



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή:

«Έλεγχος σύνθετης πλάκας με πιεζοηλεκτρικά υλικά σε συνθήκες αποκόλλησης»

Υπό τον Διπλ. Μηχανικό

Παναγιώτη Η. Κουτσιανίτη

A.M.: 2014019013

Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής & Βελτιστοποίησης

Χανιά 2016

Η διατριβή του Παναγιώτη Η. Κουτσιανίτη (2014019013) με τίτλο: “ Έλεγχος σύνθετης πλάκας με πιεζοηλεκτρικά υλικά σε συνθήκες αποκόλλησης ” εγκρίνεται

Σταυρουλάκης Γεώργιος, Καθηγητής, Επιβλέπων

Αντωνιάδης Αριστομένης, Καθηγητής

Μπιλάλης Νικόλαος, Καθηγητής

Δημοσιεύσεις σε συνέδρια και περιοδικά που αποτέλεσαν άμεσα ή έμμεσα προϊόντα της παρούσης εργασίας:

Περιοδικά:

P. Koutsianitis, G. Tairidis, G. Drosopoulos, G. Foutsitzi and G.E. Stavroulakis, "**Effectiveness of Optimized Fuzzy Controllers on Partially Delaminated Piezocomposites**", Composites Part B, Elsevier, (Submitted for publication)

G. Tairidis, G. Foutsitzi, P. Koutsianitis and G.E.Stavroulakis, "**Fine Tuning of a Fuzzy Controller used for Vibration Suppression of Smart Plates using Genetic Algorithms**", Advances in Engineering Software, Elsevier, 2015. (Ms.Ref.No.: ADES-D-15-00717)

Συνέδρια:

P. Koutsianitis, Georgia Foutsitzi, G.A. Drosopoulos, Georgios K. Tairidis and G.E. Stavroulakis, "**Optimally Tuned Fuzzy Control for Smart, Possibly Damaged Piezocomposites**", PCM-CMM-2015-3rd Polish Congress of Mechanics & 21st Computer Methods in Mechanics September 8th-11th 2015 Gdansk, Poland.

Georgios K Tairidis,Georgia A. Foutsitzi, Panagiotis Koutsianitis, Georgios Drosopoulos and Georgios E.Stavroulakis, "**Design and testing of Fuzzy Controllers on Smart Structures in the Presence of Delamination**", The Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing to be held in Prague, Czech Republic 1-4 September 2015.

Georgios K Tairidis,Georgia A. Foutsitzi, Panagiotis I. Koutsianitis and Georgios E.Stavroulakis, "**Fine Tuning of Fuzzy Controllers for Vibration Suppression of Smart Plates using Particle Swarm Optimization**",8th GRACM International Congress on Computational Mechanics Volos, 12 July - 15 July 2015.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υλοποιήθηκε με την υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη του οποίου χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση της. Επιπλέον μου έδωσε τη δυνατότητα, από την έναρξη του μεταπτυχιακού μου προγράμματος, της συμμετοχής και διεκπεραίωσης εργασιών τα οποία στην πορεία δημοσιεύθηκαν σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω δύο πολύτιμους συνεργάτες, τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γεώργιο Ταϊρίδη και τον μεταδιδάκτορα κ. Γεώργιο Δροσόπουλο για την συνεργασία μας, τις συμβουλές και τις γνώσεις που μου μετέδωσαν, αλλά και τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσαν για τις συναντήσεις μας.

Μία ειδική αναφορά θα ήθελα να κάνω στη καθηγήτρια κα Γεωργία (Ντόρα) Φουτσιτζή για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε αλλά κυρίως για τη βοήθεια που μου παρείχε και το προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε, δεδομένου ότι ανήκει σε διαφορετικό εκπαιδευτικό ίδρυμα.

Επιπλέον, ευχαριστώ όλους μου τους φίλους παλιούς και νέους εδώ στα Χανιά που στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν όλον αυτό τον καιρό με την παρουσία τους.

Τέλος, η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στην οικογένεια μου η οποία είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζει στις καλές τις κακές και τις δύσκολες στιγμές και μου έμαθε πως δεν υπάρχουν εμπόδια τα οποία δεν μπορούν να ξεπεραστούν.

Κουτσιανίτης Παναγιώτης

Χανιά, 2016

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	9
2.1 Μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	9
2.2 Το συγκολλητικό στρώμα	12
2.3 Η αρχή Hamilton	15
2.3 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων	17
2.4 Μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης (Houbolt).....	23
3. ΘΕΩΡΙΑ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ	25
3.1 Περιγραφή του μοντέλου αποκόλλησης.....	25
3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα	26
4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ	31
4.1 Ασαφή σύνολα	31
4.2 Συναρτήσεις συμμετοχής	32
4.3 Ασαφοποίηση.....	32
4.4 Αποασαφοποίηση	32
4.5 Κανόνες ασαφούς συστήματος	33
4.7 Ασαφής έλεγχος μηχανικού μοντέλου	33
4.8 Ασαφής έλεγχος ηλεκτρομηχανικού μοντέλου	36
5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	39
5.1 Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου	39
5.2 Γενετικοί αλγόριθμοι με περιορισμούς	44
5.3 Το πρόβλημα βελτιστοποίησης.....	46
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	50
6.1 Αποτελέσματα μηχανικού μοντέλου.....	53
6.1.1 Αποτελέσματα χωρίς αποκόλληση	54
6.1.2 Αποκόλληση 10%.....	55
6.1.3 Αποκόλληση 50%.....	56
6.1.4 Αποκόλληση 90%.....	58
6.2 Αποτελέσματα ηλεκτρικού μοντέλου	60
6.2.1 Αποτελέσματα χωρίς αποκόλληση χωρίς βελτιστοποίηση	61
6.2.2 Αποτελέσματα χωρίς αποκόλληση με βελτιστοποίηση.....	62
6.2.3 Αποκόλληση 10%.....	63

6.2.4 Αποκόλληση 50%.....	65
6.2.5 Αποκόλληση Collocated actuator.....	66
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
Βιβλιογραφία	70

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο έλεγχος των ταλαντώσεων στις έξυπνες κατασκευές αποτελεί θέμα μελέτης για πολλούς ερευνητές και είναι στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια . Παρόλα αυτά, η βιομηχανική εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών έχει αυξήσει δραματικά την πολυπλοκότητα των συστημάτων που μελετήθηκαν. Έτσι πολλές μέθοδοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν για τον βέλτιστο σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου.

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης στην πλειοψηφία τους ο είναι εμπνευσμένες από την φύση, και είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς λόγω της απλότητας και της αποτελεσματικότητας τους, σε διάφορα προβλήματα και καταστάσεις.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης, με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε πληθώρα διαφορετικών προβλημάτων και συγκεκριμένα στο τομέα του ελέγχου κατασκευών. Για παράδειγμα ο PID (Proportional-Integral-Derivative) έλεγχος είναι μία από τις πιο κοινές και ισχυρές μεθόδους στον αυτόματο έλεγχο. Παρόλα αυτά, λόγω της πολυπλοκότητας των σύγχρονων βιομηχανικών συστημάτων, μπορεί να προκύψουν μη γραμμικότητες αλλά και άλλες ατέλειες, καθιστώντας τον ελεγκτή λιγότερο ισχυρό για τη διαδικασία ελέγχου. Έτσι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου καθίσταται υποχρεωτική. Για το βέλτιστο σχεδιασμό των παραμέτρων ενός PID ελεγκτή κρίνεται αποτελεσματική η χρήση γενετικού αλγορίθμου[1].

Εκτός από τις μαθηματικές μεθόδους ελέγχου, οι οποίες συνήθως παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση γραμμικών νόμων ανάδρασης υπό ορισμένες προϋποθέσεις, είναι δυνατή η εφαρμογή μη γραμμικών ελεγκτών βασισμένων σε τεχνικές ασαφούς λογικής[2].

Η ασαφής λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με γενετικούς αλγορίθμους ή και άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης σε πληθώρα εφαρμογών. Για παράδειγμα οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν για την εκπαίδευση των ασαφών συστημάτων [3], σε κατασκευές για τη βελτιστοποίηση του ενεργού ελέγχου σε υψηλές κτηριακές κατασκευές [4] ή στη χημική βιομηχανία, για παράδειγμα προκειμένου να διαπιστωθεί κατάλληλος έλεγχος του pH [5].

Όσον αφορά στο βέλτιστο σχεδιασμό του ελεγκτή ασαφούς λογικής με χρήση γενετικών αλγορίθμων, μία απλή μέθοδος είναι τα συμμετρικά κατανομημένα σύνολα [6], το οποίο θεωρείται ως ένα μικτού ακέραιου περιορισμού δυναμικό πρόβλημα.

Αναφορικά με τη ρύθμιση των ασαφών ελεγκτών, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξηθεί η απόδοση του ελεγκτή στη διαδικασία του ελέγχου [7], βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους του [8].

Ποικίλες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με εφαρμογή του ασαφούς ελέγχου, με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων και διεγερτών ώστε να μειωθούν οι ταλαντώσεις σε κατασκευές πλάκας [9],[10]. Στο [11] παρουσιάζονται δύο αριθμητικά σχήματα για την εξάλειψη της ταλάντωσης πλάκας με τη χρήση ασαφούς ελέγχου. Τέλος, στο [12] ερευνήθηκε η συμπεριφορά ενός PID ελεγκτή σε σχέση με έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής σε μία τετραγωνική πλάκα.

Όσον αφορά την κατασκευή, μικρή έρευνα έχει προηγηθεί σχετικά με σύνθετες ευφυείς κατασκευές όπου λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη στρώματος συγκόλλησης των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων και διεγερτών. Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας για τις σύνθετες ευφυείς κατασκευές, αφορά σύνθετες κατασκευές που είναι εύκαμπτες και λεπτές (thin-walled structures). Σε αυτές τις περιπτώσεις, μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη το υλικό συγκόλλησης μεταξύ των στοιχείων της κατασκευής και των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων και διεγερτών είναι πολύ σημαντικά, αφού το στρώμα της κόλλας δεν είναι τόσο λεπτό σε σχέση με τα πιεζοηλεκτρικά φύλλα και μπορεί να επηρεάσει, συνήθως αρνητικά, τον έλεγχο της κατασκευής. Ακόμα και στην περίπτωση κατά την οποία το στρώμα της κόλλας είναι λεπτό, οι διαφορετικές ιδιότητές του, η ικανότητά του να απορροφά ενέργεια καθώς και η πιθανότητα να έχει ατέλειες λόγω δυσκολιών στην κατασκευή το καθιστούν σημαντικό στοιχείο για την κατασκευή και δικαιολογούν την χρήση σχετικά πολύπλοκων μοντέλων για να ληφθεί υπόψη η επιρροή του.

Για τους λόγους αυτούς, στα πλαίσια της παρούσας την διατριβής χρησιμοποιήθηκε ένα βελτιωμένο μαθηματικό μοντέλο σύνθετης ευφυούς πλάκας, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος από την κα Γεωργία Φουτσιτζή [13], το οποίο λαμβάνει υπόψη και το συγκολλητικό υλικό ανάμεσα στα διάφορα στρώματα της πλάκας. Η ανάπτυξη του μοντέλου αυτού στηρίχθηκε σε θεωρία διακριτών στρώσεων (layerwise theory) η οποία ενσωματώνει τόσο τις ηλεκτρο-μηχανικές επιδράσεις σύζευξης όσο και την επίδραση του συγκολλητικού στρώματος. Πιο συγκεκριμένα, η στρώση της πλάκας και των αισθητήρων-διεγερτών μοντελοποιούνται ξεχωριστά με βάση τη διατμητική θεωρία κάμψεων πλάκας ενώ η στρώση του συγκολλητικού υλικού μοντελοποιείται με τη μορφή ελατηρίων που συνδέουν την πλάκα με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Το μοντέλο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί στη προσομοίωση της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς λεπτών ή μεσαίου πάχους ευφών πλακών με αποκόλληση. Επιπλέον το μοντέλο αυτό με τη χρήση κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων πλάκας οδηγεί στο ηλεκτρομηχανικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της στατικής και δυναμικής απόκριση κατασκευών με αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων.

Τέλος, στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν και ελέγχθηκαν ασαφείς τεχνικές για έξυπνες κατασκευές. Το πρόβλημα-μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν η πλάκα που αναφέρθηκε η οποία διακριτοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στην πλάκα εφαρμόστηκαν ασαφείς ελεγκτές, με σκοπό τον έλεγχο των ταλαντώσεών της και την επιβολή δυνάμεων ελέγχου ώστε αυτή να παραμένει κατά το δυνατόν πλησιέστερα στη θέση ισορροπίας [2],[9],[14]. Επιπλέον έγινε και η διερεύνηση κατά πόσο μία αποκόλληση μπορεί να επηρεάσει την συμπεριφορά αυτών των ελεγκτών [15]

Ο ασαφής έλεγχος περιέχει αρκετές παραμέτρους οι οποίες πρέπει να ρυθμισθούν με τον καλύτερο τρόπο με στόχο τη βελτιστοποίηση της ευφυούς κατασκευής. Στην εργασία αυτή η χρήση του γενετικού αλγορίθμου έχει σαν σκοπό την βέλτιστη τοποθέτηση των συναρτήσεων συμμετοχής του ελεγκτή με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το εύρος της ταλάντωσης της κατασκευής. Το σύνολο των προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν είναι εφαρμόσιμα για τον έλεγχο οποιασδήποτε μηχανικής κατασκευής.

2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στο παρόν κομμάτι παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο σύνθετης πλάκας της οποίας το άνω και κάτω στρώμα αποτελείται από πιεζοηλεκτρικό υλικό. Το άνω στρώμα μπορεί για παράδειγμα να χρησιμοποιηθεί ως διεγέρτης και το κάτω στρώμα ως αισθητήρας, με σκοπό μετέπειτα τη δημιουργία συστήματος ελέγχου, για τη μείωση των ταλαντώσεων της κατασκευής.

Εξελιγμένες κατασκευές, με αυτόνομο σύστημα αναγνώρισης βλαβών αλλά και ελέγχου, αποτελούν επιστημονικούς τομείς ανάπτυξης, στην ερευνητική περιοχή των έξυπνων κατασκευών, όπως και στις κατασκευές στην αεροναυτική και 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 [16], [17], [18]. Η ένωση των πιεζοηλεκτρικών στρωμάτων με τη πλάκα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση συγκολλητικού υλικού όπως φαίνεται στην εικόνα(1). Ο διαχωρισμός αυτός πραγματοποιήθηκε αποτυπώνοντας την συγκεκριμένη περιοχή με αρκετά μεγαλύτερη «ευελιξία», όριο ελαστικότητας, σε σχέση με την υπόλοιπη κατασκευή.

Το συγκεκριμένο μοντέλο χαρακτηρίζεται από την «ευχρηστία» του δεδομένου ότι μπορεί πολύ εύκολα να ενσωματωθεί σε ποικίλα προβλήματα βέλτιστου ελέγχου, είναι δυνατή η αποτύπωση μίας βλάβης στην κατασκευή (ρωγμή, αποκόλληση κτλ), με σκοπό τη μελέτη, κατά πόσο αυτή μπορεί να επηρεάσει στη διαδικασία του ελέγχου.

2.1 Μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Θεωρούμε σύνθετη πλάκα, η οποία ενώνεται με 2 πιεζοηλεκτρικά στρώματα, αισθητήρα και διεγέρτη, σε μορφή sandwich και μεταξύ τους συνδέονται με χρήση συγκολλητικού υλικού όπως φαίνεται στην εικόνα(1).

Χρησιμοποιώντας την θεωρία της πλάκας Mindlin και χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες του συστήματος όπως δίνονται στην Εικόνα 1, οι μετατοπίσεις των μη συγκολλητικών επιπέδων αναγράφονται όπως παρακάτω:

$$\begin{aligned}u_1^{(i)}(x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}, t) &= u^{(i)}(x^{(i)}, y^{(i)}, t) - z^{(i)} \theta_x^{(i)}(x^{(i)}, y^{(i)}, t) \\u_2^{(i)}(x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}, t) &= v^{(i)}(x^{(i)}, y^{(i)}, t) - z^{(i)} \theta_y^{(i)}(x^{(i)}, y^{(i)}, t) \\u_3^{(i)}(x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}, t) &= w^{(i)}(x^{(i)}, y^{(i)}, t)\end{aligned}\tag{1}$$

όπου $u^{(i)}, v^{(i)}$ και $w^{(i)}$ είναι οι 3 παραμορφώσεις του μεσαίου επιπέδου του i-οστού στρώματος και $\theta_x^{(i)}, \theta_y^{(i)}$ είναι γωνίες περιστροφής της κάθετης προς το μέσο επίπεδο γύρω από τους άξονες x και y αντίστοιχα. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι τα στρώματα είναι όλα παράλληλα μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό, οι συντεταγμένες του κάθε στρώματος $(x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)})$ αντικαθίσταται από ένα

κοινό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) . Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι μετατοπίσεις μπορούν να γραφτούν ως:

$$\begin{aligned} u_1^{(i)}(x, y, z, t) &= u^{(i)}(x, y, t) - (z - \tilde{z}^{(i)}) \theta_x^{(i)}(x, y, t) \\ u_2^{(i)}(x, y, z, t) &= v^{(i)}(x, y, t) - (z - \tilde{z}^{(i)}) \theta_y^{(i)}(x, y, t) \\ u_3^{(i)}(x, y, z, t) &= w^{(i)}(x, y, t) \end{aligned} \quad (2)$$

Όπου, $\tilde{z}^{(i)}$ είναι το πάχος του i-οστού στρώματος.

Οι τροπές κάμψης (bending) και η διάτμησης (shear) του i-οστού στρώματος μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$\left\{ \varepsilon_b^{(i)} \right\} = \left\{ \varepsilon_{0b}^{(i)} \right\} + (z - \tilde{z}^{(i)}) \left\{ \kappa^{(i)} \right\}, \quad \left\{ \varepsilon_s^{(i)} \right\} = \left\{ \varepsilon_{0s}^{(i)} \right\} \quad (3)$$

όπου,

$$\left\{ \varepsilon_b^{(i)} \right\} = \left\{ \varepsilon_{xx}^{(i)}, \varepsilon_{yy}^{(i)}, \gamma_{xy}^{(i)} \right\}^T, \quad \left\{ \varepsilon_s^{(i)} \right\} = \left\{ \gamma_{yz}^{(i)}, \gamma_{xz}^{(i)} \right\}^T, \quad \left\{ \varepsilon_{0b}^{(i)} \right\} = \left\{ \frac{\partial u^{(i)}}{\partial x}, \frac{\partial v^{(i)}}{\partial y}, \frac{\partial u^{(i)}}{\partial y} + \frac{\partial v^{(i)}}{\partial x} \right\}^T, \quad (4)$$

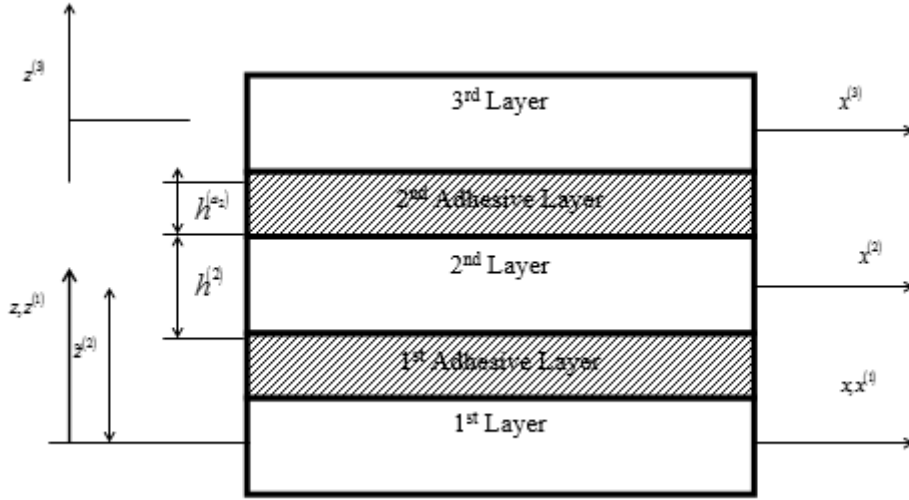
$$\left\{ \kappa^{(i)} \right\} = \left\{ -\frac{\partial \theta_x^{(i)}}{\partial x}, -\frac{\partial \theta_y^{(i)}}{\partial y}, -\left(\frac{\partial \theta_x^{(i)}}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y^{(i)}}{\partial x} \right) \right\}^T, \quad \left\{ \varepsilon_{0s}^{(i)} \right\} = \left\{ \frac{\partial w^{(i)}}{\partial y} - \theta_y^{(i)}, \frac{\partial w^{(i)}}{\partial x} - \theta_x^{(i)} \right\}^T$$

Η εξίσωση (3) μπορεί να εκφραστεί και με την παρακάτω μορφή

$$\left\{ \varepsilon_b^{(i)} \right\} = \left[L_b^{(i)}(z) \right] \left\{ u^{(i)} \right\}, \quad \left\{ \varepsilon_s^{(i)} \right\} = \left[L_s^{(i)}(z) \right] \left\{ u^{(i)} \right\} \quad (5)$$

όπου $\left\{ u^{(i)} \right\} = \left\{ u^{(i)}, v^{(i)}, w^{(i)}, \theta_x^{(i)}, \theta_y^{(i)} \right\}^T$ είναι το γενικευμένο διάστημα μετατοπίσεων και

$$\left[L_b^{(i)}(z) \right] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & -(z - \tilde{z}^{(i)}) \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & 0 & -(z - \tilde{z}^{(i)}) \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 & -(z - \tilde{z}^{(i)}) \partial/\partial y & -(z - \tilde{z}^{(i)}) \partial/\partial x \end{bmatrix}, \quad \left[L_s^{(i)}(z) \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \partial/\partial x & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$



Εικόνα 1: Η 3^{ων} επιπέδων σύνθετη πιεζοηλεκτρική πλάκα

Το ηλεκτρικό πεδίο $\{E^{(i)}\}$ του i -οστού πιεζοηλεκτρικού στρώματος εκφράζεται από το ηλεκτρικό δυναμικό $\Phi^{(i)}$ όπου:

$$\{E^{(i)}(x, y, z, t)\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T \Phi^{(i)}(x, y, z, t) \quad (7)$$

Στη συνέχεια θεωρούμε ότι το ηλεκτρικό δυναμικό $\Phi^{(i)}$ είναι γραμμικά κατανομημένο κατά μήκος του πιεζοηλεκτρικού υλικού, επομένως μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\Phi^{(i)}(x, y, z, t) = \frac{z - \tilde{z}^{(i)}}{h^{(i)}} \phi^{(i)}(x, y, t) \quad (8)$$

όπου $h^{(i)}$ είναι το πάχος του i -οστού πιεζοηλεκτρικού στρώματος και $\phi^{(i)}$ είναι το ηλεκτρικό δυναμικό στο μέσον επίπεδο του i -οστού στρώματος χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (7) και (8) το ηλεκτρικό πεδίο $\{E^{(i)}\}$ μπορεί να γραφτεί ως

$$\{E^{(i)}\} = -[L_E^{(i)}(z)]\phi^{(i)} \quad (9)$$

όπου

$$[L_E^{(i)}(z)] = \left\{ \frac{z - \tilde{z}^{(i)}}{h^{(i)}} \frac{\partial}{\partial x}, \frac{z - \tilde{z}^{(i)}}{h^{(i)}} \frac{\partial}{\partial y}, \frac{1}{h^{(i)}} \right\}^T$$

Στην περίπτωση κατά την οποία το $\phi^{(i)}(x, y, t) = \Phi_0$ είναι σταθερό, προκύπτει:

$$\left[L_E^{(i)}(z) \right] = \left\{ 0, 0, \frac{1}{h^{(i)}} \right\}^T$$

Για μεγαλύτερη απλοποίηση, στον αλγόριθμο όλα τα μη συγκολλημένα επίπεδα θεωρούνται πιεζοηλεκτρικά. Η γραμμική εξίσωση για κάθε στρώμα πλέον γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \{\sigma^{(i)}\} &= [Q^{(i)}] \{\varepsilon^{(i)}\} - [e^{(i)}]^T \{E^{(i)}\}, \\ \{D^{(i)}\} &= [e^{(i)}] \{\varepsilon^{(i)}\} + [\xi^{(i)}] \{E^{(i)}\}, \end{aligned} \quad (10)$$

όπου $\{\sigma\}$ είναι η τάση, $\{\varepsilon\}$ είναι ο τανυστής τροπή, $\{D\}$ είναι η ηλεκτρική μετατόπιση, $\{E\}$ το ηλεκτρικό πεδίο, $[Q]$ ο πίνακας ελαστικής δυσκαμψίας, $[e]$ ο πίνακας πιεζοηλεκτρικού και $[\xi]$ ο πίνακας διαπερατότητας [19]. Θεωρούμε επιπλέον ότι το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ορθότροπο.

Όταν πλέον διαχωριστούν οι διατμητικές με τις καμπτικές τιμές, η εξίσωση (10) γίνεται

$$\begin{aligned} \{\sigma_b^{(i)}\} &= [Q_b^{(i)}] \{\varepsilon_b^{(i)}\} - [e_b^{(i)}]^T \{E^{(i)}\}, \\ \{\sigma_s^{(i)}\} &= [Q_s^{(i)}] \{\varepsilon_s^{(i)}\} - [e_s^{(i)}]^T \{E^{(i)}\}, \\ \{D^{(i)}\} &= [e_b^{(i)}] \{\varepsilon_b^{(i)}\} + [e_s^{(i)}] \{\varepsilon_s^{(i)}\} + [\xi^{(i)}] \{E^{(i)}\}, \end{aligned} \quad (11)$$

όπου $\{\sigma_b^{(i)}\} = \{\sigma_{xx}^{(i)}, \sigma_{yy}^{(i)}, \tau_{xy}^{(i)}\}^T$, $\{\sigma_s^{(i)}\} = \{\tau_{yz}^{(i)}, \tau_{xz}^{(i)}\}^T$ και

$$\begin{aligned} [Q_b^{(i)}] &= \begin{bmatrix} Q_{11}^{(i)} & Q_{12}^{(i)} & 0 \\ Q_{21}^{(i)} & Q_{22}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}^{(i)} \end{bmatrix} & [Q_s^{(i)}] &= \begin{bmatrix} Q_{44}^{(i)} & 0 \\ 0 & Q_{55}^{(i)} \end{bmatrix} \\ [e_b^{(i)}] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ e_{31}^{(i)} & e_{32}^{(i)} & 0 \end{bmatrix} & [e_s^{(i)}] &= \begin{bmatrix} 0 & e_{15}^{(i)} \\ e_{24}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & [\xi^{(i)}] &= \begin{bmatrix} \xi_{11}^{(i)} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{22}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{33}^{(i)} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Τα πιεζοηλεκτρικά στρώματα θεωρείται ότι παρουσιάζουν εγκάρσιες ιδιότητες. Στην εξίσωση (11), ένα στρώμα μπορεί να είναι είτε πιεζοηλεκτρικό είτε ελαστικό. Στην τελευταία περίπτωση, οι σταθερές του υλικού πρέπει να είναι μηδενικές.

2.2 Το συγκολλητικό στρώμα

Το συγκολλητικό στρώμα θεωρείται ότι είναι πολύ λεπτό και η ελαστική συμπεριφορά του χαρακτηρίζεται ως γραμμική. Οι τιμές οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση είναι οι

εγκάρσιες κανονικές τάσεις (stress ($\sigma_z^{(a)}$)) και τροπές (strain ($\varepsilon_z^{(a)}$)), όπως και οι διατμητικές τάσεις ($\tau_{xz}^{(a)}, \tau_{yz}^{(a)}$) και τροπές αντίστοιχα ($\gamma_{xz}^{(a)}, \gamma_{yz}^{(a)}$). Το μήκος και το πάχος συμβολίζονται με L , b και h αντίστοιχα.

Η γραμμική παραμόρφωση των συγκολλητικών στρωμάτων περιγράφεται συναρτήσει των παραμορφώσεων των γειτονικών δομικών στρωμάτων, σύμφωνα με τις εξισώσεις όπως φαίνονται παρακάτω.

$$u_1^{(a_i)} = u_1^{(i),t} + \left(u_1^{(i+1),b} - u_1^{(i),t} \right) \frac{z - z^{(i),t}}{h^{(a_i)}} \quad (12a)$$

$$u_2^{(a_i)} = u_2^{(i),t} + \left(u_2^{(i+1),b} - u_2^{(i),t} \right) \frac{z - z^{(i),t}}{h^{(a_i)}} \quad (12b)$$

$$u_3^{(a_i)} = u_3^{(i),t} + \left(u_3^{(i+1),b} - u_3^{(i),t} \right) \frac{z - z^{(i),t}}{h^{(a_i)}} \quad (12c)$$

Όπου t και b είναι η άνω (top) και η κάτω (bottom) επιφάνεια του στρώματος. Για παράδειγμα,

$$u_1^{(i),t} = u^{(i)} - \theta_x^{(i)} \frac{h^{(i)}}{2}, \quad u_1^{(i+1),b} = u^{(i+1)} + \theta_x^{(i+1)} \frac{h^{(i+1)}}{2} \text{ και } z^{(i),t} = \tilde{z}^{(i)} + \frac{h^{(i)}}{2}$$

Δεδομένου ότι η εγκάρσια μετατόπιση είναι ανεξάρτητη από τις κατακόρυφες συντεταγμένες, $u_3^{(i),t} = u_3^{(i),b} = w^{(i)}$.

Η εξ.(12) μπορεί να γραφτεί πλέον ως

$$\left\{ \bar{u}^{(a_i)} \right\} = \left[R_t^{(a_i)}(z) \right] \left\{ \bar{u}^{(i+1)} \right\} + \left[R_b^{(a_i)}(z) \right] \left\{ \bar{u}^{(i)} \right\} \quad (13)$$

Όπου $\left\{ \bar{u}^{(i)} \right\} = \left\{ u^{(i)}, v^{(i)}, w^{(i)}, \theta_x^{(i)}, \theta_y^{(i)} \right\}^T$ είναι το γενικευμένο διάνυσμα μετατόπισης,

$$\left[R_t^{(a_i)}(z) \right] = \begin{bmatrix} Z & 0 & 0 & \frac{h^{(i+1)}}{2}Z & 0 \\ 0 & Z & 0 & 0 & \frac{h^{(i+1)}}{2}Z \\ 0 & 0 & Z & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \left[R_b^{(a_i)}(z) \right] = \begin{bmatrix} 1-Z & 0 & 0 & -\frac{h^{(i)}}{2}Z & 0 \\ 0 & 1-Z & 0 & 0 & -\frac{h^{(i)}}{2}Z \\ 0 & 0 & 1-Z & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{και } Z \equiv \frac{1}{h^{(a_i)}} \left(z - \tilde{z}^{(i)} - \frac{h^{(i)}}{2} \right).$$

Χρησιμοποιώντας τις μετατοπίσεις και λαμβάνοντας υπόψιν ότι το πιεζοηλεκτρικό στρώμα είναι αρκετά πιο λεπτό σε σχέση με τα άλλα στρώματα, οι διατμητικές τροπές και οι ορθές τροπές του συγκολλητικού στρώματος δίδονται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{zz}^{(a_i)} &= \frac{w^{(i+1)} - w^{(i)}}{h^{(a_i)}} \\ \gamma_{yz}^{(a_i)} &= \frac{1}{h^{(a_i)}} \left[v^{(i+1)} - v^{(i)} + \frac{h^{(i)}}{2} \theta_y^{(i)} + \frac{h^{(i+1)}}{2} \theta_y^{(i+1)} \right] \\ \gamma_{xz}^{(a_i)} &= \frac{1}{h^{(a_i)}} \left[u^{(i+1)} - u^{(i)} + \frac{h^{(i)}}{2} \theta_x^{(i)} + \frac{h^{(i+1)}}{2} \theta_x^{(i+1)} \right]\end{aligned}\tag{14}$$

Η εξίσωση (14) μπορεί να γραφτεί και στην παρακάτω μορφή

$$\left\{ \mathcal{E}^{(a_i)} \right\} = \left[L_a^{(top)}(z) \right] \left\{ u^{(i+1)} \right\} + \left[L_a^{(bottom)}(z) \right] \left\{ u^{(i)} \right\}\tag{15}$$

όπου

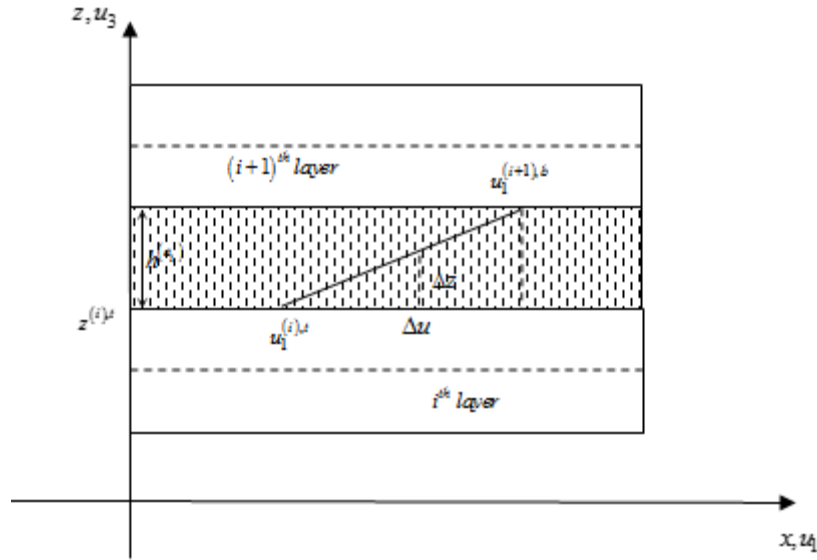
$$\begin{aligned}\left\{ \mathcal{E}^{(a_i)} \right\} &= \left\{ \mathcal{E}_{zz}^{(a_i)}, \gamma_{yz}^{(a_i)}, \gamma_{xz}^{(a_i)} \right\}^T \\ \left[L_{a_i}^{(top)}(z) \right] &= \frac{1}{h^{(a_i)}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{h^{(i+1)}}{2} \\ 1 & 0 & 0 & \frac{h^{(i+1)}}{2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \left[L_{a_i}^{(bottom)}(z) \right] = \frac{1}{h^{(a_i)}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{h^{(i)}}{2} \\ -1 & 0 & 0 & \frac{h^{(i)}}{2} & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Η ορθή και η διατμητική τάση στο συγκολλητικό υλικό πλέον θα γραφτούν ως

$$\left\{ \sigma^{(a_i)} \right\} = \left[Q^{(a_i)} \right] \left\{ \mathcal{E}^{(a_i)} \right\} \quad \text{ή} \quad \left\{ \begin{matrix} \sigma_{zz}^{(a_i)} \\ \tau_{yz}^{(a_i)} \\ \tau_{xz}^{(a_i)} \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} E^{(a_i)} & 0 & 0 \\ 0 & G^{(a_i)} & 0 \\ 0 & 0 & G^{(a_i)} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \mathcal{E}_{zz}^{(a_i)} \\ \gamma_{yz}^{(a_i)} \\ \gamma_{xz}^{(a_i)} \end{matrix} \right\}\tag{16}$$

Όπου $E^{(a_i)}$ και $G^{(a_i)}$ είναι οι ελαστικοί και διατμητικοί συντελεστές του συγκολλητικού στρώματος a_i και

$$\begin{aligned}\left\{ \sigma^{(\varepsilon_i)} \right\} &= \left\{ \sigma_{zz}^{(\alpha_i)}, \tau_{yz}^{(\alpha_i)}, \tau_{xz}^{(\alpha_i)} \right\}^T \quad \text{και} \\ \left[Q^{(\alpha_i)} \right] &= \begin{bmatrix} Q_{33}^{(\alpha_i)} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{44}^{(\alpha_i)} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{55}^{(\alpha_i)} \end{bmatrix}\end{aligned}$$



Εικόνα 2: Το πεδίο μετατοπίσεων του συγκολλητικού υλικού

2.3 Η αρχή Hamilton

Για να προκύψουν οι εξισώσεις της κατασκευής, χρησιμοποιείται η γενική αρχή Hamilton, η οποία μπορεί να γραφτεί ως

$$\int_0^T (\delta T - \delta U + \delta W) dt = 0 \quad (17)$$

όπου T είναι η κινητική ενέργεια, U είναι η συνολική ενέργεια τροπής και W είναι το έργο που παράγεται από τα φορτία.[33]

Η συνολική κινητική ενέργεια του συστήματος είναι το άθροισμα των αποθηκευμένων ενεργειών των επιμέρους στρωμάτων και μπορεί αν δοθεί από

$$T = \sum_{i=1}^3 T^{(i)} + \sum_{i=1}^2 T^{(a_i)} \quad (18)$$

όπου $T^{(i)}$, $T^{(a_i)}$ είναι η κινητική ενέργεια του i -οστού στρώματος και a_i συγκολλητικού στρώματος αντίστοιχα, και υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις

$$T^{(i)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(i)}} \left\{ \dot{\vec{u}}^{(i)} \right\}^T \left[I^{(i)}(z) \right] \left\{ \ddot{\vec{u}}^{(i)} \right\} dV, \quad T^{(a_i)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(a_i)}} \left\{ \dot{\vec{u}}^{(a_i)} \right\}^T \left[I^{(a_i)}(z) \right] \left\{ \ddot{\vec{u}}^{(a_i)} \right\} dV, \quad (19)$$

όπου

$$[I^{(i)}(z)] = \begin{bmatrix} \rho^{(i)} & 0 & 0 & -(z - \bar{z}^{(i)})\rho^{(i)} & 0 \\ 0 & \rho^{(i)} & 0 & 0 & -(z - \bar{z}^{(i)})\rho^{(i)} \\ 0 & 0 & \rho^{(i)} & 0 & 0 \\ -(z - \bar{z}^{(i)})\rho^{(i)} & 0 & 0 & (z - \bar{z}^{(i)})^2 \rho^{(i)} & 0 \\ 0 & -(z - \bar{z}^{(i)})\rho^{(i)} & 0 & 0 & (z - \bar{z}^{(i)})^2 \rho^{(i)} \end{bmatrix}$$

$$[I^{(a_i)}(z)] = \begin{bmatrix} \rho^{(a_i)} & 0 & 0 \\ 0 & \rho^{(a_i)} & 0 \\ 0 & 0 & \rho^{(a_i)} \end{bmatrix},$$

$u^{(a_i)} = \{u_1^{(a_i)}, u_2^{(a_i)}, u_3^{(a_i)}\}^T$ και $V^{(i)}$, $V^{(a_i)}$ είναι οι όγκοι του i-στού στρώματος και a_i συγκολλητικού στρώματος αντίστοιχα.

Η συνολική ενέργεια του συστήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση

$$U = \sum_{i=1}^3 U^{(i)} + \sum_{i=1}^2 U^{(a_i)} \quad (20)$$

Όπου η ενέργεια του i-οστού στρώματος δίνεται από τις σχέσεις

$$U^{(i)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(i)}} \left(\{\mathcal{E}^{(i)}\}^T \{\sigma^{(i)}\} \right) dV = \frac{1}{2} \int_{V^{(i)}} \left(\{\bar{\mathcal{E}}^{(i)}\}^T [\mathcal{D}^{(i)}(z)] \{\bar{\mathcal{E}}^{(i)}\} - \{\bar{\mathcal{E}}^{(i)}\}^T [\mathcal{E}^{(i)}(z)] \{E^{(i)}\} \right) dV \quad (21)$$

με

$$\{\bar{\mathcal{E}}^{(i)}\} = \left\{ \left\{ \mathcal{E}_{0b}^{(i)} \right\}^T, \left\{ \kappa^{(i)} \right\}^T, \left\{ \mathcal{E}_{0s}^{(i)} \right\}^T \right\}^T \quad (22)$$

και

$$[D^{(i)}(z)] = \begin{bmatrix} [\mathcal{Q}_b^{(i)}] & (z - \bar{z}^{(i)})[\mathcal{Q}_b^{(i)}] & 0 \\ (z - \bar{z}^{(i)})[\mathcal{Q}_b^{(i)}] & (z - \bar{z}^{(i)})^2 [\mathcal{Q}_b^{(i)}] & 0 \\ 0 & 0 & [\mathcal{Q}_s^{(i)}] \end{bmatrix} \quad [\mathcal{E}^{(i)}(z)] = \begin{bmatrix} [e_b^{(i)}]^T \\ (z - \bar{z}^{(i)})[e_b^{(i)}]^T \\ [e_s^{(i)}]^T \end{bmatrix}$$

Η δυναμική ενέργεια του a_i συγκολλητικού στρώματος δίδεται από

$$U^{(a_i)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(i)}} \left(\{\mathcal{E}^{(a_i)}\}^T \{\sigma^{(a_i)}\} \right) dV = \frac{1}{2} \int_{V^{(a_i)}} \left(\{\mathcal{E}^{(a_i)}\}^T [\mathcal{Q}^{(a_i)}] \{\mathcal{E}^{(a_i)}\} \right) dV$$

Το συνολικό έργο που παράγεται, υπολογίζεται από το άθροισμα των ηλεκτρικών δυνάμεων και των μηχανικών, $W_E^{(i)}$ και $W^{(i)}$ αντίστοιχα.

$$W = \sum_{i=1}^3 (W_E^{(i)} + W^{(i)}), \quad (23)$$

όπου

$$W_E^{(i)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(i)}} \{E^{(i)}\}^T [D^{(i)}] dV = \frac{1}{2} \int_{V^{(i)}} \left\{ \{E^{(i)}\}^T [\xi^{(i)}] \{E^{(i)}\} + \{\bar{\varepsilon}^{(i)}\}^T [\mathcal{E}^{(i)}] \{E^{(i)}\} \right\} dV \quad (24)$$

$$W^{(i)} = \{\bar{u}^{(i)}\}^T \{F_c^{(i)}\} + \int_{S^{(i)}} \{\bar{u}^{(i)}\}^T \{f_s^{(i)}\} dS + \int_{V^{(i)}} \{\bar{u}^{(i)}\}^T \{f_v^{(i)}\} dV - \int_{S^{(i)}} \{E^{(i)}\}^T \{q^{(i)}\} dS \quad (25)$$

Στην εξίσωση (25), το $\{F_c^{(i)}\}$ συμβολίζει το διάνυσμα των επικεντρωμένων δυνάμεων, $\{f_s^{(i)}\}$ και $\{f_v^{(i)}\}$ συμβολίζουν τα διανύσματα των επιφανειακών δυνάμεων και των δυνάμεων όγκου αντίστοιχα κα $\{q^{(i)}\}$ συμβολίζει το διάνυσμα επιφανειακού φορτίου.

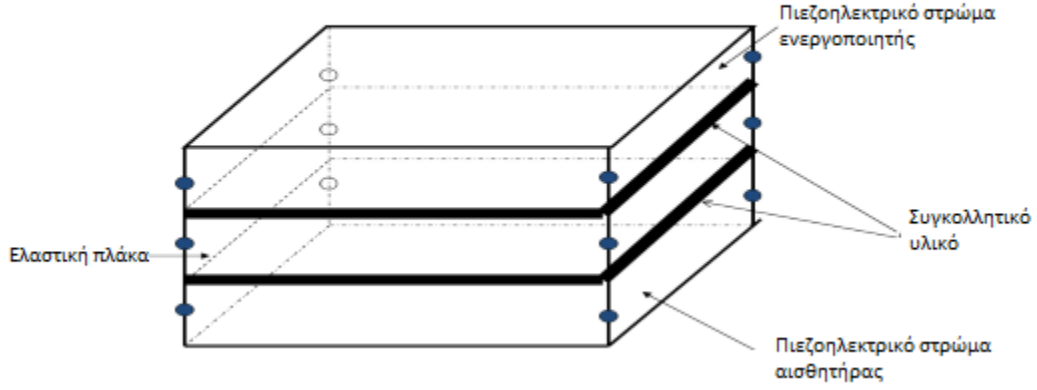
Πλέον, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (18)-(21) και (23)-(25), η εξίσωση (17) γίνεται,

$$\begin{aligned} & \int_0^T \left(\sum_{i=1}^3 \int_{V^{(i)}} \left[-\{\delta \bar{u}^{(i)}\}^T [I^{(i)}] \{\ddot{u}^{(i)}\} - \{\delta \bar{\varepsilon}^{(i)}\}^T [D^{(i)}] \{\bar{\varepsilon}^{(i)}\} + \{\delta \bar{\varepsilon}^{(i)}\}^T [\mathcal{E}^{(i)}] \{E^{(i)}\} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \{\delta E^{(i)}\}^T [\mathcal{E}^{(i)}]^T \{\bar{\varepsilon}^{(i)}\} + \{\delta E^{(i)}\}^T [\xi^{(i)}]^T \{E^{(i)}\} + \{\delta \bar{u}^{(i)}\}^T \{f_v^{(i)}\} \right] dV \right. \\ & \quad \left. + \sum_{i=1}^2 \int_{V^{(a_i)}} \left[-\{\delta u^{(a_i)}\}^T [I^{(a_i)}] \{\ddot{u}^{(a_i)}\} - \{\delta \varepsilon^{(a_i)}\}^T [\mathcal{Q}^{(a_i)}] \{\varepsilon^{(a_i)}\} \right] dV \right. \\ & \quad \left. + \sum_{i=1}^3 \left\{ \{\delta \bar{u}^{(i)}\}^T \{F_c^{(i)}\} + \sum_{i=1}^3 \int_{S^{(i)}} \left[\{\delta \bar{u}^{(i)}\}^T \{f_s^{(i)}\} - \{\delta E^{(i)}\}^T \{q^{(i)}\} \right] dS \right\} dt = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Η παραπάνω ολοκληρωτική διατύπωση χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του αντίστοιχου υπολογιστικού μοντέλου με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

2.3 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Σύμφωνα με την αρχή της εξίσωσης Hamilton όπως παρουσιάστηκε από την εξ. (26), αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, τριών στρωμάτων, κολλημένα, με συγκολλητικό υλικό, μεταξύ τους. Τα στοιχεία είναι ορθογώνια και έχουν τέσσερις κόμβους σε κάθε στρώμα. Έτσι, δημιουργείται μία πλάκα, τριών στρωμάτων, η οποία έχει $4 \times 3 = 12$ κόμβους, με πέντε βαθμούς ελευθερίας ο κάθε κόμβος όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



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

Η γενικευμένη μετατόπιση δίδεται με διάνυσμα $\{\bar{u}^{(i)}\}$ όπου

$$\{\bar{u}^{(i)}(x, y, t)\} = [H] \{d_e^{(i)}\} \quad (27)$$

όπου $[H]$ είναι πίνακας συναρτήσεων παρεμβολής και $\{d_e^{(i)}\}$ είναι το διάνυσμα κόμβων τα οποία δίδονται παρακάτω,

$$[H] = [[H_1][H_2][H_3][H_4]] \quad [H_j] = H_j I_5, \quad j = 1, 2, 3, 4$$

$$\{d_e^{(i)}\} = \left\{ \{d_1^{(i)}\}^T, \{d_2^{(i)}\}^T, \{d_3^{(i)}\}^T, \{d_4^{(i)}\}^T \right\}^T \quad \{d_j^{(i)}\} = \{u_j^{(i)}, v_j^{(i)}, w_j^{(i)}, \theta_{xy}^{(i)}, \theta_{yx}^{(i)}\}^T, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (28)$$

όπου $H_j, j = 1, 2, 3, 4$ είναι διγραμμικές ισοπαραμετρικές συναρτήσεις σχήματος, ενώ ο I_5 είναι μοναδιαίος πίνακας. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (24) στην (20), έχουμε

$$\{\bar{\varepsilon}^{(i)}(x, y, t)\} = [B] \{d_e^{(i)}\} \quad (29)$$

όπου

$$[B] = [[B_1][B_2][B_3][B_4]]$$

$$[B_j] = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_j}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial H_j}{\partial y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial H_j}{\partial y} & \frac{\partial H_j}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial y} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial H_j}{\partial y} & -\frac{\partial H_j}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial H_j}{\partial y} & 0 & -H_j \\ 0 & 0 & \frac{\partial H_j}{\partial x} & -H_j & 0 \end{bmatrix}$$

Για το ηλεκτρικό δυναμικό $\phi^{(i)}$ χρησιμοποιούμε την ίδια μορφή συνάρτησης όπως στους μηχανικούς βαθμούς ελευθερίας,

$$\phi^{(i)} = [H_E] \{ \phi_e^{(i)} \} \quad (30)$$

όπου

$$[H_E] = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4]$$

και $\{ \phi_e^{(i)} \}$ είναι ένα διάνυσμα με τα τέσσερα ηλεκτρικά δυναμικά για κάθε στοιχείο e . Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (30) στην (9) μας δίνει

$$\{ E^{(i)} \} = -[B_E^{(i)}] \{ \phi_e^{(i)} \} \quad (31)$$

όπου

$$[B_E^{(i)}] = [L_E^{(i)}(z)] [H_E]$$

Στην συνέχεια, αντικαθιστούμε τις εξισώσεις (27), (29) και (30) και χρησιμοποιώντας την αρχή της εξίσωσης Hamilton, δημιουργείται η ακόλουθη εξίσωση, για κάθε στοιχείο

$$\begin{aligned} & \left([M_e^{(1)}] + [M_{e(bb)}^{(a_1)}] \right) \{ \ddot{d}_e^{(1)} \} + [M_{e(bt)}^{(a_1)}] \{ \ddot{d}_e^{(2)} \} + \left([K_e^{(1)}] + [K_{e(bb)}^{(a_1)}] \right) \{ d_e^{(1)} \} \\ & + [K_{e(bt)}^{(a_1)}] \{ d_e^{(2)} \} + [K_{e(u\phi)}^{(1)}] \{ \phi_e^{(1)} \} = \{ F_{e(m)}^{(1)} \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[M_{e(tb)}^{(a_1)} \right] \left\{ \ddot{d}_e^{(1)} \right\} + \left(\left[M_e^{(2)} \right] + \left[M_{e(tt)}^{(a_1)} \right] + \left[M_{e(bb)}^{(a_2)} \right] \right) \left\{ \ddot{d}_e^{(2)} \right\} + \left[M_{e(bt)}^{(a_2)} \right] \left\{ \ddot{d}_e^{(3)} \right\} + \left[K_{e(tb)}^{(a_1)} \right] \left\{ d_e^{(1)} \right\} \\
& + \left(\left[K_e^{(2)} \right] + \left[K_{e(tt)}^{(a_1)} \right] + \left[K_{e(bb)}^{(a_2)} \right] \right) \left\{ d_e^{(2)} \right\} + \left[K_{e(bt)}^{(a_2)} \right] \left\{ d_e^{(3)} \right\} + \left[K_{e(u\phi)}^{(2)} \right] \left\{ \varphi_e^{(2)} \right\} = \left\{ F_{e(m)}^{(2)} \right\} \\
& \left[M_{e(tb)}^{(a_2)} \right] \left\{ \ddot{d}_e^{(2)} \right\} + \left(\left[M_e^{(3)} \right] + \left[M_{e(tt)}^{(a_2)} \right] \right) \left\{ \ddot{d}_e^{(3)} \right\} + \left[K_{e(tb)}^{(a_2)} \right] \left\{ d_e^{(2)} \right\} \\
& + \left(\left[K_e^{(3)} \right] + \left[K_{e(tt)}^{(a_2)} \right] \right) \left\{ d_e^{(3)} \right\} + \left[K_{e(u\phi)}^{(3)} \right] \left\{ \varphi_e^{(3)} \right\} = \left\{ F_{e(m)}^{(3)} \right\} \\
& \left[K_{e(u\phi)}^{(1)} \right]^T \left\{ d_e^{(1)} \right\} - \left[K_{e(\phi\phi)}^{(1)} \right] \left\{ \varphi_e^{(1)} \right\} - \left\{ F_{e(q)}^{(1)} \right\} = 0 \\
& \left[K_{e(u\phi)}^{(2)} \right]^T \left\{ d_e^{(2)} \right\} - \left[K_{e(\phi\phi)}^{(2)} \right] \left\{ \varphi_e^{(2)} \right\} - \left\{ F_{e(q)}^{(2)} \right\} = 0 \\
& \left[K_{e(u\phi)}^{(3)} \right]^T \left\{ d_e^{(3)} \right\} - \left[K_{e(\phi\phi)}^{(3)} \right] \left\{ \varphi_e^{(3)} \right\} - \left\{ F_{e(q)}^{(3)} \right\} = 0
\end{aligned} \tag{32}$$

όπου

$$\left[M_e^{(i)} \right] = \int_{V^{(i)}} [H]^T [I^{(i)}(z)] [H] dV \quad \left[K_e^{(i)} \right] = \int_{V^{(i)}} [B]^T [D^{(i)}(z)] [B] dV \tag{33}$$

είναι οι πίνακες της μάζας και της δυσκαμψίας σε ένα συγκεκριμένο πεπερασμένο στοιχείο, του κάθε πιεζοηλεκτρικού υλικού. Επίσης,

$$\begin{aligned}
\left[M_{e(bb)}^{(a_i)} \right] &= \int_{V^{(a_i)}} [H]^T [R^{(bottom)}]^{-T} [I^{(a_i)}] [R^{(bottom)}] [H] dV & \left[M_{e(bt)}^{(a_i)} \right] &= \int_{V^{(a_i)}} [H]^T [R^{(bottom)}]^{-T} [I^{(a_i)}] [R^{(top)}] [H] dV \\
\left[M_{e(tb)}^{(a_i)} \right] &= \int_{V^{(a_i)}} [H]^T [R^{(top)}]^{-T} [I^{(a_i)}] [R^{(bottom)}] [H] dV & \left[M_{e(tt)}^{(a_i)} \right] &= \int_{V^{(a_i)}} [H]^T [R^{(top)}]^{-T} [I^{(a_i)}] [R^{(top)}] [H] dV \\
\left[K_{e(bb)}^{(a_i)} \right] &= \int_{V^{(a_i)}} [H]^T [L_{a_i}^{(bottom)}]^{-T} [Q^{(a_i)}] [L_{a_i}^{(bottom)}] [H] dV & \left[K_{e(bt)}^{(a_i)} \right] &= \int_{V^{(a_i)}} [H]^T [L_{a_i}^{(bottom)}]^{-T} [Q^{(a_i)}] [L_{a_i}^{(top)}] [H] dV \\
\left[K_{e(tb)}^{(a_i)} \right] &= \int_{V^{(a_i)}} [H]^T [L_{a_i}^{(top)}]^{-T} [Q^{(a_i)}] [L_{a_i}^{(bottom)}] [H] dV & \left[K_{e(tt)}^{(a_i)} \right] &= \int_{V^{(a_i)}} [H]^T [L_{a_i}^{(top)}]^{-T} [Q^{(a_i)}] [L_{a_i}^{(top)}] [H] dV
\end{aligned} \tag{34}$$

είναι οι πίνακες της μάζας και της δυσκαμψίας για το στοιχείο του συγκολλητικού υλικού e αντίστοιχα.

Στην συνέχεια εμφανίζονται οι μετρήσεις τις μηχανικής εξωτερικής διέγερσης,

$$\left\{ F_{e(m)}^{(i)} \right\} = \int_{V^{(i)}} [H]^T \left\{ f_v^{(i)} \right\} dV + [H]^T \left\{ F_c^{(i)} \right\} + \int_{S^{(i)}} [H]^T \left\{ f_s^{(i)} \right\} dS \tag{35a}$$

όπως και οι μετρήσεις, εν συνεχεία, της ηλεκτρικής διέγερσης

$$\left\{ F_{e(q)}^{(i)} \right\} = \int_{S^{(i)}} [B_E^{(i)}]^T \left\{ q^{(i)} \right\} dS \tag{35b}$$

Τέλος δίδονται και οι πίνακες που σχετίζονται με την ηλεκτρική διέγερση,

$$\left[K_{e(u\phi)}^{(i)} \right] = \int_{V^{(i)}} [B]^T [\mathcal{E}^{(i)}(z)] [B_E^{(i)}] dV, \quad \left[K_{e(\phi\phi)}^{(i)} \right] = \int_{V^{(i)}} [B_E^{(i)}]^T [\xi^{(i)}(z)] [B_E^{(i)}] dV, \quad (35c)$$

Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι το κάτω στρώμα ενεργεί σαν αισθητήρας και το άνω στρώμα σαν διεγέρτης. Έχουμε, $\{\varphi_e^{(1)}\}$ όπου είναι η άγνωστη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται στον αισθητήρα και $\{\varphi_e^{(3)}\}$ η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στον διεγέρτη. Δεδομένου ότι το μεσαίο στρώμα της πλάκας έχει καθαρά ελαστική συμπεριφορά, έχουμε $\{\varphi_e^{(2)}\} = 0$ και $\{\delta\varphi_e^{(2)}\} = 0$. Επομένως, η πέμπτη εξίσωση από το (32) αυτομάτως μπορεί να αγνοηθεί. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι η $\{\varphi_e^{(3)}\}$ επιβάλλεται, η διακύμανση της $\{\delta\varphi_e^{(3)}\}$ εξαφανίζεται. Η έκτη εξίσωσης από το (32) αυτομάτως μπορεί να απορριφτεί. Η $\{\varphi_e^{(3)}\}$ από την τρίτη εξίσωση του (32) μπορεί να μεταφερθεί στην δεξιά πλευρά της εξίσωσης και το ηλεκτρικό δυναμικό να υπολογιστεί ως

$$\{F_{e(A)}^{(3)}\} = -[K_{e(u\phi)}^{(3)}] \{\varphi_e^{(3)}\} \quad (36)$$

Η τέταρτη σχέση της εξ. (29) μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό να εκφραστεί το δυναμικό στον αισθητήρα $\{\varphi_e^{(1)}\}$ σε σχέση με τους μηχανικούς βαθμούς ελευθερίας $\{d_e^{(1)}\}$. Να σημειωθεί ότι η ηλεκτρική φόρτιση στον αισθητήρα παραμένει σταθερή και θεωρούμε ότι είναι ίση με 0. Έτσι, $\{F_{e(q)}^{(1)}\} = 0$ και η έξοδος του αισθητήρα εκφράζεται ως

$$\{\varphi_e^{(1)}\} = [K_{e(\phi\phi)}^{(1)}]^{-1} [K_{e(u\phi)}^{(1)}]^T \{d_e^{(1)}\} \quad (37)$$

Οι τρεις πρώτες εξισώσεις από την (32) γίνονται

$$\begin{aligned} & \left([M_e^{(1)}] + [M_{e(bb)}^{(a_1)}] \right) \{\ddot{d}_e^{(1)}\} + [M_{e(bt)}^{(a_1)}] \{\ddot{d}_e^{(2)}\} + \left([K_e^{(1)}] + [K_{e(bb)}^{(a_1)}] + [K_{e(s)}^{(1)}] \right) \{d_e^{(1)}\} \\ & + [K_{e(bt)}^{(a_1)}] \{d_e^{(2)}\} = \{F_{e(m)}^{(1)}\} \\ & [M_{e(tb)}^{(a_1)}] \{\ddot{d}_e^{(1)}\} + \left([M_e^{(2)}] + [M_{e(tt)}^{(a_1)}] + [M_{e(bb)}^{(a_2)}] \right) \{\ddot{d}_e^{(2)}\} + [M_{e(bt)}^{(a_2)}] \{\ddot{d}_e^{(3)}\} + [K_{e(tb)}^{(a_1)}] \{d_e^{(1)}\} \\ & + \left([K_e^{(2)}] + [K_{e(tt)}^{(a_1)}] + [K_{e(bb)}^{(a_2)}] \right) \{d_e^{(2)}\} + [K_{e(bt)}^{(a_2)}] \{d_e^{(3)}\} = \{F_{e(m)}^{(2)}\} \\ & [M_{e(tb)}^{(a_2)}] \{\ddot{d}_e^{(2)}\} + \left([M_e^{(3)}] + [M_{e(tt)}^{(a_2)}] \right) \{\ddot{d}_e^{(3)}\} + [K_{e(tb)}^{(a_2)}] \{d_e^{(2)}\} \\ & + \left([K_e^{(3)}] + [K_{e(tt)}^{(a_2)}] \right) \{d_e^{(3)}\} = \{F_{e(m)}^{(3)}\} + \{F_{e(A)}^{(3)}\} \end{aligned} \quad (38)$$

Όπου

$$\left[K_{e(S)}^{(1)} \right] = \left[K_{e(u\phi)}^{(1)} \right] \left[K_{e(\phi\phi)}^{(1)} \right]^{-1} \left[K_{e(u\phi)}^{(1)} \right]^T \quad (39)$$

Οπότε η εξίσωση (38) μπορεί να γραφτεί και ως

$$\begin{aligned} \left[M_e \right] \left\{ \ddot{d}_e \right\} + \left[K_{e(uu)} \right] \left\{ d_e \right\} + \left[K_{e(u\phi)} \right] \left\{ \phi_e \right\} &= \left\{ F_{e(m)} \right\} \\ \left[K_{e(\phi u)} \right] \left\{ d_e \right\} + \left[K_{e(\phi\phi)} \right] \left\{ \phi_e \right\} &= \left\{ F_{e(q)} \right\} \end{aligned} \quad (40)$$

$$\text{Όπου } \left\{ d_e \right\} = \left\{ \left\{ d_e^{(1)} \right\}^T, \left\{ d_e^{(2)} \right\}^T, \left\{ d_e^{(3)} \right\}^T \right\}^T, \left\{ \phi_e \right\} = \left\{ \phi_e^{(1)}, \phi_e^{(2)}, \phi_e^{(3)} \right\}^T,$$

$$\left[M_e \right] = \begin{bmatrix} \left[M_e^{(1)} \right] + \left[M_{e(bb)}^{(a_1)} \right] & \left[M_{e(bt)}^{(a_1)} \right] & 0 \\ \left[M_{e(tb)}^{(a_1)} \right] & \left[M_e^{(2)} \right] + \left[M_{e(tt)}^{(a_1)} \right] + \left[M_{e(bb)}^{(a_2)} \right] & \left[M_{e(bt)}^{(a_2)} \right] \\ 0 & \left[M_{e(tb)}^{(a_2)} \right] & \left[M_e^{(3)} \right] + \left[M_{e(tt)}^{(a_2)} \right] \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\left[K_{e(uu)} \right] = \begin{bmatrix} \left[K_e^{(1)} \right] + \left[K_{e(bb)}^{(a_1)} \right] & \left[K_{e(bt)}^{(a_1)} \right] & 0 \\ \left[K_{e(tb)}^{(a_1)} \right] & \left[K_e^{(2)} \right] + \left[K_{e(tt)}^{(a_1)} \right] + \left[K_{e(bb)}^{(a_2)} \right] & \left[K_{e(bt)}^{(a_2)} \right] \\ 0 & \left[K_{e(tb)}^{(a_2)} \right] & \left[K_e^{(3)} \right] + \left[K_{e(tt)}^{(a_2)} \right] \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\left[K_{e(u\phi)} \right] = \begin{bmatrix} \left[K_{e(u\phi)}^{(1)} \right] & 0 & 0 \\ 0 & \left[K_{e(u\phi)}^{(2)} \right] & 0 \\ 0 & 0 & \left[K_{e(u\phi)}^{(3)} \right] \end{bmatrix}, \left[K_{e(\phi\phi)} \right] = \begin{bmatrix} \left[K_{e(\phi\phi)}^{(1)} \right] & 0 & 0 \\ 0 & \left[K_{e(\phi\phi)}^{(2)} \right] & 0 \\ 0 & 0 & \left[K_{e(\phi\phi)}^{(3)} \right] \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\left[K_{e(\phi u)} \right] = \left[K_{e(u\phi)} \right]^T, \left\{ F_{e(q)} \right\} = \left\{ \left\{ F_{e(q)}^{(1)} \right\}^T, \left\{ F_{e(q)}^{(2)} \right\}^T, \left\{ F_{e(q)}^{(3)} \right\}^T \right\}^T, \left\{ F_{e(m)} \right\} = \left\{ \left\{ F_{e(m)}^{(1)} \right\}^T, \left\{ F_{e(m)}^{(2)} \right\}^T, \left\{ F_{e(m)}^{(3)} \right\}^T \right\}^T \quad (44)$$

Ως εκ τούτου, οι μηχανικοί βαθμοί ελευθερίας, λόγω μηχανικών και / ή ηλεκτρικών φορτίων, μπορούν να υπολογισθούν αρχικά ενώ οι άγνωστοι ηλεκτρικοί βαθμοί ελευθερίας μπορούν να υπολογισθούν εκ των υστέρων χρησιμοποιώντας την εξ. (40). Η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί σε ταχύτερους υπολογισμούς δεδομένου ότι το συζευγμένο σύστημα (32) έχει ως αποτέλεσμα την αποσύζευξη δυναμική των εξισώσεων (40) και (37), για τις μηχανικές μετατοπίσεις και το δυναμικό του αισθητήρα, αντίστοιχα. Επίσης, αποτρέπει προβλήματα κακώς τοποθετημένα επιλύοντας άμεσα τις εξισώσεις (39). Ως άμεσο αποτέλεσμα, ο πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης και αισθητήρας μπορούν να θεωρηθούν για την ανάλυση συστημάτων κλειστού βρόχου.

Μετά από τη συνήθη διαδικασία συναρμολόγησης, μπορεί να ληφθεί η καθολική μητρική εξίσωση που ισχύει για ολόκληρη την ευφυή σύνθετη πλάκα

$$[M]\{\ddot{d}(t)\} + [C]\{\dot{d}(t)\} + ([K_m] + [K_s])\{d(t)\} = \{F_{(m)}\} + \{F_{(A)}\} \quad (45)$$

όπου $[C]$ είναι ο πίνακας απόσβεσης ο οποίος εισέρχεται εκ των υστέρων στο παραπάνω σύστημα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το επαγόμενο δυναμικό στον αισθητήρα που οφείλεται στο ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή αυτό του πρώτου στρώματος στο οποίο δεν επιβάλλεται ηλεκτρικό δυναμικό, οδηγεί σε αύξηση της δυσκαμψίας της δομής. Αυτό οφείλεται σε ένα ηλεκτρικό φορτίο το οποίο παράγεται στο πιεζοηλεκτρικό στρώμα από το επαγόμενο δυναμικό.

2.4 Μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης (Houbolt)

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα των εξισώσεων επιλέχθηκε η μέθοδος ολοκλήρωσης Houbolt [2],[14]. Η μέθοδος αυτή έχει δύο σταθερές β και γ , γνωστές και ως σταθερές Houbolt. Για προβλήματα σταθερής επιτάχυνσης, οι σταθερές αυτές λαμβάνουν τιμές 0.25 και 0.50 αντίστοιχα.

Ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης (t) είναι 3 δευτερόλεπτα. Το βήμα της ολοκλήρωσης (Δt) επιλέχθηκε στο 0,001 δευτερόλεπτα, δημιουργώντας ένα βρόχο με 3.000 επαναλήψεις (βήματα χρονικής ολοκλήρωσης).

Οι σταθερές ολοκλήρωσης δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$c_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}, c_2 = \frac{1}{\beta\Delta t}, c_1 = \frac{1}{2\beta}, c_1 = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}, c_1 = \frac{\gamma}{\beta}, c_1 = \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right),$$

Σε κάθε βήμα της αριθμητικής ολοκλήρωσης (t), ο ασαφής ελεγκτής παρέχει μία δύναμη ελέγχου (z), σύμφωνα με τις δοθείσες τιμές των εισόδων, δηλαδή της μετατόπισης (u) και της ταχύτητας (u').

Η δύναμη ελέγχου σε συνδυασμό με τις εξωτερικές φορτίσεις παρέχουν τις τιμές για την μετατόπιση και την ταχύτητα του επόμενου βήματος ($t + \Delta t$).

Ο αλγόριθμος, συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Αρχικοποίηση μεταβλητών

$x, \dot{x}, \ddot{x}, F, K, C, M, \beta, \gamma, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$

Βήμα 2: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας F^*

$$K^* = K + c_1 M + c_4 C$$

Αντιστροφή του K^* : $F^* = (K^*)^T$

Έναρξη του βρόχου for από το t_0 έως t_f

Βήμα 3: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας P^*

Υπολογισμός μεταβολής φορτίσεων: $dF_m = F_m(t+1) - F_m(t)$

Υπολογισμός μεταβολής δύναμης ελέγχου u

Προσθήκη στην ποσότητα $dF_m = dF_m + u$

Υπολογισμός της ποσότητας P^* με χρήση των μητρώων μάζας (M) και απόσβεσης (C) του συστήματος:

$$P^* = dF_m + M(c_2 \dot{x}(t) + c_3 \ddot{x}(t)) + C(c_5 \dot{x}(t) + c_6 \ddot{x}(t))$$

Βήμα 4: Υπολογισμός του βήματος απόκρισης dx

$$dx = F^* P^*$$

Βήμα 5: Επίλυση του επόμενου χρονικού Βήματος

Υπολογισμός επιτάχυνσης: $\ddot{x}(t+1) = \ddot{x}(t) + c_1 dx - c_2 \dot{x}(t) - c_3 \ddot{x}(t)$

Υπολογισμός ταχύτητας: $\dot{x}(t+1) = \dot{x}(t) + c_4 dx - c_5 \dot{x}(t) - c_6 \ddot{x}(t)$

Υπολογισμός μετατόπισης: $x(t+1) = x(t) + dx$

Τερματισμός του βρόχου for

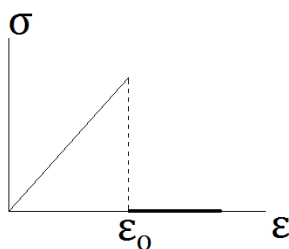
Τέλος

3. ΘΕΩΡΙΑ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ

Στο επίκεντρο της παρούσας εργασίας βρίσκεται η εισαγωγή μη γραμμικού νόμου αποκόλλησης, σε προϋπάρχον μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων σύνθετης πιεζοηλεκτρικής πλάκας. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα η πλάκα αποτελείται από τρία επίπεδα: το επάνω και το κάτω επίπεδο προσομοιώνουν την συμπεριφορά «έξυπνου» πιεζοηλεκτρικού υλικού, ενώ το μεσαίο αποτυπώνει τη συμπεριφορά ελαστικού υλικού. Μεταξύ των δύο διεπιφανειών των ανωτέρω στρώσεων, τοποθετούνται δύο νέες στρώσεις συγκολλητικού υλικού. Για τις μη συγκολλητικές στρώσεις, λαμβάνεται υπ' όψιν η θεωρία πλακών Mindlin. Τέλος, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, επί του οποίου εισάγεται ο νόμος μη γραμμικής αποκόλλησης, περιλαμβάνει τη δυνατότητα επιβολής τόσο μηχανικού όσο και ηλεκτρικού φορτίου, καθώς και την δυνατότητα προσομοίωσης στατικού και δυναμικού προβλήματος.

3.1 Περιγραφή του μοντέλου αποκόλλησης

Για την προσομοίωση του φαινομένου της αποκόλλησης, εφαρμόζεται στις δύο διεπιφάνειες των φύλλων της πλάκας, μη γραμμικός νόμος τάσης-τροπής:



Εικόνα 4: Διάγραμμα Τάσης-Τροπής με βάση τον κανονισμό αποκόλλησης

Ο νόμος αυτός οδηγεί στην κατάλληλη τροποποίηση των προϋπαρχόντων μητρώων ακαμψίας της κατασκευής, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά πριν και μετά την αποκόλληση.[20],[21]

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

$$\varepsilon_{zz}^{(a_i)} = \frac{w^{(i+1)} - w^{(i)}}{h^{(a_i)}} \quad (46)$$

όπου w η κατακόρυφη μετατόπιση των στρωμάτων, η συμπεριφορά των οποίων σε αποκόλληση διερευνάται, και h^a το πάχος του συγκολλητικού υλικού. Εάν η τροπή αυτή είναι μικρότερη μιας προκαθορισμένης από τον μελετητή 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.

Για την υλοποίηση της μη γραμμικής αποκόλλησης, εφαρμόζεται στον κώδικα η επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson. Το σχήμα που ακολουθείται, 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 ε₀

- 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. Διακρίνονται συνεπώς οι εξής τέσσερις περιπτώσεις:

α) Καμία αποκόλληση.

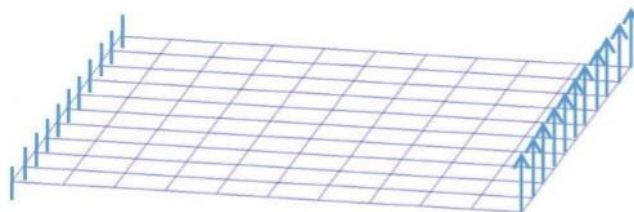
β) Αποκόλληση μεταξύ κατώτατου-μεσαίου στρώματος πλάκας.

γ) Αποκόλληση μεταξύ μεσαίου-ανώτατου στρώματος πλάκας.

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

3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

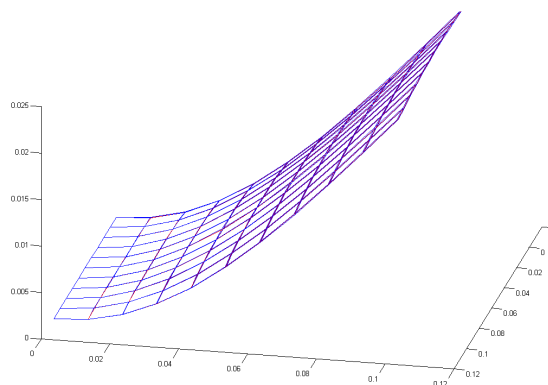
Το παραπάνω σχήμα αποκόλλησης εφαρμόστηκε σε σύνθετη πλάκα διαστάσεων 100x100mm, πακτωμένη στην αριστερή πλευρά. Χρησιμοποιήθηκε δίκτυο 10x10 πεπερασμένων στοιχείων. Κάθε στοιχείο αποτελείται από 12 κόμβους: 4 κόμβους του κατώτατου στρώματος, 4 κόμβους του μεσαίου και 4 κόμβους του ανώτατου στρώματος υλικού. Κάθε κόμβος έχει 5 βαθμούς ελευθερίας (3 μεταφορικούς και 2 στροφικούς). Βάσει των παραπάνω στοιχείων, ο φορέας έχει $11 \times 11 \times 3 = 363$ κόμβους και $363 \times 5 = 1815$ βαθμούς ελευθερίας.



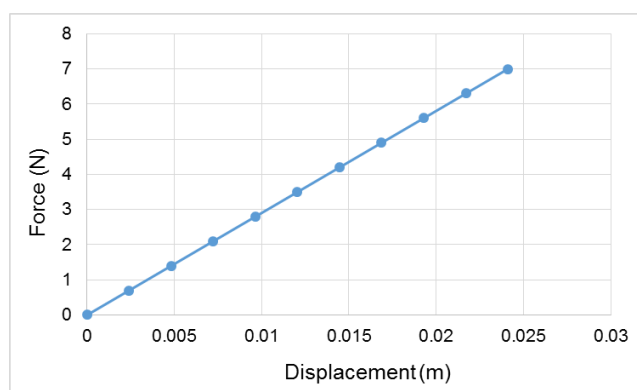
Εικόνα 5: Mesh, συνοριακές συνθήκες και φορτίσεις της κατασκευής

Στον φορέα ασκείται μηχανικό φορτίο στην δεξιά πλευρά, στην επάνω στρώση πιεζοηλεκτρικού. Αρχικά παρουσιάζονται αποτελέσματα με εφαρμογή μηχανικού φορτίου δύναμης. Στην συνέχεια και για την καλύτερη παρακολούθηση του φαινομένου της αποκόλλησης εφαρμόζεται επιβεβλημένη μετακίνηση.[22]

Στην πρώτη επίλυση εφαρμόζεται σχετικά μικρό μηχανικό φορτίο δύναμης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, δεν συμβαίνει αποκόλληση και η συμπεριφορά του υλικού είναι γραμμική, όπως φαίνεται από το σχήμα της μετατόπισης του φορέα και από το σχετικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης:



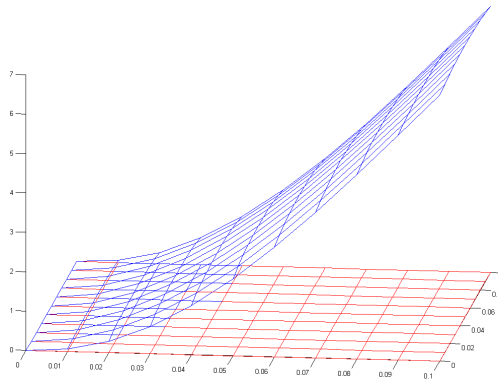
Εικόνα 6: Μετατόπιση όταν δεν έχει εμφανιστεί αποκόλληση



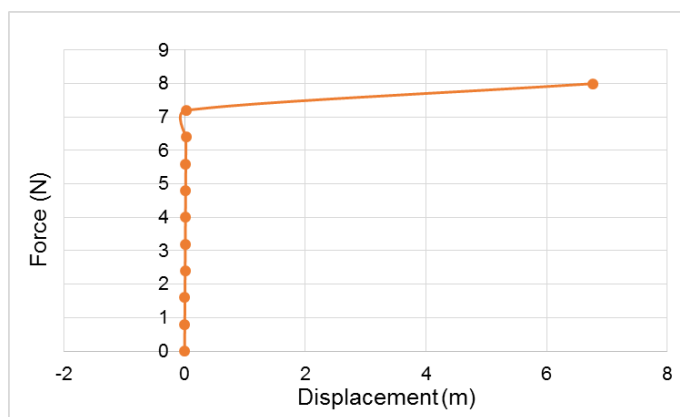
Εικόνα 7: Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης όταν δεν έχει εμφανιστεί αποκόλληση

Όταν το μηχανικό φορτίο δύναμης αυξηθεί, η συμπεριφορά του φορέα τροποποιείται, με κύρια χαρακτηριστικά την αποκόλληση και την μη γραμμική συμπεριφορά. Σύμφωνα με το σχήμα μετατόπισης του φορέα που ακολουθεί, αποκόλληση συμβαίνει ταυτόχρονα σε ολόκληρη την

επάνω στρώση υλικού, η οποία στο τέλος της επίλυσης λειτουργεί εντελώς ανεξάρτητα από τις υποκείμενες στρώσεις. Εξαιτίας αυτού, εμφανίζονται μεγάλες μετατοπίσεις σε αυτήν την στρώση. Η αλλαγή της κλίσης του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης που παρουσιάζεται παρακάτω, το οποίο είναι πλέον μη γραμμικό, εκφράζει ακριβώς το φαινόμενο της αποκόλλησης, με παράλληλη μείωση της ακαμψίας του φορέα.



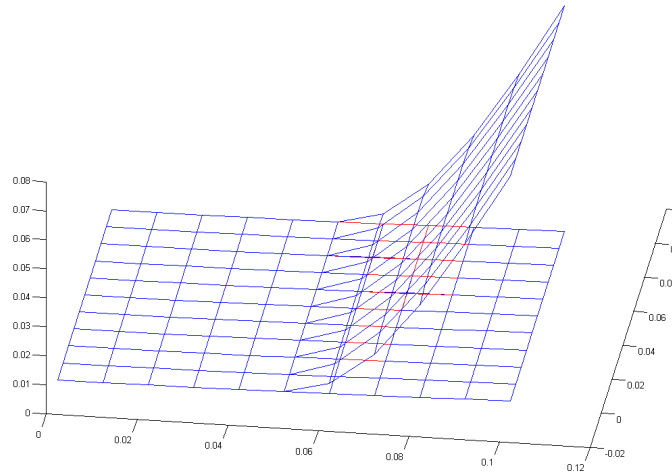
Εικόνα 8: Μετατόπισης της κατασκευής όταν έχει εμφανιστεί ολική αποκόλληση του άνω πιεζοηλεκτρικού στρώματος



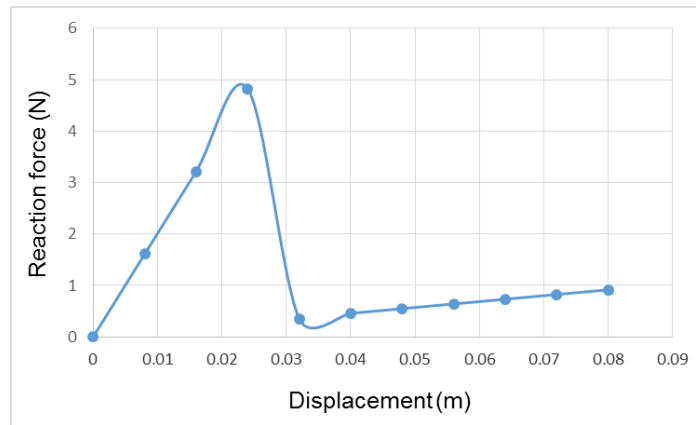
Εικόνα 9: Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για αποκόλληση έπειτα από επιβολή εξωτερικού φορτίου

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, η αποκόλληση στο τελευταίο παράδειγμα συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλα τα στοιχεία της διεπιφάνειας. Η σταδιακή εμφάνιση αποκόλλησης σε ορισμένα μόνο τμήματα της διεπιφάνειας, δεν είναι δυνατόν να απεικονισθεί με εφαρμογή μηχανικού φορτίου δύναμης, εξαιτίας αριθμητικής αστάθειας που εισάγει η επαναληπτική διαδικασία Newton-Raphson στο σημείο αστοχίας, όταν η διαδικασία γίνεται με έλεγχο φορτίου δύναμης. Αυτό σημαίνει ότι τυχόν φθίνων κλάδος του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης, δε μπορεί αριθμητικά να ακολουθηθεί όταν η επιβαλλόμενη φόρτιση είναι φορτίο δύναμης.[23]

Για τους παραπάνω λόγους, ο κώδικας τροποποιήθηκε έτσι ώστε το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο να είναι φορτίο μετατόπισης. Όπως φαίνεται από τα σχήματα που ακολουθούν, είναι πλέον εφικτή η απεικόνιση σταδιακής αποκόλλησης. Παράλληλα, το διάγραμμα φορτίου (αντίδραση)-μετατόπισης εμφανίζει φθίνοντα κλάδο, με μορφή αντίστοιχη με αυτήν του διαγράμματος τάσης-τροπής.

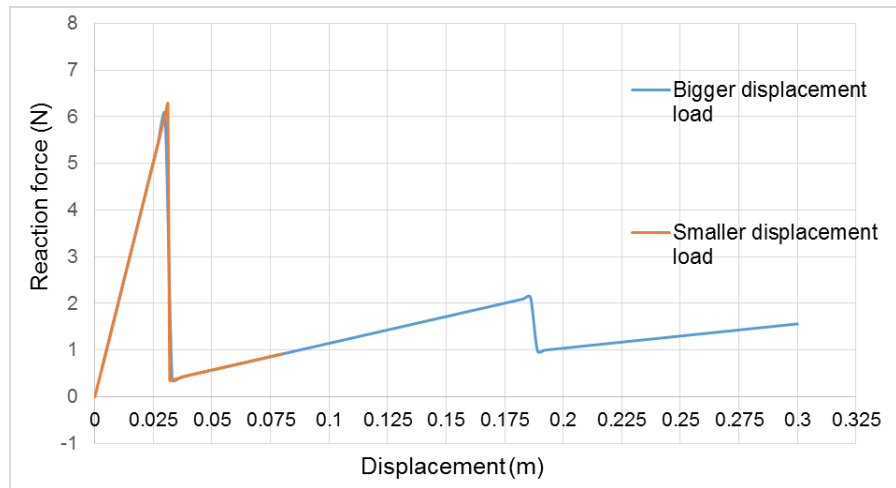


Εικόνα 10: Μετατόπιση της κατασκευής όταν έχει αποκολληθεί το μισό άνω πιεζοηλεκτρικό στρώμα



Εικόνα 11: Διάγραμμα Δύναμης(αντίδραση)-Μετατόπισης όταν επιβάλλεται μία αρχική μετατόπιση

Η παρούσα μελέτη ολοκληρώνεται με τα διαγράμματα φορτίου (αντίδραση)-μετατόπισης, για την περίπτωση που στον φορέα εφαρμόζεται μεγαλύτερο φορτίο μετατόπισης. Για την καλύτερη απεικόνιση της συμπεριφοράς, έχουν επίσης αυξηθεί οι επαναλήψεις της μεθόδου Newton-Raphson, με αποτέλεσμα την μείωση του επαυξητικού φορτίου μετατόπισης. Το παρακάτω διάγραμμα (μπλε γραμμή) δείχνει ότι η αποκόλληση συμβαίνει σε δύο επίπεδα φόρτισης: αρχικά εμφανίζεται αποκόλληση στα μισά περίπου στοιχεία της εξεταζόμενης διεπιφάνειας, όταν η επιβαλλόμενη μετατόπιση είναι περίπου 30mm, ενώ η αποκόλληση επεκτείνεται στο σύνολο σχεδόν των στοιχείων, σε μετατόπιση περίπου ίση με 186mm. Η πορτοκαλί γραμμή δείχνει το αποτέλεσμα όταν η επιβαλλόμενη μετατόπιση είναι μικρότερη, οπότε αποκόλληση συμβαίνει μόνο σε ένα επίπεδο φόρτισης.[21],[24],[25]



Εικόνα 12: Διάγραμμα Δύναμης(αντίδρασης)-Μετατόπισης για διαφορετικές φορτίσεις

4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

Ο όρος ασαφής εισήχθη το 1973, από το καθηγητή L. Zadeh, ο οποίος πρότεινε την γλωσσική αναπαράσταση των μεταβλητών και τη δημιουργία ασαφών συνόλων που διέπεται από ένα σύνολο κανόνων συμπερασμού του γνωστού αν-τότε (if-then) μορφή.

Οι βασικές αρχές της ασαφούς λογικής μπορούν να βρεθούν στα [26] και [27]. Η αυξημένη πολυπλοκότητα στις σύγχρονες βιομηχανικές διαδικασίες και οι αυξανόμενες απαιτήσεις, επιβάλλει τη χρήση της ασαφούς λογικής για την δημιουργία ελεγκτών οι οποίοι να μπορούν να ανταποκριθούν σε συνθήκες τις οποίες ένας συμβατικός ελεγκτής δεν μπορεί να ανταποκριθεί. Η εφαρμογή της ασαφούς λογικής στα συστήματα ελέγχου είναι μια γενική μεθοδολογία για τη κατασκευή ελεγκτή ασαφούς λογικής και μπορεί να μελετηθεί στο [28].

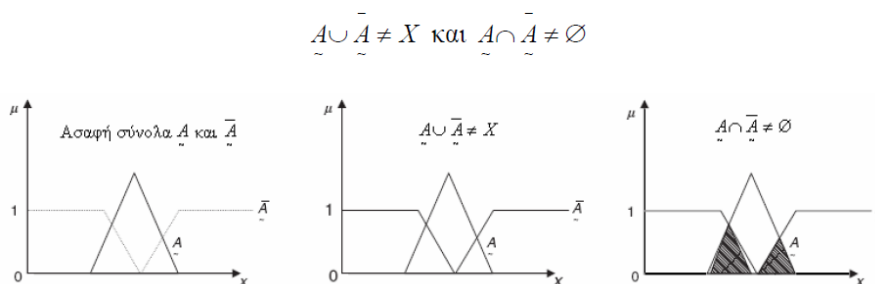
Το βασικό χαρακτηριστικό της ασαφούς λογικής και των ελεγκτών που στηρίζονται σε αυτή είναι ότι βασίζεται εξ' ολοκλήρου στον ανθρώπινο παράγοντα και στην εμπειρία που μπορεί να διατυπωθεί με τη βοήθεια γλωσσικών κανόνων, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

4.1 Ασαφή σύνολα

Κάθε στοιχείο του χώρου των ασαφών συνόλων, μπορεί να λάβει μια τιμή ανάμεσα σε ένα εύρος τιμών και να ανήκει στο υπό εξέταση σύνολο, με αυτή την τιμή η οποία δείχνει το ποσοστό συμμετοχής του στοιχείου στο χώρο των λύσεων. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η συμμετοχή του στοιχείου στο σύνολο. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται **συνάρτηση συμμετοχής** ενώ το σύνολο ονομάζεται **ασαφές σύνολο**.

Συνεπώς, για να ανήκει ένα στοιχείο σε ένα ασαφές σύνολο δεν απαιτείται πλήρης συμμετοχή όπως στα κλασικά σύνολα. Το δίπολο 0 ή 1 των κλασσικών συνόλων αντικαθίσταται από ένα διάστημα τιμών [0,1]. Επιπρόσθετα κάθε στοιχείο του χώρου διακριτών τιμών δύναται να συμμετέχει ταυτόχρονα, σε περισσότερα του ενός, ασαφή σύνολα με διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής.

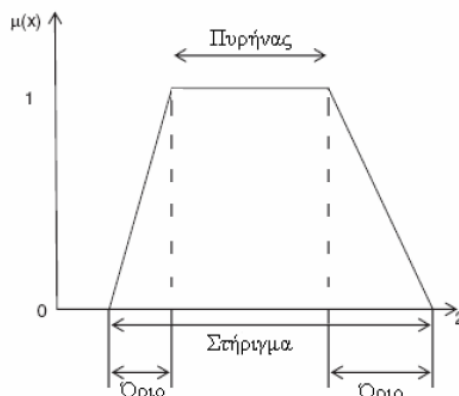
Στα ασαφή σύνολα ισχύουν όλοι οι τελεστές (ένωση, τομή, συμπλήρωμα) και οι όλες οι ιδιότητες (μεταβατική, προσεταιριστική, αντιμεταθετική) των κλασσικών συνόλων. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η **αρχή του αποκλειόμενου μέσου**. Λόγω της επικάλυψης που μπορεί να υπάρξει στα ασαφή σύνολα, η αρχή αυτή διαφοροποιείται από αυτή των κλασσικών συνόλων ως εξής:



Εικόνα 13: Αρχή αποκλειόμενου μέσου

4.2 Συναρτήσεις συμμετοχής

Ο βαθμός ασάφειας ενός ασαφούς συνόλου ορίζεται από τις συναρτήσεις συμμετοχής του. Η αναπαράσταση των συναρτήσεων αυτών μπορεί να γίνει είτε αριθμητικά, είτε γραφικά. Οι γραφικές αναπαραστάσεις περιλαμβάνουν διάφορες σχηματικές μορφές, κάθε μια με τους δικούς της περιορισμούς. Οι συναρτήσεις συμμετοχής μπορεί να είναι συμμετρικές ή ασύμμετρες. Τα βασικά χαρακτηριστικά των συναρτήσεων συμμετοχής είναι ο πυρήνας, το στήριγμα και τα όρια όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 14: Χαρακτηριστικά συναρτήσεων συμμετοχής

Οι πιο δημοφιλείς μορφές συναρτήσεων συμμετοχής είναι οι παρακάτω

- a) Τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής
- b) Τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής
- c) Κωδωνοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής
- d) Γκαουσιανές (Gauss) συναρτήσεις συμμετοχής
- e) Σιγμοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής

4.3 Ασαφοποίηση

Η μέθοδος της *ασαφοποίησης* είναι η διαδικασία μετατροπής μιας ακριβούς αριθμητικής ποσότητας σε ασαφή, η οποία αναπαρίσταται με τις συναρτήσεις συμμετοχής. Η διαδικασία βασίζεται στην αναγνώριση της αβεβαιότητας, η οποία υπάρχει στις ακριβείς ποσότητες. Σε πρακτικές εφαρμογές είναι η πιθανή ύπαρξη σφαλμάτων, με συνακόλουθη μείωση της ακρίβειας των δεδομένων. Αυτή η μείωση της ακρίβειας μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί με τις συναρτήσεις συμμετοχής.

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, όπου οι ασαφείς εξόδοι

δεν είναι χρήσιμες για περαιτέρω επεξεργασία. Για την αποασαφοποίηση των ασαφών συναρτήσεων εξόδου χρησιμοποιούνται οι παρακάτω επτά μέθοδοι:

1. Αρχή μεγίστου (Max – membership principle)
2. Κεντροειδής μέθοδος (Centroid method)
3. Μέθοδος σταθμισμένου μέσου (Weighted average method)
4. Μέθοδος μέσου – μεγίστου (Mean of Maximum)
5. Κέντρο βάρους αθροισμάτων (Centre of sums)
6. Κέντρο βάρους μέγιστης επιφάνειας (Centre of largest area)
7. Πρώτη ή τελευταία τιμή μεγίστου (First or last of maxima)

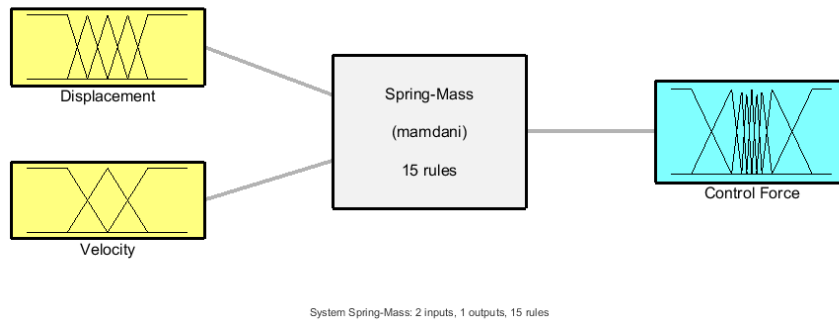
4.5 Κανόνες ασαφούς συστήματος

Ένα ασαφές σύστημα συνήθως περιγράφεται με -περισσότερους του ενός- κανόνες. Η διαδικασία σύνοψης των κανόνων για τη λήψη ενός συνολικού συμπεράσματος ονομάζεται *συνάθροιση* (aggregation). 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.

4.7 Ασαφής έλεγχος μηχανικού μοντέλου

Η πρώτη περίπτωση η οποία εξετάστηκε ήταν ο σχεδιασμός του ελεγκτή ασαφούς λογικής για το μηχανικό μοντέλο [15]. 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 *Mamdani* και υλοποιήθηκε με χρήση του πακέτου *Fuzzy Toolbox* του Matlab και βασίζεται στην εργασία [34].

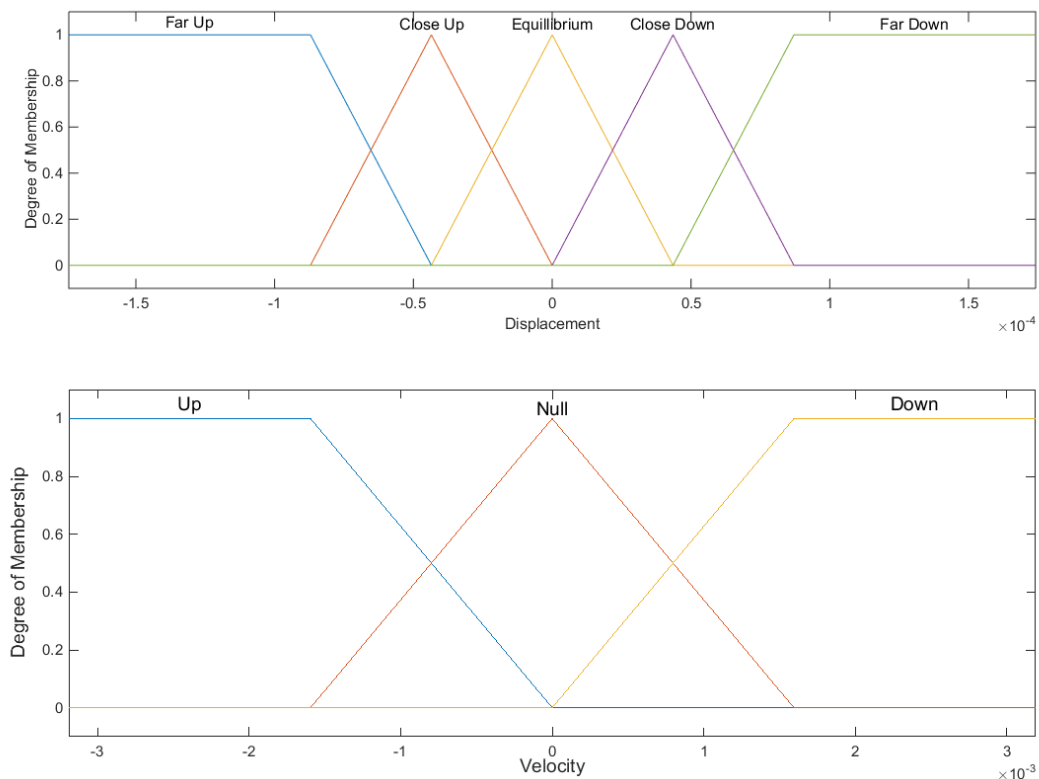
Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, δέχεται δύο εισόδους και παράγει μία έξοδο.

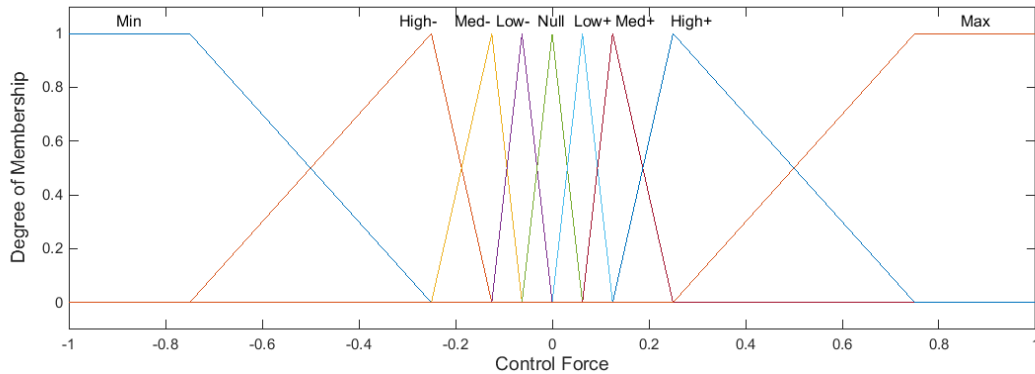


Εικόνα 15: Ελεγκτής Mamdani για μηχανικό μοντέλο

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

Οι συναρτήσεις συμμετοχής, οι οποίες έχουν επιλεγεί για την περιγραφή των εισόδων και της εξόδου του ελεγκτή, είναι τριγωνικής μορφής -στις ενδιάμεσες τιμές- και τραπεζοειδούς μορφής -στις ακραίες τιμές- των μεταβλητών (Far left, Far Right, Left, Right, Min και Max), όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.





Εικόνα 16: Συναρτήσεις συμμετοχής των 2 εισόδων και της 1 εξόδου στο μηχανικό μοντέλο

Το σύστημα του ελεγκτή περιγράφεται από 15 κανόνες (fuzzy rules) που συντάχθηκαν με βάση τη λογική. Τα ενδεχόμενα συνδυάζονται με χρήση του λογικού τελεστή ΚΑΙ. Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά τρεις από τους κανόνες:

- If (Displacement is Far-down) and (Velocity is Downwards) then (Control-Force is Max)
- If (Displacement is Equilibrium) and (Velocity is Downwards) then (Control-Force is Low+)
- If (Displacement is Close-up) and (Velocity is Downwards) then (Control-Force is Null)

Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται μία σύνοψη του συνόλου των 15 κανόνων.

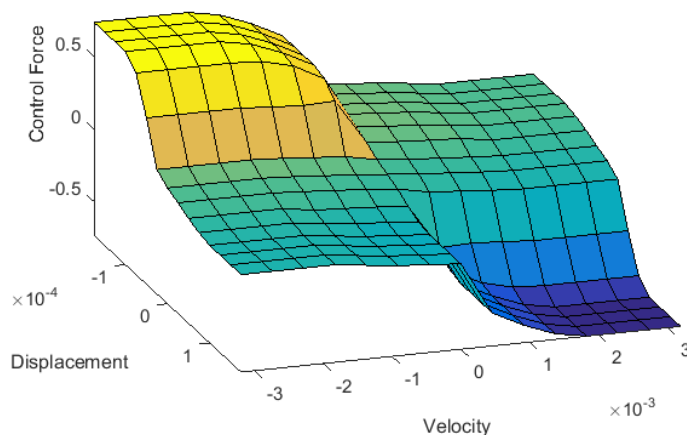
Πίνακας 1: Σύνοψη του συνόλου των 15 κανόνων

Displacement	Far Up	Close Up	Equilibrium	Close Down	Far Down
	Velocity				
Up	Max	Med+	Low+	Null	Med-
Null	Med+	Low+	Null	Low-	High-
Down	High+	Null	Low-	Med-	Min

Ως μέθοδος αποσαφοποίησης (implication method), έπειτα από μία σειρά διερευνήσεων [29] επιλέχθηκε η μέθοδος centroid.

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 στο Σχήμα 10. Πρέπει να σημειωθεί, ότι με μικρές

διαφοροποιήσεις στις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος, παράγεται μια εντελώς διαφορετική επιφάνεια.

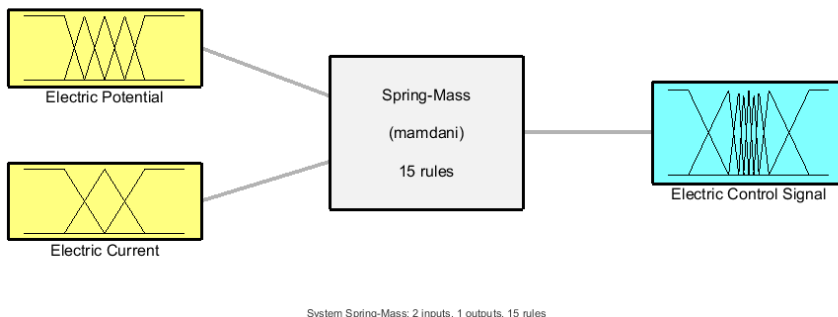


Εικόνα 17: Επιφάνεια ασαφούς συστήματος στο μηχανικό μοντέλο

4.8 Ασαφής έλεγχος ηλεκτρομηχανικού μοντέλου

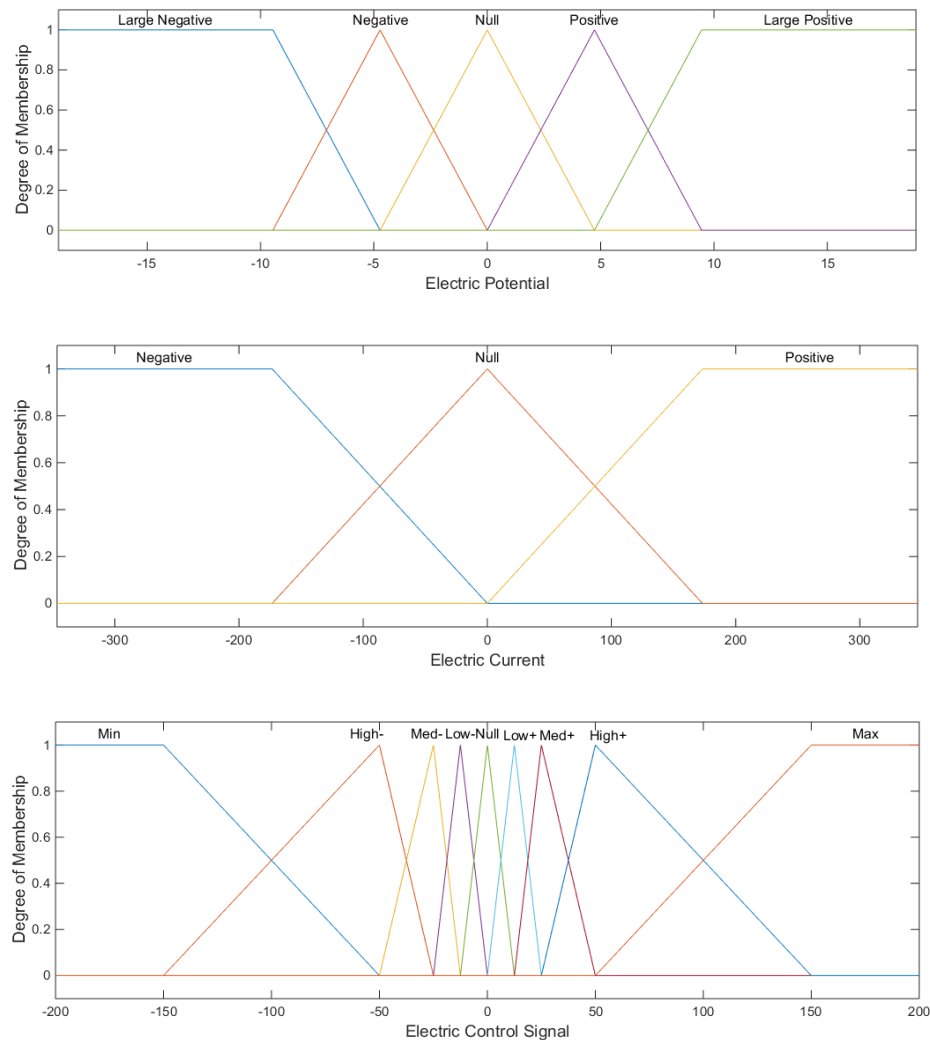
Η δεύτερη περίπτωση η οποία εξετάστηκε είναι η σχεδίαση ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής, πλέον για το ηλεκτρομηχανικό μοντέλο, το οποίο επίσης παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η λογική της δημιουργίας του συγκεκριμένου ελεγκτή είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε και στον ελεγκτή για το μηχανικό μοντέλο.

Όπως και στο μηχανικό μοντέλο, έχουμε έναν ελεγκτή τύπου Mamdani, με δύο εισόδους και μία έξοδο όπως παρουσιάζεται στην εικόνα (). Σαν εισοδοί πλέον χρησιμοποιούνται το ηλεκτρικό δυναμικό (electric potential) και η παράγωγος του η οποία είναι η το ηλεκτρικό ρεύμα (electric current). Ως έξοδος του συστήματος είναι το ηλεκτρικό σήμα ελέγχου, το οποίο μεταφράζεται σε ηλεκτρικό δυναμικό. Στη συνέχεια αυτό μεταφέρεται στους πρώτους ακραίους κόμβους οι οποίοι δεν έχουν υποστεί αποκόλληση του διεγέρτη, η οποία λειτουργεί καμπτικά για την κατασκευή.



Εικόνα 18: Ελεγκτής Mamdani για το ηλεκτρομηχανικό μοντέλο

Οι συναρτήσεις συμμετοχής, οι οποίες έχουν επιλεγεί για την περιγραφή των εισόδων και της εξόδου του ελεγκτή, εξακολουθούν να είναι τριγωνικής μορφής -στις ενδιάμεσες τιμές- και τραπεζοειδούς μορφής -στις ακραίες τιμές- των μεταβλητών της εισόδου (Large Negative, Negative, Null Positive και Large Positive) και της εξόδου (Far left, Far Right, Left, Right, Min και Max), όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



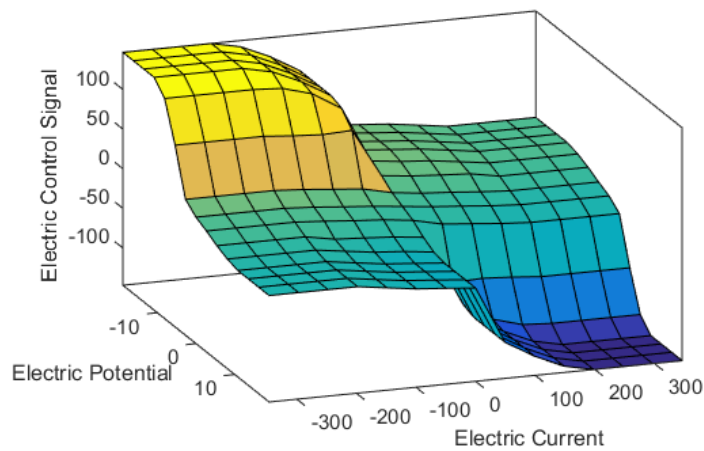
Εικόνα 19: Συναρτήσεις συμμετοχής των 2 εισόδων και της 1 εξόδου στο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο

Το σύστημα του ελεγκτή εξακολουθεί να περιγράφεται από 15 κανόνες (fuzzy rules), των οποίων η σύνταξη φαίνεται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Σύνοψη του συνόλου των 15 κανόνων

Electric Potential Electric Current	Large Positive	Positive	Null	Negative	Large Negative
Positive	Max	Med+	Low+	Null	Low-
Null	Med+	Low+	Null	Low-	Med-
Negative	High+	Null	Low+	Med-	Min

Τέλος, και σε αυτή τη περίπτωση επιλέχθηκε ως μέθοδος αποασαφοποίησης η centroid. Παρακάτω παρουσιάζεται η επιφάνεια η οποία αποτυπώνει την λογική αποτύπωση των παραπάνω κανόνων η οποία όπως παρουσιάζει και η εικόνα, η επιφάνεια επιτυγχάνει μία ομαλή φθίνουσα πορεία.



Εικόνα 20: Επιφάνεια ασαφούς συστήματος στο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο

5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η βελτιστοποίηση του παραπάνω συστήματος, τόσο σε επίπεδο εισόδου, όσο και σε επίπεδο εξόδου, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Ο αρχικός κώδικας είχε υλοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C, ενώ στην παρούσα εργασία μεταφέρθηκε στη Matlab, ώστε να είναι πιο εύκολη η συνεργασία του μοντέλου του συστήματος με το γενετικό αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) αλγόριθμοι, ένας για την είσοδο και ένας για την έξοδο. Η βάση του κάθε αλγορίθμου είναι ίδια, η διαφοροποίηση είναι στις παραμέτρους και στους περιορισμούς των μεταβλητών. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι συναρτήσεις ενός γενετικού αλγορίθμου, σύμφωνα με το θεωρητικό πλαίσιο καθώς και ο τρόπος εισαγωγής περιορισμών.

5.1 Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms – EA) είναι μια κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που βασίζονται τη λειτουργία τους στη μίμηση των διαδικασιών της φυσικής εξέλιξης. Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι εμφανίζονται σε τρεις διαφορετικές μορφές, οι οποίες ακολουθούν διακριτή πορεία, αλλά με ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους: τους **Γενετικούς Αλγορίθμους** (Genetic Algorithms – GA), τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming – EP) και τις Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies –ES).

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ) χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στην μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Η βασική ιδέα της φυσικής επιλογής, που κρύβεται πίσω από τους Εξελικτικούς Αλγορίθμους περιγράφεται από τον Michalewicz με το ακόλουθο παράδειγμα που αναφέρεται ειδικότερα στους Γενετικούς Αλγορίθμους [30]:

*«Ας υποθέσουμε ότι μελετάμε έναν πληθυσμό από κουνέλια. Κάποια από αυτά είναι γρηγορότερα και εξυπνότερα από τα υπόλοιπα. Αυτά τα ταχύτερα και ευφύστερα κουνέλια είναι πολύ πιθανό να επιζήσουν σε μια επιδρομή από αλεπούδες και να μπορέσουν έτσι να συνεχίσουν το έργο που γνωρίζουν καλύτερα από κάθε άλλο: να κάνουν κουνέλια. Αντίθετα, τα πιο αργά και λιγότερο έξυπνα κουνέλια κατά πάσα πιθανότητα θα αφανιστούν ύστερα από μια τέτοια επιδρομή, χωρίς βέβαια να αποκλείσουμε και το ενδεχόμενο ότι ορισμένα από αυτά θα επιζήσουν καθαρά επειδή στάθηκαν τυχερά. Ο πληθυσμός λοιπόν που θα επιζήσει της επιδρομής θα αρχίσει κάποτε να αναπαράγεται. Το γενετικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για το νέο πληθυσμό κουνελιών θα προέρχεται από τη μείξη κάποιων αργών με κάποια γρήγορα κουνέλια, κάποιων γρήγορων με γρήγορα, κάποιων έξυπνων με κάποια χαζά κ.ο.κ. Και στην κορυφή αυτών, η φύση κατά καιρούς παράγει και κάποιο κουνέλι-φαινόμενο (γένους *lepus*) μεταλλάσσοντας κατά κάποιο τρόπο το ήδη υπάρχον γενετικό υλικό. Είναι προφανές ότι οι απόγονοι θα είναι κατά μέσο όρο γρηγορότερα και εξυπνότερα κουνέλια από τα προηγούμενα.*

Φυσικά το ίδιο συμβαίνει και για τις αλεπούδες, γιατί διαφορετικά τα κουνέλια θα γίνονταν κάποια στιγμή εξυπνότερα από τις αλεπούδες με αποτέλεσμα να χαλάσει ο βιολογικός κύκλος. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ακολουθούν βήμα προς βήμα μια διαδικασία όμοια με της παραπάνω ιστορίας».

Οι Ε.Α. βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη μίμηση της διαδικασίας της εξέλιξης, καθώς και στη διαδικασία της κληρονομικότητας στους ζωντανούς οργανισμούς. Ήταν συνεπώς, αναμενόμενο να δανειστούν την ορολογία της βιολογίας για πολλές διαδικασίες που προσομοιάζουν στις αντίστοιχες βιολογικές [31].

Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής. Αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή **γονότυπους (genotypes)** μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γονότυπος αποτελείται από **χρωμοσώματα (chromosomes)**. Στους Γ.Α. αναφερόμαστε συνήθως σε άτομα με ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από **γονίδια (genes)** που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνώρισμα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος που καλούνται loci. Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου (όπως για παράδειγμα το χρώμα μαλλιών) έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να πάρει το γονίδιο καλούνται **αλληλόμορφα (alleles)**.

Πολλοί οργανισμοί έχουν πολλαπλά χρωμοσώματα σε κάθε κύτταρο. Η συνολική συλλογή από γενετικό υλικό (όλα τα χρωμοσώματα μαζί) ονομάζεται **γονιδίωμα (genome)** του οργανισμού. Ο όρος γονότυπος (genotype) αναφέρεται στο συγκεκριμένο σύνολο γονιδίων που περιέχονται σε ένα γονιδίωμα. Και τέλος ο γονότυπος ύστερα από την εμβρυϊκή ανάπτυξη του οργανισμού δίνει τη θέση του στο **φαινότυπο (phenotype)**, στα σωματικά και πνευματικά του χαρακτηριστικά, όπως χρώμα ματιών, ύψος, μέγεθος εγκεφάλου, ευφυΐα κ.λπ. Ο γονότυπος δηλαδή αναφέρεται στην κωδικοποίηση των εξωτερικών χαρακτηριστικών, ενώ ο φαινότυπος στα ίδια τα χαρακτηριστικά του οργανισμού. Η φυσική επιλογή επιδρά άμεσα στο φαινότυπο αφού τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του οργανισμού αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον. Στο γονότυπο επιδρά έμμεσα μέσω της επιβίωσης των καλύτερα προσαρμοσμένων ατόμων [31].

Τα χρωμοσώματα, αντίθετα με τα γονίδια δεν είναι μόνιμες δομές. Μπορούν να κατακερματιστούν και τα τμήματά τους να συνδυαστούν διαφορετικά, σε νέες ομάδες γονιδίων. Οι βασικές λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα στους οργανισμούς είναι η **αναπαραγωγή** και η **μετάλλαξη (mutation)**.

Στη διαδικασία της αναπαραγωγής δύο μέλη του οργανισμού ανταλλάσσουν γενετικό υλικό με στόχο την παραγωγή απογόνων. Η διαδικασία γίνεται με τον εξής τρόπο: τα χρωμοσώματα κόβονται σε διάφορα σημεία και αλλάζουν θέση από το ένα μέλος του ζεύγους στο άλλο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **διασταύρωση ή επιχiasμός (crossover)**. Σε κάθε γονέα ανταλλάσσονται γονίδια μεταξύ των ζευγαριών των χρωμοσωμάτων για να σχηματίσουν τον γαμέτη -ένα απλό χρωμόσωμα- και έπειτα οι γαμέτες των δύο γονέων ζευγαρώνουν και δημιουργούν ένα πλήρες σύνολο χρωματοσωμάτων (με χρωμοσώματα ανά ζεύγη) στους

απογόνους τους. Οι απόγονοι που εμφανίζονται παίρνουν κάποια από τα χαρακτηριστικά των γονέων τους, ή ακόμα και χαρακτηριστικά από πιο περασμένες γενιές.

Η μετάλλαξη είναι σφάλμα στην αντιγραφή του γενετικού υλικού κατά τη διαδικασία της μίτωσης (της διαίρεσης και πολλαπλασιασμού των κυττάρων). Το σφάλμα αυτό αν συμβεί κατά τη φάση της αντιγραφής, (που ακολουθεί τον επιχiasμό), τότε το τροποποιημένο χρωμόσωμα μπορεί να περάσει στην επόμενη γενιά. Η μετάλλαξη στα είδη, λαμβάνει χώρα σε πολύ αραιά χρονικά διαστήματα και προκαλείται είτε από γενετικούς παράγοντες, είτε από παράγοντες του περιβάλλοντος.

Η βασική αρχή των γενετικών αλγορίθμων είναι η διατήρηση ενός πληθυσμού του προβλήματος με τη μορφή κωδικοποιημένης πληροφορίας και η εξέλιξη του πληθυσμού με την πάροδο του χρόνου. Η εξέλιξη των μελών του πληθυσμού βασίζεται στους νόμους της φυσικής επιλογής (επιβίωση του ισχυρότερου) και του ανασυνδυασμού του γενετικού υλικού μέσα στον πληθυσμό. Ο εξελισσόμενος πληθυσμός δειγματοληπτεί το χώρο αναζήτησης, συσσωρεύει πληροφορία σχετικά με τις περιοχές λύσεων καλής και κακής ποιότητας και ανταλλάσσοντας τμήματα πληροφορίας σχηματίζει λύσεις με βέλτιστη συμπεριφορά για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Έστω λοιπόν ότι έχουμε ένα σύστημα προς βελτιστοποίηση. Αρχικά πρέπει να γίνει η μοντελοποίηση του συστήματος. Το μοντέλο είναι μια απλουστευμένη απεικόνιση του συστήματος. Η απεικόνιση γίνεται με τη χρήση πεπερασμένου αριθμού παραμέτρων, των ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης (independent design variables). Οι μεταβλητές αυτές μπορεί να είναι σε δυαδική μορφή (κλασικοί γενετικοί αλγόριθμοι), σε μορφή ακεραίου ή σε μορφή πραγματικού αριθμού (υβριδικοί εξελικτικοί αλγόριθμοι). Όταν είναι σε δυαδική μορφή, κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή σχεδίασης αποτελεί ένα γονίδιο και αποτελείται από ένα δυαδικό ψηφίο (0 ή 1) ή μια σειρά δυαδικών ψηφίων (1101010).

Κάθε πίνακας-γραμμή με τα κωδικοποιημένα γονίδια αποτελεί το χρωμόσωμα (chromosome). Όταν στο χρωμόσωμα οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης πάρουν συγκεκριμένες τιμές, τότε έχουμε μία **υποψήφια λύση**. Η κωδικοποίηση ενός συγκεκριμένου συστήματος στη μορφή του χρωμοσώματος αποτελεί τον γονότυπο, ενώ το σύστημα που προκύπτει εάν εφαρμοστεί ο συγκεκριμένος γονότυπος στο μοντέλο του συστήματος, αποτελεί τον φαινότυπο που είναι αυτός που τελικά αξιολογείται.

Το πόσο ισχυρό είναι ένα χρωμόσωμα ελέγχεται από την τιμή της συνάρτησης προσαρμογής (fitness function) η οποία εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το δεδομένο χρωμόσωμα. Τα ισχυρότερα χρωμοσώματα επιλέγονται για να συνδυαστούν με άλλα ισχυρά για τη δημιουργία απογόνου, ενώ τα άλλα σταδιακά απομακρύνονται από τον πληθυσμό. Η βελτιστοποίηση της συνάρτησης προσαρμογής αντιστοιχεί στην προσαρμογή του ατόμου στο περιβάλλον κατά τη διαδικασία της φυσικής επιλογής.

Ο επιχiasμός υλοποιείται με ανταλλαγή γενετικού υλικού ανάμεσα σε δύο απλοειδείς γονείς (δηλαδή ανάμεσα στα χρωμοσώματα δύο λύσεων της ίδιας γενιάς). Στην πιο απλή του μορφή, τα δύο χρωμοσώματα κόβονται στην ίδια τυχαία θέση και το πρώτο τμήμα του πρώτου χρωμοσώματος ενώνεται με το δεύτερο τμήμα του δεύτερου και αντίστροφα, οπότε προκύπτουν

δύο νέες λύσεις (δύο απόγονοι). Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με αλλαγή τιμής σε κάποιο γονίδιο σε μια τυχαία επιλεγμένη θέση του χρωμοσώματος.

Η νέα τιμή λαμβάνεται από τα αλληλόμορφα (τις διαφορετικές τιμές που μπορεί να πάρει ένα γονίδιο) του συγκεκριμένου γονιδίου. Έτσι αν η κωδικοποίηση γίνεται με δυαδικούς αριθμούς, το στοιχείο που επιλέχθηκε, αν έχει τιμή 0 μετατρέπεται σε 1, ενώ αν έχει τιμή 1 σε 0.

Ο τελεστής της επιλογής (selection) ωθεί την έρευνα σε περιοχές με καλύτερες προοπτικές, όσον αφορά στην αντικειμενική συνάρτηση.

Οι τελεστές της μετάλλαξης και του επιχιασμού εξερευνούν (explore) τον χώρο των λύσεων, ενώ ο τελεστής της επιλογής εκμεταλλεύεται (exploits) την πληροφορία που υπάρχει μέσα στον πληθυσμό. Οι πρώτοι τελεστές τείνουν να αυξήσουν τη διαφοροποίηση μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού, ενώ η επιλογή τείνει να την μειώσει, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ομοιομορφία ατόμων με υψηλή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η ρύθμιση της ισορροπίας μεταξύ των δύο αντικρουόμενων λειτουργιών (exploration-exploitation) πραγματοποιείται με τον μηχανισμό της επιλογής. Ο όρος που εκφράζει την υπερίσχυση της exploitation σε βάρος της exploration ιδιότητας, ονομάζεται «πίεση επιλογής» - **selective pressure**. Με αύξηση της selective pressure – η οποία επιτυγχάνεται με την αλλαγή της μεταβλητής q - αυξάνεται η ταχύτητα σύγκλισης του ΕΑ, αλλά μερικές φορές αυξάνεται και η πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα [30].

Η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει ως εξής: αρχικά δημιουργείται τυχαία ένας αριθμός P λύσεων κωδικοποιημένων υπό τη μορφή συμβολοσειρών (συνήθως δυαδικών) που αναπαριστούν τα φυσικά χρωμοσώματα. Η έννοια του πληθυσμού δίνει στους γενετικούς αλγόριθμους μοναδικά χαρακτηριστικά: οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδος στοχαστικής βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί πολλές υποψήφιας λύσεις (μεγάλο πληθυσμό υποψήφιας λύσεων) ταυτόχρονα.

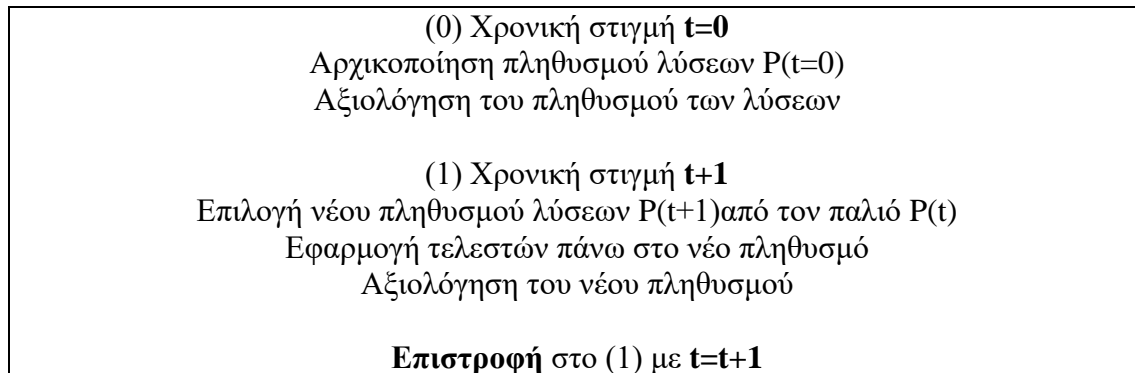
Μετά τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, κάθε μέλος του πληθυσμού αποκωδικοποιείται σε μία υποψήφια λύση του προβλήματος και ανατίθεται σε αυτή τη λύση μία τιμή «καταλληλότητας» μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας που δίνει ένα μέτρο της ποιότητας της κάθε λύσης. Στη συνέχεια επιλέγονται κατά ζεύγη μέλη του πληθυσμού για να αναπαραχθούν και να σχηματίσουν απογόνους (νέες λύσεις). Η επιλογή των ζευγών γίνεται πιθανοτικά, έτσι ώστε η πιθανότητα επιλογής της κάθε λύσης να είναι ανάλογη της «καταλληλότητάς» της. Αυτό εγγυάται ότι οι λύσεις υψηλής ποιότητας θα επιλεγούν πολλές φορές και θα αποτελέσουν τους “γονείς” για πολλές νέες λύσεις, ενώ οι λύσεις χαμηλής ποιότητας θα συνεισφέρουν λιγότερο στο νέο πληθυσμό, με την πιθανότητα να μην επιλεγούν για αναπαραγωγή [32].

Όταν επιλεγούν οι δύο λύσεις-γονείς, οι συμβολοσειρές τους ανασυνδυάζονται για την παραγωγή μίας λύσης-απογόνου με τη χρήση τελεστών που προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς. Οι βασικοί γενετικοί τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Η διασταύρωση ανασυνδυάζει τις συμβολοσειρές των γονέων παράγοντας έναν απόγονο που κληρονομεί χαρακτηριστικά και των δύο γονέων. Η διασταύρωση, αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων, δεν είναι σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Η μετάλλαξη καλύπτει αυτή την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στο νέο απόγονο. Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με την τυχαία αλλαγή συμβόλων

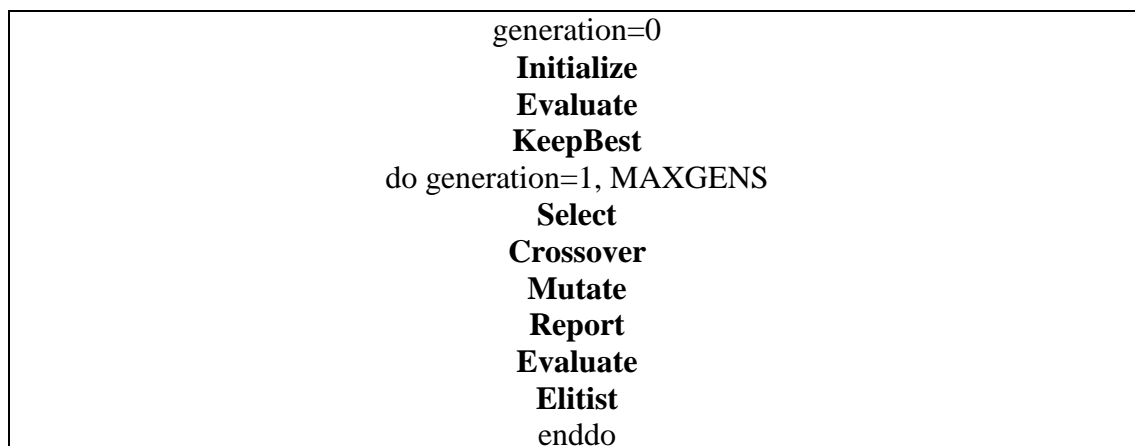
του νέου απογόνου. Γενικά η μετάλλαξη θεωρείται ως δευτερεύων, αλλά χρήσιμος τελεστής, ο οποίος δίνει μία μη μηδενική πιθανότητα για έλεγχο και αξιολόγηση, σε κάθε δυνατή λύση.

Όταν παραχθούν M νέες λύσεις, θεωρούνται ως η νέα γενιά και αντικαθιστούν πλήρως τους “γονείς” ώστε να προχωρήσει η εξέλιξη. Πολλές γενιές απαιτούνται ώσπου ο πληθυσμός να συγκλίνει στη βέλτιστη ή σε κοντινή της λύση, με τον αριθμό των γενιών να αυξάνεται ανάλογα με τη δυσκολία του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Η γενική μορφή των βημάτων ενός εξελικτικού αλγορίθμου δίνεται παρακάτω [32]:



Το βήμα 1 επαναλαμβάνεται, μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού με αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος να δίνει μια βέλτιστη λύση που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς. Ο αλγόριθμος με τη μορφή ψευδοκώδικα έχει ως εξής:



Οι συναρτήσεις του προγράμματος είναι οι εξής:

Initialize: παράγει τον αρχικό πληθυσμό, δίνοντας τυχαίες τιμές, με ομοιόμορφη πιθανότητα, στα γονίδια κάθε χρωμοσώματος του πληθυσμού, εντός των ορίων κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής σχεδίασης.

Evaluate: υπολογίζει τη συνάρτηση προσαρμογής κάθε χρωμοσώματος. Είναι η συνάρτηση που αλλάζει ανάλογα με το πρόβλημα που επιλύεται.

KeepBest: φυλάσσει το καλύτερο άτομο κάθε γενιάς (χρωμόσωμα και συνάρτηση προσαρμογής του).

Select: επιλέγει τα χρωμοσώματα του ενδιαμέσου πληθυσμού, με χρήση της μεθόδου tournament selection.

Crossover: Επιλέγει τα ζεύγη για επιχiasμό. Σαρώνει όλα τα άτομα του πληθυσμού. Κάθε ένα επιλέγεται ως υποψήφιο για επιχiasμό με πιθανότητα **pxover**. Μόλις συμπληρωθεί το ζεύγος, καλείται η **Xover**.

Xover: πραγματοποιεί επιχiasμό μονού σημείου μεταξύ των δύο ατόμων του επιλεγμένου ζεύγους χρωμοσωμάτων. Το σημείο τομής επιλέγεται με ομοιόμορφη πιθανότητα.

Mutate: από το σύνολο του πληθυσμού και το σύνολο των γονιδίων κάθε χρωμοσώματος επιλέγονται (με ομοιόμορφη πιθανότητα) τα γονίδια που θα μεταλλαχθούν. Η νέα τιμή καθενός, προκύπτει με ομοιόμορφη πιθανότητα, από το διάστημα ορισμού της αντίστοιχης μεταβλητής σχεδίασης

Report: υπολογίζει στατιστικά στοιχεία του πληθυσμού σε κάθε γενιά και τα εξάγει στο αρχείο εξόδου

Elitist: εάν το καλύτερο άτομο της παρούσης γενιάς είναι χειρότερο από το καλύτερο της προηγούμενης, το τελευταίο αντικαθιστά το χειρότερο άτομο της παρούσης γενιάς.

5.2 Γενετικοί αλγόριθμοι με περιορισμούς

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να διακριθούν με βάση διάφορα κριτήρια σε διάφορες κατηγορίες, με κυριότερες:

- Προβλήματα με περιορισμούς ή χωρίς. Ανάλογα αν υπάρχουν ή όχι περιορισμοί στις μεταβλητές απόφασης.
- Προβλήματα στατικής ή δυναμικής βελτιστοποίησης. Τα πρώτα αρκούνται στην εύρεση τιμών για τις μεταβλητές απόφασης, ενώ τα δεύτερα προσπαθούν να εκφράσουν τις μεταβλητές απόφασης συναρτήσει μιας τρίτης παραμέτρου ως προς την οποία γίνεται η βελτιστοποίηση.
- Προβλήματα βέλτιστου ελέγχου ή μη βέλτιστου ελέγχου. Στα πρώτα το πρόβλημα αποτελείται από στάδια τα οποία προκύπτουν το ένα από το άλλο με καθορισμένο τρόπο. Οι μεταβλητές απόφασης διαχωρίζονται σε μεταβλητές ελέγχου, που καθορίζουν τη ροή από το ένα στάδιο στο άλλο και σε μεταβλητές κατάστασης που περιγράφουν την κατάσταση σε οποιαδήποτε στάδιο.

Έτσι, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης θεμελιώνεται ως η εύρεση ενός διανύσματος που θα ελαχιστοποιεί ή θα μεγιστοποιεί αντίστοιχα την αντικειμενική συνάρτηση $F(x)$ του προβλήματος. Και αν είναι πρόβλημα με περιορισμούς, να ικανοποιεί και τους περιορισμούς του προβλήματος.

$$\min_{\vec{x}} F(\vec{x}) \quad \text{ή} \quad \max_{\vec{x}} F(\vec{x}) \quad \text{με} \quad \vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (\text{Αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης})$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0 \quad \text{με} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (\text{Ανισοτικοί περιορισμοί})$$

$$i_j(\vec{x}) = 0 \quad \text{με} \quad j = 1, 2, 3, \dots, p \quad (\text{Περιορισμοί ισότητας})$$

Το διάνυσμα X αποτελεί τις μεταβλητές απόφασης, η συνάρτηση $F(x)$ την αντικειμενική συνάρτηση, οι συναρτήσεις $g(x)$ τους περιορισμούς ανισότητας και οι συναρτήσεις $l(x)$ τους περιορισμούς ισότητας.

Στη γενική περίπτωση μη κυρτού χώρου λύσεων με μη γραμμικούς περιορισμούς οι περισσότερες μέθοδοι που έχουν προταθεί για ΕΑ, βασίζονται στην αρχή των συναρτήσεων τιμωρίας (penalty functions). Μια μέθοδος ποινής μπορεί να μετατρέψει ένα πρόβλημα με περιορισμούς σε ένα χωρίς περιορισμούς με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιεί την αθροιστική μορφή:

$$eval(x) = \begin{cases} f(x), & \text{if } x \text{ is feasible} \\ f(x) + penalty(x), & \text{otherwise} \end{cases}$$

όπου το $p(x)$ συμβολίζει τη συνάρτηση της ποινής και F την περιοχή εφικτών λύσεων. Αν δεν υπάρχουν παραβιάσεις το $p(x)$ θα είναι μηδέν, αλλιώς θα είναι θετικό. Πλέον η συνάρτηση $eval(x)$ θα είναι η κυρίως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

Ο δεύτερος τρόπος χρησιμοποιεί την μορφή γινομένου:

$$eval(\vec{x}) = \begin{cases} f(\vec{x}), & \vec{x} \in F \\ f(\vec{x})p(\vec{x}), & \text{otherwise} \end{cases}$$

Στις περισσότερες μεθόδους χρησιμοποιείται ένα σύνολο συναρτήσεων τιμωρίας, μία για κάθε περιορισμό του προβλήματος. Κάθε μία συνάρτηση μετρά το βαθμό μη ικανοποίησης του περιορισμού και προσθέτει κάποιο ποσό στην αντικειμενική συνάρτηση (penalty). Αν δεν υπάρχουν παραβιάσεις το $p(x)$ θα είναι ένα, αλλιώς θα είναι μεγαλύτερο από ένα.

Στο γενετικό αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η προσθήκη των περιορισμών κρίνεται απαραίτητη, καθώς χωρίς αυτούς η εύρεση λύσεων συχνά οδηγεί σε μη λειτουργία του μοντέλου. Υπό αυτές τις συνθήκες, πρέπει να προστεθούν οι ανισοτικοί περιορισμοί που περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Το βασικό χαρακτηριστικό της αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται στο μοντέλο του συστήματος μας είναι ότι για κάποιες τιμές των x , το σύστημα δεν μπορεί να λειτουργήσει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν τηρούνται οι κανόνες συναρτήσεων συμμετοχής, ώστε να διατηρήσουν την τριγωνική και την τραπεζοειδή τους μορφή. Επομένως, θα πρέπει αυτές οι τιμές των x , να αποκλειστούν από την επιλογή, χωρίς να σταματάει ο αλγόριθμος, κάτι που θα συνέβαινε αν το σύστημα «έμπαινε» στη διαδικασία χρήσης αυτών. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η συνάρτηση του penalty ου χρησιμοποιήθηκε δεν έχει αμιγώς ούτε αθροιστική μορφή, ούτε μορφή γινομένου.

Συγκεκριμένα, για την είσοδο οι συναρτήσεις τιμωρίας έχουν προστεθεί στον κώδικα, στο τμήμα της evaluate (σε όσα σημεία αυτή χρησιμοποιείται), ως εξής:

```
for mem = 1:POPSIZE
    for i = 1:NVARS
        x(i) = population(mem).gene(i);
```

```

    end
    if(x(1)<=x(2))
        population(mem).fitness=0.01*(x(2)-x(1));
    elseif (x(3)>=x(4))
        population(mem).fitness=0.01*(x(3)-x(4));
    else
        population(mem).fitness = apli_fitness(x,K,M,C) ;
    End
end

```

Ενώ για την έξοδο οι συναρτήσεις τιμωρίας έχουν προστεθεί στον κώδικα, στο τμήμα της evaluate (σε όσα σημεία αυτή χρησιμοποιείται), ως εξής:

```

for mem = 1:POPSIZE
    for i = 1:NVARS
        x(i) = population(mem).gene(i);
    end
    if(x(1)<=x(2))
        population(mem).fitness=0.01*(x(2)-x(1));
    elseif (x(2)<=x(3))
        population(mem).fitness=0.01*(x(3)-x(2));
    elseif(x(3)<=x(4))
        population(mem).fitness=0.01*(x(4)-x(3));
    elseif(x(5)>=x(6))
        population(mem).fitness=0.01*(x(5)-x(6));
    elseif(x(6)>=x(7))
        population(mem).fitness=0.01*(x(6)-x(7));
    elseif(x(7)>=x(8))
        population(mem).fitness=0.01*(x(7)-x(8));
    else
        population(mem).fitness = apli_fitness(x,K,M,C) ;
    end
end
end

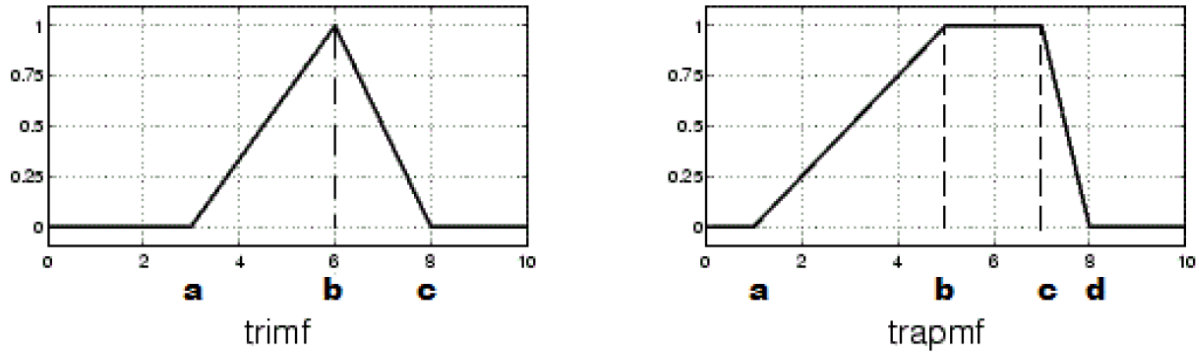
```

Όπως παρατηρούμε, και στις δύο περιπτώσεις, η penalty function παίρνει μια πολύ μικρή τιμή, η οποία εξαρτάται από τη διαφορά των x_i , δηλαδή από την απόσταση των x_i . Ο σκοπός της συγκεκριμένης penalty function είναι να απομακρύνει το γενετικό από αυτήν την περιοχή των λύσεων, δίνοντας μια ελάχιστη τιμή (αφού επιδιώκουμε μεγιστοποίηση) στην αντικειμενική συνάρτηση, και κατά συνέπεια στη best_val.

5.3 Το πρόβλημα βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, στόχος της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ελεγκτή ασαφούς λογικής, έτσι ώστε να επιτευχθεί η **μέγιστη δυνατή μείωση ταλάντωσης της κατασκευής**. Τα αποτελέσματα της χρήσης του γενετικού αλγορίθμου

πραγματοποιήθηκαν και εμφανίζονται στην δημοσιευμένη εργασία [29] όπου εμφανίζεται η έντονα δραστική επίδραση του γενετικού στον ελεγκτή, πετυχαίνοντας μειώσεις ταλάντωσης της τάξης άνω του 90%. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο γενετικός για την βελτιστοποίηση του ελεγκτή στο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο. Το πρόβλημα το οποίο υλοποιείται είναι ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης, όπου η *αντικειμενική συνάρτηση* είναι η ποσοστιαία μείωση του εύρους της ταλάντωσης, ενώ οι *μεταβλητές σχεδίασης* θα είναι τα σημεία a,b,c και a,b,c,d για την τριγωνική και την τραπεζοειδή συνάρτηση συμμετοχής αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.



Εικόνα 21: Συναρτήσεις συμμετοχής για το πρόβλημα βελτιστοποίησης

Το πλήθος του πληθυσμού που επιλέχθηκε μετά από σειρά δοκιμών είναι 50 μέλη. Ο αριθμός των γενιών ορίστηκε στις 100. Άλλη σημαντικά χαρακτηριστικά τα οποία αξίζουν να αναφερθούν για το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι το $q=2$ όπου είναι η παράμετρος που ρυθμίζει την πίεση επιλογής» - selective pressure, η οποία εκφράζει την υπερίσχυση της exploitation σε βάρος της exploration ιδιότητας [32] , το $p_{crossover}=0.8$ και $p_{mutation}=0.15$. Επιπλέον το πρόβλημα περιέχει γραμμικούς περιορισμούς και συντάσσεται ως εξής:

Maximize:

$$percentage = 0.4 \cdot percentage(d) + 0.6 \cdot percentage(\ddot{d}) \quad (47)$$

Subject to:

$$x(i) < x(i + 1) \text{ if } el.potential \geq 0$$

$$x(i) > x(i + 1) \text{ if } el.potential < 0$$

$$x(j) < x(j + 1) \text{ if } el.current \geq 0$$

$$x(j) > x(j + 1) \text{ if } el.current < 0$$

$$x(k) < x(k + 1) \text{ if } p \geq 0$$

$$x(k) > x(k + 1) \text{ if } p < 0$$

where:

$$percentage(d) = \frac{(\max_displ_before_control) - (\max_displ_after_control)}{\max_displ_before_control}$$

$$percentage(\ddot{d}) = \frac{(\max_acc_before_control) - (\max_acc_after_control)}{\max_acc_before_control}$$

$$\max_displ_before_control = \max(d \text{ before control}) + |\min(d \text{ before control})|$$

$$\max_displ_after_control = \max(d \text{ after control}) + |\min(d \text{ after control})|$$

$$\max_acc_before_control = \max(\ddot{d} \text{ before control}) + |\min(\ddot{d} \text{ before control})|$$

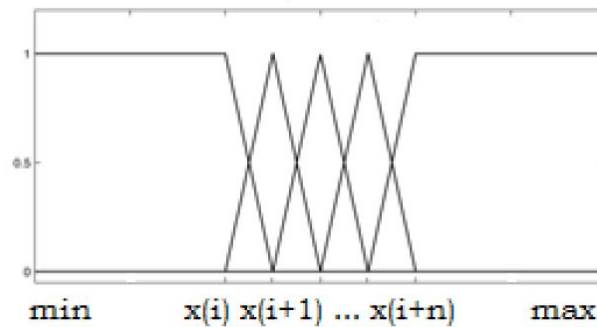
$$\max_acc_after_control = \max(\ddot{d} \text{ after control}) + |\min(\ddot{d} \text{ after control})|$$

$$0 < x(i) < 1, i = 1, \dots, 4$$

$$0 < x(j) < 1, j = 1, 2$$

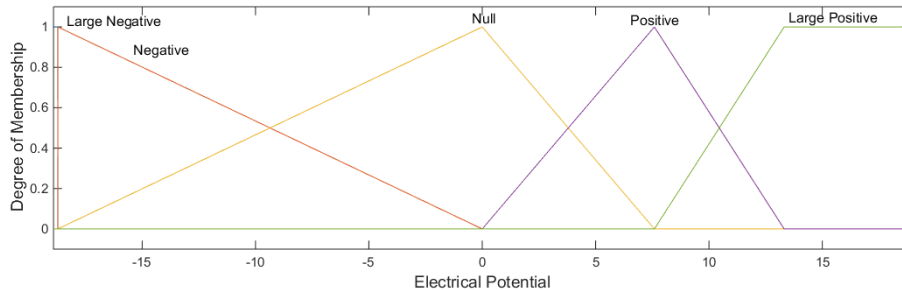
$$0 < x(k) < 1, k = 1, \dots, 8$$

Τα $x(i)$, $x(j)$ και $x(k)$ είναι το ποσοστό του ηλεκτρικού δυναμικού, της ηλεκτρικής τάση και του σήματος ελέγχου αντίστοιχα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Παρακάτω, απεικονίζεται η τοποθέτηση των x στον οριζόντιο άξονα στις συναρτήσεις συμμετοχής.

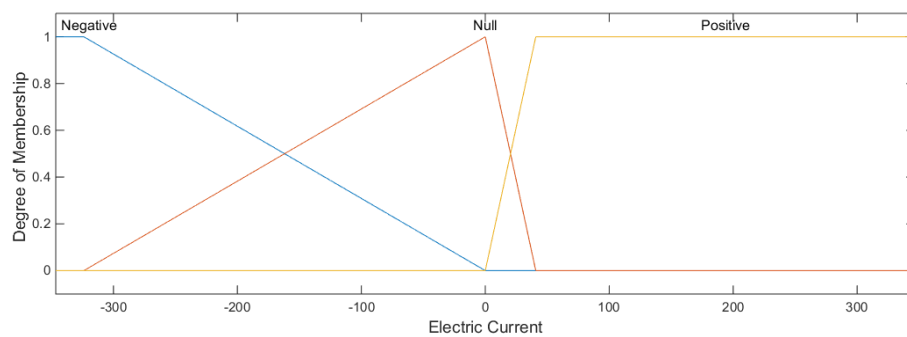


Εικόνα 22: Συνάρτηση συμμετοχής βελτιστοποίησης

Έπειτα από μία σειρά δοκιμών παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα προκύπτουν έπειτα από την βελτιστοποίηση των συναρτήσεων συμμετοχής των εισόδων. Τα αποτελέσματα την επίλυσης του παραπάνω αλγορίθμου, εμφανίζονται στα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 23: Βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής για το ηλεκτρικό δυναμικό



Εικόνα 24: Βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής για το ηλεκτρικό ρεύμα

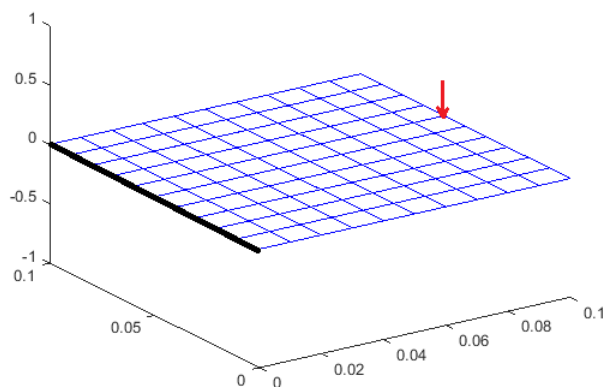
Παρατηρείται πλέον ότι τα τρίγωνα έχουν χάσει την συμμετρία τους έχοντας πλέον πάρει μία ακανόνιστη θέση, τηρώντας πάντα τους περιορισμούς ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως έχει αναφερθεί από την εισαγωγή, στόχος της εργασίας ουσιαστικά είναι η προσομοίωση ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιεί ελεγκτές ασαφούς λογικής και έχει σαν σκοπό την μείωση της ταλάντωσης της κατασκευής. Επιπλέον μετά την σχεδίαση του ελεγκτή, στόχος ήταν η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του έτσι ώστε να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερες μειώσεις στις βασικές παραμέτρους μίας ταλάντωσης που είναι η μετατόπιση της κατασκευής, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Τέλος θέλαμε να εξετάσουμε κατά πόσο αυτός ο ελεγκτής, βελτιστοποιημένος ή μη θα εξακολουθούσε να επιδρά θετικά ή μη σε περίπτωση που η σύνθετη κατασκευή υπόκειντο αποκόλληση σε ένα από τα δύο πιεζοηλεκτρικά στρώματα.

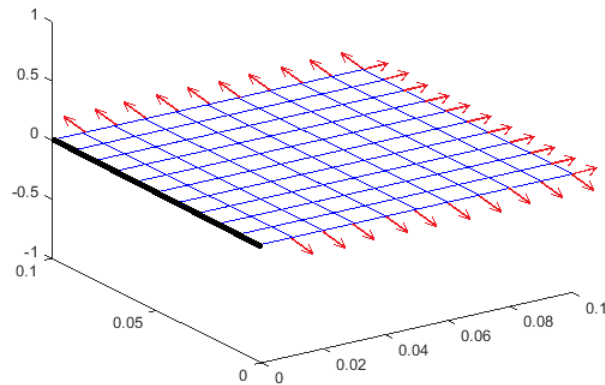
Στην υλοποίηση της προσομοίωσης του μηχανικού μοντέλου σε σχέση με το συζευγμένο ηλεκτρομηχανικό υπάρχει μία βασική διαφορά.

Στο μηχανικό μοντέλο, οι μετρήσεις για τις εισόδους του ελεγκτή λαμβάνονται από ένα κόμβο του κάτω πιεζοηλεκτρικού στρώματος, και η δύναμη ελέγχου εφαρμόζεται κάθετα στην σύνθετη πλάκα, στον αντίστοιχο κόμβο του άνω πιεζοηλεκτρικού στρώματος ο οποίος στην συνέχεια χρησιμοποιείται ως διεγέρτης. Η απεικόνιση του συστήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (25).



Εικόνα 25: Διακριτοποιημένη πλάκα στην οποία ασκείται η δύναμη ελέγχου (κόκκινο βέλος) στο μηχανικό μοντέλο

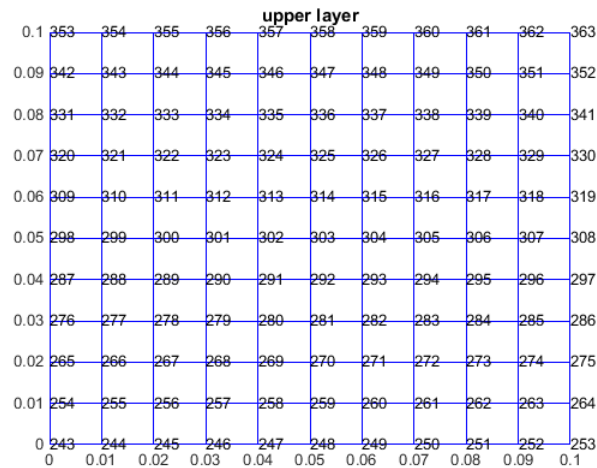
Αντίθετα, η λειτουργία του συζευγμένου ηλεκτρομηχανικού συστήματος είναι εντελώς διαφορετική. Οι μετρήσεις για τις εισόδους του ελεγκτή λαμβάνονται από ένα στοιχείο του κάτω πιεζοηλεκτρικού στρώματος και στη συνέχεια η ηλεκτρική τάση μεταφέρεται στο άνω πιεζοηλεκτρικό στρώμα το οποίο είναι ο διεγέρτης. Όπως φαίνεται και από την εικόνα(26), οι δυνάμεις ελέγχου δεν είναι πλέον κάθετες στο στρώμα, αλλά είναι στους άξονες x, y. Αυτές οι δυνάμεις τείνουν να δημιουργήσουν ροπή προς τα υπόλοιπα στρώματα όπου τείνει να δράσει καμπτικά στην υπόλοιπη κατασκευή.

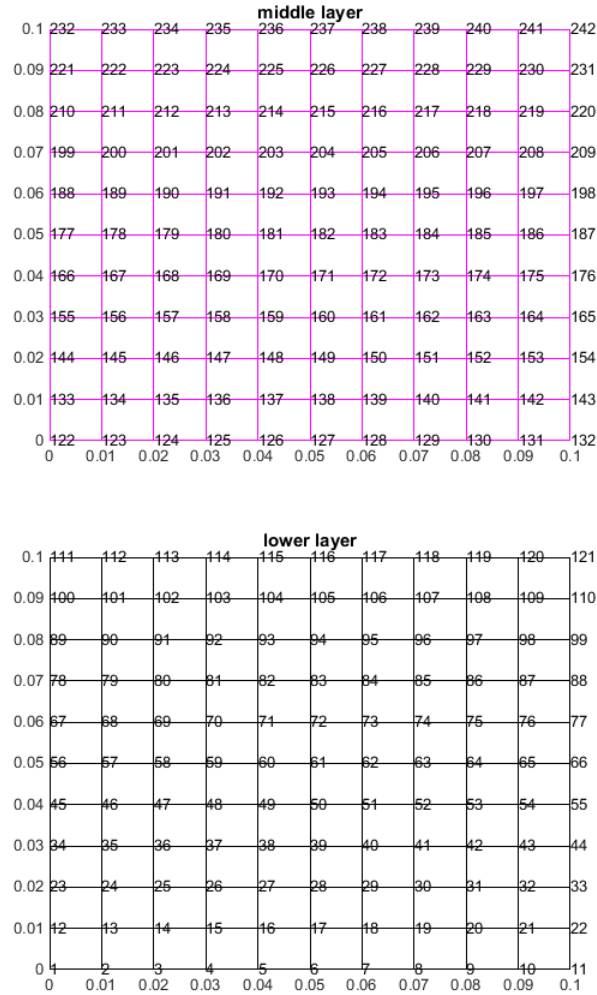


Εικόνα 26: Διακριτοποιημένη πλάκα στην οποία ασκείται η δύναμη ελέγχου (κόκκινο βέλος) στο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται στους ακριανούς κολλημένους κόμβους του πιεζοηλεκτρικού στρώματος. Σε περίπτωση που ένας κόμβος αποκολληθεί, οι δυνάμεις μεταφέρονται στον αμέσως επόμενο κολλημένο κόμβο.

Επιπλέον, οι 3 επόμενες εικόνες απεικονίζουν τον τρόπο με τον οποίο έγινε η αρίθμηση των κόμβων, έπειτα από τη μοντελοποίηση της κατασκευής μας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η αρίθμηση όπως φαίνεται ξεκίνησε από το κάτω πιεζοηλεκτρικό στρώμα που είναι ο αισθητήρας, συνέχισε στην μεσαία ελαστική πλάκα και ολοκληρώθηκε στο άνω πιεζοηλεκτρικό στρώμα που είναι ο διεγέρτης.





Εικόνα 27: Αρίθμηση των κόμβων του κάθε στρώματος άνω-μεσσαίο-κάτω

Τέλος στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το πιεζοηλεκτρικό μπορεί να παράγει έως 200V.

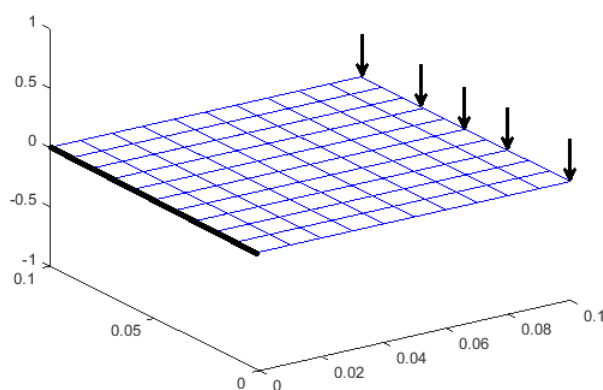
Πίνακας 3: Μηχανικά χαρακτηριστικά του κάθε στρώματος

	CORE layer T300/976	PZT G1195N	Adhesive
Length (m)	0.1	0.1	0.1
Young's Modulus (Pa)	130x10 ⁹	59x10 ⁹	1.78x10 ⁹
Density ($\frac{kg}{m^3}$)	1570	7400	1050
Poison Ratio	0.31	0.34	0.3

6.1 Αποτελέσματα μηχανικού μοντέλου

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρατεθούν τα αποτελέσματα της έρευνας μελέτης σχετικά με τη λειτουργία του ελεγκτή και κατά πόσο αυτός είναι αποδοτικός σε συνθήκες με μικρή αλλά και εκτεταμένης αποκόλλησης.

Στην κατασκευή μας ασκείται μία εξωτερική δύναμη ημιτονοειδούς μορφής, η οποία κατανέμεται ισόποσα στους 5 κόμβους στο ελεύθερο άκρο της κατασκευής όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 28: Διακριτοποιημένη πλάκα στην οποία εφαρμόζεται η εξωτερική διέγερση (μαύρα βέλη)

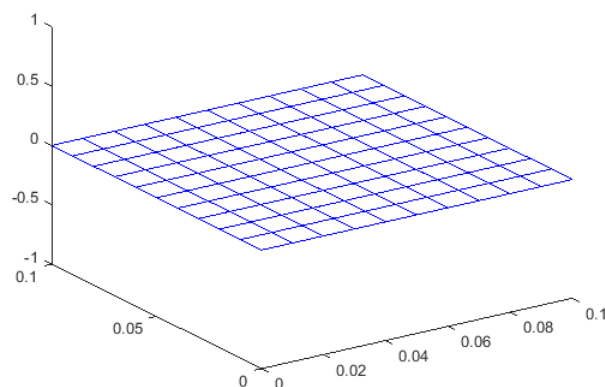
Πριν την περιγραφή των αποτελεσμάτων, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην δημοσιευμένη εργασία [15] έγινε μία σχετική μελέτη για την επίδραση του συγκολλητικού υλικού στην κατασκευή. Παράθεση γραφημάτων-αποτελεσμάτων δεν γίνεται στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή διότι η κατασκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε, είχε διαφορετική διακριτοποίηση σε σχέση με τη διακριτοποίηση που κάναμε στη δική μας και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα δεν είναι συγκρίσιμα. Παρόλα αυτά τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι στη κατασκευή με το συγκολλητικό παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στο πλάτος της μετατόπισης, της ταχύτητας, και της επιτάχυνσης όπου και εμφανίζεται αύξηση σε σχέση με την δεύτερη κατασκευή. Η διαφοροποίηση αυτή εμφανίζεται διότι η κόλλα αυξάνει την ελαστικότητα της σύνθετης κατασκευής, παρόλα αυτά η λειτουργία του ελεγκτή παραμένει πολύ ικανοποιητική και στις 2 περιπτώσεις.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά του ελεγκτή ο οποίος σχεδιάστηκε για τον έλεγχο της σύνθετης κατασκευής χωρίς να υποστεί αποκόλληση. Επιπλέον μελετήθηκε η απόδοση του για διαφορετικά ποσοστά αποκόλλησης του άνω πιεζοηλεκτρικού στρώματος, το οποίο λειτουργεί σαν διεγέρτης. Οι διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν για 10% , 50% και 90% αποκόλλησης υλικού.

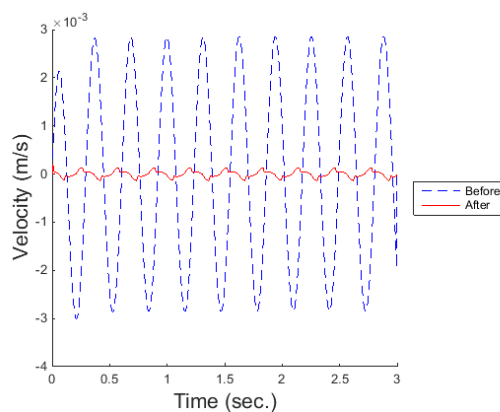
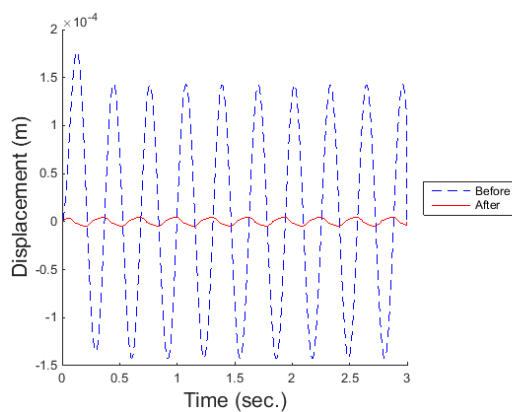
Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι στη συγκεκριμένη διερεύνηση ο ελεγκτής δεν είναι βελτιστοποιημένος.

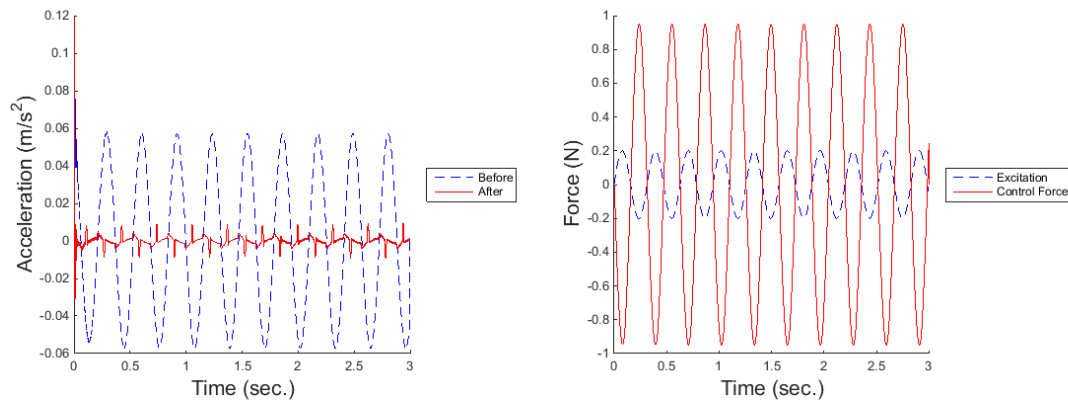
6.1.1 Αποτελέσματα χωρίς αποκόλληση

Αρχικά παρουσιάζεται η συμπεριφορά της σύνθετης πλάκας, χωρίς να έχει υποστεί την οποιαδήποτε αποκόλληση. 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 29: Διακριτοποιημένη πλάκα δίχως αποκόλληση



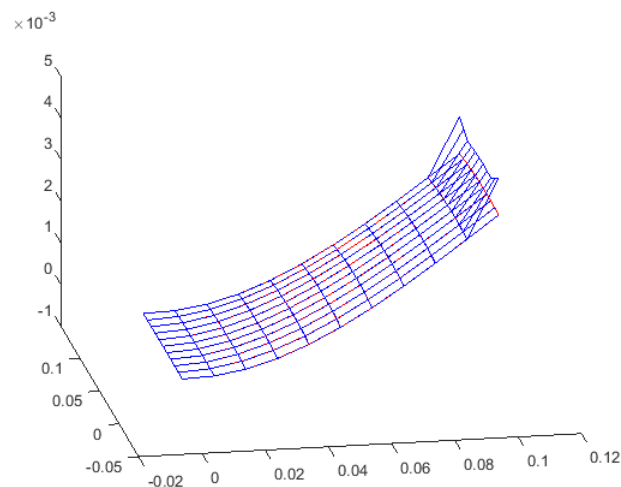


Εικόνα 30: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

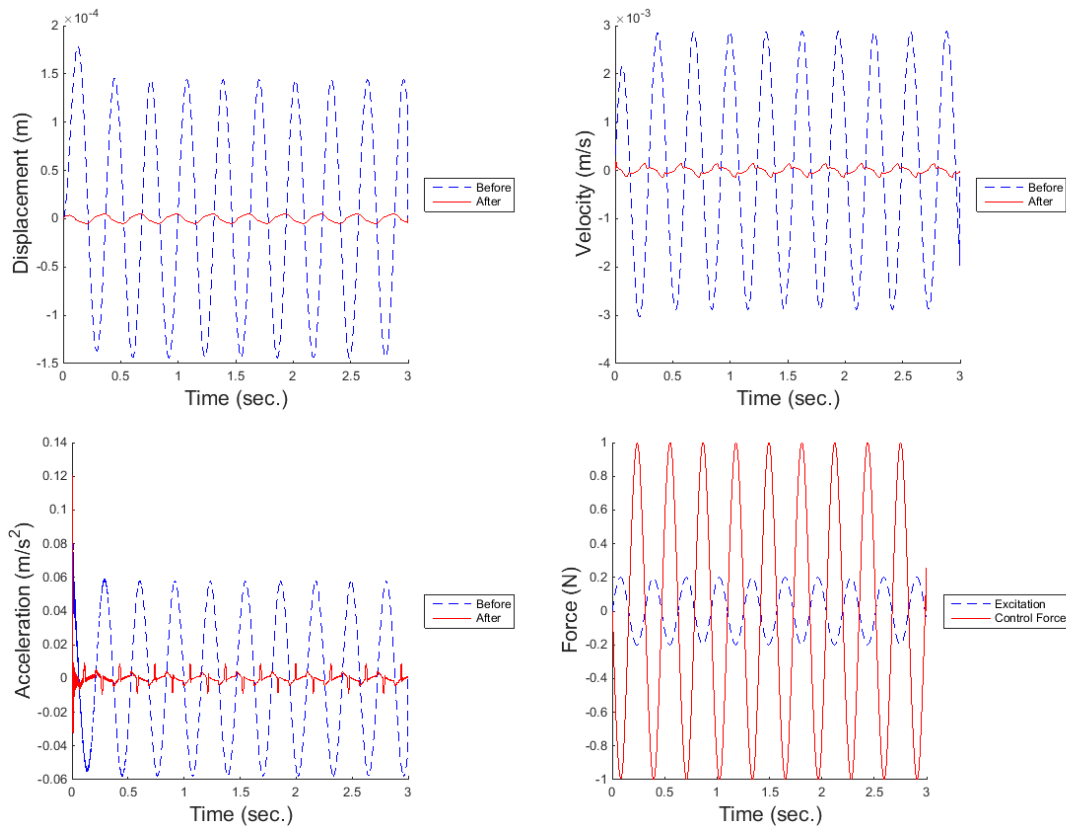
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται μία πάρα πολύ σημαντική μείωση της μετατόπισης, της ταχύτητας όπως και της επιτάχυνσης. Οι μειώσεις αυτές είναι τις τάξης του 97.14%, 94.53% και 87.02% αντίστοιχα. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, για περίπτωση που δεν έχουμε κάποια αποκόλληση ο ελεγκτής μας είναι εντυπωσιακά αποδοτικός.

6.1.2 Αποκόλληση 10%

Η επόμενη περίπτωση η οποία μελετήθηκε είναι η αποκόλληση της κατασκευής της τάξης του 10%. Η αποκόλληση όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα ξεκινά από το ελεύθερο άκρο και επεκτείνεται προς το μέσο της κατασκευής. Η απόδοση του ελεγκτή και η συμπεριφορά της κατασκευής παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Εικόνα 31: Διακριτοποιημένη πλάκα με 10% αποκόλληση

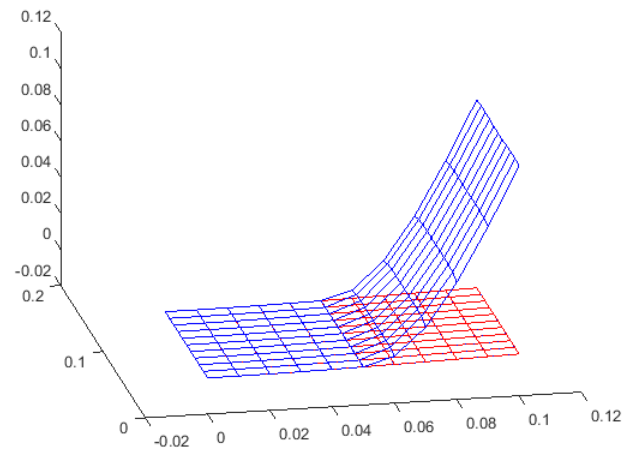


Εικόνα 32: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

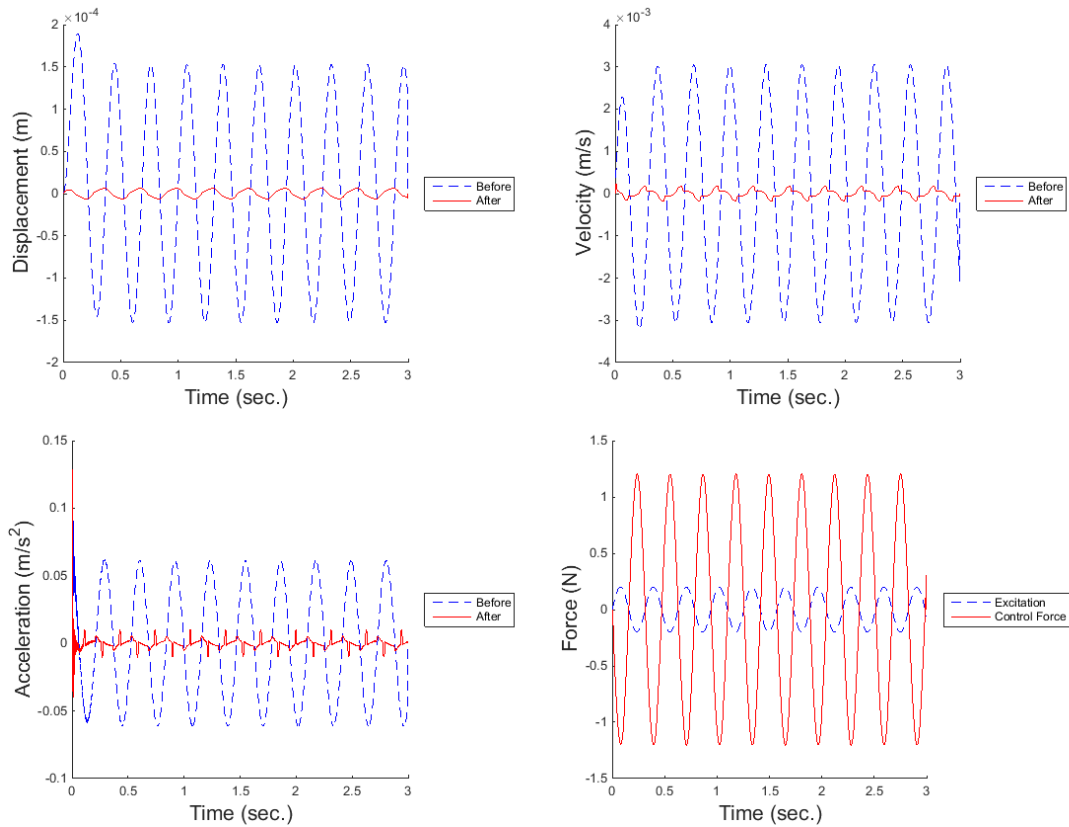
Όπως και στην προηγούμενη κατασκευή, έτσι και σε αυτή ο ελεγκτής δείχνει να έχει μία ιδιαίτερα εντυπωσιακή συμπεριφορά. Παρατηρούμε ότι η μείωση της μετατόπισης αγγίζει το ποσοστό του 96.99% ενώ η ταχύτητα και η επιτάχυνση μειώθηκαν 94.43% και 84.19%. Ποσοστά ελαφρώς χειρότερα, αλλά εξίσου ικανοποιητικά με την περίπτωση της μη αποκόλλησης.

6.1.3 Αποκόλληση 50%

Επόμενη περίπτωση που μελετήθηκε, είναι αυτή όπου το μισό άνω στρώμα πιεζοηλεκτρικού αποκολλήθηκε, Όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω αποτελέσματα και σε αυτή τη περίπτωση ο ελεγκτής δείχνει να έχει πάρα πολύ καλή απόδοση.



Εικόνα 33: Διακριτοποιημένη πλάκα με 50% αποκόλληση

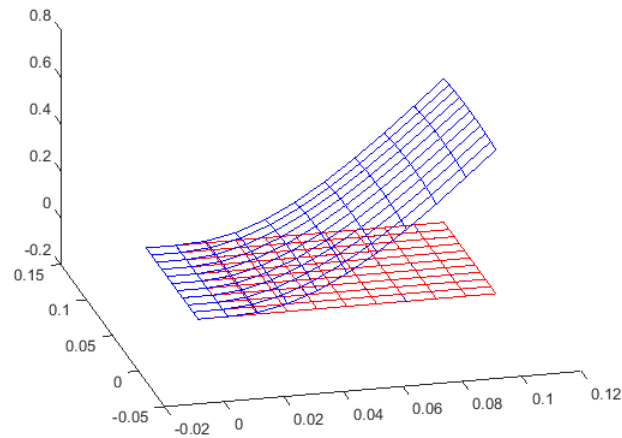


Εικόνα 34: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

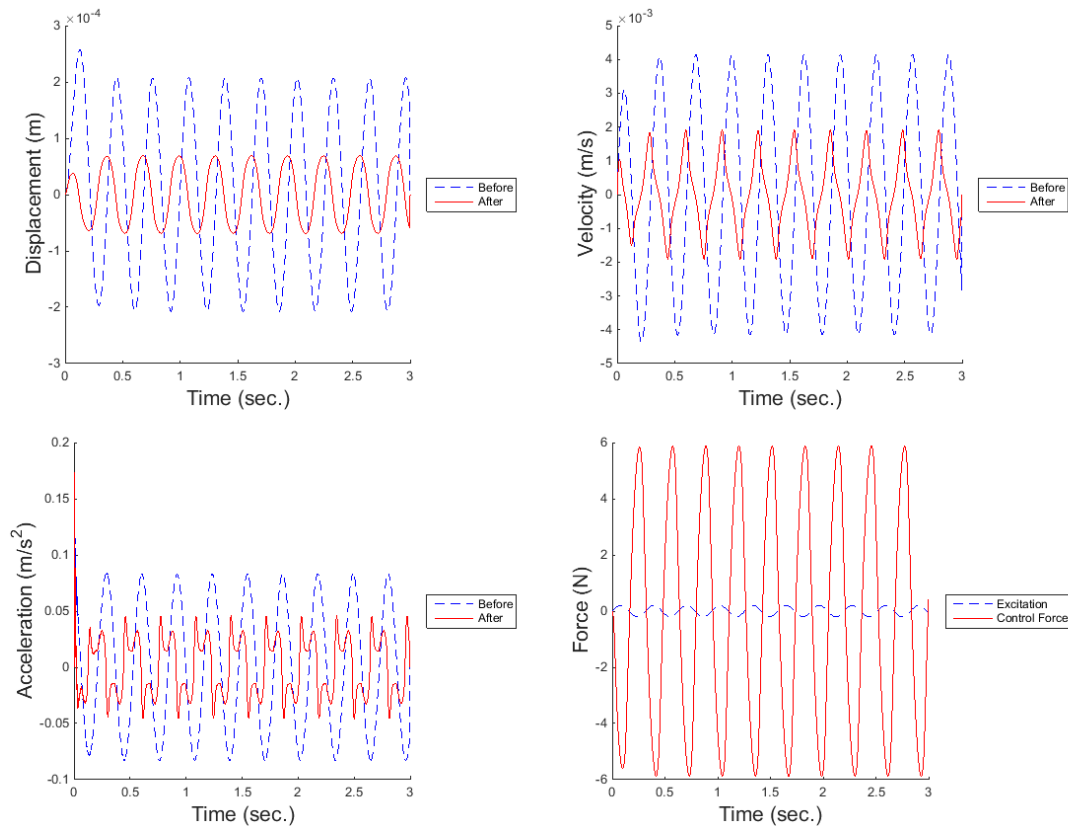
Τα ποσοστά μείωσης παραμένουν στα ίδια επίπεδα με τις προηγούμενες διερευνήσεις δηλαδή της τάξεως του 80-95%. Σε αυτή τη περίπτωση βέβαια πρέπει να αναφερθεί ένα χαρακτηριστικό που εμφανίζεται και είναι μία μικρή αύξηση της ταλάντωσης η οποία παρατηρείται στην κατασκευή πριν τον έλεγχο.

6.1.4 Αποκόλληση 90%

Τελευταία περίπτωση για το μηχανικό μοντέλο που εξετάστηκε είναι η εκτεταμένη περίπτωση αποκόλλησης, η οποία είναι της τάξης του 90%. Η έκταση μίας τέτοιας αποκόλλησης θεωρείται μικρής ερευνητικής σημασίας διότι ουσιαστικά η κατασκευή έχει καταστραφεί. Παρόλα αυτά, όπως παρατηρήθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν δυνάμεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένη αποκόλληση της κατασκευής.



Εικόνα 35: Διακριτοποιημένη πλάκα με 90% αποκόλληση



Εικόνα 36: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

Σε αυτή την τελευταία περίπτωση υπάρχουν κάποια ενδιαφέροντα στοιχεία τα οποία αξίζουν να αναφερθούν και ως προς την λειτουργία του ελεγκτή, αλλά και ως προς την συμπεριφορά της κατασκευής σε μία τέτοιας έκτασης αποκόλληση. Αρχικά, παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής ακόμα και σε αυτή την περίπτωση εξακολουθεί να δουλεύει καλά, αλλά όχι στα επίπεδα των προηγούμενων διερευνήσεων. Οι μειώσεις στην μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση που επιτυγχάνεται είναι 53.42%, 55.10% και 52.34%. Όσον αφορά την κατασκευή λόγω την μεγάλης αποκόλλησης, και της μεταβολής σε μεγάλο βαθμό της δυσκαμψίας της παρατηρείται μία μεγάλη αύξηση του πλάτους της ταλάντωσης.

Τέλος, ακολουθεί ο πίνακας με αναλυτικά τις μειώσεις της μετατόπισης, της ταχύτητας κα της επιτάχυνσης για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις.

Πίνακας 4: Ποσοστό μείωσης μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης

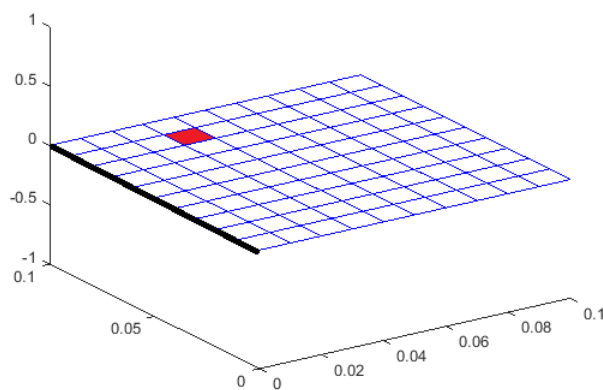
Percentage of reduction	0% delamination	10% delamination	50% delamination	90% delamination
Displacement	97.14%	97.99%	96.48%	53.42
Velocity	94.53%	94.43%	93.35%	55.10%
Acceleration	87.02%	84.19%	82.23%	52.34%

6.2 Αποτελέσματα ηλεκτρικού μοντέλου

Στην τελευταία αυτή ενότητα, μελετάται η λειτουργία του ελεγκτή με τη χρήση του ηλεκτρομηχανικού μοντέλου. Η βασική διαφοροποίηση σε σχέση με το μηχανικό μοντέλο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι ο τρόπος με τον οποίο δίδονται οι δυνάμεις ελέγχου. Σε αυτή την περίπτωση ως διεγέρτης ενεργεί το άνω πιεζοηλεκτρικό στρώμα, ενώ οι μετρήσεις για τις εισόδους του ελεγκτή δεν λαμβάνονται από έναν συγκεκριμένο κόμβο αλλά από ένα πεπερασμένο στοιχείο του αισθητήρα. Σε περίπτωση που υπάρξει αποκόλληση στην συγκεκριμένη περιοχή-πεπερασμένο στοιχείο τότε ο έλεγχος παύει να λειτουργεί.

Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν στην συνέχεια ακολουθούν την λογική του μηχανικού μοντέλου, δηλαδή την μελέτη της ταλάντωσης δίχως αποκόλληση και στην συνέχεια βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ελεγκτή. Έπειτα, θεωρώντας ότι ο ελεγκτής πλέον δεν επιδέχεται βελτίωσης, βλέπουμε πώς επιδρά σε συνθήκες αποκόλλησης της τάξης του 10% και του 50%. Επιπλέον εξετάστηκε και η περίπτωση της λειτουργίας του ελεγκτή σε περίπτωση που αποκολληθεί το άνω στρώμα στην περιοχή στην οποία ακριβώς στο ίδιο στοιχείο στο κάτω πιεζοηλεκτρικό στρώμα έχει τοποθετηθεί ο έλεγχος.

Δεδομένου ότι θεωρούμε πως ο ελεγκτής από τη στιγμή που θα τοποθετηθεί, δεν επιδέχεται ρύθμισης, έπρεπε, πέραν της βελτιστοποίησης των παραμέτρων στις συναρτήσεις συμμετοχής όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, να τον τοποθετήσουμε σε σημείο τον αισθητήρα όπου με βάση της μετρήσεις σε εκείνη την περιοχή να έχουμε την μέγιστη δυνατή μείωση ταλάντωσης. Με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου, και δίχως την χρήση κάποιων περιορισμών, αυτό το στοιχείο βρέθηκε στο στοιχείο 84 όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

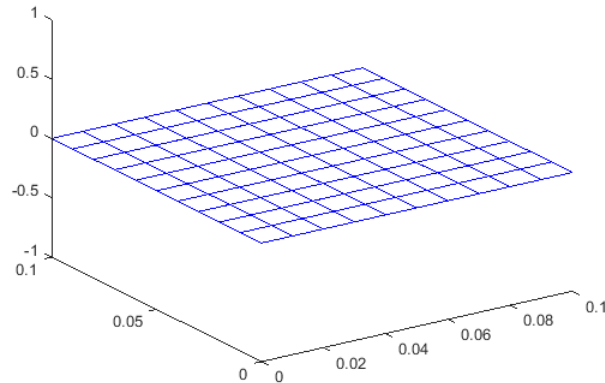


Εικόνα 37: Διακριτοποιημένη πλάκα με όπου τοποθετείται ο αισθητήρας στην βέλτιστη περιοχή (κόκκινη)

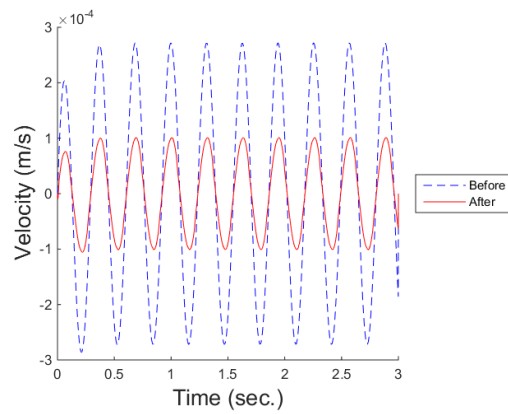
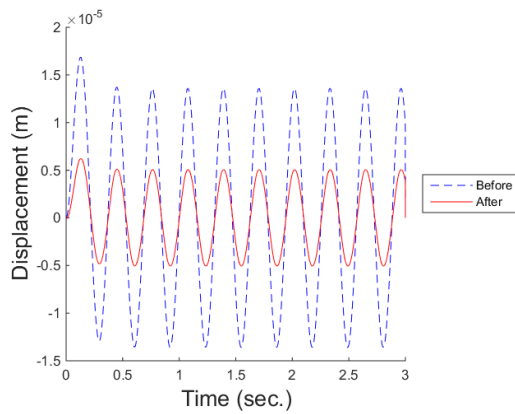
Με κόκκινο αποτυπώνεται το στοιχείο από όπου ο ελεγκτής λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για την ταλάντωση της κατασκευής.

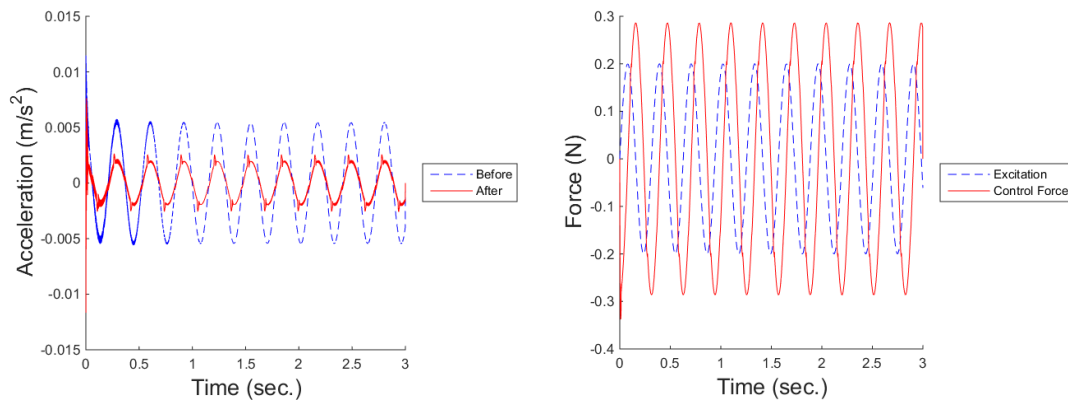
6.2.1 Αποτελέσματα χωρίς αποκόλληση χωρίς βελτιστοποίηση

Έπειτα από την επιλογή βέλτιστης τοποθέτησης του αισθητήρα, πραγματοποιήθηκε η πρώτη διερεύνηση με σκοπό να μελετηθεί η ικανοποιητική ή μη λειτουργία του ελεγκτή. Η περίπτωση που μελετήθηκε είναι χωρίς η κατασκευή να έχει υποστεί κάποια αποκόλληση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Εικόνα 38: Διακριτοποιημένη πλάκα χωρίς αποκόλληση



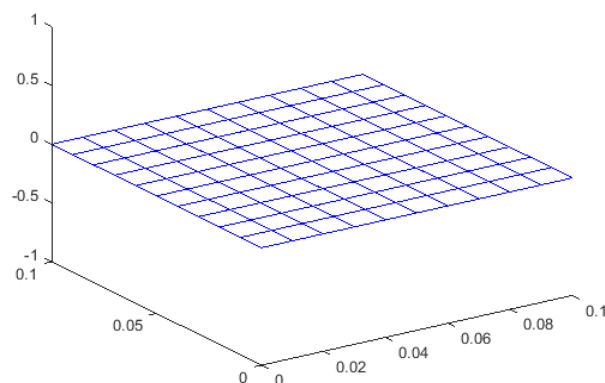


Εικόνα 39: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

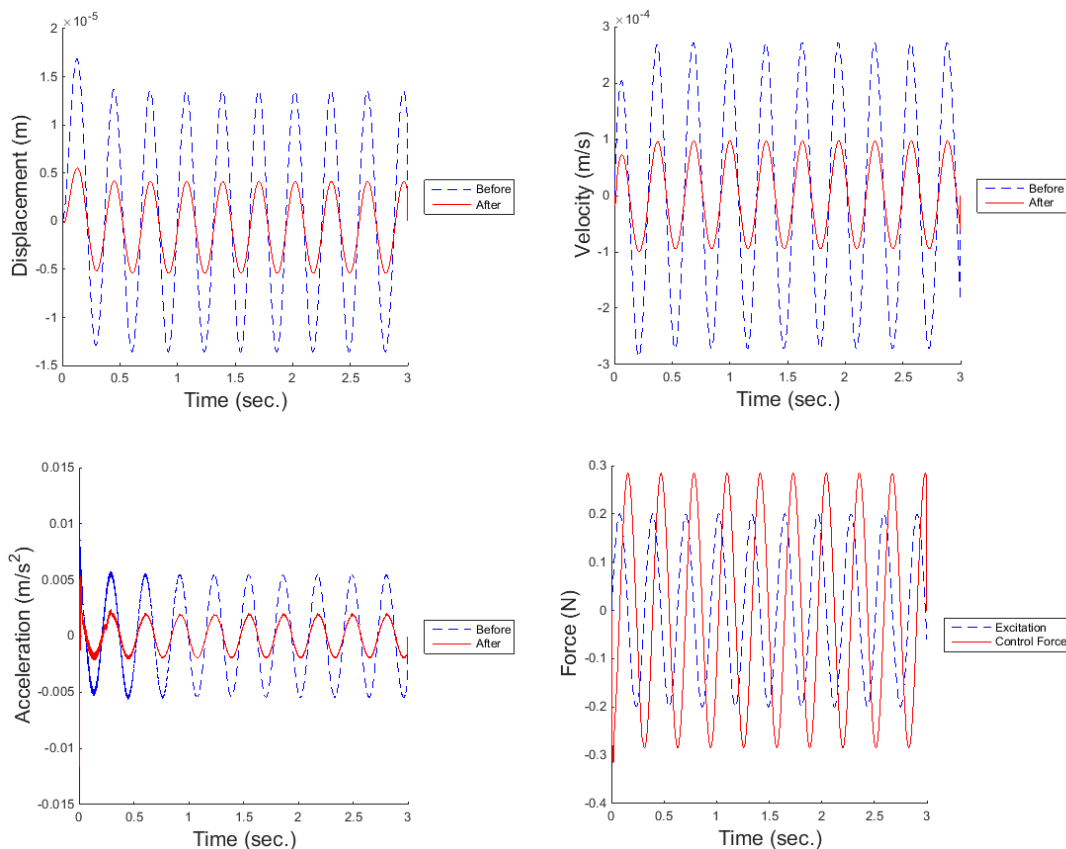
Παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής έχει μία αρκετά αποδοτική συμπεριφορά χωρίς όμως αυτή να πλησιάζει τα αποτελέσματα των παραπάνω διερευνήσεων του μηχανικού συστήματος. Τα ποσοστά της μείωσης που μπορούν να επιτευχθούν είναι της τάξης του 62.97%, 62.94% και 53.77% για την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση αντίστοιχα.

6.2.2 Αποτελέσματα χωρίς αποκόλληση με βελτιστοποίηση

Ένας από τους βασικότερους στόχους ήταν να δημιουργηθεί ένας ελεγκτής ο οποίος να μειώνει όσο το δυνατόν περισσότερο την ταλάντωση και στη συνέχεια να είναι όσο το δυνατόν πιο αποδοτικός στην περίπτωση της αποκόλλησης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε γενετικός αλγόριθμος ώστε να ρυθμιστούν οι παράμετροι του ελεγκτή, με σκοπό να επιτευχθεί η μεγάλη μείωση της ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα του ελεγκτή παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα του ελέγχου με τον νέο βελτιστοποιημένο ελεγκτή.



Εικόνα 40: Διακριτοποιημένη πλάκα χωρίς αποκόλληση

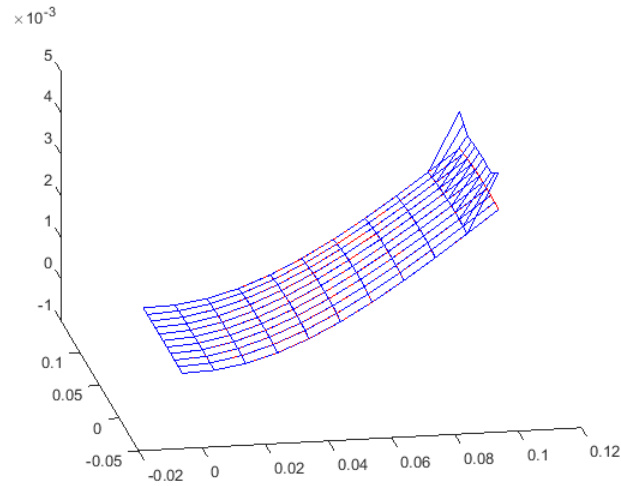


Εικόνα 41: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

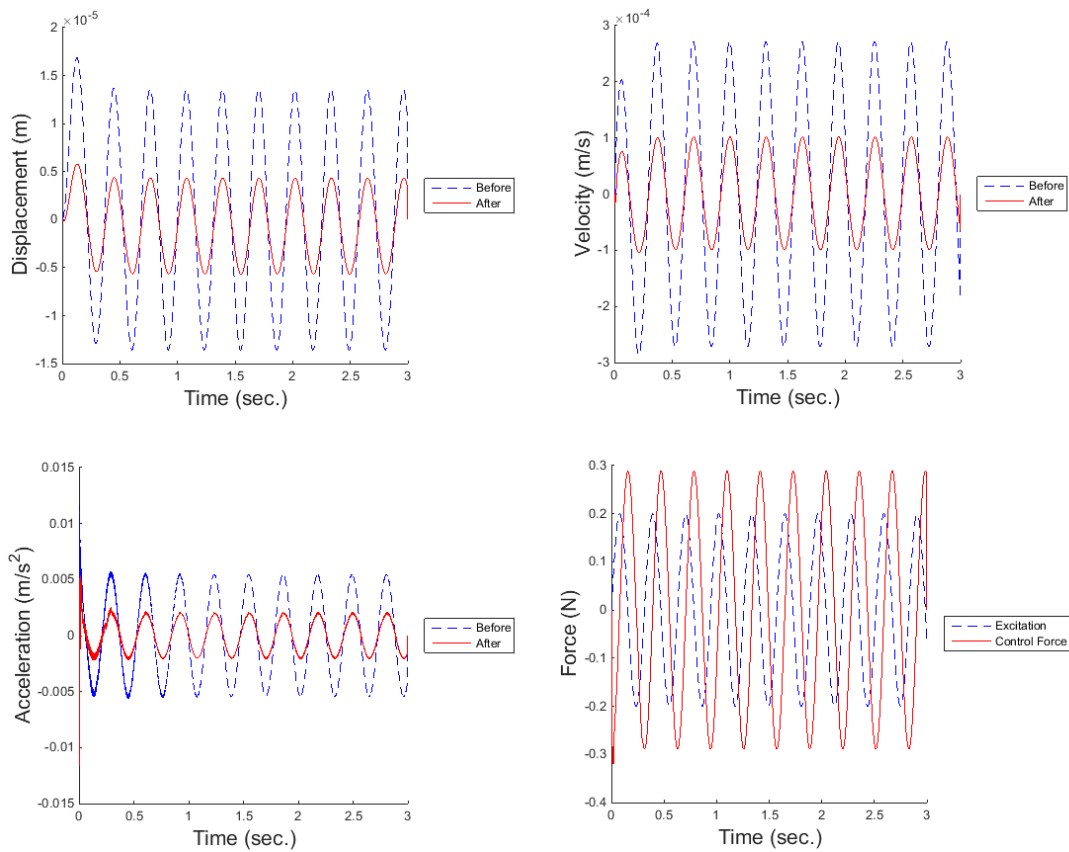
Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι έχει μία σχετικά πολύ μικρή βελτίωση αφού πλέον η μείωση της μετατόπισης είναι της τάξης του 69.09%, της ταχύτητας 64.62% και της επιτάχυνσης 60.10%. Επιπλέον παρατηρούμε ότι η γραφική της επιτάχυνσης έχει εξομαλυνθεί σε σχέση με την προηγούμενη επίλυση η οποία παρουσίαζε κάποια μικρά χτυπήματα. Παρόλα αυτά ο γενετικός δεν παρουσιάζεται να έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του ελεγκτή όπως έχει επιτευχθεί στο μηχανικό μοντέλο[29].

6.2.3 Αποκόλληση 10%

Επόμενη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε είναι η συμπεριφορά του αλγορίθμου με 10% αποκόλληση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπου εξακολουθούν να είναι ικανοποιητικά.



Εικόνα 42: Διακριτοποιημένη πλάκα με 10% αποκόλληση

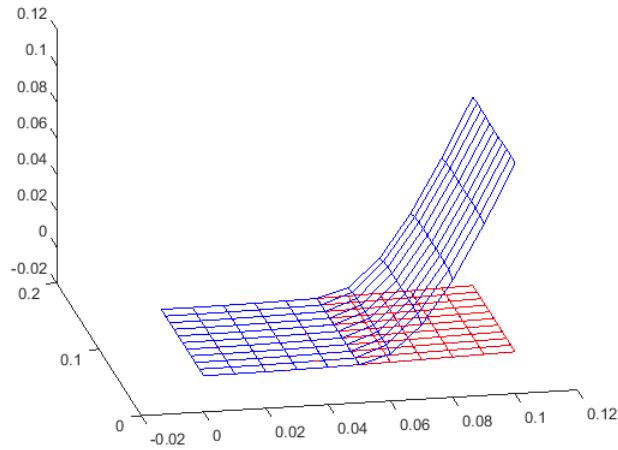


Εικόνα 43: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

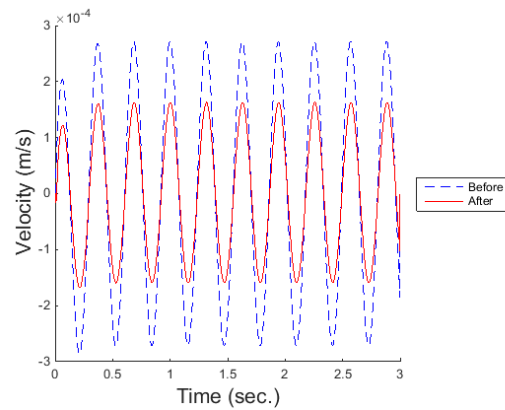
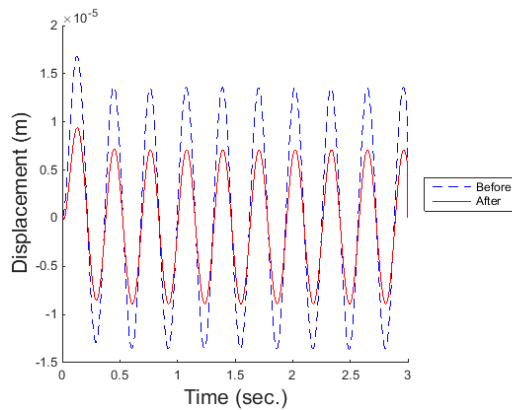
Συγκεκριμένα, η μετατόπιση μειώθηκε κατά 62.38%, η ταχύτητα κατά 62.92% και η επιτάχυνση κατά 58.68%. Η αποκόλληση εμφανίζει επιδράσεις στον ελεγκτή αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον παρατηρούμε ότι βρίσκεται πολύ κοντά στα ποσοστά του ελεγκτή πριν βελτιστοποιηθεί.

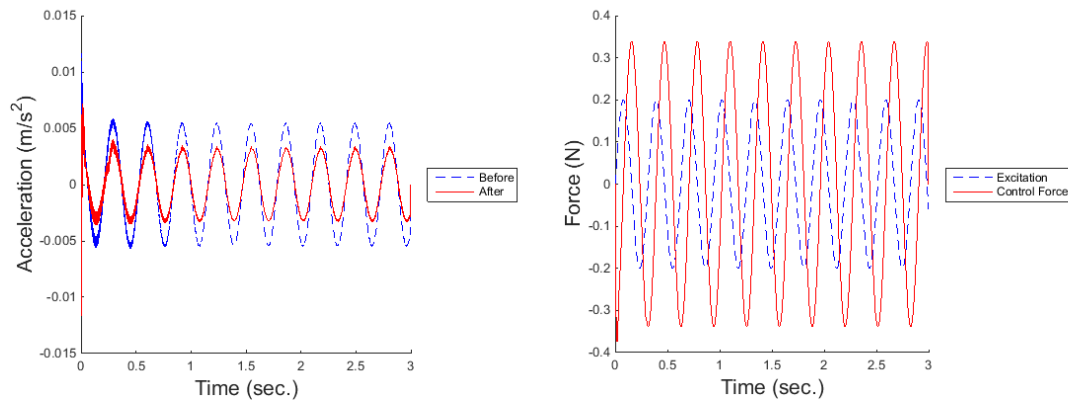
6.2.4 Αποκόλληση 50%

Έπειτα από μία σειρά επιλύσεων, παρατηρήθηκε ότι το σύστημα εξακολουθεί να λειτουργεί αρκετά ικανοποιητικά για το λόγο αυτό δεν παρατίθεται άλλο αποτέλεσμα ως ότου η αποκόλληση να φτάσει το 50%. Σε αυτή την έκταση της αποκόλλησης στην οποία ουσιαστικά το φύλλο του διεγέρτη αποκολλάται κατά το ήμισυ, αρχίζουν να υπάρχουν σημαντικές επιδράσεις στο σύστημα ελέγχου.



Εικόνα 44: Διακριτοποιημένη πλάκα με 50% αποκόλληση



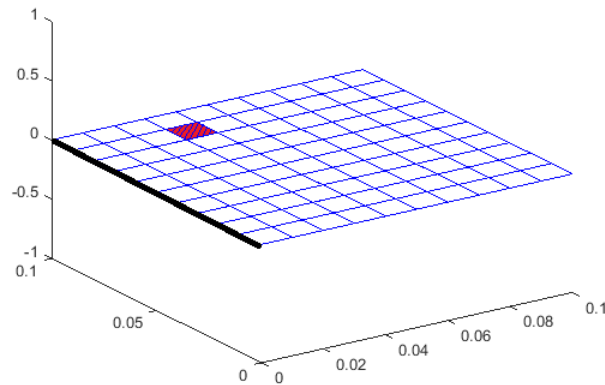


Εικόνα 45: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

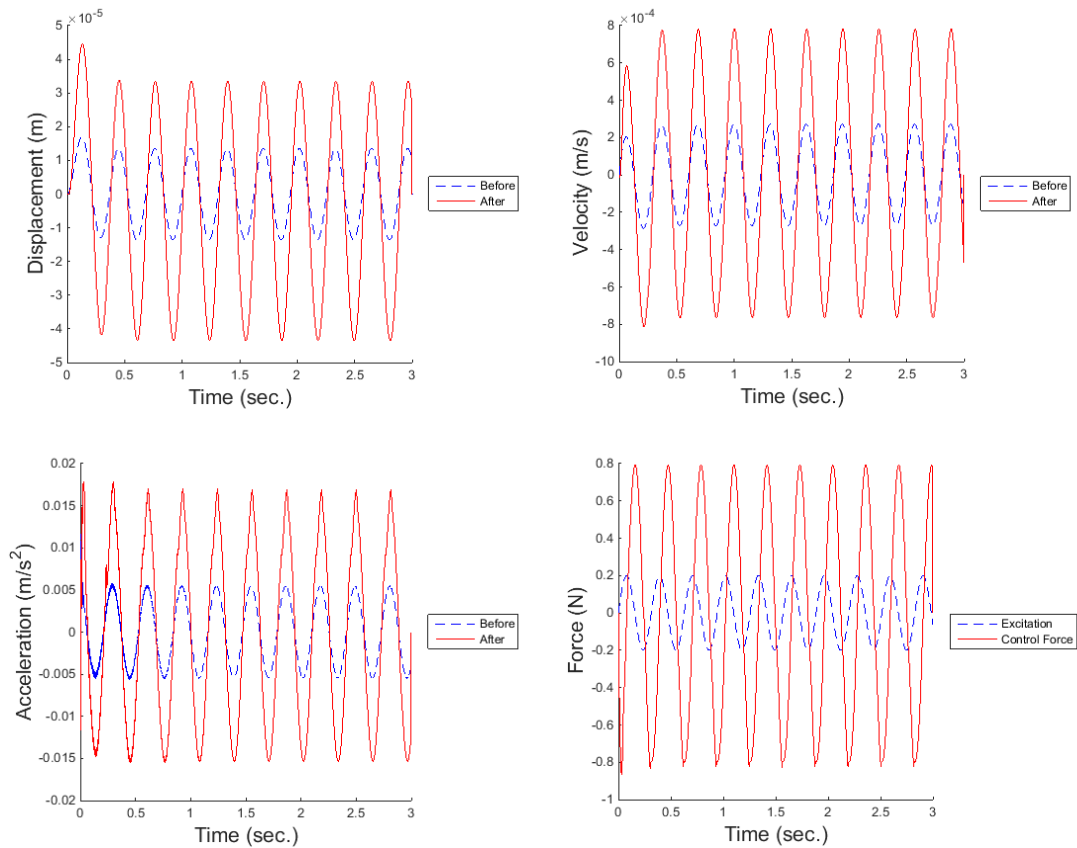
Όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα, η μορφή της ταλάντωσης παραμένει αρκετά ικανοποιητική, αλλά τα ποσοστά μείωσης έχουν αλλάξει κατά πολύ σε σχέση με προηγούμενες διερευνήσεις. Διαφοροποιήσεις που αγγίζουν την τάξη του 30%-40%. Συγκεκριμένα, η μείωση της μετατόπισης είναι πλέον στο 39.88%, η ταχύτητα το 40.615 και η επιτάχυνση το 33.71%. Παρόλα αυτά και πέραν της εκτεταμένης αυτής αποκόλλησης ο ελεγκτής εξακολουθεί να λειτουργεί ικανοποιητικά.

6.2.5 Αποκόλληση Collocated actuator

Από τη στιγμή που το πιεζοηλεκτρικό στρώμα ξεκίνησε να αποκολλάται πέραν του 50%, ο ελεγκτής ξεκίνησε να έχει από μη ικανοποιητική λειτουργία, μέχρι που δεν λειτουργούσε καθόλου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δημιουργήθηκε σχετικά με το τι θα συνέβαινε στην περίπτωση που θα γίνει αποκόλληση ,ενός συγκεκριμένου πεπερασμένου στοιχείου, του διεγέρτη στην περιοχή που από το κάτω στρώμα έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας. Συγκεκριμένα, τι θα συμβεί αν έχουμε αποκόλληση της άνω στρώσης του πεπερασμένου στοιχείου από το οποίο παίρνουμε τις μετρήσεις για τον έλεγχο μας. Η απεικόνιση της περιοχής που αποκολλάται φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπως και τα αποτελέσματα του ελέγχου.



Εικόνα 46: Διακριτοποιημένη πλάκα όπου η αποκόλληση παρατηρείται στο στοιχείο που λαμβάνονται και οι μετρήσεις (κόκκινο-μπλε γραμμή)



Εικόνα 47: Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου πριν(μπλε) και μετά (κόκκινα) τον έλεγχο

Παρατηρούμε πλέον ότι η ταλάντωση επιβαρύνεται αρκετά και ότι ο ελεγκτής ουσιαστικά επιδρά αρνητικά στην ταλάντωση, αυξάνοντας κατά πολύ το πλάτος της. Μία πιθανή εξήγηση που μπορεί

να δοθεί είναι ότι ουσιαστικά έχουμε μεγάλη αλλοίωση των χαρακτηριστικών του στοιχείου από το οποίο παίρνουμε τις μετρήσεις. Επίσης, έντονες διακυμάνσεις εντοπίστηκαν για αποκόλληση σε οποιαδήποτε περιοχή γύρω από το συγκεκριμένο στοιχείο χωρίς οπωσδήποτε αυτό να έχει υποστεί κάποια αλλοίωση (μερική ή ολική αποκόλληση)

Παρακάτω παρατίθενται ο πίνακας με τα αποτελέσματα της ταλάντωσης του ηλεκτρομηχανικού μοντέλου.

Πίνακας 5: Ποσοστό μείωσης μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης

	0% delamination		with delamination		
Percentage of reduction	No optimization	Memb. Fcn. optimization	10% delamination	50% delamination	Collocated actuator delamination
Displacement	62.97%	69.09%	62.38%	39.88%	-188.94%
Velocity	62.94%	64.62%	62.92%	40.61%	-195.82%
Acceleration	53.77%	60.10%	58.68%	33.71%	-193.85%

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η δημιουργία και ανάλυση ενός συστήματος ελέγχου, με τη χρήση ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής ο οποίος θα υπόκειντο σε βελτιστοποίηση με σκοπό την βέλτιστη απόδοση του. Κύριο χαρακτηριστικό του συστήματος μας ήταν ότι η κατασκευή μπορεί να αποκολληθεί. Οι περιπτώσεις οι οποίες εξετάστηκαν ήταν πολλές και τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν αρκετά.

Αρχικά, συμπεραίνουμε ότι το φαινόμενο της αποκόλλησης, ειδικά σε περίπτωση που στην κατασκευή εφαρμοστεί ένα αρχικό εξωτερικό φορτίο, παρουσιάζει πολύ ασταθή συμπεριφορά. Το παραπάνω συμπέρασμα προέκυψε έπειτα από μία στατική ανάλυση. Η επίλυση ενός δυναμικού προβλήματος είναι πιο σύνθετη σε σχέση με ένα στατικό, για αυτό το λόγο θα είναι πολύ πιο δύσκολο να βρεθεί μία δύναμη διέγερσης τέτοια ώστε σε ένα δυναμικό πρόβλημα το φαινόμενο της αποκόλλησης να εμφανίζεται σταδιακά και όχι να έχουμε ολική αποκόλληση.

Ένα δεύτερο συμπέρασμα, αφορά την χρησιμότητα ή μη της βελτιστοποίησης των παραμέτρων του ελεγκτή με χρήση του γενετικού αλγορίθμου. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η χρήση του μπορεί να χαρακτηριστεί από ικανοποιητική έως καθοριστική. Στο μεν μηχανικό μοντέλο, μπορούν να επιτευχθούν αποτελέσματα που ουσιαστικά φέρνουν σε ισορροπία την κατασκευή, στο δε ηλεκτρομηχανικό μοντέλο, έχει μία μικρή θετική επίδραση στην κατασκευή, όσον αφορά την μείωση της ταλάντωσης, αλλά μπορεί να βοηθήσει στην πιο ομαλή συμπεριφορά της.

Στην συνέχεια, ένα ακόμα συμπέρασμα που εξάγεται για το μηχανικό μοντέλο είναι ότι η συμπεριφορά του ελεγκτή παραμένει εξαιρετική ακόμα και σε συνθήκες μεγάλης έκτασης αποκόλλησης. Βέβαια, είναι μία περίπτωση στην οποία όσον αφορά τη δύναμη ελέγχου, η αποκόλληση δεν παίζει κάποιο ρόλο γιατί ο κόμβος που εφαρμόζεται παραμένει ο ίδιος. Η μοναδική παράμετρος που επηρεάζει το σύστημα ελέγχου του μηχανικού μοντέλου είναι η

μεταβολή του μητρώου δυσκαμψίας. Αλλά σε αυτή τη περίπτωση ο ελεγκτής ασαφούς λογικής δείχνει ότι μπορεί να προσαρμοστεί άριστα.

Τέλος, όσον αφορά το συζευγμένο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο, το οποίο ουσιαστικά είναι το ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου το οποίο θέλαμε να επιτύχουμε, παρουσιάζει κάποια αρκετά ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Αρχικά, με βάση τους 2 παραπάνω πίνακες (μηχανικού),(ηλεκτρ), παρατηρούμε ότι η απόδοση αυτού του μοντέλου είναι λιγότερο ικανοποιητική σε σχέση με το μηχανικό. Πράγματι, είναι λογικό αποτέλεσμα το παραπάνω μίας και τα πιεζοηλεκτρικά μπορούν να αποδώσουν μέχρι ένα σημείο, όπου στην περίπτωση μας μπορούν να δεχτούν ή να αποδώσουν τάση των 200V. Σε περίπτωση που ρυθμίζαμε τον ελεγκτή να αποδώσει παραπάνω θα είχαμε αλλοίωση του πιεζοηλεκτρικού. Αντίθετα, στο μηχανικό μοντέλο το μέγεθος της δύναμης έχει οριστεί εξ αρχής κοντά σε επιθυμητά αποτελέσματα. Ένα ακόμα χρήσιμο συμπέρασμα είναι η απόδοση του ελεγκτή στην διάρκεια των αποκολλήσεων. Φαίνεται ότι όσο επεκτείνεται η αποκόλληση, η απόδοση του ελέγχου μειώνεται αλλά μέχρι ένα σημείο παραμένει ικανοποιητική. Μετά από την αποκόλληση του 50% πλέον ο ελεγκτής αρχίζει να γίνεται μη αποδοτικός μέχρι που σταματά η λειτουργία του. Τελευταίο και ίσως πιο σημαντικό συμπέρασμα για το ηλεκτρομηχανικό μοντέλο αφορά την περίπτωση αποκόλλησης στο στοιχείο από το οποίο λαμβάνονται και οι μετρήσεις του αισθητήρα. Παρατηρήθηκε ότι αν υπάρξει οποιαδήποτε αλλοίωση του συγκεκριμένου στοιχείου, ακόμα και αν όλη η υπόλοιπη κατασκευή διατηρείται σε άρτια κατάσταση, τότε υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις του συστήματος ελέγχου οι οποίες τον καθιστούν μη ικανοποιητικό και επικίνδυνο για την κατασκευή.

Μελλοντικές εργασίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν σαν επέκταση της παραπάνω εργασίας είναι οι εξής.

- Έλεγχος συμπεριφοράς του ελεγκτή, πλέον όχι στο πεδίο του χρόνου αλλά στο πεδίο των συχνοτήτων. Θα είχε ενδιαφέρον να δούμε αν και πως αποδίδει το ηλεκτρομηχανικό μοντέλο σε περίπτωση που βρεθεί κοντά σε περιοχή ιδιοτιμών-ιδιοσυχνοτήτων.
- Μελέτη απόκρισης του συστήματος για σταδιακή αποκόλληση ενός πεπερασμένου, κυρίως στην περιοχή που έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας.
- Με το υπάρχον ηλεκτρομηχανικό μοντέλο, μπορούν πλέον να ξεκινήσουν μελέτες και σε άλλους τομείς πέραν του ελέγχου, που αφορούν έλεγχο βλαβών κτλ.
- Με χρήση εργαλείων τοπολογικής βελτιστοποίησης τα οποία έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο, θα μπορούσε να διαμορφωθούν ο αισθητήρας και ο διεγέρτης για πιθανόν ακόμα καλύτερη απόδοση [35]

Βιβλιογραφία

- [1] L. Qu, Y. Huang, L. Ling, “Design of Intelligent PID Controller Based on Adaptive Genetic Algorithm and Implementation of FPGA” in “Advances in Neural Networks. 5th International Symposium on Neural Networks, ISNN 2008, Beijing, China, September 24-28, 2008, Proceedings, Part II”, Springer, Berlin Heidelberg, 2008
- [2] G.K. Tairidis, G.E. Stavroulakis, D.G. Marinova and E.C. Zacharenakis, “Classical and soft robust active control of smart beams”, in: M. Papadrakakis et al. eds, “Computational Structural Dynamics and Earthquake Engineering”, CRC Press, Balkema and Taylor & Francis, London, Ch. 11, 165-178, 2009
- [3] I.G. Damousis, K.J. Satsios, D.P. Labridis, P.S. Dokopoulos, “Combined fuzzy logic and genetic algorithm techniques-application to an electromagnetic field problem”, Elsevier, Fuzzy Sets and Systems 129, 371–386, 2002
- [4] S. Pourzeynali, H.H. Lavasani, A.H. Modarayi, “Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms”, EngStruct29, 346–357, 2007
- [5] C.L. Karr, E.J. Gentry, “Fuzzy control of pH using genetic algorithms”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Volume 1, Issue 1, 46-53, 1993
- [6] K. Belarbi, F. Titel, “Genetic algorithm for the design of a class of fuzzy controllers: An alternative approach”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Volume 8, Issue 4, 398-405, 2000
- [7] F. Herrera, M. Lozano, J.L. Verdegay, “Tuning fuzzy logic controllers by genetic algorithms”, Elsevier, International Journal of Approximate Reasoning vol. 12, 299-315, 1995
- [8] R. Martinez-Soto, O. Castillo, L.T. Aguilar, P. Melin, “Fuzzy Logic Controllers Optimization Using Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization”, Springer, Advances in Soft Computing, Lecture Notes in Computer Science Volume 6438, 475-486, 2010
- [9] G. Tairidis, G. Foutsitzi, G. Tsagkaris, G.E. Stavroulakis, “Fuzzy Control for Vibration Suppression of Smart Plates”, in B.H.V. Topping, P. Iványi, (Editors), “Proceedings of the Twelfth International Conference on Computational Structures Technology”, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 60, 2014
- [10] V. Kumar, D. Chhabra, “Design of Fuzzy Logic Controller for Active Vibration Control of Cantilever Plate with Piezo-Patches As Sensor/Actuator”, International Journal of Emerging Research in Management & Technology, 34-44, 2013
- [11] A. D. Muradova, G. E. Stavroulakis, “Fuzzy Vibration Control of a Smart Plate”, Taylor & Francis, International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 14:3, 212-220, 2013
- [12] A. Hossain Nezhad Shirazi, H. R. Owji, M. Rafeeyan, “Active Vibration Control of an FGM Rectangular Plate using Fuzzy Logic Controllers”, Elsevier, The Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction - EASEC12, Volume 14, 3019–3026, 2011
- [13] Foutsitzi, G. A., Stavroulakis, G. E. and Hadjigeorgiou, E., Modelling and Simulation of Smart Structures, Proceedings of the 9th International Congress on Mechanics, 9th HSTAM, Limassol, Cyprus, 12 – 14 July, 2010
- [14] G.K Tairidis, G.E. Stavroulakis, D.G. Marinova and E.C. Zacharenakis, “Classical and soft robust active control of smart beams,” ECCOMAS Thematic Conference on Computational

- Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Rethymno, Crete, Greece, 13-16 June, 2007
- [15] Georgios K Tairidis, Georgia A. Foutsitzi, Panagiotis Koutsianitis, Georgios Drosopoulos and Georgios E. Stavroulakis, Design and testing of Fuzzy Controllers on Smart Structures in the Presence of Delamination, The Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing to be held in Prague, Czech Republic 1-4 September 2015.
 - [16] Lin C-C, Haung H-N (1999), "Vibration Control of Beam-Plates with bonded Piezoelectric Sensors and Actuators", *Comp. Struct.* 73, pp. 239-248.
 - [17] Erturk, C.L. and Tekinalp O. (2005) "A layer wise approach to piezoelectric plates accounting for adhesive and delaminated regions", *Comp. Struct.* 83, pp. 279-296.
 - [18] Sun, D. and Tong, L. (2004) "Adhesive element modelling and weighted static shape control of composite plates with piezoelectric actuator patches" *Int. J. Num. Meth Engng* 60, pp. 1911-1932.
 - [19] Reddy JN. On laminated composite plates with integrated sensors and actuators. *Eng Struct* 1999;21:568–593.
 - [20] Stavroulakis GE, Antes H. Transient dynamic analysis in layered structures with unilateral interfaces. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Special Issue on Nonsmooth Mechanics*, Eds. F. Pfeiffer 2001;359:2541-2556.
 - [21] Stavroulakis GE, Mistakidis ES. Hemivariational inequality modelling of hybrid laminates with unidirectional composite constituents. *AIAA J* 2000;38(4):680-686.
 - [22] Fremond M. *Non-smooth-thermomechanics*. Springer, 2002.
 - [23] Mistakidis ES, Stavroulakis GE. *Nonconvex optimization in mechanics*. Springer, 1998.
 - [24] J Drosopoulos GA, Wriggers P, Stavroulakis GE. A multi-scale computational method including contact for the analysis of damage in composite materials. *Comput Mater Sci* 2014;95:522-535.
 - [25] Wriggers P, Zavarise G, Zohdi TI. A computational study of interfacial debonding damage in fibrous composite materials. *Comput Mater Sci* 1998;12:39-56.
 - [26] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrak, *An introduction to fuzzy control* 2nd ed., Springer Verlag, New York, 1996
 - [27] H.J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and its Applications*, Kluwer, Boston, USA, 1996
 - [28] C.C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller - Part I", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Volume 20, Issue 2, 404-418, 1990
 - [29] G. Tairidis, G. Foutsitzi, P. Koutsianitis and G.E. Stavroulakis Fine tuning of a Fuzzy Controller for Vibration Suppression of Smart Plates using Genetic Algorithms, *Advances in Engineering Software*, Elsevier, DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.019
 - [30] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, New York, 1996
 - [31] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989
 - [32] Ι. Νικολός, «Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγόριθμους», Μηχανικοί Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης, παρουσιάσεις μεταπτυχιακού μαθήματος.
 - [33] Foutsitzi G, Marinova D, Stavroulakis GE, Hadjigeorgiou E. Vibration Control analysis of smart Piezoelectric Composite Plates. CD-ROM Proceedings of 2nd International Conference "From Scientific Computing to Computational Engineering" (IC-SCCE), Athens, 5-8 July, 2006

- [34] Ταϊρίδης Γεώργιος, Προσομοίωση σύνθετων ευφών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύνδεση με ευφείς μεθόδους ελέγχου, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2009.
- [35] Καμινάκης Νικόλαος, «Topology optimization of polymorphic structures and mechanisms using global and multicriteria optimization», Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2015