοκός έχει προσαρμοσμένο πάνω της ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (piezoelectric patch) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία συσσωρεύεται με τη χρήση μίας πλακέτας απομάστευσης ενέργειας (harvesting module).

Ο μηχανισμός με τον οποίο λειτουργεί η παραπάνω διάταξη είναι ο εξής. Ο βραχίονας πριν συγκρουστεί με τη δοκό έχει κινητική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της κρούσης, μέρος της ενέργειας αυτής μεταφέρεται στη δοκό η οποία ταλαντώνεται. Όταν ένα σώμα ταλαντώνεται, σε αυτό εμπεριέχεται μηχανική ενέργεια με τη μορφή παραμόρφωσης. Τμήμα της ενέργειας αυτής μπορεί να ανακτηθεί με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που μετατρέπουν την ενέργεια παραμόρφωσης σε ηλεκτρική, έτσι ώστε αυτή να απομαστευτεί από ένα ειδικά διαμορφωμένο κύκλωμα (energy harvesting). Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί, στη συνέχεια, να αποθηκευτεί σε κάποια διάταξη όπως π.χ. μία μπαταρία και έτσι, να είναι διαθέσιμη για εκμετάλλευση κάποια άλλη χρονική στιγμή.

## 1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός, λοιπόν, της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της απόκρισης του παραπάνω συστήματος απομάστευσης ενέργειας υπό συνθήκες κρούσης. Επομένως, ο στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία μιας μεθοδολογίας που θα μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά το φαινόμενο και να προβλέπει το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται από τη διάταξη αυτή μετά από μία κρούση. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την κατασκευή υπολογιστικών μοντέλων με τη χρήση αναλυτικών εξισώσεων και μετρήσεων. Μέσω της εφαρμογής της επιτυγχάνεται η εκτίμηση της αποδοτικότητας ενός συστήματος απομάστευσης ενέργειας από πιεζοηλεκτρικούς μεταλλάκτες κατασκευές υπό κρουστικό φορτίο. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελεί ένα εργαλείο σχεδιασμού διατάξεων με πιεζοηλεκτρικούς μεταλλάκτες σε ταλαντούμενες κατασκευές, καθώς μέσω ρύθμισης κατάλληλων παραμέτρων είναι δυνατή η βελτιστοποίηση του τελικού ηλεκτρομηχανικού συστήματος.

Η σημασία μιας τέτοιας μελέτης εντείνεται λόγω του γεγονότος ότι στα περισσότερα μηχανολογικά συστήματα εμφανίζονται φαινόμενα ταλάντωσης, η ενέργεια των οποίων

παραμένει ανεκμετάλλευτη. Ακόμα, συσκευές όπως είναι τα φορητά ηλεκτρονικά πολύ χαμηλής ισχύος (ultra-low power portable electronics) και οι ασύρματοι αισθητήρες (wireless sensors) χρειάζονται μια εναλλακτική μορφή ενέργειας αντί της συμβατικής μπαταρίας, καθώς η αλλαγή των μπαταριών τους ή η επαναφόρτισή τους πολλές φορές είναι αντιπαραγωγική ή και αδύνατη. Έτσι, τα συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα περιπτώσεων ταλάντωσης συστημάτων.

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Το αντικείμενο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας συνδυάζει στοιχεία από επιστημονικά πεδία που έχουν απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα. Το πρώτο από τα πεδία αυτά εξετάζει τη συμπεριφορά κατασκευών από σύνθετα υλικά σε συνθήκες κρούσης. Πολλοί ερευνητές, όπως οι Cantwell και Morton (1991) [12] αλλά και οι Chai και Zhu (2011) [13], έχουν διενεργήσει εκτενείς ανασκοπήσεις για το αντικείμενο της κρούσης σε σύνθετες κατασκευές. Τα μοντέλα, που έχουν προταθεί για την εκτίμηση της απόκρισης σύνθετων κατασκευών εξαιτίας κρουστικών φορτίων, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη εξ' αυτών, η προσέγγιση του εκάστοτε συστήματος γίνεται με χρήση συγκεντρωμένων παραμέτρων, δηλαδή παρατίθενται μοντέλα που περιγράφονται από σημειακές μάζες και γραμμικά ελατήρια (Shivakumar et al., 1985; Wu and Yu, 2001 [15]; Olsson, 2002 [16]; Zhou and Stronge, 2006 [17]) και σε ορισμένες περιπτώσεις περιλαμβάνουν και αποσβεστήρες (Olsson, 2003 [18]; Anderson, 2005 [19]). Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μοντέλα συνεχούς μέσου όπου χρησιμοποιούνται εξισώσεις που προκύπτουν από την ενεργειακή θεώρηση του προβλήματος (Christoforou και Yigit, 1998 [20]). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την κατηγορία μπορεί να είναι είτε αναλυτικές είτε μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι έχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης μεγεθών όπως οι μετατοπίσεις, οι παραμορφώσεις και οι μηχανικές τάσεις σε όλα τα σημεία της κατασκευής. Μια από τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των μοντέλων συνεχούς μέσου, εντοπίζεται στην επιλογή του νόμου επαφής ανάμεσα στον επικρουστήρα και την κατασκευή. Ένας ευρέως διαδεδομένος τρόπος μοντελοποίησης είναι η υπόθεση ύπαρξης γραμμικού ελατηρίου μεταξύ τους με δυσκαμψία επαφής (contact stiffness) που προκύπτει αναλυτικά από μηχανικές ιδιότητες των υλικών που έρχονται σε επαφή (Christoforou 1998 [20]). Η καταστατική εξίσωση επαφής μπορεί να διευρυνθεί περιλαμβάνοντας damping και εν γένει υστέρηση. Το γραμμικό ελατήριο έχει υιοθετηθεί σε προηγούμενες εργασίες που αφορούν κρούσεις σε σύνθετες κατασκευές με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (Saravanos-Christoforou 2002 [21], Plagianakos-Papadopoulos 2014 [22]).

Όσον αφορά το κομμάτι της απομάστευσης ενέργειας με χρήση πιεζοηλεκτρικών, πολλές ερευνητικές ομάδες αναζητούν τρόπους εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αλλά και ανάπτυξης της υπάρχουσας τεχνολογίας. Οι Matheu και Moll [23] ανέλυσαν διάφορες κατασκευές με δοκούς που υφίσταντο κάμψη,

χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικές ταινίες, οι οποίες είναι κατάλληλες για τοποθέτηση εντός υποδημάτων, ώστε να διεγείρονται μέσω περπατήματος. Στη συνέχεια, εξέφρασαν την παραμόρφωση λόγω κάμψης των δοκών ως συνάρτηση των γεωμετρικών παραμέτρων και των ιδιοτήτων των υλικών. Συγκρίνοντας την ενέργεια που αποθηκεύεται κάθε φορά, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η βέλτιστη διαμόρφωση της διάταξης. Η διάταξη περιλαμβάνει συνήθως, εκτός από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και έναν πυκνωτή στον οποίο αποθηκεύεται προσωρινά η ενέργεια. Έπειτα, με βάση τη δουλειά τους αυτή, ανέπτυξαν πιεζοηλεκτρικές ταινίες που εισήχθησαν μέσα σε υποδήματα και μελετήθηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως το είδος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, το μέγεθος της διέγερσης αλλά και το μέγεθος του πυκνωτή, για να προσδιοριστεί ο κατάλληλος πυκνωτής και τα διαστήματα φόρτισης αυτού για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ακόμα, ο Shah [24] και οι συνεργάτες του συνέκριναν την παραγωγή ενέργειας σε σύνθετα υλικά με πιεζοηλεκτρικές ίνες (PFC's) και σε πιεζοηλεκτρικές ταινίες με βάση πολυμερή υλικά (PVDF). Τα υλικά αυτά υποβάλλονταν σε διέγερση από διάφορες ταχύτητες ανέμου και σταγόνες νερού με σκοπό τη διερεύνηση της πιθανότητας παραγωγής ενέργειας από αυτές της ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Απέδειξαν ότι τα πολυμερή υλικά μπορούν να παράγουν μεγαλύτερα ποσά ισχύος από τα κεραμικά και ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας από εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως οι σταγόνες της βροχής και ο άνεμος.

Ο Sohn [25] και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων για να εκτιμήσουν τη δυνατότητα παραγωγής ισχύος με χρήση πιεζοηλεκτρικών ταινιών, όταν αυτές υποβάλλονταν σε πίεση αίματος. Η ανάλυση τους περιλάμβανε κυκλικούς και τετράγωνους σχηματισμούς.

Ο Liu [26] παρουσίασε μια ενεργητική προσέγγιση στην αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ισχύος για να ελέγξει την τάση σε μία πιεζοηλεκτρική συσκευή σε σχέση με την αντίστοιχη μηχανική είσοδο με σκοπό το βέλτιστο τρόπο μετατροπής ενέργειας. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του έδειξαν ότι η προσέγγισή του αύξησε την παραγωγή ενέργειας κατά πέντε φορές σε σχέση με ένα βελτιστοποιημένο κύκλωμα ανόρθωσης με διόδους για την ίδια μηχανική μετατόπιση.

Ο Chang [27] μοντελοποίησε και ανέλυσε τη λειτουργία μιας πιεζοελαστικής συσκευής αποθήκευσης ενέργειας μέσα σε έναν σκληρό δίσκο υπολογιστή. Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το 25% της ενέργειας που καταναλώνει ο κινητήρας του πηνίου φωνής του σκληρού δίσκου μπορεί να ανακτηθεί με την προτεινόμενη συσκευή.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν μόνο κάποια από τα πολλά παραδείγματα εφαρμογών των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που έχουν ερευνηθεί και αποδεικνύουν ότι η έρευνα στο πεδίο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι ένα πολλά υποσχόμενη. Αυτός, άλλωστε, είναι και ένας ακόμη λόγος που η συγκεκριμένη διπλωματική εστιάστηκε γύρω από το αντικείμενο της παραγωγής ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Όσον αφορά τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιείται στα επόμενα κεφάλαια, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται η παράθεση των βασικών θεωρητικών στοιχείων πάνω στα

οποία στηρίζεται η εργασία. Το πρώτο μέρος του κεφαλαίου αυτού πραγματεύεται τη φυσική που διέπει τις ταλαντώσεις. Στη Παράγραφο 2.2.1, περιγράφονται οι βασικές αρχές της ταλάντωσης με και χωρίς απόσβεση. Το τμήμα αυτό στηρίχθηκε στην πηγή [10]. Στην Παράγραφο 2.2.2, γίνεται μία ανασκόπηση της ελεύθερης και της εξαναγκασμένης ταλάντωσης συστημάτων διανεμημένης μάζας, με βάση τη βιβλιογραφική πηγή [6].

Το δεύτερο μέρος του ίδιου κεφαλαίου αναφέρεται στη λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου ως μετασχηματιστή μηχανικής σε ηλεκτρική ισχύ, αλλά και τη μοντελοποίηση αυτού, ώστε να μελετηθεί στο πλαίσιο ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η θεωρία που χρησιμοποιείται στο τμήμα αυτό της διπλωματικής εργασίας, αντλήθηκε από την πηγή [3].

Εν κατακλείδι, αξίζει να αναφερθούν οι πηγές [1] και [4] γιατί αυτές συνέβαλαν με τη σειρά τους στη μοντελοποίηση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και οδήγησαν στη συγκεκριμένη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος που αντιμετωπίστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Ακόμα, σημαντικές πληροφορίες σχετικές με το αντικείμενο αυτής της μεταπτυχιακής μπορούν να αντληθούν από την πηγή [2].

### **1.3 Δομή Εργασίας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Τα κεφάλαια αυτά θα παρουσιαστούν συνοπτικά σε αυτήν την παράγραφο για την καλύτερη εποπτεία του αναγνώστη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εισάγονται οι θεωρητικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του πειράματος απομάστευσης ενέργειας από κρουστικό φορτίο. Αρχικά, παρουσιάζονται στοιχεία θεωρίας που αφορούν τις ταλαντώσεις τόσο των συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας όσο και των συστημάτων διανεμημένης μάζας. Επιπλέον, περιγράφεται ο νόμος επαφής που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της κρούσης ανάμεσα στο βραχίονα και τη δοκό. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων μέσα από την καταστατική τους εξίσωση και υποδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μοντελοποιείται όταν αυτό είναι μέρος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο δημιουργήθηκαν τα υπολογιστικά μοντέλα με τα οποία προσεγγίστηκε η διαδικασία του πειράματος. Τα μοντέλα είναι δύο ειδών και αντιστοιχούν στο μηχανικό και το ηλεκτρικό υποσύστημα της διάταξης. Το μηχανικό υποσύστημα μοντελοποιείται με τη βοήθεια του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, ενώ το ηλεκτρικό αποδίδεται και επιλύεται με τη βοήθεια του προγράμματος Pspice. Τα παραπάνω μοντέλα δημιουργήθηκαν με σκοπό την πρόβλεψη της λειτουργίας του συστήματος υπό συνθήκες κρούσης.

Το τέταρτο κεφάλαιο εστιάζει στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Στα πλαίσια της ενότητας αυτής, πραγματοποιήθηκαν τρία διαφορετικά πειράματα τα οποία και παρουσιάζονται. Επίσης, γίνεται αναλυτική περιγραφή των πειραματικών διατάξεων και παρατίθενται οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από κάθε μοντέλο που αναπτύχθηκε και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις που προέκυψαν κατά την διάρκεια της εν λόγω μεταπτυχιακής εργασίας. Μετά τη σύγκριση, γίνεται και μια σύντομη επεξήγηση των αποτυχιών και το επιτυχιών του κάθε μοντέλου.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη καταγραφή των συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης, προτείνονται κατευθύνσεις για τη βελτίωση και επέκταση της δουλειάς που παρουσιάζεται εδώ.

## 2 Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία

### 2.1 Εισαγωγή

Το σύστημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει μία δοκό και ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (piezoelectric patch). Ο στόχος του συστήματος αυτού είναι η εκμετάλλευση μέρους της μηχανικής ενέργειας που εμπεριέχεται στη δοκό λόγω της ταλάντωσης που υφίσταται και η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η κατανόηση του φαινομένου της ταλάντωσης αλλά και του μηχανισμού μέσω του οποίου το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μετατρέπει την παραμόρφωσή του σε ηλεκτρικό δυναμικό.

### 2.2 Στοιχεία θεωρίας ταλαντώσεων

Όλα τα σώματα που διαθέτουν μάζα και ελαστικότητα υπόκεινται σε ταλαντώσεις. Εξαιτίας εξωτερικών διεγέρσεων, στις περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές συναντάται ταλαντωτική συμπεριφορά, η οποία είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό τους.

Οι ταλαντώσεις διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση την ύπαρξη εξωτερικής διέγερσης ή μη. Οι ταλαντώσεις που οφείλονται μόνο σε εσωτερικές δυνάμεις του συστήματος και όχι σε εξωτερικές ονομάζονται ελεύθερες ταλαντώσεις. Τα συστήματα που υφίστανται ελεύθερη ταλάντωση, ταλαντώνονται σε μία ή περισσότερες από τις φυσικές τους συχνότητες, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες του δυναμικού συστήματος και καθορίζονται από τη μάζα και την ελαστικότητά του.

Οι ταλαντώσεις που οφείλονται σε εξωτερικές διεγείρουσες δυνάμεις χαρακτηρίζονται ως εξαναγκασμένες. Αν η διεγείρουσα δύναμη είναι αρμονικής φύσεως και το σύστημα γραμμικό τότε η συχνότητα με την οποία ταλαντώνεται το σύστημα συμπίπτει με αυτή της διέγερσης. Ακόμα, όταν η συχνότητα της εξωτερικής διέγερσης ταυτίζεται με κάποια φυσική συχνότητα του συστήματος, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο του συντονισμού, κατά το οποίο το σύστημα ταλαντώνεται με ιδιαίτερα έντονο τρόπο.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των συστημάτων που ταλαντώνονται είναι και η απόσβεσή τους. Η απόσβεση μιας ταλάντωσης συνήθως προκύπτει ως αποτέλεσμα τριβών ή άλλων αντιστάσεων (π.χ. αεροδυναμική αντίσταση, απόσβεση λόγω ιξωδοελαστικής φύσης του υλικού). Αν η απόσβεση ενός συστήματος είναι σχετικά μικρή τότε οι φυσικές συχνότητες του δεν επηρεάζονται σημαντικά από αυτή και για αυτό υπολογίζονται με την υπόθεση μη ύπαρξης της απόσβεσης.

Ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών που χρειάζονται για την περιγραφή της κίνησης ενός σώματος ονομάζεται βαθμός ελευθερίας του συστήματος. Κατά αυτόν τον τρόπο, ένα απόλυτα στερεό σώμα διαθέτει έξι βαθμούς ελευθερίας, τρεις για τη θέση του και τρεις για τον προσανατολισμό του. Το ίδιο ισχύει και για ένα σώμα το οποίο μοντελοποιείται με την υπόθεση της συγκεντρωμένης μάζας. Τα συνεχή ελαστικά σώματα θεωρητικά διαθέτουν άπειρους βαθμούς ελευθερίας. Ωστόσο, συχνά γίνεται η υπόθεση

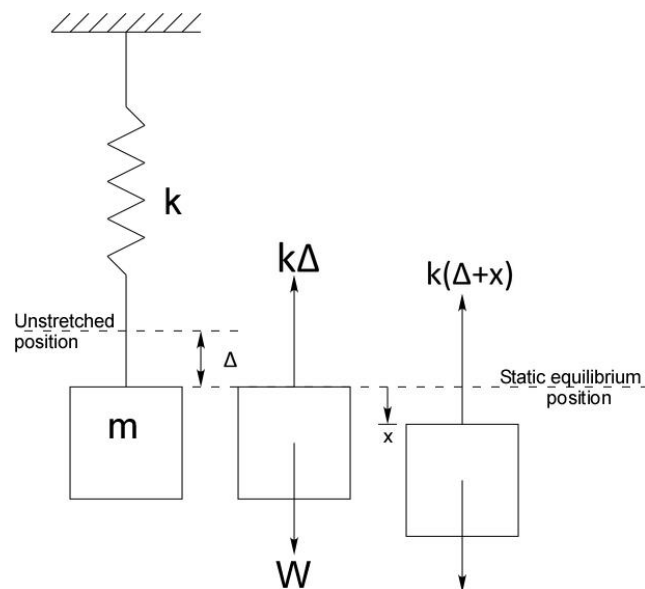
πως αυτά αποτελούνται από ένα πεπερασμένο αριθμό στερεών σωματιδίων και επομένως οι βαθμοί ελευθερίας τους είναι και αυτοί πλέον πεπερασμένοι. Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την ύπαρξη υπολογιστικών προσεγγίσεων, οι οποίες συχνά έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

### 2.2.1 Ταλάντωση συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας

Το βασικό μοντέλο, που περιγράφει τέτοια συστήματα, αποτελείται κατ' ελάχιστο από μία μάζα και ένα ελατήριο. Η μάζα θεωρείται συγκεντρωμένη ενώ το ελατήριο και ο αποσβεστήρας δεν διαθέτουν δική τους μάζα. Παρακάτω, θα γίνει η περιγραφή της ταλάντωσης τέτοιων συστημάτων όταν αυτή είναι ελεύθερη ή εξαναγκασμένη.

#### Ελεύθερη ταλάντωση συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας

Στην παράγραφο αυτή, εξετάζεται το πλέον απλό σύστημα μιας μάζας που ταλαντώνεται ελεύθερα στον κατακόρυφο άξονα με τη βοήθεια ελατηρίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1. Σύστημα μάζας-ελατηρίου σε κατακόρυφη ταλάντωση.

Για το σύστημα αυτό ισχύει ότι στο σημείο ισορροπίας, η μάζα  $m$  ισορροπεί υπό την επίδραση του βάρους της και της δύναμης που ασκεί το ελατήριο με ελαστική σταθερά  $k$ . Δηλαδή:

$$F_{\text{ελατ.}} = k\Delta = w = mg \quad (2-1)$$

όπου,  $\Delta$  η απόσταση του σημείου ισορροπίας από το ελεύθερο μήκος του ελατηρίου και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Απομακρύνοντας το σώμα από το σημείο ισορροπίας κατά μήκος  $x$  η δύναμη του ελατηρίου γίνεται:



$$F_{\text{ελατ.}} = k(\Delta + x) \quad (2-2)$$

Εφαρμόζοντας το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα προκύπτει:

$$\Sigma F = m\ddot{x} \Leftrightarrow w - k(\Delta + x) = m\ddot{x} \quad (2-3)$$

Και επειδή  $k\Delta = mg$ :

$$m\ddot{x} = -kx \quad (2-4)$$

Η εξίσωση αυτή είναι διαφορική δεύτερης τάξης και μπορεί να γραφτεί με τη μορφή:

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2-5)$$

όπου,  $\omega_n$  η φυσική κυκλική συχνότητα του συστήματος η οποία ορίστηκε ίση με:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (2-6)$$

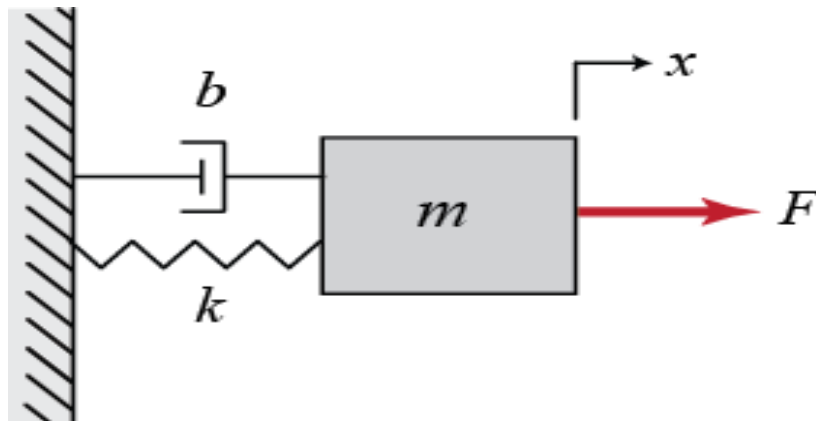
Τέλος, η λύση της διαφορικής εξίσωσης είναι της μορφής:

$$x = A \sin(\omega_n t) + B \cos(\omega_n t) \quad (2-7)$$

όπου, οι σταθερές A και B προσδιορίζονται με βάση τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος.

Ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζονται συστήματα συγκεντρωμένης μάζας με απόσβεση, όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-2, είναι παρόμοιος. Αξίζει να αναφερθεί ότι η διαφορική που διέπει αυτό το πρόβλημα, όταν η απόσβεση μπορεί να αποδοθεί ως μία δύναμη που είναι ανάλογη με την ταχύτητα του συστήματος (ιξωδοελαστική απόσβεση), είναι:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2-8)$$



Σχήμα 2-2. Σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα.

Η απόκριση του συστήματος εξαρτάται από το λόγο απόσβεσης  $\zeta$  που ορίζεται ως:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2-9)$$

όπου,  $c_c$  ο συντελεστής κρίσιμης απόσβεσης. Για αυτόν ισχύει:

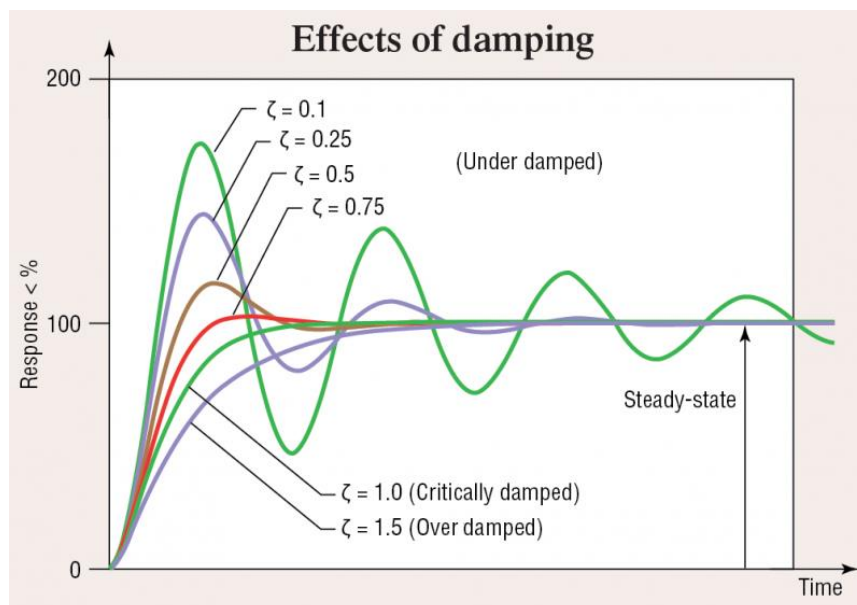
$$c_c = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} \quad (2-10)$$

Επομένως, είναι προφανές ότι όταν ένα σύστημα εμφανίζει κρίσιμη απόσβεση, ο συντελεστής  $\zeta$  είναι ίσος με τη μονάδα. Ο Πίνακας 2-1 και το Σχήμα 2-3 παρουσιάζουν τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η απόκριση του συστήματος από το λόγο απόσβεσης.

**Πίνακας 2-1. Απόκριση συστήματος με απόσβεση ως προς το λόγο απόσβεσης  $\zeta$ .**

| Λόγος απόσβεσης | Είδος ταλάντωσης   | Εξίσωση απόκρισης   |
|-----------------|--------------------|---|
| $\zeta = 0$     | Αρμονική ταλάντωση | $x = A \sin(\omega_n t) + B \cos(\omega_n t)$   |
| $\zeta < 1$     | Υποαπόσβεση        | $x = e^{-\zeta\omega_n t} (C_1 \sin(\omega_d t) + C_2 \cos(\omega_d t))$                      |
| $\zeta = 1$     | Κρίσιμη απόσβεση   | $x = (A + Bt)e^{-\zeta\omega_n t}$  |
| $\zeta > 1$     | Υπεραπόσβεση       | $x = Ae^{(-\zeta + \sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t} + Be^{(-\zeta - \sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t}$ |

όπου  $\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_n$  και τα  $A, B, C_1, C_2$  είναι σταθερές που προσδιορίζονται με βάση τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος.



**Σχήμα 2-3. Επίδραση λόγου απόσβεσης  $\zeta$  στην απόκριση του συστήματος.**

## Εξαναγκασμένη ταλάντωση συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας

Η εξαναγκασμένη ταλάντωση οφείλεται σε μια εξωτερική διέγερση. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η εξωτερική διέγερση είναι ένα κρουστικό φορτίο. Τέτοιου είδους διεγέρσεις απαντώνται συχνά σε μηχανολογικά συστήματα. Όταν ένα σύστημα υποβάλλεται σε μια κρουστική διέγερση τότε, θεωρητικά, διεγείρονται όλες οι ιδιοσυχνότητες του. Γενικά, η διέγερση μπορεί να είναι είτε μία δύναμη που ασκείται στο σύστημα είτε μια μετατόπιση.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, θα παρατεθούν κάποια βασικά στοιχεία που αφορούν στην εξαναγκασμένη ταλάντωση ενός βαθμού ελευθερίας. Στο πρόβλημα που θα εξεταστεί, η διέγερση είναι μια κρουστική δύναμη και οι αποσβέσεις μοντελοποιούνται ως ανάλογες της ταχύτητας του συστήματος. Η διαφορική που περιγράφει την κίνηση ενός τέτοιου συστήματος είναι:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2-11)$$

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης αποτελείται από δύο τμήματα, την ομογενή λύση και τη μερική λύση. Η ομογενής λύση αντιστοιχεί στην εξίσωση:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2-12)$$

Ενώ, η μερική λύση της εξαρτάται από τη μορφή που έχει η δύναμη  $F(t)$ . Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να προσεγγιστεί ένα κρουστικό φορτίο. Ένας από αυτούς είναι με χρήση της συνάρτησης Dirac που συμβολίζεται ως  $\delta(t)$ . Εναλλακτικά, το προφίλ της δύναμης, που αναπτύσσεται στη διάρκεια μιας κρούσης, μπορεί να προσεγγιστεί και ως ένα ημιτονοειδής παλμός που διαρκεί μόνο μισή περίοδο  $T$ . Δηλαδή:

$$F(t) = \begin{cases} F_0 \sin(\omega t), & 0 \leq t < T/2 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2-13)$$

Στη δεύτερη περίπτωση, η μερική λύση μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι της μορφής:

$$x_{\text{μερ.}} = X \sin(\omega t - \varphi), \quad 0 \leq t < T/2 \quad (2-14)$$

όπου το  $X$  είναι σταθερά που εκφράζει το πλάτος της ταλάντωσης του συστήματος και το  $\varphi$  είναι σταθερά που εκφράζει τη διαφορά φάσης μεταξύ της μετατόπισης και της διεγείρουσας δύναμης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συχνότητα της μετατόπισης είναι ίδια με αυτήν της εξωτερικής δύναμης.

Η διαφορική του συστήματος μπορεί εναλλακτικά να γραφτεί στη μορφή:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{F_0}{m}\sin(\omega t), \quad 0 \leq t < T/2 \quad (2-15)$$

όπου,  $\zeta$  είναι ο λόγος απόσβεσης του συστήματος και  $\omega_n$  είναι η φυσική του συχνότητα. Με βάση τη σχετική μαθηματική ανάλυση, η λύση του συστήματος είναι:

$$x(t) = x_{\mu\epsilon\rho.} + x_{\omicron\mu\omicron\gamma.} =$$

$$= \frac{F_0}{k} \frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} + X_1 e^{-\zeta\omega_n t} \sin\left(\sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_n t + \varphi_1\right) \quad (2-16)$$

όπου, τα  $X_1$  και  $\varphi_1$  είναι σταθερές που αφορούν το πλάτος και τη φάση της ομογενούς λύσης αντίστοιχα και υπολογίζονται με βάση τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η ομογενής λύση, που εξαρτάται από τη μάζα, την ελαστικότητα και την απόσβεση του συστήματος, λόγω του όρου  $e^{-\zeta\omega_n t}$  τείνει να μηδενισθεί για χρόνο μεγαλύτερο του  $t=4/\zeta\omega_n$ . Στο πρόβλημα της κρούσης που εξετάζεται εδώ, οι αρχικές συνθήκες είναι μηδενικές.

Όσον αφορά τη μερική λύση, η οποία εμφανίζεται εξ' αιτίας της διεγείρουσας δύναμης, η επίδραση της σταματά μετά το πέρας της μισή περιόδου. Εάν ενδιαφέρει η λύση της διαφορικής και μετά την χρονική στιγμή  $t = T/2$ , τότε θα πρέπει να βρεθεί η μετατόπιση σε αυτήν τη χρονική στιγμή και να θεωρηθεί ως αρχική συνθήκη για το υπόλοιπο του προβλήματος.

### 2.2.2 Ταλάντωση συστημάτων διανεμημένης μάζας

Τα συστήματα που θα εξεταστούν σε αυτήν την παράγραφο χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι η μάζα τους αλλά και η ελαστικότητα τους είναι συνεχώς διανεμημένες. Στην παρούσα εργασία, γίνεται η υπόθεση ότι αυτά τα σώματα ταλαντώνονται εντός της ελαστικής περιοχής και άρα ότι υπακούουν στο νόμο του Hooke. Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου σε ένα παραμορφωμένο ελαστικό σώμα, είναι θεωρητικά αναγκαία η ύπαρξη ενός άπειρου αριθμού μεταβλητών και επομένως το σώμα διαθέτει άπειρους βαθμούς ελευθερίας. Ωστόσο, στην πράξη, τα συστήματα διανεμημένης μάζας μοντελοποιούνται ως ένα σύνολο στοιχείων συγκεντρωμένης μάζας και με αυτόν τον τρόπο, οι βαθμοί ελευθερίας τους είναι πεπερασμένοι. Μία από τις μεθόδους που προσεγγίζει με αυτό τον τρόπο το σύστημα διανεμημένης μάζας (συνεχές μέσο) είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Κατά κανόνα ισχύει ότι για μεγάλο αριθμό στοιχείων τα αποτελέσματα που παρέχει είναι ικανοποιητικά.

Η ελεύθερη ταλάντωση των σωμάτων διανεμημένης μάζας είναι το αποτέλεσμα του αθροίσματος της συνεισφοράς όλων των ιδιομορφών τους. Κάθε ιδιομορφή ενός σώματος, οδηγεί τα σωματίδια του σε αρμονική ταλάντωση στη συχνότητα που της αντιστοιχεί. Στην περίπτωση που η ταλάντωση οφείλεται σε αρχικές συνθήκες, αν η καμπύλη του παραμορφωμένου σχήματος του σώματος στην εκκίνηση της κίνησης του, ταυτίζεται με την καμπύλη μιας ιδιομορφής, τότε η ταλάντωση του σώματος οφείλεται αποκλειστικά σε αυτήν την ιδιομορφή. Παρόλα αυτά, συνήθως οι ταλαντώσεις που οφείλονται σε κρούσεις, δεν υπάγονται στην παραπάνω περίπτωση. Αντιθέτως, οι δυνάμεις, που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μιας κρούσης, διεγείρουν θεωρητικά όλες τις ιδιομορφές του σώματος.

Για τις εξαναγκασμένες ταλαντώσεις, αξίζει να αναφερθεί ότι η συχνότητά τους οφείλεται κατά κύριο λόγο στη συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης. Ακόμα, ο τρόπος στήριξης ενός συστήματος διανεμημένης μάζας επηρεάζει τις ιδιομορφές που αυτό παρουσιάζει.

Για την περιγραφή της ταλάντωσης ενός συστήματος διανεμημένης μάζας υπάρχουν αναλυτικές εξισώσεις (π.χ. εξισώσεις δοκού Euler, δοκός Timoshenko), ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία η προσέγγιση που ακολουθείται είναι υπολογιστική. Αυτό σημαίνει ότι θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των μητρώων δυσκαμψίας και αδράνειας της κατασκευής, που υπεισέρχονται στην εξίσωση κίνησης του συστήματος, η οποία θα περιγραφεί στις επόμενες παραγράφους.

### Ελεύθερη ταλάντωση συστημάτων διανεμημένης μάζας

Η μελέτη της ελεύθερης ταλάντωσης ενός συστήματος διανεμημένης μάζας είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οδηγεί στον προσδιορισμό των ιδιομορφών του συστήματος. Η διαφορική εξίσωση που διέπει την ταλάντωση ενός τέτοιου συστήματος γράφεται ως εξής:

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [C] \cdot \{\dot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = 0 \quad (2-17)$$

όπου,  $\{q\}$  είναι το διάνυσμα που περιλαμβάνει τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος. Τα μητρώα  $[M]$ ,  $[K]$  και  $[C]$  αντιστοιχούν στη μάζα, την ελαστικότητα και την απόσβεση του συστήματος. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, η απόσβεση θεωρείται κατ' αρχήν αμελητέα και δεν λαμβάνεται υπόψη. Μπορεί όμως να προστεθεί με όμοιο τρόπο όπως στα συστήματα συγκεντρωμένων παραμέτρων με μόνη διαφοροποίηση ότι το μητρώο απόσβεσης περιέχει σταθερές απόσβεσης, κατ' αντιστοιχία με το μητρώο δυσκαμψίας. Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση που εξετάζεται είναι η ακόλουθη.

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = 0 \quad (2-18)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής είναι της μορφής [6] :

$$\{q(t)\} = \{\varphi\} \cdot e^{j\omega t} \quad (2-19)$$

όπου,  $\varphi$  είναι το ιδιοδιάνυσμα του συστήματος και  $\omega$  η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα. Η μορφή αυτή υποδηλώνει την ύπαρξη μιας αρμονικής αμείωτης ταλάντωσης αφού έχει γίνει η υπόθεση ότι οι αποσβέσεις είναι αμελητέες. Τελικά, η γενική λύση είναι της μορφής:

$$\{q(t)\} = c_1\{\varphi_1\} \cdot e^{j\omega_1 t} + c_2\{\varphi_2\} \cdot e^{j\omega_2 t} + \dots + c_n\{\varphi_n\} \cdot e^{j\omega_n t} \quad (2-20)$$

όπου, οι σταθερές  $c_i$  προσδιορίζονται με βάση τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Με βάση τη μορφή της λύσης που υποτέθηκε (εξίσωση (2-19)), οι  $\omega_i$  θα πρέπει να επαληθεύουν την:

$$(-\omega^2 \cdot [M] + [K]) \cdot \{\varphi\} \cdot e^{j\omega t} = 0 \quad (2-21)$$

Και για να έχει μη τετριμμένη λύση το σύστημα θα πρέπει:

$$|-\omega^2 \cdot [M] + [K]| = 0 \quad (2-22)$$

Η εξίσωση (2-22) οδηγεί στην εύρεση των  $n$  διαφορετικών ιδιοσυχνοτήτων  $\omega_n$ . Οι ιδιοσυχνότητες αυτές αποδεικνύεται ότι είναι όλες θετικές αφού το μητρώο της μάζας είναι θετικά ημιορισμένο. Τα ιδιοδιανύσματα του συστήματος προκύπτουν με βάση τη σχέση που ακολουθεί:

$$\omega_i^2 \cdot [M] \cdot \{\varphi_i\} = [K] \cdot \{\varphi_i\} \quad (2-23)$$

Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι τα ιδιοδιανύσματα του συστήματος είναι ορθογώνια μεταξύ τους και αυτή τους η ιδιότητα χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί η κανονικοποίησή τους. Η κανονικοποίηση, τελικά, υλοποιείται όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\{\varphi_i\}^T [M] \cdot \{\varphi_i\} = 1 \Rightarrow \{\varphi_i\}^T [K] \cdot \{\varphi_i\} = \omega_i^2 \quad (2-24)$$

### Εξαναγκασμένη ταλάντωση συστημάτων διανεμημένης μάζας

Έχοντας ολοκληρώσει τη μελέτη της ελεύθερης ταλάντωσης των συστημάτων διανεμημένης μάζας, είναι πλέον δυνατή η ανάλυση της περίπτωσης όπου η ταλάντωση ενός τέτοιου συστήματος διεγείρεται από μία εξωτερική δύναμη. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορική εξίσωση που περιγράφει, εν γένει, τη φυσική του συστήματος, έχει τη μορφή που ακολουθεί.

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [C] \cdot \{\dot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = \{F\} \cdot u \quad (2-25)$$

Στην προαναφερθείσα εξίσωση, εμφανίζεται ο όρος  $\{F\} \cdot u$ . Στον όρο αυτό, με  $\{F\}$  συμβολίζεται το διάνυσμα προσαρμογής της μοναδιαίας εισόδου στη διάσταση του συστήματος και με  $u$  η είσοδος, η οποία είναι η διεγείρουσα δύναμη του συστήματος.

Η λύση της διαφορικής αυτήν τη φορά έχει τη μορφή:

$$\{q(t)\} = [\Phi] \cdot \{\eta(t)\} \quad (2-26)$$

όπου,  $[\Phi]$  είναι το μητρώο που περιλαμβάνει τα ιδιοδιανύσματα  $\varphi_i$  και  $\{\eta(t)\}$  είναι το διάνυσμα των συντεταγμένων στο χώρο των ιδιομορφών. Αντικαθιστώντας την παραπάνω έκφραση στη διαφορική του συστήματος, προκύπτει η εξίσωση:

$$[M][\Phi] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [C][\Phi] \cdot \{\dot{\eta}\} + [K][\Phi] \cdot \{\eta\} = \{F\} \cdot u \quad (2-27)$$

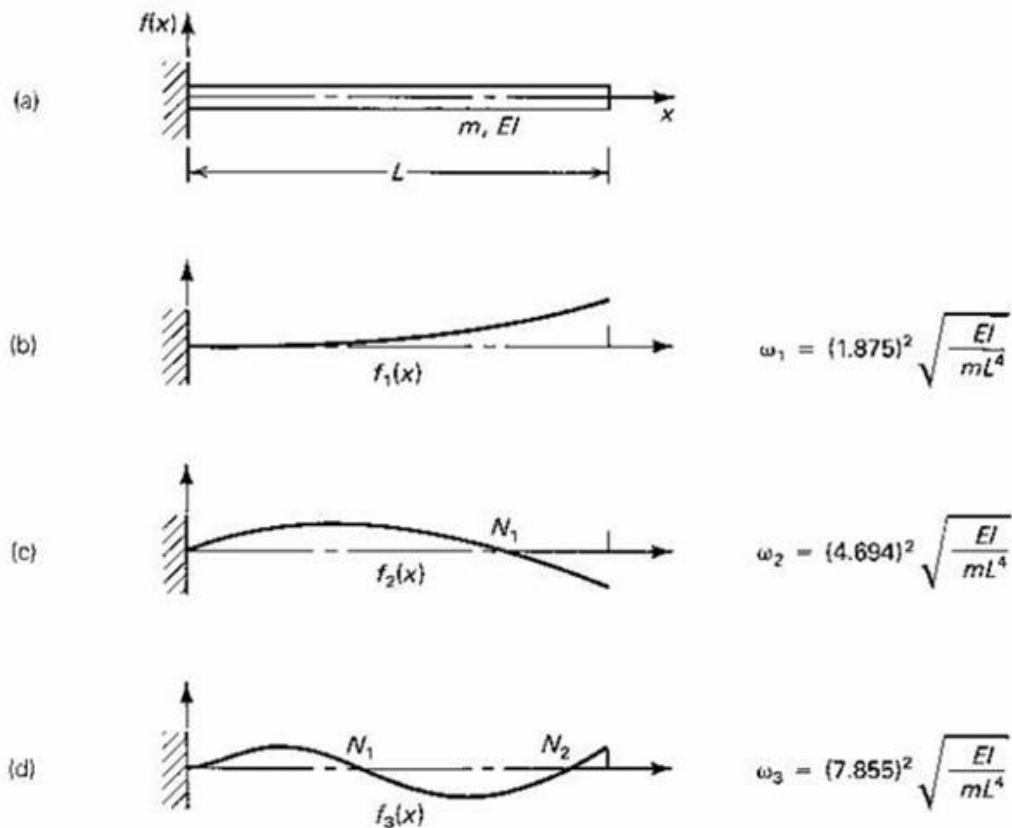
Και πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης με το μητρώο  $[\Phi]^T$ , η εξίσωση μετατρέπεται στην ακόλουθη μορφή:

$$[\Phi]^T [M][\Phi] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [\Phi]^T [C][\Phi] \cdot \{\dot{\eta}\} + [\Phi]^T [K][\Phi] \cdot \{\eta\} = [\Phi]^T \{F\} \cdot u \quad (2-28)$$

Ή αλλιώς:

$$[M_{ffmod}] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [C_{ffmod}] \cdot \{\dot{\eta}\} + [K_{ffmod}] \cdot \{\eta\} = \{F_{sfmod}\} \cdot u \quad (2-29)$$

Για την εξίσωση (2-29), αξίζει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της εργασίας αυτής, τα μητρώα  $[M_{ffmod}]$ ,  $[C_{ffmod}]$ ,  $[K_{ffmod}]$  και  $\{F_{sfmod}\}$  εκφυλλίζονται σε αριθμούς, αφού για την ανάλυση που υλοποιήθηκε, έγινε η υπόθεση ότι είναι απαραίτητη μόνο η πρώτη ιδιομορφή του συστήματος. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, η λύση της διαφορικής αυτής εξίσωσης αποτελείται από δυο επιμέρους τμήματα, την ομογενή και τη μερική λύση. Στη διάρκεια της μελέτης που θα ακολουθήσει, η διαφορική εξίσωση θα λυθεί με υπολογιστικές μεθόδους και όχι αναλυτικά.



Σχήμα 2-4. Σχηματική απεικόνιση πρώτων ιδιομορφών μονόπακτης δοκού.

Ολοκληρώνοντας την ανασκόπηση των θεωρητικών στοιχείων που αφορούν τις ταλαντώσεις, αναφέρεται ότι και για τις εξαναγκασμένες ταλαντώσεις συστημάτων διανεμημένης μάζας, ισχύει ότι:

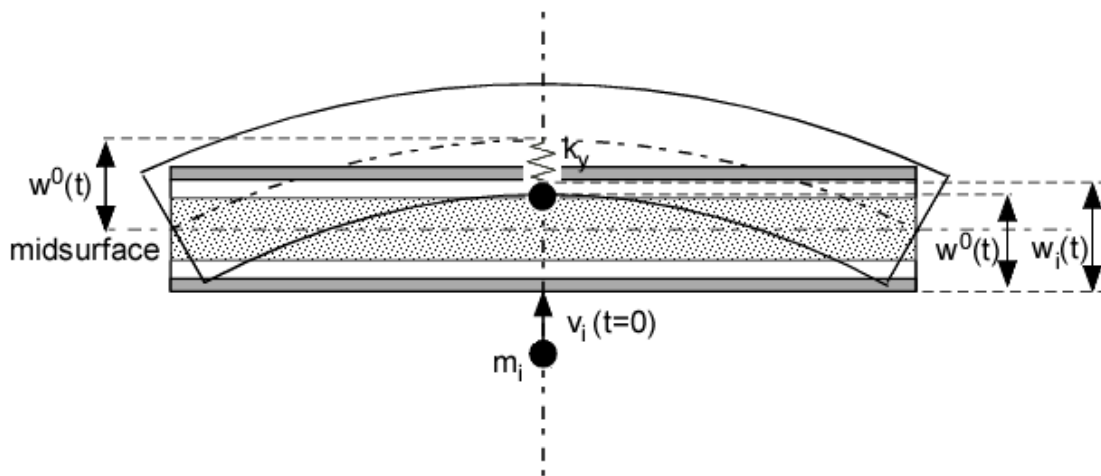
$$q_i(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_{i,j}(x) \cdot \eta_{i,j}(t) \quad (2-30)$$

όπου, το  $j$  αντιστοιχεί στην  $j$ -ιστή ιδιομορφή του συστήματος. Ωστόσο, για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, ο μόνος βαθμός ελευθερίας που θα εξεταστεί είναι η βύθιση του δοκιμίου  $w_{rel}$  και θα χρησιμοποιηθεί μόνο η πρώτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος, οπότε, τελικά, η (2-30) γράφεται ως εξής:

$$w_{rel}(x, t) = \varphi_1(x) \cdot \eta_1(t) \quad (2-31)$$

### 2.3 Νόμος επαφής επικρουστήρα-δοκού

Για τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος απομάστευσης ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας κρούσης, είναι απαραίτητη η υιοθέτηση ενός νόμου επαφής, ο οποίος θα μπορεί να περιγράψει την αλληλεπίδραση μεταξύ του επικρουστήρα και της δοκού. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ο ελαστο-πλαστικός νόμος επαφής που προτείνεται από τους Yigit και Christoforou (1994). Με βάση τον νόμο αυτό, η δύναμη επαφής που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια μιας κρούσης σε ένα σημείο της δοκού με συντεταγμένες  $(x_0, y_0)$  μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση ανάμεσα στον επικρουστήρα και την μέση επιφάνεια της δοκού στην οποία ασκείται η δύναμη.



Σχήμα 2-5. Απεικόνιση του νόμου επαφής.

Ο νόμος αυτός μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$F_i(t) = \begin{cases} k_y(w_i(t) - w^0(x_0, y_0, t)), & w_i(t) > w^0(x_0, y_0, t) \\ 0 & w_i(t) \leq w^0(x_0, y_0, t) \end{cases} \quad (2-32)$$

όπου,  $w_i(t)$  είναι η απόσταση που διανύει ο επικρουστήρας από τη στιγμή που έρχεται σε επαφή με τη δοκό,  $k_y$  ο συντελεστής δυσκαμψίας της επαφής, και  $w^0(x_0, y_0, t)$  είναι η βύθιση του σημείου  $(x_0, y_0)$  της βαλλόμενης μέσης επιφάνειας την χρονική στιγμή  $t$ . Ουσιαστικά θεωρείται ότι όλη η διατομή της δοκού κινείται με κοινή μετατόπιση και



ταχύτητα, οι οποίες εκφράζονται από την κίνηση της μέσης επιφάνειας της δοκού. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο συντελεστής δυσκαμψίας της επαφής  $k_y$  εξαρτάται από τα υλικά του επικρουστήρα και της δοκού και δίνεται αναλυτικά στο [20] .

Ο παραπάνω νόμος επαφής ουσιαστικά προτείνει πως η επαφή μεταξύ επικρουστήρα και δοκού, μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη χρήση ενός ελατηρίου ανάμεσα τους. Όταν ο επικρουστήρας βρίσκεται στην αρχική θέση, όπου έχει τη μέγιστη ταχύτητα, το ελατήριο είναι ασυμπέστο και άρα, η δύναμη επαφής είναι μηδενική. Αντίστροφα, όταν ο επικρουστήρας φτάσει στο σημείο όπου η ταχύτητά του μηδενίζεται, το ελατήριο είναι πλήρως συμπιεσμένο και άρα η δύναμη επαφής είναι μέγιστη.

## 2.4 Στοιχεία θεωρίας πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί με τους οποίους γίνεται η μετατροπή της ενέργειας που περιέχεται σε μία ταλάντωση σε ηλεκτρική, σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, είναι οι ηλεκτρομαγνητικοί, οι ηλεκτροστατικοί και οι πιεζοηλεκτρικοί εναλλάκτες. Από τις τρεις παραπάνω εναλλακτικές, μετά από ενδελεχή επιστημονική έρευνα, έχει προκύψει ότι τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία υπερτερούν έναντι των υπολοίπων σε εφαρμογές ταλαντώσεων [3] . Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι η μεγάλη ενεργειακή τους πυκνότητα και η ευκολία στη χρήση τους. Η ηλεκτρομαγνητική εναλλακτική στην αποθήκευση ενέργειας σε εφαρμογές ταλαντώσεων, παρουσιάζει, γενικά, μικρότερες τιμές παραγόμενου ηλεκτρικού δυναμικού σε σχέση με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και συχνά απαιτείται η χρήση μετεπεξεργασίας της εξόδου τους σε πολλά επίπεδα για την επίτευξη τιμών δυναμικού που επιτρέπουν την αποθήκευση της ενέργειας. Αυτό στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία δεν είναι αναγκαίο καθώς το δυναμικό που παράγουν είναι άμεσα αξιοποιήσιμο. Επιπλέον, στην ηλεκτροστατική μετατροπή ενέργειας, χρειάζεται η εφαρμογή ενός σήματος εισόδου με τη μορφή δυναμικού ή ρεύματος, έτσι ώστε η σχετική κίνηση της ταλάντωσης των στοιχείων συσώρευσης να παράξει μία εναλλασσόμενη έξοδο. Αντιθέτως, στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία το δυναμικό που προκύπτει στην έξοδο τους είναι αποτέλεσμα της ίδιας της καταστατικής τους εξίσωσης και άρα δεν υπάρχει ανάγκη για εξωτερική παρέμβαση. Τέλος, ένα επιπλέον πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία έναντι των υπολοίπων εναλλακτικών είναι και το γεγονός ότι μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν τόσο σε εφαρμογές μεγάλης όσο και μικρής κλίμακας.

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, συνήθως, τοποθετούνται σε πακτωμένες δοκούς αλλά μπορούν να βρουν εφαρμογή και σε άλλες κατασκευές όπως είναι οι επίπεδες πλάκες. Τα πιεζοηλεκτρικά εκμεταλλεύονται τη δυναμική παραμόρφωση των δοκών και τη μετατρέπουν στα ηλεκτρόδιά τους σε ηλεκτρικό δυναμικό εναλλασσόμενης φύσεως. Το δυναμικό αυτό, θα πρέπει στη συνέχεια να ανορθωθεί και να εξομαλυνθεί με τη χρήση ειδικού κυκλώματος, το οποίο περιλαμβάνει γέφυρα ανόρθωσης και πυκνωτή (AC-DC converter), προκειμένου να αποθηκευτεί σε κάποια μπαταρία. Συχνά χρησιμοποιείται και ένα δεύτερο υποκύκλωμα το οποίο ρυθμίζει το δυναμικό της εξόδου ως προς το πλάτος για την κατάλληλη τροφοδότηση της συσκευής συσώρευσης της ενέργειας.

Οι παραπάνω πληροφορίες δικαιολογούν το ενδιαφέρον που οδηγεί στη μελέτη της αποθήκευσης ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Ωστόσο, για την καλύτερη κατανόηση των διατάξεων αυτών, είναι απαραίτητη η περιγραφή της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων τόσο όταν αυτά βρίσκονται συνδεδεμένα σε κάποιο κύκλωμα όσο και όταν αυτό δεν συμβαίνει. Για το λόγο αυτό στις παραγράφους που ακολουθούν, παρατίθενται η καταστατική εξίσωση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο αυτά μοντελοποιούνται όταν αποδίδουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν σε κάποιο κύκλωμα αποθήκευσης.

#### 2.4.1 Καταστατικές εξισώσεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Γενικά, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι εγκαρσίως ισότροπα υλικά. Στις εξισώσεις που θα παρατεθούν στη συνέχεια, το επίπεδο ως προς το οποίο εμφανίζεται η ισοτροπία είναι το επίπεδο-xy (ή αλλιώς επίπεδο-12). Επομένως, το πιεζοηλεκτρικό υλικό εμφανίζει συμμετρία ως προς τον άξονα-z (ή αλλιώς άξονα-3), ο οποίος είναι και ο άξονας πόλωσης του υλικού. Ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται οι άξονες του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου φαίνεται στο Κεφάλαιο 3, όπου και παρουσιάζεται το μοντέλο του μηχανικού υποσυστήματος.

Οι καταστατικές εξισώσεις, που διέπουν τη λειτουργία ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, συνδέουν μεταξύ τους τις μηχανικές τάσεις  $T_{ij}$ , τις παραμορφώσεις  $S_{ij}$ , το ηλεκτρικό πεδίο  $E_k$  και την ηλεκτρική μετατόπιση (φορτίο ανα μονάδα επιφάνειας)  $D_k$ . Στην εξίσωση (2-33) παρατίθενται οι καταστατικές εξισώσεις ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στην πιο συνηθισμένη τους μορφή.

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E \cdot T_{kl} + d_{kij} \cdot E_k \quad (2-33)$$

$$D_i = d_{ikl} \cdot T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T \cdot E_k$$

όπου οι συντελεστές  $i, j$  λαμβάνουν τις τιμές  $\{1, 2, \dots, 6\}$ , ενώ οι συντελεστές  $k, l$  τις τιμές  $\{1, 2, 3\}$ . Εναλλακτικά, οι εξισώσεις αυτές αποδίδονται σε μητρική μορφή ως εξής:

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d^t \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

όπου το στοιχείο  $s^E$  είναι το μητρώο που περιέχει τις σταθερές ενδοτικότητας  $s_{ijkl}^E$ , το στοιχείο  $d$  είναι ο πίνακας που περιέχει τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές  $d_{kij}$ , ενώ το στοιχείο  $d^t$  είναι ο ανάστροφος του  $d$  και το στοιχείο  $\varepsilon^T$  είναι ο πίνακας που περιέχει τις σταθερές διηλεκτρικής διαπερατότητας  $\varepsilon_{ik}^T$ . Επιπλέον, οι εκθέτες  $E$  και  $T$  υποδηλώνουν ότι οι σταθερές που τους φέρουν έχουν εκτιμηθεί σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο και σταθερή μηχανική τάση αντίστοιχα.

Ωστόσο, οι εξισώσεις (2-33) μπορούν να εκφραστούν ως προς οποιοδήποτε ζεύγος μεταβλητών από τις τέσσερις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι να γραφτούν. Στις εναλλακτικές εκφράσεις των καταστατικών

εξισώσεων  $c_{ijkl}^E$ ,  $e_{kij}$  και  $\varepsilon_{ik}^S$  είναι οι ελαστικές, οι πιεζοηλεκτρικές και οι σταθερές ηλεκτρικής διαπερατότητας αντίστοιχα. Οι  $d_{ikl}$ ,  $h_{ikl}$  και  $g_{ikl}$  είναι εναλλακτικές εκφράσεις των πιεζοηλεκτρικών σταθερών, οι  $s_{ijkl}^E$ ,  $s_{ijkl}^D$  είναι οι σταθερές ενδοτικότητας και οι  $\beta_{ik}^S$ ,  $\beta_{ik}^T$  οι σταθερές αδιαπερατότητας. Ακόμα, οι εκθέτες  $S$  και  $D$  αντιστοιχούν σε σταθερές που εκτιμούνται υπό σταθερή παραμόρφωση και ηλεκτρική μετατόπιση αντίστοιχα. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι διαφορετικές εκφράσεις των καταστατικών εξισώσεων του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}^E \cdot S_{kl} - e_{kij} \cdot E_k \\ D_i &= e_{ikl} \cdot S_{kl} + \varepsilon_{ik}^S \cdot E_k \end{aligned} \quad (2-35)\alpha$$

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}^D \cdot S_{kl} - h_{kij} \cdot D_k \\ E_i &= -h_{ikl} \cdot S_{kl} + \beta_{ik}^S \cdot D_k \end{aligned} \quad (2-36)\beta$$

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^D \cdot T_{kl} + d_{kij} \cdot E_k \\ E_i &= -g_{ikl} \cdot T_{kl} + \beta_{ik}^T \cdot E_k \end{aligned} \quad (2-37)\gamma$$

Από τις παραπάνω εκφράσεις, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, στην πραγματικότητα, λειτουργεί ως ένας μετασχηματιστής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια, θα παρατεθεί η μητρική μορφή των εξισώσεων όταν αυτές αφορούν και τις τρεις διαστάσεις του χώρου αλλά και τον τρόπο με τον οποίο το μητρώο αυτό μετατρέπεται στην περίπτωση της λεπτής δοκού.

### Καταστατικές εξισώσεις στις τρεις διαστάσεις

Η μητρική μορφή των εξισώσεων που παρατέθηκαν προηγουμένως (βλέπε (2-33),(2-34)) φαίνεται στην ανεπτυγμένη μορφή που ακολουθεί:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

όπου,  $S_i$  ( $i=1,\dots,6$ ) είναι οι παραμορφώσεις του συνεχούς μέσου, 3 ορθές και 3 διατμητικές,  $T$  είναι οι αντίστοιχες τάσεις και  $E_j$  ( $j=1,2,3$ ) είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στις 3 διευθύνσεις του χώρου.

Στην (2-38) θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μορφή του πίνακα οφείλεται στο γεγονός ότι το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ισότροπο ως προς τις ελαστικές σταθερές του. Ακόμα, από άποψη συμβολισμού, τα μεγέθη στα δύο διανύσματα της σχέσεως που προηγήθηκε παρατέθηκαν σε σύντμηση, όπου για  $i=j$  γίνεται αναφορά σε ορθές παραμορφώσεις και τάσεις, ενώ όταν  $i$  διάφορο του  $j$  στα αντίστοιχα διατμητικά μεγέθη. Τα διανύσματα αυτά είναι ίσα με:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{13} \\ 2S_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ 2T_{13} \\ 2T_{23} \\ 2T_{13} \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

### Καταστατικές εξισώσεις για λεπτή δοκό

Στην παρούσα μελέτη, γίνεται η υπόθεση ότι το δοκίμιο που εξετάζεται υπάγεται στην κατηγορία της λεπτής δοκού. Η υπόθεση αυτή, σύμφωνα με τη θεωρία Euler-Bernoulli, οδηγεί στην παραδοχή ότι όλες οι συνιστώσες της μηχανικής τάσης εκτός από τη συνιστώσα της ορθής τάσης  $T_1$ , είναι αμελητέες, δηλαδή:

$$T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = 0 \quad (2-40)$$

Εάν, επίσης, γίνει και η υπόθεση ότι τα ηλεκτρόδια καλύπτουν τις επιφάνειες του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που είναι κάθετες ως προς τον άξονα-3, τότε οι καταστατικές εξισώσεις απλοποιούνται περαιτέρω και λαμβάνουν τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

Εναλλακτικά, μπορούν, επίσης, να γραφτούν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{c}_{11}^E & -\bar{e}_{31} \\ -\bar{e}_{31} & \bar{\epsilon}_{33}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

Στην παραπάνω σχέση, η παύλα πάνω από τις σταθερές συμβολίζει ότι τα μεγέθη αφορούν το επίπεδο εντατικό πρόβλημα (δηλ. ότι όλες οι συνιστώσες παραμόρφωσης εκτός του επιπέδου  $xy$  της δοκού αμελούνται). Με δεδομένο ότι το πλάτος της δοκού είναι πολύ μικρότερο από το μήκος της, τελικά η μόνη παραμόρφωση που λαμβάνεται υπόψη είναι η

ορθή αξονική παραμόρφωση  $S_{11}$ . Οι σχέσεις που συνδέουν τις σταθερές της (2-42) με τις αντίστοιχες σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενους τύπους είναι:

$$\begin{aligned} \bar{c}_{11}^E &= \frac{1}{s_{11}^E} \\ \bar{e}_{31} &= \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \\ \bar{e}_{33}^S &= \varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \end{aligned} \quad (2-43)$$

#### 2.4.2 Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε ηλεκτρικά κυκλώματα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από πιεζοηλεκτρικό στοιχείο κατά τη διάρκεια μιας ταλάντωσης, θα πρέπει να διοχετευθεί σε ένα ειδικό κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη ενός τέτοιου κυκλώματος, είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του πιεζοηλεκτρικού με τη χρήση συγκεντρωμένων ηλεκτρικών στοιχείων. Για το λόγο αυτό στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιαστεί η μέθοδος με την οποία δημιουργείται το επιθυμητό μοντέλο αλλά και οι μαθηματικές εξισώσεις που ποσοτικοποιούν τα μεγέθη που εμπλέκονται σε αυτό.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο συνδέεται με μία αντίσταση. Ακόμα, σύμφωνα με την υπόθεση της λεπτής δοκού που έγινε στην προηγούμενη παράγραφο, η μόνη παραμόρφωση που συνεισφέρει στη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου και ηλεκτρικής μετατόπισης, είναι η ορθή αξονική παραμόρφωση που οφείλεται στην κάμψη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην (2-35)α το διάνυσμα της ηλεκτρικής μετατόπισης να εκφυλλίζεται σε ένα μονόμετρο μέγεθος το οποίο δίνεται ως:

$$D_3 = \bar{e}_{31} \cdot S_1 + \bar{e}_{33}^S \cdot E_3 \quad (2-44)$$

όπου,  $D_3$  είναι η ηλεκτρική μετατόπιση που παράγεται με τις υποθέσεις που έγιναν παραπάνω. Η σταθερά  $\bar{e}_{31}$  είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά του στοιχείου και  $\bar{e}_{33}^S$  είναι η διηλεκτρική διαπερατότητα του στοιχείου όταν αυτή μετράται υπό σταθερή παραμόρφωση και με την υπόθεση της επίπεδης εντατικής κατάστασης (αμελείται η ορθή τάση στη διεύθυνση κάθετα στο επίπεδο της δοκού).

Εάν συνδεθεί το πιεζοηλεκτρικό με μία αντίσταση φορτίου  $R_l$ , τότε το ρεύμα που θα παραχθεί από αυτό θα προκαλέσει μια διαφορά δυναμικού  $v(t)$ , η οποία θα ακολουθεί το νόμο Ohm. Το ρεύμα που θα παραχθεί από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, υπολογίζεται από την ολοκληρωτική μορφή του νόμου του Gauss. Η σχέση που προκύπτει είναι η εξής:

$$\frac{d}{dt} \left( \int_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \, dA \right) = \frac{v(t)}{R_l} \quad (2-45)$$

όπου, το  $D$  είναι το διάνυσμα της ηλεκτρικής μετατόπισης και  $n$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια  $A$  των ηλεκτροδίων στην οποία γίνεται και η ολοκλήρωση. Λόγω όσων ειπώθηκαν προηγουμένως, η μόνη συνιστώσα του διανύσματος  $D$  που συνεισφέρει στο εσωτερικό γινόμενο είναι η  $D_3$ . Εκφράζοντας τη μέση παραμόρφωση που παράγεται λόγω της κάμψης στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε όρους καμπυλότητας και το ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο σε όρους διαφοράς δυναμικού, προκύπτει η (2-46) [3].

$$\frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}} \cdot \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} + \bar{e}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \int_{x_s}^{x_f} \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx = 0 \quad (2-46)$$

Στην εξίσωση που προηγήθηκε,  $b$  είναι το πλάτος,  $L$  το μήκος και  $h_{\bar{p}}$  το πάχος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Ακόμα,  $h_{\bar{p}c}$  είναι η απόσταση μεταξύ του ουδέτερου άξονα της ταλάντωσης και του κέντρου του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Η βύθιση  $w_{rel}$  της δοκού μπορεί να αντικατασταθεί με την έκφρασή της στο χώρο των ιδιομορφών, δηλαδή:

$$w_{rel}(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(x) \cdot \eta_j(t) \quad (2-47)$$

Οπότε η προηγούμενη εξίσωση γράφεται πλέον ως εξής:

$$\frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}} \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} + \sum_{j=1}^{\infty} \kappa_j \cdot \frac{d\eta_j(t)}{dt} = 0 \quad (2-48)$$

όπου,  $\kappa_j$  είναι ο όρος σύζευξης στο χώρο των ιδιομορφών με το ηλεκτρικό κύκλωμα και δίνεται από τον τύπο που ακολουθεί,

$$\kappa_j = \bar{e}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \int_{x_s}^{x_f} \frac{d^2 \varphi_j(x)}{dx^2} dx = \bar{e}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \left( \left. \frac{d\varphi_j(x)}{dx} \right|_{x_f} - \left. \frac{d\varphi_j(x)}{dx} \right|_{x_s} \right) \quad (2-49)$$

όπου,  $x_f$  και  $x_s$  οι θέσεις της δοκού όπου βρίσκονται τα άκρα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να παρατεθεί το μοντέλο του ηλεκτρικού υποσυστήματος του συζευγμένου συστήματος. Το μοντέλο προκύπτει από την εξίσωση (2-48). Σε αυτήν υπάρχουν τρεις όροι ρεύματος που αθροίζονται. Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί σε ρεύμα ανάλογο της πρώτης παραγώγου του της ηλεκτρικής τάσης  $v(t)$  και μπορεί να αντιστοιχεί με την καταστατική εξίσωση ενός πυκνωτή. Ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στο ρεύμα που παράγεται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και τροφοδοτεί το φορτίο που εδώ θεωρείται ότι είναι μία αντίσταση. Ο τρίτος όρος μπορεί να θεωρηθεί ότι περιγράφει μια πηγή ρεύματος η οποία είναι εξαρτημένη από το μηχανικό υποσύστημα. Επομένως, το ηλεκτρικό υποσύστημα μπορεί να απεικονιστεί ως ένα απλό κύκλωμα το οποίο περιέχει μία πηγή ρεύματος που συνδέεται παράλληλα με έναν πυκνωτή και μία

αντίσταση. Η εξίσωση που περιγράφει τη δυναμική απόκριση ενός τέτοιου κυκλώματος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$C_{\bar{p}} \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} - i_{\bar{p}}(t) = 0 \quad (2-50)$$

όπου,  $C_{\bar{p}}$  η χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου,  $i_{\bar{p}}(t)$  η εξαρτημένη από το μηχανικό υποσύστημα πηγή ρεύματος και  $R_l$  το ηλεκτρικό φορτίο. Οι μαθηματικές εξισώσεις με τις οποίες γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της χωρητικότητας  $C_{\bar{p}}$  και της έντασης της πηγής ρεύματος  $i_{\bar{p}}(t)$ , προκύπτουν μετά από σύγκριση των (2-48) και (2-50).

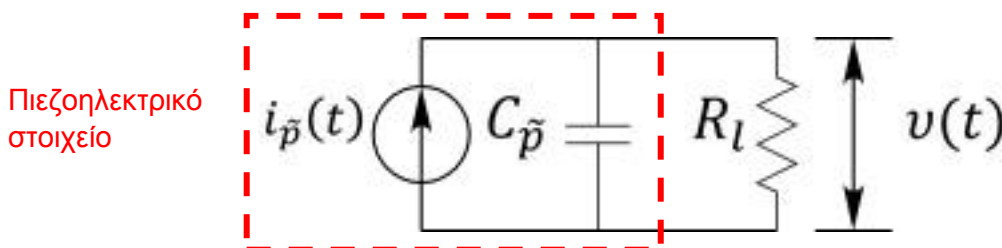
$$C_{\bar{p}} = \frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}} \quad (2-51)$$

$$i_{\bar{p}}(t) = - \sum_{j=1}^{\infty} \kappa_j \cdot \frac{d\eta_j(t)}{dt} \quad (2-52)$$

Σημειώνεται εκ νέου ότι για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα χρησιμοποιηθεί μόνο μία ιδιομορφή του συστήματος, οπότε το άθροισμα της (2-52) εκφυλλίζεται στον αντίστοιχο όρο, δηλαδή,

$$i_{\bar{p}}(t) = \kappa_1 \cdot \frac{d\eta_1(t)}{dt} \quad (2-53)$$

Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για να μοντελοποιηθεί η λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-6.



**Σχήμα 2-6.** Ισοδύναμο κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που τροφοδοτεί μία αντίσταση.

Είναι φανερό ότι στο Σχήμα 2-6 παρουσιάζεται μόνο το ηλεκτρικό υποσύστημα. Η σύζευξη του μηχανικού και του ηλεκτρικού υποσυστήματος είναι ένας εναλλάκτης. Για το λόγο αυτό το πλάτος και η φάση της πηγής ρεύματος δεν είναι σταθερά αλλά εξαρτώνται από το μηχανικό τμήμα του συστήματος.

### 3 Μοντελοποίηση συστήματος για απόκριση σε κρουστικό φορτίο

#### 3.1 Εισαγωγή

Το σύστημα που μελετάται, αποτελείται από δύο κυρίως υποσυστήματα. Το πρώτο είναι το υποσύστημα της μονόπακτης δοκού που φέρει το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα και το δεύτερο είναι το ηλεκτρικό κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας της PI. Στην παρούσα εργασία, η δοκός και το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, θα αναφέρονται ως μηχανικό υποσύστημα, ενώ το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας θα αναφέρεται ως ηλεκτρικό υποσύστημα. Επομένως, για την πλήρη μελέτη του μηχανισμού με τον οποίο απομαστεύεται ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας κρούσης, είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός μοντέλου που μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά το φαινόμενο.

Η μελέτη της απόκρισης του μηχανικού υποσυστήματος, επιλέχθηκε, αρχικά, να γίνει με τη βοήθεια του εμπορικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Ωστόσο, το Abaqus δεν έχει τη δυνατότητα να συμπεριλάβει το ηλεκτρικό υποσύστημα στις προσομοιώσεις, καθώς το μοντέλο του κυκλώματος αποτελείται από συγκεντρωμένα στοιχεία. Για το λόγο αυτό, η απόκριση του ηλεκτρικού υποσυστήματος, προσεγγίζεται με ξεχωριστό μοντέλο που δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Pspice.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας με την οποία κατασκευάζεται και ελέγχεται ως προς την εγκυρότητά του, το μοντέλο του μηχανικού υποσυστήματος στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Το μοντέλο του μηχανικού υποσυστήματος μπορεί να μοντελοποιηθεί έτσι ώστε είτε να έχει ως είσοδο τη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια της κρούσης, είτε την ταχύτητα που έχει ο επικρουστήρας ακριβώς πριν ξεκινήσει η επαφή του επικρουστήρα με την δοκό. Και στις δύο παραλλαγές, η έξοδος του συστήματος είναι το παραγόμενο δυναμικό στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα.

Επιπλέον, θα παρατεθεί το μοντέλο του ηλεκτρικού υποσυστήματος, και θα αναλυθεί η λειτουργία των επιμέρους τμημάτων του. Το ηλεκτρικό υποσύστημα περιλαμβάνει το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module) αλλά και το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα που επιτελεί τη λειτουργία ενός αναστροφέα ανάμεσα στα δύο υποσυστήματα. Το υποσύστημα αυτό έχει ως είσοδο την τάση του επιθέματος και ως έξοδο τους τετραγωνικούς παλμούς που εξέρχονται από την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας, όταν ο πυκνωτής της φορτιστεί επιτυχώς.

Τέλος, τα μοντέλα, που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, έχουν ως στόχο την ικανοποιητική περιγραφή του μηχανισμού με τον οποίο αποθηκεύεται ενέργεια εξαιτίας ενός κρουστικού φορτίου. Μια τέτοια ακριβής περιγραφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα υπολογιστικό εργαλείο για τον έλεγχο της καταλληλότητας ενός κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας για απομάστευση ενέργειας σε συνθήκες κρούσης. Επίσης, είναι δυνατή η εκμετάλλευση του εργαλείου αυτού για την επιλογή των παραμέτρων του κυκλώματος που θα επιτρέψουν την βέλτιστη απόδοσή του.



### 3.2 Συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογίας μοντελοποίησης

Στις ενότητες που ακολουθούν, θα παρουσιαστεί αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζονται τα δύο μοντέλα για την μελέτη των δύο υποσυστημάτων της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, θεωρείται σκόπιμη η παράθεση των βημάτων με τα οποία πραγματοποιείται η μοντελοποίηση.

Όσον αφορά το μηχανικό υποσύστημα, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε σε τρία στάδια, έτσι ώστε να ελέγχεται η σωστή λειτουργία του κάθε τμήματος του μοντέλου (validation). Στην περίπτωση του ηλεκτρικού υποσυστήματος, το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων κατασκευάστηκε στο Pspice, αφού πρώτα διαμορφώθηκε η είσοδος του με βάση τις πληροφορίες που προέκυψαν από τα προηγούμενα βήματα. Ο έλεγχος της εγκυρότητάς του γίνεται μόνο ως προς το τελικό αποτέλεσμα που είναι η ηλεκτρική τάση που αναπτύσσεται στον πυκνωτή του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας. Η αξιολόγηση (evaluation) της μεθοδολογίας γίνεται βάσει συγκρίσεων με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη κρούσης του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Η μέθοδος συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

**Βήμα 1ο:** Δημιουργία μοντέλου δοκού στο Abaqus για εύρεση ιδιοσυχνοτήτων

- Εύρεση ελαστικών ιδιοτήτων και πυκνότητας δοκού από στατικά πειράματα
- Έλεγχος πρόβλεψης πρώτης ιδιοσυχνότητας σε σύγκριση με πείραμα

**Βήμα 2ο:** Δημιουργία μοντέλου δοκού και πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στο Abaqus

- Χρήση στοιχείων κατασκευαστή για το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα
- Σύνδεση μοντέλων επιθέματος και δοκού με βάση την τοπολογία των πειραμάτων
- Επιλογή της μέτρησης της δύναμης από πειράματα κρούσης ως είσοδος του συστήματος
- Έλεγχος εκτίμησης της παραγόμενης τάσης στα άκρα του επιθέματος από το μοντέλο σε σχέση με τα αντίστοιχα πειράματα

**Βήμα 3ο:** Προσθήκη επικρουστήρα στο μοντέλο του προηγούμενου βήματος

- Μοντελοποίηση επικρουστήρα με συγκεντρωμένη μάζα
- Χρήση ελατηρίου για προσέγγιση της διεπαφής επικρουστήρα - δοκού κατά την κρούση
- Αντικατάσταση της δύναμης ως εισόδου του συστήματος με την μετρηθείσα αρχική ταχύτητα του επικρουστήρα

**Βήμα 4ο:** Μοντελοποίηση επιθέματος ως πηγή ηλεκτρικού κυκλώματος

- Επίλυση των εξισώσεων από την Παράγραφο 2.4.2 με βάση στοιχεία που προέκυψαν από τα προηγούμενα βήματα για τη μοντελοποίηση του επιθέματος ως πηγή ρεύματος παράλληλα συνδεδεμένη με πυκνωτή.

**Βήμα 5ο:** Δημιουργία μοντέλου ηλεκτρικού υποσυστήματος στο Pspice

- Προσθήκη μοντέλου επιθέματος από το 4<sup>ο</sup> Βήμα ως είσοδος στο ηλεκτρικό υποσύστημα
- Χρήση γνωστών παραμέτρων ηλεκτρικού κυκλώματος από κατασκευαστή
- Έλεγχος ακρίβειας μεθοδολογίας με βάση το πείραμα: Σύγκριση εκτίμησης - μέτρησης τάσης στα άκρα του πυκνωτή

### 3.3 Μοντελοποίηση μηχανικού υποσυστήματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μηχανικό υποσύστημα μοντελοποιήθηκε με τη βοήθεια του Abaqus της Dassault Systemes. Το Abaqus είναι ένα υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο μπορεί να προσεγγίσει αριθμητικά μια πληθώρα μηχανολογικών εφαρμογών και φυσικών πεδίων (multiphysics). Στο φυσικό πρόβλημα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, το Abaqus χρησιμοποιείται για να προβλέψει την δυναμική απόκριση του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος όταν αυτό υποβάλλεται σε κρούση.

Το πλήρες μηχανικό υποσύστημα περιλαμβάνει τη δοκό, το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα και τον επικρουστήρα. Πιο συγκεκριμένα, η δοκός είναι μονόπακτη που σημαίνει ότι το ένα της άκρο συγκρατείται σταθερά από μία πάκτωση ενώ το άλλο είναι ελεύθερο. Το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα είναι κολλημένο κοντά στο πακτωμένο άκρο της δοκού καθώς εκεί αναμένονται οι μέγιστες παραμορφώσεις κατά την διάρκεια της κρούσης, οι οποίες οδηγούν και στη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το επίθεμα. Ο επικρουστήρας προσκρούει στη δοκό κοντά στο ελεύθερο άκρο της.

Επομένως, ως είσοδος του συστήματος μπορεί να θεωρηθεί είτε η ταχύτητα του επικρουστήρα ακριβώς πριν την κρούση, είτε η δύναμη που καταπονεί τη δοκό κατά τη διάρκεια ενός πειράματος. Ως έξοδος θεωρείται η ηλεκτρική τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού.

Η επιτυχία του μοντέλου εξαρτάται από τρία κυρίως σημεία. Το πρώτο είναι η σωστή πρόβλεψη των παραμορφώσεων που υφίσταται η δοκός εξαιτίας της κρούσης. Το δεύτερο είναι η ορθή εκτίμηση του ηλεκτρικής τάσης που εμφανίζει στα άκρα του το επίθεμα λόγω των παραμορφώσεων της δοκού και άρα και του επιθέματος που είναι κολλημένο σε αυτή. Τέλος, το τρίτο είναι η ικανοποιητική πρόβλεψη της δύναμης που παρατηρείται κατά την κρούση, δεδομένης της ταχύτητας του επικρουστήρα. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο Abaqus αναπτύχθηκε σε τρία στάδια που θα περιγραφούν αναλυτικά παρακάτω .

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το Abaqus δεν διαθέτει την δυνατότητα επίλυσης μοντέλων συγκεντρωμένων παραμέτρων. Έτσι αποκλείεται η κατασκευή ενός συζευγμένου μοντέλου που θα περιλαμβάνει και τα δύο υποσυστήματα της εφαρμογής. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο που θα παρουσιαστεί, περιγράφει την απόκριση του μηχανικού υποσυστήματος όταν αυτό δεν είναι συνδεδεμένο με την αντίστοιχη πλακέτα. Παρόλα αυτά, χρήσιμες πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν από αυτό και για τη συζευγμένη λειτουργία των δύο υποσυστημάτων μέσω αναλυτικών σχέσεων που έχουν αναφερθεί στην Παράγραφο 2.4.2.

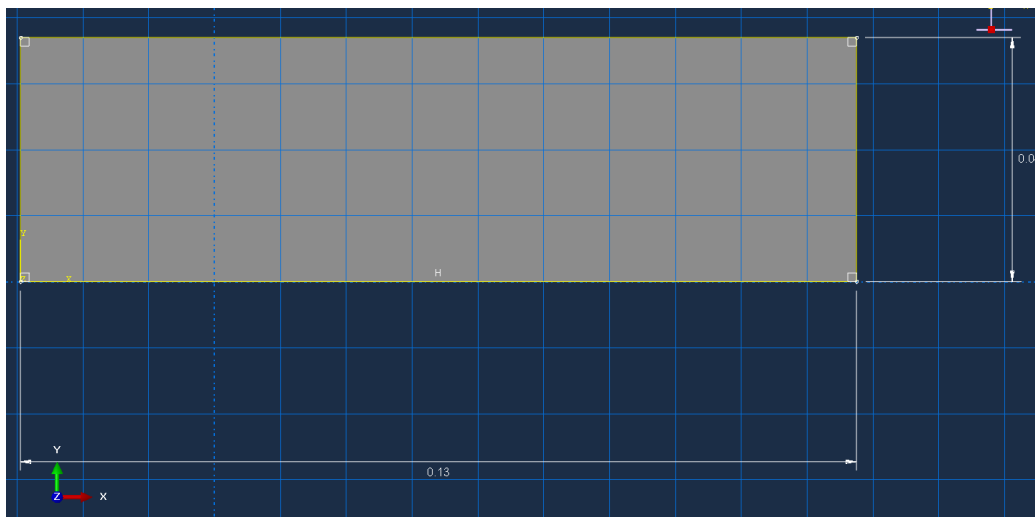
Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκε τμηματικά το μοντέλο του δοκιμίου και του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Ακόμα, εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους επιστρατεύονται τα ενδιάμεσα βήματα για την κατασκευή του τελικού μοντέλου και αναλύονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσα από την διαδικασία αυτή.

### 3.3.1 Υπολογιστική προσέγγιση ιδιοσυχνοτήτων δοκού

Η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου του μηχανικού υποσυστήματος, εκκινεί με τη δημιουργία ενός αρχικού μοντέλου που περιλαμβάνει μόνο τη δοκό. Το μοντέλο αυτό θα εξεταστεί ως προς τις ιδιοσυχνότητες του και κατά κύριο λόγο την πρώτη ιδιοσυχνότητα, η οποία κατέχει κυρίαρχο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

#### Καθορισμός διαστάσεων δοκού (Part)

Η κατασκευή του μοντέλου της δοκού στο Abaqus ξεκινά με τον καθορισμό της γεωμετρίας του τεμαχίου. Το σχέδιο της δοκού υλοποιείται στο βήμα Part του προγράμματος. Το μοντέλο του δοκιμίου προκύπτει ύστερα από extrusion του παραλληλογράμμου που φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Οι διαστάσεις της δοκού έχουν μετρηθεί πάνω στην πειραματική διάταξη και είναι 0.127 X 0.037 X 0.00215m. Να σημειωθεί ότι το μήκος της δοκού που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις είναι το ελεύθερο μήκος της.



Σχήμα 3-1. Διαστάσεις δοκού στο Abaqus.

#### Προσδιορισμός των ιδιοτήτων του υλικού της δοκού (Property)

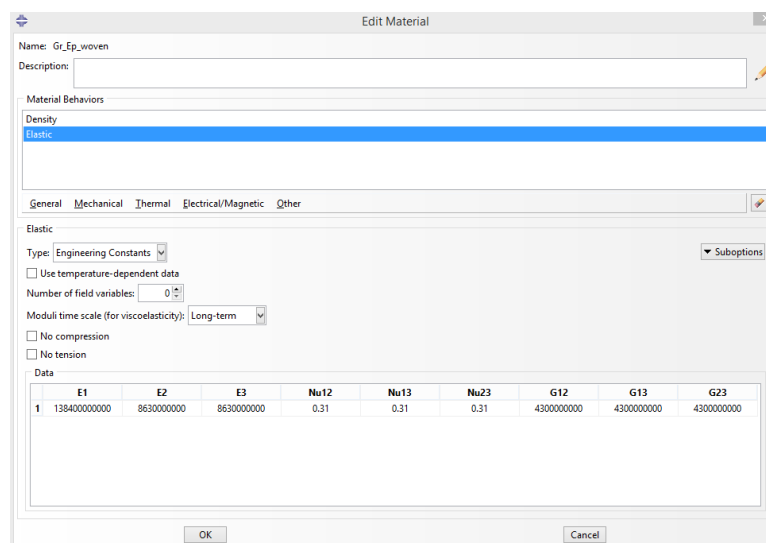
Το δεύτερο βήμα για τη διαμόρφωση του μοντέλου του δοκιμίου είναι η καταχώρηση των μηχανικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν το υλικό από το οποίο έχει κατασκευαστεί. Το υλικό της δοκού που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ονομάζεται graphite-epoxy (Gr/Ep). Ωστόσο, η δοκός δεν είναι ομογενής. Αντιθέτως, υπάρχουν στρώσεις κατά το πάχος του υλικού, στις οποίες οι ίνες του υλικού έχουν τοποθετηθεί με διαφορετικό προσανατολισμό. Συγκεκριμένα, οι ιδιότητες του graphite-epoxy έχουν προκύψει από αντίστοιχα στατικά πειράματα και η διαστρωμάτωση της δοκού δίνεται ως  $[-45/45/90_2/0/90]_s$  και είναι συμμετρική.

Η διαδικασία με την οποία καταχωρείται το υλικό στο μοντέλο έρχεται εις πέρας στο module του Abaqus που ονομάζεται Property. Αρχικά, ορίζονται οι ιδιότητες του υλικού στο

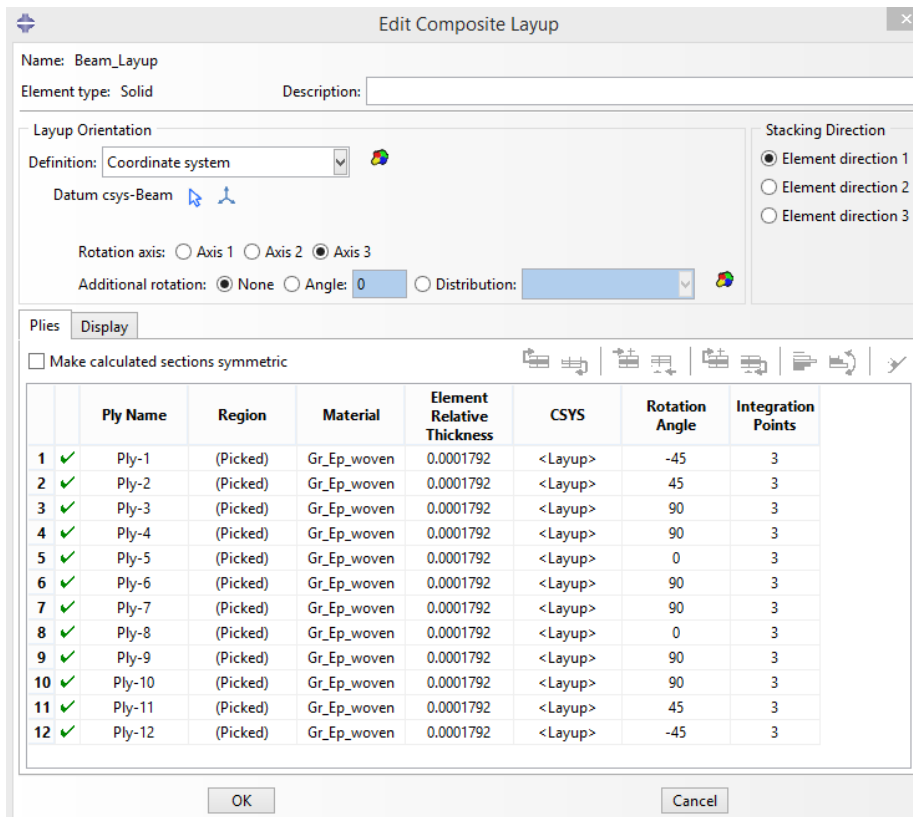
αντίστοιχο παράθυρο. Οι ιδιότητες που ενδιαφέρουν εδώ είναι η πυκνότητα και οι ελαστικές του σταθερές. Στην συνέχεια, δίνεται στη δοκό η διαστρωμάτωση του υλικού μέσω ενός Composite Layer. Το Composite Layer επιτρέπει τη δημιουργία στρώσεων (plies) εντός της δοκού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, σε όλες τις στρώσεις επιλέγεται το ίδιο υλικό αλλά αλλάζει ο προσανατολισμός του. Στο Σχήμα 3-2 φαίνεται το παράθυρο επιλογής των ιδιοτήτων ενός υλικού όπως αυτό εμφανίζεται στο Abaqus, στο Σχήμα 3-3 φαίνεται το παράθυρο διαμόρφωσης του Composite Layer, ενώ στον Πίνακα 3-1 δίνονται συνοπτικά οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν.

**Πίνακας 3-1. Μηχανικές ιδιότητες graphite-epoxy.**

| Material Properties                         | Gr/Ep |
|---|-------|
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )                 | 1530  |
| $E_{11}$ (GPa)                              | 138.4 |
| $E_{22}$ (GPa)                              | 8.63  |
| $E_{33}$ (GPa)                              | 8.63  |
| $G_{23}$ (GPa)                              | 4.3   |
| $G_{13}$ (GPa)                              | 4.3   |
| $G_{12}$ (GPa)                              | 4.3   |
| $\nu_{12}$                                  | 0.31  |
| $\nu_{13}$                                  | 0.31  |
| $\nu_{23}$                                  | 0.31  |
| $d_{31}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)            | -     |
| $d_{32}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)            | -     |
| $d_{33}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)            | -     |
| $\epsilon_{33}$ (10 <sup>-12</sup> Farad/m) | 27    |



**Σχήμα 3-2. Παράθυρο επιλογής υλικού.**



Σχήμα 3-3. Παράθυρο ρύθμισης Composite Layup.

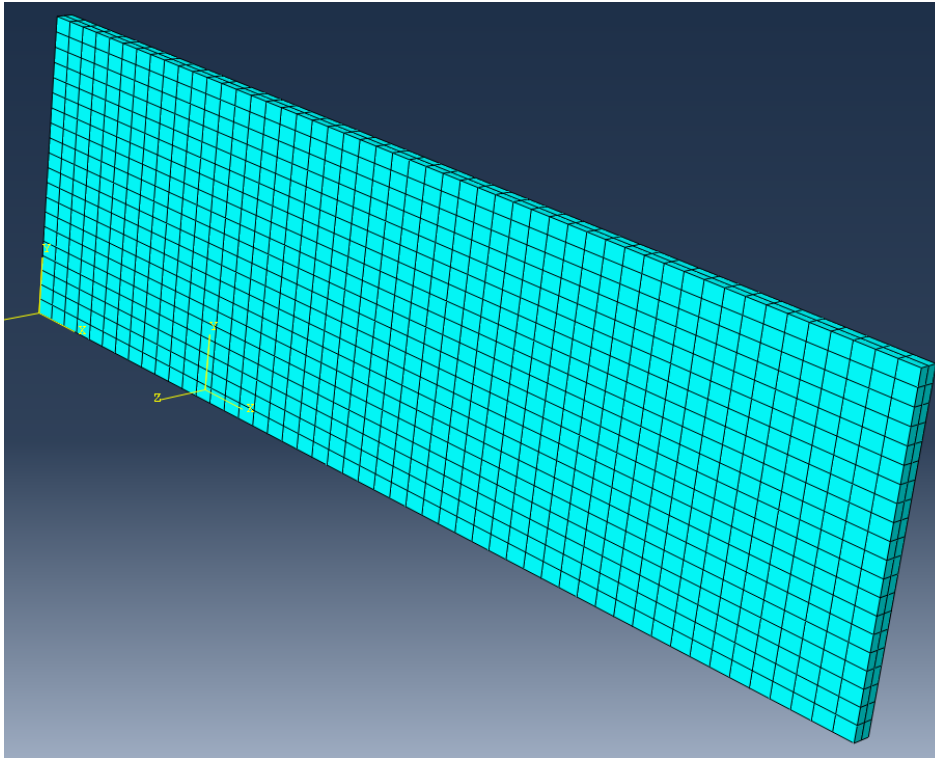
### Είδος προβλήματος και συνοριακές συνθήκες (Step)

Στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η επιλογή του κατάλληλου επιλύτη στο Abaqus. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, σκοπός αυτού του πρώτου μοντέλου είναι η πρόβλεψη των ιδιοσυχνοτήτων του δοκιμίου. Ο επιλύτης που επιλέγεται για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων ονομάζεται Frequency. Το Abaqus παρέχει την δυνατότητα προσαρμογής του επιλύτη προκειμένου να καλύψει καλύτερα τις ανάγκες κάθε συστήματος που μελετάται. Εδώ, επιλέγεται η χρήση της μεθόδου Lanczos με την οποία ζητείται να γίνει η εκτίμηση των πρώτων 30 ιδιοσυχνοτήτων. Στην πράξη, όπως θα φανεί εκ των υστέρων, κυρίαρχο ενδιαφέρον εμφανίζει η πρώτη ιδιοσυχνότητα, καθώς κατά κύριο λόγο αυτή διεγείρεται στα πειράματα. Η εκτίμηση των ιδιοσυχνοτήτων που προκύπτει από το Abaqus συγκρίνεται με τις πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Προκειμένου ο επιλύτης που επιλέχθηκε προηγουμένως να εκτιμήσει τις ιδιοσυχνότητες του συνεχούς μέσου, δηλαδή της δοκού, είναι αναγκαία η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών. Σε αυτό το μοντέλο, η μόνη συνοριακή συνθήκη σχετίζεται με την πάκτωση της δοκού. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το δοκίμιο είναι μονόπακτο και αυτό σημαίνει ότι στο ένα άκρο του θα πρέπει να εφαρμοστούν οι συνοριακές συνθήκες της πάκτωσης. Οι συνθήκες αυτές είναι μηδενικές μετατοπίσεις και περιστροφές (encastre) σε όλη την επιφάνεια της βάσης του δοκιμίου.

### Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (Mesh)

Το τελευταίο χαρακτηριστικό του μοντέλου που θα πρέπει να οριστεί είναι το πλέγμα και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Η επιλογή των στοιχείων γίνεται μέσω του module του Abaqus που ονομάζεται mesh. Για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού, επιλέχθηκε ομοιόμορφο πλέγμα. Στην συγκεκριμένη φάση της ανάλυσης, το πλέγμα δεν παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς οι ιδιοσυχνότητες δεν επηρεάζονται από τον αριθμό των στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Στο Σχήμα 3-4 φαίνεται το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3-4. Πλέγμα μοντέλου δοκού για εύρεση ιδιοσυχνοτήτων.

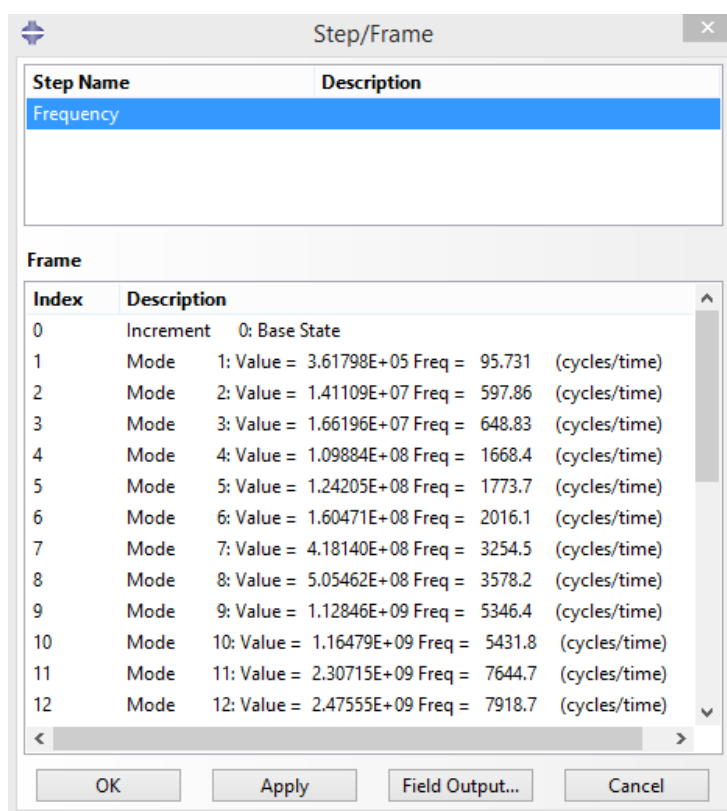
Αναφορικά με το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που μπορούν να επιλεγούν, το Abaqus περιλαμβάνει μια πληθώρα επιλογών. Δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικές εκδοχές του ίδιου μοντέλου, που διαφοροποιούνται στο είδος των πεπερασμένων στοιχείων που επιστρατεύονται κάθε φορά για την προσέγγιση των ιδιοσυχνοτήτων. Τα πρώτα στοιχεία που επιλέχθηκαν για το δοκίμιο είναι τα C3D8R, τα οποία τρισδιάστατα solid στοιχεία με 8 κόμβους και ανήκουν στην οικογένεια των 3D stress στοιχείων. Επιπλέον, τα στοιχεία αυτά έχουν ρυθμιστεί ώστε να περιορίζουν το φαινόμενο του hour glassing, το οποίο μπορεί να προκαλέσει μια τεχνητή αύξηση της ενδοτικότητας του μοντέλου με αποτέλεσμα οι ιδιοσυχνότητες να εμφανίζονται εσφαλμένα χαμηλότερες απ' ό,τι στην ορθή επίλυση. Τα δεύτερα στοιχεία ονομάζονται SC8R τα οποία είναι στοιχεία κελύφους (Shell) με 8 κόμβους, τα οποία ανήκουν στην οικογένεια Continuum Shell. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν επίσης προστασία ενάντια στο hour-glassing.

## Επίλυση και Αποτελέσματα (Job and Visualization)

Η ολοκλήρωση των προηγούμενων βημάτων οδηγεί στην κατασκευή του μοντέλου της μονόπακτης δοκού. Επομένως, η τελευταία εκκρεμότητα είναι η επίλυση των εξισώσεων από το Abaqus και στην συνέχεια, η λήψη των αποτελεσμάτων. Στο Abaqus, η επίλυση των εξισώσεων που διέπουν ένα μοντέλο πραγματοποιείται μέσω του βήματος Job και τα αποτελέσματα προβάλλονται στο αντίστοιχο βήμα που ονομάζεται Visualization.

Στο πρώτο εκ των δύο προαναφερθέντων βημάτων (Job), δίνεται η δυνατότητα επιλογής των παραμέτρων που αφορούν τη διαχείριση των πόρων του υπολογιστή που αφιερώνονται στην επίλυση του προβλήματος. Για παράδειγμα, μπορεί να επιλεγεί το μέγιστο ποσοστό της μνήμης του υπολογιστή που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί από το Abaqus και ο αριθμός των επεξεργασιών που θα επιστρατευτούν κατά την διάρκεια της επίλυσης.

Τέλος, στο βήμα Visualization, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που παράγονται από το Abaqus. Ο σκοπός του συγκεκριμένου μοντέλου όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι η εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού. Οι ιδιοσυχνότητες αυτές παρατίθενται σε μορφή πίνακα όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



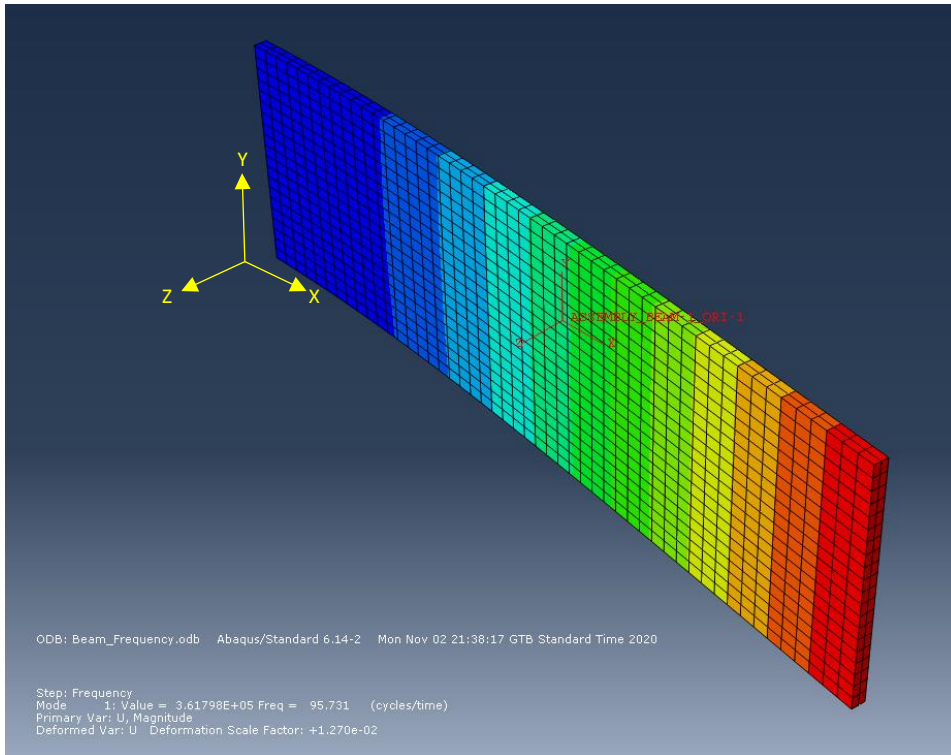
| Step Name | Description |
|-----------|-------------|
| Frequency |             |

| Index | Description  |
|-------|--|
| 0     | Increment 0: Base State                                  |
| 1     | Mode 1: Value = 3.61798E+05 Freq = 95.731 (cycles/time)  |
| 2     | Mode 2: Value = 1.41109E+07 Freq = 597.86 (cycles/time)  |
| 3     | Mode 3: Value = 1.66196E+07 Freq = 648.83 (cycles/time)  |
| 4     | Mode 4: Value = 1.09884E+08 Freq = 1668.4 (cycles/time)  |
| 5     | Mode 5: Value = 1.24205E+08 Freq = 1773.7 (cycles/time)  |
| 6     | Mode 6: Value = 1.60471E+08 Freq = 2016.1 (cycles/time)  |
| 7     | Mode 7: Value = 4.18140E+08 Freq = 3254.5 (cycles/time)  |
| 8     | Mode 8: Value = 5.05462E+08 Freq = 3578.2 (cycles/time)  |
| 9     | Mode 9: Value = 1.12846E+09 Freq = 5346.4 (cycles/time)  |
| 10    | Mode 10: Value = 1.16479E+09 Freq = 5431.8 (cycles/time) |
| 11    | Mode 11: Value = 2.30715E+09 Freq = 7644.7 (cycles/time) |
| 12    | Mode 12: Value = 2.47555E+09 Freq = 7918.7 (cycles/time) |

Σχήμα 3-5. Πίνακας εκτιμήσεων των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού από το Abaqus.

Επιπλέον του πίνακα με τις αριθμητικές τιμές των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού, το Abaqus δίνει τη δυνατότητα της γραφικής αναπαράστασης των ιδιομορφών που αντιστοιχούν σε κάθε ιδιοσυχνότητα. Στο επόμενο σχήμα, φαίνεται η πρώτη καμπτική ιδιομορφή της δοκού, όπως την προβλέπει το Abaqus για το μοντέλο με τα solid στοιχεία.



**Σχήμα 3-6. Γραφική απεικόνιση πρώτης ιδιομορφής δοκού (solid στοιχεία).**

Όπως θα φανεί και σε επόμενο κεφάλαιο, η πρώτη ιδιοσυχνότητα που προβλέπει το Abaqus δεν συμπίπτει με την πειραματική μέτρηση, αλλά βρίσκεται ικανοποιητικά κοντά, τόσο στο μοντέλο με τα τρισδιάστατα στοιχεία, όσο και στο μοντέλο με τα στοιχεία κελύφους. Το γεγονός αυτό, αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη ότι το μοντέλο της δοκού θα εμφανίσει μια δυναμική συμπεριφορά αντίστοιχη με εκείνη της πειραματικής διάταξης.

### **3.3.2 Υπολογιστική εκτίμηση της απόκρισης του μηχανικού υποσυστήματος σε διέγερση από συγκεντρωμένη κρουστική δύναμη.**

Μετά την ολοκλήρωση του αρχικού μοντέλου για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού, σειρά έχει η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα περιλαμβάνει την δοκό και το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Στο προηγούμενο μοντέλο, η δοκός απομονώθηκε από το υπόλοιπο υποσύστημα, προκειμένου να εξεταστεί η ικανότητα του Abaqus να προβλέψει τη δυναμική της συμπεριφορά. Από τη στιγμή που τα αποτελέσματα αυτού του πρώτου βήματος είναι ενθαρρυντικά, η διαδικασία συνεχίζεται με τη κατασκευή ενός μοντέλου που εξετάζει μεμονωμένα τη δυναμική συμπεριφορά του συσσωματώματος δοκού-επιθέματος. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα δεν περιλαμβάνει το τμήμα της κρούσης μεταξύ επικρουστήρα και δοκού, αλλά χρησιμοποιεί τη μέτρηση της κρουστικής δύναμης που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια του πειράματος ως είσοδό του.

Κατά αντιστοιχία με την προηγούμενη ενότητα, θα παρουσιαστούν και εδώ αναλυτικά τα βήματα με τα οποία συναρμολογείται το μοντέλο δοκού-επιθέματος με είσοδο συγκεντρωμένη δύναμη. Αξίζει να αναφερθεί ότι το σύστημα αυτό έχει δύο εξόδους, δηλαδή το παραγόμενο ηλεκτρικό δυναμικό από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα αλλά και τη βύθιση του σημείου εφαρμογής του κρουστικού φορτίου. Η προσέγγιση της χρονικής εξέλιξης αυτών

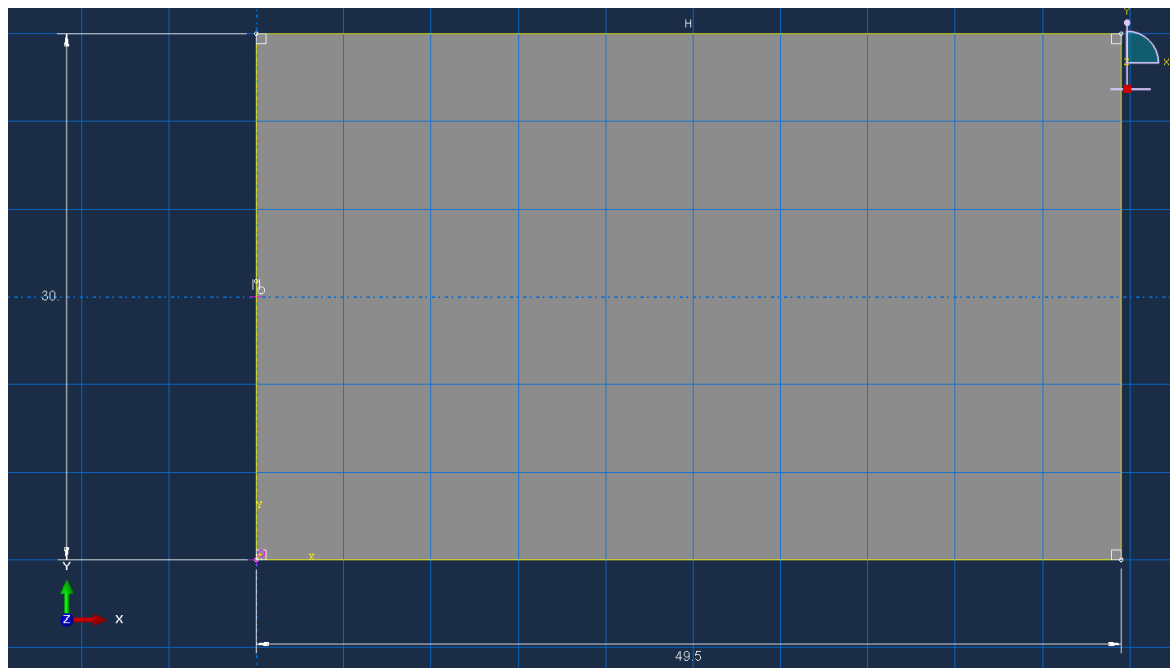


των δύο μεγεθών από το Abaqus συγκρίνεται με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις σε επόμενο κεφάλαιο.

### Καθορισμός διαστάσεων δοκού (Part)

Όπως συνέβη και στην περίπτωση του προηγούμενου μοντέλου, η διαδικασία για την κατασκευή του μοντέλου δοκού-επιθέματος στο Abaqus έχει ως αφετηρία την καταχώρηση της γεωμετρίας κάθε τεμαχίου στο βήμα Part του Abaqus. Η δοκός σχεδιάζεται με τον ίδιο τρόπο που παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη ενότητα.

Η διαφορά εδώ είναι ότι θα πρέπει να καταχωρηθούν και οι διαστάσεις του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Το μοντέλο του πιεζοηλεκτρικού προκύπτει ύστερα από extrusion του παραλληλογράμμου που φαίνεται στο Σχήμα 3-7. Οι διαστάσεις του επιθέματος δίνονται από τον κατασκευαστή και είναι  $0.05 \times 0.03 \times 0.0002$  m. Να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις αυτές αντιστοιχούν στο πιεζοκεραμικό πλακίδιο και όχι του συνολικού επιθέματος το οποίο περιλαμβάνει και ένα πλαστικό κάλυμμα.



Σχήμα 3-7. Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στο Abaqus.

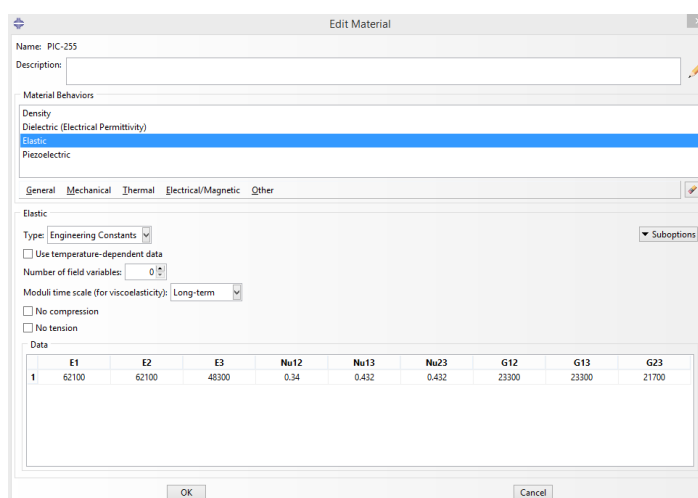
### Προσδιορισμός των ιδιοτήτων του υλικού της δοκού (Property)

Μετά τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των δύο τεμαχίων, ακολουθεί η ανάθεση των ιδιοτήτων των υλικών από τα οποία αποτελούνται. Η ανάθεση αυτή πραγματοποιείται στο βήμα Property. Είναι προφανές ότι το υλικό και η διαστρωμάτωση της δοκού παραμένουν ίδια και σε αυτό μοντέλο. Το πιεζοκεραμικό πλακίδιο είναι κατασκευασμένο από το υλικό PIC-255 και οι ιδιότητες του είναι γνωστές από τον κατασκευαστή (PI). Σε αυτήν την περίπτωση, εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, σημαντικό ρόλο παίζουν και οι πιεζοηλεκτρικές και διηλεκτρικές του ιδιότητες.

Όπως και στην περίπτωση της δοκού, αρχικά, προσδιορίζονται οι ιδιότητες του υλικού στο αντίστοιχο παράθυρο. Για την καταχώρηση του υλικού PIC-255, στο τμήμα του μοντέλου που αντιστοιχεί στο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, δημιουργείται ένα τμήμα (Section). Κατά τον ορισμό του τμήματος αυτού, δηλώνεται ότι το επίθεμα θα μοντελοποιηθεί με χρήση τριδιάστατων στοιχείων (Solid) και πως οι ιδιότητες του υλικού είναι ομογενείς. Στο Σχήμα 3-8 φαίνεται το παράθυρο επιλογής των ιδιοτήτων ενός υλικού, ενώ στον Πίνακας 3-2 δίνονται συνοπτικά οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν.

**Πίνακας 3-2. Ιδιότητες PIC-255.**

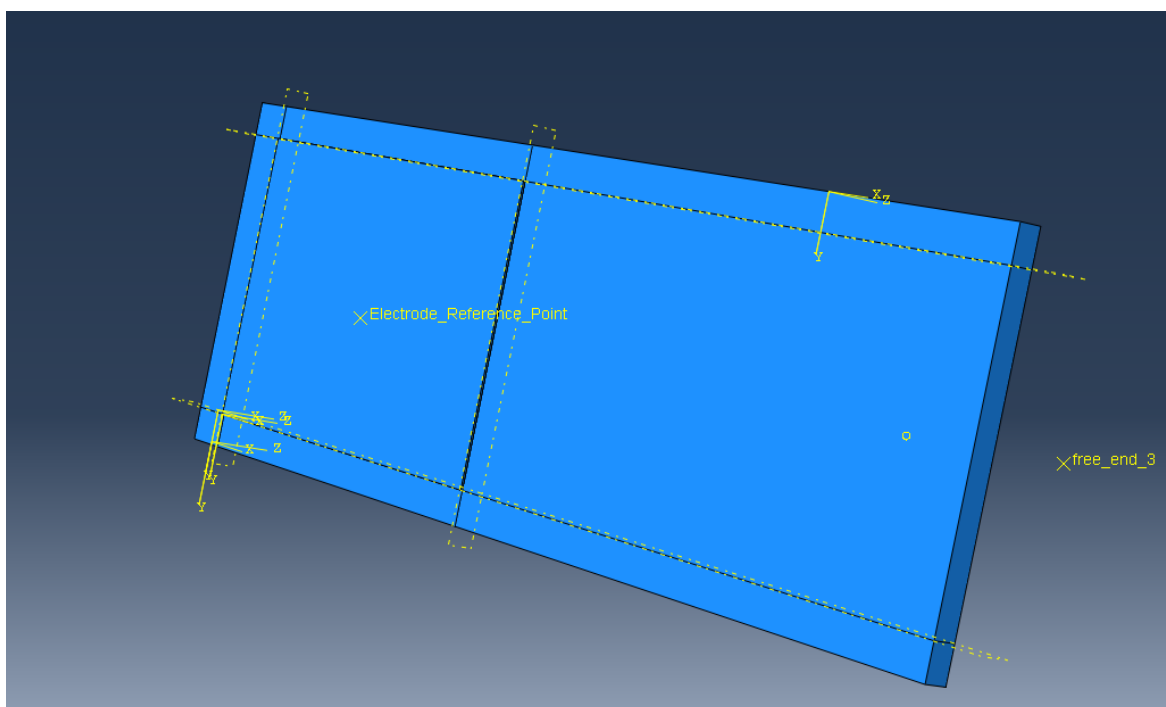
| Material Properties                         | PIC-255 |
|---|---------|
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )                 | 7800    |
| $E_{11}$ (GPa)                              | 62.1    |
| $E_{22}$ (GPa)                              | 62.1    |
| $E_{33}$ (GPa)                              | 48.3    |
| $G_{23}$ (GPa)                              | 21.7    |
| $G_{13}$ (GPa)                              | 23.3    |
| $G_{12}$ (GPa)                              | 23.3    |
| $\nu_{12}$                                  | 0.33    |
| $\nu_{13}$                                  | 0.43    |
| $\nu_{23}$                                  | 0.43    |
| $d_{31}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)            | -180    |
| $d_{32}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)            | -180    |
| $d_{33}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)            | 398     |
| $\epsilon_{33}$ (10 <sup>-12</sup> Farad/m) | 15495   |



**Σχήμα 3-8. Παράθυρο επιλογής ιδιοτήτων υλικού PIC-255.**

### Προσδιορισμός σχετικής θέσης σωμάτων (Assembly)

Σε αυτό σημείο της διαδικασίας, έχουν οριστεί η γεωμετρία των δύο σωμάτων του μοντέλου και τα υλικά τους. Επομένως, πλέον είναι δυνατή η συναρμογή των δύο τεμαχίων προκειμένου το μοντέλο να λάβει την τελική του γεωμετρία. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο να αποδοθεί η σχετική τοποθέτηση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος σε σχέση με τη δοκό. Αυτό υλοποιείται με χρήση του module Assembly. Η σχετική θέση δύο σωμάτων μπορεί να οριστεί με τη βοήθεια περιορισμών (constraints). Οι περιορισμοί αυτοί επηρεάζουν μόνο τη αρχική γεωμετρία του μοντέλου. Στο συγκεκριμένο μοντέλο απαραίτητος περιορισμός ήταν η εξασφάλιση της επαφής της μίας επιφάνειας του επιθέματος με την αντίστοιχη επιφάνεια του δοκιμίου (face to face), καθώς και η ευθυγράμμιση των ακμών (edge to edge) του επιθέματος με το τεχνητό πλαίσιο που έχει δημιουργηθεί πάνω στη δοκό. Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται το συναρμολογημένο μοντέλο των δύο σωμάτων.



Σχήμα 3-9. Συναρμολογημένο μοντέλο (Assembly).

### Είδος προβλήματος και συνοριακές συνθήκες (Step)

Μετά τον συνολικό προσδιορισμό της γεωμετρίας του μοντέλου, ακολουθεί η επιλογή των επιλυτών που θα χρησιμοποιηθούν. Ο στόχος αυτού του μοντέλου είναι η προσέγγιση της χρονικής απόκρισης του συστήματος υπό την επίδραση του κρουστικού φορτίου. Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας επιλύτης που μπορεί να λύσει το πρόβλημα της δυναμικής απόκρισης του συστήματος δοκού-επιθέματος. Το Abaqus παρέχει δύο πιθανούς επιλύτες που μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις του προβλήματος. Ο πρώτος ονομάζεται Dynamic Implicit και ο δεύτερος Modal Dynamics. Οι δύο επιλύτες διαφέρουν ως προς τον τρόπο προσέγγισης της λύσης του προβλήματος ως

εξής: Ο επιλύτης Dynamic Implicit λύνει συνολικά το πρόβλημα της δυναμικής κίνησης του μοντέλου. Ο επιλύτης Modal Dynamics χρησιμοποιεί την συνεισφορά κάθε ιδιομορφής για να δώσει την τελική απόκριση του συστήματος. Επομένως, για να χρησιμοποιηθεί ο δεύτερος επιλύτης θα πρέπει και πάλι να έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση ιδιομορφών μέσω του επιλύτη Frequency. Οι δύο επιλύτες επιστρατεύονται (implicit και modal dynamics) και συγκρίνονται μεταξύ τους έτσι ώστε να μπορεί να εξακριβωθεί αν επιδρούν σημαντικά στο τελικό αποτέλεσμα.

Όπως και στο μοντέλο για την εύρεση των ιδιομορφών της δοκού, έτσι και εδώ, είναι αναγκαία η εφαρμογή συνωριακών συνθηκών. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν δύο συνωριακές συνθήκες. Η πρώτη είναι η πάκτωση του ενός άκρου της δοκού. Και η δεύτερη είναι ο ορισμός της μίας από της δύο επιφάνειες του πιεζοηλεκτρικού ως γείωσης. Για τη γείωση, επιλέχθηκε η επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος που έρχεται σε επαφή με την δοκό. Όσον αφορά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης, αυτή είναι ίση με 0.05s, ενώ το βήμα ολοκλήρωσης είναι ίσο με  $2.5 \cdot 10^{-4}$ s.

### **Αλληλεπίδραση μεταξύ των σωμάτων (Interaction)**

Όταν σε ένα μοντέλο υπάρχουν περισσότερα του ενός σώματα, τότε είναι απαραίτητος ο χαρακτηρισμός της αλληλεπίδρασης που υπάρχει μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στο βήμα Interaction (Αλληλεπίδραση). Ο τρόπος με τον οποίο αλληλοεπιδρούν τα διαφορετικά μέρη ενός μοντέλου καθορίζεται μέσα από τη χρήση περιορισμών (constraints). Οι περιορισμοί αυτοί διαφέρουν από τους αντίστοιχους που αναφέρθηκαν στο βήμα της συναρμολόγησης, καθώς εδώ οι περιορισμοί έχουν ως στόχο την σύνδεση βαθμών ελευθερίας μεταξύ τεμαχίων ή και κόμβων που μπορεί να βρίσκονται στο ίδιο σώμα.

Στο μοντέλο δοκού-επιθέματος χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί περιορισμοί. Ο πρώτος περιορισμός φέρει το όνομα tie. Σκοπός αυτού του περιορισμού είναι να συνδέσει τις επιφάνειες της δοκού και του πιεζοηλεκτρικού που έρχονται σε επαφή. Πιο συγκεκριμένα, ο περιορισμός tie επιβάλλει όλοι οι κόμβοι του επιθέματος που βρίσκονται στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων, να έχουν ίδιες μετατοπίσεις (γραμμικές και περιστροφικές) με τους αντίστοιχους κόμβους της δοκού. Ο περιορισμός αυτός οφείλεται στο γεγονός ότι τα δύο τεμάχια είναι κολλημένα μεταξύ τους.

Ο δεύτερος περιορισμός σχετίζεται με το ηλεκτρικό δυναμικό στην ελεύθερη επιφάνεια του επιθέματος. Στην προηγούμενη παράγραφο, αναφέρθηκε πως η επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού που βρίσκεται στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων ορίστηκε ως γείωση. Κατά την κάμψη της δοκού, κάθε κόμβος στην ελεύθερη επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού εμφανίζει διαφορετική παραμόρφωση και άρα και διαφορετικό δυναμικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην ελεύθερη επιφάνεια του επιθέματος να εμφανίζεται μια κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν μπορεί να παρατηρηθεί στην πραγματικότητα καθώς η μέτρηση του παραγόμενου ηλεκτρικού δυναμικού γίνεται μέσω ηλεκτροδίου που καλύπτει όλη την επιφάνεια του επιθέματος και άρα λαμβάνεται μόνο μία τιμή δυναμικού. Προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η επίδραση του ηλεκτροδίου,

χρησιμοποιείται ο περιορισμός equation. Ο περιορισμός αυτός εφαρμόζεται έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι της ελεύθερης επιφάνειας του πιεζοηλεκτρικού να έχουν την ίδια τιμή ηλεκτρικού δυναμικού, το οποίο, επίσης, θεωρείται βαθμός ελευθερίας.

### Φορτίο (Load)

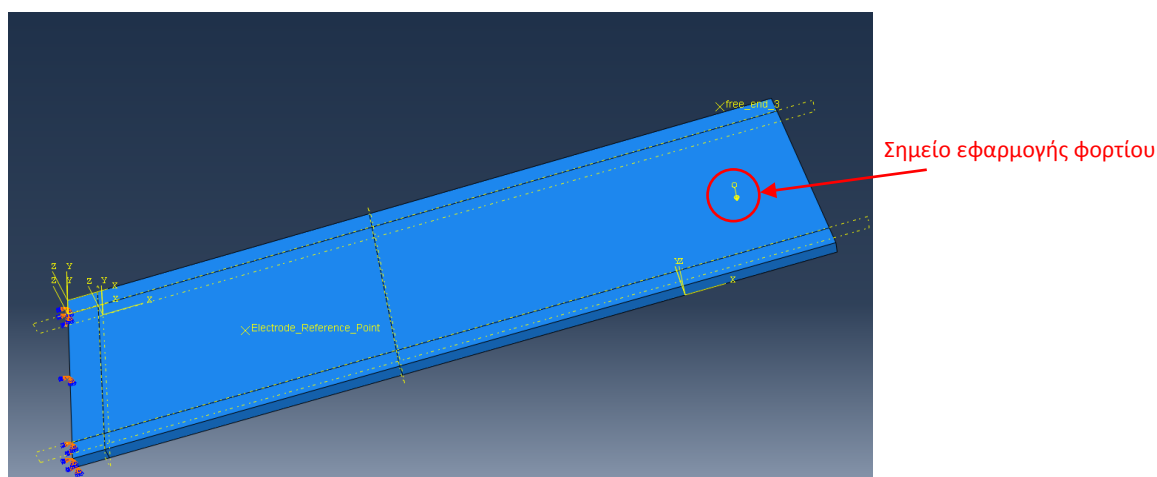
Το επόμενο βήμα για την ολοκλήρωση του μοντέλου είναι η προσθήκη της εισόδου του συστήματος. Για το μοντέλο που εξετάζεται στην παρούσα ενότητα, ως είσοδος χρησιμοποιείται το κρουστικό φορτίο που ασκείται στη δοκό, όπως αυτό μετρήθηκε κατά την διάρκεια της κρούσης. Η είσοδος του συστήματος ορίζεται στο βήμα Load του Abaqus.

Σε αυτό το βήμα, περιγράφεται πλήρως το φορτίο που ασκείται πάνω στη δοκό κατά τη διάρκεια της κρούσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά της δύναμης που πρέπει να καθοριστούν είναι το είδος του φορτίου, το σημείο εφαρμογής του αλλά και η χρονική εξέλιξή του.

Όσον αφορά το είδος του φορτίου, η δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο, θεωρείται πως είναι σημειακή. Στην πραγματικότητα, κάτι τέτοιο δεν ισχύει καθώς η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ επικρουστήρα και δοκού, εφαρμόζεται σε μία επιφάνεια ("ίχνος" επικρουστήρα στην επιφάνεια της δοκού). Ωστόσο, η μοντελοποίηση της δύναμης ως σημειακής διευκολύνει τη διαδικασία.

Από τη στιγμή που η δύναμη καταχωρείται ως συγκεντρωμένη, είναι απαραίτητη και η ταυτοποίηση του σημείου εφαρμογής της και ο προσανατολισμός της. Από μετρήσεις πάνω στην πειραματική διάταξη, φάνηκε ότι η κρούση λαμβάνει χώρα σε απόσταση 11.5cm από την πάκτωση στη διεύθυνση του μήκους της δοκού και κοντά στο μέσον της δοκού κατά το πλάτος. Το κρουστικό φορτίο στο μοντέλο θεωρείται ότι διατηρεί σταθερή διεύθυνση κατά τη διάρκεια της κρούσης, η οποία είναι κάθετη στην επιφάνεια της δοκού (άξονας z) όταν ξεκινάει η κρούση.

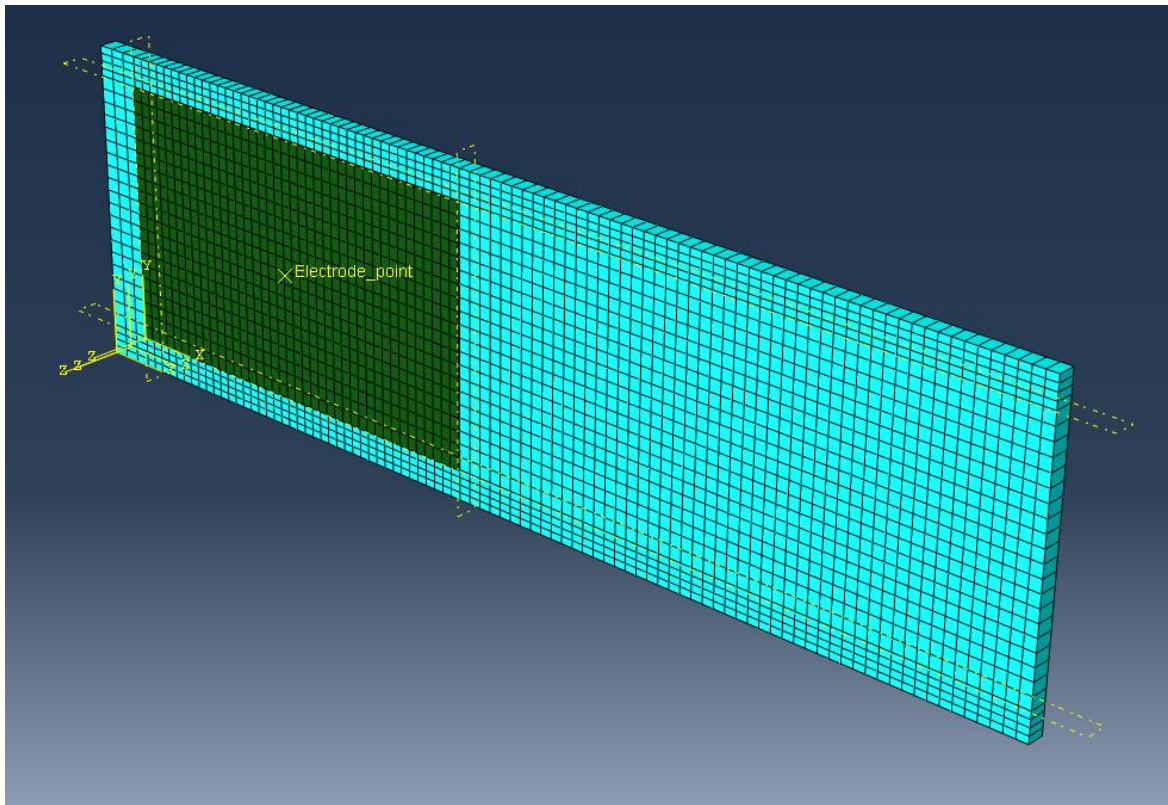
Όσον αφορά στην χρονική εξέλιξη της δύναμης, το Abaqus δίνει τη δυνατότητα να εισαχθεί αυτή με μορφή χρονοσειράς. Επομένως, χρησιμοποιείται απευθείας η μέτρηση της δύναμης όπως ελήφθη κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στο Σχήμα 3-10 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται η δύναμη σε αυτό το μοντέλο.



Σχήμα 3-10. Εφαρμογή φορτίου στο μοντέλο δοκού-επιθέματος του Abaqus.

### Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (Mesh)

Και σε αυτήν την περίπτωση, το μοντέλο ολοκληρώνεται με την εφαρμογή του πλέγματος. Η διακριτοποίηση γίνεται στο βήμα mesh όπως συνέβη και με το προηγούμενο μοντέλο. Επομένως, σε αυτό το σημείο, είναι απαραίτητο να επιλεγθεί η πυκνότητα του πλέγματος και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα επιστρατευτούν. Το πλέγμα είναι και εδώ σχεδόν ομοιόμορφο, αλλά έχει αισθητά μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με το πλέγμα του μοντέλου για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει επειδή η μελέτη του μεταβατικού φαινομένου της κρούσης απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, το πάχος του πιεζοηλεκτρικού είναι πολύ μικρό (0.2 mm) και το σχετικό πλέγμα πρέπει να είναι πυκνό ώστε ο λόγος μήκους προς πάχος στοιχείου να εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξουν αριθμητικά προβλήματα τεχνητής δυσκαμψίας (spurious stiffening due to shear locking effects) κατά την ολοκλήρωση. Το μειονέκτημα, εδώ, είναι ο αυξημένος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος. Στο Σχήμα 3-11 φαίνεται το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3-11. Πλέγμα μοντέλου δοκού-επιθέματος.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση της δοκού είναι τα ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Επομένως, σε δύο διαφορετικές παραλλαγές του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα τρισδιάστατα στοιχεία C3D8R της οικογένειας 3D-stress και τα στοιχεία κελύφους SC8R της οικογένειας Continuum Shell. Αξίζει να αναφερθεί ότι, γενικά, τα τρισδιάστατα στοιχεία συνήθως δεν

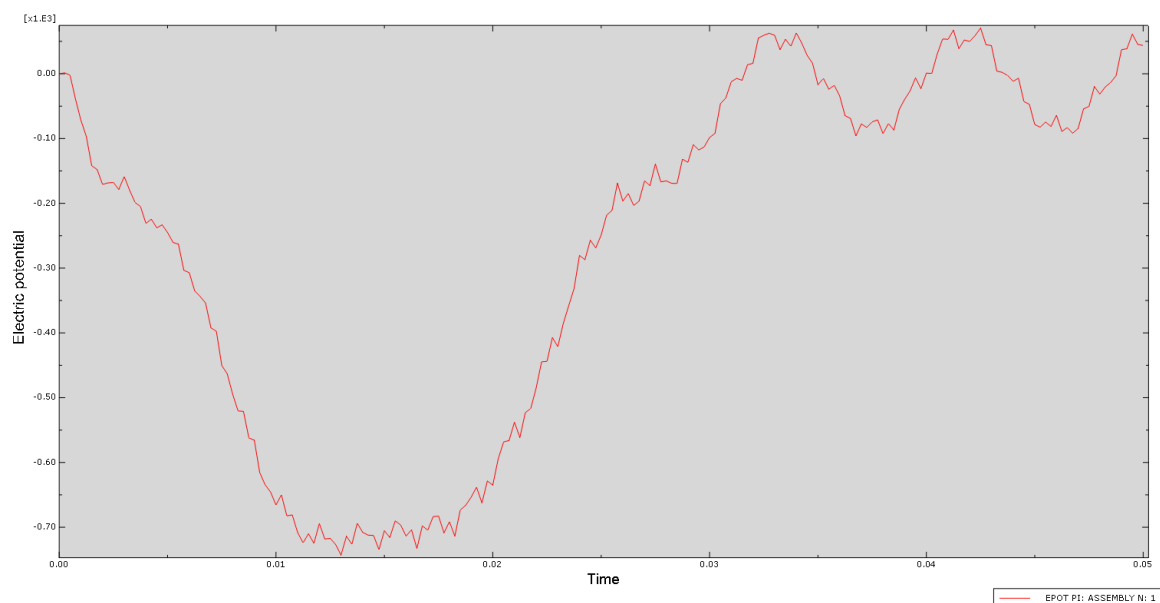
επιλέγονται σε μοντέλα όπου η μία διάσταση είναι πολύ μικρότερη από τις υπόλοιπες. Αυτό ισχύει επειδή τα στοιχεία αυτά οδηγούν συχνά σε μοντέλα με τεχνητά αυξημένη δυσκαμψία. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται δύο είδη στοιχείων, επιτρέποντας έτσι την άμεση σύγκρισή τους.

Όσον αφορά το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται ονομάζονται C3D8E και ανήκουν στην οικογένεια Piezoelectric. Τα στοιχεία αυτά είναι επίσης τρισδιάστατα και φέρουν 8 κόμβους. Ιδανικά, θα έπρεπε να επιλεγούν πιεζοηλεκτρικά στοιχεία κελύφους αλλά το Abaqus δεν περιλαμβάνει τέτοια στοιχεία.

### Επίλυση και Αποτελέσματα (Job and Visualization)

Μετά και την τοποθέτηση του πλέγματος, το μοντέλο δοκού-επιθέματος είναι πλέον ολοκληρωμένο. Τα τελευταία δύο βήματα είναι το Job και το Visualization. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διαχείριση των υπολογιστικών πόρων δεν αλλάζει μεταξύ των δύο μοντέλων που έχουν παρουσιαστεί, επομένως στο βήμα Job δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση.

Στο βήμα Visualization γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Υπενθυμίζεται ότι η είσοδος του συστήματος είναι το φορτίο που ασκείται πάνω στη δοκό λόγω της κρούσης, ενώ οι δύο βασικότερες έξοδοι είναι η παραγόμενη ηλεκτρική τάση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του επιθέματος και η βύθιση του σημείου της εφαρμογής της δύναμης. Ο λόγος που επιλέγονται τα δύο αυτά μεγέθη ως έξοδοι του μοντέλου, είναι το γεγονός πως αυτά τα μεγέθη μετρούνται και στην πειραματική διάταξη και άρα μπορεί να υπάρξει άμεση σύγκριση μεταξύ πρόβλεψης και μετρήσεων. Εδώ τα μεγέθη που εμφανίζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζονται σε γραφήματα όπως αυτό στο Σχήμα 3-12 και στη συνέχεια εξάγονται από το Abaqus για περαιτέρω επεξεργασία και αποθήκευση.



Σχήμα 3-12. Γράφημα παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης στο Abaqus.

### 3.3.3 Υπολογιστική εκτίμηση της απόκρισης του μηχανικού υποσυστήματος σε διέγερση από επικρουστήρα με γνωστή αρχική ταχύτητα.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, το πλήρες σύστημα που μελετάται, αποτελείται από μία μονόπακτη δοκό, ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα και έναν βραχίονα που φέρει επικρουστήρα στο άκρο του. Επομένως, κατά τη διάρκεια της κρούσης, η κινητική ενέργεια που έχει ο βραχίονας μετατρέπεται σε ενέργεια παραμόρφωσης στη δοκό και το επίθεμα και τέλος μέρος της παραμόρφωσης αυτής μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του επιθέματος.

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, η κατασκευή του πρώτου μοντέλου είχε ως σκοπό να ελέγξει αν ένα μοντέλο στο Abaqus μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά την συμπεριφορά της δοκού. Το δεύτερο μοντέλο έδειξε ότι είναι δυνατή η εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος δοκού-επιθέματος, δηλαδή, μπορεί να προβλέψει ικανοποιητικά τόσο τη βύθιση της δοκού όσο και το ηλεκτρικό δυναμικό που παράγεται λόγω μιας εξωτερικής δύναμης. Αυτό σημαίνει ότι το τελευταίο μοντέλο θα πρέπει να έχει ως στόχο να μοντελοποιεί σωστά το φαινόμενο της κρούσης. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει, με δεδομένη την μάζα και την ταχύτητα του επικρουστήρα λίγο πριν την κρούση, να προσεγγίζει την δύναμη που αναπτύσσεται ανάμεσα στη δοκό και τον βραχίονα κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Με βάση τη θεωρία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, η επαφή της δοκού και του επικρουστήρα μπορεί να προσεγγιστεί με τη χρήση ενός ελατηρίου. Άρα, το κριτήριο για την επιτυχία του μοντέλου που θα παρουσιαστεί στην συνέχεια, είναι η σύγκριση μεταξύ της δύναμης που μετρήθηκε στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και της δύναμης που θα ασκηθεί στο ελατήριο κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Από την παραπάνω περιγραφή, είναι εμφανές ότι το μοντέλο που περιεγράφη στην προηγούμενη παράγραφο είναι ως επί το πλείστον όμοιο του μοντέλου που θα παρουσιαστεί παρακάτω. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ τους είναι πως η δύναμη πλέον δεν νοείται δεδομένη και άρα δεν χρησιμοποιείται ως είσοδος του συστήματος, αλλά αντιθέτως αποτελεί έξοδο και επομένως, ένα ακόμα κριτήριο για τον έλεγχο της ακρίβειας του συνολικού μοντέλου.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο το μοντέλο που δέχεται ως είσοδο την δύναμη, όσο και το μοντέλο που χρησιμοποιεί την αρχική ταχύτητα του επικρουστήρα, μπορούν να αποτελέσουν εργαλεία για την μελέτη του φαινομένου. Ωστόσο, η επιλογή ανάμεσα τους εξαρτάται από τους αισθητήρες που είναι διαθέσιμοι σε ένα εργαστήριο. Δηλαδή, αν σε μία διάταξη είναι πιο εύκολη η μέτρηση της δύναμης που αναπτύσσεται κατά την κρούση, τότε το δεύτερο μοντέλο είναι ήδη επαρκές για τη μελέτη της συμπεριφοράς της δοκού και του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Αν, όμως, η μέτρηση της ταχύτητας του επικρουστήρα αποδεικνύεται πιο απλή διαδικασία, τότε το μοντέλο που θα παρατεθεί εδώ, θα καλύψει καλύτερα της ανάγκες της μελέτης.

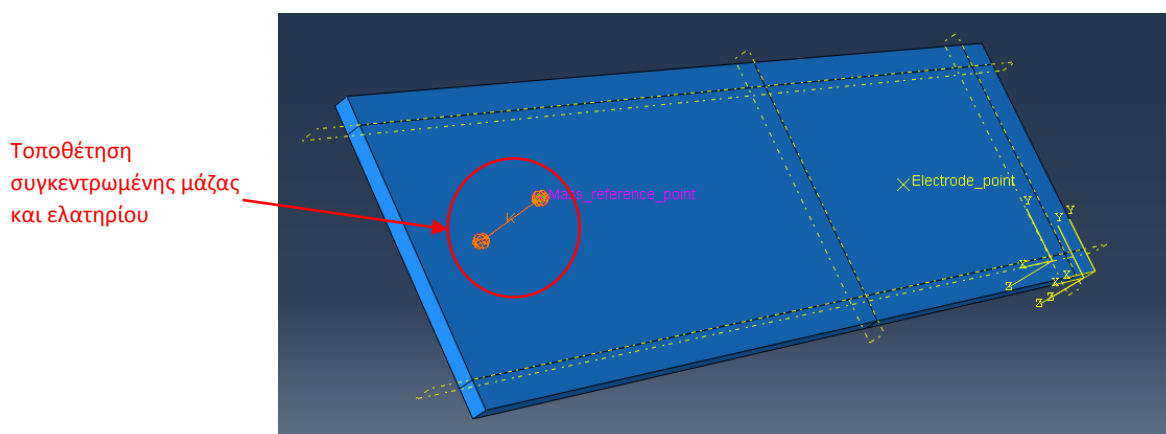


Τέλος, λόγω της μεγάλης ομοιότητας των δύο αυτών μοντέλων στη συνέχεια θα περιγραφούν μόνο τα σημεία στα οποία εμφανίζονται οι διαφοροποιήσεις που είναι απαραίτητες για την κατασκευή του μοντέλου που έχει ως είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα. Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα Part, Property, Step, Interaction, Mesh, Job και Visualization εκτελούνται με πανομοιότυπο τρόπο και άρα για λόγους οικονομίας παραλείπεται η περιγραφή τους.

### Προσδιορισμός σχετικής θέσης σωμάτων (Assembly)

Μέχρι το σημείο αυτό, έχει ήδη οριστεί η γεωμετρία της δοκού και του πιεζοηλεκτρικού. Επίσης, έχει ολοκληρωθεί η ανάθεση των υλικών στα δύο αυτά τεμάχια. Άρα το βήμα που ακολουθεί είναι η συναρμολόγηση του μοντέλου. Όσον αφορά την τοποθέτηση της δοκού και του επιθέματος, η διαδικασία είναι και πάλι η ίδια με αυτή που περιεγράφη στην προηγούμενη παράγραφο. Ωστόσο, είναι απαραίτητη και η τοποθέτηση του βραχίονα και του επικρουστήρα. Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, ο βραχίονας και το επικρουστήρας αντικαταστάθηκαν από μία συγκεντρωμένη μάζα 280 γραμμαρίων. Η αντικατάσταση αυτή γίνεται επειδή η επαφή της δοκού και του επικρουστήρα μοντελοποιείται με ένα ελατήριο. Η ανάπτυξη μοντέλου που θα περιείχε και τα τεμάχια του επικρουστήρα και του βραχίονα θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη στην περίπτωση όπου παρουσιάζουν ενδιαφέρον οι συνέπειες της κρούσης πάνω σε αυτά. Εδώ, ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν κρίνεται σκόπιμο. Αυτό που έχει σημασία είναι να μπορέσει να αποδοθεί η ορθή η ορμή του βραχίονα λίγο πριν την κρούση και άρα απαραίτητη είναι η γνώση μόνο της μάζας του βραχίονα και της ταχύτητας που έχει λίγο πριν την κρούση.

Η συγκεντρωμένη μάζα που επιλέχθηκε τοποθετείται στο ένα άκρο του ελατηρίου. Το άλλο άκρο συνδέεται με τον κόμβο του πλέγματος της δοκού που βρίσκεται στην αντίστοιχη θέση με αυτήν της κρούσης. Στο Σχήμα 3-13 φαίνεται το συναρμολογημένο μοντέλο μαζί με τη συγκεντρωμένη μάζα και το ελατήριο.



Σχήμα 3-13. Συναρμολογημένο μοντέλο με μάζα και ελατήριο (Assembly).

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, ο κόμβος απέχει 11.5cm από το πακτωμένο άκρο της δοκού στη διεύθυνση του μήκους της (άξονας x) και στο μέσον της δοκού κατά το πλάτος της (άξονας y). Η σκληρότητα του ελατηρίου αυτού επιλέγεται  $3 \cdot 10^4 \text{N/m}$  που

αποτελεί λογική τιμή με βάση τα υλικά κατασκευής του επικρουστήρα και της δοκού. Υπενθυμίζεται πως η δοκός είναι κατασκευασμένη από το υλικό Graphite-Epoxy ενώ ο επικρουστήρας είναι από πολυουρεθάνη.

### **Φορτίο (Load)**

Η τελευταία διαφοροποίηση αυτού του μοντέλου σχετίζεται με τον τρόπο που εισάγεται ως είσοδος το φορτίο της κρούσης. Στο προηγούμενο μοντέλο, το φορτίο είχε την μορφή συγκεντρωμένης δύναμης που ασκείτο στον κατάλληλο κόμβο. Στο παρόν μοντέλο το μόνο που χρειάζεται για να δημιουργηθεί το φορτίο είναι η αρχική ταχύτητα της συγκεντρωμένης μάζας. Η ταχύτητα αυτή μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και είχε μέτρο 0.78m/s ενώ είχε διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια της δοκού (άξονας z). Ακόμα, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για την κίνηση της μάζας έχει τεθεί ένας επιπλέον περιορισμός. Ο περιορισμός αυτός επιβάλλει η κίνηση της συγκεντρωμένης μάζας να παραμένει καθόλη τη διάρκεια στον άξονα των z, όπως συμβαίνει κατά προσέγγιση και στην πραγματικότητα. Ο ορισμός της αρχικής ταχύτητας της συγκεντρωμένης μάζας γίνεται με χρήση της επιλογής Predefined Fields.

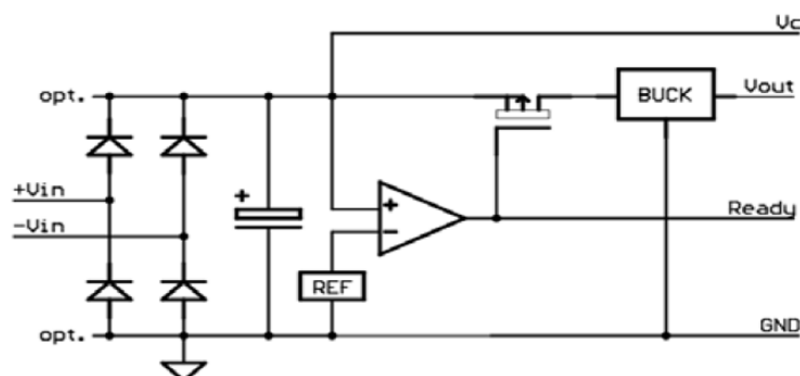
### **3.4 Μοντελοποίηση ηλεκτρικού υποσυστήματος**

Το μοντέλο που προηγήθηκε αποδίδει ικανοποιητικά την απόκριση του μηχανικού υποσυστήματος όταν αυτό δεν είναι σε σύνδεση με το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας (βλέπε Κεφάλαιο 6). Επομένως, είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός μοντέλου που θα προβλέπει ικανοποιητικά και τη λειτουργία της πλακέτας απομάστευσης ενέργειας όταν αυτή τροφοδοτείται από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα.

Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο στο υπολογιστικό πρόγραμμα Pspice-Capture της Orcad. Το πρόγραμμα αυτό δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της απόκρισης ενός κυκλώματος, όταν τα στοιχεία που το απαρτίζουν είναι γνωστά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο στο οποίο προσομοιώνεται ο τρόπος που αποκρίνεται το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας όταν αυτό φορτίζεται από το επίθεμα. Επειδή το Pspice δεν έχει τη δυνατότητα να αποδώσει το μηχανικό υποσύστημα της διάταξης, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο αντιμετωπίζεται ως μια πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας με μια συγκεκριμένη τάση εισόδου (Vin).

Η PI δίνει ένα αρχικό δομικό διάγραμμα του κυκλώματος το οποίο όμως χρήζει περαιτέρω διερεύνησης (βλ. Σχήμα 3-14). Στο συγκεκριμένο κύκλωμα, μία τάση εισόδου εφαρμόζεται στην πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας και αφού ανορθωθεί, το εισερχόμενο ηλεκτρικό φορτίο αποθηκεύεται στον πυκνωτή. Με τη συσσώρευση ολοένα και περισσότερου φορτίου στον πυκνωτή η τάση στα άκρα του ανεβαίνει. Όταν φτάσει η τάση αυτή σε μια ανώτατη τιμή, ο τελεστικός ενισχυτής του κυκλώματος ενεργοποιεί το transistor, το οποίο λειτουργεί ως διακόπτης που κλείνει, και τότε δημιουργείται ένας παλμός σταθερής τάσης, ο οποίος και αποτελεί την αξιοποιήσιμη τάση στην έξοδο του κυκλώματος. Η απόδοση ενέργειας στην έξοδο της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας με την μορφή που

αναφέρθηκε προηγουμένως, οδηγεί στην σταδιακή μείωση της τάσης στα άκρα του πυκνωτή του κυκλώματος. Όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει σε ένα κατώτατο όριο, ο τελεστικός ενισχυτής προκαλεί το transistor να λειτουργήσει ως ένας διακόπτης που ανοίγει και άρα ο παλμός τάσης εξόδου τερματίζεται. Τέλος, ο παλμός τάσης, που εμφανίζεται στην έξοδο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, λαμβάνει την τελική του μορφή με τη βοήθεια ενός ειδικού υποκυκλώματος το οποίο λειτουργεί ως φίλτρο και ονομάζεται buck converter.



**Σχήμα 3-14. Δομικό διάγραμμα κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 από την PI.**

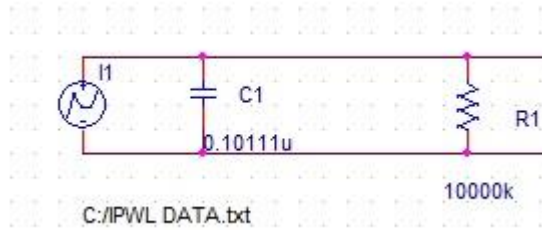
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εντοπίζεται στη λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή. Αυτός λειτουργεί ως συγκριτής της τάσης του πυκνωτή και μιας τάσης αναφοράς (REF), η οποία, όμως με βάση τα παραπάνω, είναι μεταβλητή. Συγκεκριμένα, η REF παίρνει δύο τιμές, οι οποίες αποτελούν το μέγιστο όριο τάσης στο οποίο ξεκινά η αποφόρτιση του πυκνωτή και το ελάχιστο όριο της ίδιας τάσης όπου και η φόρτιση του πυκνωτή εκκινεί εκ νέου.

Από τον κατασκευαστή, ήταν γνωστή η χωρητικότητα του πυκνωτή του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, η οποία είναι ίση με 200μF. Ακόμα, η χωρητικότητα που εμφανίζει το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα εκτιμάται, από την PI, ίση με 90nF αλλά μετρήθηκε στο εργαστήριο ίση με 78nF. Το εύρος του ρεύματος που μπορεί να διαχειριστεί η πλακέτα είναι 20μΑ-40mA.

Ωστόσο, όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 3-14, από τον κατασκευαστή παραλείπονται το υποκύκλωμα που υλοποιεί την μεταβλητή τάση αναφοράς REF και το υποκύκλωμα του buck converter που διαμορφώνει το τελικό σήμα εξόδου. Σε προηγούμενη εργασία, που αφορούσε την εξαναγκασμένη ταλάντωση δοκού, τα υποκυκλώματα αυτά προσδιορίστηκαν με την μέθοδο της αντίστροφης μηχανικής (reverse engineering), έτσι ώστε το υπολογιστικό μοντέλο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας να αποδίδει σωστά την μορφή του εισερχόμενου και του εξερχόμενου από την πλακέτα σήματος.

Στη συνέχεια της Παραγράφου 3.4, αρχικά, παρουσιάζονται τα διάφορα επιμέρους τμήματα του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας και εξηγείται η λειτουργία που το κάθε ένα επιτελεί. Στο Σχήμα 3-15, παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο μοντέλο που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα Pspice



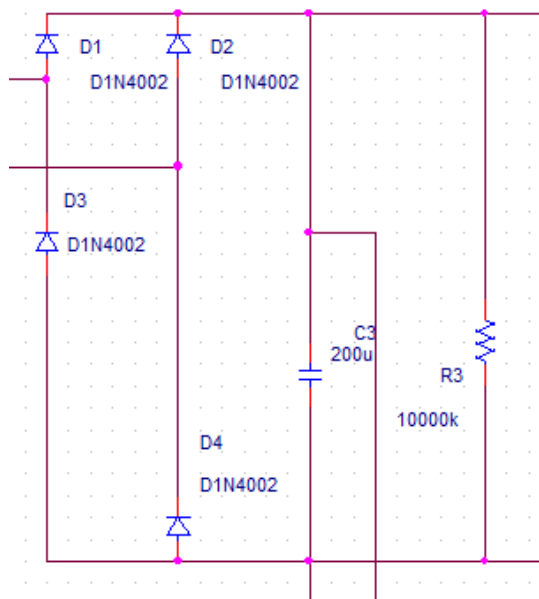


**Σχήμα 3-16. Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος.**

Η χωρητικότητα που εμφανίζει το επίθεμα θα εκτιμηθεί μαζί με την ένταση της πηγής του ρεύματος. Αυτή αποδίδεται στον πυκνωτή C1 που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του χαρακτηριστικού αυτού. Η αντίσταση R1 δεν επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του κυκλώματος αλλά είναι μεγάλη για να μοντελοποιεί την αποφόρτιση του επιθέματος όταν αυτό ηρεμεί μετά από μια χρήση του. Η αποφόρτιση αυτή γίνεται με αργούς ρυθμούς.

### 3.4.2 Ανόρθωση τάσης

Η τάση που εφαρμόζεται στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αποτελεσματική αποθήκευση ενέργειας όσο είναι εναλλασσόμενη. Για το λόγο αυτό ανορθώνεται. Έτσι, στο τμήμα του κυκλώματος που εμφανίζεται στο Σχήμα 3-17, η τάση που δημιουργείται στα άκρα του επιθέματος ανορθώνεται με τη βοήθεια των διόδων D1, D2, D3 και D4 οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε μορφή γέφυρας.



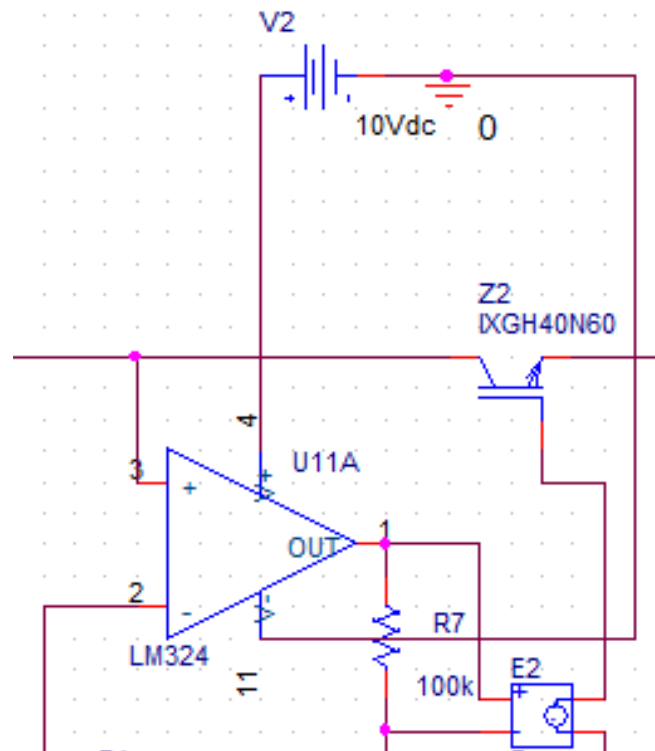
**Σχήμα 3-17. Ανορθωτής τάσης.**

Το ανορθωμένο σήμα εισόδου στη συνέχεια φορτίζει τον πυκνωτή της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας. Η χωρητικότητά του σύμφωνα τον κατασκευαστή είναι ίση με 200μF και αποδίδεται με το ιδανικό στοιχείο συσσώρευσης C3, ενώ οι απώλειες του μοντελοποιούνται με το ιδανικό στοιχείο αντίστασης R3. Η χωρητικότητα του πυκνωτή C3 έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό αν το σήμα της εισόδου είναι

αρκετά ισχυρό για να καταφέρει να τον φορτίσει μέχρι το ανώτερο όριο τάσης που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επίσης, αν αυτό τελικά συμβεί, η χωρητικότητα του πυκνωτή καθορίζει και το χρόνο στον οποίο η φόρτιση θα ολοκληρωθεί. Η αντίσταση R3 και πάλι δεν επηρεάζει τη λειτουργία του κυκλώματος και είναι μεγάλη για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

### 3.4.3 Τελεστικός Ενισχυτής και transistor

Το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας χρειάζεται έναν διακόπτη ο οποίος θα ρυθμίζει το πότε θα εμφανίζεται ο παλμός εξόδου με βάση την τάση του πυκνωτή C3. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συνεργασία του transistor Z2 και του τελεστικού ενισχυτή U11A. Ο τελεστικός ενισχυτής συγκρίνει διαρκώς το δυναμικό στον ακροδέκτη 3 με το δυναμικό του ακροδέκτη 2, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-18. Όταν  $V_3 > V_2$ , τότε στον ακροδέκτη 1 εμφανίζεται θετικό δυναμικό το οποίο ενεργοποιεί το transistor και έτσι το φορτίο από τον πυκνωτή C3 μπορεί να μεταφερθεί στον buck converter, αφού το ρεύμα πια διέρχεται ελεύθερα μέσα από το transistor. Στην αντίθετη περίπτωση, ο ενισχυτής δεν στέλνει πια θετικό δυναμικό στην πύλη του transistor και η διέλευση του ρεύματος μέσω αυτού διακόπτεται. Το δυναμικό  $V_2$  είναι μεταβλητό και είναι ίσο με το REF που προαναφέρθηκε και θα επεξηγηθεί παρακάτω. Στο Σχήμα 3-18 φαίνεται και μία εξαρτημένη πηγή τάσης από τάση (E2), η οποία υπάρχει για την εύρυθμη λειτουργία του προγράμματος και εξασφαλίζει ότι το δυναμικό εξόδου του ενισχυτή είναι ίσο με το δυναμικό που εφαρμόζεται στην πύλη του transistor. Στην πραγματικότητα, κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο.

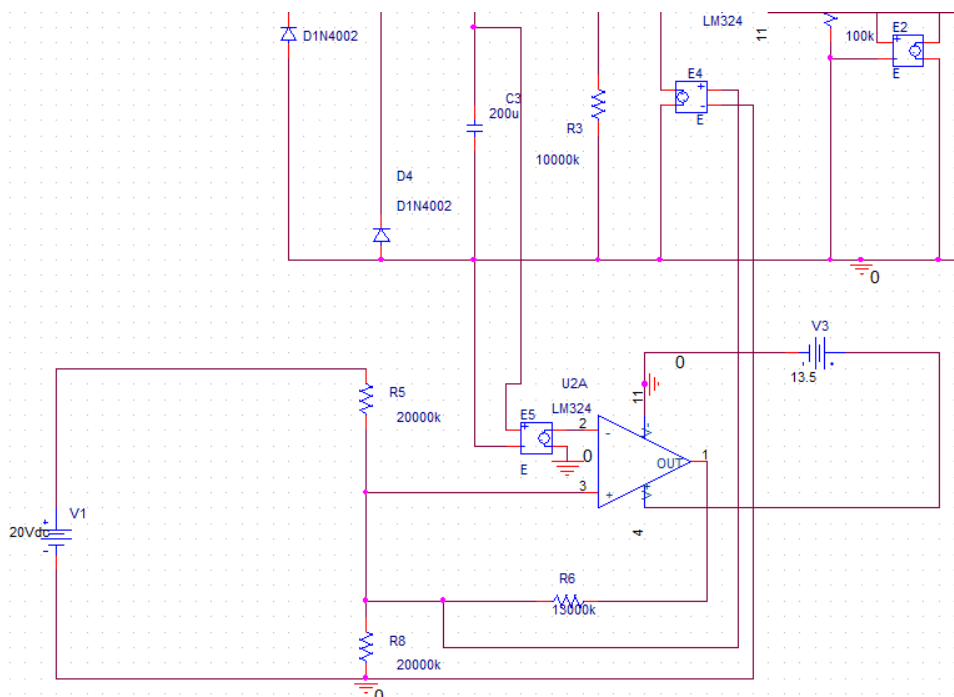


Σχήμα 3-18. Transistor και τελεστικός ενισχυτής.

### 3.4.4 Schmitt trigger και REF

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ένδειξη REF στο δομικό διάγραμμα του κατασκευαστή αναπαριστά μια τάση που μεταβάλλεται παίρνοντας είτε μια υψηλή τιμή είτε μια χαμηλή τιμή. Αρχικά, η τιμή της REF είναι υψηλή και μάλιστα υψηλότερη της τάσης του πυκνωτή, με αποτέλεσμα ο τελεστικός ενισχυτής U11A που ελέγχει το transistor, να το κρατά σε κατάσταση OFF. Όταν η τιμή του πυκνωτή φτάσει την υψηλή τιμή της REF, τότε ο ενισχυτής θέτει το transistor σε κατάσταση ON και ο πυκνωτής C3 αρχίζει να αποφορτίζεται. Ταυτόχρονα, όμως, η REF μεταπηδά στη χαμηλή τιμή της με αποτέλεσμα η τάση του πυκνωτή C3 να είναι μεγαλύτερη από τη REF. Έτσι η αποφόρτιση του πυκνωτή δεν σταματά ακαριαία αλλά συνεχίζεται μέχρι η τάση του πυκνωτή να γίνει ίση με τη χαμηλή τιμή της REF. Όταν αυτό συμβεί η REF επανέρχεται στην υψηλή της τιμή και η φόρτιση ξεκινά εκ νέου.

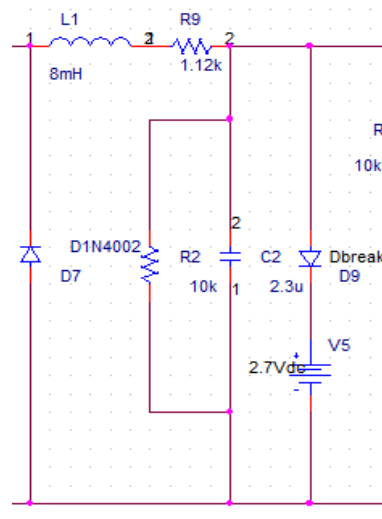
Η επίτευξη της παραπάνω μεταβλητής τιμής της τάσης REF οφείλεται σε ένα υποκύκλωμα που ονομάζεται Schmitt trigger. Στο κύκλωμα αυτό ένας δεύτερος ενισχυτής (U2A) συγκρίνει την τιμή του δυναμικού του πυκνωτή C3 με το δυναμικό στο μη γειωμένο άκρο της αντίστασης R8. Όταν το δυναμικό στο εν λόγω άκρο της αντίστασης είναι μεγαλύτερο της τάσης του πυκνωτή C3, τότε τα ρεύματα που διαρρέουν τις αντιστάσεις R5 και R6 προστίθενται και διαρρέουν την R8 που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με αυτές. Αντίθετα, όταν είναι μικρότερο, τότε οι αντιστάσεις R8 και R6 είναι συνδεδεμένες παράλληλα και σε σειρά με αυτές συνδέεται η R5. Η αλλαγή αυτή στη συνδεσμολογία των αντιστάσεων οδηγεί στη μεταβολή της τάσης της αντίστασης R8. Η τάση αυτή είναι ίση με τη REF και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της εξαρτημένης πηγής τάσης από τάση E4. Στο Σχήμα 3-19 παρουσιάζεται το αντίστοιχο τμήμα του κυκλώματος.



Σχήμα 3-19. Schmitt trigger και REF.

### 3.4.5 Buck converter και voltage clipper

Αφού το ρεύμα διαρρέυσει επιτυχώς το transistor Z2 που φαίνεται στο Σχήμα 3-18, το φορτίο εισέρχεται στο δεύτερο τμήμα του κυκλώματος, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3-20. Εκεί υπάρχει ένα buck converter, το οποίο είναι ένα υποκύκλωμα με σκοπό να λειτουργεί ως φίλτρο και να διαμορφώνει το παλμό της τάσης εξόδου. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από ένα πηνίο (L1), μία αντίσταση (R9), έναν πυκνωτή και τις απώλειες του (C2 και R2) και μια δίοδο (D7), η οποία διασφαλίζει τη σωστή φορά του ρεύματος όταν το transistor σταματά να άγει ρεύμα. Η τάση εξόδου ( $V_{out}$ ) εμφανίζεται στους ακροδέκτες του πυκνωτή C3. Τέλος, υπάρχει μια δίοδος (D10) η οποία συνδέεται με μια πηγή τάσης σε σειρά. Αυτό το κομμάτι του υποκυκλώματος ονομάζεται voltage clipper και σκοπό έχει να κόβει το τμήμα του παλμού που εξέρχεται από τον buck converter που ξεπερνά την επιθυμητή  $V_{out}$ . Έτσι, ο παλμός που εξέρχεται είναι πλήρως τετραγωνικός.



Σχήμα 3-20. Buck converter και Voltage Clipper.

### 3.4.6 Ηλεκτρικό φορτίο

Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας τροφοδοτούσε με τάση μια αντίσταση 10kΩ. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της ύπαρξης του voltage clipper το φορτίο είτε αυτό είναι αντίσταση είτε είναι κάποια μπαταρία, δεν επηρεάζει την τάση στα άκρα της αλλά μόνο το ρεύμα που το διαρρέει.



## 4 Πειράματα παραγωγής ενέργειας με κρουστικό φορτίο

### 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα περιγραφεί η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μελέτη του φαινομένου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά την διάρκεια μιας κρούσης. Τα πειράματα που διεξήχθησαν κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, έγιναν με σκοπό την κατανόηση της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της διάταξης στην απομάστευση μέρους της ενέργειας της κρούσης. Η κατανόηση αυτή επιβεβαιώνεται και αποκρυσταλλώνεται με τη δημιουργία των μοντέλων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι πραγματοποιήθηκαν τρία διαφορετικά είδη πειραμάτων. Το πρώτο είδος πειραμάτων είχε ως σκοπό την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της μονόπακτης δοκού. Το δεύτερο είδος στόχευε στην παρατήρηση της λειτουργίας του μηχανικού υποσυστήματος όταν αυτό είναι απομονωμένο από το κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας. Και το τρίτο είδος πειραμάτων αφορούσε τη συμπεριφορά του συστήματος δοκού-επιθέματος όταν αυτό αποδίδει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει σε ένα κύκλωμα ειδικά κατασκευασμένο για την αξιοποίησή της.

Είναι εμφανές, λοιπόν, ότι υπάρχει μία αντιστοιχία ανάμεσα στα πειράματα που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της εργασίας αυτής και στα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς πως σε κάθε πείραμα προστίθεται και άλλο ένα τμήμα μέχρι τελικά να συναρμολογηθεί η τελική διάταξη. Η διαδικασία αυτή δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιείται έλεγχος σε κάθε στάδιο της μοντελοποίησης του πλήρους συστήματος. Το αποτέλεσμα είναι να γίνεται με άμεσο τρόπο η απόδοση τυχόν σφαλμάτων στο εκάστοτε τμήμα του μοντέλου που αντιστοιχούν. Κατά αυτόν τον τρόπο, γίνεται στοχευμένα η ανίχνευση και διόρθωση τυχόν ελαττωμάτων του μοντέλου. Συγκεκριμένα, τα πρώτα δύο είδη πειραμάτων χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της απόδοσης των μοντέλων που κατασκευάστηκαν στο Abaqus καθώς και τη ρύθμιση ορισμένων παραμέτρων τους. Ενώ, το τελευταίο είδος πειραμάτων χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης και επιβεβαιώνει την επιτυχία ή την αποτυχία της συνολικής μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πειραματική εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού απαιτεί διαφορετική διάταξη από εκείνη των υπόλοιπων πειραμάτων. Επομένως, στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι δύο διαφορετικές διατάξεις και τα επιμέρους εξαρτήματα που τις απαρτίζουν. Ακόμα, θα παρουσιαστεί συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο τα εξαρτήματα της διάταξης συνεργάζονται για να έρθουν εις πέρας τα πειράματα που εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Επιπλέον, θα παρατεθούν και οι πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των εν λόγω πειραμάτων. Οι πειραματικές μετρήσεις θα χρησιμοποιηθούν μαζί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα υπολογιστικά μοντέλα που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, για να υλοποιηθεί η τελική τους σύγκριση στο Κεφάλαιο 5.

## 4.2 Πειράματα εύρεσης ιδιοσυχνοτήτων δοκού

### 4.2.1 Περιγραφή διάταξης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα πρώτα πειράματα που λαμβάνουν χώρα, είναι αυτά που σκοπό έχουν την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της μονόπακτης δοκού. Η ανίχνευση των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού γίνεται με τη βοήθεια μιας κρούσης. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την επιβολή ενός κρουστικού φορτίου διεγείρονται όλες οι ιδιοσυχνότητες μιας κατασκευής. Για την εκτέλεση αυτού του πειράματος, είναι απαραίτητη η χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού. Τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται μια διάταξη κατάλληλη για τη μέτρηση των ιδιοσυχνοτήτων μιας δοκού, είναι η δοκός, ένα σφυρί για κρούσεις με αισθητήρα δύναμης, ένα επιταχυνσιόμετρο, οι αντίστοιχοι ενισχυτές για το σήμα κάθε αισθητήρα και μία κάρτα συλλογής δεδομένων σε συνεργασία με τον κώδικα που αξιοποιεί τα δεδομένα αυτά. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα συγκεκριμένα πειράματα διενεργήθηκαν με τη συνεργασία του Εργαστηρίου Τεχνικής Μηχανικής και Ταλαντώσεων του Πανεπιστημίου Πατρών. Στην συνέχεια, θα ακολουθήσει η περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σήμερα στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Ο Πίνακας 4-1 παρέχει μια εποπτική παρουσίαση του εν λόγω εξοπλισμού.

**Πίνακας 4-1. Στοιχεία πειραματικής διάταξης για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού.**

| A/A | Στοιχείο   | Κατασκευαστής        | Λειτουργία  |
|-----|--|----------------------|---|
| 1   | Δοκός από σύνθετο υλικό                          | EAB                  | Πραγματοποίηση ταλάντωσης για εύρεση ιδιοσυχνοτήτων           |
| 2   | Σφυρί για κρούση με αισθητήρα δύναμης PCB 208C03 | PCB Piezotronics     | Πραγματοποίηση κρούσης και μέτρηση ασκούμενου φορτίου         |
| 3   | Επιταχυνσιόμετρο PCB M352C66                     | PCB Piezotronics     | Μέτρηση επιτάχυνσης σε συγκεκριμένο σημείο της δοκού          |
| 4   | Ενισχυτής PCB 482C15                             | PCB Piezotronics     | Ενίσχυση σημάτων αισθητήρα δύναμης και επιταχυνσιόμετρου      |
| 5   | Κάρτα υπολογιστή NI 6036E                        | National Instruments | Μέτρηση σημάτων ηλεκτρικού δυναμικού και αποθήκευση μετρήσεων |

### **Δοκός από σύνθετο υλικό**

Το δοκίμιο, που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, είναι κατασκευασμένο από πλεκτό σύνθετο υλικό με ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη (Graphite/Epoxy). Το δοκίμιο αυτό κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν πακτωμένο στο ένα άκρο του με τη βοήθεια μιας μέγγενης. Η δοκός είναι ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις 148mm X 37mm και έχει ελεύθερο μήκος 127mm. Επιπλέον, το πάχος της είναι 2.15mm. Όπως σημειώθηκε και στην Παράγραφο 3.3.1, η

δοκός είναι κατασκευασμένη σε στρώσεις. Σε κάθε στρώση, οι ίνες του υλικού έχουν διαφορετικό προσανατολισμό με αποτέλεσμα να εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες μεταξύ τους. Ο προσανατολισμός των ινών με βάση τη γωνία που σχηματίζουν οι ίνες του υλικού σε σχέση με τον άξονα x που θεωρείται παράλληλος με το μήκος του υλικού. Τελικά, η διαστρωμάτωση του υλικού είναι  $[-45/45/90_2/0/90]_s$ . Στο Σχήμα 4-1 φαίνεται η δοκός που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.



**Σχήμα 4-1. Δοκός για τη διενέργηση πειραμάτων.**

#### **Σφυρί για κρούσεις με αισθητήρα δύναμης PCB 208C03.**

Τα πειράματα εύρεσης ιδιοσυχνοτήτων μιας κατασκευής ή στην συγκεκριμένη περίπτωση της δοκού, είναι σκόπιμο να γίνονται με κρουστικά φορτία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται ειδικά σφυριά σαν αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-2. Όσον αφορά το συγκεκριμένο σφυρί, κατασκευάστηκε ειδικά για τις ανάγκες της παρούσας πειραματικής διάταξης. Ένα σφυρί για κρούσεις θα πρέπει να είναι ελαφρύ έτσι ώστε οι κρούσεις να γίνονται ακαριαία και επίσης θα πρέπει να φέρει το κατάλληλο σπείρωμα για την σύνδεση του με τον αισθητήρα δύναμης. Ακόμα από το Σχήμα 4-9, γίνεται εμφανές ότι μέρος ενός τέτοιου σφυριού είναι και ο επικρουστήρας που τοποθετείται μετά τον αισθητήρα δύναμης για να τον προφυλάσσει από τυχόν ζημιές. Ο επικρουστήρας μπορεί να είναι κατασκευασμένος από διάφορα υλικά, ανάλογα με τη διάταξη που εξετάζεται. Εδώ, ο επικρουστήρας είναι χαλύβδινος.

Ο αισθητήρας PCB 208C03 είναι μία δυναμοκυψέλη που μπορεί να μετρήσει δυνάμεις μέχρι και 2.224 kN, έχει ανώτατο όριο συχνότητας τα 36 kHz, ενώ η ευαισθησία του ανέρχεται στα 2248 mV/kN. Ο αισθητήρας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3, τοποθετείται ανάμεσα στο σφυρί και τον επικρουστήρα, έτσι ώστε να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα της κρούσης αλλά παράλληλα να είναι προστατευμένος από την άμεση επαφή με τη δοκό.



**Σχήμα 4-2. Σφυρί για κρούσεις με αισθητήρα δύναμης PCB 208C03.**



**Σχήμα 4-3. Δυναμοκυψέλη PCB 208C03.**

#### **Επιταχυνσιόμετρο PCB M352C66**

Το επιταχυνσιόμετρο PCB M352C66 είναι ένας αισθητήρας που μπορεί να λάβει αξιόπιστες μετρήσεις επιταχύνσεων που φτάνουν μέχρι και τα  $491\text{m/s}^2$ . Η ευαισθησία του δίνεται από τον κατασκευαστή ίση με  $10.2\text{mV}/(\text{m/s}^2)$ , ενώ μέχρι και τα  $10\text{kHz}$  μπορεί να μετρήσει με σφάλμα μικρότερο του 5%. Τα βασικά πλεονεκτήματα του αισθητήρα είναι ότι μπορεί να δώσει πολύ καθαρό σήμα ανεξάρτητα από τις συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί και ότι εμφανίζει σταθερή ευαισθησία ανεξάρτητα από τον τύπο του καλωδίου που χρησιμοποιείται

και το μήκος του. Σχετικά με την τοποθέτηση του πάνω στη δοκό, αυτή πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός ειδικού κεριού που δίνεται μαζί με τον αισθητήρα.



**Σχήμα 4-4. Αισθητήρας δύναμης PCB 208C03.**

#### **Ενισχυτής (Conditioner) PCB 482C15**

Τα σήματα τόσο του αισθητήρα δύναμης όσο και του επιταχυνσιομέτρου περνούν μέσα από τον ενισχυτή PCB 482C15. Ο ενισχυτής αυτός διαθέτει κανάλια για να μπορεί να υποδέχεται ταυτόχρονα μέχρι και 4 διαφορετικά σήματα. Εσωτερικά μπορεί να επιλεγεί ο συντελεστής ενίσχυσης του κάθε καναλιού ανάμεσα στις τιμές x1, x10 ή x100. Τα κέρδη αυτά μπορεί να φανούν ιδιαίτερος χρήσιμα σε περίπτωση όπου ο θόρυβος λόγω των καλωδίων που ακολουθούν είναι συγκρίσιμος με το σήμα του αισθητήρα. Στο

Το σήμα που παρέχεται από τον αισθητήρα διέρχεται πρώτα από ενισχυτή και φίλτρο (conditioner PCB 482A16) (Σχήμα 4-5) και ενισχύεται 100 φορές πριν εισέλθει στον παλμογράφο όπου και γίνεται η καταγραφή της μέτρησης. Ο ενισχυτής αυτός διαθέτει 4 κανάλια και παρέχει την επιλογή ανάμεσα σε τρεις συντελεστές ενίσχυσης, οι οποίοι είναι x1, x10 ή x100. Στο Σχήμα 4-5 φαίνεται ο ενισχυτής που χρησιμοποιήθηκε.



**Σχήμα 4-5. Ενισχυτής PCB 482C15.**

### Κάρτα υπολογιστή NI 6036E

Η αποθήκευση των δεδομένων που παράγονται κατά τη διάρκεια ενός πειράματος θα πρέπει να συλλέγονται από μία ειδική κάρτα υπολογιστή. Για τις ανάγκες αυτού του είδους των πειραμάτων έχει επιλεγεί η κάρτα NI 6036E της National Instruments. Η κάρτα αυτή διαθέτει 16 αναλογικά κανάλια εισόδου με συχνότητα δειγματοληψίας 200 kS/s (multiplexing), 2 αναλογικά κανάλια εξόδου των 16 bit καθώς και 8 ψηφιακά κανάλια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως εισοδοί είτε ως εξοδοί. Επιπλέον, περιλαμβάνει και δύο counters/timers των 24 bit. Στην πειραματική διάταξη, τα σήματα που καταλήγουν στην κάρτα περνούν πρώτα από το κατάλληλο terminal block. Εδώ επιλέχθηκε το BNC-2115 από την National Instruments. Η κάρτα του υπολογιστή καθώς και το terminal block παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-6 και Σχήμα 4-7 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-6. Κάρτα υπολογιστή NI6036E.



Σχήμα 4-7. Terminal Block BNC-2115.

#### 4.2.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

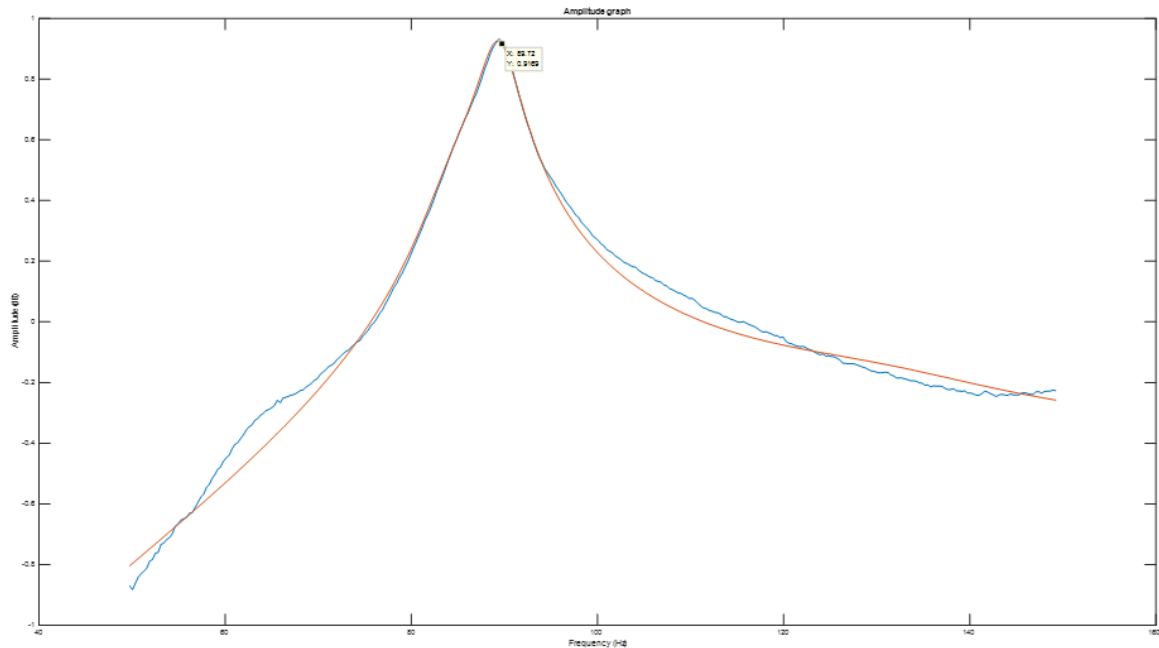
Προκειμένου να εκτελεστεί ένα πείραμα για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων μιας δοκού, θα πρέπει πρώτα να γίνει η κατάλληλη προετοιμασία. Αρχικά, θα πρέπει να συναρμολογηθεί το σφυρί για τις κρούσεις. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο αισθητήρας δύναμης PCB 208C03 βιδώνεται πάνω στο σώμα του σφυριού και στη συνέχεια πάνω στον αισθητήρα συνδέεται ο επικρουστήρας. Ο επικρουστήρας μπορεί να αποτελείται από διάφορα υλικά αλλά εδώ επιλέγεται να είναι χαλύβδινος για να μην εμφανίζεται σημαντική απόσβεση κατά τη διάρκεια της κρούσης. Στη συνέχεια, τοποθετείται η δοκός στη μέγγενη που θα τη συγκρατεί. Είναι σημαντικό να έχει σημειωθεί εκ των προτέρων η ακριβής θέση της πάκτωσης της δοκού, έτσι ώστε το ελεύθερο μήκος της να είναι σταθερό σε όλα τα πειράματα. Η σημασία της επιλογής ενός σταθερού ελεύθερου μήκους είναι ζωτική καθώς οι ιδιοσυχνότητες της μονόπακτης δοκού επηρεάζονται σημαντικά από αυτήν την παράμετρο. Το επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση του επιταχυνσιομέτρου PCB M352C66. Παραπάνω επισημάνθηκε πως ο αισθητήρας συνοδεύεται από ένα ειδικό κερύ το οποίο χρησιμοποιείται για τη σταθερή σύνδεση του με την επιφάνεια της δοκού. Έπειτα, θα πρέπει να συνδεθούν οι αισθητήρες με τον ενισχυτή PCB 482C15. Στο σημείο αυτό, μπορεί να γίνει και η επιλογή των συντελεστών ενίσχυσης των δύο σημάτων αν είναι γνωστό το εύρος τους. Τέλος, τα κανάλια του ενισχυτή που αντιστοιχούν στα σήματα της δύναμης και της επιτάχυνσης θα πρέπει να συνδεθούν με την κάρτα NI 6036E μέσω του terminal block BNC-2115.

Το πείραμα ξεκινάει με την κρούση του σφυριού πάνω στη δοκό. Το σημείο εφαρμογής του κρουστικού φορτίου είναι σημαντικό καθώς μπορεί να επηρεάσει τη διέγερση διαφορετικών ιδιομορφών. Για παράδειγμα, μία έκκεντρη κρούση ως προς τον άξονα συμμετρίας κατά το πλάτος της δοκού, έχει ως αποτέλεσμα να διεγείρονται με μεγαλύτερη ένταση οι στρεπτικές ιδιομορφές του δοκιμίου. Ωστόσο, στα πειράματα, που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στην ταυτοποίηση της πρώτης ιδιοσυχνότητας της δοκού, καθώς αυτή συνεισφέρει περισσότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, είναι γνωστό πως η πρώτη ιδιοσυχνότητα μιας μονόπακτης δοκού είναι καμπτική. Επομένως, οι κρούσεις επιλέχθηκαν να γίνουν κοντά στο ελεύθερο άκρο της δοκού και πάνω στον άξονα συμμετρίας της ως προς το πλάτος. Παρομοίως, η επιλογή του σημείου τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου έχει εξίσου μεγάλη συνεισφορά στον εντοπισμό της επιθυμητής ιδιομορφής. Για το λόγο αυτό, το επιταχυνσιόμετρο συνδέεται στο μέσον της δοκού κατά το μήκος της και κεντρικά ως προς το πλάτος. Ακόμα, σημαντικό στοιχείο της κρούσης είναι και η διάρκεια της η οποία θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν περιορισμένη.

Τα σήματα που προκύπτουν από ένα πείραμα ενισχύονται, συλλέγονται από την κάρτα και στην συνέχεια αποθηκεύονται στον υπολογιστή. Στην συνέχεια, ακολουθεί ένα στάδιο επεξεργασίας του σήματος εισόδου και της εξόδου και με ανάλυση Fourier προκύπτουν τελικά οι ιδιοσυχνότητες της δοκού.

### 4.2.3 Πειραματικές μετρήσεις

Μετά από τη διαδικασία που περιεγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, προκύπτουν τα αποτελέσματα για τις ιδιοσυχνότητες της δοκού. Όπως αναφέρθηκε ήδη, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, η ιδιοσυχνότητα που εμφανίζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η πρώτη. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συμπεριφορά της δοκού στο φάσμα της συχνότητας.



**Σχήμα 4-8. Διάγραμμα από ανάλυση Fourier.**

Από τα πειράματα, τελικά προέκυψε πως η πρώτη ιδιοσυχνότητα της δοκού εμφανίζεται στα 89.365Hz ενώ ο συντελεστής απόσβεσης που αναλογεί σε αυτήν την ιδιοσυχνότητα είναι  $\zeta=0.0227$ . Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές αυτές αντιστοιχούν μόνο στη μονόπακτη δοκό και χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση του μοντέλου της δοκού στο Abaqus. Με την πρόσθεση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος η συχνότητα αυτή αλλάζει και ταυτόχρονα αλλάζει και ο συντελεστής απόσβεσης.

## 4.3 Πειράματα με πιεζοηλεκτρικό επίθεμα

### 4.3.1 Περιγραφή διάταξης

Τα επόμενα πειράματα περιλαμβάνουν και τη χρήση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Όπως σημειώθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, τα πειράματα με το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα χωρίζονται σε δύο είδη. Στο πρώτο, το σύστημα δοκού-επιθέματος μελετάται ως προς την δυναμική του απόκριση κατά τη διάρκεια μιας κρούσης, όταν το πιεζοηλεκτρικό είναι ανοικτοκυκλωμένο. Ενώ στο δεύτερο είδος, το πιεζοηλεκτρικό είναι συνδεδεμένο με ένα ειδικό κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας. Η πειραματική διάταξη για τις δύο αυτές παραλλαγές είναι η ίδια με την εξαίρεση του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας που



προστίθεται μόνο στα τελευταία πειράματα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα δοκού-επιθέματος κατά τη διάρκεια μιας κρούσης περιλάμβανε τη δοκό, το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, την πλακέτα απομάστευσης ενέργειας, ένα πλαίσιο στήριξης, έναν βραχίονα, έναν επικρουστήρα, έναν αισθητήρα δύναμης, το Compact RIO (C-RIO: πλατφόρμα με επεξεργαστή και μνήμη) και ειδικά διαμορφωμένο κώδικα στο LabVIEW. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν η δοκός, το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας και το C-RIO του προηγούμενου πειράματος. Για μια πιο εποπτική παρουσίαση των παραπάνω εξαρτημάτων του πειράματος, παρατίθεται ο Πίνακας 4-2. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια αναλυτικότερη περιγραφή των επιμέρους τμημάτων της διάταξης.

**Πίνακας 4-2. Στοιχεία πειραματικής διάταξης για τη μελέτη του συστήματος δοκού-επιθέματος.**

| A/A | Στοιχείο  | Κατασκευαστής                  | Λειτουργία   |
|-----|---|--------------------------------|--|
| 1   | Δοκίμιο από σύνθετο υλικό   | EAB                            | Πραγματοποίηση ταλάντωσης για παραγωγή ενέργειας   |
| 2   | Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch P-876.A12)                          | PI                             | Μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική   |
| 3   | Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας (Harvesting module E-821.00 της PI) | PI                             | Αποθήκευση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας  |
| 4   | Πλαίσιο   | Intracom                       | Σταθερή στήριξη δοκιμίου   |
| 5   | Βραχίονας   | Κατασκευασμένος στο εργαστήριο | Επιβολή κρουστικού φορτίου στο δοκίμιο   |
| 6   | Αισθητήρας δύναμης και επικρουστήρας                              | CSL/Lika [7]                   | Μέτρηση ασκούμενης δύναμης και ενίσχυση μετρούμενου σήματος                                    |
| 7   | LabVIEW VI και C-RIO 9074   | National Instruments           | Καταγραφή και αποθήκευση της κρουστικής απόκρισης  |
| 8   | Κάμερα HiSpec   | Fastec Imaging                 | Καταγραφή ταχύτητας βραχίονα πριν την κρούση και μετατόπισης του σημείου επαφής βραχίονα-δοκού |

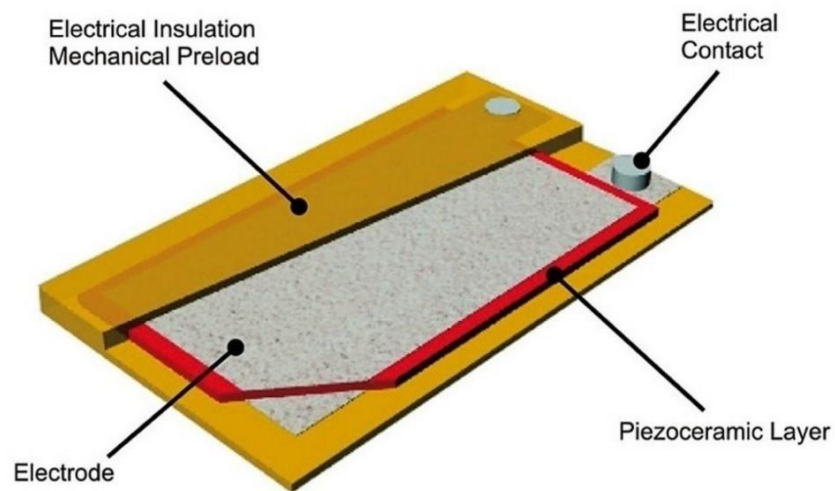
#### **Δοκίμιο από σύνθετο υλικό**

Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της κρούσης είναι το ίδιο με αυτό που περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.2.1.

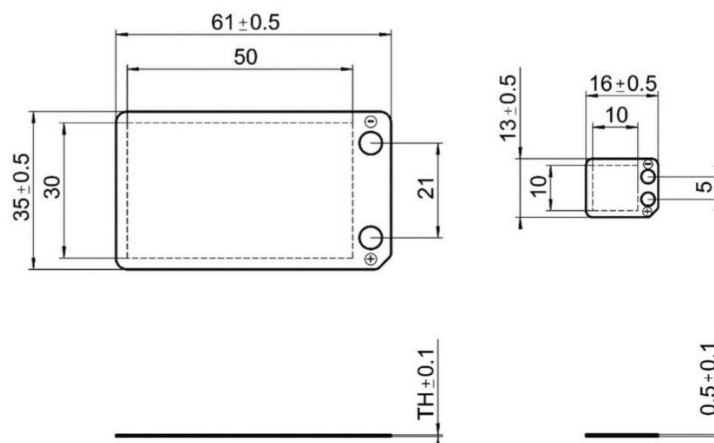
#### **Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) P-876.A12 της PI**

Το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) P-876.A12 της PI είναι ίσως το βασικότερο από τα εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης, αφού αυτό μετατρέπει μέρος της ενέργειας

παραμόρφωσης του δοκιμίου σε αποθηκεύσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Το πιεζοηλεκτρικό συνοδεύεται από το αντίστοιχο φύλλο του κατασκευαστή, στο οποίο αναφέρονται οι διαστάσεις του και το υλικό του, καθώς και πληροφορίες που οριοθετούν το εύρος συνθηκών εργασίας του. Το συγκεκριμένο πιεζοηλεκτρικό επιθέμα (patch) είναι κατασκευασμένο από πιεζοκεραμικό υλικό PIC-255, το οποίο περιβάλλεται από ένα πλαστικό περίβλημα με μηχανική προένταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-9. Η σύνθετη αυτή δομή του επιθέματος, του προσδίδει μεγαλύτερη ευλυγισία και ευρωστία. Οι διαστάσεις του πιεζοκεραμικού υλικού είναι 50mm X 30mm X 0.2mm (Σχήμα 4-10). Ο Πίνακας 3-2 παρέχει πληροφορίες που αφορούν τις μηχανικές, διηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού PIC-255 είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο από την κατασκευάστρια εταιρεία.



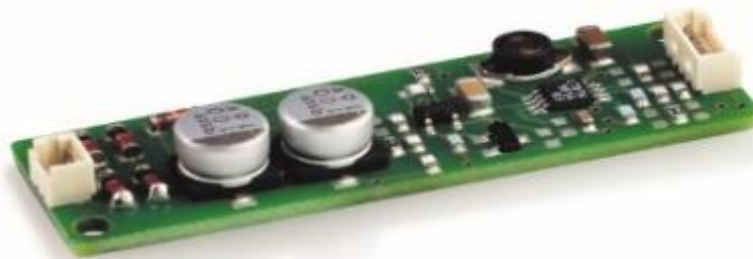
**Σχήμα 4-9. Δομή πιεζοηλεκτρικού επιθέματος.**



**Σχήμα 4-10. Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πιεζοκεραμικού υλικού.**

### Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module) E-821.00 της PI

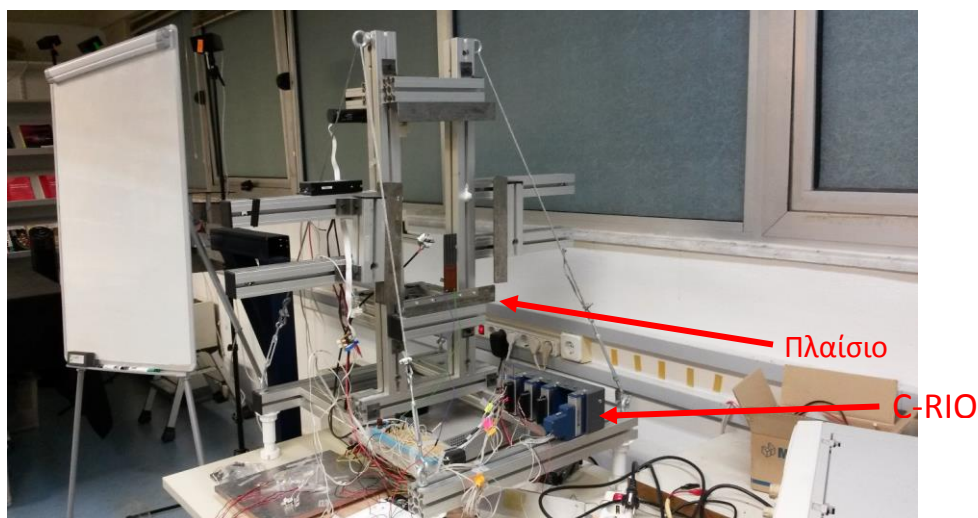
Η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 της PI (Σχήμα 4-11) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που αποθηκεύει προσωρινά την ενέργεια που δέχεται από ηλεκτρικά σήματα τυχαίας μορφής και αναπαράγει μέρος αυτής με τη μορφή παλμών σταθερής τάσης. Οι παλμοί σταθερής τάσης διευκολύνουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε κάποια μπαταρία, που θα συνδεθεί με το ηλεκτρονικό αυτό κύκλωμα. Το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 αποτελείται από έναν ανορθωτή, έναν πυκνωτή όπου αποθηκεύεται σε πρώτη φάση η ηλεκτρική ενέργεια που εισέρχεται και ένα υποκύκλωμα που αποδίδει την ενέργεια αυτή με τη μορφή παλμών. Η ύπαρξη του ανορθωτή επιτρέπει στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας να δέχεται ως είσοδο τόσο σήματα συνεχούς όσο και σήματα εναλλασσόμενης τάσης. Ο παλμός εξόδου όπως προαναφέρθηκε είναι σταθερής τάσης, η τιμή της οποίας μπορεί να επιλεγεί από το χρήστη μεταξύ των τιμών 1.8 V, 3.3 V και 5.5 V. Ο πυκνωτής όπου αποθηκεύεται προσωρινά η εισερχόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαθέτει χωρητικότητα της τάξης των 200μF. Η ενέργεια που αποδίδεται με κάθε παλμό που εξέρχεται από την πλακέτα είναι 8.7 mJ, σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Πέρα από τον παλμό της εξόδου (ονομάζεται  $V_{out}$ ), ο χρήστης μπορεί να λαμβάνει και ένα επιπρόσθετο σήμα, το οποίο τον ενημερώνει πότε το κύκλωμα είναι έτοιμο να αποδώσει ενέργεια και πότε όχι. Το σήμα αυτό ονομάζεται ready. Ακόμα, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιεί την ανορθωμένη τάση που αποθηκεύεται στον πυκνωτή με την προϋπόθεση ότι το φορτίο που χρησιμοποιεί συνδέεται και αποσυνδέεται με χρήση του σήματος ready. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη σε εφαρμογές όπου η επιθυμητή τάση εξόδου ξεπερνά τις προεπιλεγμένες από τον κατασκευαστή τιμές. Το κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας αποτελείται, επιπλέον, και από άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία, η λειτουργία των οποίων έχει περιγραφεί εκτενώς στις Παραγράφους 3.4.1 έως 3.4.6 όταν και παρουσιάστηκε το σχετικό μοντέλο. Ένα αρχικό δομικό διάγραμμα δίνεται από τον κατασκευαστή και φαίνεται στο Σχήμα 3-14.



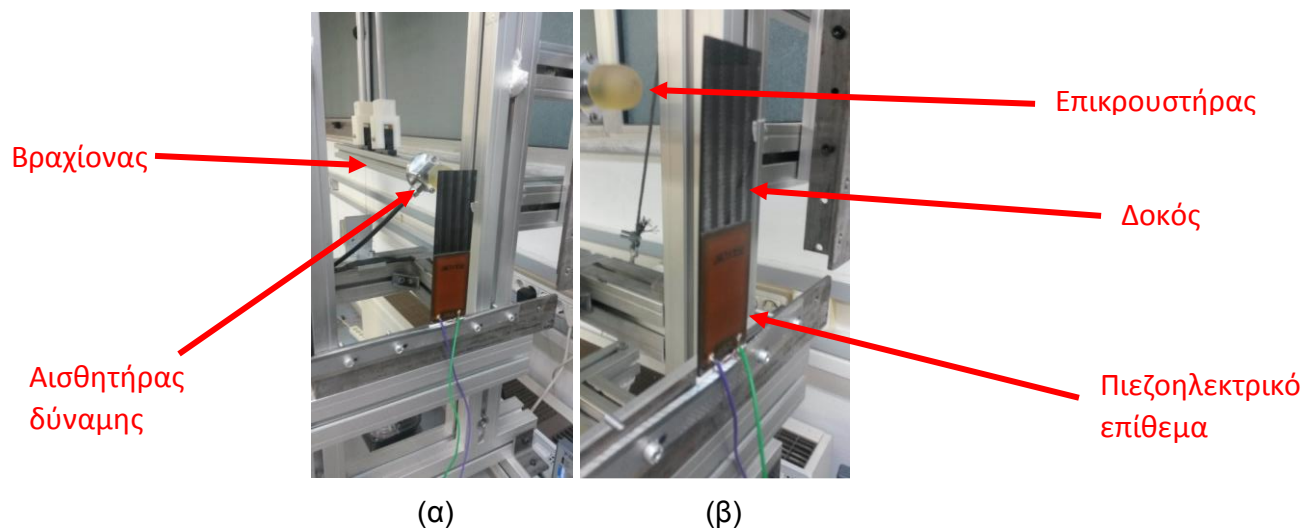
Σχήμα 4-11. Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 της PI.

## Πλαίσιο

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την αποθήκευση ενέργειας με ημιτονοειδές φορτίο, το δοκίμιο ήταν πακτωμένο στο ένα άκρο του με τη βοήθεια μίας μέγγενης. Στα πειράματα που αφορούν την κρούση επιλέχθηκε η χρήση μιας προϋπάρχουσας διάταξης του εργαστηρίου στην οποία έχουν πραγματοποιηθεί ανάλογες εργασίες στο παρελθόν. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει ένα πλαίσιο κατασκευασμένο από αλουμίνιο, το οποίο διαθέτει επιπλέον στιβαρότητα χάρη στη μηχανική προένταση των ασάλινων συρμάτων που το συγκρατούν. Το πλαίσιο έχει κατασκευαστεί με σκοπό τη διενέργεια πειραμάτων που αφορούν κρούση σε πλάκα, ωστόσο εδώ, χρησιμοποιείται για τη στήριξη μίας δοκού. Η πάκτωση της δοκού επιτυγχάνεται με τον εγκλωβισμό της ανάμεσα στο πλαίσιο και σε μία λάμα η οποία βιδώνεται πάνω σε αυτό. Στο Σχήμα 4-12 απεικονίζεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος της κρούσης. Ακόμα, στο Σχήμα 4-13(α) φαίνεται μια κοντινή άποψη της διάταξης, ενώ η στήριξη της δοκού πάνω στο πλαίσιο απεικονίζεται στο Σχήμα 4-13(β).



Σχήμα 4-12. Διάταξη για το πείραμα της κρούσης



Σχήμα 4-13. (α) Κοντινή άποψη της διάταξης, (β) Πάκτωση δοκού πάνω στο πλαίσιο.

## **Βραχίονας**

Η διάταξη αυτή πέρα από το πλαίσιο περιλαμβάνει και έναν βραχίονα. Ο βραχίονας αυτός είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο και μπορεί να εκτελεί κίνηση όμοια με αυτή ενός εκκρεμούς. Η κίνηση του αυτή, όταν αφεθεί από ένα δεδομένο ύψος, οδηγεί σε κρούση μεταξύ του ενός άκρου του και του δοκιμίου. Στο άκρο του βραχίονα, υπάρχει ειδική διαμόρφωση για την εισαγωγή αισθητήρα δύναμης. Ακόμα, μέσω του μηχανισμού παραλληλογράμμου που τον συγκρατεί, διασφαλίζεται η καθετότητα της κρούσης μεταξύ του βραχίονα και του στόχου του. Ακόμα, πλέον υπάρχει και η δυνατότητα ελέγχου της κίνησης του βραχίονα έτσι ώστε να ελέγχεται η ταχύτητα πρόσκρουσης (Διπλωματική Πάνου Καρύδη [29] )

## **Αισθητήρας δύναμης και επικρουστήρας**

Ο αισθητήρας δύναμης που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πείραμα έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (Lika 2013) και παρέχει το χρονικό προφίλ της δύναμης που ασκείται μεταξύ των δύο σωμάτων κατά τη διάρκεια της κρούσης. Ο αισθητήρας αυτός προσδένεται με τη μία του πλευρά πάνω στο άκρο του βραχίονα που συμμετέχει στην κρούση. Να επισημανθεί στο σημείο αυτό ότι ο λόγος μετατροπής του αισθητήρα είναι 384 N/Volt.

Στην άλλη του πλευρά, τοποθετείται ο επικρουστήρας (tip), ο οποίος έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο, όταν πραγματοποιείται η κρούση. Όσον αφορά τον επικρουστήρα, υπήρχαν δύο επιλογές. Ο ένας να είναι κατασκευασμένος από πολυουρεθάνη (βλέπε Σχήμα 4-14), ενώ ο δεύτερος να είναι χαλύβδινος.



**Σχήμα 4-14. Σύνδεση βραχίονα, αισθητήρα δύναμης και επικρουστήρα.**

## LabVIEW VI και C-RIO 9074

Το LabVIEW είναι ένα περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού που συναντάται ευρέως σε μηχανολογικές και άλλου είδους εφαρμογές. Το LabVIEW είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το χρήστη και η National Instruments παρέχει υπηρεσίες υποστήριξης στους χρήστες καθώς και πολλά έτοιμα προγράμματα για εκπαιδευτικούς σκοπούς, τα οποία όμως φαίνονται συχνά πολύ χρήσιμα στην πράξη. Ένα πρόγραμμα γραμμένο στη LabVIEW ονομάζεται VI (Virtual Instrument) και αποτελείται από δύο τμήματα το Front Panel και το Block Diagram. Το Front Panel περιλαμβάνει τις εισόδους και τις εξόδους του προγράμματος ενώ το Block Diagram περιλαμβάνει τον κώδικα του προγράμματος ο οποίος είναι γραμμένος σε μορφή δομικού διαγράμματος. Αν δύο ή περισσότερα VIs πρέπει να συνεργαστούν μεταξύ τους σε μία εφαρμογή, τότε αυτά οργανώνονται σε ομάδες που ονομάζονται projects.

Το C-RIO είναι ολοκληρωμένη πλατφόρμα με επεξεργαστή και ανεξάρτητη μνήμη, στην οποία τοποθετούνται κάρτες συλλογής δεδομένων (Data Acquisition Boards) και εξαγωγής σημάτων διέγερσης (output) σε αναλογική ή ψηφιακή μορφή, επικοινωνεί με το LabVIEW, και είναι κατασκευασμένο από την ίδια εταιρεία. Το C-RIO στη συγκεκριμένη εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα ένα project να διεκπεραιώνεται σε επίπεδο hardware, με αποτέλεσμα η εκτέλεση του να υλοποιείται με μεγαλύτερη ταχύτητα, στοιχείο ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές κρούσης. Η κάρτα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιείται είναι η NI 9220, η οποία διαθέτει 16 αναλογικά κανάλια τα οποία μπορούν αν λαμβάνουν μετρήσεις με δειγματοληψία 100kSamples/s.

Όταν μια εφαρμογή υλοποιείται σε επίπεδο hardware, τότε το project διαθέτει τουλάχιστον δύο VIs. Το ένα εκ των δύο λαμβάνει το χαρακτηρισμό FPGA (Field Programmable Gate Array) και είναι αυτό που εργάζεται σε επίπεδο hardware, ενώ το άλλο ονομάζεται Host και τρέχει σε επίπεδο software. Το FPGA VI είναι υπεύθυνο για τη δειγματοληψία η οποία πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Στο Host VI γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν και η απόδοση εντολής από το χρήστη.

Το LabVIEW χρησιμοποιείται για τη λήψη των μετρήσεων που προκύπτουν καθόλη τη διάρκεια του πειράματος. Συγκεκριμένα, αξίζει να αναφερθεί ότι το project που χρησιμοποιείται αυτή τη φορά, έχει δημιουργηθεί με βάση ένα έτοιμο πρόγραμμα που παρέχει η εταιρεία NI και το οποίο ονομάζεται DMA MCA project. Το project αυτό, τροποποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις που έχει ένα πείραμα κρούσης. Το τελικό project το οποίο και ονομάστηκε DMA with encoder project δίνει τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων από τέσσερα αναλογικά κανάλια και δύο ψηφιακά ταυτοχρόνως. Ακόμα, παρέχει διαγράμματα τα οποία ενημερώνονται με το πέρασ του χρόνου και δίνουν μια καλύτερη εσοπτεία του πειράματος στον ερευνητή. Επίσης, το εν λόγω project δεν λειτουργεί για μια προκαθορισμένη χρονική διάρκεια όπως τα περισσότερα αντίστοιχα projects. Αντιθέτως, ξεκινάει να λειτουργεί με το πάτημα ενός κουμπιού και συνεχίζει να εκτελείται έως ότου το ίδιο κουμπί πατηθεί ξανά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το DMA with encoder project είναι υλοποιημένο σε επίπεδο FPGA και επομένως, δίνει τη δυνατότητα μιας πολύ συχνής δειγματοληψίας, στοιχείο με κομβική

σημασία για πειράματα με έντονη δυναμική φύση όπως αυτά της κρούσης. Περισσότερα στοιχεία σχετικά με το LabVIEW, το C-RIO αλλά και τη λειτουργία του DMA with encoder project δίνονται στο Παράρτημα Α.

### **Κάμερα HiSpec**

Η κάμερα HiSpec της Fastec Imaging, είναι μία κάμερα υψηλής ταχύτητας, η οποία μπορεί να καταγράφει ασπρόμαυρο βίντεο. Η ανάλυση που διαθέτει είναι 1280x1024 pixels όπου το μέγεθος του pixel είναι ίσο με 14x14μm. Η μέγιστη δειγματοληψία που μπορεί να πετύχει είναι τα 113.000 fps. Στην πραγματικότητα η δειγματοληψία της κάμερας εξαρτάται από την ανάλυση της εικόνας που επιλέγεται.

Στα πειράματα που διενεργήθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας, η κάμερα χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της μετατόπισης του σημείου επαφής μεταξύ του επικρουστήρα και της δοκού κατά τη διάρκεια της κρούσης. Η μέτρηση αυτή έγινε με δειγματοληψία 500fps και η ανάλυση της εικόνας ήταν η μέγιστη. Από την ίδια κάμερα μπορεί να προκύψει και η μέτρηση της ταχύτητας με την οποία ο βραχίονας προσκρούει πάνω στο δοκίμιο.

#### **4.3.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας**

Τα πειράματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα αφορούν την απόκριση του συστήματος δοκού-επιθέματος σε συνθήκες κρούσης, όταν το επίθεμα είναι ανοικτοκυκλωμένο, αλλά και την απόκριση του ίδιου συστήματος, στην περίπτωση που αυτό τροφοδοτεί ένα κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας. Παρότι γίνεται λόγος για δύο διαφορετικά πειράματα, η διαδικασία που ακολουθείται είναι σε μεγάλο βαθμό κοινή. Όσον αφορά την προετοιμασία, αρχικά, θα πρέπει να συναρμολογηθεί ο βραχίονας που θα συγκρουστεί με το δοκίμιο. Η συναρμολόγηση περιλαμβάνει τη σύνδεση του αισθητήρα δύναμης στο ένα άκρο του βραχίονα μέσω κοχλιών και στην συνέχεια την τοποθέτηση του επικρουστήρα πάνω στον αισθητήρα. Ο επικρουστήρας σε αυτά τα πειράματα είναι κατασκευασμένος από πολυουρεθάνη. Το υλικό αυτό είναι πιο εύκαμπτο σε σχέση με τον χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού. Η επιλογή αυτού του υλικού έχει σαν στόχο την προστασία της δοκού η οποία καταπονείται σημαντικά μετά από μεγάλο αριθμό πειραμάτων. Πριν από την εκκίνηση των πειραμάτων, γίνεται η κόλληση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος πάνω στην δοκό με εποξική κόλλα δύο συστατικών. Στη συνέχεια, τοποθετείται η δοκός στο πλαίσιο που τη συγκρατεί. Σε αυτό το στάδιο, στήνεται και η κάμερα έτσι ώστε να μπορεί να βιντεοσκοπήσει ευκρινώς το πείραμα.

Τα πειράματα ξεκινούν όταν ο βραχίονας αφήνεται από συγκεκριμένο ύψος να πέσει προκειμένου να προκληθεί η κρούση με τη δοκό. Επειδή, τόσο ο βραχίονας όσο και το δοκίμιο συγκρατούνται από την ίδια κατασκευή, το σημείο της κρούσης των δύο σωμάτων είναι πάντα το ίδιο. Το ελεύθερο μήκος της δοκού παραμένει το ίδιο με τα προηγούμενα πειράματα χάρη στην ειδική σήμανση που έχει σημειωθεί πάνω στο δοκίμιο. Το επόμενο βήμα είναι η σύνδεση του κυκλώματος E-821.00. Προφανώς αυτό το βήμα εκτελείται μόνο

στα αντίστοιχα πειράματα. Τέλος, τα μετρούμενα σήματα της δύναμης και του ηλεκτρικού δυναμικού που επιλέγεται κάθε φορά ως έξοδος, συνδέονται με το C-RIO. Τα σήματα που προκύπτουν από ένα πείραμα, συλλέγονται από την κάρτα του C-RIO και στην συνέχεια αποθηκεύονται στον υπολογιστή. Εξάιρεση αποτελούν τα δεδομένα που προκύπτουν από την κάμερα, τα οποία περνούν πρώτα ένα στάδιο επεξεργασίας από ειδικό κώδικα που εξάγει τη βύθιση της σημείου της κρούσης.

### **4.3.3 Πειραματικές μετρήσεις**

Η διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο ακολουθείται και στα δύο είδη πειραμάτων. Ωστόσο, η διαφοροποίηση των δύο ειδών σχετίζεται με το ηλεκτρικό σήμα που μετράται ως έξοδος. Στα πειράματα που το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα είναι ανοικτοκυκλωμένο, το ηλεκτρικό δυναμικό που μετράται ως έξοδος είναι φυσικά η ηλεκτρική τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του επιθέματος. Στα πειράματα που συμπεριλαμβάνεται και το κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας επιλέγεται να μετρηθεί η τάση στους ακροδέκτες του βασικού πυκνωτή του κυκλώματος ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη συσσώρευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας κρούσης. Επιπλέον, μια μικρή διαφορά εντοπίζεται στη χρήση της κάμερας για την μέτρηση της μετατόπισης του σημείου επαφής δοκού-βραχίονα, η οποία χρησιμοποιείται για την επαλήθευση του μοντέλου δοκού-επιθέματος χωρίς το κύκλωμα. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων των δύο περιπτώσεων που εξετάστηκαν.

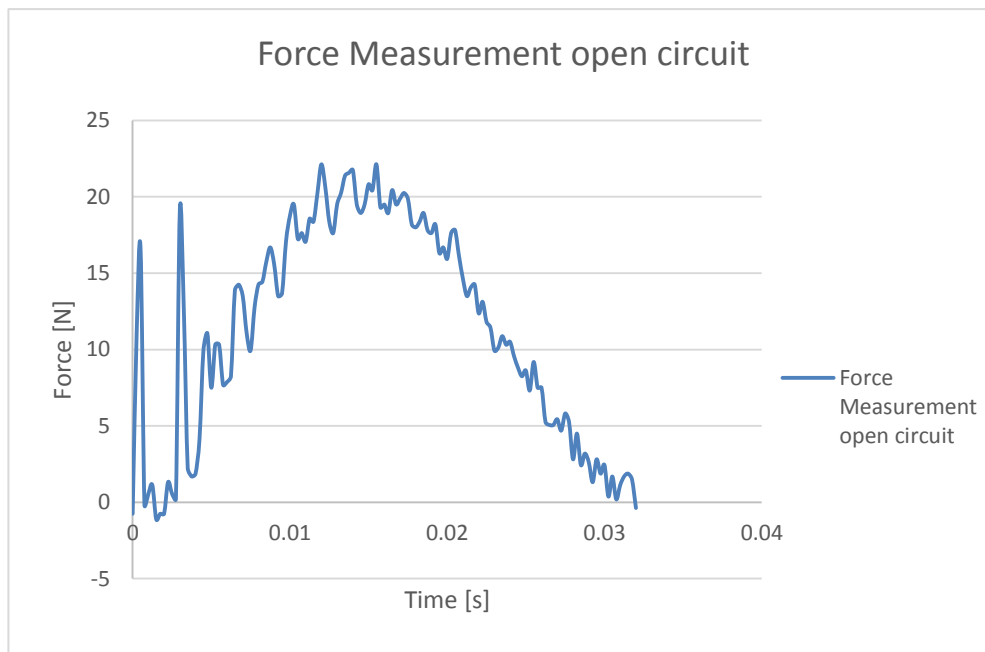
### **Πείραμα απόκρισης συστήματος δοκού-επιθέματος σε ανοικτοκύκλωμα**

Σε αυτό τη σημείο, θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που προέκυψαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων στα οποία το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα δεν ήταν συνδεδεμένο με το κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας. Υπενθυμίζεται ότι τα πειράματα αυτά είχαν σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα μοντέλα των Παραγράφων 3.3.2 και 3.3.3. Το πρώτο μοντέλο δέχεται ως είσοδο τη δύναμη που αναπτύσσεται ανάμεσα στη δοκό και τον επικρουστήρα κατά τη διάρκεια της κρούσης και επιστρέφει ως εξόδους το παραγόμενο ηλεκτρικό δυναμικό στους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού, καθώς και την βύθιση του σημείου επαφής. Στο δεύτερο μοντέλο, όλα τα παραπάνω μεγέθη θεωρούνται έξοδοι, ενώ είσοδος είναι η ταχύτητα του βραχίονα λίγο πριν την κρούση. Επομένως, τα μεγέθη αυτά πρέπει να μετρηθούν για να είναι δυνατή η σύγκριση του μοντέλου με την πραγματικότητα.

Οι μετρήσεις που θα παρουσιαστούν παρακάτω αφορούν κρούσεις, στις οποίες η ταχύτητα του βραχίονα λίγο πριν την κρούση μετρήθηκε ίση με 0.78m/s. Η πρώτη μέτρηση που παρουσιάζεται είναι η μέτρηση της κρουστικής δύναμης. Τα δύο σημαντικότερα χαρακτηριστικά του διαγράμματος είναι το πλάτος του φορτίου αλλά και η χρονική διάρκεια της κρούσης. Όπως φαίνεται και στη γραφική παράσταση που έπεται, η δύναμη που αναπτύσσεται έχει μέγιστο πλάτος τα 20N και η διάρκεια της κρούσης είναι ίση με 0.032s. Από το διάγραμμα προκύπτουν άμεσα δύο παρατηρήσεις. Η πρώτη σχετίζεται με τη μορφή

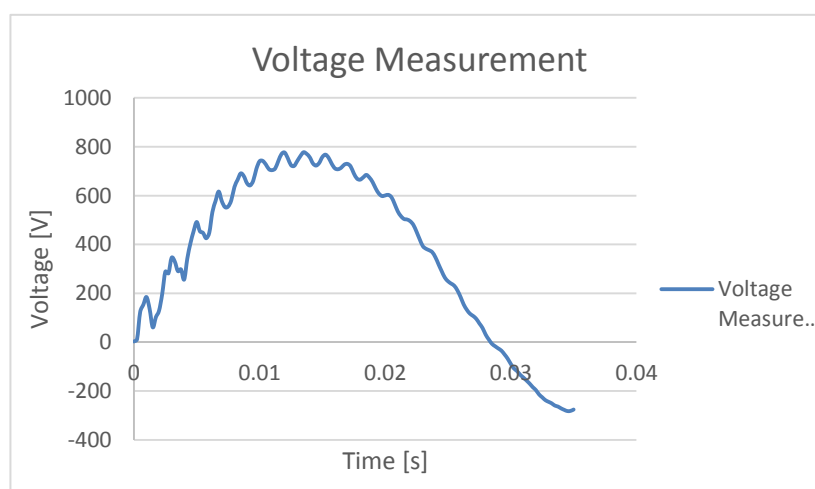


που έχει το προφίλ της δύναμης. Το προφίλ αυτό μοιάζει αρκετά με ένα ημιτονοειδές σήμα που έχει διάρκεια μισής περιόδου, το οποίο όμως εμφανίζει και δύο απότομες αυξομειώσεις στην αρχή. Η δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με τη διάρκεια της κρούσης η οποία είναι σχετικά μεγάλη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο επικρουστήρας από πολυουρεθάνη είναι αρκετά εύκαμπτος και στο ότι η κρούση πραγματοποιείται στο ελεύθερο άκρο της δοκού, όπου η μετατόπιση είναι μεγάλη.



**Σχήμα 4-15. Διάγραμμα αναπτυσσόμενης δύναμης κατά τη διάρκεια μιας κρούσης (ανοικτοκύκλωμα).**

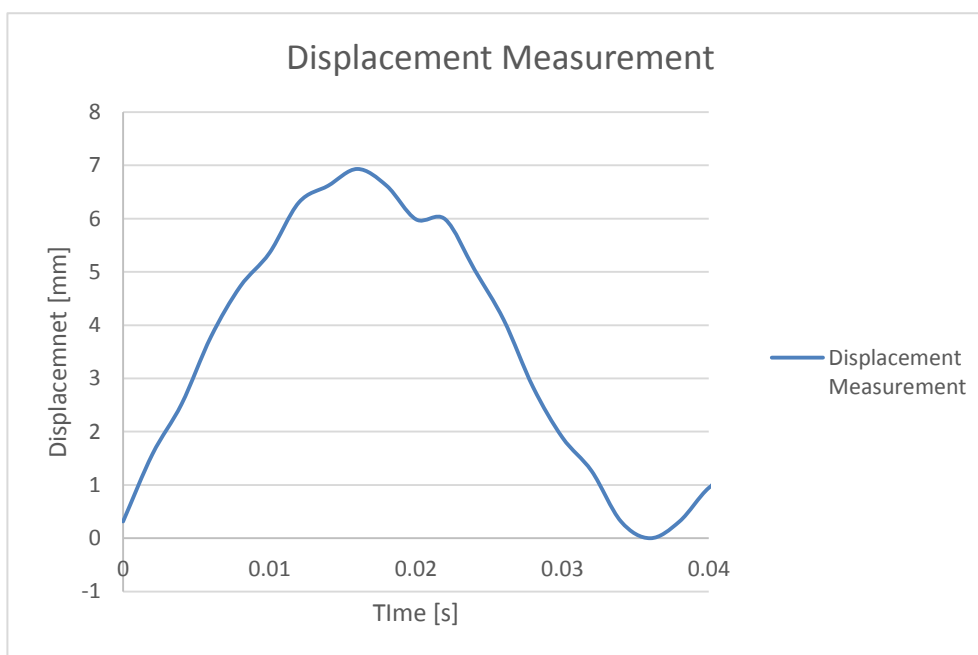
Η επόμενη μέτρηση αφορά στο ηλεκτρικό δυναμικό που παράγεται από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι επειδή η κάρτα NI 9220 δέχεται τάσεις στο εύρος από -10V έως 10V, κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων έπρεπε χρησιμοποιηθεί διαρέτη τάσης. Ο διαιρέτης αποτελούταν από μία αντίσταση των 100kΩ και μία του 1kΩ. Στο διάγραμμα που ακολουθεί, φαίνεται η απόκριση του επιθέματος.



**Σχήμα 4-16. Διάγραμμα παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα κατά τη διάρκεια μιας κρούσης.**

Παρατηρείται ότι η μέτρηση της ηλεκτρικής τάσης είναι ένα σήμα με πλάτος περίπου ίσο με 750V, ενώ η διάρκεια του είναι ίση με 0.028s. Ο πιθανότερος λόγος για τον οποίο η διάρκεια του σήματος της τάσης είναι μικρότερη από τη διάρκεια της κρούσης είναι επειδή ο διαιρέτης τάσης λειτουργεί εν μέρει σαν ηλεκτρικό φορτίο και έτσι κάποια από την ενέργεια που παράγεται καταναλώνεται στις αντιστάσεις του. Η επίδραση των αντιστάσεων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του διαιρέτη τάσης μελετάται στην εργασία (paper) που διενεργείται στο πλαίσιο του project ΕνΑυΣυ [28] .

Η επόμενη μέτρηση που παρατίθεται είναι η βύθιση του σημείου επαφής της δοκού και του βραχίονα κατά τη διάρκεια μιας κρούσης. Η μέτρηση αυτή προέκυψε μετά τη χρήση ειδικού κώδικα που συντέθη από τον Σπύρο Κομητόπουλο. Ο κώδικας μπορεί να διαβάσει αρχεία εικόνων από την κάμερα και να εκτιμήσει την απόσταση που καλύπτει το σημείο επαφής των δύο σωμάτων, μετρώντας τα pixels κατά τα οποία μετακινήθηκε το σημείο στο πλαίσιο της εικόνας. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι το σημείο στο οποίο έλαβε χώρα η κρούση είχε μετατόπιση με πλάτος τα 7mm και διάρκεια τα 0.036s. Τα αποτελέσματα της παραπάνω επεξεργασίας φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



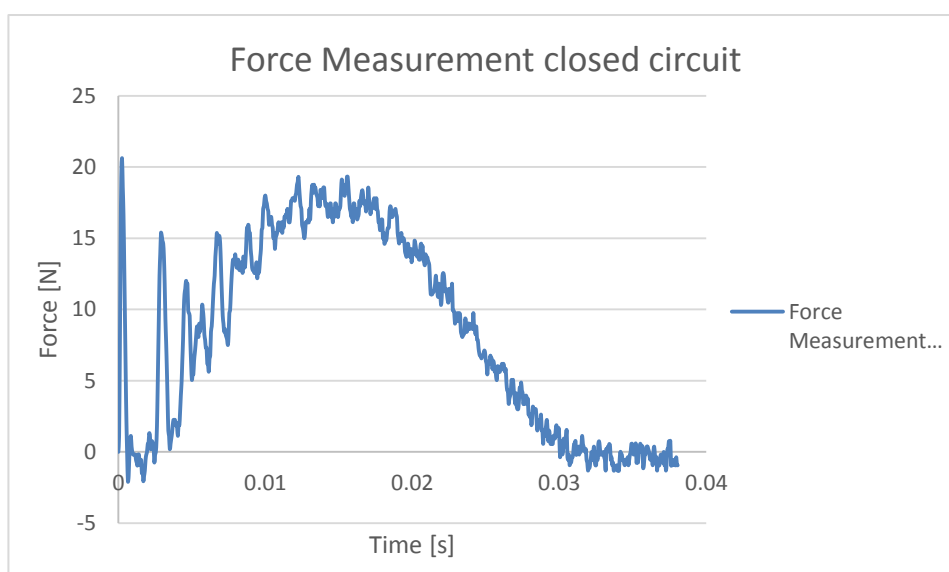
**Σχήμα 4-17. Διάγραμμα μετατόπισης του σημείου επαφής ανάμεσα στη δοκό και τον βραχίονα κατά τη διάρκεια μιας κρούσης.**

Από τα σήματα της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης καθώς και της βύθισης, φαίνεται εκ πρώτης όψεως ότι μία ιδιοσυχνότητα είναι εκείνη που κυριαρχεί στην απόκριση του συστήματος δοκού-επιθέματος. Αυτό το εύρημα δίνει και βάση στην υπόθεση που έγινε στο Κεφάλαιο 2, ότι δηλαδή η πρώτη ιδιοσυχνότητα είναι εκείνη που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

## Πείραμα απόκρισης συστήματος δοκού-επιθέματος σε σύνδεση με κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας

Τα τελευταία πειράματα, που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, είναι εκείνα που εξυπηρετούν στη μελέτη του πλήρους συστήματος για την απομάστευση ενέργειας. Δηλαδή, σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που προκύπτουν κατά τη διάρκεια μιας κρούσης, η οποία τροφοδοτεί με ενέργεια το σύστημα δοκού-επιθέματος-κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας. Σκοπός αυτών των πειραμάτων, είναι η σύγκριση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα που δίνει η συνδυασμένη χρήση των μοντέλων του μηχανικού υποσυστήματος στο Abaqus, των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 2.4.2 και του μοντέλου του κυκλώματος στο Pspice. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε κατά την διάρκεια της εργασίας αυτής, μπορεί να λάβει ως είσοδο είτε την ταχύτητα του επικρουστήρα πριν από την κρούση, είτε το προφίλ της δύναμης που καταπονεί τη δοκό. Από την άλλη πλευρά, έξοδος θεωρείται η ηλεκτρική τάση που αποθηκεύεται στα άκρα του πυκνωτή του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας. Η τάση του πυκνωτή είναι το πλέον σημαντικό μέγεθος, καθώς δείχνει το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στο κύκλωμα μετά από μία μεμονωμένη κρούση. Επίσης, όπως αναφέρεται και στην Παράγραφο 3.4.3, η τάση του πυκνωτή είναι το μέγεθος εκείνο που καθορίζει την ενεργοποίηση ή μη του διακόπτη που επιτρέπει την απόδοση ενέργειας στην έξοδο του κυκλώματος. Άλλωστε, ο βασικότερος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός υπολογιστικού εργαλείου που θα μπορεί να προβλέπει ικανοποιητικά το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μία κρούση.

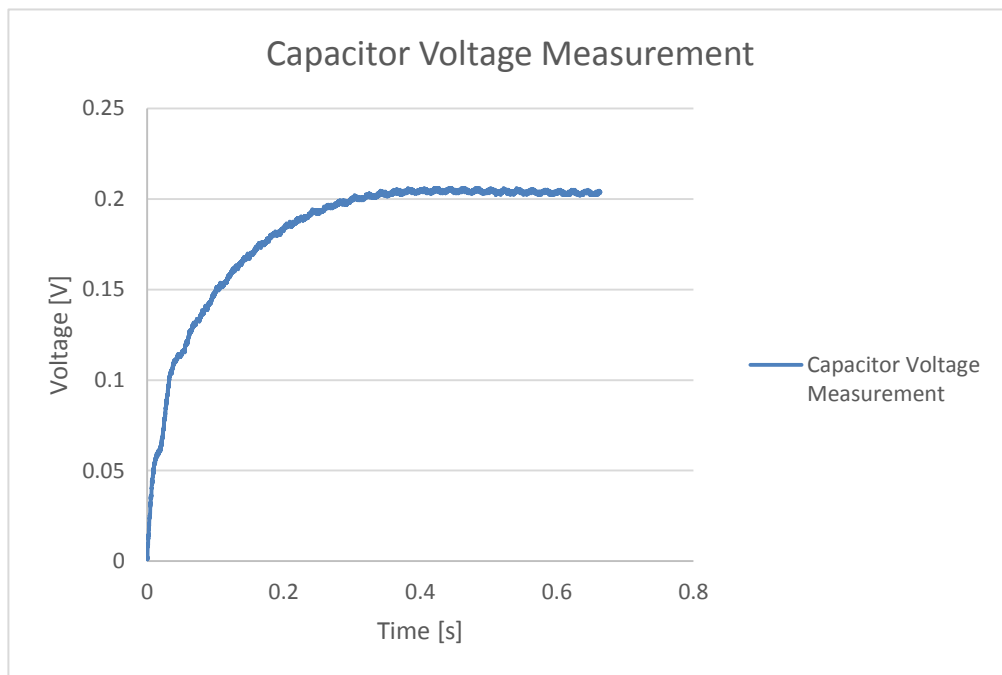
Οι μετρήσεις που παρατίθενται στη συνέχεια αφορούν και πάλι κρούση στην οποία η αρχική ταχύτητα του βραχίονα είναι ίση με 0.78m/s. Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη υποενοότητα, η πρώτη μέτρηση που παρουσιάζεται είναι αυτή της δύναμης που προκύπτει ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης του βραχίονα με τη δοκό. Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται η γραφική παράσταση της δύναμης σε συνάρτηση με το χρόνο.



Σχήμα 4-18. Διάγραμμα αναπτυσσόμενης δύναμης κατά τη διάρκεια μιας κρούσης (κλειστό κύκλωμα).

Παρατηρείται πως η λειτουργία του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας δεν έχει σημαντική επίδραση στη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την κρούση. Δηλαδή, το προφίλ της δύναμης έχει και πάλι πλάτος κοντά στα 20N και διάρκεια ίση με 0.032s.

Η τελευταία μέτρηση που παρατίθεται στο σημείο αυτό, είναι η μέτρηση της ηλεκτρικής τάσης που αναπτύσσεται στους ακροδέκτες του πυκνωτή του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας. Στο παρακάτω σχήμα, παρατίθεται το διάγραμμα που παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη της τάσης του πυκνωτή.



**Σχήμα 4-19. Διάγραμμα ηλεκτρικής τάσης στους ακροδέκτες του πυκνωτή του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας κρούσης.**

Από το παραπάνω σχήμα, φαίνεται ότι η ενέργεια που συσσωρεύεται στον πυκνωτή του κυκλώματος είναι ικανή να ανεβάσει την τάση στα άκρα του πυκνωτή μέχρι τα 0.2V. Σημαντική παρατήρηση είναι το γεγονός ότι μέχρι το πέρας της κρούσης η τάση έχει φτάσει περίπου μέχρι τα 0.1V. Αυτό σημαίνει ότι μεγάλο μέρος της ενέργειας που απορροφάται από το κύκλωμα οφείλεται στην ταλάντωση της δοκού μετά από το τέλος της κρούσης.

## 5 Αποτελέσματα

### 5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας. Σκοπός της παραγράφου αυτής είναι η σύγκριση των υπολογιστικών εκτιμήσεων με τις πειραματικές μετρήσεις από τη διάταξη. Έτσι, αναδεικνύονται οι επιτυχίες και οι αδυναμίες των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3.

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου που αποτελεί αντικείμενο μελέτης στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, αποδείχθηκε απαραίτητη η διενέργεια πολλών πειραμάτων και αντίστοιχα η δημιουργία πολλών μοντέλων που διαιρούν το πρόβλημα σε μικρότερες συνιστώσες. Επιπλέον, κάθε μοντέλο αναπτύχθηκε σε διάφορες εκδοχές, προκειμένου να αποκαλυφθούν και οι περιορισμοί των υπολογιστικών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν. Επομένως, στο κεφάλαιο αυτό, θα παρατεθούν όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτήν τη διαδικασία, έτσι ώστε να γίνει αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

Αρχικά, θα παρουσιαστεί η σύγκριση των μετρηθέντων ιδιοτιμών της δοκού με τις εκτιμήσεις από τα αντίστοιχα μοντέλα στο Abaqus. Στη συνέχεια, θα ελεγχθεί η ικανότητα των μοντέλων του μηχανικού υποσυστήματος να προβλέψουν την συμπεριφορά του όταν το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα είναι ανοικτοκυκλωμένο. Και τέλος, θα εξακριβωθεί η ικανότητα της χρήσης των μοντέλων στο Abaqus σε συνδυασμό με τις εξισώσεις της παραγράφου 2.4.2 αλλά και του μοντέλου στο Pspice, να προσεγγίσουν την απόκριση του συνολικού συστήματος απομάστευσης ενέργειας.

### 5.2 Σύγκριση μοντέλου δοκού για την εύρεση ιδιοσυχνοτήτων με πειραματικές μετρήσεις

Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία ενός μοντέλου που θα μπορεί να μελετήσει την απόκριση της συνολικής διάταξης, είναι η κατασκευή ενός μοντέλου που μπορεί να προσεγγίσει τη δυναμική συμπεριφορά της δοκού. Οι παραμορφώσεις που υφίσταται η δοκός κατά τη διάρκεια μιας κρούσης, είναι το αίτιο που προκαλεί τελικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Οι παραμορφώσεις, που παρατηρούνται στο πείραμα, προκύπτουν από την επαλληλία των συνεισφορών των ιδιομορφών που διεγείρονται κατά τη διάρκεια της κρούσης. Επομένως, η ακριβής προσέγγιση των ιδιομορφών ή ισοδύναμα των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού, είναι λογικό να οδηγήσει και σε ικανοποιητική εκτίμηση των παραμορφώσεων που ενδιαφέρουν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι τιμές των ιδιοτιμών προκύπτουν από τη δυσκαμψία και τη μάζα της κατασκευής. Δεδομένου ότι το υλικό της δοκού είναι ορθότροπο και οι στρώσεις έχουν διαφορετικό προσανατολισμό, η δυσκαμψία διαμορφώνεται από 4 ελαστικές σταθερές (E11, E22, G12, ν12 - Πίνακας 3-1). Για το υλικό της δοκού οι ελαστικές σταθερές έχουν προσδιοριστεί από στατικά πειράματα (Plagianakos, Karachalios [30]). Δεδομένου

ότι η πυκνότητα προσδιορίζεται με ακρίβεια από τη γεωμετρία και τη μέτρηση του βάρους της δοκού, η σύγκριση υπολογιστικών - πειραματικών ιδιοτιμών δείχνει το βαθμό ακρίβειας της μοντελοποίησης της δοκού.

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 3.3.1, αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικές εκδοχές του μοντέλου της δοκού στο Abaqus. Η διαφοροποίηση των δύο εκδοχών εντοπίζεται στο είδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Στο ένα μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα στοιχεία (solid), ενώ στο δεύτερο μοντέλο επιλέχθηκαν στοιχεία κελύφους (continuum shell). Τα μοντέλα αυτά συγκρίθηκαν με την πειραματική μέτρηση της πρώτης ιδιοσυχνότητας της δοκού. Υπενθυμίζεται ότι η πρώτη ιδιοσυχνότητα είναι εκείνη που περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι εκτιμήσεις των δύο μοντέλων και η μέτρηση της πρώτης ιδιοσυχνότητας.

**Πίνακας 5-1. Σύγκριση πειραματικής μέτρησης της πρώτης ιδιοσυχνότητας με τις εκτιμήσεις των δύο εκδοχών του μοντέλου της δοκού.**

|   | 1 <sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα |
|---|------------------------------|
| Πειραματική μέτρηση                                 | 89.365Hz                     |
| Μοντέλο με τρισδιάστατα στοιχεία (solid, 3D stress) | 95.731Hz                     |
| Μοντέλο με στοιχεία κελύφους (continuum shell)      | 95.103Hz                     |

Από τα παραπάνω στοιχεία, είναι εμφανές ότι οι δύο εκδοχές προσεγγίζουν σε καλό βαθμό την πραγματική ιδιοσυχνότητα της δοκού. Ωστόσο, και οι δύο εκδοχές προβλέπουν μεγαλύτερη πρώτη ιδιοσυχνότητα από αυτήν που μετρήθηκε στο πείραμα. Επομένως, είναι λογικό, στη συνέχεια, να προβλέπουν πως το σήμα της κρουστικής δύναμης θα έχει μειωμένη διάρκεια και αυξημένο πλάτος.

Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει τις 4 πρώτες ιδιοσυχνότητες της δοκού, όπως προβλέπονται από τις δύο εκδοχές του μοντέλου της δοκού.

**Πίνακας 5-2. Σύγκριση εκτιμήσεων των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού από τις δύο εκδοχές του μοντέλου.**

| Ιδιοσυχνότητα                | Μοντέλο με τρισδιάστατα στοιχεία (solid, 3D stress) | Μοντέλο με στοιχεία κελύφους (continuum shell) |
|------------------------------|---|--|
| 1 <sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα | 95.731Hz  | 95.103Hz                                       |
| 2 <sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα | 597.86Hz  | 592.23Hz                                       |
| 3 <sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα | 648.83Hz  | 941.61Hz                                       |
| 4 <sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα | 1668.4Hz  | 1666.2Hz                                       |

Από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται πως οι δύο εκδοχές προβλέπουν παραπλήσιες τιμές για όλες τις ιδιοσυχνότητες με εξαίρεση την τρίτη, η οποία αντιστοιχεί σε στρεπτική

ιδιομορφή. Επίσης, σε όλες τις υπόλοιπες ιδιοσυχνότητες, η εκδοχή με τα solid στοιχεία προβλέπει μεγαλύτερες τιμές από το μοντέλο με τα στοιχεία κελύφους. Η παρατήρηση αυτή ήταν αναμενόμενη καθώς τα solid στοιχεία συνήθως εμφανίζουν αυξημένη δυσκαμψία σε μοντέλα όπου η μία διάσταση του μοντέλου είναι σαφώς μικρότερη από τις υπόλοιπες. Ωστόσο, φαίνεται πως η χρήση της επιλογής για προστασία έναντι του hour-glassing περιορίζει αυτό σφάλμα.

### **5.3 Σύγκριση απόκρισης μοντέλου δοκού-επιθέματος με πειραματικές μετρήσεις για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος**

Τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου έδειξαν ότι, αν και υπάρχει κάποιο σφάλμα στην εκτίμηση των ιδιοσυχνότητων της δοκού, το Abaqus μπορεί όντως να μοντελοποιήσει με ικανοποιητική ακρίβεια τη δοκό. Επομένως, σειρά, τώρα, έχουν τα μοντέλα για την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Εδώ υπάρχουν δύο βασικά μοντέλα. Το πρώτο έχει ως είσοδο την μέτρηση της δύναμης από τα πειράματα, ενώ το δεύτερο έχει ως είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα λίγο πριν την κρούση.

Τα δύο αυτά μοντέλα έχουν με τη σειρά τους πολλές εκδοχές. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η κατασκευή ενός μοντέλου που να προβλέπει ικανοποιητικά την απόκριση του μηχανικού υποσυστήματος, αποδείχθηκε αρκετά δύσκολη. Επομένως, κάθε εκδοχή των δύο βασικών μοντέλων απέκλειε έναν πιθανό παράγοντα που θα μπορούσε να οδηγεί στην αστοχία των μοντέλων. Η διαδικασία δημιουργίας νέων εκδοχών τερματίστηκε όταν τελικά βρέθηκε ο λόγος που προκαλούσε τις μεγάλες αποκλίσεις.

Υπενθυμίζεται ότι η επιτυχία του μοντέλου που δέχεται ως είσοδο την δύναμη εξαρτάται από τη σωστή εκτίμηση δύο μεγεθών. Το πρώτο είναι η παραγόμενη ηλεκτρική τάση στα άκρα του επιθέματος καθόλη τη διάρκεια της κρούσης και το δεύτερο είναι η βύθιση του σημείου επαφής για το ίδιο χρονικό διάστημα. Τα δύο αυτά μεγέθη έχουν επιλεγεί στρατηγικά. Η βύθιση του σημείου κρούσης σε συνδυασμό με τη δύναμη που εφαρμόζεται στο σημείο αυτό, περιγράφουν το έργο που καταπονεί τη δοκό κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης με τον βραχίονα. Επομένως, είναι ένας καλός δείκτης για την ακρίβεια με την οποία το μοντέλο μπορεί να προσεγγίσει την κατανομή των μηχανικών καταπονήσεων σε όλη τη δοκό όπως οι μηχανικές τάσεις και οι παραμορφώσεις. Από την άλλη πλευρά, η ηλεκτρική τάση στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος μπορεί να εξακριβώσει την επιτυχία ή μη του μοντέλου να μεταφράσει τις παραμορφώσεις αυτές σε ηλεκτρικό δυναμικό.

Όσον αφορά το μοντέλο που δέχεται ως είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση, για αυτό ισχύουν όλα όσα ειπώθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση προστίθεται άλλος ένας στόχος που θα πρέπει να εκτιμηθεί σωστά, ο οποίος είναι η δύναμη που αναπτύσσεται ανάμεσα στα δύο σώματα.

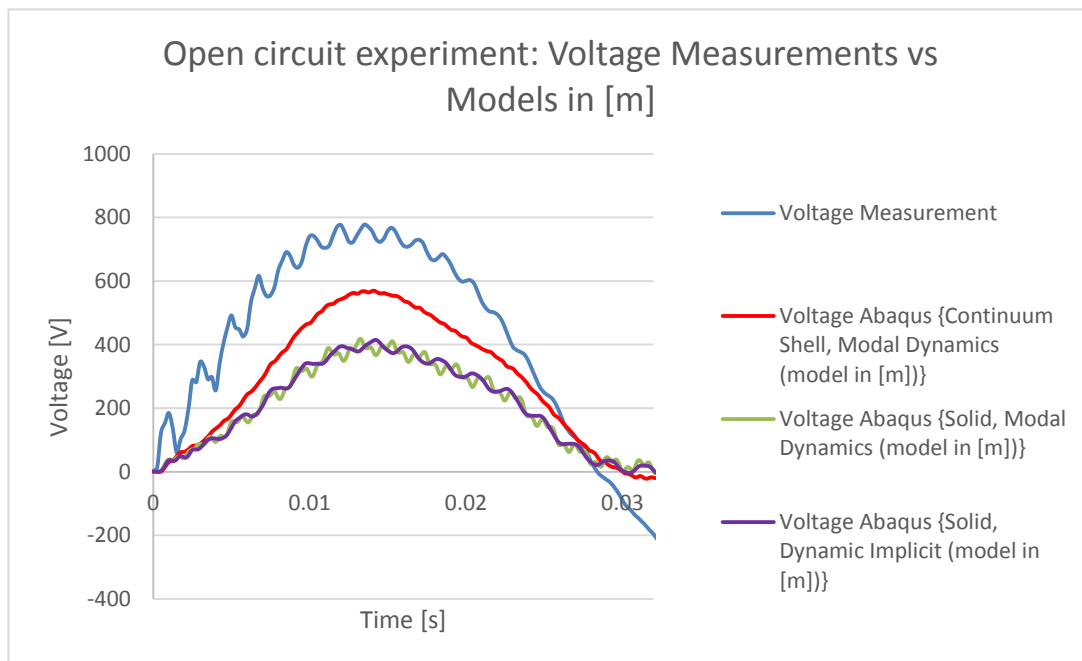
### 5.3.1 Μοντέλο δοκού-επιθέματος με είσοδο την κρουστική δύναμη

Όπως σημειώθηκε ανωτέρω, το μοντέλο αυτό έχει κατασκευαστεί σε πολλές εκδοχές, μέχρι να βρεθεί η τελική του μορφή. Οι εκδοχές που δημιουργήθηκαν διαφοροποιούνται ως προς τρεις διαφορετικούς παράγοντες. Ο πρώτος είναι το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους. Τα δύο είδη πεπερασμένων στοιχείων είναι τα τριδιάστατα 3D stress και τα στοιχεία κελύφους Continuum shell. Ο δεύτερος παράγοντας είναι το είδος του επιλύτη που επιλέγεται για την εκτίμηση της απόκρισης του μηχανικού υποσυστήματος. Χρησιμοποιούνται δύο επιλύτες. Ο ένας ονομάζεται Dynamic Implicit και ο δεύτερος Modal Dynamics. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι ο επιλύτης Modal Dynamics χρησιμοποιεί τις ιδιομορφές της κατασκευής για να προσεγγίσει την απόκριση του συστήματος, ενώ ο επιλύτης Dynamic Implicit επιλύει όλες τις εξισώσεις χωρίς γνώση των ιδιομορφών. Και ο τελευταίος παράγοντας είναι οι μονάδες μήκους με τις οποίες γίνεται η μοντελοποίηση.

Επειδή, αποδείχθηκε ότι τη μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα είχε η επιλογή των μονάδων μήκους, οι εκδοχές θα χωριστούν σε αυτές που είναι εκφρασμένες σε [m] και σε αυτές που είναι εκφρασμένες σε [mm].

#### Εκδοχές μοντέλου σε [m]

Όπως είναι λογικό, οι πρώτες προσπάθειες για την μοντελοποίηση του συστήματος δοκού-επιθέματος έγιναν με χρήση μονάδων SI. Άρα, και οι διαστάσεις όλων των εκδοχών του μοντέλου ήταν εκφρασμένες σε [m]. Στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζονται οι προβλέψεις όλων των εκδοχών που επιχειρήθηκαν με αυτές τις μονάδες μέτρησης για την παραγόμενη ηλεκτρική τάση.



Σχήμα 5-1. Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από όλες τις εκδοχές του μοντέλου με είσοδο τη δύναμη στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [m]).



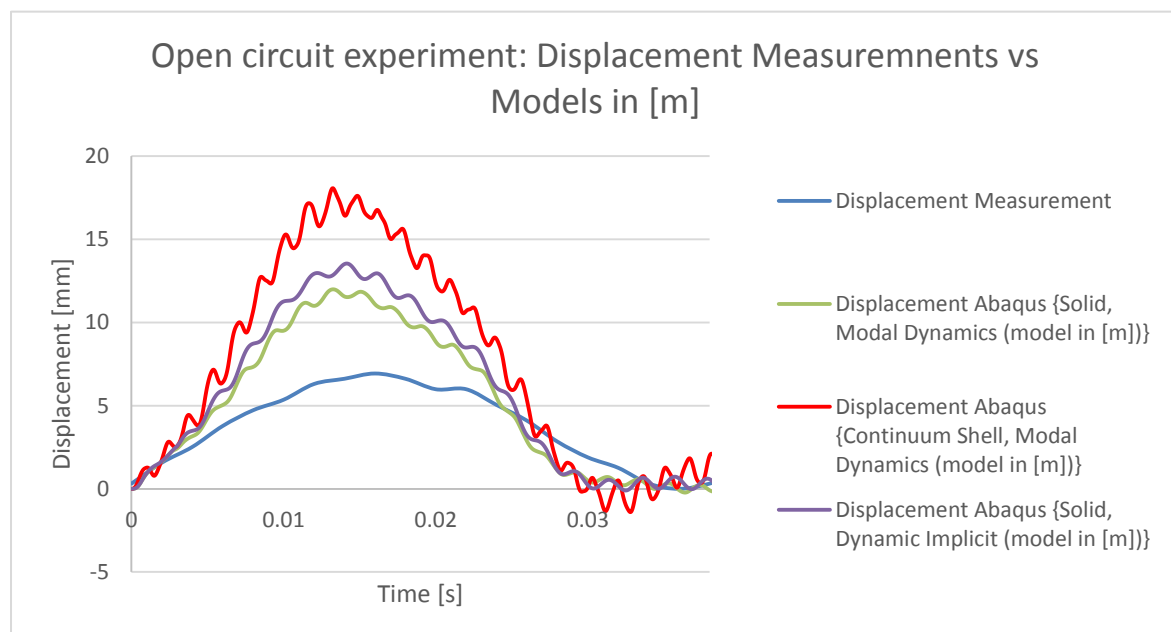
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν πολλές παρατηρήσεις. Η πρώτη από αυτές, η οποία είναι και η πιο σημαντική, είναι ότι όλα τα μοντέλα προβλέπουν χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικού δυναμικού από αυτές που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Μάλιστα, ακόμα και στην καλύτερη περίπτωση, η απόκλιση μεταξύ πειράματος και εκτίμησης κυμαίνεται κοντά στα 200V για το πλάτος της καμπύλης.

Η δεύτερη παρατήρηση σχετίζεται με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων. Είναι εμφανές ότι τα μοντέλα που χρησιμοποιούν στοιχεία κελύφους προβλέπουν μεγαλύτερη ηλεκτρική τάση στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού. Ο λόγος για αυτό θα φανεί άμεσα μετά το επόμενο σχήμα.

Η τρίτη παρατήρηση αφορά τη χρήση των δύο διαφορετικών επιλυτών. Από τις δύο καμπύλες με τα τρισδιάστατα στοιχεία, φαίνεται καθαρά ότι οι δύο επιλύτες δίνουν πολύ κοντινές προβλέψεις και επομένως, μπορούν αυτόματα να αποκλειστούν ως παράγοντας αστοχίας του μοντέλου.

Μία επιπλέον παρατήρηση είναι το γεγονός ότι η διάρκεια της παραγωγής ηλεκτρικού δυναμικού από το επίθεμα φαίνεται να είναι συντομότερη στα πειράματα από ότι στα μοντέλα. Ωστόσο, το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότητα στο γεγονός ότι περνάει ρεύμα μέσα από τον διαιρέτη τάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η εικασία αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι η διάρκεια της κρουστικής δύναμης και η βύθιση του σημείου επαφής είναι μεγαλύτερες από αυτήν της ηλεκτρικής τάσης στις πειραματικές μετρήσεις και ίσες με αυτές που προβλέπονται από τα μοντέλα.

Στο Σχήμα 5-2, παρατίθενται οι προβλέψεις όλων των εκδοχών για τη βύθιση του σημείου επαφής μεταξύ βραχίονα και δοκού.



**Σχήμα 5-2. Εκτίμηση βύθισης σημείου κρούσης από όλες τις εκδοχές του μοντέλου με είσοδο τη δύναμη στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [m]).**

Το γράφημα της βύθισης του σημείου της κρούσης, παράγει με τη σειρά του μια σειρά από σημαντικές παρατηρήσεις. Ξεκινώντας και πάλι από τη σημαντικότερη παρατήρηση, όλες οι υπολογιστικές εκδοχές υπερεκτιμούν το μέγεθος της βύθισης του σημείου επαφής. Σε αυτήν την περίπτωση, φαίνεται ότι τα μοντέλα που απέτυχαν περισσότερο στην προσέγγιση του ηλεκτρικού δυναμικού, αποκλίνουν λιγότερο στην εκτίμηση της βύθισης. Αυτό δείχνει ότι μέχρι στιγμής όλες οι εκδοχές αστοχούν διπλά. Δηλαδή, προβλέπουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις, οι οποίες όμως οδηγούν σε χαμηλότερα ηλεκτρικά δυναμικά. Αυτό σημαίνει ότι οι εκδοχές αυτές εμφανίζουν πρόβλημα και στο κομμάτι των μηχανικών παραμορφώσεων αλλά και στην μετατροπή τους σε ηλεκτρική τάση.

Η επόμενη παρατήρηση συνδέεται με τα είδη των πεπερασμένων στοιχείων. Τα μοντέλα που είναι κατασκευασμένα από στοιχεία κελύφους προβλέπουν μεγαλύτερη βύθιση του σημείου της κρούσης. Αυτό σε συνδυασμό με την αντίστοιχη παρατήρηση στο γράφημα του παραγόμενου ηλεκτρικού δυναμικού ενισχύει τον ισχυρισμό που έγινε στην Παράγραφο 5.2. Δηλαδή, είναι φανερό πως η χρήση των στοιχείων κελύφους οδηγεί σε ένα μοντέλο το οποίο είναι πιο εύκαμπτο από το αντίστοιχο μοντέλο που φέρει στοιχεία 3D stress. Αυτό το γεγονός, συνεπάγεται μεγαλύτερες μετατοπίσεις και άρα μεγαλύτερες παραμορφώσεις, που με τη σειρά τους έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ηλεκτρικό δυναμικό στην έξοδο. Επομένως, από το στοιχείο αυτό φαίνεται πως και τα δύο μοντέλα είναι εξίσου αποτυχημένα, αφού αμφότερα αστοχούν αρκετά σε μία από τις δύο προβλέψεις τους.

Η τρίτη παρατήρηση επιβεβαιώνει, ακόμα την υποψία που διατυπώθηκε στην Παράγραφο 5.2. Όπως σημειώθηκε σε εκείνο το σημείο, και τα δύο είδη πεπερασμένων στοιχείων οδηγούν σε μοντέλα που προβλέπουν κρούσεις που διαρκούν λιγότερο από τη μετρηθείσα.

Τέλος, για ακόμα μια φορά αναδεικνύεται πως η χρήση διαφορετικού επιλύτη οδηγεί σε παρόμοια αποτελέσματα.

### **Εκδοχές μοντέλου σε [mm]**

Μετά την αποτυχία των προηγούμενων εκδοχών, πραγματοποιήθηκε μια ενδελεχής έρευνα του εγχειριδίου του Abaqus για την εύρεση της αιτίας που οδηγεί σε αυτήν την απόκλιση των εκδοχών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Τελικά, η έρευνα αυτή οδήγησε σε μια προειδοποίηση των κατασκευαστών για τη λειτουργία του Abaqus. Με βάση την προειδοποίηση αυτή, υπάρχει σημαντικός κίνδυνος να εμφανίζονται γεωμετρικές αστοχίες κατά την επίλυση ενός προβλήματος στο Abaqus όταν υπάρχουν διαστάσεις εκτός των ορίων  $10^4$  και  $10^{-3}$ . Ωστόσο, η σημαντικότερη διάσταση του επιθέματος, δηλαδή το πάχος του είναι εκτός αυτών των ορίων, ενώ και το πάχος της δοκού είναι επικίνδυνα κοντά στα όρια. Επιπλέον, από το Σχήμα 5-1 φαίνεται ότι ακόμα και μικρές αλλαγές σε μετατοπίσεις και παραμορφώσεις προκαλούν αυτόματα και μεγάλες διαφορές στην εκτίμηση του παραγόμενου από το επίθεμα ηλεκτρικού δυναμικού.

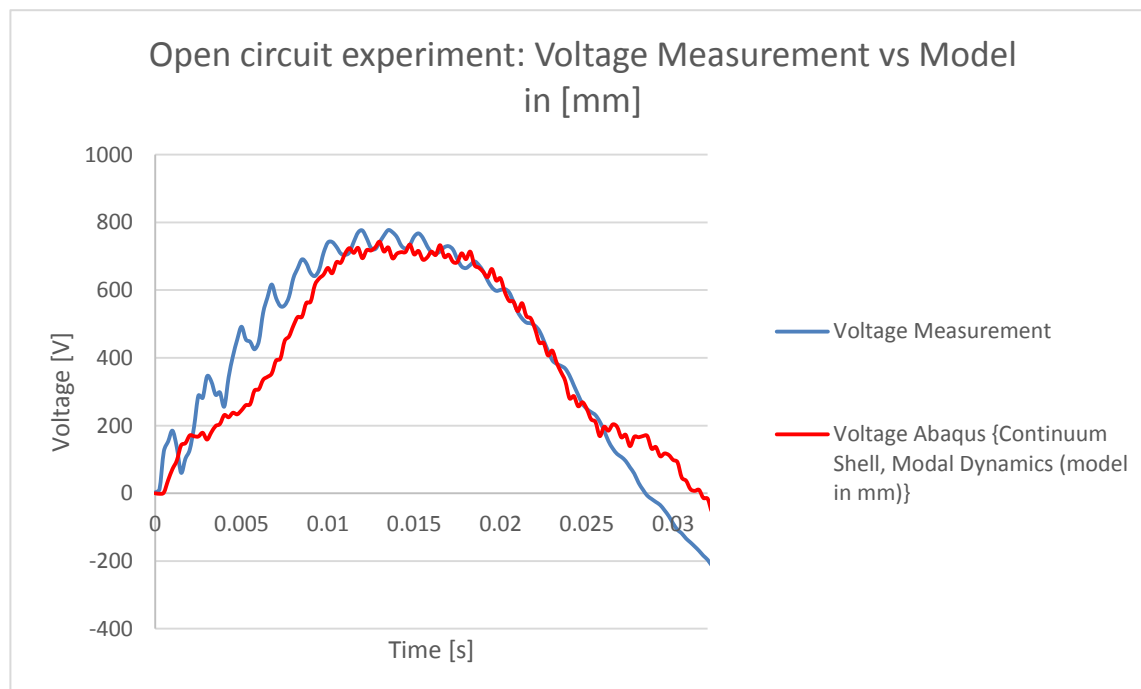
Άρα, τα παραπάνω μοντέλα κατασκευάστηκαν εκ νέου έτσι ώστε οι γεωμετρικές τους διαστάσεις να είναι εκφρασμένες σε [mm]. Η επιλογή αυτή, όμως, συνεπάγεται ότι όλες οι

ιδιότητες των υλικών θα πρέπει να εκφραστούν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε όλες οι μονάδες μέτρησης να είναι συνεπείς μεταξύ τους. Ο Πίνακας 5-3 παρουσιάζει την μετατροπή των μονάδων που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται.

**Πίνακας 5-3. Μετατροπή μονάδων μέτρησης.**

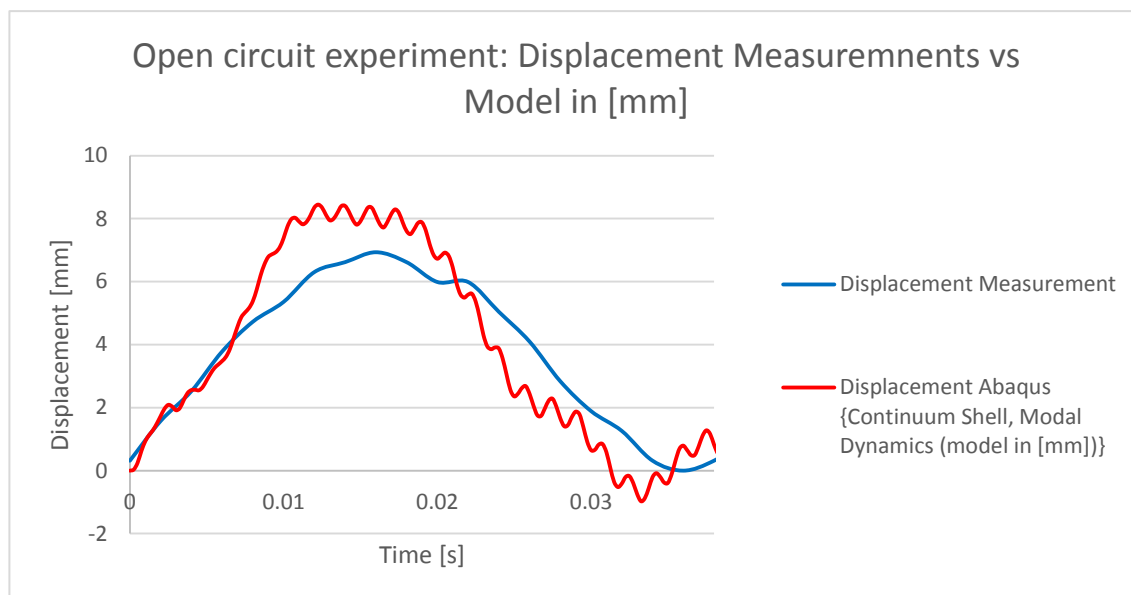
| Ιδιότητα           | Μοντέλο σε [m] | Μοντέλο σε [mm]    |
|--------------------|----------------|--------------------|
| Μήκος              | m              | mm                 |
| Δύναμη             | N              | N                  |
| Μάζα               | kg             | tonne ( $10^3$ kg) |
| Χρόνος             | s              | s                  |
| Μηχανικές Τάσεις   | Pa ( $N/m^2$ ) | MPa ( $N/mm^2$ )   |
| Ενέργεια           | J              | mJ ( $10^{-3}$ J)  |
| Πυκνότητα          | $kg/m^3$       | $tonne/mm^3$       |
| Διηλεκτρικότητα    | C/(V·m)        | C/(V·mm)           |
| Πιεζοηλεκτρικότητα | m/V            | mm/V               |

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται επίσης τα νέα αποτελέσματα που αφορούν την παραγόμενη ηλεκτρική τάση και τη βύθιση του σημείου επαφής μεταξύ βραχίονα και δοκού Σχήμα 5-3.



**Σχήμα 5-3. Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο με είσοδο τη δύναμη στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]).**

Μετά την μετατροπή των μονάδων, η βελτίωση των αποτελεσμάτων είναι ραγδαία. Είναι εμφανές ότι η πρόβλεψη του πλάτους της καμπύλης είναι πολύ κοντά στις πειραματικές μετρήσεις. Η μόνη απόκλιση πλέον ανιχνεύεται στη διάρκεια του σήματος, αλλά όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η εκτίμηση αυτή μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη ασφάλεια μετά και την εξέταση της βύθισης του σημείου της κρούσης, καθώς το σήμα του ηλεκτρικού δυναμικού επηρεάζεται από την ύπαρξη του διαιρέτη τάσης.



**Σχήμα 5-4. Εκτίμηση βύθισης σημείου κρούσης από μοντέλο με είσοδο τη δύναμη στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]).**

Για ακόμη μια φορά, παρατηρείται σημαντική βελτίωση και στην πρόβλεψη της βύθισης του σημείου επαφής μεταξύ βραχίονα και δοκού. Εδώ, φαίνεται, επίσης, πως το μοντέλο εξακολουθεί να προβλέπει μικρότερη χρονική διάρκεια της βύθισης από το πραγματικό σύστημα. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό γιατί αποτελεί ένδειξη ότι οι αλλαγές οδήγησαν, όντως, σε συνεπές σύστημα μονάδων μέτρησης, καθώς τα χρονικά χαρακτηριστικά της απόκρισης παραμένουν ίδια.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στα δύο παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται μόνο η απόκριση της εκδοχής του μοντέλου με τα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους και τον επιλύτη Modal Dynamics, καθώς αυτή η εκδοχή έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Για τον ίδιο λόγο, από εδώ και πέρα όλα τα αποτελέσματα ακολουθούν την επιλογή της εκδοχής που χρησιμοποιεί τον επιλύτη Modal Dynamics και τα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους.

### 5.3.2 Μοντέλο δοκού-επιθέματος με είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση

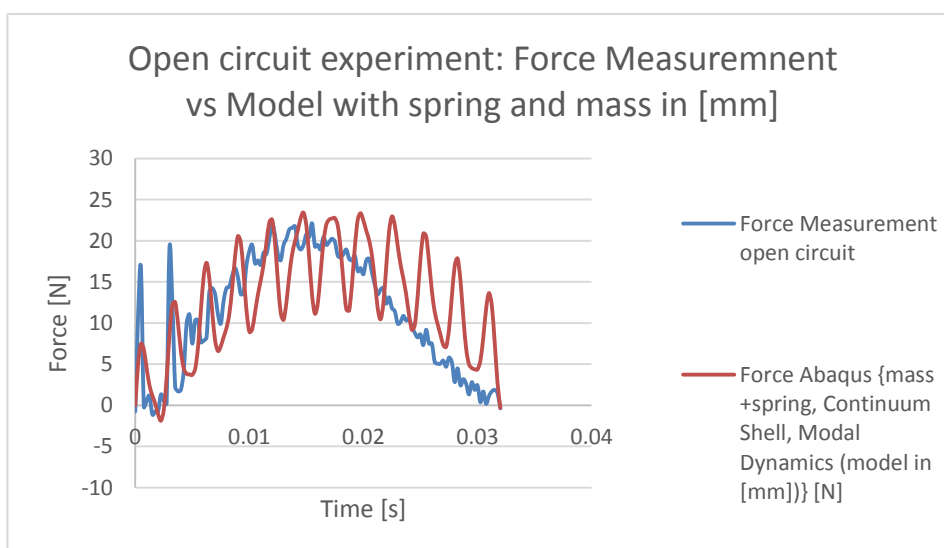
Μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου του μηχανικού υποσυστήματος με είσοδο τη δύναμη, ήταν πλέον δυνατή η αντικατάσταση της από το μοντέλο του βραχίονα και της επαφής κατά τη διάρκεια της κρούσης. Όπως επισημάνθηκε στην Παράγραφο 3.3.3, για την μοντελοποίηση του βραχίονα χρησιμοποιείται μια συγκεντρωμένη μάζα 0.28kg. Η μάζα

αυτή σε συνδυασμό με την αρχική ταχύτητα του βραχίονα (0.78m/s), δίνουν την πληροφορία της ορμής του βραχίονα αλλά και της κινητικής τους ενέργειας. Όσον αφορά στην επαφή, αυτή μοντελοποιείται με τη χρήση ενός ελατηρίου. Η σταθερά του ελατηρίου δεν είναι γνωστή και εξαρτάται άμεσα από το υλικό της δοκού αλλά και από το υλικό του επικρουστήρα. Για τις ανάγκες αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας η τιμή του ελατηρίου επιλέχθηκε ως  $3 \cdot 10^4 \text{N/m}$ , η οποία είναι εντός των φυσιολογικών τιμών για τέτοιου είδους εφαρμογές.

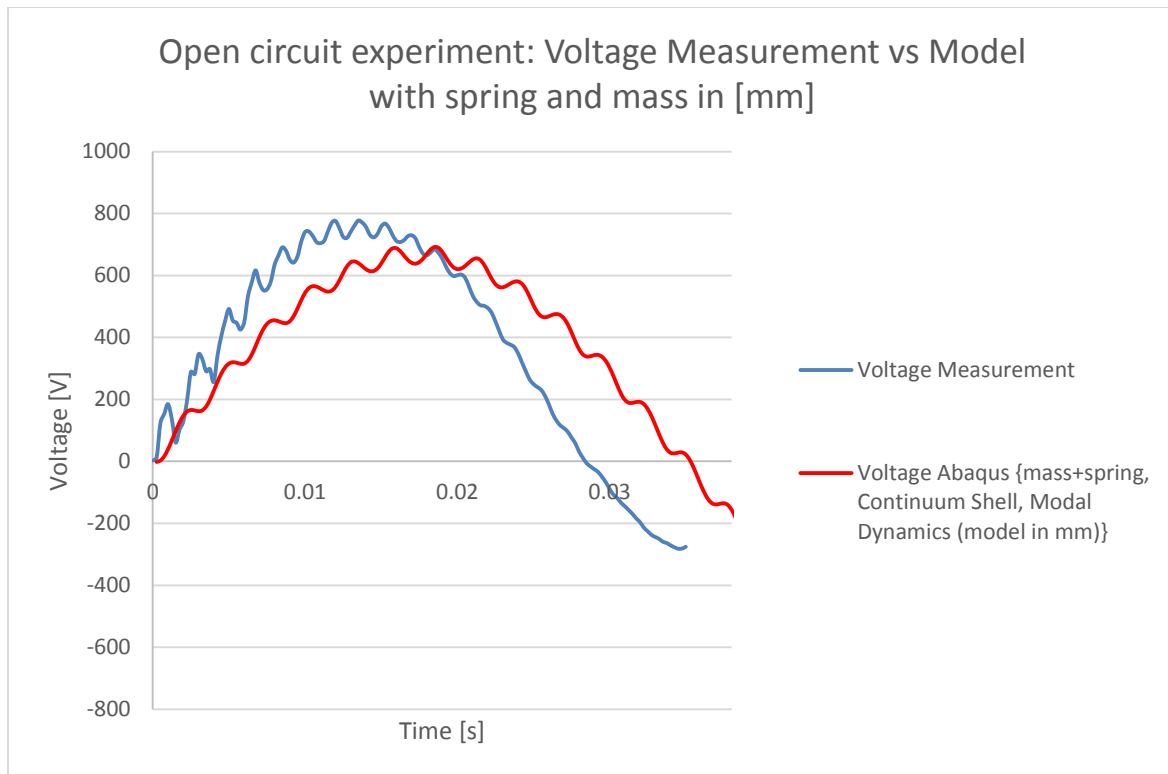
Στην παράγραφο αυτή, δεν επαναλαμβάνεται η διαδικασία για την εύρεση της βέλτιστης εκδοχής που παρουσιάστηκε προηγουμένως, αλλά υιοθετείται απευθείας η τελευταία (Modal Dynamics, στοιχεία κελύφους). Όπως τονίστηκε προηγουμένως είναι απαραίτητη η μετατροπή των μονάδων τόσο στις διαστάσεις, όσο και σε όλες τις ιδιότητες των υλικών. Αυτή η μετατροπή γίνεται με όμοιο τρόπο τόσο στη σταθερά ελατηρίου όσο και στη συγκεντρωμένη μάζα που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση.

Σε αντίθεση με το προηγούμενο μοντέλο, εδώ, εκτός από την επαρκώς ακριβή εκτίμηση της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης και της βύθισης του σημείου εφαρμογής του κρουστικού φορτίου, θα πρέπει να προσεγγιστεί ικανοποιητικά και το προφίλ της δύναμης που αναπτύσσεται λόγω της κρούσης.

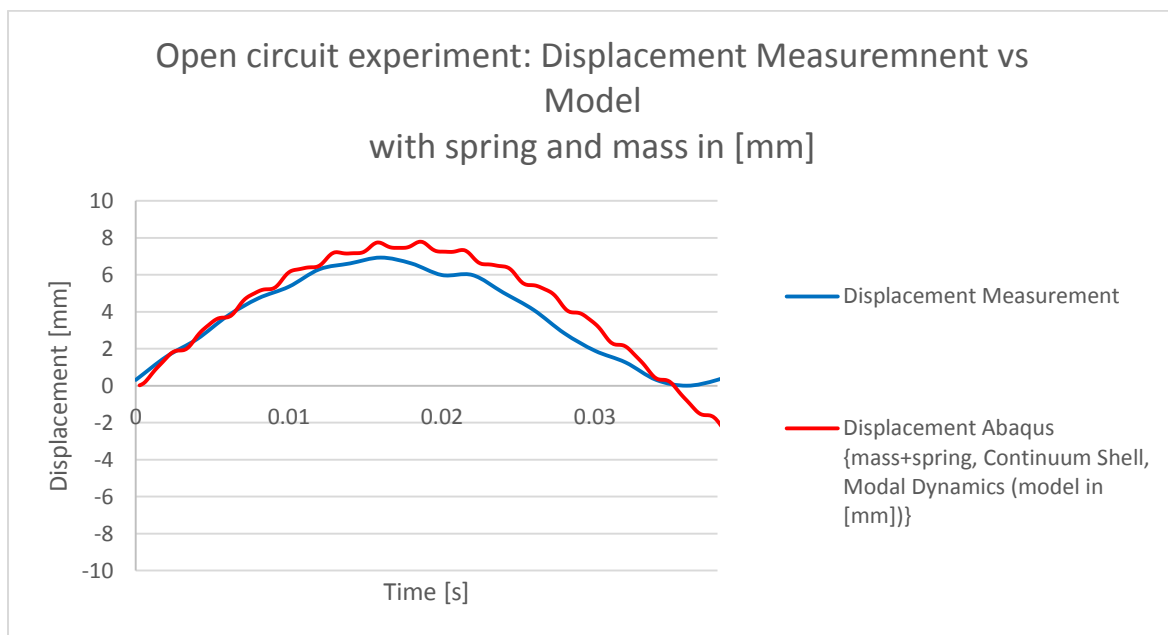
Υπενθυμίζεται ότι τόσο αυτό το μοντέλο όσο και το μοντέλο της προηγούμενης παραγράφου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ολοκληρωμένα υπολογιστικά εργαλεία για τη μελέτη του ίδιου φαινομένου. Η διαφοροποίησή τους, ωστόσο, είναι σημαντική γιατί ανάλογα με το αν είναι διαθέσιμη η πληροφορία του προφίλ της δύναμης ή της αρχικής ταχύτητας του βραχίονα, θα πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη λύση. Στα Σχήματα 5-5, 5-6 και 5-7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου όσον αφορά την εκτίμηση της δύναμης της κρούσης, της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης και της βύθισης του σημείου επαφής μεταξύ βραχίονα και δοκού. Ακόμα, τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.



**Σχήμα 5-5. Εκτίμηση κρουστικής δύναμης από μοντέλο με είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]).**



**Σχήμα 5-6.** Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο με είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]).



**Σχήμα 5-7.** Εκτίμηση βύθισης σημείου κρούσης από μοντέλο με είσοδο την ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση στο Abaqus για την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος (διαστάσεις εκφρασμένες σε [mm]).

Προκύπτουν, λοιπόν, τα εξής συμπεράσματα. Πρώτον, η μοντελοποίηση της επαφής του βραχίονα και της δοκού μόνο με ένα ελατήριο, φαίνεται πως μπορεί να εκτιμήσει σχετικά καλά την βασική συχνότητα της παραγόμενης δύναμης καθώς και το πλάτος αυτής.

Ωστόσο, εισάγει και μία δεύτερη συχνότητα η οποία δεν υπάρχει στις πειραματικές μετρήσεις. Πιθανότατα η επίδραση αυτής της συχνότητας θα μπορούσε να μετριασθεί με την συμπλήρωση του μοντέλου της επαφής με έναν αποσβεστήρα. Δεύτερον, όσον αφορά το παραγόμενο δυναμικό βλέπουμε ότι επειδή έχει αυξηθεί η διάρκεια της κρούσης λόγω της επιλογής του ελατηρίου, η μέγιστη τιμή της ηλεκτρικής τάσης που παράγεται κατά την κρούση είναι ελαφρώς μειωμένη σε σχέση με τα αποτελέσματα του προηγούμενου μοντέλου, αλλά και πάλι βρίσκεται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Τέλος, λόγω της αύξησης της διάρκειας της κρούσης, το μοντέλο αυτό παρέχει την καλύτερη πρόβλεψη της βύθισης του σημείου εφαρμογής του κρουστικού φορτίου.

Από όλα τα παραπάνω, προκύπτει πως ακόμα και αν τα τελικά μοντέλα εμφανίζουν κάποιες αποκλίσεις από τις πειραματικές μετρήσεις, είναι ικανά να προσφέρουν μια ικανοποιητική προσέγγιση του φαινομένου. Η βασικότερη αδυναμία του Abaqus εντοπίζεται στο γεγονός ότι τόσο οι γεωμετρικές διαστάσεις όσο και οι τιμές της διηλεκτρικότητας είναι στα όρια που μπορεί να διαχειριστεί το πακέτο και επομένως τα μοντέλα που προκύπτουν είναι ευαίσθητα σε ορισμένες παραμέτρους.

#### **5.4 Σύγκριση εκτιμήσεων συνολικής μεθοδολογίας για την απόκριση του συστήματος απομάστευσης ενέργειας με πειραματικές μετρήσεις**

Σε αυτό το σημείο, έχουν ολοκληρωθεί όλα τα βήματα για την κατασκευή και τον έλεγχο της λειτουργίας των μοντέλων του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στο Abaqus. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους είναι ικανοποιητικά. Επομένως, κρίνεται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν, έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η μελέτη του πλήρους συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει και το κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας.

Υπενθυμίζεται ότι ο τελικός στόχος αυτής της εργασίας είναι ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής ενέργειας που απομαστεύεται από την πλακέτα της PI κατά τη διάρκεια μιας κρούσης μεταξύ βραχίονα και δοκού. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητη η εκτίμηση του δυναμικού που αναπτύσσεται στους ακροδέκτες του πυκνωτή C3 του κυκλώματος μετά από μία κρούση. Η σύγκριση της εκτίμησης αυτής με τις πειραματικές μετρήσεις θα καθορίσει και την ικανότητα της μεθοδολογίας, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, να προβλέπει ικανοποιητικά την απόκριση του συνολικού συστήματος. Εφόσον, οι εκτιμήσεις που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία είναι αρκετά ακριβείς, τότε αυτό συνεπάγεται πως η μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα υπολογιστικό εργαλείο σε παρόμοιες εφαρμογές απομάστευσης ενέργειας με πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους.

Όπως έχει σημειωθεί και σε προηγούμενες ενότητες, το Abaqus δεν προσφέρει τη δυνατότητα εισαγωγής συγκεντρωμένων παραμέτρων από ηλεκτρικά κυκλώματα. Άρα, γίνεται εμφανής η ανάγκη κατασκευής ενός μοντέλου του ηλεκτρικού κυκλώματος. Το μοντέλο του κυκλώματος υλοποιείται στο Pspice και η μέθοδος με την οποία δημιουργήθηκε περιγράφεται ενδελεχώς στην Ενότητα 3.4. Για τη χρήση του μοντέλου στο Pspice, είναι

απαραίτητος ο προσδιορισμός της έντασης της πηγής ρεύματος και της χωρητικότητας του πυκνωτή που μοντελοποιούν το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο.

Επομένως, σε αυτήν την ενότητα θα περιγραφεί η διαδικασία με την οποία υπολογίζονται τα απαραίτητα μεγέθη για τον προσδιορισμό της εισόδου του μοντέλου στο Pspice. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί η εκτίμηση της ηλεκτρικής τάσης του πυκνωτή του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας και θα συγκριθεί με την αντίστοιχη μέτρηση.

#### 5.4.1 Προσδιορισμός ισοδύναμων ηλεκτρικών στοιχείων για την μοντελοποίηση της λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά την απομάστευση ενέργειας από μία κρούση

Όπως επεξηγήθηκε στην Παράγραφο 2.4.2, η λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, όταν αυτό αποδίδει ενέργεια στην πλακέτα απομάστευσης ενέργειας, μοντελοποιείται ως μία πηγή ρεύματος η οποία συνδέεται παράλληλα με έναν πυκνωτή (βλέπε Σχήμα 3-16). Επομένως, για να είναι πλήρως ορισμένο το μοντέλο, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της έντασης της πηγής ρεύματος και η χωρητικότητα του πυκνωτή. Οι μαθηματικές εξισώσεις που ποσοτικοποιούν τις παραμέτρους αυτές είναι οι ακόλουθες.

$$C_{\bar{p}} = \frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}}, \quad (5-1)$$

$$i_{\bar{p}}(t) = - \sum_{j=1}^{\infty} \kappa_j \cdot \frac{d\eta_j(t)}{dt} \quad (5-2)$$

Οι παράμετροι που εμφανίζονται στις δύο εξισώσεις αναφέρονται στην Παράγραφο 2.4.2.

Από την Εξίσωση (5-1), προκύπτει το συμπέρασμα ότι η χωρητικότητα του ισοδύναμου πυκνωτή, εξαρτάται από την γεωμετρία και την διηλεκτρική σταθερά του υλικού. Τα δεδομένα αυτά είναι γνωστά και επομένως ο υπολογισμός της χωρητικότητας είναι απλός. Τελικά, η χωρητικότητα υπολογίζεται ως:

$$C_{\bar{p}} = 78nF$$

Η Εξίσωση (5-2) περιέχει τον όρο  $\kappa_j$ . Αυτός είναι ο όρος σύζευξης στον χώρο των ιδιομορφών στην εξίσωση του ηλεκτρικού κυκλώματος και δίνεται από τον τύπο που ακολουθεί,

$$\kappa_j = \bar{\epsilon}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \int_{x_s}^{x_f} \frac{d^2\varphi_j(x)}{dx^2} dx = \bar{\epsilon}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \left( \left. \frac{d\varphi_j(x)}{dx} \right|_{x_f} - \left. \frac{d\varphi_j(x)}{dx} \right|_{x_s} \right) \quad (5-3)$$

Τόσο στην Εξίσωση (5-2), όσο και στον όρο σύζευξης (Εξίσωση (5-3)) εμφανίζεται ο δείκτης  $j$ . Ο δείκτης αυτός αναφέρεται στην αντίστοιχη ιδιομορφή του συστήματος. Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, γίνεται η παραδοχή ότι η μόνη ιδιομορφή



που επηρεάζει το φαινόμενο είναι η πρώτη. Για τον λόγο αυτό, το άθροισμα της Εξίσωσης (5-2) εκφυλλίζεται στον πρώτο όρο του αρχικού αθροίσματος και το ρεύμα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$i_{\bar{p}}(t) = \kappa_1 \cdot \frac{d\eta_1(t)}{dt} \quad (5-4)$$

Όπως και προηγουμένως, η ένταση της πηγής ρεύματος καθορίζεται σε κάποιο βαθμό από την γεωμετρία και τις ηλεκτρικές σταθερές του συστήματος. Ωστόσο, επηρεάζεται, επίσης, και από την βύθιση του δοκιμίου λόγω του εξωτερικού φορτίου. Η εξάρτηση αυτή οφείλεται στις παραγώγους των μεγεθών  $\eta$  και  $\varphi$ . Τα μεγέθη αυτά συνδέονται με την βύθιση της δοκού ως εξής:

$$w_{rel}(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(x) \cdot \eta_j(t) \quad (5-5)$$

όπου,  $w_{rel}(x, t)$  είναι η βύθιση της δοκού. Το μέγεθος  $\varphi_j$  αναφέρεται στο μέρος της βύθισης που εξαρτάται από την εκάστοτε ιδιομορφή και  $\eta_j(t)$  είναι το μέρος της βύθισης που οφείλεται στο ασκούμενο μηχανικό φορτίο. Όπως και προηγουμένως, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας το άθροισμα εκφυλλίζεται στον πρώτο όρο του αρχικού αθροίσματος.

Οι παράμετροι που αφορούν την γεωμετρία και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του συστήματος είναι γνωστές. Πρέπει, λοιπόν, να προσδιοριστούν οι παράγωγοι των μεγεθών που συνδέονται με την βύθιση του δοκιμίου. Οι τιμές της παραγώγου  $\varphi'(x)$  εκφράζουν την κλίση της βύθισης ( $w, x$ ) και μπορούν να προσδιοριστούν με χρήση ενός πακέτου πεπερασμένων στοιχείων όπως το Abaqus για κάθε ιδιομορφή. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, οι τιμές ελήφθησαν με χρήση του κώδικα των Plagiannakos και Saravanos [9].

Όσον αφορά το μέγεθος  $\eta$  αυτό προσδιορίζεται από την διαφορική εξίσωση που ακολουθεί.

$$[M_{ffmod}] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [C_{ffmod}] \cdot \{\dot{\eta}\} + [K_{ffmod}] \cdot \{\eta\} = \{F_{sfmod}\} \cdot u \quad (5-6)$$

Τα μητρώα  $[M_{ffmod}]$ ,  $[C_{ffmod}]$ ,  $[K_{ffmod}]$  και το διάνυσμα  $\{F_{sfmod}\}$  αντιστοιχούν στη μάζα, την απόσβεση και την ελαστικότητα του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και την προσαρμογή της μοναδιαίας δύναμης αντίστοιχα. Η προέλευση της εξίσωσης αυτής επεξηγείται στην Παράγραφο 2.2.2. Επειδή, στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, έχει γίνει η παραδοχή ότι η μόνη ιδιοσυχνότητα που επηρεάζει το φαινόμενο είναι η πρώτη, η εξίσωση (5-6), μπορεί να γραφτεί στην εξής μορφή:

$$\ddot{\eta} + 2\zeta\omega_n \cdot \dot{\eta} + \omega_n^2 \cdot \eta = f \cdot u \quad (5-7)$$

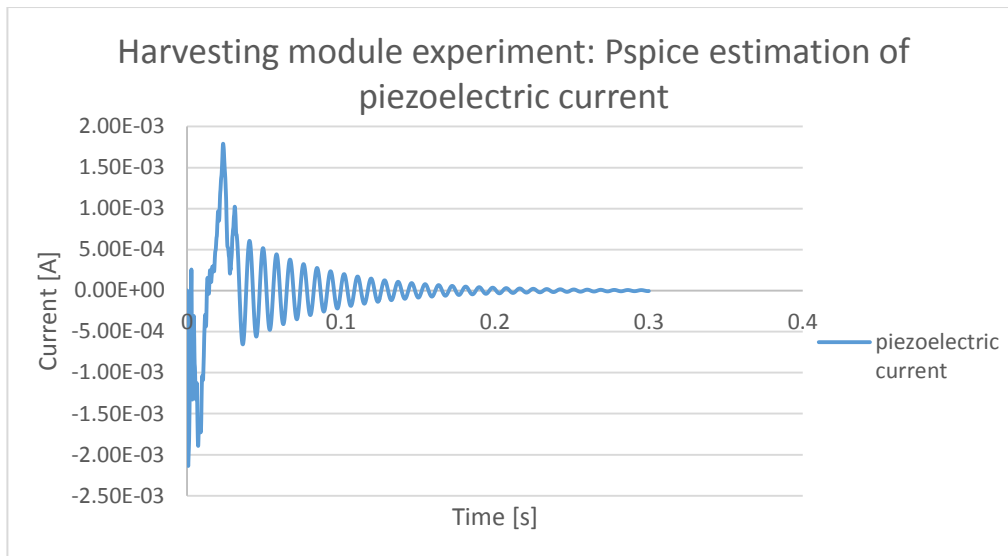
όπου,  $\zeta$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή και  $\omega_n$  είναι η πρώτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής. Ο συντελεστής απόσβεσης δεν είναι γνωστός με ακρίβεια καθώς ο συντελεστής από τα πειράματα που έγιναν με τη βοήθεια του εργαστηρίου Τεχνικής Μηχανικής και Ταλαντώσεων του Πανεπιστημίου Πατρών αφορούσε τη δοκό χωρίς το επίθεμα. Με βάση την μορφή του σήματος της ηλεκτρικής τάσης που μετρήθηκε στα πειράματα όπου το επίθεμα ήταν ανοικτοκυκλωμένο, προέκυψε ότι ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού είναι:

$$\zeta = 0.025$$

**Η εξίσωση (5-7) είναι μια συνήθης διαφορική εξίσωση. Η ιδιαιτερότητα της εξίσωσης αυτής είναι ότι αν η επίλυσή της γινόταν αναλυτικά, τότε θα έπρεπε να χωριστεί σε δύο τμήματα. Ο λόγος για αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 4-19. Διάγραμμα ηλεκτρικής τάσης στους ακροδέκτες του πυκνωτή του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας κρούσης.**

, από όπου προκύπτει πως η φόρτιση του πυκνωτή του κυκλώματος συνεχίζεται και μετά το πέρας της κρούσης μέχρι να αποσβεστεί πλήρως η ταλάντωση της δοκού. Επομένως, στο πρώτο τμήμα της η εξίσωση (5-7) είναι μια συνήθης διαφορική με εξωτερική διέγερση και μετά το τέλος της κρούσης, είναι μια διαφορική με αρχικές συνθήκες. Για να αποφευχθεί, λοιπόν, η πολύπλοκη και επίπονη διαδικασία της αναλυτικής προσέγγισης, επιλέχθηκε η επίλυση της εξίσωσης να γίνει με χρήση του Matlab και συγκεκριμένα της συνάρτησης ode45. Περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται η παραπάνω ρουτίνα του Matlab παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

Η χρήση της παραπάνω ανάλυσης και διαδικασίας μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό τόσο με το μοντέλο του Abaqus που δέχεται ως είσοδο την κρουστική δύναμη, όσο και με το μοντέλο που βασίζεται στην ταχύτητα του βραχίονα πριν την κρούση. Η μόνη διαφορά είναι πως στην πρώτη περίπτωση, η είσοδος  $u$  της εξίσωσης (5-7) αντιστοιχεί στη μέτρηση της δύναμης από τα πειράματα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση προκύπτει από την πρόβλεψη του Abaqus για το προφίλ της δύναμης που αναπτύσσεται κατά την κρούση. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν έχουν προκύψει μετά από επιλογή των πειραματικών μετρήσεων της δύναμης ως εισόδου.

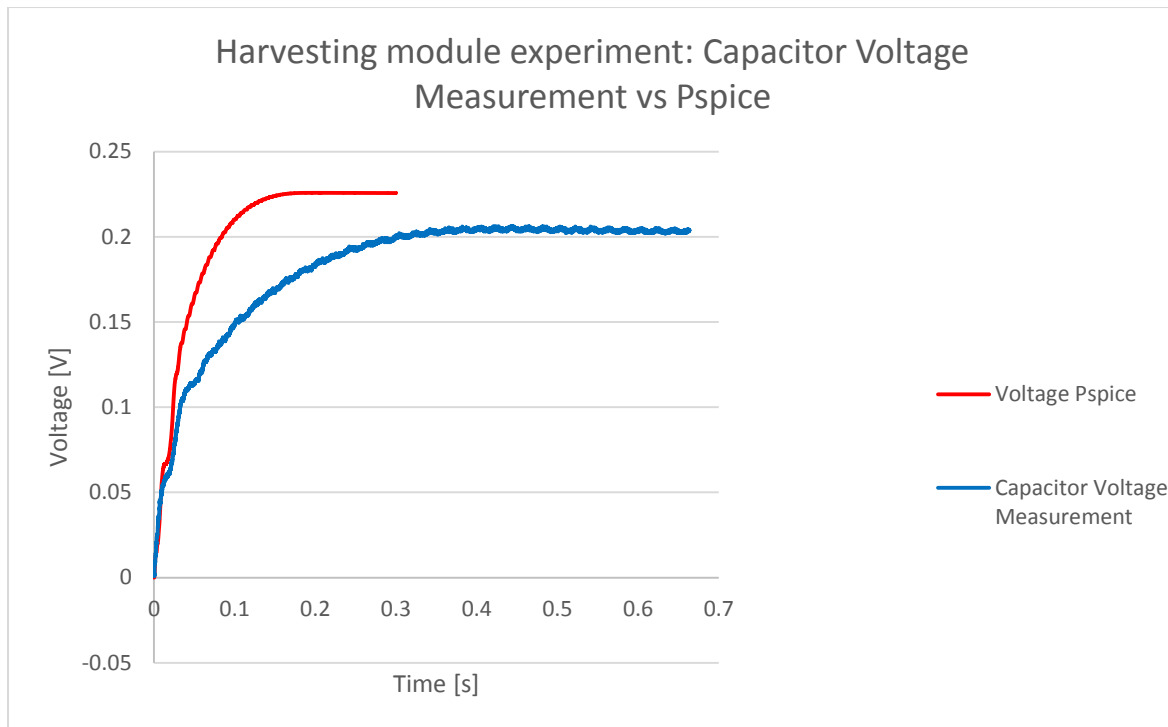


**Σχήμα 5-8. Εκτίμηση έντασης της πηγής ρεύματος του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος**

Επιλύοντας την εξίσωση αυτή, προκύπτει η συνάρτηση του μεγέθους  $\eta$  ως προς τον χρόνο. Με παραγωγή της συνάρτησης αυτής προκύπτει η ζητούμενη παράγωγος  $\dot{\eta}(t)$  και άρα και η μορφή που λαμβάνει η πηγή ρεύματος. Στο Σχήμα 5-8 παρουσιάζεται η εκτίμηση για την ένταση της πηγής ρεύματος.

#### **5.4.2 Πρόβλεψη απόκρισης συνολικού συστήματος με χρήση του μοντέλου στο Pspice**

Μετά από τον υπολογισμό των μεγεθών που είναι απαραίτητα για την μοντελοποίηση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στο Pspice, είναι πλέον δυνατή η χρήση του μοντέλου που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.4. Το μοντέλο του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας έχει ως σκοπό να εκτιμήσει την ηλεκτρική τάση στους ακροδέκτες του πυκνωτή που συσσωρεύει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Ακόμα, υπενθυμίζεται ότι όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Παράγραφο 5.4 αντιστοιχούν σε κρούση με ταχύτητα βραχίονα ίση με 0.78m/s, όπως και στα προηγούμενα μοντέλα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθεται η προσέγγιση της ηλεκτρικής τάσης του πυκνωτή του κυκλώματος και συγκρίνεται με τις πειραματικές μετρήσεις.



**Σχήμα 5-9. Σύγκριση της τελικής εκτίμησης της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης στους ακροδέκτες του πυκνωτή του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας από το Pspice με τις πειραματικές μετρήσεις.**

Από το Σχήμα 5-9, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις. Η πρώτη παρατήρηση σχετίζεται με το αρχικό τμήμα της φόρτισης. Το τμήμα αυτό αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια της κρούσης και εκεί παρατηρείται ότι η εκτίμηση της τάσης του πυκνωτή από το Pspice είναι πολύ κοντά στην πειραματική μέτρηση. Μάλιστα φαίνεται ότι η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να προβλέψει με σχετική ακρίβεια ακόμα και τα σημεία καμπής του πραγματικού σήματος.

Η δεύτερη παρατήρηση είναι πως στο δεύτερο κομμάτι της φόρτισης υπάρχει μία απόκλιση μεταξύ πρόβλεψης και μέτρησης. Η απόκλιση αυτή σχετίζεται με τον ρυθμό  $\dot{V}(t)$  που η τάση προσεγγίζει την τελική της τιμή και οφείλεται στο γεγονός ότι το κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας έχει ιδιοκαταναλώσεις, προκειμένου να λειτουργεί το Schmitt trigger και ο τελεστικός ενισχυτής που ενεργοποιεί το δευτερεύον κύκλωμα. Οι απώλειες αυτές δεν έχουν μοντελοποιηθεί στη παρούσα εργασία και αποδεικνύεται πως έχουν κάποια επίδραση κατά την απομάστευση μικρών ποσοτήτων ενέργειας, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της κρούσης.

Η τελευταία παρατήρηση είναι πως ακόμα και με τις αποκλίσεις που υπάρχουν, η εκτίμηση της ενέργειας που συσσωρεύεται τελικά στον πυκνωτή προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματικότητα. Επομένως, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη τέτοιων συστημάτων.

## 6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, μελετήθηκε η απόκριση ενός συστήματος απομάστευσης ενέργειας, το οποίο εκμεταλλεύεται μέρος της μηχανικής ενέργειας κρούσης βλήματος σε μονόπακτη δοκό. Η ενέργεια που συγκεντρώνεται, προκύπτει από την ταλάντωση της δοκού και δεσμεύεται με χρήση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πλακέτας απομάστευσης ενέργειας. Για την πραγματοποίηση της μελέτης, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία η οποία περιλάμβανε την κατασκευή μοντέλων του μηχανικού υποσυστήματος στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και ενός μοντέλου του ηλεκτρικού υποσυστήματος στο πρόγραμμα επίλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων Pspice και σχεδιασμό-υλοποίηση πειραμάτων κρούσης.

Τα μοντέλα του μηχανικού υποσυστήματος κατασκευάστηκαν, έτσι ώστε το σύνθετο πρόβλημα της μοντελοποίησης του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος να διαιρεθεί σε μικρότερα τμήματα που μπορούν να ελέγχονται πιο εύκολα. Επιπλέον, για κάθε τμήμα δημιουργήθηκαν πολλές εναλλακτικές εκδοχές με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση κάθε πιθανού παράγοντα στα αποτελέσματα που δίνει το Abaqus. Κατά αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατός ο αποκλεισμός των εκδοχών εκείνων που δεν αποδίδουν τα αναμενόμενα, μέχρι τελικά να βρεθεί η σωστή εκδοχή. Τα δύο τελικά μοντέλα στο Abaqus που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή μπορούν να προσεγγίσουν την απόκριση του μηχανικού υποσυστήματος όταν το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα είναι ανοικτοκυκλωμένο κατά τη διάρκεια μιας κρούσης. Τα δύο αυτά μοντέλα διαφοροποιούνται ως προς την είσοδο του συστήματος η οποία μπορεί να είναι είτε η κρουστική δύναμη είτε η αρχική ταχύτητα του βλήματος. Η διαφοροποίηση αυτή επιτρέπει την χρήση διαφορετικών μεθόδων για τη μέτρηση της εισερχόμενης ενέργειας στο σύστημα και άρα μεγαλύτερη ευελιξία στη μελέτη του φαινομένου.

Το μοντέλο του ηλεκτρικού υποσυστήματος μπορεί να προβλέψει την απόκριση της πλακέτας απομάστευσης ενέργειας για οποιαδήποτε φορτίο δέχεται η δοκός. Η είσοδος το μοντέλου είναι το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Οι παράμετροι του κυκλώματος αυτού προσδιορίζονται χάρη σε μαθηματικές εξισώσεις από την διεθνή βιβλιογραφία. Επιπλέον, το μοντέλο αυτό μπορεί να αποτελέσει σχεδιαστικό εργαλείο για την τροποποίηση του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, έτσι ώστε αυτό να είναι αποδοτικό στις εκάστοτε συνθήκες εργασίας του.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε υπάρχον εξοπλισμός του ΕΑΕ και γράφτηκε λογισμικό σε γλώσσα Labview FPGA για την καταγραφή των σημάτων ταχύτητας κρούσης, κρουστικής δύναμης και ηλεκτρικού δυναμικού στον πυκνωτή απομάστευσης ενέργειας. Το νέο λογισμικό καθιστά δυνατή τη λήψη και καταγραφή σημάτων με υψηλή δειγματοληψία (500fps) για χρονικό διάστημα που δίνεται από το χρήστη κατά βούληση. Οι πειραματικές μετρήσεις περιλαμβάνουν επίσης μετατόπιση του ελεύθερου άκρου της δοκού με τη βοήθεια κάμερας υψηλής ταχύτητας.

## 6.1 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του συστήματος δοκού-επιθέματος, αποδεικνύεται ότι οι υπολογιστικές απαιτήσεις του προβλήματος ήταν αυξημένες λόγω του μικρού πάχους του επιθέματος και της δοκού σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις τους. Παρά το γεγονός ότι τελικά το εμπόδιο της γεωμετρίας ξεπεράστηκε σε κάποιο βαθμό, είναι εμφανές ότι η λύση τέτοιων προβλημάτων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς τα μοντέλα που κατασκευάζονται στο Abaqus εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία στην επιλογή της κλίμακας στην οποία γίνεται η μοντελοποίηση.

Παρόλα αυτά, μέσα από τη διαδικασία που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για την επίδραση που έχει η επιλογή διαφορετικών πεπερασμένων στοιχείων και διαφορετικών επιλυτών. Συγκεκριμένα, επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι τα στερεά τρισδιάστατα στοιχεία οδηγούν σε μοντέλα που εμφανίζουν αυξημένη δυσκαμψία σε σχέση εκείνα τα μοντέλα που αποτελούνται από στοιχεία κελύφους. Επιπλέον, φάνηκε πως οι δύο επιλύτες που επιλέχθηκαν, ο Dynamic Implicit και ο Modal Dynamics, είναι ισοδύναμα εργαλεία για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων, όπως μία κρούση και παράγουν παρόμοια αποτελέσματα.

Μέσα από τη χρήση του Pspice για τη μελέτη του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας, αναδείχθηκε ένας σημαντικός περιορισμός. Ο περιορισμός αυτός συνδέεται με τη μοντελοποίηση του Schmitt trigger και του τελεστικού ενισχυτή του κυκλώματος. Τα δύο αυτά μέρη του κυκλώματος προκειμένου να λειτουργούν πρέπει να καταναλώνουν ενέργεια. Στην πραγματικότητα, η ενέργεια αυτή πρέπει να καλύπτεται από την είσοδο του συστήματος. Ωστόσο, η μοντελοποίηση των στοιχείων αυτών έτσι ώστε να μην τροφοδοτούνται από κάποια εξωτερική πηγή, μεγεθύνει την περιπλοκότητα του κυκλώματος σε βαθμό που το Pspice δεν μπορεί να διαχειριστεί. Για το λόγο αυτό, οι ιδιοκαταναλώσεις αυτές αμελούνται. Σε εφαρμογές όπου το κύκλωμα δέχεται μεγάλα ποσά ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα, είναι πιθανό αυτές οι ιδιοκαταναλώσεις να μην επηρεάζουν την απόδοση του μοντέλου. Στην περίπτωση της κρούσης, όμως, αποδείχθηκε ότι οδηγούν σε αποκλίσεις.

Όσον αφορά το κύκλωμα απομάστευσης ενέργειας, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η πλακέτα δεν είναι κατάλληλα ρυθμισμένη για την εκμετάλλευση ενέργειας σε εφαρμογές όπου το φορτίο χαρακτηρίζεται από μικρότερα χρονικά διαστήματα εμφάνισης όπως συμβαίνει στις κρούσεις. Προκειμένου το σύστημα να καταστεί αποδοτικό σε συνθήκες κρούσης θα πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα οι παράμετροι του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας.

Παρά τα εμπόδια που εμφανίστηκαν λόγω της επιλογής των συγκεκριμένων εργαλείων, αποδεικνύεται ότι η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε είναι ικανή να προσεγγίζει την απομάστευση ενέργειας από τέτοιες κρούσεις με ικανοποιητική ακρίβεια. Δεδομένου ότι πρόκειται για μεθοδολογία συνεχούς μέσου, αυτό την καθιστά ένα πολύ χρήσιμο υπολογιστικό εργαλείο για το σχεδιασμό τέτοιων κατασκευών με σκοπό την αντοχή σε κόπωση. Επιπλέον, το μοντέλο που έχει δημιουργηθεί στο Pspice έχει την ικανότητα να

δέχεται τροποποιήσεις. Αυτό το στοιχείο, το καθιστά κατάλληλο να λειτουργεί και ως σχεδιαστικό εργαλείο, καθώς ο χρήστης του μπορεί να αλλάζει τις παραμέτρους του κυκλώματος ή ακόμα και την αρχιτεκτονική του έως ότου καταλήξει στο κύκλωμα εκείνο που εξυπηρετεί καλύτερα την εφαρμογή του.

Επομένως, στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας έχει πραγματοποιηθεί μια ενδελεχής μελέτη της εκμετάλλευσης ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πλακέτας απομάστευσης ενέργειας. Μάλιστα, η μελέτη αυτή περιλαμβάνει τη χρήση δύο πολύ διαφορετικών υπολογιστικών προγραμμάτων, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους μέσα από αναλυτικές σχέσεις. Η προσέγγιση αυτή ανοίγει το δρόμο για την περαιτέρω διερεύνηση αυτού του επιστημονικού πεδίου.

## **6.2 Μελλοντική Εργασία**

Η μελλοντική εργασία που μπορεί να υλοποιηθεί πλέον, αφορά τόσο την βελτίωση της υπάρχουσας μεθοδολογίας όσο και την μελέτη της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε άλλες διατάξεις είτε με τον ρόλο του αισθητήρα είτε με αυτόν του επενεργητή.

Η βελτίωση της υπάρχουσας μεθοδολογίας εστιάζει περισσότερο στην εύρεση των κατάλληλων εκείνων εργαλείων που θα μπορούν να αποδώσουν με ακόμα μεγαλύτερη λεπτομέρεια τη δυναμική τόσο του μηχανικού υποσυστήματος όσο και του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας. Ειδικά, για την πλακέτα απομάστευσης ενέργειας, η δημιουργία ενός ακριβέστερου μοντέλου, θα επιφέρει και βαθύτερη κατανόηση της αρχιτεκτονικής του κυκλώματος, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά άλλα συστήματα που σκοπό έχουν την εκμετάλλευση ενέργειας.

Όσον αφορά την διεύρυνση του πεδίου μελέτης, οι δυνατότητες που υπάρχουν είναι πολλές. Πρώτον, στην υπάρχουσα διάταξη, θα ήταν πολύ ενδιαφέρουσα η μελέτη της επίδρασης της ιδιοσυχνότητας του κυκλώματος απομάστευσης ενέργειας σε συνδυασμό με την ιδιοσυχνότητα που επικρατεί κατά τη διάρκεια μιας ημι-στατικής κρούσης, στην συνολική απόδοση του συστήματος. Ένας τρόπος για να διενεργηθεί αυτή η μελέτη είναι με επαναλαμβανόμενα πειράματα όπου τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος μεταβάλλονται. Εναλλακτικά, αυτή η μελέτη θα μπορούσε να προσεγγιστεί με τεχνικές συστημάτων όπως είναι το *impedance matching* που σκοπό έχει τη μεγιστοποίηση της ενέργειας που απομαστεύεται από μία κρούση ή ακόμα και από ένα φορτίο διαφορετικής μορφής.

Επιπλέον, είναι δυνατό να μελετηθεί η εκμετάλλευση ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας και σε δοκίμια με γεωμετρία πλάκας ή κελύφους.

Επίσης, το ίδιο σύστημα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και για την αποστολή ασύρματων σημάτων. Δηλαδή, αν σε μία εφαρμογή υπάρχει κίνδυνος το δοκίμιο που χρησιμοποιείται να αστοχήσει λόγω των μηχανικών φορτίων που δέχεται, τότε το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα μπορεί να ενεργοποιεί ένα σύστημα που θα προειδοποιεί για την εμφάνιση του κινδύνου αυτού.

Τέλος, το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, λόγω της διπλής του φύσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως επενεργητής σε εφαρμογές που είναι απαραίτητη η ελεγχόμενη απόσβεση των δονήσεων που δέχεται μία κατασκευή.

Αυτές είναι μόνο κάποιες από τις πιθανές εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και αυτό αποδεικνύει τις ανεξάντλητες δυνατότητες περαιτέρω μελέτης αυτού του επιστημονικού πεδίου.



## 7 Βιβλιογραφία

- [1] Chandrasekharan, Nataraj, Jaehyung Ju, and Lonny Thompson. "Effects of Geometric and Material Properties on Electrical Power Harvested From a Bimorph Piezoelectric Cantilever Beam." Volume 1: *23rd Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Parts A and B (2011): n. pag. Web.
- [2] Chrysochoidis, Nikolaos, Eugenio Gutierrez, and Graziano Renaldi. "Evaluation of the Performance of an Energy Harvesting Chain Based on Piezopolymer Sensors." *Structural Health Monitoring 2015* (2015): n. pag. Web.
- [3] Erturk, Alper, and Daniel J. Inman. *Piezoelectric Energy Harvesting*. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. Print.
- [4] Guan, M. J., and W. H. Liao. "On the Efficiencies of Piezoelectric Energy Harvesting Circuits towards Storage Device Voltages." *Smart Materials and Structures* 16.2 (2007): 498-505. Web.
- [5] Kim, Heung Soo, Joo Hyong Kim, and Jaehwan Kim. "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 12.6 (2011): 1129-141. Print.
- [6] Kwon, Young W., and Hyochoong Bang. *The Finite Element Method Using MATLAB*. Boca Raton, FL: CRC, 2000. Print.
- [7] Lika, K, 2013."Σχεδιασμός και κατασκευή αισθητήρα δύναμης/ροπής 5 αξόνων." *Διπλωματική Εργασία*, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- [8] Plagianakos, Theofanis S., Klajd Lika, and Evangelos G. Papadopoulos. "Low-velocity Impact Response of Smart Sandwich Composite Plates with Piezoelectric Transducers: Modeling and Experiments." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 27.6 (2016): 774-85. Web.
- [9] Plagianakos, Theofanis S. and Dimitris A. Saravanos, 2008. "Coupled high-order layerwise laminate theory for sandwich composite plates with piezoelectric actuators and sensors." *19th International Conference on Adaptive Structures Technologies (ICAST 2008)*, Ascona, CH.
- [10] Thomson, William Tyrrell., and Marie Dillon. Dahleh. *Theory of Vibration with Applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2014. Print.
- [11] Yigit, A.s., and A.p. Christoforou. "Impact Dynamics of Composite Beams." *Composite Structures* 32.1-4 (1995): 187-95. Web.
- [12] Cantwell, W.j., and J. Morton. "The Impact Resistance of Composite Materials — a Review." *Composites*, vol. 22, no. 5, 1991, pp. 347–362., doi:10.1016/0010-4361(91)90549-v.
- [13] Chai GB, Zhu S. A review of low-velocity impact on sandwich structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2011;225(4):207-230., doi:[10.1177/1464420711409985](https://doi.org/10.1177/1464420711409985)

- [14] Shivakumar, K.N., Elber, W., Illg, W., 1985. Prediction of impact force and duration due to low-velocity impact on circular composite laminates. *J. Appl. Mech.* 52, 674-680.
- [15] Wu, K.Q., Yu, T.X., 2001. Simple dynamic models of elasto-plastic structures under impact. *Int. J. Impact Eng.* 25, 735-754.
- [16] Olsson, R., 2002. Engineering method for prediction of impact response and damage in sandwich panels. *J. Sandw. Struct. Mater.* 4, 3-29.
- [17] Zhou, D.W., Stronge, W.J., 2006. Low-velocity impact denting of HSSA lightweight sandwich panel. *Int. J. Mech. Sci.* 48, 1031-1045.
- [18] Olsson, R., 2003. Closed form prediction of peak load and delamination onset under small mass impact. *Composite Struct.* 59, 341-349.
- [19] Anderson, T.A., 2005. An investigation of SDOF models for large mass impact on sandwich composites. *Composites Part B* 36, 135-142.
- [20] Christoforou, A.P., Yigit, A.S., 1998. Characterization of impact in composite plates. *Composite Struct.* 43, 15-24.
- [21] Saravanos, D.A., Christoforou, A.P., 2002a. Impact response of adaptive piezoelectric laminated plates. *AIAA J.* 40, 2087-2095.
- [22] Plagianakos, Theofanis, Papadopoulos, Evangelos. (2014). Low-energy impact response of composite and sandwich composite plates with piezoelectric sensory layers. *International Journal of Solids and Structures.* 51. 2713–2727.
- [23] Mateu, L. and Moll, F., "Optimum piezoelectric bending beam structures for energy harvesting using shoe inserts," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 10, pp. 835-845, 2005.
- [24] Patel, I., Siores, E. and Shah, T., "Utilisation of smart polymers and ceramic based piezoelectric materials for scavenging wasted energy," *Sensors and Actuators*, Vol. 159, No. 2, pp. 213-218, 2010.
- [25] Sohn, J. W., Choi, S. B. and Lee, D. Y., "An investigation on piezoelectric energy harvesting for MEMS power sources," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 219, pp. 429-436, 2003.
- [26] Liu, Y. M., Tian, G., Wang, Y., Lin, J. H., Zhang, Q. M. and Hofmann, H. F., "Active Piezoelectric energy harvesting: general principle and experimental demonstration," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, No. 5, pp. 575-585, 2009.
- [27] Chang, J. Y., "Modeling and analysis of piezo-elastica energy harvester in computer hard disk drives," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 7, pp. 1862-1867, 2011.
- [28] Plagianakos, Th., Nikolaos Margelis, Nikolaos Leventakis, Georgios Bolanakis, Panagiotis Vartholomeos, and Papadopoulos, E., "Piezoelectric Energy Harvesting from a Composite Cantilever Beam under Sinusoidal Excitation," *IEEE Sensors '20, Rotterdam, Netherlands*, Oct. 25-28, 2020.

- [29] Καρύδης, Π., 2019. “Μοντελοποίηση και Έλεγχος Κρουστικού Εκκρεμούς για Πειράματα Κρούσεων σε Πλάκες με Πιεζοηλεκτρικούς Αισθητήρες”, *Διπλωματική Εργασία*, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- [30] Plagianakos, Theofanis, Muñoz, Kirsa, Strapatsakis, Stylianos, Fernandez, Maria, Jimenez, Miguel, Karachalios, Evangelos. (2020). Effects of hot-wet storage aging, CNT-integration and damping layer interposition on static and fatigue interlaminar shear response of a UD Graphite/Epoxy material system. *Materials Today Communications*. 25. 101296. 10.1016/j.mtcomm.2020.101296.

## 8 Παράρτημα Α

### 8.1 LabVIEW

Το LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) είναι ένα περιβάλλον σχεδιασμού συστημάτων και ταυτόχρονα ένα περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού κατασκευασμένο από την National Instruments. Το LabVIEW χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η ανάκτηση δεδομένων, ο έλεγχος οργάνων ή ακόμα και σε εφαρμογές βιομηχανικών αυτοματισμών. Επιπλέον, το LabVIEW είναι διαθέσιμο για μια σειρά λειτουργικών συστημάτων.

Η γραφική γλώσσα που χρησιμοποιείται στα πλαίσια του LabVIEW είναι η γλώσσα G. Η γλώσσα αυτή εξυπηρετεί τους σκοπούς ενός είδους προγραμματισμού που στηρίζεται στην ροή των δεδομένων. Η εκτέλεση ενός προγράμματος στο LabVIEW καθορίζεται από το αντίστοιχο δομικό του διάγραμμα το οποίο κατασκευάζει ο εκάστοτε προγραμματιστής. Η επεξεργασία της πληροφορίας πραγματοποιείται με την χρήση συναρτήσεων-κόμβων (function-nodes) στις οποίες το σήμα εισέρχεται και εξέρχεται με την χρήση εικονικών συρμάτων (wires). Το βασικό πλεονέκτημα του γραφικού προγραμματισμού είναι ότι επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση εντολών, σε αντίθεση με τις κλασσικές γλώσσες προγραμματισμού όπου η υλοποίηση τους γίνεται με σειριακό τρόπο. Ένα, ακόμα, πλεονέκτημα είναι ότι, στην γλώσσα G, η δημιουργία διεπαφής με τον χρήστη (user interface) είναι αναπόσπαστο τμήμα της ανάπτυξης του ίδιου προγράμματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της μορφής που έχουν τα προγράμματα που γράφονται με χρήση του LabVIEW.

Πιο συγκεκριμένα, τα προγράμματα που υλοποιούνται στο LabVIEW ονομάζονται εργασίες (projects) τα οποία απαρτίζονται από υποπρογράμματα ή υπορουτίνες που αποκαλούνται εικονικά όργανα (Vis-virtual instruments). Τα εικονικά όργανα αποτελούνται από δύο βασικά συστατικά. Το πρώτο είναι η πρόσοψη (front panel) του προγράμματος όπου τοποθετούνται οι ρυθμιστές (controls) και οι δείκτες (indicators). Οι ρυθμιστές επιτελούν τον ρόλο των εισόδων (inputs) του προγράμματος και μέσω αυτών το εικονικό όργανο τροφοδοτείται με τις πληροφορίες που εισάγει ο χρήστης. Οι ρυθμιστές μπορούν να λάβουν διάφορες μορφές όπως κομβία, διακόπτες και μπάρες, δίνοντας έτσι την δυνατότητα εισαγωγής της πληροφορίας και με ψηφιακό και με αναλογικό τρόπο. Οι δείκτες αντιστοιχούν στις εξόδους του συστήματος και οπτικοποιούν το αποτέλεσμα της εκτέλεσης του κώδικα του εικονικού εργαλείου. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν και ψηφιακά αλλά και σε μορφή διαγραμμάτων.

Το δεύτερο συστατικό ενός εικονικού οργάνου στο LabVIEW είναι το δομικό του διάγραμμα (block diagram). Στο δομικό διάγραμμα περιέχεται ο κώδικας του προγράμματος ο οποίος αποτελείται από διάφορες δομές και συναρτήσεις. Ακόμα, στο δομικό διάγραμμα οι ρυθμιστές και οι δείκτες εμφανίζονται με την μορφή τερματικών. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι πληροφορίες εισέρχεται στο δομικό διάγραμμα μέσω των ρυθμιστών και μετά την

επεξεργασία που δέχεται μέσω των συναρτήσεων καταλήγει στους δείκτες οι οποίοι και εμφανίζουν το αποτέλεσμα της επεξεργασίας που προηγήθηκε.

Με βάση τα παραπάνω, ο χρήστης ενός εικονικού οργάνου, ανάλογα με την εξοικείωση του με τον προγραμματισμό, μπορεί να το χρησιμοποιεί είτε με την ιδιότητα του προγραμματιστή είτε με αυτήν του απλού αποδέκτη της επεξεργασίας που επιτελείται εντός του εικονικού οργάνου, αφού η πρόσοψη (front panel) του λειτουργεί και ως διεπαφή χρήστη (user interface). Στα πλαίσια αυτά, η National Instruments παρέχει διάφορα έτοιμα εικονικά εργαλεία για άμεση χρήση ή και για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μεταξύ των υπολοίπων δυνατοτήτων που παρέχει το LabVIEW είναι και ο προγραμματισμός σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (Real time) και σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA-Field Programmable Gate Array). Ο προγραμματισμός σε επίπεδο πραγματικού χρόνου επιτρέπει την υλοποίηση προγραμμάτων που σκοπό έχουν την λήψη δεδομένων από αυτόνομες συσκευές-στόχους hardware ή και τον έλεγχό τους σε ταχύτητες που σχετίζονται με τις δυνατότητες του επεξεργαστή του υπολογιστή όπου εκτελείται το πρόγραμμα. Δηλαδή, τα εικονικά εργαλεία που είναι προγραμματισμένα σε επίπεδο πραγματικού χρόνου, τρέχουν σε επίπεδο software.

Σε αντιπαράθεση με το επίπεδο πραγματικού χρόνου, το επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA), επιτρέπει την εκτέλεση παρόμοιων προγραμμάτων σε επίπεδο hardware. Αυτό σημαίνει ότι ο προγραμματισμός στο επίπεδο αυτό απαιτεί την ύπαρξη μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων (compact RIO). Οι πλατφόρμες αυτές είναι αυτόνομες και φέρουν ανεξάρτητο επεξεργαστή ο οποίος, εν γένει, χαρακτηρίζεται από ανώτερες ικανότητες από αυτές που αντιστοιχούν στον επεξεργαστή ενός υπολογιστή. Κατά αυτόν τον τρόπο, η δειγματοληψία ή η παραγωγή δεδομένων που θα εξαχθούν, ανάλογα με την εφαρμογή, πραγματοποιούνται με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα, γεγονός το οποίο είναι απαραίτητο όπως στη λήψη μετρήσεων στο πείραμα της κρούσης όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.

Σχετικά με την δομή μιας εργασίας (project) σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA), θα πρέπει να αναφερθεί ότι αποτελείται από τουλάχιστον δυο διαφορετικά εικονικά όργανα. Το ένα από αυτά έχει συνταχθεί (compiled) σε επίπεδο πραγματικού χρόνου ενώ το άλλο σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών. Τα δύο αυτά εικονικά εργαλεία ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους μέσω ενός FIFO (First In First Out) bus. Το εικονικό εργαλείο που συντάσσεται σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών αναλαμβάνει την λήψη ή την παραγωγή δεδομένων. Το εικονικό εργαλείο που συντάσσεται σε επίπεδο πραγματικού χρόνου εξυπηρετεί στην επεξεργασία των δεδομένων που θα ληφθούν ή θα παραχθούν από το έτερο εικονικό εργαλείο.

## **8.2 Ολοκληρωμένη πλατφόρμα εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων (Compact RIO)**

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εργασίες (projects) στο LabVIEW. Το πρώτο ήταν το Sine Generator project για την παραγωγή ενός ημιτονοειδούς σήματος τάσης στα πειράματα που αφορούσαν το ημιτονοειδές φορτίο και το δεύτερο, ήταν το dma with encoder project που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων της κρούσης. Κοινός παρονομαστής των δύο εργασιών (projects) είναι ο προγραμματισμός τους σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, ένα τέτοιο είδος προγραμματισμού απαιτεί την ύπαρξη μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων. Μία τέτοια πλατφόρμα αποτελείται από τον συνδυασμό ενός ελεγκτή που εργάζεται σε πραγματικό χρόνο, ορισμένων καρτών εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων, μίας μονάδας FPGA (FPGA module) και ενός σκελετού (chassis) που συνδέεται με καλώδιο Ethernet.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής αυτής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα C-RIO 9074 της National Instruments. Το σύστημα αυτή διαθέτει επεξεργαστή 400MHz που εργάζεται σε πραγματικό χρόνο, 512MB μνήμης, 128 MB DRAM και 2M θύρα FPGA. Επιπλέον, παρέχει την δυνατότητα σύνδεσης έως και οκτώ διαφορετικών καρτών εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων στις αντίστοιχες υποδοχές. Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, σημαντικότερο ρόλο επιτελεί το μέγεθος του επεξεργαστή το οποίο είναι δέκα φορές μεγαλύτερο από αυτό του επεξεργαστή του υπολογιστή και επομένως εξασφαλίζει μεγαλύτερη δειγματοληψία η οποία είναι απαραίτητη στα πειράματα της κρούσης.

Στην παραπάνω πλατφόρμα συνδέθηκαν οι κάρτες NI 9220, NI9263 και NI 9401. Η κάρτα NI 9220 χρησιμοποιείται για την λήψη μετρήσεων από αναλογικές εισόδους τάσης. Η μέγιστη δειγματοληψία που υποστηρίζει είναι 100 kSamples/s/channel και διαθέτει 16 κανάλια. Η κάρτα αυτή είναι χρήσιμη στο dma with encoder project όπου γίνεται η λήψη των μετρήσεων από το πείραμα της κρούσης. Στην μέγιστη δειγματοληψία μπορεί να παράγει 3.2 MB/s δεδομένων.

Η κάρτα NI 9263 επιτελεί την λειτουργία παραγωγής σημάτων τάσης εξόδου. Η συχνότητα με την οποία παράγει τάση εξόδου είναι 100 kSamples/s/channel και διαθέτει 4 κανάλια. Η κάρτα αυτή χρησιμοποιείται από το Sine Generator project για την παραγωγή του ημιτονοειδούς σήματος τάσης που διεγείρει τον δονητή.

Τέλος, η κάρτα NI 9401 μπορεί να διαχειριστεί ψηφιακά σήματα εισόδου και εξόδου. Διαθέτει 8 διαφορετικά κανάλια διπλής κατεύθυνσης με χρόνο δειγματοληψίας 100ns. Όπως θα αναφερθεί στην επόμενη παράγραφο, στο dma with encoder project δίνεται η δυνατότητα λήψης μετρήσεων από το ψηφιακό σήμα που στέλνει ένας encoder.

## **8.3 Εργασία (project) dma with encoder στο LabVIEW**

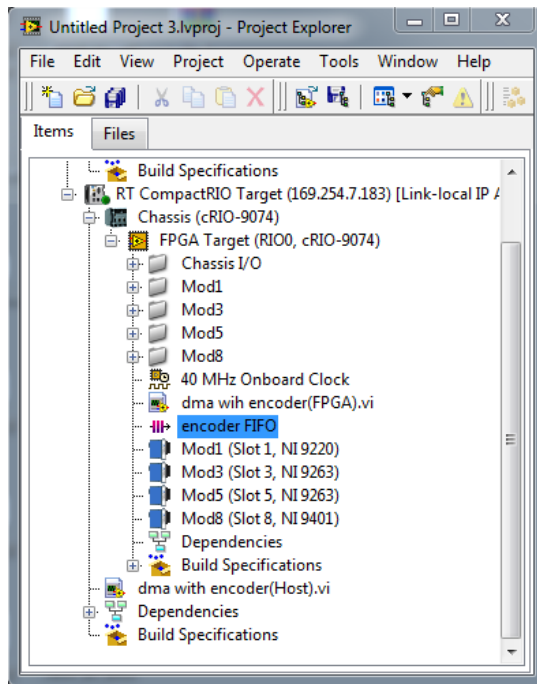
Στο Κεφάλαιο 4 αναφέρεται η συμβολή του dma with encoder project στην λήψη μετρήσεων που αφορούν τόσο την δύναμη που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια της κρούσης όσο και

την ηλεκτρική τάση που παράγεται στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος λόγω της παραμόρφωσης που αυτό υφίσταται. Η εργασία (project) αυτή βασίζεται σε ένα έτοιμο πρόγραμμα που διατίθεται από την National Instruments και το οποίο φέρει το όνομα DMA MCA project. Το πρόγραμμα αυτό εμπλουτίστηκε κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής έτσι ώστε να καλύπτει καλύτερα τις ανάγκες του πειράματος της κρούσης.

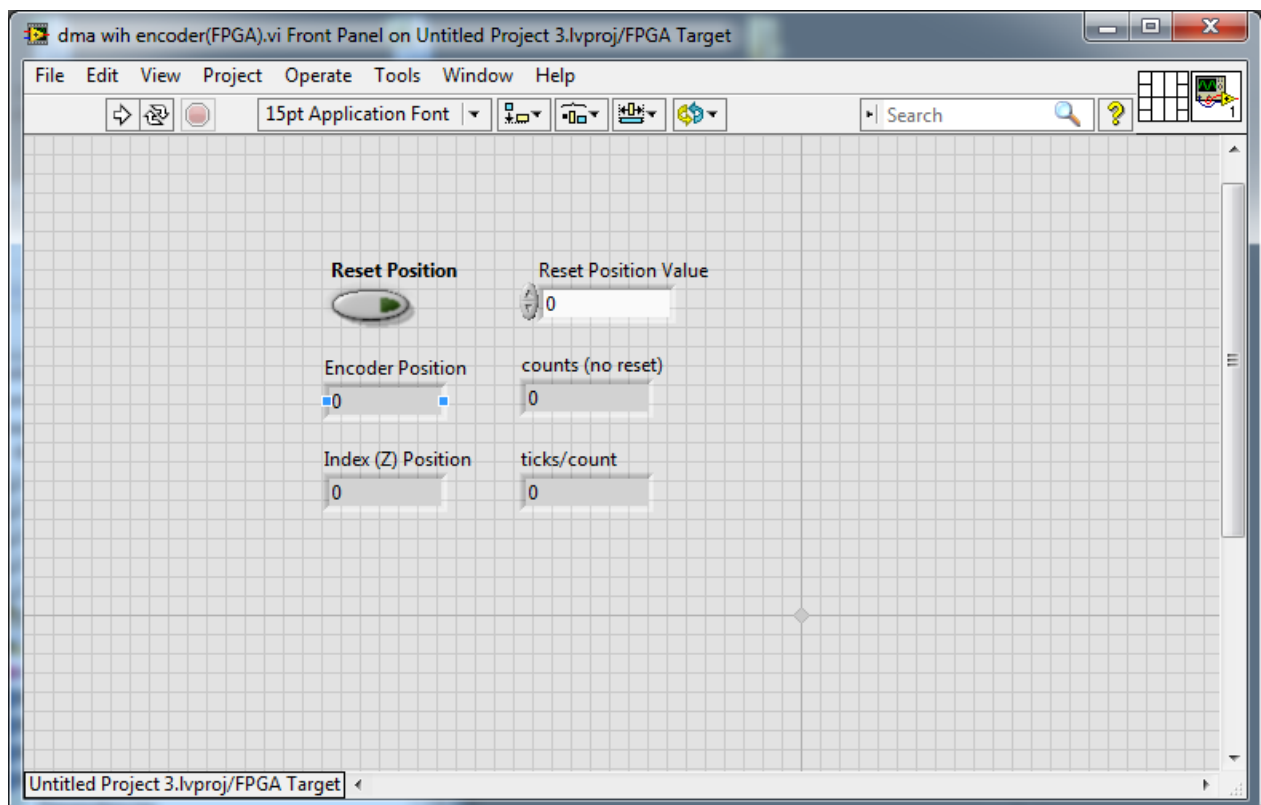
Το dma with encoder project, όπως και το DMA MCA project, είναι εργασίες οι οποίες εκμεταλλεύονται την δυνατότητα του που προσφέρει το LabVIEW για προγραμματισμό σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA). Αυτό το χαρακτηριστικό των εν λόγω προγραμμάτων τους επιτρέπει να λαμβάνουν μετρήσεις με μεγαλύτερη συχνότητα δειγματοληψίας, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για την παρακολούθηση πειραμάτων κρούσης. Η ανάγκη για μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας επιβάλλεται από το γεγονός ότι οι κρούσεις, εν γένει, είναι βίαια φαινόμενα και προκαλούν ταλαντώσεις σε πολλές ιδιοσυχνότητες κάποιες εκ των οποίων είναι ιδιαίτερα υψηλές.

Αν και το dma with encoder project, στην παρούσα διπλωματική, εξυπηρετεί τις ανάγκες του πειράματος της κρούσης όπως αυτό παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, στην πραγματικότητα, διαθέτει περισσότερες δυνατότητες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πιο περίπλοκα πειράματα. Συγκεκριμένα, η εργασία δύναται να πραγματοποιεί την ταυτόχρονη λήψη μετρήσεων από 4 αναλογικά κανάλια και 2 ψηφιακά, ενώ με μικρές τροποποιήσεις και το κατάλληλο hardware, οι αριθμοί των καναλιών μπορούν να αυξηθούν σημαντικά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα 2 από τα αναλογικά κανάλια χρησιμοποιήθηκαν για την ταυτόχρονη μέτρηση της δύναμης και του παραγόμενου ηλεκτρικού δυναμικού κατά την διάρκεια της κρούσης. Τα υπόλοιπα 2 μπορούν να φανούν χρήσιμα σε πειράματα κρούσης σε πλάκα όπου υπάρχουν περισσότεροι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες για τον καθορισμό της θέσης πάνω στην πλάκα που έλαβε χώρα η μελετούμενη πρόσκρουση. Επιπλέον, υπάρχουν και 2 ψηφιακά κανάλια τα οποία μπορούν να λαμβάνουν μετρήσεις που προέρχονται από κωδικοποιητή (encoder). Αυτά τα κανάλια είναι ιδανικά για την μέτρηση της ταχύτητας και της θέσης του βραχίονα που εκτελεί την κρούση σε πειράματα που η κίνησή του οφείλεται στην ύπαρξη κάποιου κινητήρα.

Αναφορικά με την δομή του προγράμματος, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η εργασία (project) αποτελείται από ένα εικονικό όργανο που συντάσσεται σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA VI), ένα εικονικό όργανο που υλοποιείται σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (Real Time VI), ενώ η πληροφορία μεταξύ των δύο διέρχεται από ένα bus που ονομάζεται encoder FIFO. Στο Σχήμα 8-1 έως και το Σχήμα 8-5 παρουσιάζονται ο project explorer της εργασίας και οι προσόψεις και τα δομικά διαγράμματα των δύο συνεργαζόμενων εικονικών οργάνων.

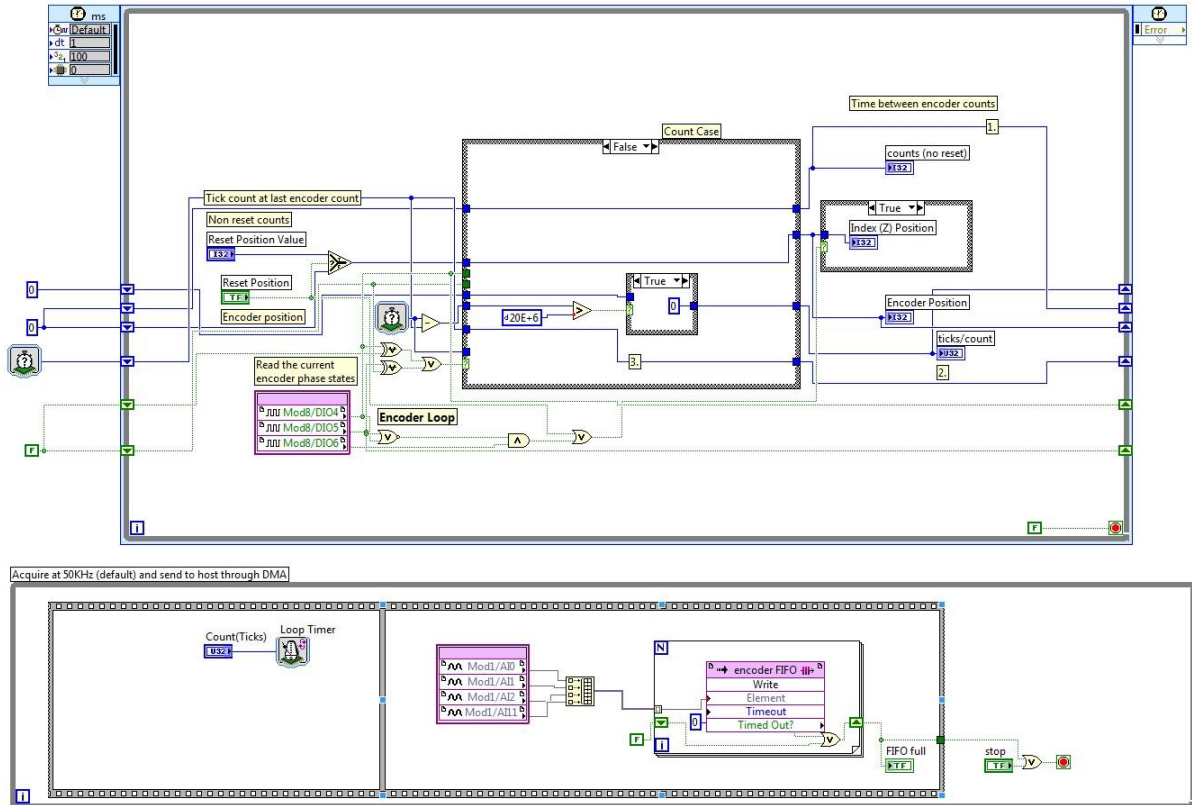


Σχήμα 8-1. Project explorer του dma with encoder project.

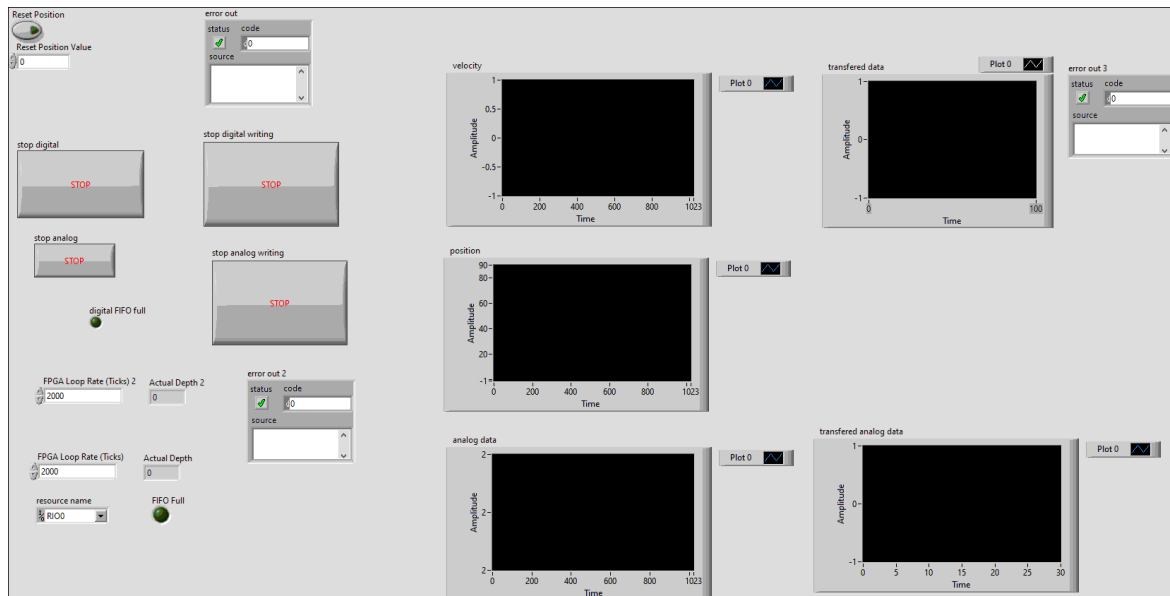


Σχήμα 8-2. Πρόσωση (front panel) του dma with encoder FPGA VI.

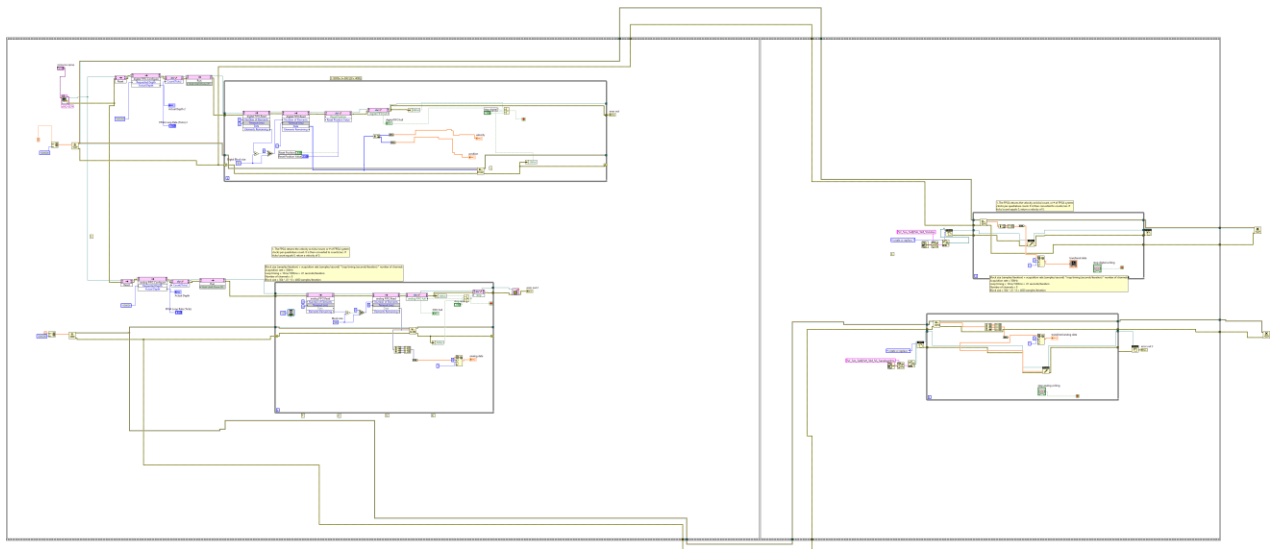




Σχήμα 8-3. Δομικό διάγραμμα (block diagram) του dma with encoder FPGA VI.



Σχήμα 8-4. Πρόσωση (front panel) του dma with encoder Real Time VI.



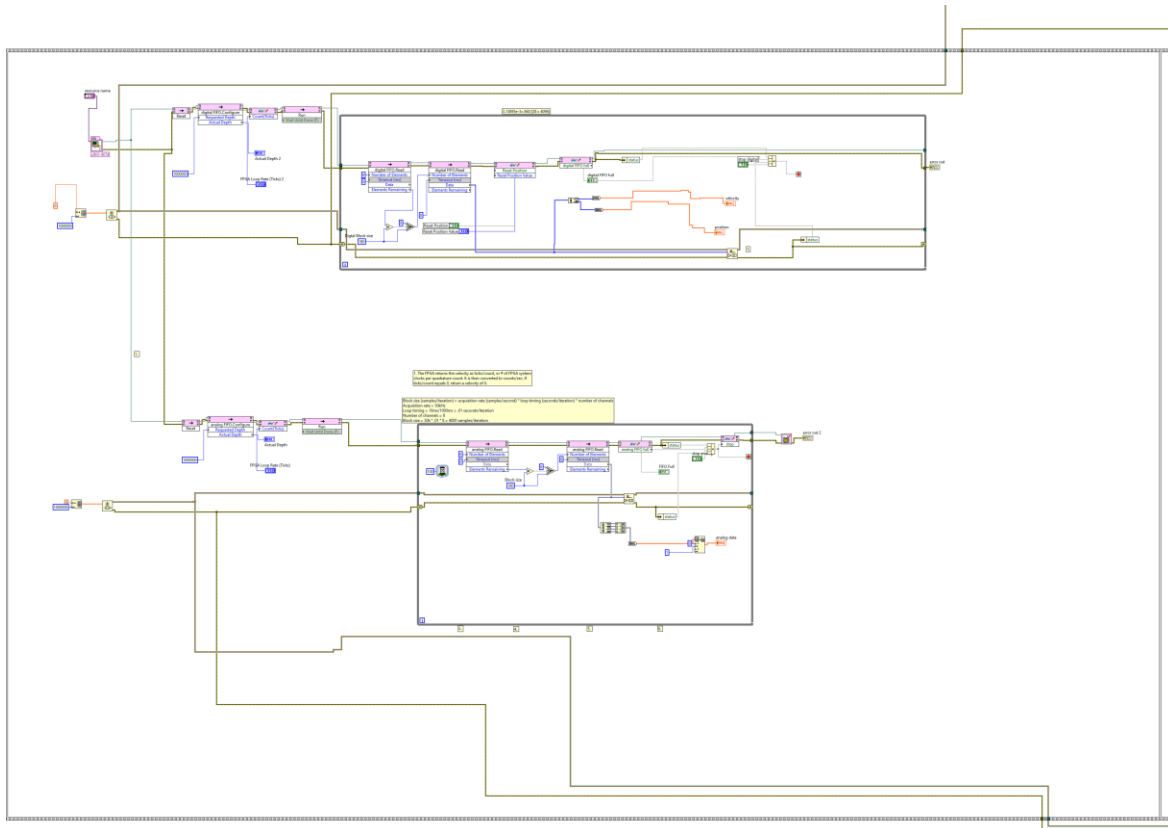
**Σχήμα 8-5. Δομικό διάγραμμα (block diagram) του dma with encoder Real Time VI.**

Στο δομικό διάγραμμα του εικονικού οργάνου που συντάσσεται σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA VI), είναι εμφανές ότι υπάρχουν δύο μεγάλες δομές ανάδρασης (loops). Η δομή που εμφανίζεται στο Σχήμα 8-3, και συγκεκριμένα στο ανώτερο τμήμα του, αντιστοιχεί στο κομμάτι του οργάνου που σχετίζεται με την λήψη μετρήσεων από τα ψηφιακά κανάλια. Η δομή στο κατώτερο τμήμα εξυπηρετεί την εισαγωγή δεδομένων από τα αναλογικά κανάλια. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, το εικονικό όργανο που συντάσσεται σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA VI) εκτελεί μόνο την συλλογή των δεδομένων τα οποία αποθηκεύονται σε μορφή πίνακα. Ο γραφικός κώδικας που περιέχεται σε αυτό το εικονικό όργανο επιβεβαιώνει επίσης ότι η δειγματοληψία πραγματοποιείται χωρίς σφάλματα.

Το εικονικό όργανο που συντάσσεται σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (real time VI), είναι το όργανο το οποίο χρησιμοποιείται απευθείας από τον χρήστη. Παρατηρώντας την πρόσοψη του (front panel) που παρατίθεται στο Σχήμα 8-4, είναι εμφανές ότι σε αυτήν παρουσιάζονται διάφορες επιλογές στον χρήστη με την μορφή ρυθμιστών (controls), ενώ παράλληλα φαίνονται και τα αποτελέσματα του προγράμματος μέσω των δεικτών (indicators) σε μορφή διαγραμμάτων. Η βασικότερη επιλογή που γίνεται σε αυτό το επίπεδο από τον χρήστη αφορά την περίοδο της δειγματοληψίας που αντιστοιχεί στα αναλογικά κανάλια. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα εκκινεί την λειτουργία του με το πάτημα ενός κουμπιού και λήψη των μετρήσεων τερματίζεται με χρήση των δύο κομβίων STOP, ένα για τα ψηφιακά και ένα για τα αναλογικά κανάλια. Αυτό το χαρακτηριστικό του προγράμματος το διαφοροποιεί σημαντικά από άλλα προγράμματα που επιτελούν αντίστοιχη λειτουργία καθώς στα περισσότερα από αυτά ο συνολικός χρόνος της διάρκειας του πειράματος πρέπει να δηλωθεί εκ των προτέρων από τον χρήστη. Κατά αυτόν τον τρόπο, η εργασία (project) που παρουσιάζεται, υπερτερεί έναντι των υπολοίπων ως προς την χρηστικότητα της.

Το αντίστοιχο δομικό διάγραμμα του εικονικού οργάνου που συντάσσεται σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (real time VI) είναι πιο περίπλοκο από αυτό που περιγράφηκε

προηγουμένως. Σε αυτό το εικονικό όργανο πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται στο προηγούμενο εικονικό όργανο. Στο Σχήμα 8-5, είναι εμφανής η ύπαρξη δύο μεγάλων τμημάτων, που στο γραφικό περιβάλλον του LabVIEW παρουσιάζονται σαν δύο καρτέ ενός φιλμ. Το καρτέ που φαίνεται στο επόμενο σχήμα περιλαμβάνει δύο επαναληπτικές δομές (loops). Οι δομές αυτές είναι υπεύθυνες για την ανάκτηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν στο επίπεδο του FPGA, έτσι ώστε να είναι διαθέσιμες στο επίπεδο Real Time.

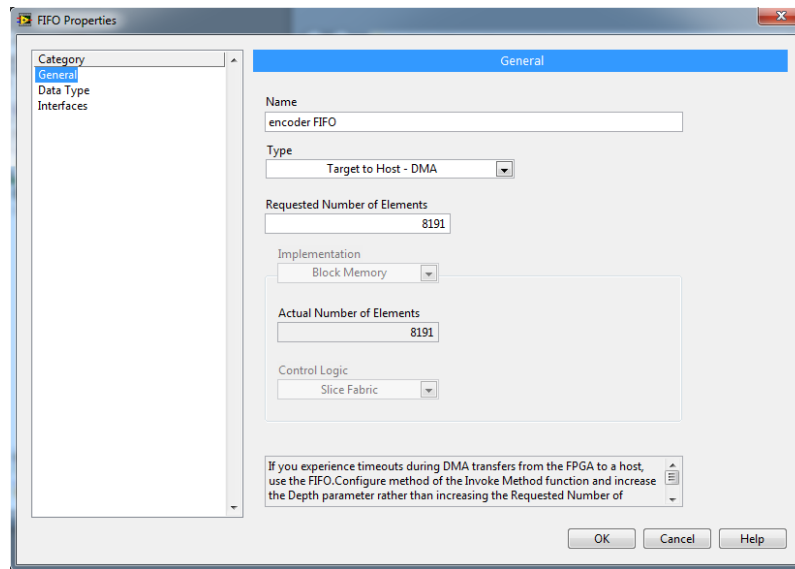


**Σχήμα 8-6. Τμήμα ανάκτησης δεδομένων του dma with encoder Real Time VI.**

Η δομή που βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του ανωτέρω σχήματος αντιστοιχεί στην ανάκτηση των δεδομένων που συλλέγονται από τα ψηφιακά κανάλια. Η δομή που βρίσκεται στο κάτω μέρος του σχήματος, πραγματοποιεί την αντίστοιχη λειτουργία προκειμένου να γίνουν διαθέσιμα τα δεδομένα των αναλογικών καναλιών. Σε αυτές τις επαναληπτικές δομές, περιλαμβάνονται επιπλέον δύο δείκτες (indicators) οι οποίοι παρουσιάζουν με μικρή καθυστέρηση τα δεδομένα που ανακτώνται σε μορφή διαγραμμάτων.

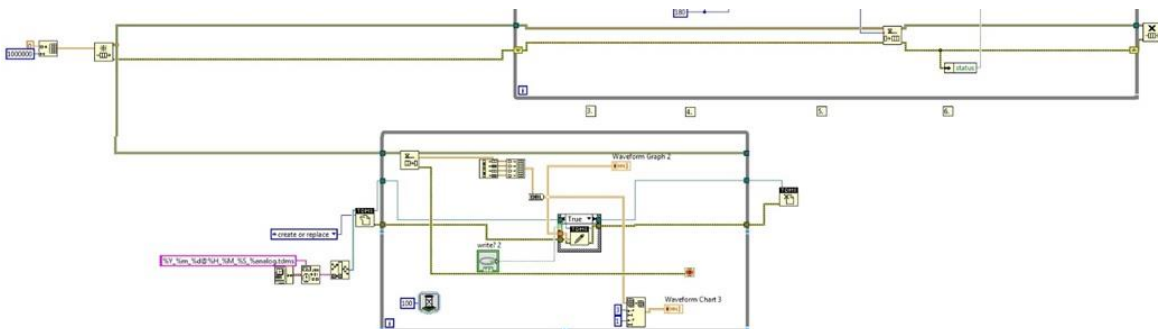
Τα δεδομένα που συλλέγονται από το πρώτο εικονικό εργαλείο (FPGA VI) μεταφέρονται στο δεύτερο (Real time VI) μέσω ενός bus που έχει μορφή πίνακα και του οποίου η διάσταση καθορίζεται από τον χρήστη. Τα δεδομένα εισέρχονται στον πίνακα αυτό το ένα μετά το άλλο και αν ο πίνακας αυτός πληρωθεί, τότε η επόμενη τιμή που θα εισέλθει θα εκτοπίσει την πρώτη τιμή που τοποθετήθηκε σε αυτόν. Αυτού του είδους, τα bus ονομάζονται FIFO (First In First Out). Όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια δεδομένων αν το πρόγραμμα δεν έχει συνταχθεί κατάλληλα. Τα

χαρακτηριστικά του FIFO καθορίζονται από τον προγραμματιστή σε αντίστοιχο παράθυρο όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 8-7.



**Σχήμα 8-7. Παράθυρο προσδιορισμού χαρακτηριστικών FIFO.**

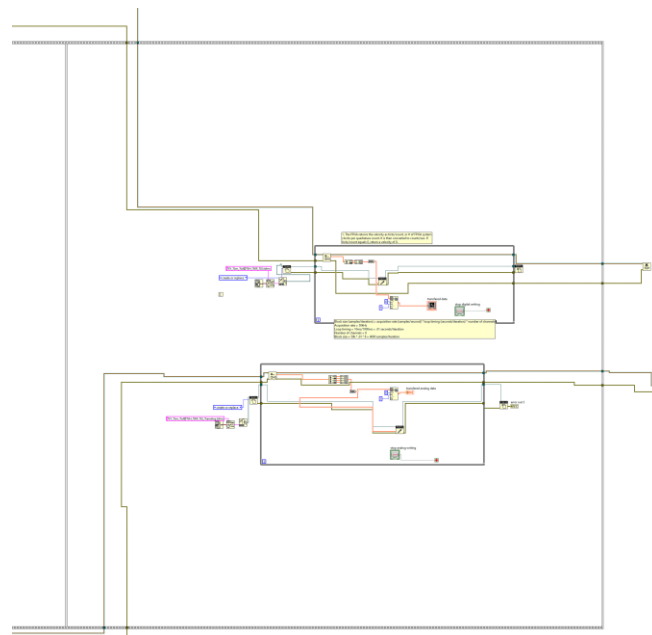
Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δομές που επιτελούν την επεξεργασία των δεδομένων, έχουν συνταχθεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και βασίζονται σε μία τεχνική που ονομάζεται επαναληπτική δομή παραγωγού-καταναλωτή. Η τεχνική αυτή εξυπηρετεί στην εύρυθμη λειτουργία του προγράμματος αφού χωρίς αυτήν θα υπήρχε απώλεια δεδομένων. Η απώλεια των δεδομένων οφείλεται στο γεγονός ότι οι λειτουργίες που επιτελούνται στο εικονικό όργανο που συντάσσεται σε συστοιχία επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA VI), ολοκληρώνονται στον επεξεργαστή των 400MHz της πλατφόρμας C-RIO, ο οποίος είναι σαφώς πιο γρήγορος από τον αντίστοιχο του υπολογιστή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται επιτυχώς με την τεχνική που αναφέρθηκε καθώς τα δεδομένα που εξέρχονται από το πρώτο εικονικό όργανο (FPGA VI) τοποθετούνται σε μία σειρά αναμονής (queue) και αξιοποιούνται από το εικονικό όργανο που συντάσσεται σε πραγματικό χρόνο (Real time VI) όταν αυτό ζητηθεί. Η υλοποίηση της παραπάνω τεχνικής έχει ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις να παρουσιάζονται με καθυστέρηση στον χρήστη, ωστόσο δεν υπάρχει απώλεια δεδομένων. Το τμήμα του δομικού διαγράμματος που αντιστοιχεί στην προαναφερθείσα τεχνική παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-8.



**Σχήμα 8-8. Τεχνική παραγωγού-καταναλωτή (producer-consumer).**

Αναφέρθηκε προηγουμένως πως ο κώδικας είναι γραμμένος μέσα σε μια δομή που μοιάζει με φιλμ. Η δομή αυτή εξασφαλίζει πως οι εντολές που περιλαμβάνονται στο αριστερό καρέ θα διεκπεραιωθούν εξ' ολοκλήρου, προτού αρχίσει η εκτέλεση των εντολών του δεξιού καρέ. Επομένως, ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο κώδικας μπορεί να περιγραφεί ως εξής. Αρχικά, οι δύο δομές λαμβάνουν τις μετρήσεις που μεταφέρει το FIFO από το FPGA VI και γεμίζουν τις δύο δομές αναμονής. Αυτό συμβαίνει αδιαλείπτως μέχρι ο χρήστης να πιέσει τα δύο κομβία με την ένδειξη STOP. Κάθε κομβίο έχει λεζάντα που εξηγεί ποια διαδικασία τερματίζει. Στην συνέχεια, δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί στις δομές αναμονής γίνονται διαθέσιμα στο επόμενο καρέ.

Το δεύτερο καρέ του φιλμ περιλαμβάνει και αυτό δύο δομές, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αποθήκευση των μετρήσεων. Οι δομές αυτές είναι παρόμοιες μεταξύ τους και εκεί πραγματοποιείται η αποθήκευση των ανακτηθέντων δεδομένων. Είναι σημαντικό να επεξηγηθεί, ότι ο κώδικας έχει συντεθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο χρήστης να έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει μόνο το μέρος που τον ενδιαφέρει από τα δεδομένα που βρίσκονται σε αναμονή. Σε αυτό το στάδιο του κώδικα, γίνεται η ανάσυρση των μετρήσεων που βρίσκονται στις δομές αναμονής (queues). Τα δεδομένα που ανασύρονται και είναι έτοιμα για αποθήκευση προβάλλονται σε διαγράμματα τα οποία εμφανίζονται στην πρόσοψη (front panel) του οργάνου. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει σε ποιο σημείο να τερματίσει την αποθήκευση των μετρήσεων πατώντας τα άλλα δύο κομβία με ένδειξη STOP. Η σύνταξη αυτήν επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους των αρχείων που θα παραχθούν. Η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται σε δύο αρχεία, ένα για τα δεδομένα των ψηφιακών καναλιών και ένα για αυτά των αναλογικών. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθεται το τμήμα του κώδικα που είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση των μετρήσεων.



**Σχήμα 8-9. Τμήμα ανάκτησης δεδομένων του dma with encoder Real Time VI.**

## 9 Παράρτημα Β

### 9.1 Επίλυση διαφορικών εξισώσεων στο Matlab

Στην παράγραφο 5.4.1 αναφέρθηκε ότι για τον προσδιορισμό της έντασης της πηγής ρεύματος που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στο Pspice, είναι απαραίτητη η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (5-7). Αυτή η εξίσωση είναι μια διαφορική εξίσωση δεύτερου βαθμού. Στην παράγραφο 2.2.1, περιγράφηκαν κάποιοι τρόποι με τους οποίους μπορεί να προσεγγιστεί αναλυτικά αυτή η εξίσωση.

Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε η επιλογή να επιλυθεί αριθμητικά το πρόβλημα. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν την επιλογή είναι δύο. Ο πρώτος είναι πως η αριθμητική επίλυση είναι λιγότερο επίπονη και απλούστερη. Η δεύτερη και πιο σημαντική αιτία είναι το γεγονός ότι η είσοδος της εξίσωσης προκύπτει από τις μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Επομένως, δεν υπάρχει κάποια αναλυτική έκφραση του σήματος της εισόδου. Αντιθέτως, η δύναμη είναι διαθέσιμη σε διακριτοποιημένη μορφή η οποία είναι ιδανική για την χρήση υπολογιστικών μέσων.

Για την επίλυση της εξίσωσης (5-7) επιλέχθηκε η χρήση της έτοιμης ρουτίνας του Matlab που ονομάζεται ode45. Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για την λύση διαφορικών εξισώσεων. Ωστόσο, η ode45, όπως και οι περισσότερες υπολογιστικές μέθοδοι, δεν μπορούν να επιλύσουν απευθείας μια δευτεροβάθμια εξίσωση. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η μετατροπή της δευτεροβάθμιας εξίσωσης σε ένα σύστημα δύο πρωτοβάθμιων, όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\ddot{\eta} + 2\zeta\omega_n \cdot \dot{\eta} + \omega_n^2 \cdot \eta = f \cdot u \Rightarrow$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\eta}_1 = \eta_2 \\ \dot{\eta}_2 = -2\zeta\omega_n \cdot \eta_2 - \omega_n^2 \cdot \eta_1 + f \cdot u \end{array} \right\} \quad (9-1)$$

Όπου, το  $\eta_1$  τίθεται ίσο με την μεταβλητή  $\eta$  και το  $\eta_2$  τίθεται ίσο με την πρώτη παράγωγο του  $\eta$ . Η παραπάνω μορφή της εξίσωσης είναι συμβατή με τις απαιτήσεις της συνάρτησης ode45. Η συνάρτηση ode45 καλείται με την εξής εντολή:

$$[t,h] = \text{ode45}(@(\text{t,h}) \text{myode}(\text{t,h,time},\text{F}), \text{tspan}, \text{ic});$$

Όπου:

- h: ο πίνακας που περιλαμβάνει τα διανύσματα με τις τιμές των  $\eta_1$  και  $\eta_2$ , όπως αυτές προκύπτουν από την εκτέλεση της ode45.
- t: το διάνυσμα που περιέχει τις χρονικές τιμές που αντιστοιχούν στις τιμές του πίνακα h. Η διακριτοποίηση στο πεδίο του χρόνου διαμορφώνεται αυτόματα από την ode45 εκτός και αν ζητηθεί το αντίθετο από τον χρήστη.
- tspan: δίνει το χρονικό διάστημα για το οποίο ζητείται η επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων.
- ic: το διάνυσμα που περιέχει τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος
- myode(t,h,time,F): η συνάρτηση που περιέχει το σύστημα διαφορικών εξισώσεων

Η ode45 δέχεται τις διαφορικές εξισώσεις που επιλύει σε μορφή συνάρτησης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η συνάρτηση αυτή ονομάστηκε myode. Η συνάρτηση myode συντάσσεται όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

```
function dhdt=myode(t,h,time,F)
w1=716.0;
z=0.025;
dhdt=zeros(2,1);
Fnew = interp1(time,F,t); % Interpolate the data set
(gt,g) at time t
dhdt = [h(2);-w1^(2)*h(1) - 2*z*w1*h(2) + 13.5*Fnew];
% Evaluate ODE at time t
```

#### Σχήμα 9-1. Σύνταξη συνάρτησης myode για χρήση από την ode45.

Στην συνάρτηση myode είναι απαραίτητη η δήλωση των εισόδων time και F και των εξόδων t και h. Η είσοδος F είναι το διάνυσμα με τις τιμές από τη μέτρηση της δύναμης στα πειράματα της κρούσης και το διάνυσμα time περιλαμβάνει τις χρονικές στιγμές στις οποίες λήφθηκε η κάθε μέτρηση.