



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

Νευροασαφής έλεγχος σε μοντέλο πλάκας με αποκόλληση

Διπλωματική εργασία

του Ορέστη Μπερτίδη

Επιβλέπων: καθ. Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Χανιά, Ιούνιος 2018

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
1 Εισαγωγή.....	5
2 Μοντελοποίηση Σύνθετης Κατασκευής	7
2.1 Μοντελοποίηση Με Πεπερασμένα Στοιχεία	7
2.2 Πιεζοηλεκτρισμός	8
2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά	9
3 Θεωρία Αποκόλλησης.....	11
3.1 Περιγραφή του Μοντέλου Αποκόλλησης.....	11
4 Ασαφής Έλεγχος.....	14
4.1 Ασαφής Λογική – Ιστορική Αναδρομή.....	14
4.2 Ασαφή Σύνολα	14
4.3 Ασαφοποίηση	15
4.4 Αποασαφοποίηση.....	15
4.5 Κανόνες Ασαφούς Συστήματος.....	15
5 Προσαρμοστικός Νευροασαφής Έλεγχος.....	16
5.1 ANFIS.....	16
5.2 Διαδικασία Προσομοίωσης σε Matlab	17
6 Αριθμητικά αποτελέσματα	22
6.1 Έλεγχος Χωρίς Αποκόλληση.....	23
6.2 Έλεγχος με αποκόλληση 10%	27
6.3 Έλεγχος με αποκόλληση 50%	29
6.4 Έλεγχος με αποκόλληση 90%	31
7 Συμπεράσματα.....	33
8 Βιβλιογραφία	34

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου, καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη που με βοήθησε και καθοδήγησε στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Οι παρατηρήσεις του ήταν πάντα εύστοχες και καίριες με σκοπό την διευκόλυνση της μελέτης μου, ενώ ήταν πάντα διαθέσιμος για οποιαδήποτε απορία και ερώτημα παρουσιαζόταν.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Γεώργιο Ταϊρίδη, διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τον χρόνο που μου αφιέρωσε για την επίλυση των αποριών μου και την καθοδήγηση μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράστασή τους και τη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή, θα ασχοληθούμε με ένα σύστημα προκατασκευασμένου νεύρο-ασαφούς ελεγκτή, τον οποίο αφού παραμετροποιήσουμε, θα μελετήσουμε το πώς αντιδρά σε διάφορα στάδια αποκόλλησης. Το σύστημα πάνω στο οποίο θα κάνουμε τις δοκιμές, έχει σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί χωρίς παραμετρική διερεύνηση από τον Δρ. Γεώργιο Ταϊρίδη στα πλαίσια της διατριβής του με τίτλο «Προσομοίωση σύνθετων ευφυών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά» .

Για την εργασία είναι απαραίτητη η προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, με τη βοήθεια του προγράμματος Simulink της Matlab. Καθώς επίσης και η χρήση ενός νεύρο-ασαφούς ελεγκτή (neuro fuzzy control) που παρέχεται στη βασική βιβλιοθήκη της Matlab .

Απώτερος σκοπός λοιπόν της εργασίας, είναι να καταφέρω σε συνθήκες ποσοστιαίας αποκόλλησης (δηλαδή να ξεκολλάει το Συγκολλητικό Υλικό ποσοστιαία, λόγω αστοχίας κόλλησης) να βγάλω κάποια συμπεράσματα για τη λειτουργία του ελεγκτή που θα έχει τοποθετηθεί στο σύστημα.

1 Εισαγωγή

Ανέκαθεν, ένα από τα βασικότερα προβλήματα της μηχανικής αποτελούσε ο έλεγχος των ταλαντώσεων στις διάφορες κατασκευές. Τα τελευταία χρόνια, η επιστήμη έχει φτάσει σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μπορούμε με μεγάλη ακρίβεια να προβλέψουμε την μηχανική συμπεριφορά κάθε κατασκευής, με σκοπό την λήψη κατάλληλων μέτρων για την αντιμετώπιση και ακόμα καλύτερα την αποφυγή προβλημάτων που ενδέχεται να εμφανιστούν.

Πέρα από τη χρησιμοποίηση μαθηματικών μεθόδων ελέγχου, οι οποίες συνήθως παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση γραμμικών νόμων υπό ορισμένες συνθήκες, είναι δυνατή η εφαρμογή μη γραμμικών ελεγκτών βασισμένων σε τεχνικές ασαφούς και νευροασαφούς λογικής.

Γενικά, η ασαφής λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με γενετικούς αλγόριθμους ή και με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης σε πληθώρα εφαρμογών. Για παράδειγμα οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν για την εκπαίδευση των ασαφών συστημάτων, σε κατασκευές για τη βελτιστοποίηση του ενεργού ελέγχου σε υψηλές κτηριακές κατασκευές ή στη χημική βιομηχανία, για να προσδιοριστεί ο έλεγχος του pH.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήσαμε μία από τις πλέον σύγχρονες μεθόδους μείωσης ταλαντώσεων για να προσπαθήσουμε να καταφέρουμε μείωση στη ταλάντωση του δοκιμίου μας. Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε είναι αυτή του νεύρο-ασαφή ελέγχου (neuro fuzzy control). Το δοκίμιο πάνω στο οποίο δουλέψαμε είναι μια τετραγωνική πλάκα με γνωστά όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά της. Αυτή αποτελείται από:

- Μια τετραγωνική πλάκα, που βρίσκεται στο μέσον του συστήματος και αποτελεί το Ελαστικό μας Μέρος.
- Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία, που βρίσκονται στο ακραίο πάνω και κάτω στρώμα της κατασκευής μας.
- Συγκολλητικό Υλικό, που βρίσκεται ακριβώς πάνω και κάτω από το ελαστικό μας μέρος.

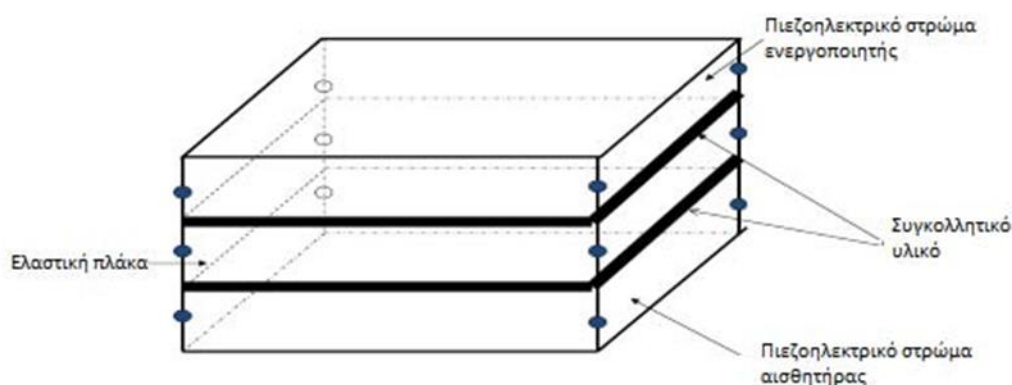
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι η πλάκα που προαναφέραμε, η οποία διακριτοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και η οποία λόγω της ύπαρξης του συγκολλητικού υλικού είναι επιλέξιμη για μελέτη προβλημάτων αστοχιών όπως για παράδειγμα η αποκόλληση. Συγκεκριμένα, στην πλάκα εφαρμόστηκε νευρο-ασαφής ελεγκτής, με σκοπό τον έλεγχο των ταλαντώσεών της και την επιβολή δυνάμεων, ώστε αυτή να παραμένει κατά το δυνατόν πλησιέστερα στη θέση ισορροπίας, δηλαδή να πραγματοποιεί την ταλάντωση με μειωμένο πλάτος. Επιπλέον, έγινε διερεύνηση στο κατά πόσο μία αποκόλληση μπορεί να επηρεάσει την συμπεριφορά αυτών των ελεγκτών.

2 Μοντελοποίηση Σύνθετης Κατασκευής

Στο συγκεκριμένο σημείο παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο σύνθετης πλάκας της οποίας, το άνω και κάτω στρώμα αποτελείται από πιεζοηλεκτρικό υλικό. Ενώ, ενδιάμεσα τους υπάρχει συγκολλητικό υλικό (κόλλα). Το άνω στρώμα μπορεί για παράδειγμα, να χρησιμοποιηθεί σαν διεγέρτης και το κάτω στρώμα σαν αισθητήρας, με απώτερο σκοπό τη δημιουργία συστήματος ελέγχου, για τη μείωση των ταλαντώσεων της κατασκευής.

Οι σύγχρονες και εξελιγμένες κατασκευές που έχουν αυτόνομο σύστημα αναγνώρισης βλαβών αλλά και ελέγχου, αποτελούν επιστημονικούς τομείς ανάπτυξης και αντικείμενο έρευνας των έξυπνων κατασκευών, όπως και στις κατασκευές στην αεροναυτική και την αεροδιαστημική.

Για την μοντελοποίηση της σύνθετης κατασκευής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη στο τομέα της μηχανικής και των κατασκευών.



Εικόνα 1: 3D μοντέλο σύνθετης πλάκας και η τοποθέτηση των κόμβων

2.1 Μοντελοποίηση Με Πεπερασμένα Στοιχεία

Όταν αναφερόμαστε στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, εννοούμε την εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων για την επίλυση δύσκολων διαφορικών εξισώσεων. Αποτελεί δηλαδή, μια αριθμητική μέθοδο για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Έχει το **πλεονέκτημα** ότι δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Πρόκειται για ένα ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό

εφαρμογών σε αρκετούς τομείς. Τα πεπερασμένα στοιχεία βασίζονται ουσιαστικά στο γεγονός ότι μπορούμε να επιτύχουμε μια καλή προσέγγιση της λύσης ενός προβλήματος μηχανικής όταν διαλέγουμε και επιλύουμε πολλές συναρτήσεις απλής μορφής με συστηματικό τρόπο. **Μειονέκτημα** αποτελούν οι πάρα πολλές πράξεις που προκύπτουν και η ανάγκη για μεγάλη και χρονοβόρα επεξεργασία. Με τη χρησιμοποίηση βέβαια ηλεκτρονικού υπολογιστή, η μέθοδος αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά άμεσα, κάνοντας την μια εφικτή διαδικασία και όχι ακατόρθωτη.

Τα πεπερασμένα στοιχεία θεωρούμε ότι συνδέονται μεταξύ τους αποκλειστικά με διακριτούς κόμβους. Η συμπεριφορά των στοιχείων μπορεί να περιγραφεί μονοσήμαντα, συναρτήσει των μεγεθών τους στους κόμβους (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη ελέγχου), στους οποίους εφαρμόζονται. Για τη διακριτοποίηση του μοντέλου μπορούμε να επιλέξουμε διαφόρων ειδών πεπερασμένα στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι βρίσκονται στα άκρα τους. Τα επιλεγμένα στοιχεία καθορίζουν τους βαθμούς ελευθερίας κάθε κόμβου, δηλαδή τις δυνατότητες μετακίνησης του κάθε κόμβου π.χ. για ένα δυσδιάστατο σχήμα, η μετακίνηση του κόμβου είναι διάνυσμα δύο στοιχείων που εκφράζουν την μετατόπιση στο X-Y σύστημα συντεταγμένων. Για ένα τρισδιάστατο σχήμα, η μετακίνηση του κόμβου είναι ένα διάνυσμα τριών στοιχείων που εκφράζουν την μετατόπιση του κάθε κόμβου στο X-Y-Z σύστημα συντεταγμένων κ.ο.κ.

Το κύριο νόημα λοιπόν της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρωϊκή ανάλυση, η δυνατότητα που μας δίνει αυτή η μέθοδος να διαιρέσουμε μια πραγματική κατασκευή σε πολλά μικρά συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ένα συγκεκριμένο αριθμό κόμβων.

2.2 Πιεζοηλεκτρισμός

Ο πιεζοηλεκτρισμός ανακαλύφθηκε το 1880 από τους Γάλλους φυσικούς Jacques και Pierre Curie. Ετυμολογικά, η λέξη πιεζοηλεκτρισμός σημαίνει ηλεκτρική ενέργεια από την πίεση. Προέρχεται από την λέξη πιέζω και ηλεκτρον.

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών (κυρίως κρυσταλλικών αλλά και μερικών κεραμικών) να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική πίεση. Αυτό ισχύει και αντίστροφα, δηλαδή ένα εφαρμόζουμε ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε ένα

υλικό, προκαλεί μηχανική παραμόρφωση στο υλικό αυτό. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει στα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά φερροηλεκτρικά κεραμικά υλικά.

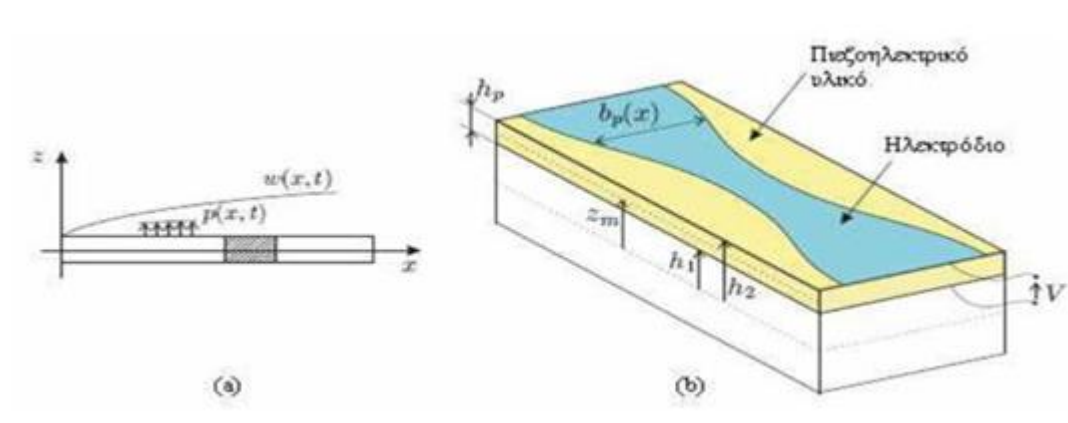
Σε ορισμένα κεραμικά υλικά, κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία, γνωστή ως θερμοκρασία Curie, παράγονται ηλεκτρικά δίπολα με τυχαίο προσανατολισμό μέσα στον κρύσταλλο, ο οποίος μακροσκοπικά είναι μηδέν. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πόλωσης, παρουσία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, αυτά τα δίπολα τείνουν να ευθυγραμμίζονται οδηγώντας μακροσκοπικά σε ένα ηλεκτρικό δίπολο. Μετά τη διαδικασία ψύξης και την αφαίρεση του πολωτικού πεδίου, τα ηλεκτρικά δίπολα δεν μπορούν να επιστρέψουν στις αρχικές τους θέσεις και το υλικό γίνεται μόνιμα πιεζοηλεκτρικό, με δυνατότητα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα. Αυτή η κατάσταση χάνεται μόνο όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει τη θερμοκρασία Curie ή όταν ο μετατροπέας υποβληθεί σε ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο.

2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή στην καθημερινότητα. Χρησιμοποιούνται στα ρολόγια ακριβείας, σε ακουστικά, βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά μέρη των αυτοκινήτων, σε οπτικά συστήματα κ.α. Τα βασικά **πλεονεκτήματα** τους είναι: η δυνατότητα δημιουργίας συμπαγών κατασκευών που καταλαμβάνουν μικρό όγκο, η υψηλή ακρίβεια διέγερσης και οι πάρα πολύ μικροί χρόνοι απόκρισης που διαθέτουν, καθώς και η ικανότητα χειρισμού σε συνθήκες κενού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα αναφερθούμε στην χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών σε ελάσματα, με σκοπό την παραμόρφωση τους όταν βρίσκονται υπό ηλεκτρική τάση.

Παραδείγματα υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το αλάτι Rochelle ή Seignette (τρυγικό καλιονάτριο, $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), το ADP (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), το ένυδρο θεικό λίθιο, ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride), κτλ.

Πέρα από τα προαναφερθέντα υλικά στη δεκαετία του 1950-60 βρέθηκε ότι το ανθρώπινο οστό επίσης επιδεικνύει ένα πιεζοηλεκτρικό δυναμικό όταν εφαρμόζεται σε αυτό στρεπτική φόρτιση (Fukada & Yasuda 1957).



Εικόνα 2: Πιεζοηλεκτρική δοκός με πιεζοηλεκτρικά ελάσματα

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ένα προϊόν συγκόλλησης πιεζοηλεκτρικού υλικού, πολωμένου κατά τον άξονα z . Η μια πλευρά έχει ως ηλεκτρόδιο την υποστηρικτική κατασκευαστική δομή, ενώ στην άλλη υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο μεταβλητού πάχους. Έχοντας λοιπόν δύο ηλεκτρόδια δημιουργείται διαφορά δυναμικού. Μπορούμε δηλαδή, ελέγχοντας την τάση η οποία διαρρέει το πιεζοηλεκτρικό υλικό να το μετακινήσουμε κατά άξονα z όπως θέλουμε.

Η κίνηση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που οφείλεται στην επιμήκυνση ή την συμπίεση του, περιορίζεται από το ελαστικό στοιχείο. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η παραμόρφωση της συνολικής δομής λόγω εμφάνισης μηχανικής ροπής. Το στοιχείο παραμορφώνεται όχι ομαλά και η μεγαλύτερη παραμόρφωση φαίνεται κατά τον άξονα z . Λόγω αυτού, οι μικρές μεταβολές του μήκους του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου μετατρέπονται σε παραμόρφωση κάμψης.

3 Θεωρία Αποκόλλησης

Αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας είναι ο γραμμικός νόμος της αποκόλλησης, σε μηχανικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων πιεζοηλεκτρικής πλάκας. Όπως έχουμε αναφέρει και πιο πάνω, η πλάκα αποτελείται από τρία επίπεδα: το επάνω και το κάτω επίπεδο από πιεζοηλεκτρικό υλικό, ενώ το μεσαίο αποτελείται από το ελαστικό μας υλικό, δηλαδή τη πλάκα μας.

Μεταξύ των δύο επιφανειών των ανωτέρω στρώσεων, βρίσκονται δύο στρώσεις συγκολλητικού υλικού (κόλλα). Τέλος, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που μελετάμε, επί του οποίου εισάγεται ο νόμος της μη γραμμικής αποκόλλησης, περιλαμβάνει τη δυνατότητα επιβολής μηχανικού φορτίου, καθώς και την δυνατότητα προσομοίωσης στατικού προβλήματος.

3.1 Περιγραφή του Μοντέλου Αποκόλλησης

Κατά το φαινόμενο της αποκόλλησης, εφαρμόζεται στις δύο επιφάνειες των φύλλων της πλάκας, μη γραμμικός νόμος τάσης-τροπής:

Ο νόμος αυτός οδηγεί στην αλλαγή των μητρώων ακαμψίας που υπάρχουν ήδη στην κατασκευή, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά πριν και μετά την αποκόλληση.

Συγκεκριμένα, υπολογίζεται για κάθε πεπερασμένο στοιχείο η τροπή ϵ_{zz} , βάσει της σχέσης:

$$E_{zz} = (w^{(i+1)} - w^{(i)}) / h(\alpha_1)$$

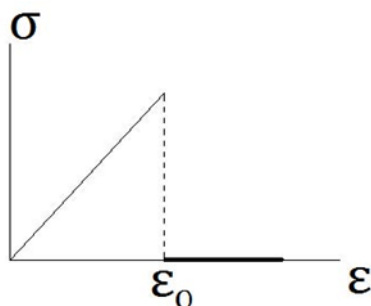
όπου :

w η κατακόρυφη μετατόπιση των στρωμάτων, η συμπεριφορά των οποίων σε αποκόλληση διερευνάται

h_a το πάχος του συγκολλητικού υλικού.

Εάν η τροπή αυτή είναι μικρότερη της τροπής διαρροής ϵ_0 , τότε δεν συμβαίνει αποκόλληση στο εν λόγω στοιχείο. Εάν η τροπή είναι ίση ή μεγαλύτερη του ϵ_0 τότε

πραγματοποιείται αποκόλληση. Αποκόλληση μπορεί να συμβαίνει μεταξύ κατώτατου-μεσαίου και μεσαίου-ανώτατου στρώματος πλάκας.



Εικόνα 3: Διάγραμμα Τάσης-Τροπής με βάση τον κανονισμό αποκόλλησης

Το σχήμα περιγράφεται παρακάτω:

- Έναρξη επαυξητικού βήματος
- Επιβολή φορτίου
- Έναρξη επαναλήψεων
- Βρόχος (loop) στο σύνολο των στοιχείων - Υπολογισμός της μέσης τροπής κάθε στοιχείου
- Σύγκριση με τροπή διαρροής ϵ_0
- Μόρφωση κατάλληλα του εφαπτομενικού μητρώου ακαμψίας στοιχείου και φορέα
- Μόρφωση διανύσματος εσωτερικών δυνάμεων
- Επίλυση εξισώσεων ισορροπίας, εύρεση επαυξητικών και καθολικών μετατοπίσεων
- Έλεγχος σφάλματος και συνέχιση της επανάληψης ή συνέχιση του επαυξητικού βήματος

Αξίζει να σημειωθεί πως το προϋπάρχον μοντέλο σύνθετων πιεζοηλεκτρικών πλακών, διευκολύνει απόλυτα την παραπάνω επαναληπτική διαδικασία εύρεσης της εφαπτομενικής ακαμψίας του φορέα, με κατάλληλη αφαίρεση μελών ακαμψίας από το πλήρες μητρώο ακαμψίας στοιχείου χωρίς αποκόλληση (Κουτσιανίτης,2016)

Γενικά, διακρίνονται συνεπώς οι εξής τέσσερις περιπτώσεις αποκόλλησης:

α) Καμία αποκόλληση.

β) Αποκόλληση μεταξύ κατώτατου-μεσαίου στρώματος πλάκας.

γ) Αποκόλληση μεταξύ μεσαίου-ανώτατου στρώματος πλάκας.

δ) Αποκόλληση μεταξύ κατώτατου-μεσαίου και μεσαίου-ανώτατου στρώματος πλάκας.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι πρώτες δύο περιπτώσεις, δηλαδή **η υγιής κατασκευή και η περίπτωση αποκόλλησης του κάτω στρώματος.**

4 Ασαφής Έλεγχος

4.1 Ασαφής Λογική – Ιστορική Αναδρομή

Σύμφωνα με τα δεδομένα μαθηματικά που ισχύουν μέχρι σήμερα, μια πρόταση μπορεί να είναι ή αληθής ή ψευδής. Σύμφωνα με την ασαφή λογική όμως, λέμε ότι μια πρόταση είναι αληθής «με κάποιο βαθμό αλήθειας».

Για παράδειγμα, έστω ένα αντικείμενο A κοστίζει 100 ευρώ και ένα άλλο αντικείμενο B κοστίζει 90 ευρώ. Με την κλασική λογική λοιπόν, η πρόταση «το αντικείμενο A είναι ακριβότερο του αντικειμένου B» είναι αληθής. Η ασαφής λογική από την άλλη, ορίζει ότι η παραπάνω πρόταση είναι αληθής, αλλά σε κάποιο βαθμό, π.χ. 20%. Με την ασαφή λογική μπορούμε να λάβουμε υπ' όψη και ποιοτικές μεταβλητές όπως η ποιότητα, η χρηστικότητα κ.λ.π.

Συνεπώς, μεγάλο **πλεονέκτημα** της λογικής αυτής είναι ότι μπορεί να λειτουργεί σε περιβάλλον αβεβαιότητας. Συνηθίζεται επίσης, να γίνεται λεκτική κωδικοποίηση μεταβλητών και να χρησιμοποιείται μια συγκεκριμένη αυτοματοποιημένη μεθοδολογία επίλυσης, που πλησιάζει περισσότερο στην ανθρώπινη λογική και αναλύει συστήματα αρκετά πιο πολύπλοκα από την κλασική μεθοδολογία ελέγχου μιας μηχανής. (Ταϊρίδης, 2006)

4.2 Ασαφή Σύνολα

Η θεωρία των συνόλων έγινε ευρέως γνωστή από τον Georg Cantor και τον Dedekind την δεκαετία του 1870. Αντίθετα με τις υπόλοιπες μαθηματικές θεωρίες που επικρατούσαν τότε, και που κυρίως εξέταζαν δομές, η συνολοθεωρία μελετάει σύνολα.

Περίπου εκατό χρόνια αργότερα, το 1963 Ο Lofti A. Zadeh του πανεπιστημίου Barkley της Καλιφόρνια, εξελίσσοντας την παραπάνω θεωρία εφηύρε την θεωρία των ασαφών συνόλων, και παρουσίασε την εργασία του "Fuzzy Sets" στο περιοδικό "Information and Control". Κατά τη θεωρία αυτή, τα αντικείμενα γύρω μας ανήκουν σε διακριτοποιημένα σύνολα, τα οποία όμως έχουν διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής.

Το 1965, ο Zadeh θεμελίωσε την θεωρία των ασαφών συνόλων και της ασαφής λογικής, η οποία όμως αμφισβητήθηκε, εξαιτίας των πρωτοποριακών ιδεών που περιείχε.

Οι υπολογιστές που βασίζονταν στην συμβατική λογική αδυνατούσαν να επεξεργαστούν δεδομένα που εκφράζονταν στην λογική που ήθελε ο ίδιος να εισάγει, καθώς ήταν δομημένοι με βάση τη λογική του 0 και 1. Έτσι, ο Zadeh δημιούργησε την ασαφή λογική ώστε οι υπολογιστές να μπορούν να διαχειρίζονται γλωσσικές μεταβλητές, όπως για παράδειγμα “αρκετά ψηλός”, που προσεγγίζουν την πραγματικότητα.

Την δεκαετία του 1970 ο Ebrahim H. Mamdani, μηχανικός στο Queen Mary του Λονδίνου, δοκίμασε για πρώτη φορά την ασαφή λογική για την δημιουργία ενός ελεγκτή ατμομηχανής (Παπαδόπουλος, 2013).

4.3 Ασαφοποίηση

Με τον όρο ασαφοποίηση εννοούμε τη διαδικασία μετατροπής μιας ακριβούς αριθμητικής ποσότητας σε ασαφή. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην αναγνώριση της αβεβαιότητας, η οποία υπάρχει στις ακριβείς ποσότητες. Σε πρακτικές εφαρμογές είναι η πιθανή ύπαρξη **σφαλμάτων**, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας των δεδομένων.

4.4 Αποασαφοποίηση

Με τον όρο «αποασαφοποίηση» εννοούμε την διαδικασία μετατροπής των ασαφών εξόδων σε ακριβείς. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη δεδομένου ότι οι τιμές των εξόδων πρέπει να είναι ακριβείς, ειδικά όταν το ασαφές σύστημα χρησιμοποιείται σαν ελεγκτής.

4.5 Κανόνες Ασαφούς Συστήματος

Τις περισσότερες φορές ένα ασαφές σύστημα περιγράφεται με -περισσότερους του ενός- κανόνες. Η διαδικασία διαλογής των κανόνων για τη λήψη ενός συνολικού συμπεράσματος ονομάζεται συνάθροιση. Στην περίπτωση όπου οι επιμέρους κανόνες συνδέονται με τον τελεστή **AND**, ο προσδιορισμός της συνάθροισης γίνεται με σύζευξη του συστήματος των κανόνων λαμβάνοντας την τομή των επιμέρους κανόνων. Εάν οι επιμέρους κανόνες συνδέονται με τον τελεστή **OR**, ο προσδιορισμός της συνάθροισης γίνεται με διάζευξη του συστήματος των κανόνων υπολογίζοντας την ένωση των επιμέρους κανόνων. Οι μέθοδοι σύζευξης και διάζευξης είναι γνωστές και ως μέθοδοι ελαχίστου (min) και μεγίστου (max), αντίστοιχα.

5 Προσαρμοστικός Νευροασαφής Έλεγχος

Τα απλά ασαφή συστήματα είναι ιδιαίτερα δημοφιλή σε διάφορους επιστημονικούς τομείς, όπως ο έλεγχος, η ρομποτική ,κλπ. Η κύρια δομή αυτών των συστημάτων βασίζεται στις λειτουργίες ένταξης για input - output των αποτελεσμάτων, καθώς και σε ορισμένους λεκτικούς κανόνες προκειμένου να καθοριστεί η λήψη αποφάσεων ενός συστήματος. Οι λειτουργίες συμμετοχής θα πρέπει να επιλέγονται εμπειρικά ή και η δομή των κανόνων θα πρέπει να είναι προκαθορισμένη με βάση την ερμηνεία του μοντέλου από τον χρήστη.

Αυτά τα συστήματα είναι πολύ αποτελεσματικά όταν εφαρμόζονται για έλεγχο. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιοι κρίσιμοι περιορισμοί, όπως η απουσία συστηματικού πλαισίου ή μεθόδου μετατροπής της ανθρώπινης εμπειρίας σε ένα σύνολο κανόνων if-then. Επιπλέον, είναι αρκετά συνηθισμένη η εφαρμογή τεχνικών ασαφούς ελέγχου σε συστήματα για τα οποία ένα σύνολο δεδομένων εισόδου/εξόδου (input/output) υπάρχουν ήδη. Ένα Παράδειγμα αποτελεί ο διαρθρωτικός έλεγχος .

Στην πραγματικότητα, είναι συχνό το φαινόμενο, όταν κατασκευαστεί ο μηχανισμός ελέγχου, ο σχεδιαστής ή ο μηχανικός να μην μπορεί να αποφασίσει τη μορφή και τα άλλα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του. Σε αυτήν την περίπτωση, τα προσαρμοστικά ασαφή συστήματα μπορούν να λύσουν το πρόβλημα.(Tairidis et al)

5.1 ANFIS

Το ANFIS είναι ένα από τα πιο δημοφιλή προσαρμοστικά ασαφή συστήματα, αν όχι το πιο δημοφιλές. Μια διεξοδική μελέτη της προσαρμοστικότητας αυτών των ασαφών συστημάτων, ιδιαίτερα στον έλεγχο, καθώς και οι ιδιότητες σταθερότητάς τους μπορούν να βρεθούν σε κλασικές μονογραφίες (Wang, 1994).

Το πρώτο προσαρμοστικό ασαφές σύστημα με βάση το δίκτυο, ήταν ένα ασαφές σύστημα, το οποίο διαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας γενικευμένα νευρωνικά δίκτυα (GNN) και τον αλγόριθμο Kalman για να ελαχιστοποιηθεί το τετραγωνικό σφάλμα (Jang, 1991).

Η αρχιτεκτονική του ANFIS βασίζεται σε ένα σύστημα ασαφούς συμπεράσματος, το οποίο με τη σειρά του υλοποιείται μέσα στο πλαίσιο των προσαρμοστικών νευρωνικών δικτύων.

Το ANFIS αποτελείται από ασαφείς κανόνες οι οποίοι, σε αντίθεση με τα κλασσικά ασαφή συστήματα, είναι τοπικές χαρτογραφήσεις (mappings) αντί για καθολικές (Jang & Sun, 1995). Η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για να δημιουργηθεί ένα σύστημα ασαφούς ελέγχου, ονομάζεται **ασαφής μοντελοποίηση**. Από την άλλη πλευρά, η **νευρο-ασαφής μοντελοποίηση** αναφέρεται στον τρόπο εφαρμογής διαφόρων τεχνικών μάθησης που αναπτύχθηκαν στη βιβλιογραφία του νευρικού δικτύου σε συστήματα ασαφούς συμπερασμού. Χρησιμοποιούνται κυρίως νευρωνικά δίκτυα οπίσθιας διάδοσης για την αναγνώριση των παραμέτρων ενός συστήματος προσαρμοστικής ασαφούς εξαγωγής.

Η διαδικασία μάθησης θα μπορούσε να είναι υβριδική, δηλαδή το προτεινόμενο μοντέλο ελέγχου να μπορεί να κατασκευάσει μια χαρτογράφηση εισόδου-εξόδου που βασίζεται τόσο στην ανθρώπινη γνώση, όσο και σε ασαφή συστήματα και κατάλληλα ζεύγη δεδομένων εισόδου / εξόδου. Ωστόσο, ακόμη και αν δεν υπάρχει ανθρώπινη τεχνογνωσία, είναι δυνατό να ρυθμίσουμε τις αρχικές παραμέτρους διαισθητικά και να δημιουργήσουμε τους ασαφείς κανόνες χρησιμοποιώντας μια μαθησιακή διαδικασία με σκοπό να προσεγγίσουμε μια απόδοση που θέλουμε.

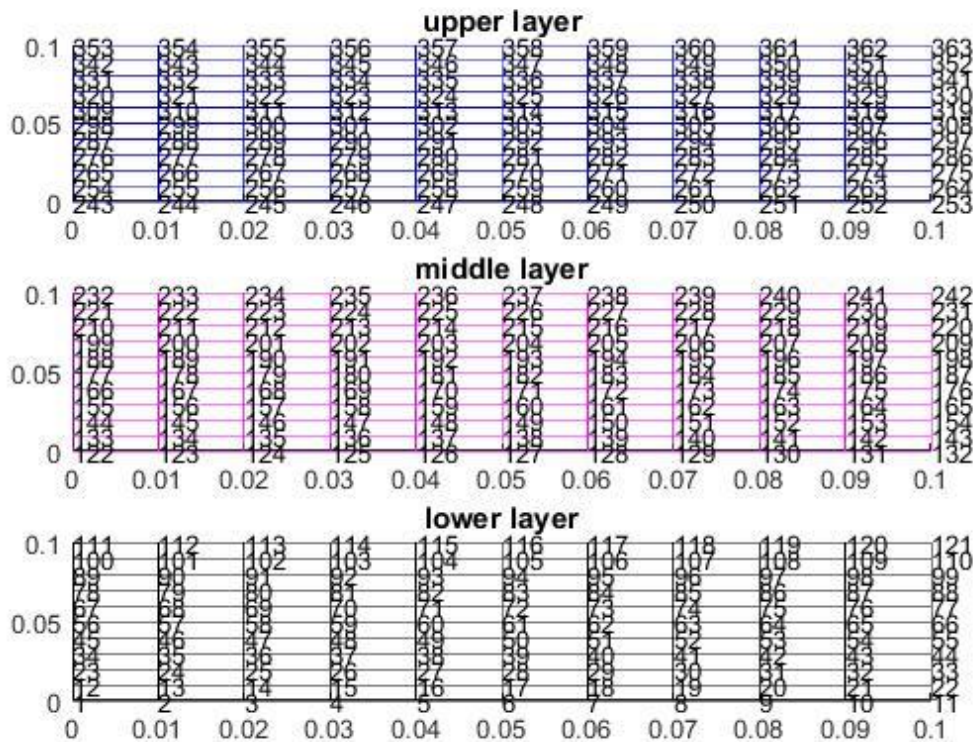
Αυτό σημαίνει ότι, αντί να επιλέγονται οι παράμετροι του ελεγκτή (συναρτήσεις συμμετοχής, κανόνες κ.λπ.) αυθαίρετα, μια αυτοματοποιημένη διαδικασία μπορεί να προσφέρει εξατομικευμένη ιδιότητα για τις ασαφείς μεταβλητές (εισόδους και εξόδους) βάσει των διαθέσιμων δεδομένων του συστήματος. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχει ένα σύνολο κανόνων ή άλλοι παράμετροι ελέγχου και το πιο σημαντικό, ο ελεγκτής μπορεί να εκπαιδευτεί για να είναι ανθεκτικός, δηλαδή ικανός να λειτουργεί κάτω από διαφορετικές συνθήκες. (Ταϊρίδης, 2006)

5.2 Διαδικασία Προσομοίωσης σε Matlab

Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να δοθεί μια περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, ώστε να καταλάβει ο αναγνώστης τον τρόπο με τον οποίο φτάσαμε στα αποτελέσματα που βγάλαμε. Το πρόγραμμα που ασχοληθήκαμε κατά βάση είναι το Simulink της Matlab.

ΒΗΜΑ 1^ο

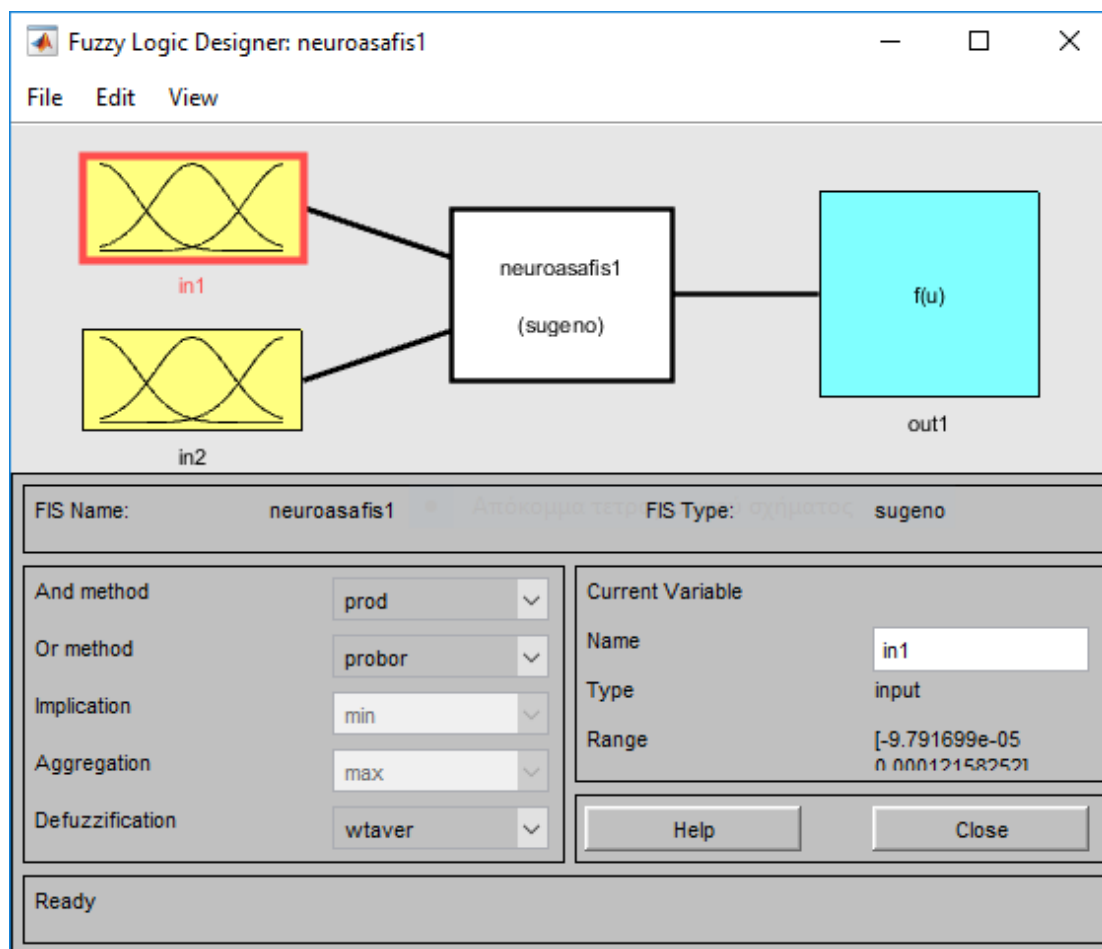
Αρχικά, ανοίγοντας το κατάλληλο αρχείο Matlab και αφού τρέξουμε το προκατασκευασμένο κώδικα της Κα. Φουτσιτζή (καθηγήτρια Τ.Ε.Ι. Ηπείρου) μας δίνονται τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας που είναι απαραίτητα για τη συνέχεια καθώς και η εικόνα της πλάκας μας με τα 2 πιεζοηλεκτρικά. Όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 4: Το πάνω και το κάτω layer αποτελούν τα δύο πιεζοηλεκτρικά στρώματα, ενώ το μεσαίο layer αποτελεί την ελαστική μας πλάκα

ΒΗΜΑ 2^ο

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με την εκπαίδευση του ελεγκτή μας, χρησιμοποιώντας την εντολή FUZZY από το toolbox του matlab έχουμε την εικόνα του ελεγκτή, όπως βλέπουμε παρακάτω :



Εικόνα 5: Αναπαράσταση του ελεγκτή από το fuzzy toolbox

Ο ελεγκτής μας που είναι τύπου sugeno, ο οποίος δέχεται δύο εισόδους (input1, input2) και επιστρέφει μια έξοδο (output) .

ΒΗΜΑ 3^ο

Ακολούθως, αφού έχει εκπαιδευτεί ο ελεγκτής προχωράμε μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης (μέθοδος Houbolt) στην επίλυση των εξισώσεων κίνησης και συνεπώς στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων για την μείωση των ταλαντώσεων (γραφικές παραστάσεις και ποσοστά μείωσης που ψάχνουμε).

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  %% Integration of a Plate system      %%
3  %% with constant time step (dt=const) %%
4  %% m-File: integration_plate.m       %%
5  %% Code created by: Tairidis,Tsagkaris %%
6  %% DPEM, TUC, Chania, November 2013  %%
7  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8  %tic
9  %timerVal = tic
10
11  % STEP1: Integration constants
12
13  - beta = 0.25;                % acceleration = constant
14  - gamma = 0.5;               % acceleration = constant
15
16  %beta = 1/6;                 % acceleration = linear
17  %gamma = 1/2;               % acceleration = linear
18
19  % Time intervals
20  - t1 = 0;                    % Initial time
21  - dt = 0.001;               % Time step
22  - tf = 2;                   % Final time

```

Command Window

```

Error goal (0) reached --> ANFIS training completed at epoch 1.
Απόκομμα τετραγωνικού σχήματος
Minimal training RMSE = 0.000000
fx >>

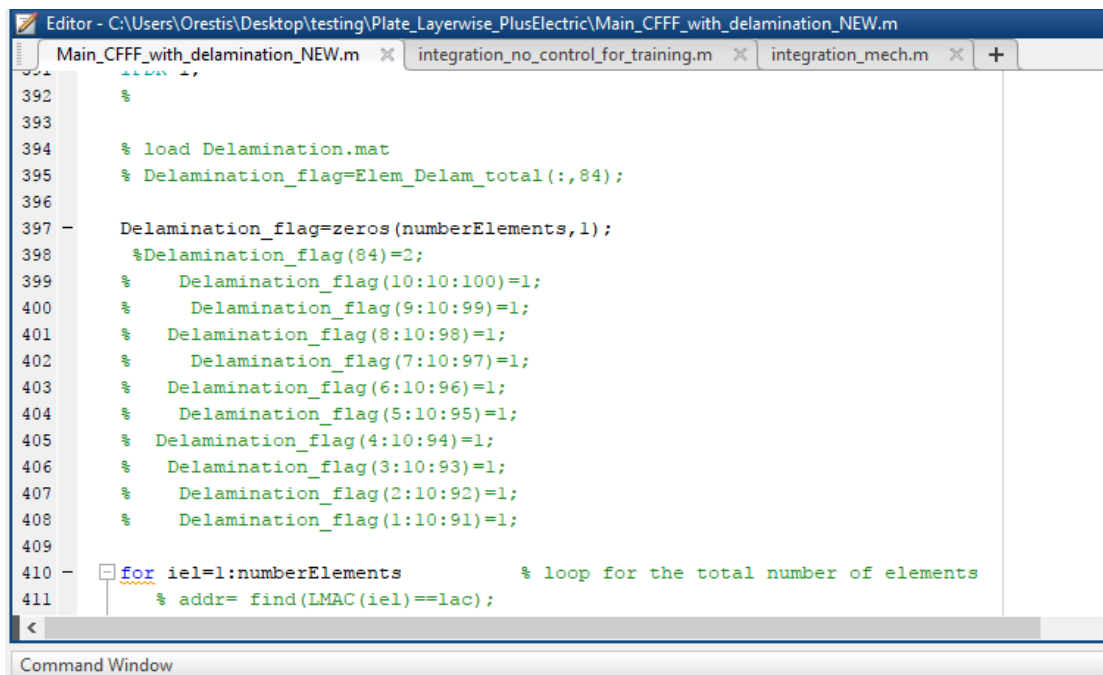
```

Εικόνα 6: Κώδικας αριθμητικής ολοκλήρωσης (Ταϊρίδης 2009)

Καταλήγουμε λοιπόν, στις γραφικές παραστάσεις επιτάχυνσης, μετατόπισης, ταχύτητας, δύναμης αλλά και επιφάνειας που ζητάμε, για να βγάλουμε τα συμπεράσματα που θέλουμε. Τα αποτελέσματα αυτά θα μας βοηθήσουν στο να εκμαιεύσουμε χρήσιμα συμπεράσματα μέσω των ποσοστιαίων μεταβολών στις τιμές μας με την εφαρμογή του ελεγκτή, αλλά και με τη σταδιακή διαδικασία αποκόλλησης.

ΒΗΜΑ 4^ο

Τέλος, για να πραγματοποιήσουμε τις δοκιμές με τη ποσοστιαία αποκόλληση ακολουθούμε την ίδια διαδικασία ,αλλάζοντας απλά κάποιες εντολές στον παρακάτω κώδικα.



```
Editor - C:\Users\Orestis\Desktop\testing\Plate_Layerwise_PlusElectric\Main_CFFF_with_delamination_NEW.m
Main_CFFF_with_delamination_NEW.m  integration_no_control_for_training.m  integration_mech.m  +
392 %
393
394 % load Delamination.mat
395 % Delamination_flag=Elem_Delam_total(:,84);
396
397 - Delamination_flag=zeros(numberElements,1);
398 %Delamination_flag(84)=2;
399 % Delamination_flag(10:10:100)=1;
400 % Delamination_flag(9:10:99)=1;
401 % Delamination_flag(8:10:98)=1;
402 % Delamination_flag(7:10:97)=1;
403 % Delamination_flag(6:10:96)=1;
404 % Delamination_flag(5:10:95)=1;
405 % Delamination_flag(4:10:94)=1;
406 % Delamination_flag(3:10:93)=1;
407 % Delamination_flag(2:10:92)=1;
408 % Delamination_flag(1:10:91)=1;
409
410 - for iel=1:numberElements % loop for the total number of elements
411 % addr= find(LMAC(iel)==lac);
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```

Εικόνα 7: Επιβολή αποκόλλησης (Foutsitzi 2016)

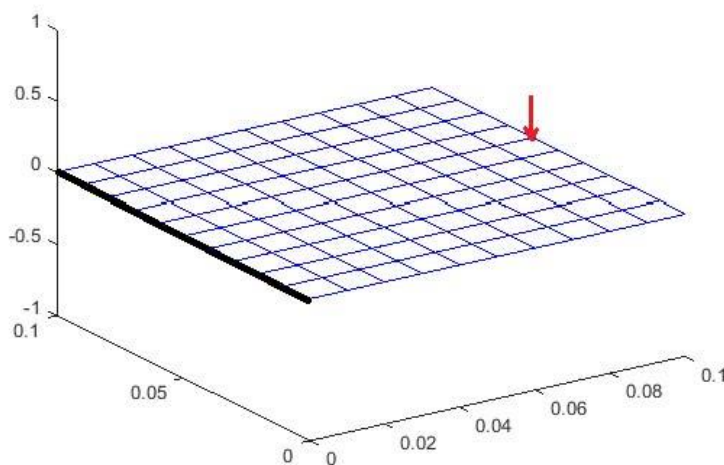
Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα, η αποκόλληση μαίνεται σταδιακά, ανά ποσοστό του 10% των στοιχείων κάθε φορά και συγκεκριμένα σαρώνοντας σειριακά τα κάθετα στοιχεία από το ελεύθερο άκρο προς τα μέσα (προς την στήριξη). Για παράδειγμα ενεργοποιώντας την γραμμή 399 του κώδικα, θα έχουμε 10% αποκόλληση. Προφανώς, για τις δοκιμές που έγιναν στην παρούσα εργασία, για 10% αποκόλληση ενεργοποιείται η γραμμή 399, για 50% αποκόλληση οι γραμμές 399 μέχρι 403 και για 90% αποκόλληση οι γραμμές 399 μέχρι 407.

Αυτά είναι τα βασικά βήματα της διαδικασίας που ακολουθήσαμε για να φτάσουμε στα ζητούμενα αποτελέσματα.

6 Αριθμητικά αποτελέσματα

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, στόχος της εργασίας είναι η προσομοίωση ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιεί νευροασαφούς λογικής ελεγκτή και έχει σαν σκοπό την μείωση της ταλάντωσης της κατασκευής. Βασικές παράμετροι τις οποίες θα εξετάσουμε είναι η μετατόπιση της κατασκευής, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Τέλος θέλαμε να εξετάσουμε κατά πόσο αυτός ο ελεγκτής εξακολουθεί να επιδρά θετικά ή μη, σε περίπτωση που στη σύνθετη κατασκευή μας εμφανιστεί ποσοστιαία αποκόλληση.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι στο μηχανικό μοντέλο που εξετάζουμε, οι μετρήσεις για τις εισόδους λαμβάνονται από ένα συγκεκριμένο κόμβο και η ημιτονοειδής δύναμη ελέγχου εφαρμόζεται κάθετα στη σύνθετη πλάκα (εικόνα 8). Για την παρούσα εργασία επιλέξαμε να εξετάσουμε τον κόμβο **280** που βρίσκεται στο δεξιό άκρο της πλάκας μας. Ορίσαμε το **μέτρο της δύναμης μας να είναι 10N και τη συχνότητά μας 20 rad/sec**. Σε περίπτωση αποκόλλησης του εξεταζόμενου κόμβου, οι δυνάμεις μεταφέρονται αυτόματα στον αμέσως επόμενο κολλημένο κόμβο.



Εικόνα 8: Διακριτοποιημένη πλάκα στην οποία ασκείται η δύναμη ελέγχου (κόκκινο βέλος) στο μηχανικό μοντέλο

Τέλος στον πιο κάτω πίνακα, φαίνονται τα χαρακτηριστικά της κατασκευής μας.

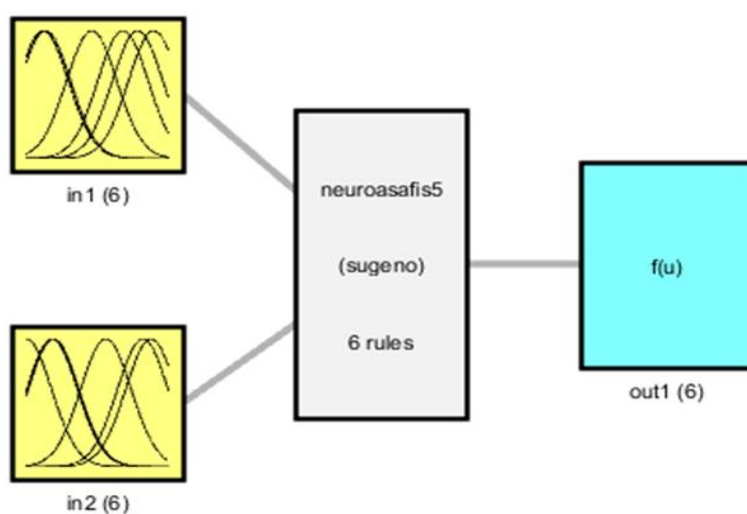
	Ανθρακόνημα	Πιεζοηλεκτρικό	Συγκολλητικό υλικό
Μήκος (m)	0.1	0.1	0.1
Πάχος φύλλου (mm)	0.1	0.2	0.05
Μέτρο ελαστικότητας (Pa)	130×10^9	59×10^9	1.78×10^9
Πυκνότητα (kg/m ³)	1570	7400	1050
Λόγος Poisson	0.31	0.34	0.3
$d_{31}=d_{32}$ (m/V)	-	-260×10^{-12}	-

Πίνακας 1: Υλικές σταθερές του κάθε στρώματος

6.1 Έλεγχος Χωρίς Αποκόλληση

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήσαμε έναν ελεγκτή νευροασαφούς λογικής με εφαρμογή σε μηχανικό μοντέλο. Προκειμένου να μειώσουμε το πεδίο μετακινήσεων του συστήματός μας χρησιμοποιήθηκε ένας ασαφής ελεγκτής πολλαπλών εισόδων και μονής εξόδου MISO (Multiple Inputs, Single Output). Ο εν λόγω ασαφής ελεγκτής είναι τύπου Sugeno και υλοποιήθηκε με χρήση του πακέτου Fuzzy Toolbox του Matlab.

Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, δέχεται δύο εισόδους και παράγει μία έξοδο.

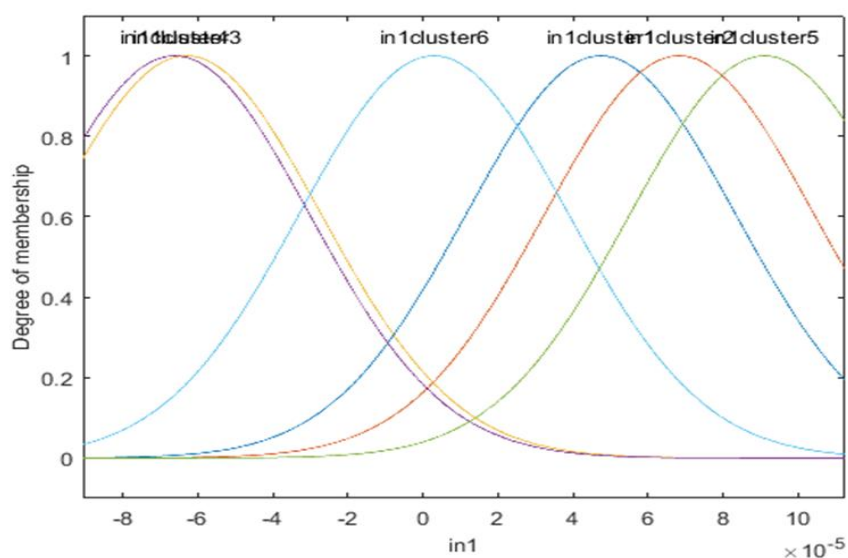


System neuroasafis5: 2 inputs, 1 outputs, 6 rules

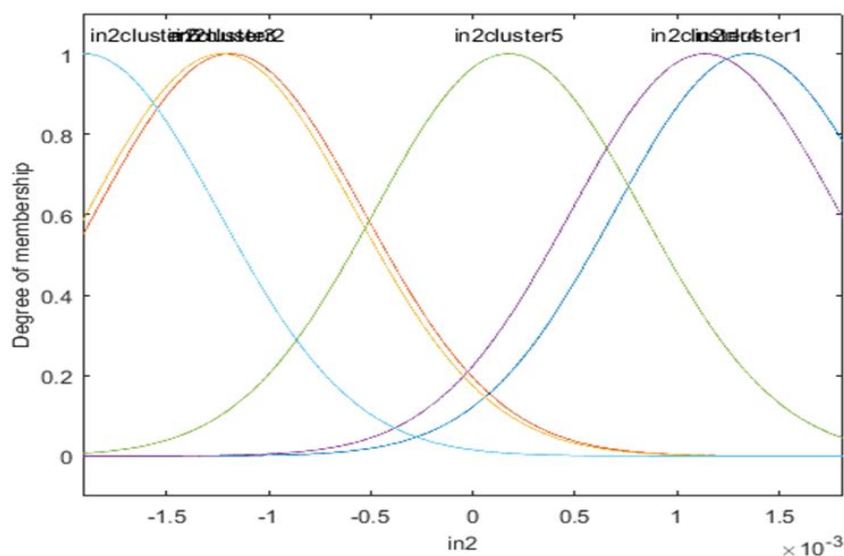
Εικόνα 9 : Ο Ελεγκτής μας τύπου Sugeno για το μηχανικό μας μοντέλο

Ως εισόδους, δέχεται το πεδίο των μετακινήσεων (u) και την ταχύτητα (\dot{u}) σε μία θέση του συστήματος. Ως έξοδος, προκύπτει η δύναμη ελέγχου.

Οι συναρτήσεις συμμετοχής, οι οποίες έχουν επιλεγεί για την περιγραφή των εισόδων και της εξόδου του ελεγκτή, είναι ημιτονοειδούς μορφής, όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Εικόνα 10: Συναρτήσεις συμμετοχής για την είσοδο 1 – Μετατόπιση



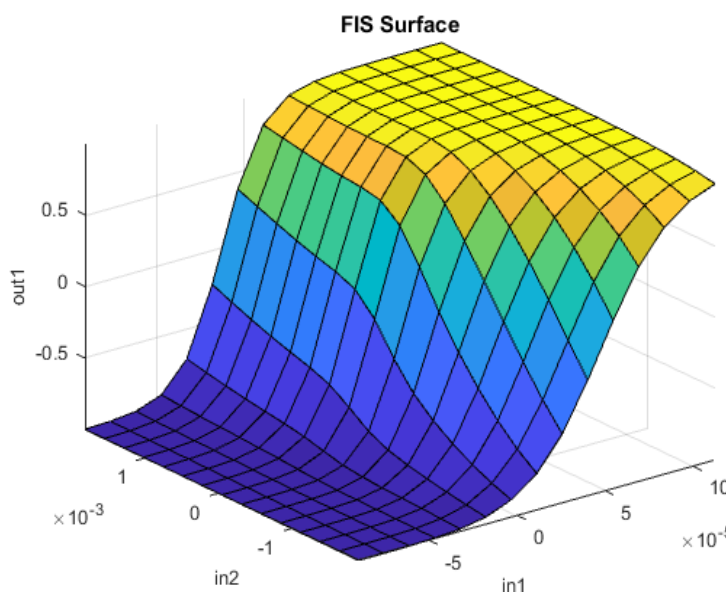
Εικόνα 11: Συναρτήσεις συμμετοχής για την είσοδο 2 – ταχύτητα

Στη συγκεκριμένη εργασία, το σύστημα του ελεγκτή μας περιγράφεται από 36 κανόνες (fuzzy rules) που συντάχθηκαν με βάση τη λογική (βλ. Πίνακα 1). Τα ενδεχόμενα συνδυάζονται με χρήση του λογικού τελεστή ΚΑΙ.

INPUT 1	INPUT 2					
	1	2	3	4	5	6
1	1	-	-	-	-	-
2	-	1	-	-	-	-
3	-	-	-1	-	-	-
4	-	-	-	-1	-	-
5	-	-	-	-	1	-
6	-	-	-	-	-	-1

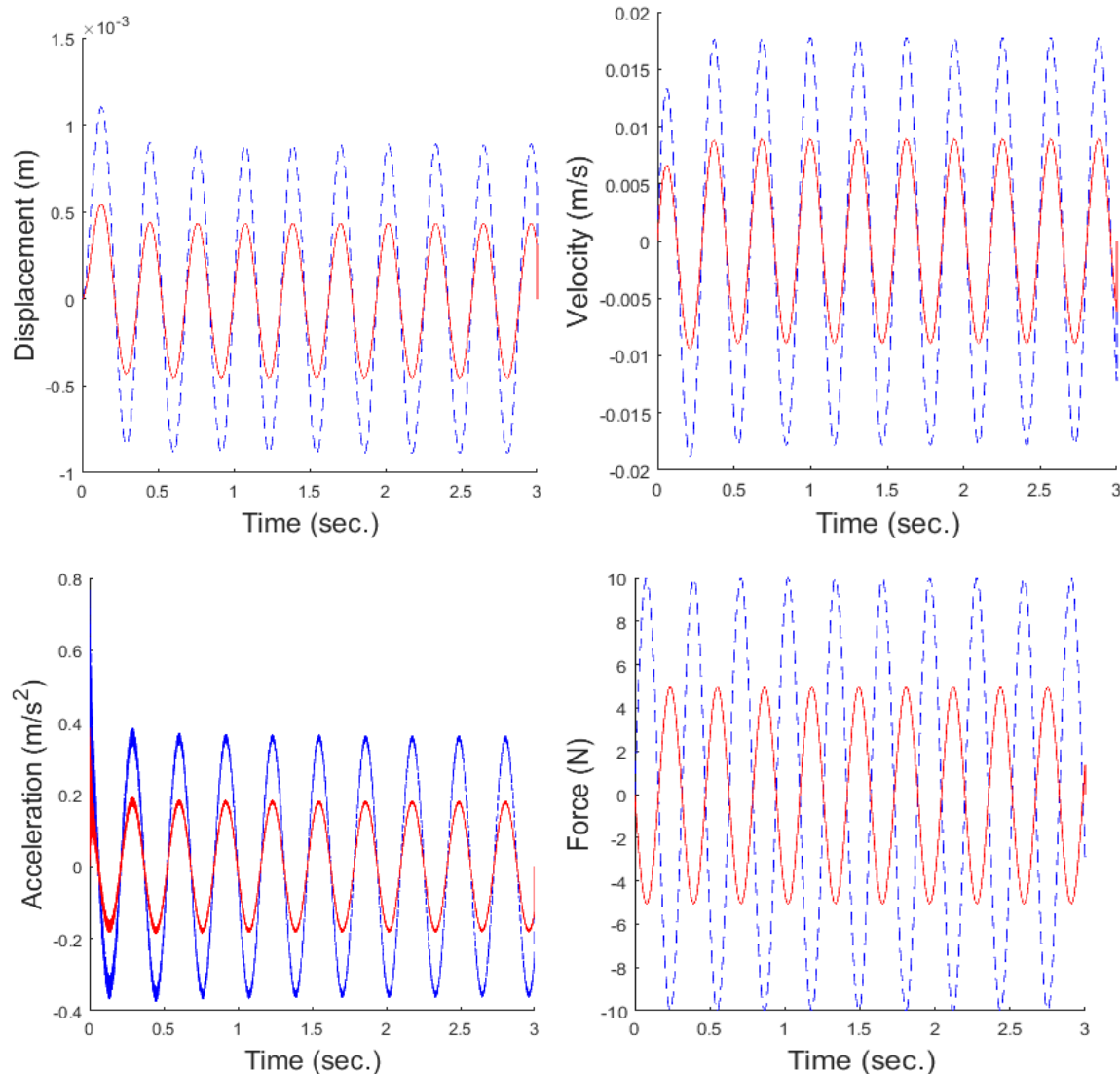
Πίνακας 2: Σύνοψη του συνόλου των 36 κανόνων

Η συσχέτιση των εισόδων (μετακινήσεις και ταχύτητες) με την έξοδο (δύναμη ελέγχου) του ασαφούς ελεγκτή φαίνεται στη επιφάνεια του συστήματος, η οποία παράγεται από το ίδιο το σύστημα. Με βάση την παραπάνω «λογική» τοποθέτηση των κανόνων δημιουργείται μία φθίνουσα επιφάνεια, όπως παρουσιάζεται παρακάτω (εικόνα 11). Πρέπει να σημειωθεί, ότι με μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος, παράγεται μια εντελώς διαφορετική επιφάνεια.



Εικόνα 12: Επιφάνεια νευροασαφούς ελεγκτή στο μηχανικό μοντέλο χωρίς αποκόλληση

Η συμπεριφορά της πλάκας μας, χωρίς να έχει εφαρμοστεί σε αυτή αποκόλληση φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Με μπλε διακεκομμένη γραμμή είναι η ταλάντωση της κατασκευής πριν τη χρήση του ελεγκτή ενώ με κόκκινη γραμμή είναι η ταλάντωση της κατασκευής μετά τον έλεγχο.



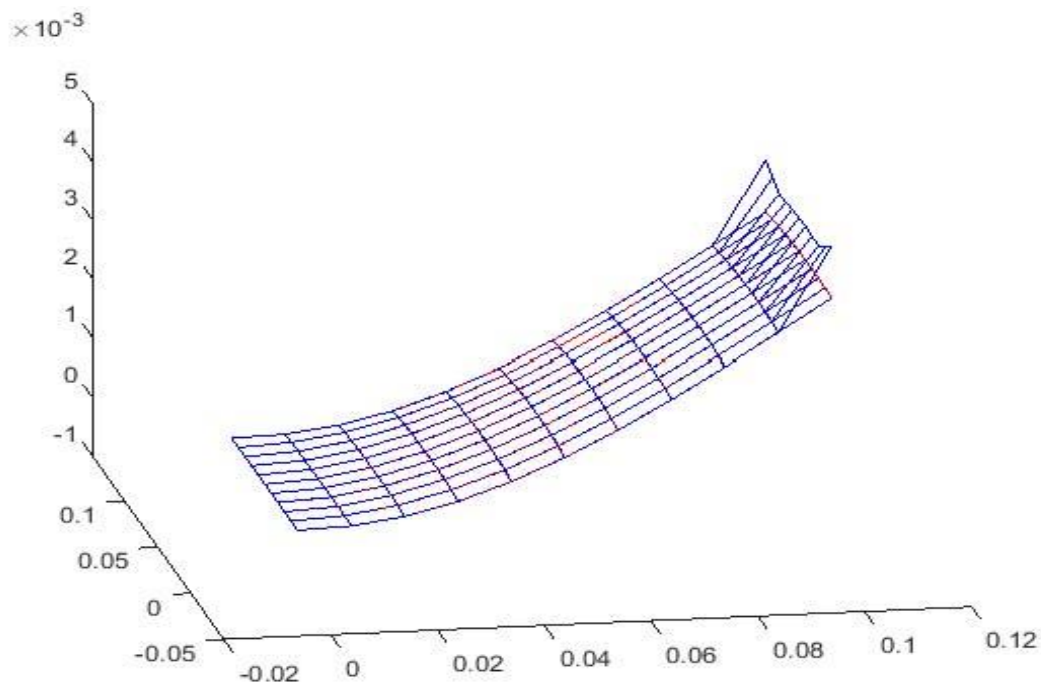
Εικόνα 13: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο για το μοντέλο χωρίς αποκόλληση

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι με τη χρήση του ελεγκτή παρατηρείται αισθητή μείωση και των τεσσάρων παραμέτρων που εξετάζουμε. Οι μειώσεις αυτές είναι τις τάξης του 49,85%, 49,96% και 50% για μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση αντίστοιχα.

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, μπορούμε να καταλήξουμε στο προκαταρκτικό συμπέρασμα ότι στην περίπτωση που δεν έχουμε κάποια αποκόλληση, ο ελεγκτής μας είναι ικανοποιητικά αποδοτικός.

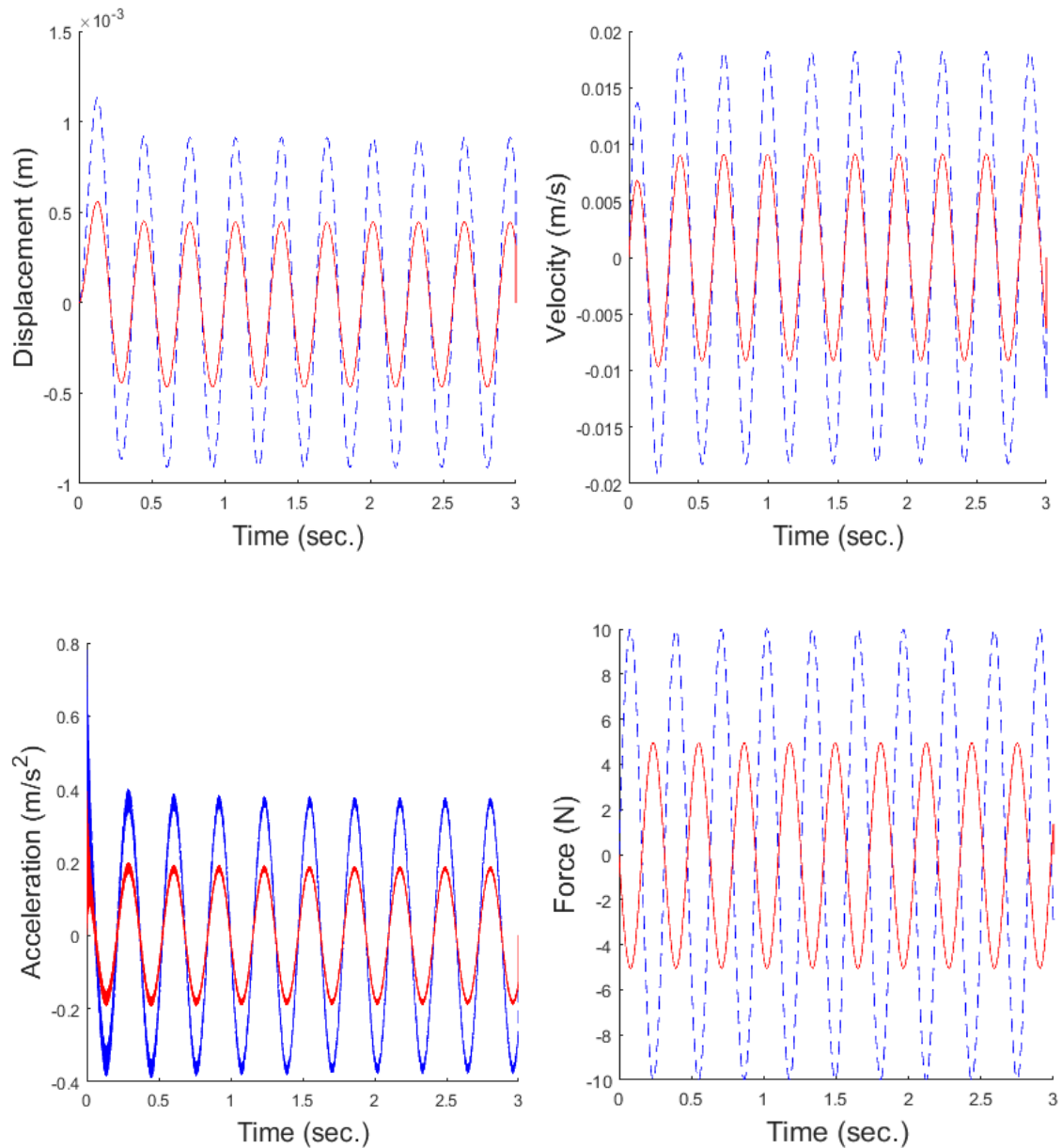
6.2 Έλεγχος με αποκόλληση 10%

Η πρώτη περίπτωση αποκόλλησης που μελετήσαμε είναι η αποκόλληση της κατασκευής της τάξεως του 10%. Η αποκόλληση όπως φαίνεται και παρακάτω (εικόνα 14) ξεκινά από το ελεύθερο άκρο και επεκτείνεται προς το μέσο της κατασκευής. Το πώς επιδρά πάνω στην κατασκευή αλλά και στην απόδοση του ελεγκτή θα το δούμε τόσο στα σχήματα που ακολουθούν, όσο και στις επεξηγήσεις-συμπεράσματα στα οποία θα καταλήξουμε.



Εικόνα 14: Διακριτοποιημένη πλάκα με 10% αποκόλληση

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα που έχουμε σαν αποτελέσματα για 10% αποκόλληση. Η αποκόλληση μας ξεκινά από το δεξιό άκρο της πλάκας προς το μέσον σε ποσοστό 10%.

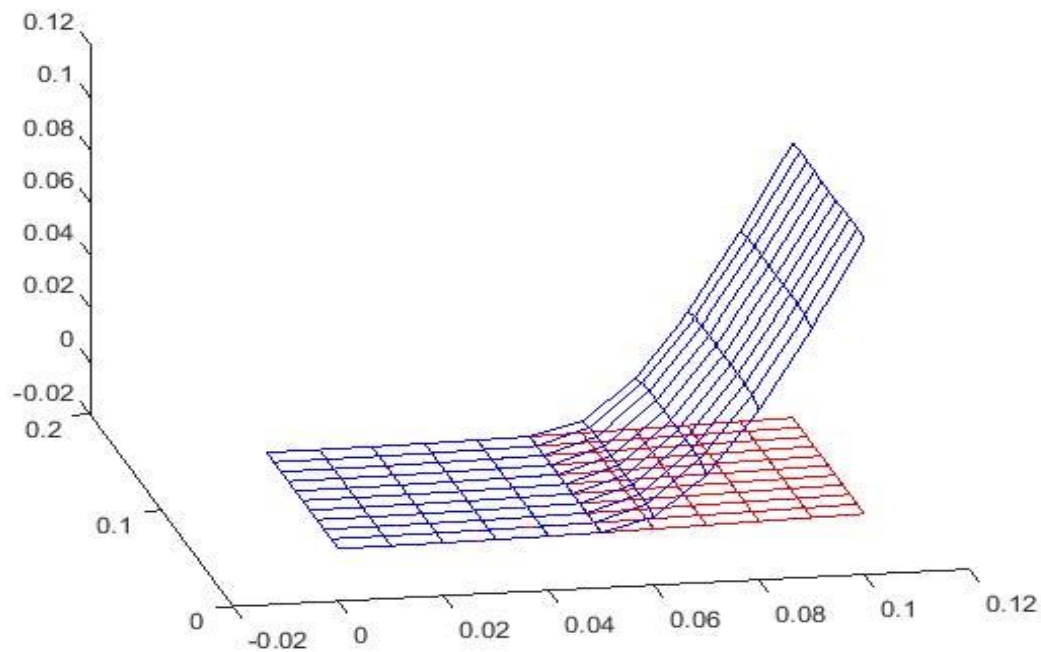


Εικόνα 15: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν (μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο για αποκόλληση 10%

Όπως και στην προηγούμενη κατασκευή, έτσι και σε αυτή ο ελεγκτής δείχνει να έχει μία ιδιαίτερα σταθερή συμπεριφορά. Παρατηρούμε, ότι η μείωση της μετατόπισης αγγίζει το ποσοστό του 49.95% ενώ η ταχύτητα και η επιτάχυνση μειώθηκαν κατά 50%.

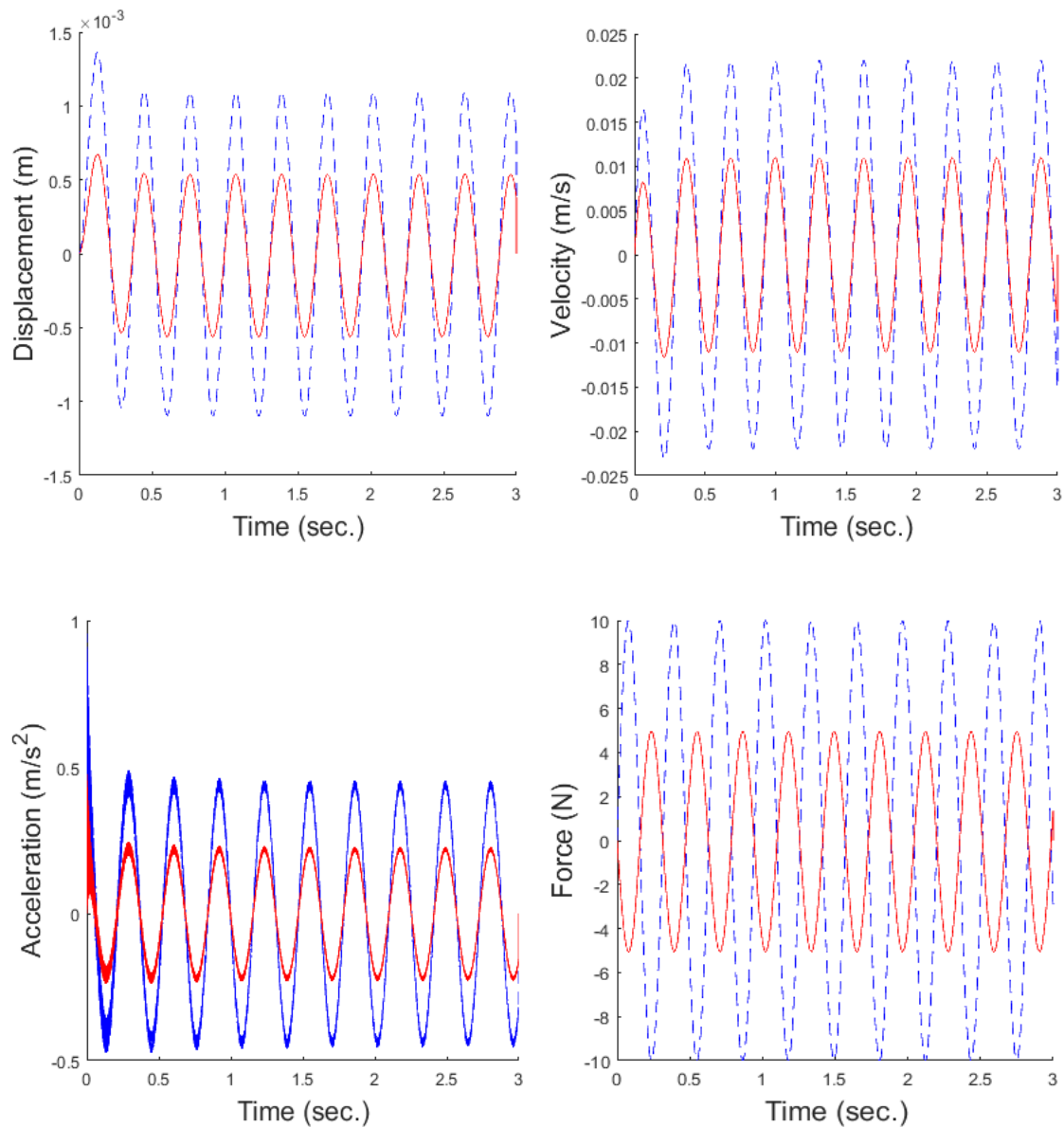
6.3 Έλεγχος με αποκόλληση 50%

Επόμενη περίπτωση που μελετήσαμε είναι αυτή της αποκόλλησης του μισού άνω πιεζοηλεκτρικού, της τάξεως του 50%, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. (εικόνα 16)



Εικόνα 16: Διακριτοποιημένη πλάκα με 50% αποκόλληση

Ακολουθούν τα διαγράμματα για την μελέτη μεσαίας έκτασης αποκόλλησης της τάξης του 50% του πιεζοηλεκτρικού στρώματος:

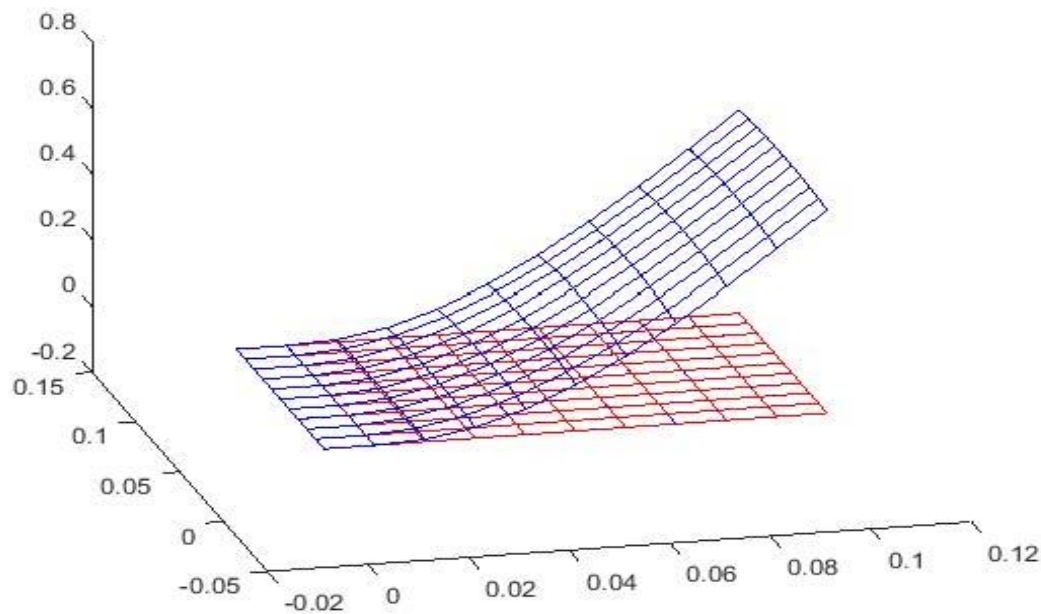


Εικόνα 17: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινα) για αποκόλληση 50%

Από τα διαγράμματα που έχουμε σαν αποτελέσματα για 50% αποκόλληση βλέπουμε ότι τα ποσοστά μείωσης, όχι απλά δεν μειώθηκαν, αλλά αυξήθηκαν ελάχιστα και μόλις ξεπέρασαν το 50%. Αυτό όχι απλά είναι σημαντικό, μιας και ο ελεγκτής συνεχίζει να δουλεύει σταθερά και αποδοτικά, αλλά είναι και σημαντικό επίτευγμα καθώς δείχνει να προσαρμόζεται στην μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής (αποκόλληση).

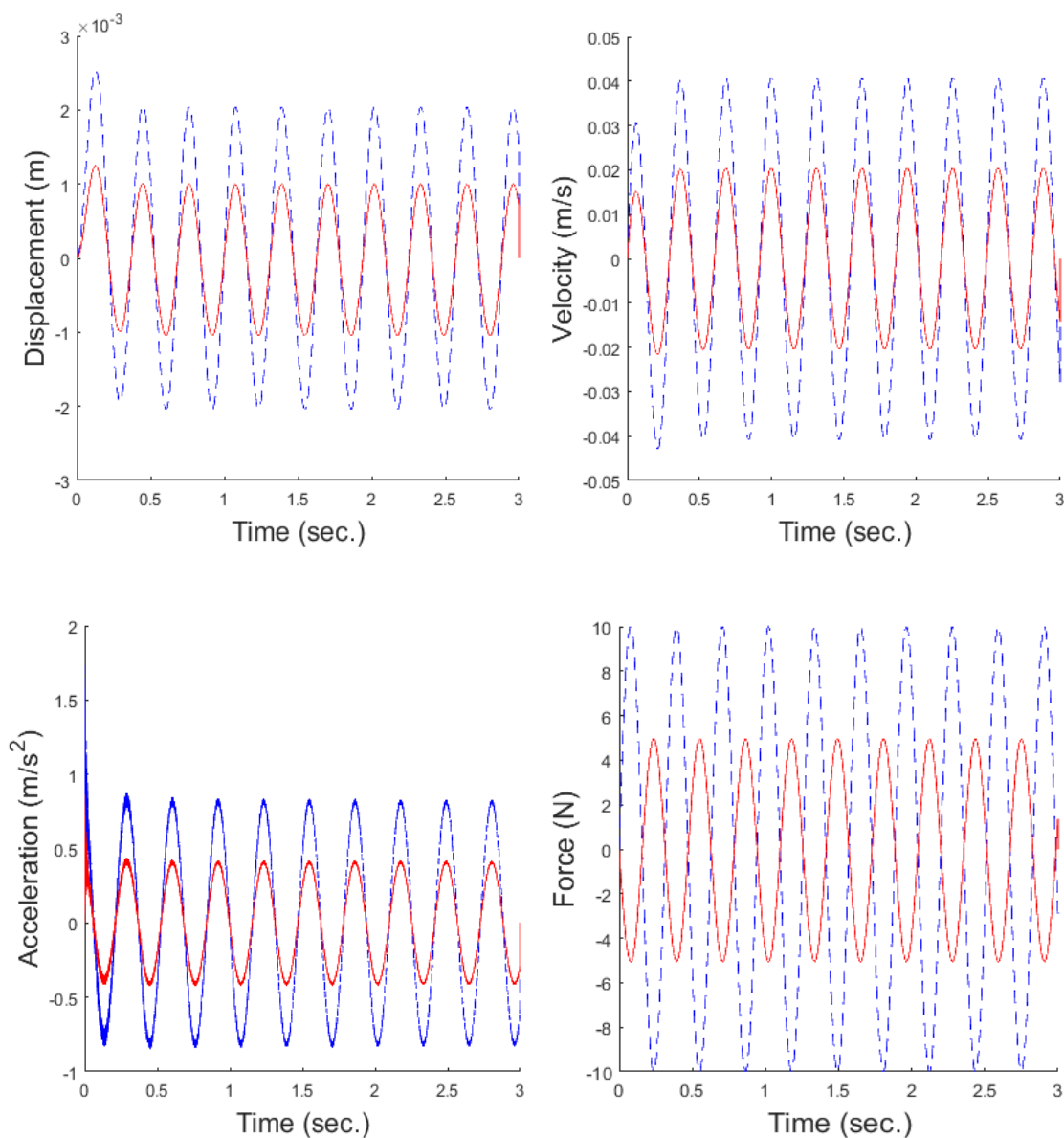
6.4 Έλεγχος με αποκόλληση 90%

Τελευταία περίπτωση για το μηχανικό μοντέλο που εξετάστηκε είναι η εκτεταμένη περίπτωση αποκόλλησης, η οποία αγγίζει το 90%. Όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα το 90% της πλάκας έχει αποκολληθεί. (εικόνα 18)



Εικόνα 18: Διακριτοποιημένη πλάκα με 90% αποκόλληση

Ακολουθούν τα διαγράμματα για την μελέτη εκτεταμένης αποκόλλησης της τάξης του 90% του πιεζοηλεκτρικού στρώματος:



Εικόνα 19: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο για αποκόλληση 90%.

Στην περίπτωση της εκτεταμένης αποκόλλησης, υπάρχει μεγάλη αύξηση του πλάτους της ταλάντωσης όπως φαίνεται από τα διαγράμματα της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Αυτό οφείλεται στην αρκετά μεγάλη μεταβολή (μείωση) της δυσκαμψίας της κατασκευής εξ' αιτίας της μεγάλης αποκόλλησης που έχουμε εφαρμόσει. Ωστόσο, οι ποσοστιαίες μεταβολές (μειώσεις) στα μετρούμενα μεγέθη, δηλαδή στη μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση βρίσκονται σχεδόν στα ίδια επίπεδα, δηλαδή 49,83%, 49,79% και 50% αντίστοιχα, γεγονός που δείχνει ότι ο έλεγχος προσαρμόζεται ακόμη και σε περίπτωση εκτεταμένης αποκόλλησης, της τάξης του 90%.

7 Συμπεράσματα

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η δημιουργία και η ανάλυση ενός συστήματος ελέγχου, με τη χρήση ενός ελεγκτή νευροασαφούς λογικής και μελέτη της αντίδρασης τόσο του ελεγκτή όσο και της κατασκευής σε διάφορα στάδια αποκόλλησης. Οι περιπτώσεις οι οποίες εξετάστηκαν ήταν πολλές και τα συμπεράσματα τα οποία βγάλαμε σε κάθε περίπτωση ικανοποιητικά.

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα, μπορεί κανείς να πει με βεβαιότητα ότι ο νευροασαφής ελεγκτής μοιάζει να είναι αποδοτικός αν εκπαιδευτεί σωστά, καθώς να μπορεί να προσαρμόζεται ακόμα και σε μεγάλα ποσοστά αποκόλλησης. Σε όλες τις διερευνήσεις που έγιναν τροποποιώντας τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας (μέσω επιβολής αποκόλλησης του πιεζοηλεκτρικού στρώματος) ο ελεγκτής προσαρμόστηκε πλήρως και ήταν αποδοτικός με αρκετά καλές ποσοστιαίες μειώσεις σε μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση. Ακόμα και στην περίπτωση της σχεδόν ολικής αποκόλλησης, στην οποία λόγω αναμενόμενης μικρής δυσκαμψίας οδηγηθήκαμε σε ταλάντωση με μεγαλύτερο πλάτος, ο ελεγκτής προσαρμόστηκε και συνέχισε να λειτουργεί ικανοποιητικά και αποδοτικά.

Μια μελλοντική εργασία η οποία θα έχει ενδιαφέρον να πραγματοποιηθεί και αποτελεί επέκταση της συγκεκριμένης, είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς και της απόδοσης ενός νευροασαφούς ελεγκτή που θα λαμβάνονται υπ' όψη και οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών στρωμάτων, ώστε να γίνεται πιο ρεαλιστική εφαρμογή των δυνάμεων ελέγχου.

8 Βιβλιογραφία

Fukada E. and Yasuda I.: On the piezoelectric effect of bone, Journal of the Physical Society of Japan, Volume 12, Issue 10, pp. 1158-1162 (1957).

Papadopoulos – Numerical Methods in Engineering – Research Article “An implicit potential method for incompressible flows” Volume94, Issue7 - Pages 672-686- 18 May 2013

Wang, L. X., 1994. *Adaptive fuzzy systems and control: design and stability analysis*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Jang: Fuzzy Modeling Using Generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm Conference: Proceedings of the 9th National Conference on Artificial Intelligence, Anaheim, CA, USA, July 14-19, 1991, Volume 2.

J. S. R. Jang and C. T. Sun, “Neuro-fuzzy modeling and control,” Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 3, pp. 378–406, 1995.

Tairidis G. K., (2016): Optimal design of smart structures, PhD dissertation, Chania, Technical University of Crete, School of Production Engineering and Management

Βολογιαννίδης Σταύρος, 2009. *Ευφυής Έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές*, Σημειώσεις ΤΕΙ Σερρών, Σέρρες.

Foutsitzi G. A., Marinova D. G., Stavroulakis G. E., Hadjigeorgiou E. P., 5-8 July 2016. *Vibration control analysis of smart piezoelectric composite plates*. Athens

I.Papachristou, Salonikos Salonikidis, Georgios K. Tairidis and Georgios E. Stavroulakis, 30 June-2 July 2011. *Adaptive fuzzy control of smart structures- ANFIS, 7th GRACM*. Athens: International Congress on Computational Mechanics.

Ταϊρίδης Γεώργιος, 2009. *Προσομοίωση ευφών συστημάτων με αισθητήρες διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Συνδεσή με ευφυείς μεθόδους ελέγχου. Μεταπτυχιακή Διατριβή*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Κουτσιανίτης Παναγιώτης, 2016, *Έλεγχος σύνθετης πλάκας με πιεζοηλεκτρικά υλικά σε συνθήκες αποκόλλησης*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.