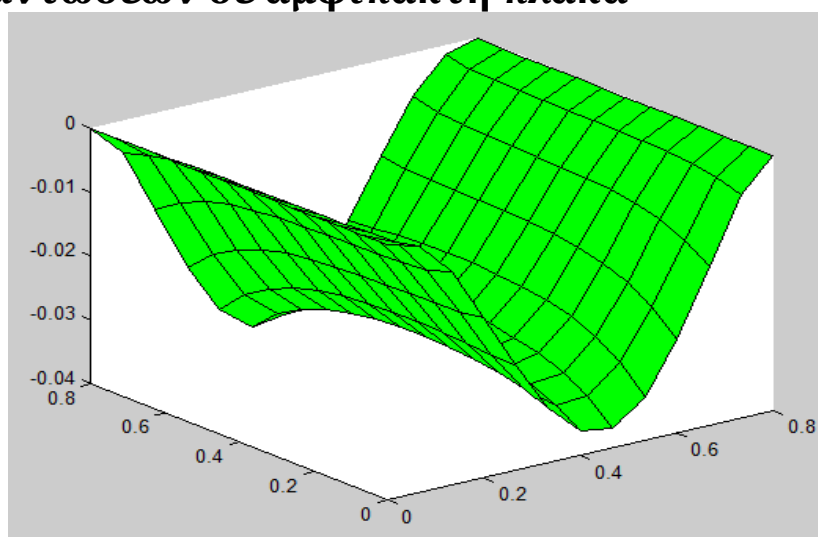




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής & Βελτιστοποίησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εφαρμογή ασαφούς ελέγχου για τον περιορισμό των
ταλαντώσεων σε αμφίπακτη πλάκα**



Επιμέλεια: Πανιεράκης Γεράσιμος

Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Χανιά, Ιανουάριος 2016

Ευχαριστίες

Για την υλοποίηση της ακόλουθης διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, ο οποίος επέβλεπε την εργασία καθ' όλη τη διάρκειά της. Επίσης, θα ήθελα ευχαριστήσω πάρα πολύ τον κ. Γεώργιο Ταϊρίδη, υποψήφιο διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης, για το χρόνο τον οποίο αφιέρωσε για την επίλυση διαφόρων αποριών και για την αστείρευτη προθυμία του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Γεράσιμος Πανιεράκης

Χανιά, Ιανουάριος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2. ΜΟΡΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ.....	4
2.1 Συμβατικός Έλεγχος (Κλασσικός).....	4
2.2 Μη-συμβατικός Έλεγχος (Πρακτικός).....	4
2.3 Ευφυής Έλεγχος	5
2.4 Ασαφής έλεγχος και ασαφής λογική.....	7
2.5 Δομή Ασαφούς Ελεγκτή.....	8
3. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	11
3.1. Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	11
3.2. Πιεζοηλεκτρικά ελάσματα	11
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΗ.....	13
4.1. Μοντέλο σύνθετης πλάκας.....	13
4.2. Περιγραφή προβλήματος	14
4.3.Δομή ασαφούς ελεγκτή πλάκας	15
4.4. Αριθμητική ολοκλήρωση με χρήση μεθόδου Houbolt.....	19
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	21
5.1 Αποτελέσματα ως προς την άκρη (κόμβος 163)	23
5.1.1 Περίπτωση ενός ελεγκτή στον κόμβο 163.....	23
5.1.2 Περίπτωση δυο ελεγκτών στους κόμβους 7 και 163.....	27
5.2 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 124.....	29
5.2.1 Περίπτωση δυο ελεγκτών στους κόμβους 46 και 124.....	29
5.3 Αποτελέσματα ως προς τη μέση (κόμβος 85)	30
5.3.1 Περίπτωση ενός ελεγκτή στον κόμβο αναφοράς (κόμβος 85)	31
5.3.2 Περίπτωση τριών ελεγκτών στους κόμβους 7, 85, 163	37
6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	41
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	42
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (Περιγραφή αλγορίθμου αριθμητικής ολοκλήρωσης).....	44

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μηχανικές κατασκευές, ένα από τα σημαντικά ζητήματα στα οποία καλούνται οι μηχανικοί να δώσουν λύση, είναι ο έλεγχος των ταλαντώσεων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία για το σκοπό αυτό, μελετάται ο έλεγχος με εφαρμογή ασαφών τεχνικών ελέγχου.

Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή την εργασία θα εξετάσουμε σε προγραμματιστικό περιβάλλον το μηχανικό μοντέλο μιας αμφίπακτης πλάκας, δηλαδή μιας πλάκας πακτωμένης στις δυο απέναντι πλευρές της. Η πλάκα αυτή είναι διακριτοποιημένη με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την καλύτερη-ακριβέστερη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Για τη δημιουργία ταλαντώσεων στο μηχανικό μοντέλο μας, θα δημιουργήσουμε ημιτονοειδείς φορτίσεις για τις οποίες θα επιλέξουμε τον τρόπο εφαρμογής τους. Επομένως, εφόσον δημιουργήσουμε ταλαντώσεις μέσω των φορτίσεων, στόχος και βασικό κομμάτι της εργασίας αυτής είναι να μπορέσουμε με κατάλληλο έλεγχο να παρέμβουμε σε αυτές τις ταλαντώσεις μειώνοντάς τις. Με λίγα λόγια, πειραματιζόμενοι, θα προσπαθήσουμε να καταλάβουμε με ποιο τρόπο μπορούμε να πετύχουμε αποτελεσματικότερη εξομάλυνση των ταλαντώσεων.

Για την επίτευξη την επίτευξη αυτού του στόχου θα χρησιμοποιήσουμε την επιστήμη της ασαφούς λογικής με βάση την οποία κατασκευάζεται ένας ασαφής ελεγκτής. Ειδικότερα, θα χρησιμοποιήσουμε τον ασαφή ελεγκτή τον οποίο κατασκεύασε ο κ. Γεώργιος Ταϊρίδης στα πλαίσια της διπλωματικής του διατριβής [1] για τον έλεγχο ταλαντώσεων σε μηχανικό μοντέλο δοκού. Τροποποιώντας σε μικρό βαθμό τις παραμέτρους του ελεγκτή, καταφέραμε να τον προσαρμόσουμε στο υπό εξέταση μοντέλο της σύνθετης πλάκας και χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης να πετύχουμε αρκετά ικανοποιητική μείωση των ταλαντώσεων της αμφίπακτης πλάκας. Το προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο έλαβαν χώρα τα ακόλουθα πειράματα είναι αυτό της Matlab.

Η παρούσα εργασία έγινε υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του καθηγητή του τμήματος μηχανικών παραγωγής και διοίκησης του πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιου Σταυρουλάκη.

2. ΜΟΡΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ

2.1 Συμβατικός Έλεγχος (Κλασσικός)

Για πολλά χρόνια, ο τρόπος ελέγχου στη βιομηχανία γινόταν βάση ποσοτικών περιγραφών οι οποίες οδηγούσαν στην κατασκευή συσκευών ελέγχου. Είναι γεγονός, ότι ακόμα και στις μέρες μας, παρά τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας και την πρόοδο σε συστήματα ελέγχου, η βάση του βιομηχανικού ελέγχου δε παύει να είναι η γνώση, η εμπειρία και οι αντίληψη των ανθρώπων που είναι σχετικοί με το αντικείμενο, όπως οι χειριστές μηχανημάτων. Σκοπός αυτών των ανθρώπων είναι η αξιοποίηση των τριων αυτών χαρακτηριστικών τους, με στόχο τη βέλτιστη ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος και τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας της παραγωγικής διαδικασίας.

Η συγκεκριμένη μορφή ελέγχου, η οποία ονομάζεται **συμβατικός έλεγχος**, λειτουργεί εξετάζοντας μακροσκοπικά την παραγωγική διαδικασία, γεγονός που αρκετές φορές δημιουργεί δυσχέρειες στην εξαγωγή σωστού αποτελέσματος. Ένα παράδειγμα τέτοιου τύπου ελέγχου είναι οι *ελεγκτές πεδίου τριων όρων (PID)* οι οποίοι για να επιτύχουν το στόχο τους απαιτείται ο σωστός συντονισμός τους. Οι ελεγκτές αυτοί τοποθετούνται στις περισσότερες *τερματικές μονάδες ελέγχου (RTU)* και ο συντονισμός τους συνήθως γίνεται εμπειρικά εντός γραμμής βάσει προσεγγιστικών προτύπων και τεχνικών συντονισμού.

Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μορφής ελέγχου, είναι σημαντικό να υπάρχει μικροσκοπικό πρότυπο της διαδικασίας ελέγχου, γεγονός που συνήθως δε συμβαίνει στην πράξη λόγω του αβέβαιου και ασαφούς περιβαλλοντικού περιβάλλοντος.

2.2 Μη-συμβατικός Έλεγχος (Πρακτικός)

Λόγω των μειονεκτημάτων του συμβατικού ελέγχου, εδώ και αρκετά χρόνια, η βιομηχανία αναζήτησε τεχνικές ελέγχου τέτοιες ώστε να ενισχυθούν οι συμβατικές τεχνικές. Ως συνέπεια της τεχνολογικής προόδου και της ανάπτυξης υπολογιστικών συστημάτων τα οποία παρέχουν ταχύτατη και αξιόπιστη λειτουργία, συνδιάστηκαν οι παλιές με τις νέες τεχνικές δημιουργώντας ένα νέο είδος ελέγχου, τον **πρακτικό έλεγχο**.

Εν συνεχεία, η ανθρώπινη ευφυΐα όπως και η εξαγωγή συμπερασμάτων σε πολύπλοκα συστήματα ελέγχου απασχόλησαν τον βιομηχανικό τομέα. Για την εξέλιξη αυτής της ιδέας συνέβαλλαν γνώσεις από πολλές ειδικότητες όπως η νευρολογία, η ψυχολογία, η επιχειρησιακή έρευνα, η θεωρία συμβατικού ελέγχου, η βιομηχανική πληροφορική και οι επικοινωνίες. Έτσι δημιουργήθηκαν νέες έννοιες όπως η *ασάφεια (fuzzy)*, ο *επαγωγικός συλλογισμός (inductive reasoning)* και ο *συνδεδεισμός (parallel distributed processing)* ορίζοντας ένα σύνολο που ονομάστηκε *Εύκαμπτη Πληροφορική (soft computing)*.

Οι ελεγκτές οι οποίοι πραγματοποιούν τέτοιους τύπους ελέγχου ονομάστηκαν ευφυείς ελεγκτές, όπου δέχονται εισόδους (αιτίες) και παράγουν εξόδους (συμπεράσματα ή αποφάσεις) με τους δυο ακόλουθους τρόπους.

- **Άμεσα** από τη σχέση εισόδων-εξόδων της υπο-έλεγχου διαδικασίας μέσω ενός αλγορίθμου συσχέτισης, ή ενός πίνακα συσχέτισης ή μιας βάσης λεκτικών κανόνων¹.
- **Έμμεσα**, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο υποδειγμάτων μάθησης.

Ο χαρακτηρισμός ενός συστήματος ως ευφυές γίνεται ανάλογα με την ικανότητά του να συμπεραίνει τη δράση ελέγχου από εμπειρικές υποδείξεις και χωρίς αναφορά σε μικροσκοπικά πρότυπα της ελεγχόμενης διαδικασίας, διαφορά η οποία διαχωρίζει το μη-συμβατικό από το συμβατικό σύστημα.

Ακόμα και με τη χρησιμοποίηση ευφυών ελεγκτών στον τύπο ελέγχου στον οποίο αναφερόμαστε, δηλαδή το μη-συμβατικό, ο ανθρώπινος παράγοντας δεν εξαλείφεται. Αντιθέτως, παραμένει αρκετά σημαντικός αφού είναι υπεύθυνος για το βρόχο μεταξύ ελεγχόμενων μεταβλητών και μεταβλητών ελέγχου. Στόχος του ανθρώπου-χειριστή είναι να επιτύχει αύξηση της παραγωγικότητας με ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, δηλαδή δυο αντίθετες έννοιες. Επομένως, οι δράσεις του ανθρώπου είναι κυρίως εμπειρικές οι οποίες πολλές φορές είναι μη-συστηματικές, υποκειμενικές και λανθασμένες, γεγονός που σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να γίνει και επικίνδυνο.

2.3 Ευφυής Έλεγχος

Στις μέρες μας, όπου η βιομηχανία παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και την ευημερία της ανθρωπότητας, είναι λογικό να παρουσιάζονται αυξημένες απαιτήσεις και αρκετά πολύπλοκα προβλήματα στην επίτευξη σωστού ελέγχου των διαδικασιών που συμβαίνουν σε αυτή. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται τη χρήση προηγμένων και εκλεπτυσμένων ελεγκτών στους οποίους οι συμβατικές τεχνικές ελέγχου δεν είναι ικανές να ανταποκριθούν.

Όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, η τεχνολογικές εξελίξεις οδήγησαν στη δημιουργία των ευφυών ελεγκτών και επομένως των ευφυών συστημάτων. Παρ' όλα αυτά, η ανθρώπινη συμπεριφορά είναι ήταν αυτή που αρκετές φορές είχε αρνητικές επιπτώσεις. Έτσι, αναπτύχθηκε μια νέα λογική, ο **ευφυής έλεγχος (intelligent control)** ο οποίος στοχεύει σε καλύτερα αποτελέσματα από τους προηγούμενους τύπους ελέγχου.

Βασικό στοιχείο του ευφυή (ή νοήμονα) ελέγχου είναι ο ανθρώπινος προσανατολισμός και στόχος είναι η μίμηση μιας επιτυχημένης ανθρώπινης συμπεριφοράς σε καταστάσεις αβεβαιότητας και ξαφνικά προβλήματα, όπου και απαιτείται η λήψη αποφάσεων.

¹Ο ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία περιέχει βάση λεκτικών κανόνων

Όσον αφορά τη βιομηχανία και τον έλεγχο των διαδικασιών σε αυτή, καταλαβαίνουμε τη σημαντικότητα του συγκεκριμένου ελέγχου. Σημαντικό επίσης αποτέλεσμα της νέας τεχνικής είναι ότι οι διαδικασίες και διεργασίες που δεν ήταν δυνατό να ελεγχθούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση τώρα μπορούν να ελέγχονται αυτόματα με τη δημιουργία ενός κατάλληλα προσαρμοσμένου ελεγκτή.

Για τη σωστή προσαρμογή του ελεγκτή, θέλουμε να καταφέρουμε να έχουμε μια συμπεριφορά πανομοιότυπη με την ανθρώπινη στον τρόπο λήψης αποφάσεων, αποφεύγοντας όμως στοιχεία όπως η ασυνέπεια, η αστάθεια, η κόπωση λόγω του απαιτητικού περιβάλλοντος εργασίας. Με λίγα λόγια, στόχος είναι να καταφέρουμε να αποκομίσουμε τα πλεονεκτήματα ενός επιτυχημένου «ανθρώπινου» ελεγκτή με σωστούς κανόνες.

Οι βασικές αρχές ενός εφυσού ελεγκτή είναι οι ακόλουθες.

- **Ορθότητα** : Η ικανότητα εκτέλεσης των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος με ασφάλεια.
- **Ευρωστία** : Η ικανότητα του συστήματος να παραμένει λειτουργικό κάτω από μη αναμενόμενες συνθήκες
- **Επεκτασιμότητα** : Η δυνατότητα επέκτασης του υλικού και του λογισμικού χωρίς επανασχεδίαση του συστήματος από την αρχή.
- **Επαναχρησιμότητα** : Η ικανότητα χρησιμοποίησης του ίδιου λογισμικού σε παρόμοιες εφαρμογές.

Όσον αφορά τον έλεγχο διαδικασιών, η γνώση μπορεί να είναι δομημένη ή μη, ενώ η επεξεργασία είναι πάντοτε αριθμητική. Στην εικόνα 2.2.1 διακρίνεται ένας πίνακας με τη διάταξη των ευφύων συστημάτων σύμφωνα με τον τρόπο επεξεργασίας και την απαραίτητη δομή της γνώσης [2].

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ		
	ΣΥΜΒΟΛΙΚΗ	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
ΔΟΜΗΜΕΝΗ	ΕΜΠΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	ΑΣΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΓΝΩΣΗ		ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΜΗ-ΔΟΜΗΜΕΝΗ		

Εικόνα 2.3.1 Διάταξη των ευφύων συστημάτων σύμφωνα με την επεξεργασία και τη δομή της γνώσης

Εξετάζοντας αρχικά τα έμπειρα συστήματα, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι κατέχουν εξελιγμένες τεχνικές αναζήτησης χρησιμοποιώντας μια βάση κανόνων, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη δημιουργία συγκεκριμένης εξόδου (απόφασης) σε περίπτωση που η συγκεκριμένη κατάσταση δεν περιλαμβάνεται στη βάση αυτή. Έτσι καθίσταται αναγκαία η δημιουργία νέου συστήματος το οποίο θα καλύπτει την παραπάνω ανάγκη. Αυτό επιτυγχάνεται με την υπολογιστική νοημοσύνη, η οποία σε αντίθεση με τα έμπειρα συστήματα, ακόμη και με τη χρήση ελλιπών στοιχείων ή χωρίς την ύπαρξη συγκεκριμένου κανόνα είναι ικανή για την εξαγωγή συμπεράσματος. Βλέποντας και την εικόνα 2.2.1 παρατηρούμε ότι ο συγκεκριμένος τύπος νοημοσύνης περιέχει τα ασαφή και τα νευρωνικά συστήματα, με τους ελεγκτές τους να βασίζονται στην ασαφή λογική και στα τεχνικά νευρωνικά δίκτυα αντίστοιχα. Οι δυο αυτές λογικές είναι η βάση προγραμματισμού των αντίστοιχων ελεγκτών ώστε να χρησιμοποιείται η κάθε μια αναλόγως τις ανάγκες, όπως επίσης είναι εφικτή και η δημιουργία υβριδικών ελεγκτών οι οποίοι συνδιάζουν τις δυο μεθόδους βασιζόμενοι σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για τον υπολογισμό αποφάσεων ελέγχου, αλλά και σε ασαφή σύνολα τα οποία περιγράφουν τους γλωσσικούς κανόνες ελέγχου[3],[4].

2.4 Ασαφής έλεγχος και ασαφής λογική

Όπως έχουμε αναφέρει και στις προηγούμενες παραγράφους, ο βιομηχανικός τομέας τον οποίο εξετάζουμε, απασχολεί χειριστές μηχανημάτων οι οποίοι λειτουργούν χωρίς την τέλεση κάποιου μαθηματικού προτύπου ή αλγορίθμου. Η ικανότητα που διαθέτουν στη λήψη αποφάσεων, επειδή δε μπορεί να χαρακτηριστεί πλήρως αριθμητικά, χαρακτηρίζεται ως «ικανοποιητική» ή «αποδεκτή». Η φράση η οποία μας ενδιαφέρει στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η «αποδεκτή» συμπεριφορά λόγω των αντίξοων συνθηκών της βιομηχανίας, όπου ο όρος «βέλτιστες» λύσεις δεν υφίσταται.

Με λίγα, λόγια αυτό είναι ένα κομμάτι της ασαφούς λογικής. Η ασαφής λογική εισήχθη από τον Lotfi A. Zadeh του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στο Berkeley των ΗΠΑ στα μέσα της δεκαετίας του '60. Η θεωρία της Ασαφούς Λογικής βασίζεται στην προϋπόθεση ότι ο περιβάλλον χώρος απαρτίζεται από στοιχεία που ανήκουν σε διάφορα σύνολα με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Η ασάφεια δημιουργεί μια πλειότιμη έννοια στο χώρο της αβεβαιότητας. Παραδείγματα είναι η αλήθεια, το ψεύδος και οι ενδιάμεσες έννοιες. Η θεωρία της Ασαφούς Λογικής είναι κατάλληλη τόσο για την αναπαράσταση της γνώσης και εμπειρίας, όσο και για τη δημιουργία μηχανισμών συμπερασμού ή συμπερασμάτων που χρησιμοποιούν τη διαθέσιμη κωδικοποιημένη γνώση και τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών της διεργασίας υπό έλεγχο. Η Ασαφής Λογική είναι ένα παράγωγο από την κλασσική

λογική Boolean και εφαρμόζει τις γλωσσικές μεταβλητές πάνω σε μια συνεχή σειρά των τιμών αλήθειας που καθορίζονται μεταξύ του συμβατικού δυαδικού δηλ. [0, 1]. Έτσι, είναι ένα ιδανικό όχημα για την περιγραφή και ανάλυση προσεγγιστικών λογικών μορφών, όπου το αληθές είναι θέμα βαθμού. Μπορεί συχνά να θεωρηθεί υποσύνολο της συμβατικής θεωρίας. Η Ασαφής Λογική είναι ικανή να χειριστεί τις κατά προσέγγιση πληροφορίες με έναν συστηματικό τρόπο και επομένως είναι κατάλληλη για τον έλεγχο μη γραμμικών συστημάτων όπου οι μεταβλητές λαμβάνουν ένα βαθμό συμμετοχής που προκύπτει από τις προκαθορισμένες συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών συνόλων. Όσο πιο μεγάλος είναι ο βαθμός συμμετοχής της μεταβλητής τόσο «πιο πολύ» ανήκει στο ασαφές σύνολο. Τέλος, χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση πολυσύνθετων συστημάτων όπου υπάρχει ένα ανακριβές πρότυπο. Τα οφέλη της λογικής αυτής στη βιομηχανία είναι τα ακόλουθα [5] :

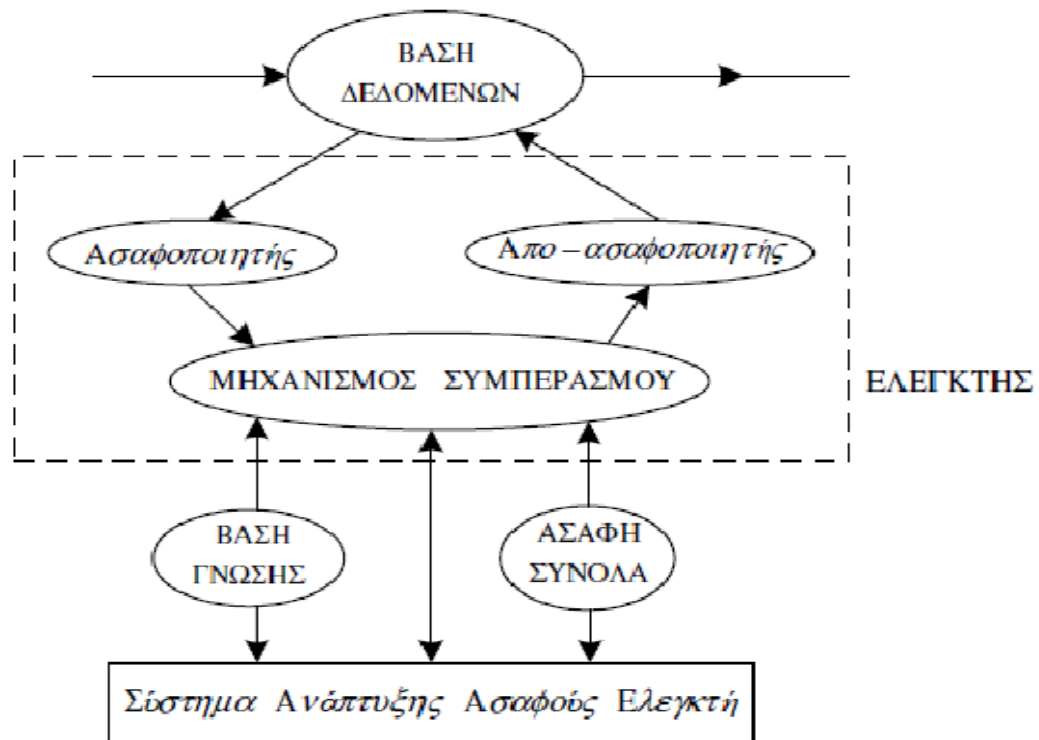
- Απλούστερη και γρηγορότερη μεθοδολογία
- Μειώνει τον κύκλο ανάπτυξης του σχεδιασμού
- Απλοποιεί την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού
- Αποτελεί μια εναλλακτική λύση για τον μη γραμμικό έλεγχο
- Βελτιώνει την απόδοση του ελέγχου
- Μειώνει το κόστος του υλικού
- Έχει απλή εφαρμογή

2.5 Δομή Ασαφούς Ελεγκτή

Ο σχεδιασμός ενός ασαφούς ελεγκτή είναι δυνατός εφόσον ο έλεγχος της διαδικασίας μπορεί να εκφραστεί με λεκτικούς κανόνες οι οποίοι συνδέουν τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας της διαδικασίας με τις απαιτούμενες δράσεις που θα πρέπει να επιβληθούν. Οι κανόνες ελέγχου σε ένα ασαφή ελεγκτή εκφράζονται από ένα σύνολο εξαρτημένων σχέσεων της μορφής:

ΑΝ (κατάσταση της φυσικής διαδικασίας) ΤΟΤΕ (δράση ελέγχου της διαδικασίας) και υλοποιούνται ως λογικές συνεπαγωγές χρησιμοποιώντας τη θεωρία των ασαφών συνόλων.

Τα απαραίτητα δομικά στοιχεία ενός ασαφούς ελεγκτή που φαίνονται στην εικόνα 2.4.1 είναι τα εξής [5]:



Εικόνα 2.4.1 Απαραίτητα δομικά στοιχεία ενός ελεγκτή

1. **η βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου (real-time data base)** όπου μετά από εξομάλυνση καταχωρούνται οι τιμές των μεταβλητών που συλλέγονται από τη φυσική διαδικασία από τις διάφορες τοπικές μονάδες ελέγχου (TME) καθώς και οι έξοδοι του ελεγκτή (δηλαδή οι δράσεις ελέγχου) που κατά τακτά χρονικά διαστήματα μεταφέρονται και πάλι στις TME της διαδικασίας μέσω του τοπικού βιομηχανικού δικτύου. Η βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ως ο κρίκος μεταξύ της φυσικής διαδικασίας και του ελεγκτή.
2. **η βάση γνώσης (knowledge base)** στην οποία είναι καταχωρημένη η κωδικοποιημένη γνώση (δηλαδή οι κανόνες ελέγχου) για τον έλεγχο της διαδικασίας.
3. **τα ασαφή σύνολα (fuzzy sets)** που είναι καταχωρημένα είτε σε αναλυτική ή διακριτή μορφή σε ειδικό αρχείο. Ο μηχανισμός συμπερασμού χρησιμοποιεί τα σύνολα αυτά για να αποδώσει τις πράξεις ελέγχου στη διαδικασία.
4. **το σύστημα ανάπτυξης (development system)** με το οποίο ο μηχανικός γνώσης επικοινωνεί με το περιβάλλον του ελεγκτή.
5. **ο ασαφοποιητής (fuzzifier)** όπου οι φυσικές μεταβλητές της διαδικασίας μετατρέπονται στην γλώσσα των ασαφών συνόλων.
6. **ο μηχανισμός συμπερασμού (inference engine)** ή μηχανισμός συμπερασμάτων όπου συμπεραίνονται οι αποφάσεις ελέγχου βάσει των διαθέσιμων κανόνων σε μορφή ασαφών συνόλων.

7. **ο απο-ασαφοποιητής (defuzzifier)** όπου τα ασαφή σύνολα των εξόδων του ελεγκτή μετατρέπονται σε σαφείς δράσεις ελέγχου προς μετάδοση στους ενεργοποιητές της διαδικασίας μέσω των τοπικών μονάδων ελέγχου.

Ας δούμε τώρα ένα πρακτικό παράδειγμα [6] ασαφούς ελέγχου με τη χρήση ασαφούς ελεγκτή.

Παράδειγμα

Έστω ότι κατασκευάζουμε ένα σύστημα ελέγχου του φρεναρίσματος των αμαξοστοιχιών του μετρό. Εάν επιδιώξουμε να χρησιμοποιήσουμε μαθηματικούς τύπους των κλασσικών συστημάτων ελέγχου θα προκύψουν αρκετά σύνθετοι υπολογισμοί. Για το λόγο αυτό, επιλέγουμε τη χρήση ενός ασαφούς συστήματος όπου οι ενέργειες ελέγχου περιγράφονται με τη χρήση ασαφών κανόνων όπως προαναφέραμε στη δομή του ασαφούς ελεγκτή, δηλαδή της μορφής ΕΑΝ..(αιτία), ΤΟΤΕ..(συμπέρασμα). Επομένως μερικοί από τους κανόνες θα είναι οι ακόλουθοι:

- Εάν η ταχύτητα είναι ΓΡΗΓΟΡΗ και ο επόμενος σταθμός είναι ΚΟΝΤΑ, εφάρμοσε στα φρένα ΜΕΓΑΛΗ πίεση.
- Εάν η ταχύτητα είναι ΑΡΓΗ και ο επόμενος σταθμός είναι ΚΟΝΤΑ, εφάρμοσε στα φρένα ΧΑΜΗΛΗ πίεση.
- Εάν η ταχύτητα είναι ΜΕΤΡΙΑ και ο επόμενος σταθμός είναι ΜΑΚΡΙΑ, εφάρμοσε στα φρένα ΚΑΝΟΝΙΚΗ πίεση.

Σε αυτό το παράδειγμα, έχουμε τρία ασαφή σύνολα. Αρχικά, το ασαφές σύνολο {ΓΡΗΓΟΡΗ, ΑΡΓΗ, ΜΕΤΡΙΑ} κωδικοποιεί την τιμή της μεταβλητής εισόδου «ταχύτητα». Ομοίως, για το ασαφές σύνολο {ΚΟΝΤΑ, ΜΑΚΡΙΑ} κωδικοποιείται η μεταβλητή εισόδου «απόσταση από τον επόμενο σταθμό». Τέλος, το ασαφές σύνολο {ΜΕΓΑΛΗ, ΚΑΝΟΝΙΚΗ, ΜΕΤΡΙΑ} κωδικοποιεί τη μεταβλητή «πίεση στα φρένα». Βεβαίως, τα τρία παραπάνω ασαφή σύνολα συνδέονται μεταξύ τους με συναρτήσεις ώστε να αλληλεπιδρούν δίνοντάς μας το κατάλληλο αποτέλεσμα, οι οποίες θα κατασκευαστούν από έμπειρους και σχετικούς με το αντικείμενο ανθρώπους. Σχετικά με αυτές τις συναρτήσεις, οι οποίες ονομάζονται **συναρτήσεις συμμετοχής** θα ασχοληθούμε εκτενέστερα στο 4^ο κεφάλαιο αυτής της εργασίας.

3. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

3.1. Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ανακαλύφθηκε από τον Πιερ Κιουρί το 1880. Με βάση αυτό το φαινόμενο, κάποια υλικά, κυρίως κρυσταλλικά αλλά και κεραμικά, παρουσιάζουν την ιδιότητα της μετατροπής μιας μηχανικής φόρτισης σε ηλεκτρικό ρεύμα ή και το αντίθετο. Ειδικότερα, όταν στα συγκεκριμένα υλικά ασκούνται καμπτικές ροπές ή φορτίσεις η οποίες προκαλούν ταλαντώσεις, έχουμε παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή αντίστροφα. Σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε με την εφαρμογή τάσης ρεύματος σε πιεζοηλεκτρικά υλικά ώστε να προκαλέσουμε φορτίσεις. Ο πιεζοηλεκτρισμός, οφείλεται στην κρυσταλλική δομή του υλικού όπου παρουσιάζονται ασυμετρίες και προκαλείται από τη μεταφορά ελευθέρων ηλεκτρονίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Μερικά πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το αλάτι Rochelle, θεικό λίθιο (Li_2SO_4) αλλά και τα πιο γνωστά όπως το PZT και το PVDF. Στην εργασία θα θεωρήσουμε ως καταλληλότερο το PZT.

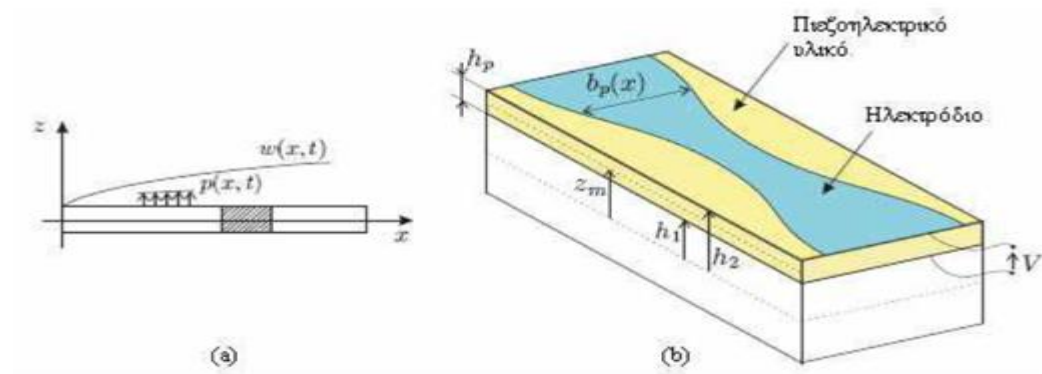
Στην καθημερινότητα, συναντάμε το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ευρύτατα στους σταθεροποιητές της συχνότητας πομπών βραχέων και υπερβραχέων κυμάτων, στα ηλεκτρονικά χρονόμετρα χαλαζία μεγάλης ακρίβειας, στα πιεζοηλεκτρικά ακουστικά όπου τα ηλεκτρικά κύματα μετατρέπονται σε ηχητικά αλλά και στα μικρόφωνα όπου συμβαίνει το αντίστροφο, με τα ηχητικά κύματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά, και τέλος στις "βελόνες" των πικάπ για τη μετατροπή των χαράξεων των δίσκων σε ηλεκτρικό ρεύμα.

3.2. Πιεζοηλεκτρικά ελάσματα

Μια από τις χρήσεις των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι η εφαρμογή τους σε τύπους ελασμάτων. Όπως και στην εικόνα 3.2.1 που ακολουθεί, έχουμε τη δυνατότητα εφαρμογής και κατάλληλης συγκόλλησης του υλικού σε έλασμα ώστε να δημιουργήσουμε ένα ενιαίο σύστημα. Παρατηρώντας την εικόνα 3.2.1, διακρίνουμε το πιεζοηλεκτρικό υλικό πάχους h το οποίο είναι πολωμένο κατά τον άξονα z . Η μια πλευρά, έχει ως ηλεκτρόδιο την υποστηρικτική δομή ενώ στην άλλη υπάρχει υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο μεταβλητού πλάτους $b_p(x)$. Έχοντας λοιπόν δυο ηλεκτρόδια, δημιουργείται διαφορά δυναμικού, η οποία μπορεί να ελεγχθεί. Με αυτό τον έλεγχο, δημιουργούμε ένα ηλεκτρικό πεδίο στο οποίο εμπεριέχεται το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Με λίγα λόγια, αυτός είναι ο τρόπος ελέγχου της τάσης η οποία διαρρέει το πιεζοηλεκτρικό υλικό και καθορίζει το μέγεθος των δυνάμεων τις οποίες θα ασκήσει στο έλασμα, τη μεταβλητή $w(x, t)$ να προσδιορίζει τις μετακινήσεις στον άξονα z .

Στις εφαρμογές συστημάτων ελέγχου με πιεζοηλεκτρικά υλικά, ένας στόχος είναι η μείωση φαινομένων κάμψης. Η διαδικασία αυτή προκύπτει λόγω της θεωρίας του

φαινομένου, όπου το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο διαρρέει το υλικό αποτελείσκα την δημιουργεί καμπτικές ροπές. Η χρήση των ροπών αυτών σε πολλές περιπτώσεις όπως και σε αυτή την οποία θα εξετάσουμε στη συνέχεια, λειτουργεί για την εξισορρόπηση του υπό εξέταση συστήματος [7] [8].



Εικόνα 3.2.1 Πιεζοηλεκτρική δοκός

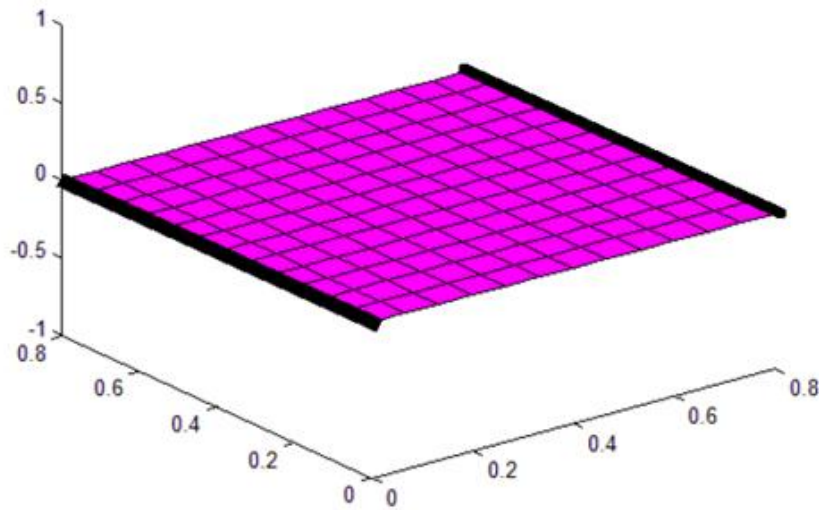
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα περιγράψουμε το υπό εξέταση πρόβλημά μας, καθώς και τους τρόπους με τους οποίους θα πειραματιστούμε αργότερα ώστε να βελτιώσουμε τα εξαγόμενα του πειράματος. Χρησιμοποιώντας τις θεωρητικές γνώσεις τις οποίες αναφέραμε στο δεύτερο κεφάλαιο για την ασαφή λογική και τους ασαφείς ελεγκτές, θα προσπαθήσουμε να μοντελοποιήσουμε το προς επίλυση πρόβλημα.

4.1. Μοντέλο σύνθετης πλάκας

Τα πειράματα και όλες οι μετρήσεις σε αυτή την εργασία γίνονται σε ένα μοντέλο τετραγωνικής αμφίπακτης πλάκαςμετα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά. Το μήκος πλευράς είναι $0,8\text{m}$, το μέτρο ελαστικότητας είναι $150 \times 10^9 \text{N/m}^2$, το μέτρο διάτμησης είναι $7,1 \times 10^9 \text{N/m}^2$ και η πυκνότητα είναι 1600kg/m^3 . Σε αυτό το μοντέλο έχουν προστεθεί πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία όπως αναφέραμε και στο τρίτο κεφάλαιο, στόχο έχουν τη δημιουργία δυνάμεων για τον περιορισμό των ταλαντώσεων της πλάκας τις οποίες δημιουργούμε με ημιτονοειδείς φορτίσεις. Για τη διακριτοποίηση της πλάκας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα ο φορέας διαιρέθηκε σε 144 τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, οδηγώντας σε ένα σύστημα 169 κόμβων με 5 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Οι βαθμοί ελευθερίας ουσιαστικά αποτελούν τις συντεταγμένες κάθε στοιχείου, ώστε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τη θέση κάθε κόμβου στο χώρο. Από αυτούς, οι τρεις πρώτοι αντιστοιχούν στις μετατοπίσεις του κόμβου στις τρεις διαστάσεις του χώρου x , y και z αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιποι δύο, στις στροφές ως προς τους άξονες x και y . Για την εφαρμογή του ελέγχου θα μας απασχολήσει μόνο η μετατόπιση στον z άξονα, δηλαδή μόνο ο τρίτος από τους πέντε βαθμούς ελευθερίας κάθε κόμβου. Η στήριξη της πλάκας γίνεται στους κόμβους 1, 14, 27, 40, 53, 66, 79, 92, 105, 118, 131, 144 και 157, όπου είναι οι κόμβοι της μίας πλευράς της πλάκας, και 13, 26, 39, 52, 65, 78, 91, 104, 117, 130, 143, 156, και 169 όπου είναι οι κόμβοι της άλλης μεριάς της πλάκας. Αυτό πρακτικά εξηγεί αριθμητικά το γεγονός ότι η πλάκα είναι πακτωμένη στις δυο πλευρές αυτές. Η πλάκα με τη στήριξη της φαίνεται στην εικόνα 4.1.1 που ακολουθεί. Ουπαχίες μαύρες γραμμές προσδιορίζουν τα σημεία των πακτώσεων.

Η γραφική απεικόνιση του μοντέλου (εικόνα 4.1.1) με την κατάλληλη διακριτοποίηση, την αρίθμηση των κόμβων καθώς και τις συνοριακές συνθήκες της πλάκας, προκύπτουν από την εκτέλεση αλγορίθμου πλάκας που έχει δημιουργηθεί από την κ. Γεωργία Φουτσιτζή, αναπληρώτρια καθηγήτρια του ΤΕΙ Ηπείρου [9]. Ο ίδιος αλγόριθμος, ο οποίος κάνει την στατική ανάλυση του μοντέλου πλάκας, παράγει τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας τα οποία χρησιμοποιούμε για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης [8].



Εικόνα 4.1.1 Αμφίπακτη πλάκα

Η μαθηματική εξίσωση με την οποία περιγράφουμε το μοντέλο της αμφίπακτης πλάκας είναι:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P + Z(4.1.1)$$

όπου: M , C , K είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας με την απόσβεση να είναι:

$$C = 0.01 * (M + K)(4.1.2)$$

όπως επίσης,

\ddot{u} , \dot{u} , u είναι τα πεδία επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων στο πεδίο του χρόνου, οπότε για την επίλυση θα αρχικοποιήσουμε τις μεταβλητές με $u_0 = 0$ και $\dot{u}_0 = 0$ τη χρονική στιγμή $t_0 = 0$

και

P , Z είναι οι εξωτερικές δυνάμεις και οι δυνάμεις ελέγχου

4.2. Περιγραφή προβλήματος

Το υπάρχον πρόβλημα, όπως έχουμε και εισαγωγικά αναφέρει, είναι ο περιορισμός των ταλαντώσεων στο μοντέλο της αμφίπακτης πλάκας. Για να το επιτεύξουμε αυτό, πρέπει να δημιουργήσουμε δυο βασικά γεγονότα εφόσον είμαστε σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Το πρώτο είναι οι ταλαντώσεις και το δεύτερο ο έλεγχός τους. Στη διάρκεια της άσκησης θα πειραματιστούμε και με τα δυο αυτά

γεγονότα εξετάζοντας τις διαφορές που προκύπτουν αλλάζοντας τα σημεία εφαρμογής τους. Λόγω της διακριτοποίησης του μοντέλου μας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι εφικτό να επιλέξουμε ακριβώς το σημείο το οποίο θέλουμε να ασκήσουμε κάποιο είδος δύναμης όπως και ελέγχου.

Για τη δημιουργία ταλαντώσεων, η οποία προκύπτει με εφαρμογή φορτίσεων, επιλέξαμε τον ακόλουθο τύπο ημιτονοειδούς φόρτισης:

$$P = p_0 * \sin(\omega t) \quad (4.2.1)$$

Όπου ο όρος (p_0) καθορίζεται ανάλογα με τον αριθμό των σημείων φόρτισης ώστε η δύναμη να μοιράζεται ισόποσα. Για παράδειγμα, αν έχουμε φόρτιση σε ένα σημείο, θα έχουμε $p_0=1$. Για δυο σημεία θα έχουμε $p_0=1/2$ για κάθε σημείο, και αντίστοιχα για περισσότερα.

Για τη συχνότητα ορίζουμε την τιμή $\omega=20$.

Επομένως η σχέση (4.2.1) μπορεί να γραφτεί :

$$P = \frac{1}{n} \sin(20t) \quad (4.2.2)$$

Όπου n ο αριθμός των φορτίσεων με $n=1,2,3,4...$

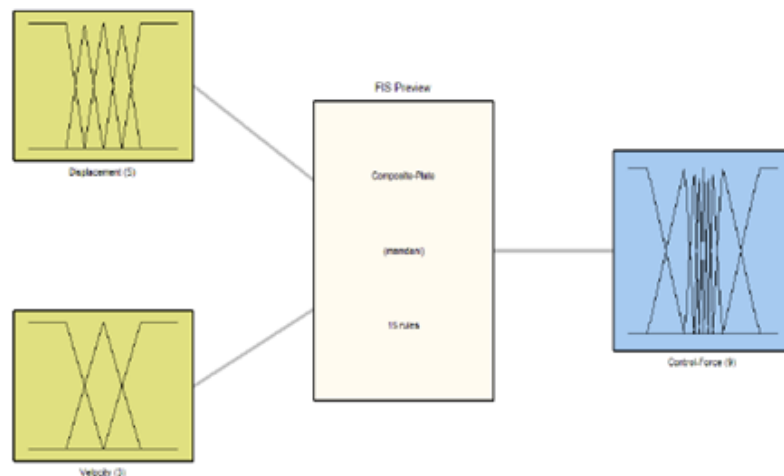
Όσον αφορά το δεύτερο γεγονός, τον έλεγχο των ταλαντώσεων, χρησιμοποιούμε τον ασαφή ελεγκτή για τον οποίο θα μιλήσουμε εκτενέστερα στην επόμενη παράγραφο, τοποθετώντας τον σε κατάλληλα σημεία πάνω στην πλάκα τα οποία επιλέγουμε πειραματιζόμενοι.

Να υπενθυμίσουμε ότι ο αλγόριθμος ο οποίος μας βοηθάει να κάνουμε τις διερευνήσεις για το τελικό αποτέλεσμα, συνδυάζει τη μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης Houbolt με έναν ασαφή ελεγκτή τύπου Mamdani και έχει δημιουργηθεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος οποίος θα περιγραφεί σε επόμενη παράγραφο, δουλεύει λαμβάνοντας μια τιμή για τη δύναμη ελέγχου από τον ελεγκτή, για κάθε βήμα αριθμητικής ολοκλήρωσης. Από την έξοδο αυτή προκύπτουν οι τιμές της μετατόπισης και της ταχύτητας για το επόμενο βήμα, μέχρι την τελική εξάλειψη της ταλάντωσης όπου πετυχαίνουμε το σκοπό μας και είμαστε σε θέση να εξετάσουμε την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

4.3. Δομή ασαφούς ελεγκτή πλάκας

Για τον περιορισμό των ταλαντώσεων στην αμφίπακτη πλάκα θα χρησιμοποιήσουμε έναν ασαφή λογικής ο οποίος πληρεί όλες τις προϋποθέσεις ενός ασαφούς ελεγκτή όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2.4

και δημιουργήθηκε από τον κ. Γεώργιο Ταϊρίδη στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής του διατριβής, με σκοπό τον περιορισμό των ταλαντώσεων μιας προβόλου δοκού [1],[10],[11]. Ο Βεβαίως, για την εξυπηρέτηση του σκοπού μας έχουμε κάνει τις ανάλογες προγραμματιστικές αλλαγές ώστε να προσαρμόσουμε τον ελεγκτή στο μοντέλο της πλάκας. Οι ελεγκτές με παρόμοια λειτουργία ονομάζονται ελεγκτές τύπου **Mamdani** με τον συγκεκριμένο να είναι MISO (multiple inputs, single output). Για τη δημιουργία του έγινε χρήση του πακέτου Fuzzy toolbox της Matlab.

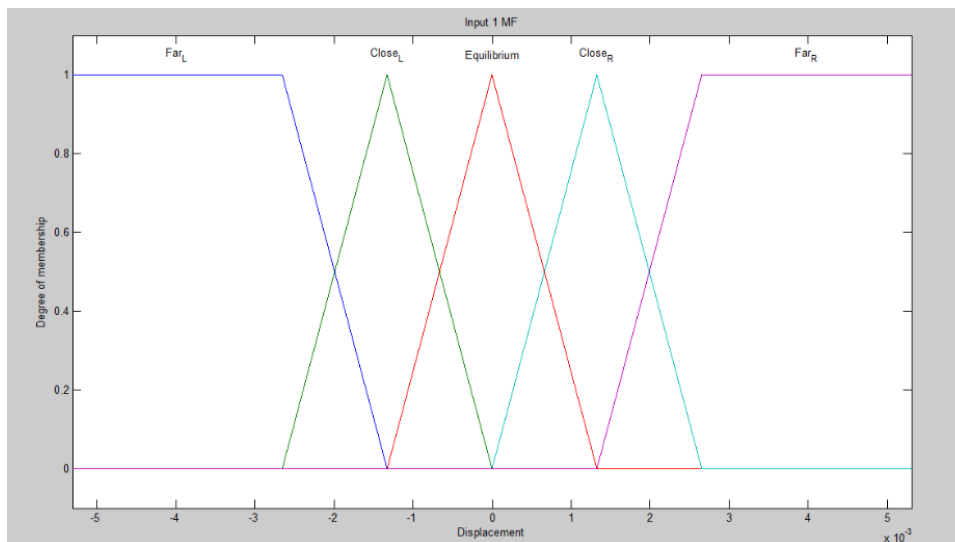


Εικόνα 4.3.1 Ασαφής ελεγκτής

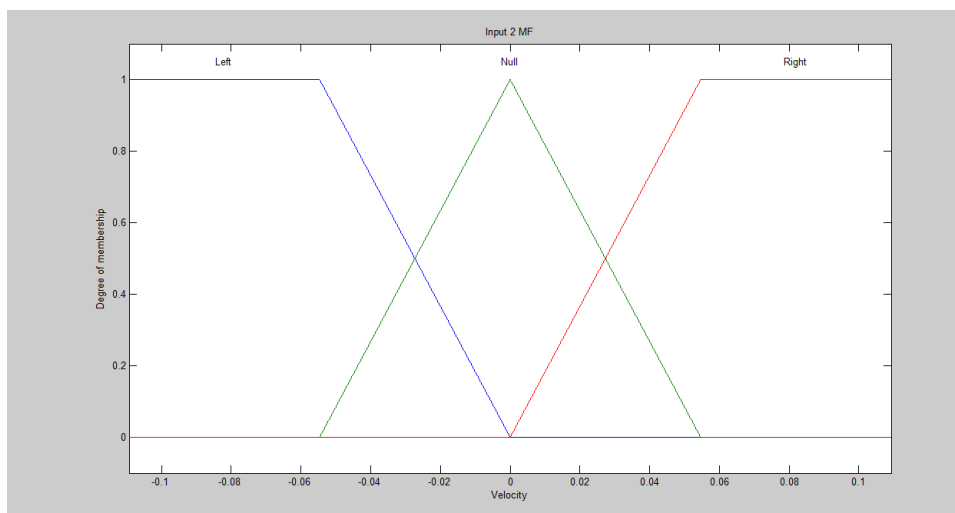
Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3.1, δέχεται δύο εισόδους και χρησιμοποιώντας κατάλληλους κανόνες παράγει μία έξοδο.

Η πρώτη είσοδος είναι το πεδίο των μετακινήσεων (u) και η ταχύτητα (\dot{u}) του συστήματος ελέγχου, τα οποία μας δίνουν ως έξοδο την τιμή της δύναμης ελέγχου.

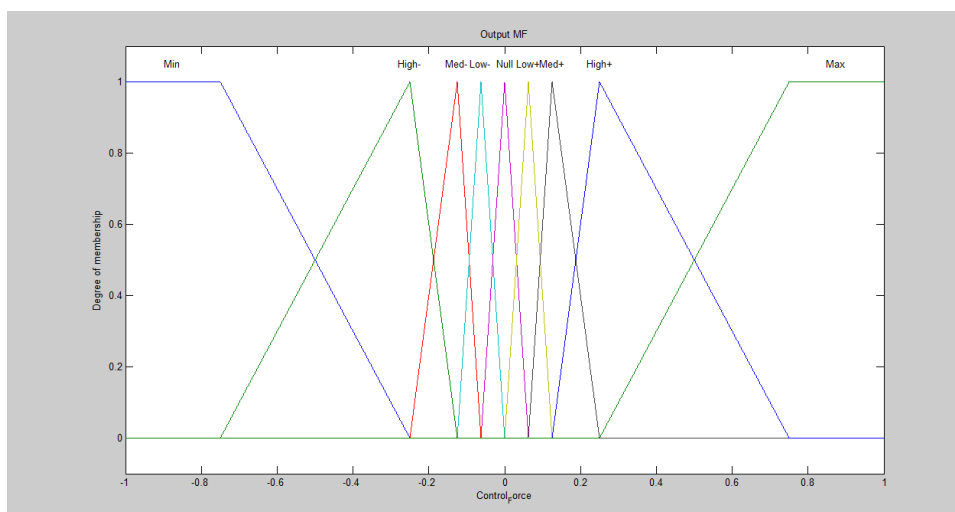
Στις επόμενες τρεις εικόνες βλέπουμε τα διαγράμματα των συναρτήσεων συμμετοχής που προκύπτουν ενεργοποιώντας τον αλγόριθμο του ελεγκτή, τα οποία απεικονίζουν τη μετατόπιση, την ταχύτητα και τη δύναμη ελέγχου αντίστοιχα.



Εικόνα 4.3.2 Συναρτήσεις συμμετοχής για τη μετατόπιση



Εικόνα 4.3.3 Συναρτήσεις συμμετοχής για την ταχύτητα



Εικόνα 4.3.4 Συναρτήσεις συμμετοχής για τη δύναμη ελέγχου

Η βάση κανόνων του ελεγκτή αποτελείται από 15 κανόνες(fuzzy rules) οι οποίοι συντάχθηκαν με βάση τη λογική και τον τρόπο τον οποίο αναφέραμε και στο 2^ο κεφάλαιο. Τα ενδεχόμενα συνδυάζονται με χρήση του λογικού τελεστή ΚΑΙ. Ένα παράδειγμα του τρόπου σύνταξης των κανόνων είναι οι τρεις ακόλουθοι κανόνες.

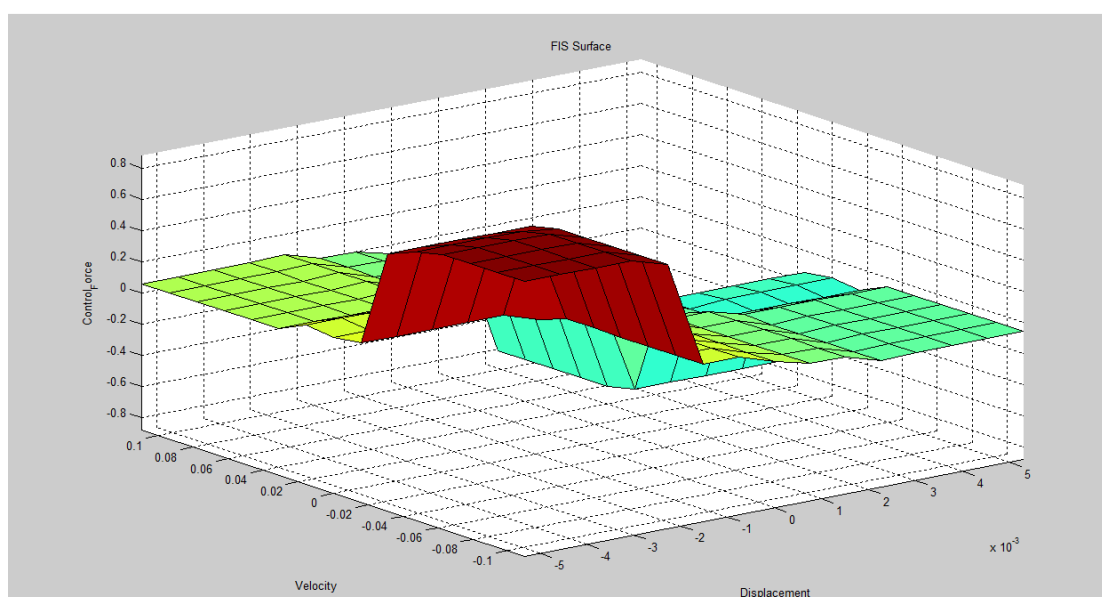
- a. **If** (Displacement is Far-down) **and** (Velocity is Downwards) **then** (Control-Force is Max)
- b. **If** (Displacement is Equilibrium) **and** (Velocity is Downwards) **then** (Control-Force is Low+)
- c. **If** (Displacement is Close-up) **and** (Velocity is Downwards) **then** (Control-Force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

Στον πίνακα 4.3.1 παρουσιάζεται μία σύνοψη του συνόλου των 15 κανόνων.

	Μετατόπιση				
ταχύτητα	πολύ κάτω	λίγο κάτω	ισορροπία	λίγο επάνω	πολύ επάνω
προς τα κάτω	Max	Med+	Low+	Null	Med-
μηδενική	Med+	Low+	Null	Low-	High-
προς τα πάνω	High+	Null	Low-	Med-	Min

Πίνακας 4.3.1

Για τον προσδιορισμό της δύναμης ελέγχου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του μέσου μεγίστου (meanofmaximummethod). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποασαφοποίηση της εξόδου. Στη συνέχεια, στην εικόνα 4.3.5 απεικονίζεται η τρισδιάστατη επιφάνεια του ασαφούς συστήματος, δηλαδή ο συσχετισμός των μετατοπίσεων και των ταχυτήτων με τη δύναμη ελέγχου.



Εικόνα 4.3.5 Επιφάνεια ασαφούς συστήματος

4.4. Αριθμητική ολοκλήρωση με χρήση μεθόδου Houbolt

Λόγω των εξισώσεων κίνησης που απαρτίζουν το πρόβλημά μας, είναι απαραίτητη η αριθμητική ολοκλήρωσή τους για την εξαγωγή των βασικών για εξέταση αποτελεσμάτων τα οποία είναι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Έτσι, λόγω της σταθερότητας που παρουσιάζει σε τέτοιου είδους προβλήματα, επιλέξαμε τη μέθοδο **Houbolt**[1].

Ξεκινώντας τη συγκεκριμένη μέθοδο, είναι απαραίτητο να αρχικοποιήσουμε δυο σταθερές β και γ , γνωστές ως σταθερές Houbolt, οι οποίες λαμβάνουν τις ακόλουθες τιμές σε προβλήματα σταθερής επιτάχυνσης όπως και το υπό εξέταση. Οπότε:

$$\beta=0,25, \gamma=0,50$$

Ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης είναι:

$$t = 3sec$$

με βήμα ολοκλήρωσης:

$$dt=0,001sec$$

Η τιμή του βήματος επιλέχθηκε ύστερα από κατάλληλες δοκιμές.

Γνωρίζοντας τις σταθερές β , γ και το βήμα ολοκλήρωσης dt , μπορούμε να υπολογίσουμε τις σταθερές ολοκλήρωσης από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$c_1=\frac{1}{\beta(dt)^2}, c_2=\frac{1}{\beta(dt)}, c_3=\frac{1}{2\beta}, c_4=\frac{\gamma}{\beta(dt)}, c_5=\frac{\gamma}{\beta}, c_6=dt\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)$$

Έχοντας υπολογίσει τις σταθερές ολοκλήρωσης, μπορούμε να γράψουμε σε μορφή βημάτων τον αλγόριθμο ως εξής:

Αλγόριθμος Houbolt

Βήμα 1: Αρχικοποίηση μεταβλητών

$$X, \dot{X}, \ddot{X}, F_m, M, \Lambda, K, \theta, \gamma, c_1, c_2, c_4, c_5, c_6$$

Βήμα 2: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας (F^*): $K^* = K + c_1 M + c_4 \Lambda$

$$\text{Αντιστροφή του } (K^*) : F^* = (K^*)^T$$

Έναρξη βρόχου for από $t0$ έως tf

Βήμα 3: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας (P^*)

$$\text{Υπολογισμός μεταβολής φορτίσεων: } dF_m = F_m(t+1) - F_m(t)$$

Υπολογισμός μεταβολής δύναμης ελέγχου u

$$\text{Προσθήκη στην ποσότητα } dF_m, \quad dF_m = dF_m + u$$

Υπολογισμός της ποσότητας (P^*) με χρήση των μητρώων μάζας (M) και απόσβεσης (Λ) του συστήματος: $P^* = dF_m + M[c_2 \dot{X}(t) + c_3 \ddot{X}(t)] + \Lambda[c_5 \dot{X}(t) + c_6 \ddot{X}(t)]$

Βήμα 4: Υπολογισμός του βήματος απόκρισης dX

$$dX = F^* P^*$$

Βήμα 5: Επίλυση του επομένου χρονικού βήματος ($t + \Delta t$)

$$\text{Υπολογισμός επιτάχυνσης: } \ddot{X}(t+1) = \ddot{X}(t) + c_1 dX - c_2 \dot{X}(t) - c_3 \ddot{X}(t)$$

$$\text{Υπολογισμός ταχύτητας: } \dot{X}(t+1) = \dot{X}(t) + c_4 dX - c_5 \dot{X}(t) - c_6 \ddot{X}(t)$$

$$\text{Υπολογισμός μετατόπισης: } X(t+1) = X(t) + dX$$

Τερματισμός του βρόχου for

Τέλος

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων του. Όπως είδαμε και στο τέταρτο κεφάλαιο, στόχος μας είναι ο περιορισμός των ταλαντώσεων της αμφίτακτης πλάκας. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου για κάθε συνδυασμό φορτίσεων και ελέγχου, μας δίνουν τιμές και διαγράμματα για την ταχύτητα, τη μετατόπιση, την επιτάχυνση καθώς και τη δύναμη ελέγχου που ασκείται στην πλάκα. Για την επίτευξη του στόχου μας λοιπόν, επιζητάμε αρχικά ικανοποιητική μείωση της μετατόπισης. Επιπλέον, είναι εξίσου σημαντικό, η μείωση αυτή να είναι «ομαλή», δηλαδή χωρίς απότομες μεταβολές. Βεβαίως, το ίδιο ισχύει και για την ταχύτητα, η οποία λόγω της μείωσης της ταλάντωσης αναμένουμε να μειωθεί. Αντιθέτως, η δύναμη ελέγχου είναι λογικό να είναι αρκετή όπως και μη ομαλή, ώστε να έχουμε επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό με τη σειρά του αναμένουμε να επηρεάσει και την ομαλότητα της επιτάχυνσης.

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε αποτελέσματα μεταβάλλοντας τα ακόλουθα δεδομένα.

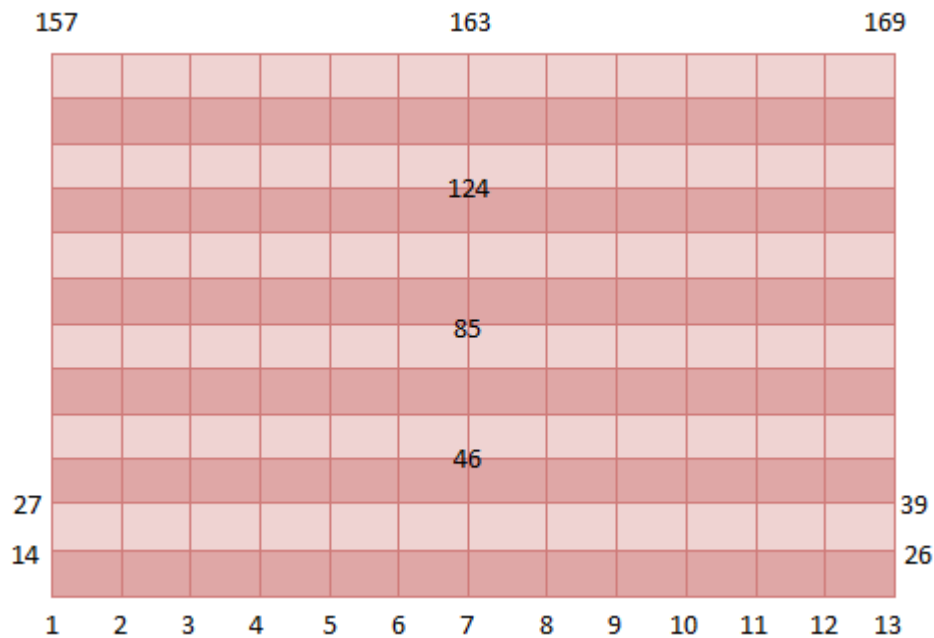
1. Το πλήθος των ελεγκτών. Αρχικά θα χρησιμοποιήσουμε έναν ελεγκτή και στη συνέχεια δύο και τρεις.
2. Τις φορτίσεις οι οποίες ασκούνται στην πλάκα. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να είναι φορτίσεις ενός, τριών ή πέντε σημείων.
3. Τον κόμβο με βάση τον οποίο παίρνουμε τις ακόλουθες μετρήσεις.

Η αρίθμηση των στοιχείων παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα της εικόνας 5.1 ο οποίος παρουσιάζεται ως κάτοψη της εξεταζόμενης πλάκας:

133	....	....	....	....	....	139	....	....	....	....	144
						115					
						79					
						43					
25	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
13	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Εικόνα 5.1 Αρίθμηση στοιχείων

Στη συνέχεια, βλέποντας πάλι την κάτοψη της εξεταζόμενης πλάκας, βλέπουμε την αρίθμηση των κόμβων στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 Αρίθμηση κόμβων

Να υπενθυμίσουμε ότι οι φορτίσεις οι οποίες θα ασκηθούν στην πλάκα προκύπτουν από τον τύπο:

$$P = \frac{1}{n} [\sin(20t)]$$

Όπου n , ο αριθμός των φορτίσεων που θέλουμε να ασκήσουμε.

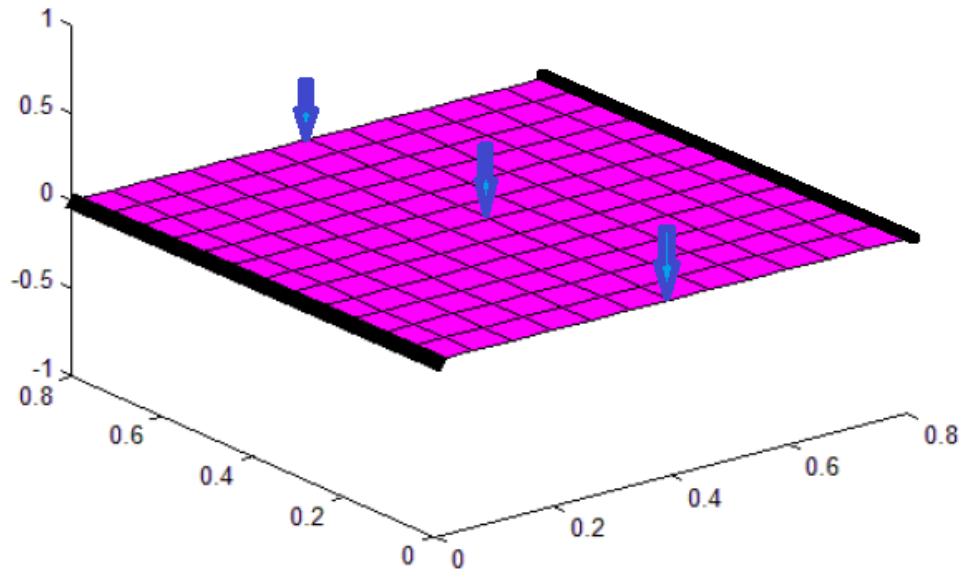
Για παράδειγμα, όταν έχουμε φόρτιση 3 σημείων, η δύναμη σε κάθε σημείο θα έχει μέτρο $P = \frac{1}{3} [\sin(20t)]$

Στις ακόλουθες δοκιμές, οι φορτίσεις θα είναι ενός, τριών ή πέντε σημείων όπως προαναφέραμε.

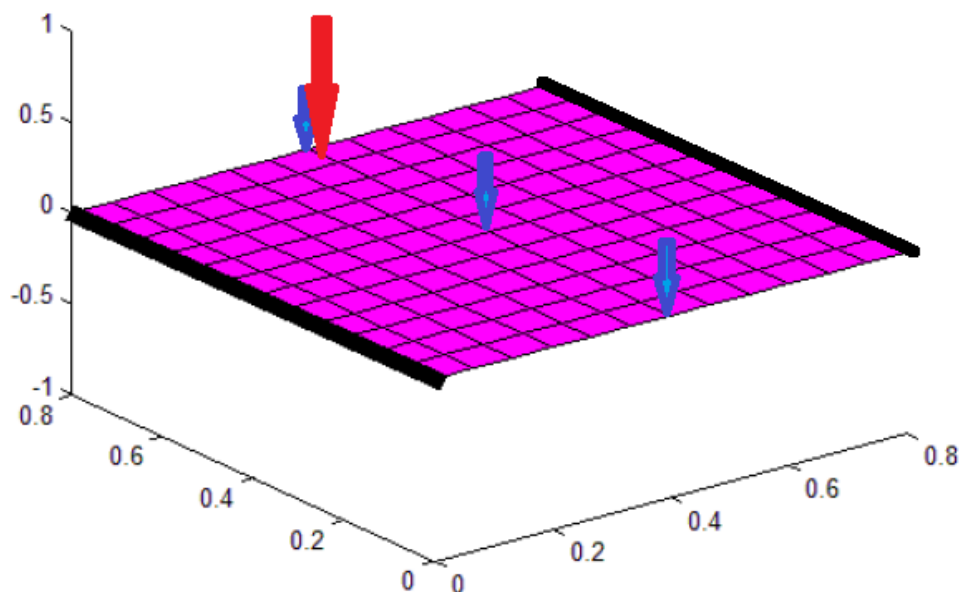
5.1 Αποτελέσματα ως προς την άκρη (κόμβος 163)

5.1.1 Περίπτωση ενός ελεγκτή στον κόμβο 163

Φόρτιση σε 3 σημεία (κόμβοι 7, 85, 163)

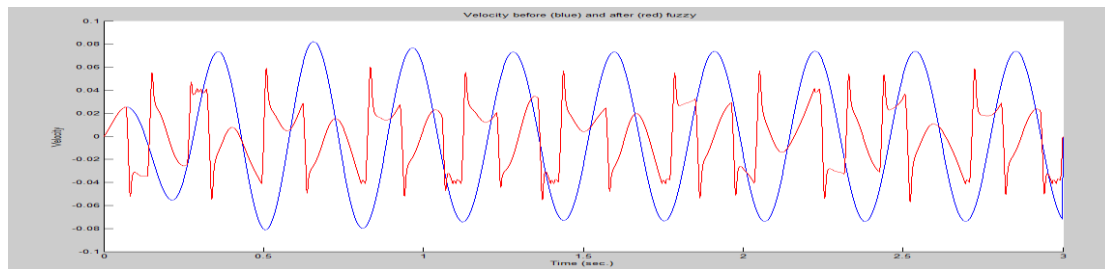


Εικόνα 5.1.1.1 Διάγραμμα πλάκας με φόρτιση 3 σημείων

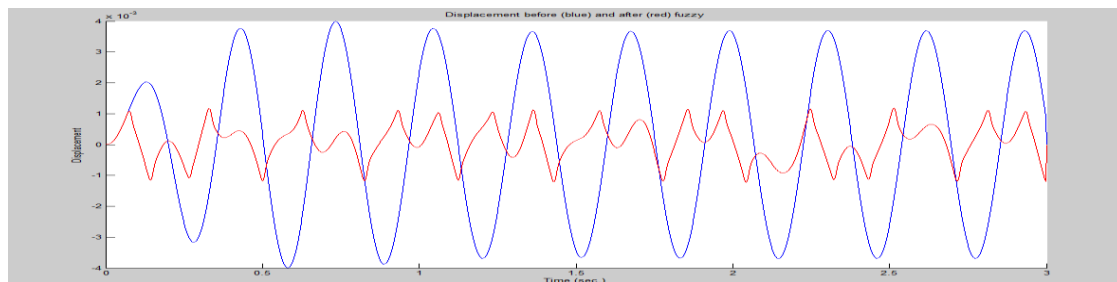


Εικόνα 5.1.1.2 Φόρτιση 3 σημείων(μπλε) και τοποθέτηση ελεγκτή στο άκρο(κόκκινο)

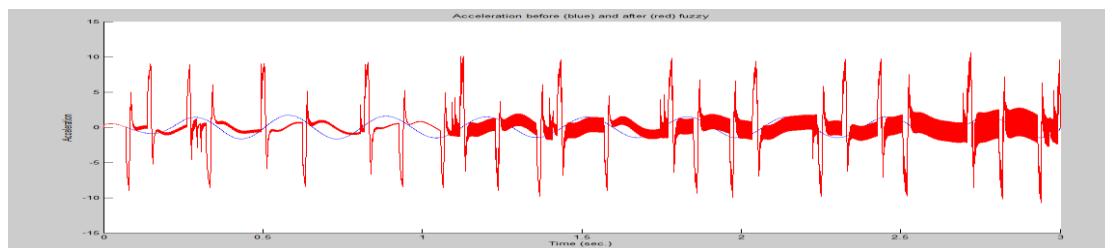
Με τη χρήση του αλγορίθμου ολοκλήρωσης τον οποίο περιγράψαμε στο 4^ο κεφάλαιο, προκύπτουν τα γραφήματα της ταχύτητας (εικόνα 5.1.1.3), της μετατόπισης (εικόνα 5.1.1.4) και της επιτάχυνσης (εικόνα 5.1.1.5) του κόμβου ελέγχου σε συνάρτηση με το χρόνο (t) καθώς και ένα γράφημα (εικόνα 5.1.1.6) που αποτυπώνει την διέγερση από την ημιτονοειδή φόρτιση, την δύναμη ελέγχου και τον ρυθμό της δύναμης ελέγχου σε συνάρτηση με το χρόνο.



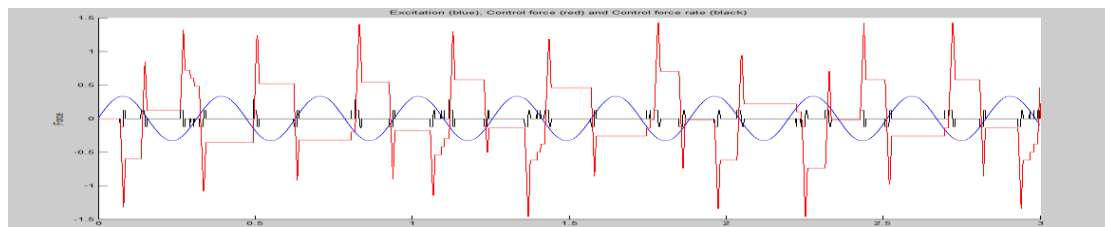
Εικόνα 5.1.1.3 Ταχύτητα πριν(μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.1.4 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά(κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.1.5 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.1.6 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0080	0.1633
Με έλεγχο	0.0024	0.1166
Μεταβολή % (απόλυτη)	69.8922	28.5898

Πίνακας 5.1.1.1

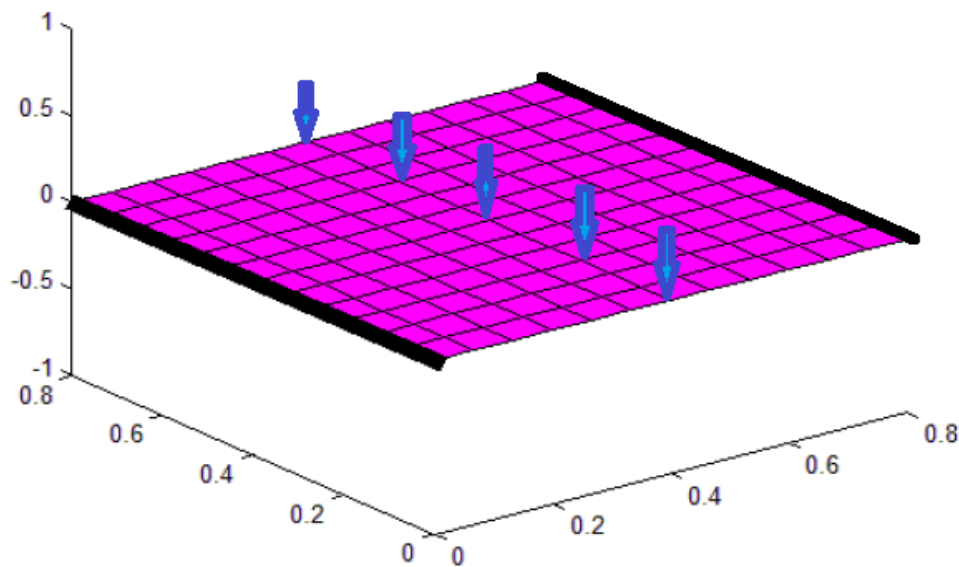
Εύκολα μπορεί να διακρίνει κανείς στο διάγραμμα των μετατοπίσεων (εικόνα 5.1.1.3) ότι ο έλεγχος που εφαρμόστηκε στον κόμβο 163 είναι αρκετά αποτελεσματικός καθώς μειώνει σημαντικά τις μετατοπίσεις του κόμβου διατηρώντας μια ομοιομορφία σε όλη τη διάρκεια των 3 sec που διαρκεί η δοκιμή.

Η ταχύτητα του κόμβου μετά τον έλεγχο διατηρεί επίσης μια ομοιομορφία με κάποιες μικρές αμελητέες διαταραχές στις ακραίες θετικές και αρνητικές τιμές. Όσον αφορά την επιτάχυνση του κόμβου (εικόνα 5.1.1.5) παρατηρούμε ότι ο έλεγχος προκαλεί κάποιες έντονες διαταραχές οι οποίες δεν παύουν να αποτελούν πρόβλημα διότι καταπονούν σημαντικά τόσο το υπό εξέταση μοντέλο όσο και τις μετρητικές διατάξεις.

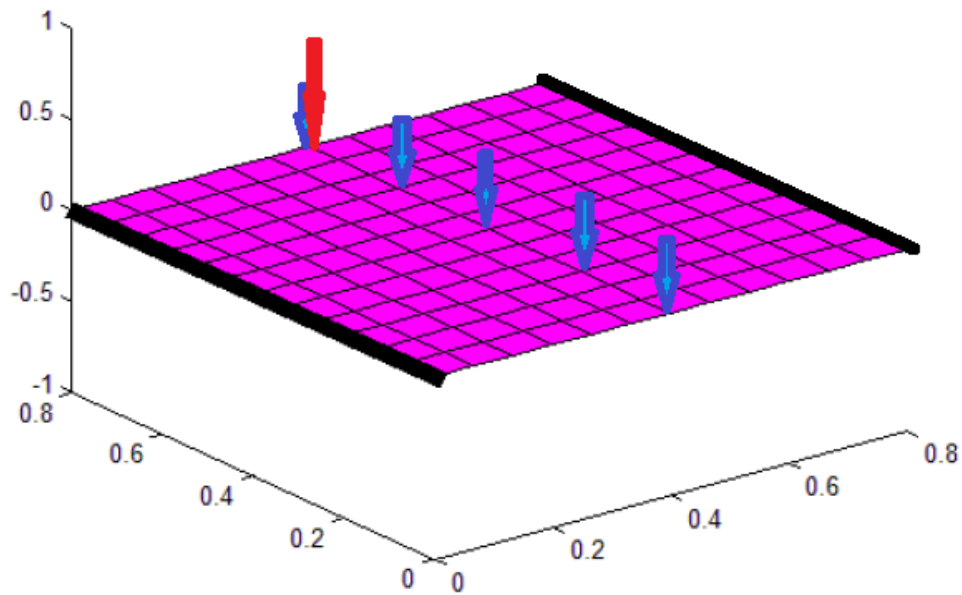
Η μεταβολή της δύναμης ελέγχου με την πρόοδο του χρόνου αποτυπώνεται στο γράφημα της εικόνας 5.1.1.6. Παρατηρούμε ότι η δύναμη ελέγχου τείνει να είναι αντίθετη και πολύ μεγαλύτερη από τη διέγερση, κάτι απόλυτα φυσιολογικό εφόσον επιδιώκουμε την εξισορρόπηση της ταλάντωσης. Ο ρυθμός της δύναμης ελέγχου λαμβάνει μηδενικές ή πολύ χαμηλές τιμές σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)

Σε αυτή την περίπτωση θα εξετάσουμε τη φόρτιση της πλάκας σε πέντε σημεία, διατηρώντας τον ελεγκτή στο άκρο (κόμβος 163). Οπότε το γράφημα της πλάκας θα έχει την εξής μορφή:

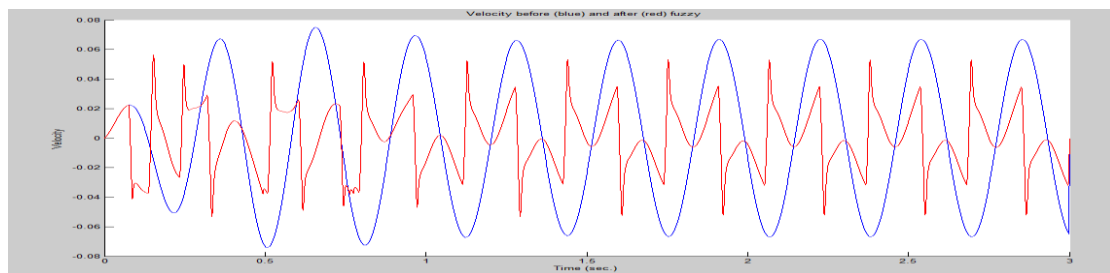


Εικόνα 5.1.1.7 Διάγραμμα πλάκας με φόρτιση 5 σημείων

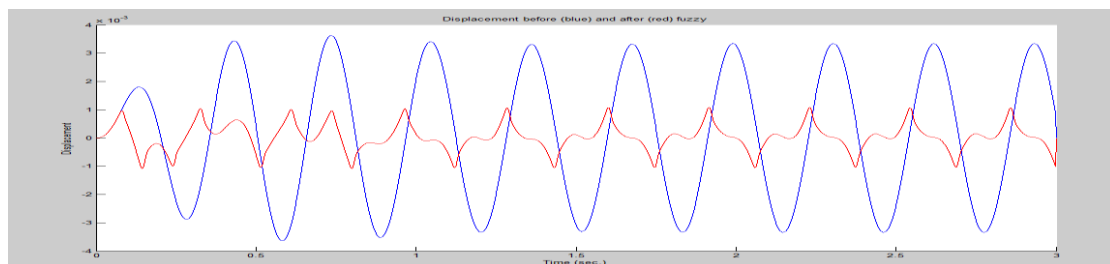


Εικόνα 5.1.1.8 Φόρτιση 5 σημείων(μπλε) και τοποθέτηση ελεγκτή στο άκρο(κόκκινο)

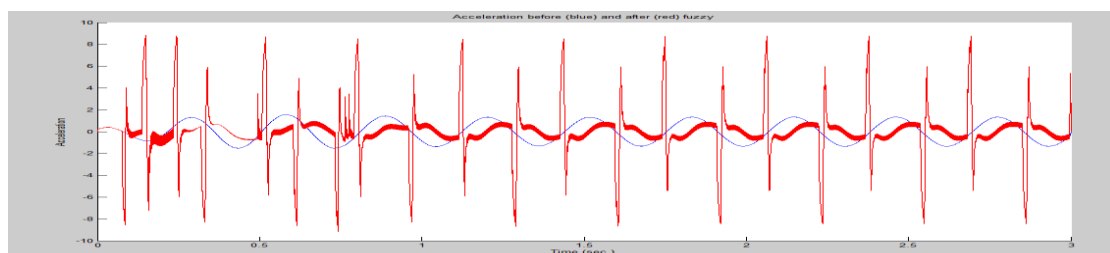
Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:



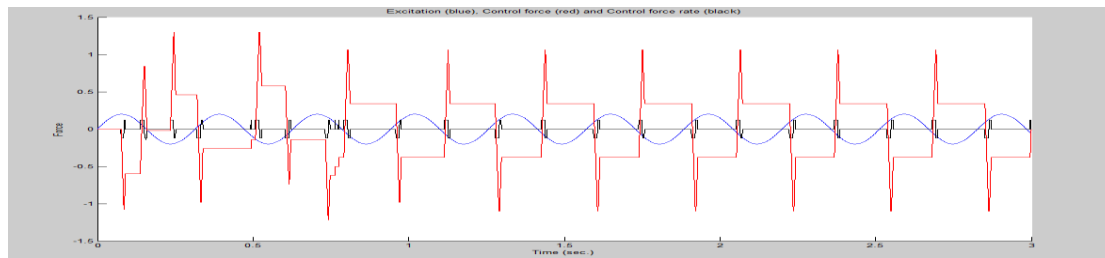
Εικόνα 5.1.1.9 Ταχύτητα πριν(μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.1.10 Μετατόπιση πριν(μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.1.11 Επιτάχυνση πριν(μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.1.12 6 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0073	0.1491
Με έλεγχο	0.0021	0.1096
Μεταβολή % (απόλυτη)	70.4686	26.5073

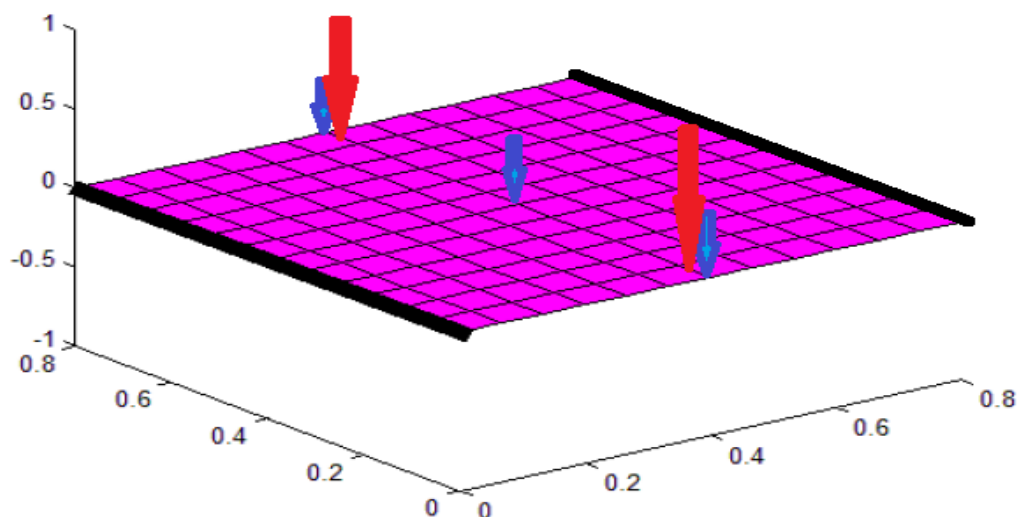
Πίνακας 5.1.1.2

Συγκρίνοντας τους πίνακες 5.1.1.2 και 5.1.1.1 (σελ. 25) παρατηρούμε ότι οι μεταβολές είναι σχεδόν ίδιες. Συγκεκριμένα, όταν ο ελεγκτής βρίσκεται στο άκρο (κόμβος 163) και η φόρτιση γίνεται σε 3 ή 5 σημεία, τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στην υπόλοιπη εργασία, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για τη φόρτιση της πλάκας σε 3 σημεία, λόγω του ότι είναι σχεδόν ίδια με αυτά της φόρτισης 5 σημείων, όπως συνέβη στο παραπάνω παράδειγμα.

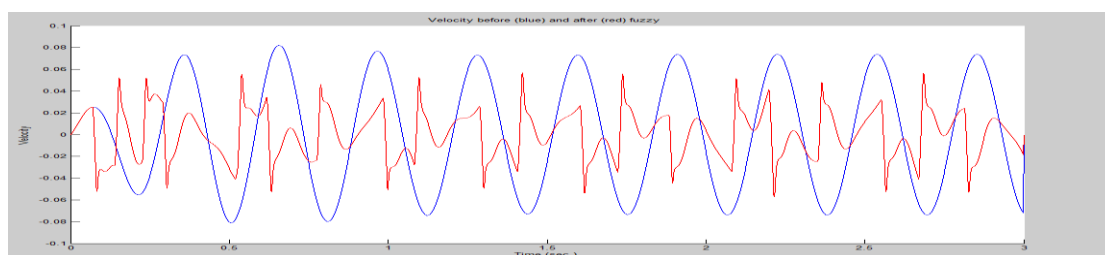
5.1.2 Περίπτωση δυο ελεγκτών στους κόμβους 7 και 163

Μέχρι τώρα διερευνήσαμε την επιβολή ελέγχου σε ένα σημείο του ελεύθερου άκρου. Σειρά έχει η επιβολή ελέγχου σε δύο σημεία.

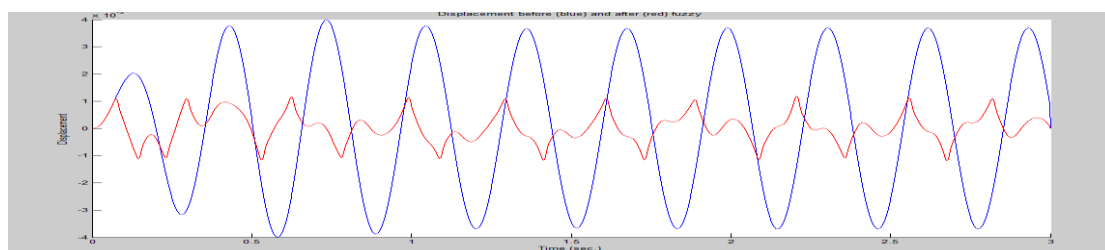


Εικόνα 5.1.2.1 Φορτίσεις (μπλε) και ελεγκτές (κόκκινο)

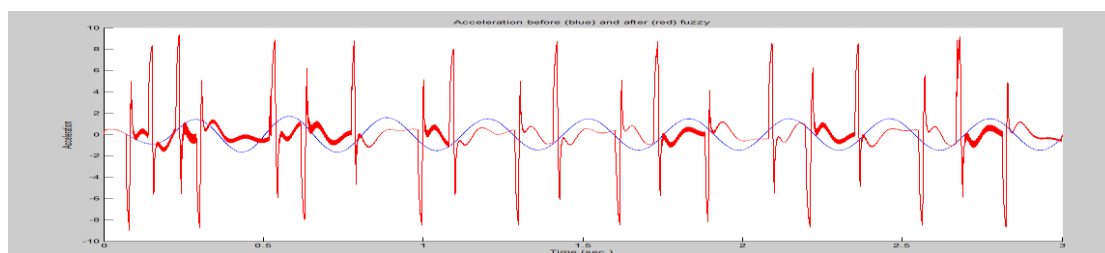
Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης λαμβάνοντας τα ακόλουθα διαγράμματα για την ταχύτητα, τη μετατόπιση, την επιτάχυνση καθώς και τη δύναμη ελέγχου.



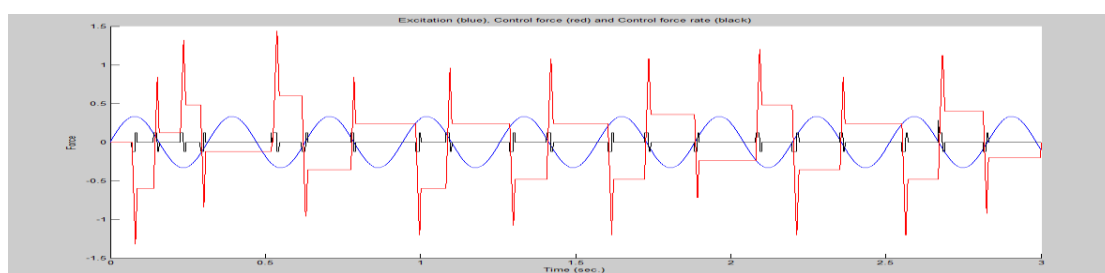
Εικόνα 5.1.2.2 Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.2.3 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.2.4 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.1.2.5 6 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

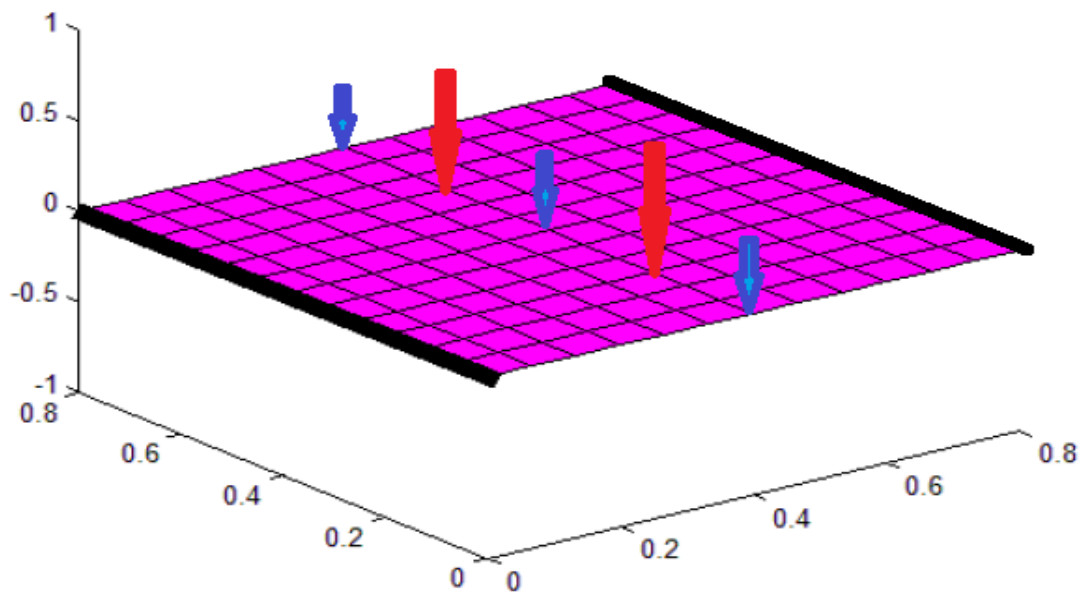
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0080	0.1633
Με έλεγχο	0.0024	0.1142
Μεταβολή % (απόλυτη)	70.3579	30.0961

Πίνακας 5.1.2.1

5.2 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 124

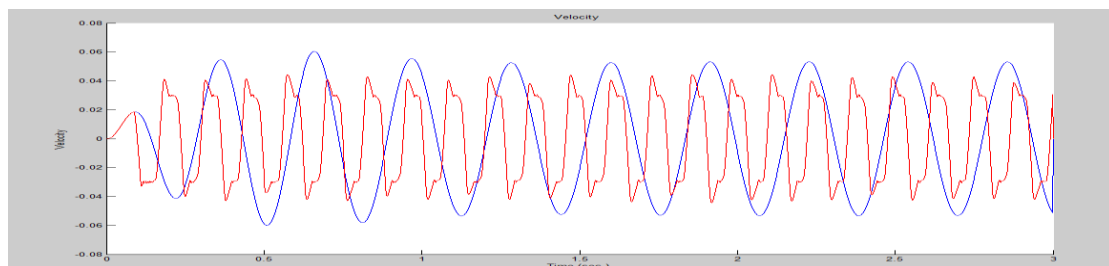
5.2.1 Περίπτωση δυο ελεγκτών στους κόμβους 46 και 124

Σε αυτή την περίπτωση επιλέξαμε να τοποθετήσουμε δυο ελεγκτές στο $1/3$ και στα $2/3$ της απόστασης από το άκρο της πλάκας. Με βάση τη δακρυτοποίηση την οποία έχουμε κάνει, αυτό αντιστοιχεί στους κόμβους 46 και 124 αντίστοιχα. Στην εικόνα 5.2.1.1 απεικονίζεται το διάγραμμα της πλάκας με την εφαρμογή δυνάμεων σε τρία σημεία (μπλε) και τον έλεγχο στους δυο κόμβους (κόκκινο).

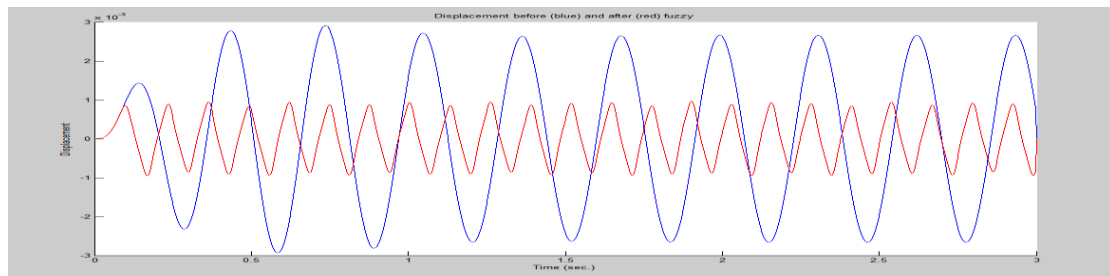


Εικόνα 5.2.1.1 Φορτίσεις (μπλε) και ελεγκτές (κόκκινο)

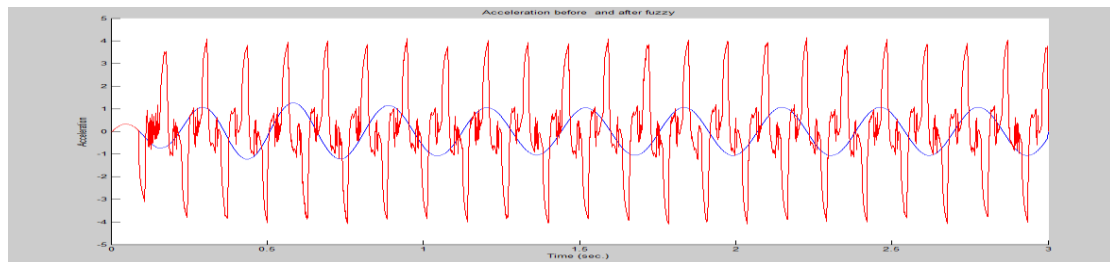
Ακολουθούν τα διαγράμματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου αριθμητικής ολοκλήρωσης, απεικονίζοντας την ταχύτητα, την μετατόπιση, την επιτάχυνση και τη διέγερση στις αντίστοιχες εικόνες.



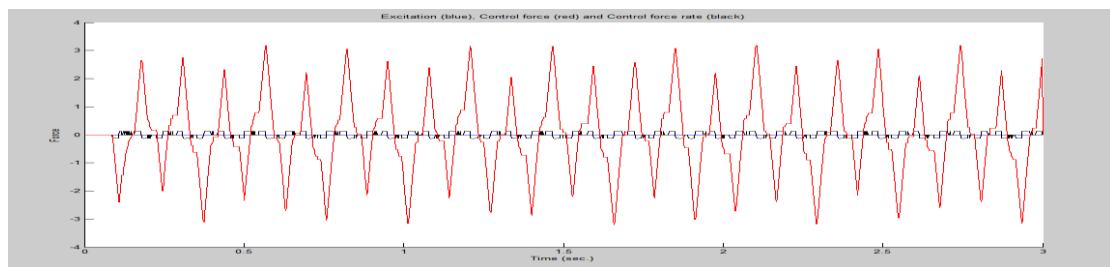
Εικόνα 5.2.1.2 Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.2.1.3 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.2.1.4 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.2.1.5 6 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0058	0.1204
Με έλεγχο	0.0019	0.0888
Μεταβολή % (απόλυτη)	67.2312	26.2790

Πίνακας 5.2.1.1

Αναλύοντας τα εξαγόμενα του πειράματος, παρατηρούμε τα εξής. Οι μεταβολές της μετατόπισης και της ταχύτητας όσον αφορά στον κόμβο τον οποίο δειγματοληπτούμε, δηλαδή τον κόμβο 124, είναι ελαφρώς μειωμένες σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα όπου οι δυο ελεγκτές τοποθετήθηκαν στα δυο άκρα της πλάκας (κόμβοι 7 και 163, κεφάλαιο 5.1.2). Οι τιμές βέβαια, συνεχίζουν να είναι αρκετά ικανοποιητικές και να μειώνουν δραστικά το πλάτος και την ταχύτητα της ταλάντωσης.

5.3 Αποτελέσματα ως προς τη μέση (κόμβος 85)

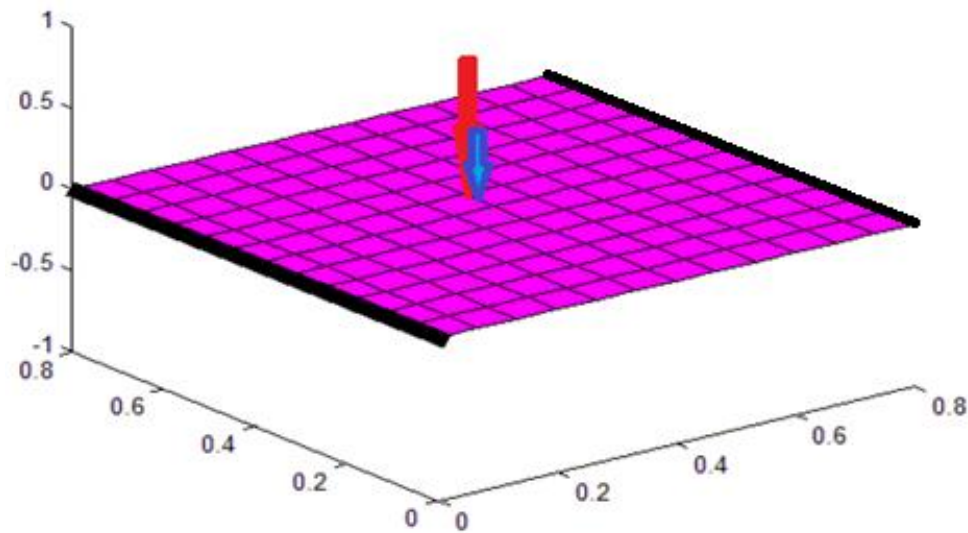
Σε αυτή την τελευταία περίπτωση αλλαγής κόμβου αναφοράς, δηλαδή αλλαγής του κόμβου με βάση τον οποίο καταγράφουμε τα αποτελέσματα του πειράματος, επιλέχθηκε ο κόμβος στη μέση της πλάκας ο οποίος είναι ο υπ' αριθμόν 85. Σε αυτή

την περίπτωση, θα εξετάσουμε δυο περιπτώσεις ελέγχου της πλάκας, με έναν ή τρεις ελεγκτές. Στην περίπτωση του ενός ελεγκτή, θα τοποθετηθεί στον κόμβο αναφοράς (κόμβος 85), ενώ στην περίπτωση των τριών ελεγκτών, θα τοποθετηθούν δυο επιπλέον ελεγκτές στα άκρα της πλάκας, δηλαδή στους κόμβους 7 και 163.

5.3.1 Περίπτωση ενός ελεγκτή στον κόμβο αναφοράς (κόμβος 85)

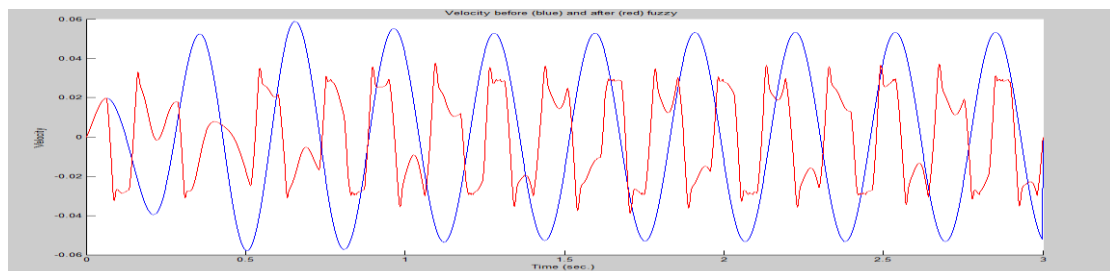
Φόρτιση στον κόμβο αναφοράς (κόμβος 85)

Σύμφωνα με την υπόθεσή μας, στο μέσο της πλάκας, δηλαδή στον κόμβο 85 θα ασκείται η εξωτερική δύναμη, αλλά συγχρόνως θα γίνεται και ο έλεγχος της ταλάντωσης. Οπότε, το τρισδιάστατο σχήμα της πλάκας θα είναι αυτό της εικόνας 5.3.1.1.

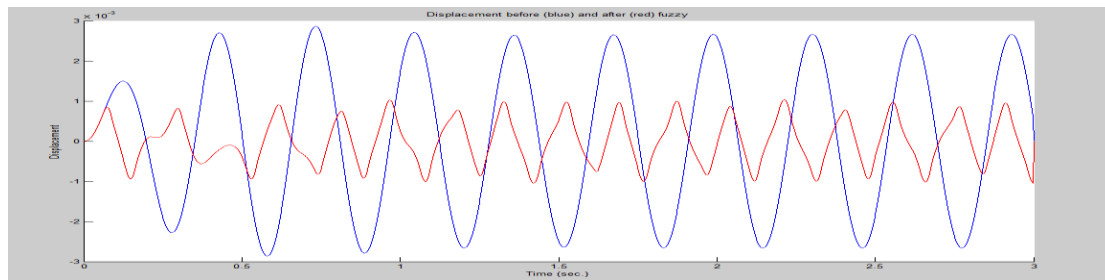


Εικόνα 5.3.1.1 Φόρτιση (μπλε) στο ίδιο σημείο με ελεγκτή (κόκκινο)

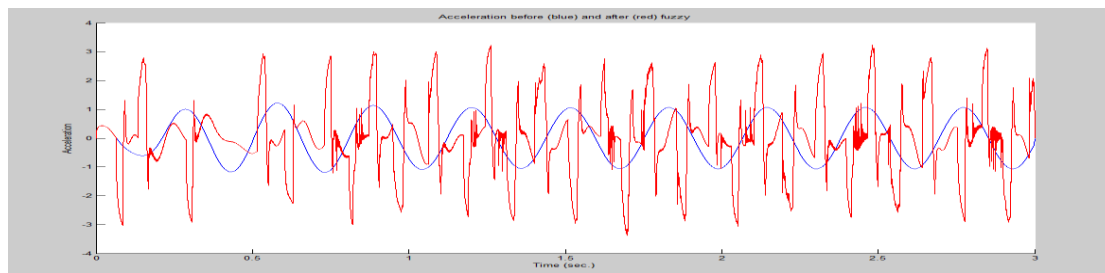
Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης, καταλήγουμε στα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία βλέπουμε στις παρακάτω εικόνες και απεικονίζουν την ταχύτητα, την μετατόπιση, την επιτάχυνση και τη διέγερση στις αντίστοιχες εικόνες.



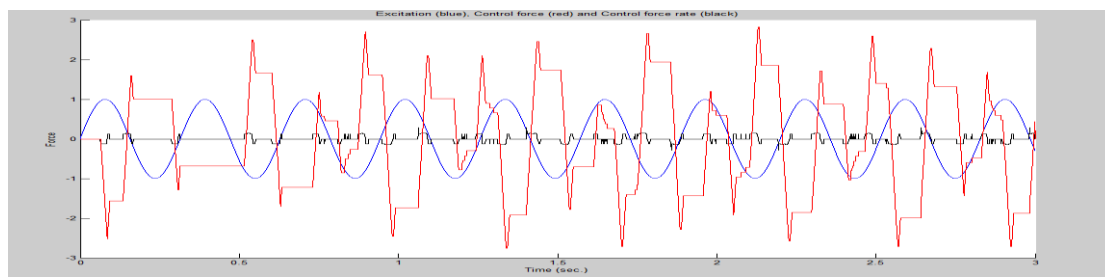
Εικόνα 5.3.1.2 Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.3 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.4 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.5 6 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

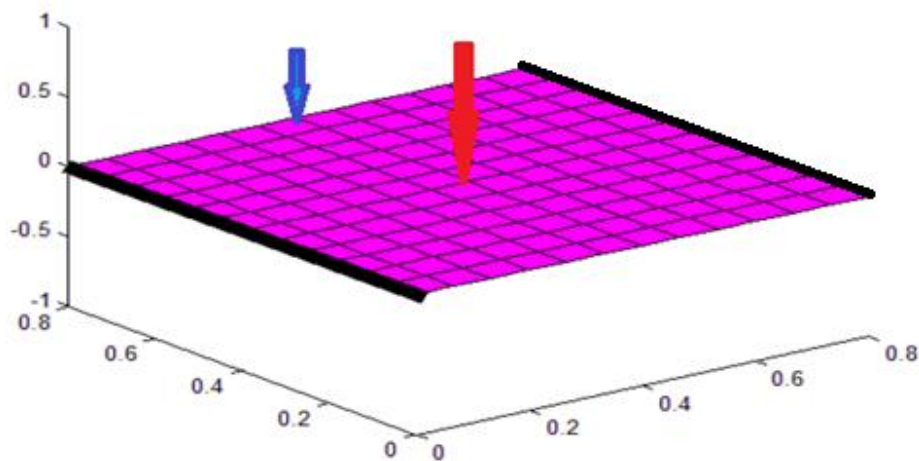
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0057	0.1168
Με έλεγχο	0.0021	0.0764
Μεταβολή % (απόλυτη)	63.6221	34.6293

Πίνακας 5.3.1.1

Εξετάζοντας τις εικόνες και τα στοιχεία του πίνακα 5.3.1.1 παρατηρούμε ότι έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, παρόμοια με τα προηγούμενα πειράματα, με ελαφρώς μειωμένη τη μεταβολή της μετατόπισης, αλλά και ελαφρώς αυξημένη τη μεταβολή της ταχύτητας.

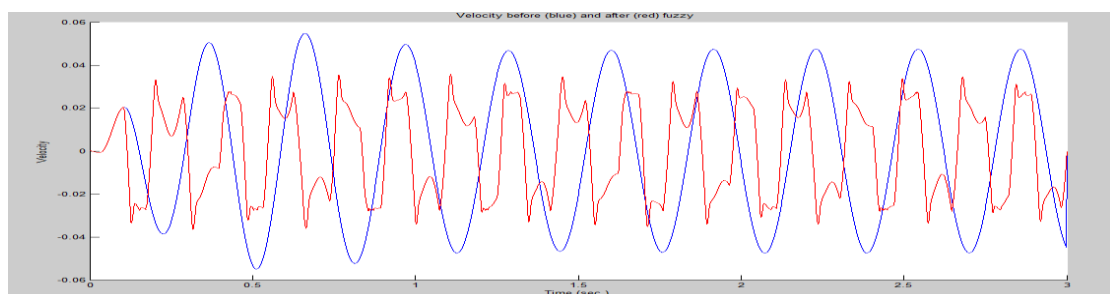
Φόρτιση στο άκρο της πλάκας, στον κόμβο 163

Διατηρώντας τον έλεγχο στο μέσο της πλάκας, δηλαδή στον κόμβο 85, θα αλλάξουμε το σημείο όπου ασκείται η εξωτερική δύναμη, τοποθετώντας την στο άκρο της πλάκας, δηλαδή στον κόμβο 163. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται το τρισδιάστατο σχήμα της πλάκας με την εξωτερική δύναμη και την τοποθέτηση ελεγκτή.

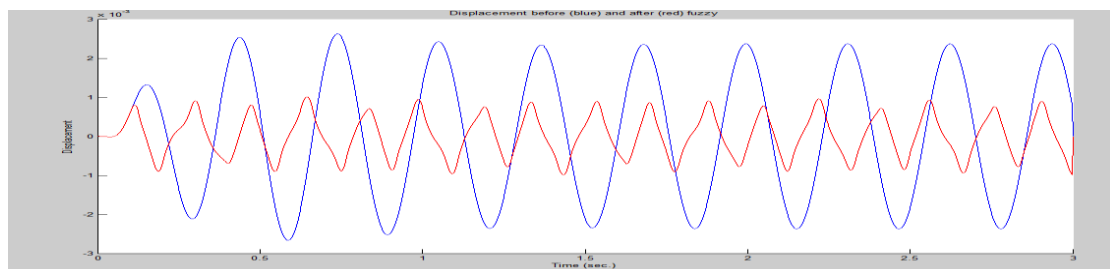


Εικόνα 5.3.1.6 Φόρτιση (μπλε) και ελεγκτής (κόκκινο)

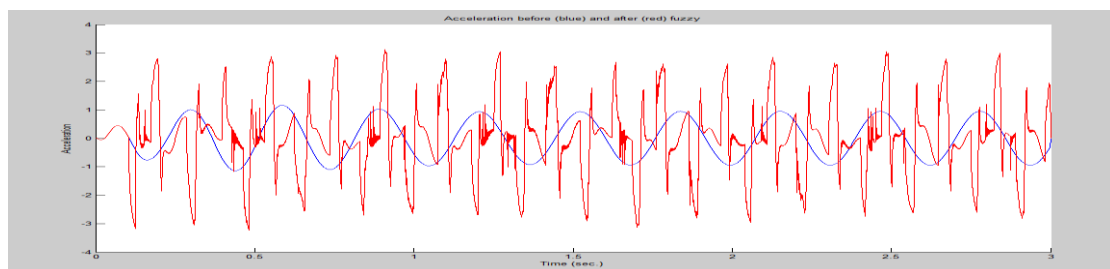
Από τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης προκύπτουν τα διαγράμματα ταχύτητας, μετατόπισης, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου τα οποία παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.



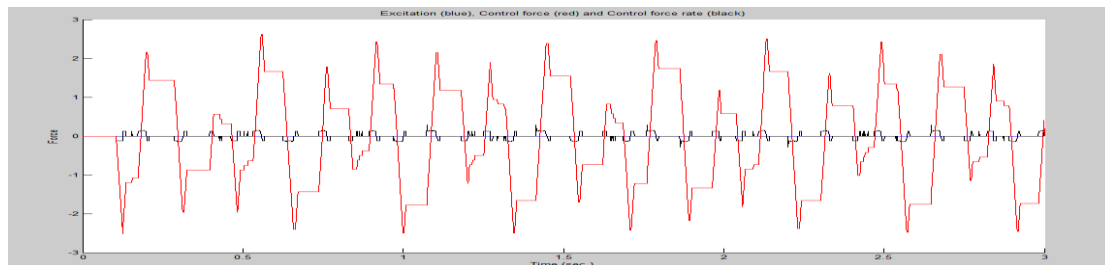
Εικόνα 5.3.1.7 Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.8 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.9 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.106 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

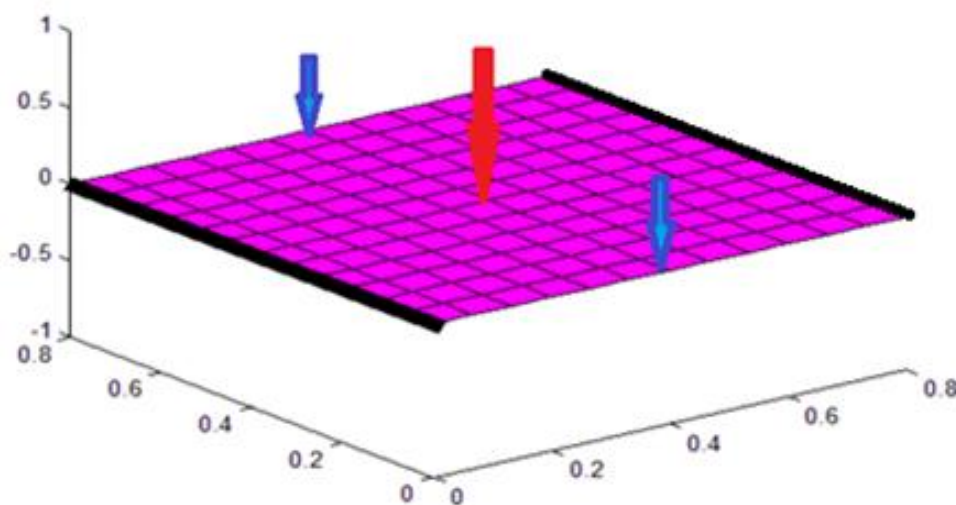
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1098
Με έλεγχο	0.0020	0.0723
Μεταβολή % (απόλυτη)	62.2394	34.1603

Πίνακας 5.3.1.2

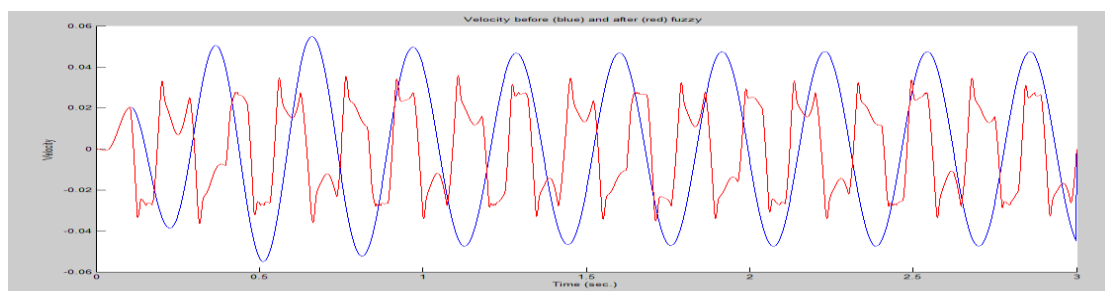
Τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3.1.2, όπως εύκολα παρατηρούμε είναι πανομοιότυπα με αυτά του προηγούμενου πίνακα (πίνακας 5.3.1.1), γεγονός που σημαίνει ότι ο ελεγκτής έχει τα ίδια ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη μείωση της μετατόπισης και της ταχύτητας της πλάκας, ανεξάρτητα από το σημείο εφαρμογής της δύναμης.

Φορτίσεις στα δυο άκρα της πλάκας, στους κόμβους 7 και 163

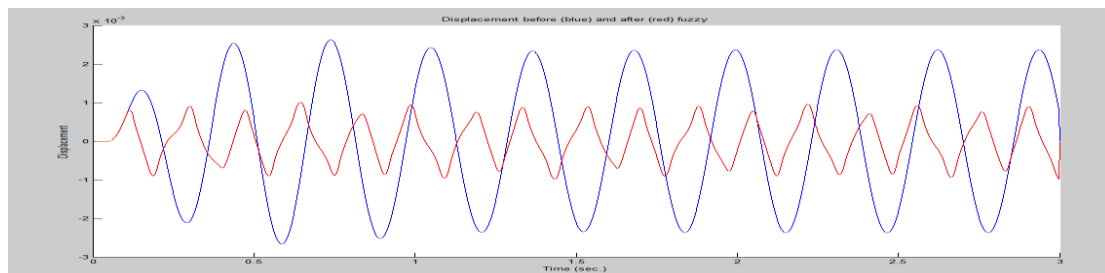
Συνεχίζοντας, θα εφαρμόσουμε εξωτερική φόρτιση και στο άλλο άκρο της πλάκας, ώστε να υπάρχουν δυνάμεις σε δυο σημεία (στα άκρα) της πλάκας και έλεγχος στο κέντρο. Όπως και στα προηγούμενα πειράματα, χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης απ' όπου προκύπτουν τα διαγράμματα ταχύτητας, μετατόπισης, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου τα οποία παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.



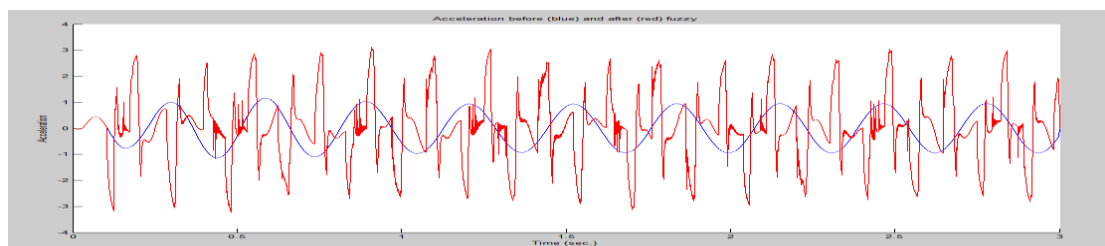
Εικόνα 5.3.1.11 Φορτίσεις (μπλε) και ελεγκτής (κόκκινο)



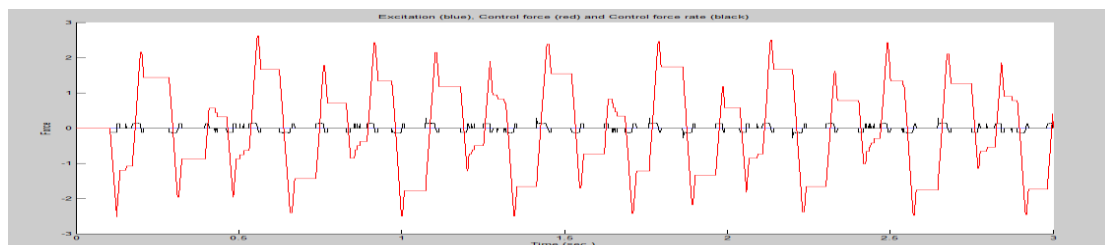
Εικόνα 5.3.1.12 Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.13 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.14 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.156 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1098
Με έλεγχο	0.0020	0.0723
Μεταβολή % (απόλυτη)	62.2394	34.1603

Πίνακας 5.3.1.3

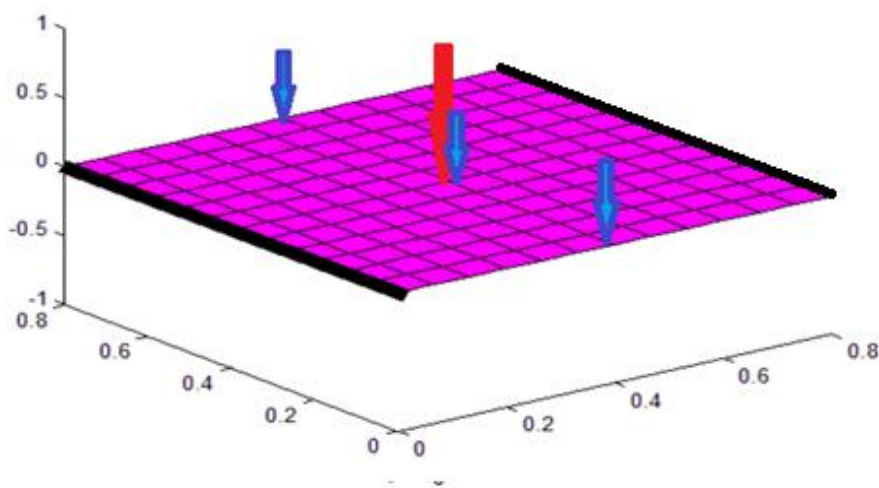
Όπως παρατηρούμε, ο πίνακας 5.3.1.3 είναι ακριβώς ίδιος με τον πίνακα 5.3.1.2, γεγονός που σημαίνει ότι η μετατόπιση και η ταχύτητα στην πλάκα λαμβάνουν ίδιες τιμές για την εφαρμογή μιας ή δυο δυνάμεων φόρτισης αντίστοιχα. Αυτό πρακτικά

σημαίνει ότι η κατανομή των εξωτερικών φορτίων σε δύο σημεία αντί για τη συγκέντρωση σε ένα δεν έχει κανέναν αντίκτυπο στη λειτουργία του ελέγχου.

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε την περίπτωση φόρτισης τριών σημείων της πλάκας, όπως κάναμε και στις προηγούμενες ενότητες.

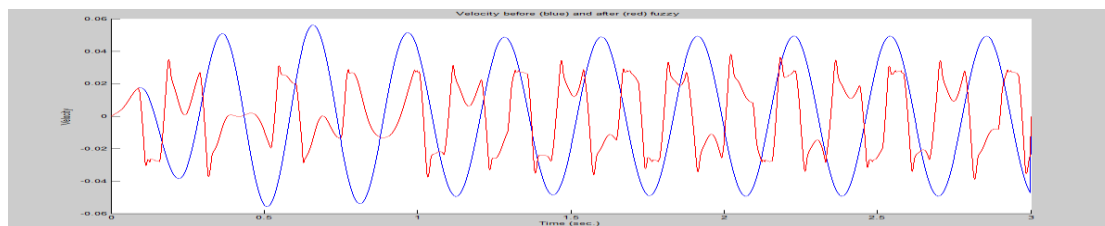
Φορτίσεις σε τρία σημεία της πλάκας (κόμβοι 7, 85, 163)

Όπως και στο πρώτο πείραμα που διερευνήσαμε, φορτίζουμε την πλάκα με δυνάμεις σε τρία σημεία χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή. Στην αρχή, αυτό έγινε στην ενότητα 5.1.1 με τη διαφορά ότι ο ελεγκτής ήταν στο άκρο, και τα αποτελέσματα τα οποία μετρούσαμε ήταν και αυτά στο άκρο της πλάκας. Σε αυτή την υποενότητα έχουμε τοποθετημένο τον ελεγκτή στο μέσο, λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές για το μέρος στο οποίο έχουμε τον ελεγκτή.

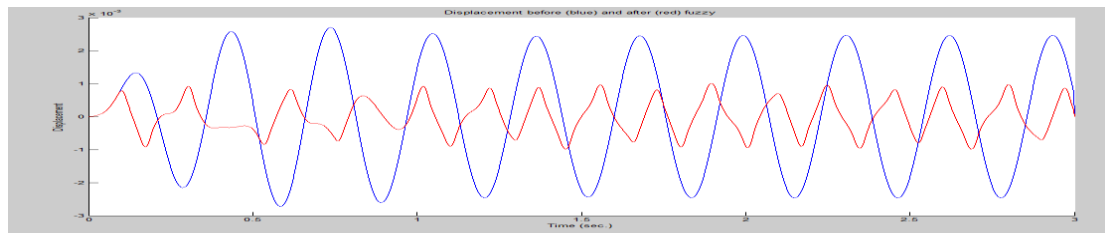


Εικόνα 5.3.1.16 Φορτίσεις (μπλε) και ελεγκτής (κόκκινο)

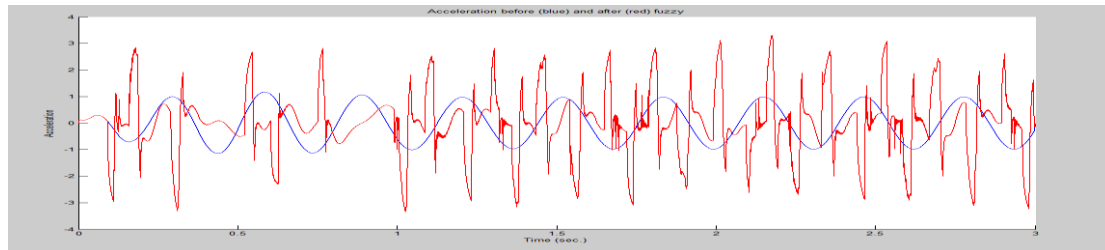
Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης απ' όπου προκύπτουν τα διαγράμματα ταχύτητας, μετατόπισης, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου τα οποία παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες. Επίσης, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά της ενότητας 5.1 όπου ο ελεγκτής είναι τοποθετημένος στο άκρο.



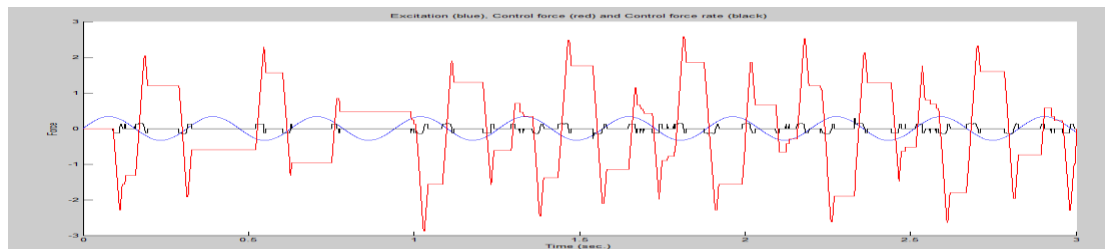
Εικόνα 5.3.1.17 Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.18 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.19 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.1.20 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

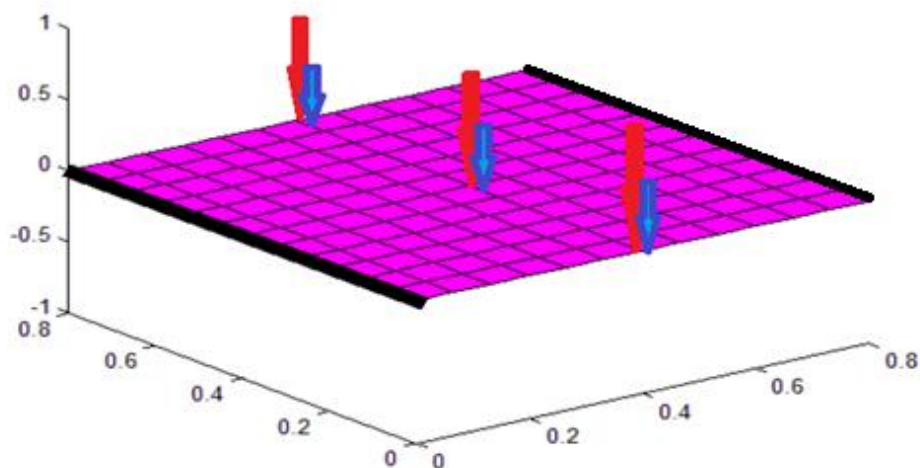
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0054	0.1119
Με έλεγχο	0.0020	0.0772
Μεταβολή % (απόλυτη)	63.2593	31.0234

Πίνακας 5.3.1.4

5.3.2 Περίπτωση τριών ελεγκτών στους κόμβους 7, 85, 163

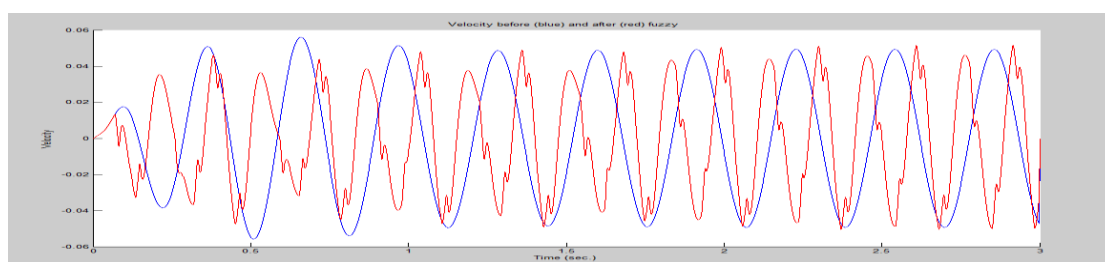
Φορτίσεις σε τρία σημεία της πλάκας (κόμβοι 7, 85, 163)

Σε αυτή την περίπτωση θα εξετάσουμε την εφαρμογή ελέγχου σε τρία σημεία, τα σημεία όπου ασκούνται και οι τρεις δυνάμεις. Επομένως, το σχήμα της πλάκας θα είναι το ακόλουθο.

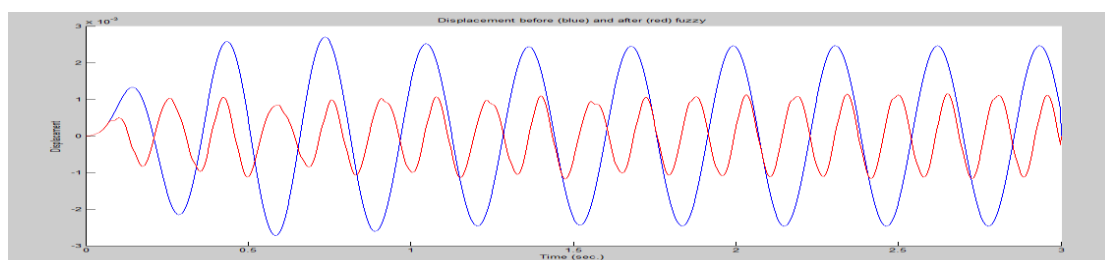


Εικόνα 5.3.2.1 Φορτίσεις (μπλε) και ελεγκτές (κόκκινο)

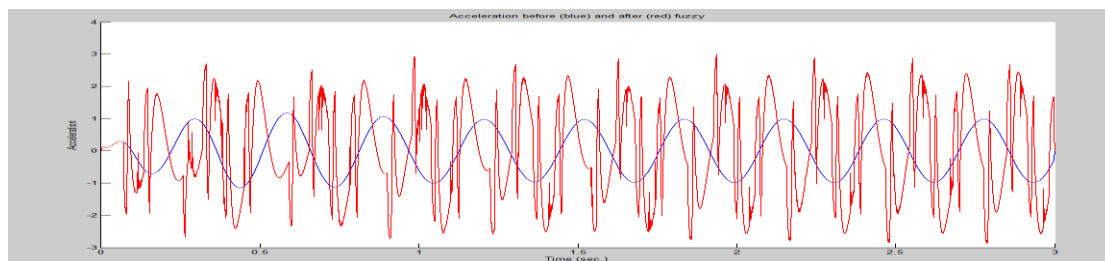
Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης από τον οποίο προκύπτουν τα διαγράμματα ταχύτητας, μετατόπισης, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου.



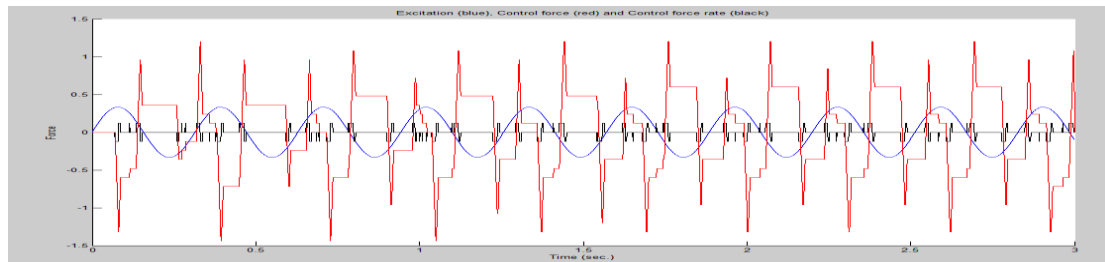
Εικόνα 5.3.2.2 Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.2.3 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.2.4 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.2.5 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

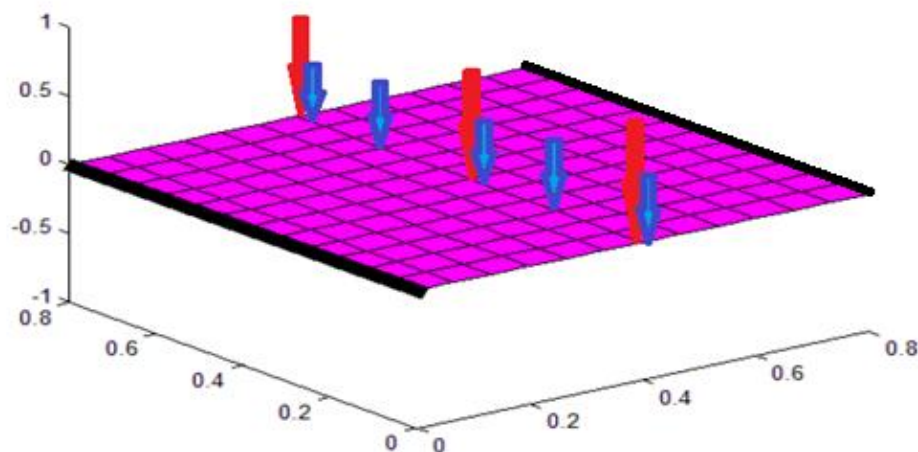
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0054	0.1119
Με έλεγχο	0.0023	0.1019
Μεταβολή % (απόλυτη)	57.1175	8.9050

Πίνακας 5.3.2.1

Παρατηρούμε ότι ο έλεγχος έχει ικανοποιητικό αποτέλεσμα στη μείωση της μετατόπισης μειώνοντάς την κατά 57%, κάτι που δε συμβαίνει με τη μέγιστη ταχύτητα, στην οποία η ποσοστιαία μείωση που παρατηρείται είναι περίπου 9%.

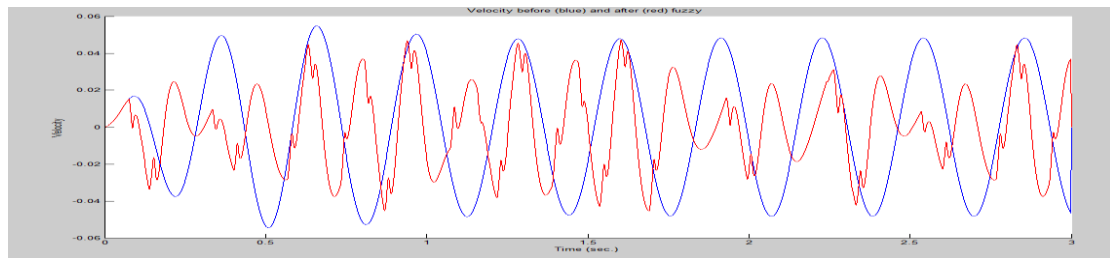
Φορτίσεις σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)

Στο τελευταίο αυτό πείραμα θα διατηρήσουμε τους τρεις ελεγκτές, ασκώντας φόρτιση στην πλάκα σε πέντε σημεία.

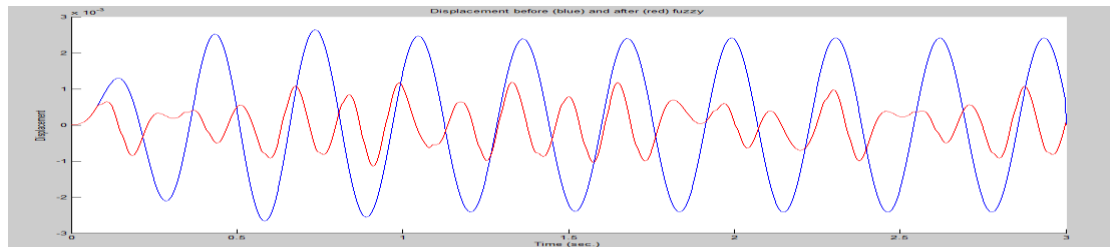


Εικόνα 5.3.2.6 Φορτίσεις (μπλε) και ελεγκτές (κόκκινο)

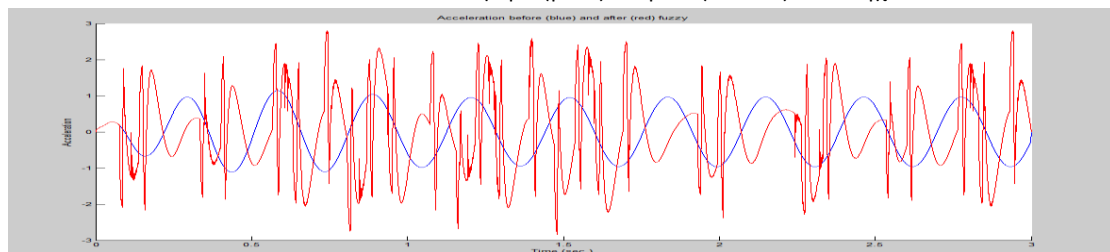
Με εφαρμογή του αλγορίθμου αριθμητικής ολοκλήρωσης προκύπτουν τα διαγράμματα ταχύτητας, μετατόπισης, επιτάχυνσης και δύναμης ελέγχου.



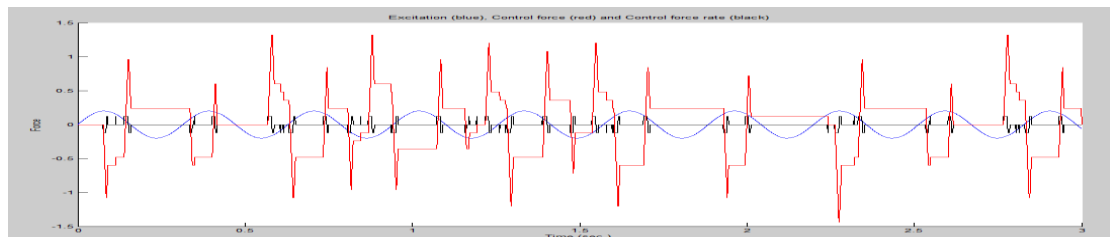
Εικόνα 5.3.2.7 Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.2.8 Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.2.9 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο



Εικόνα 5.3.2.10 Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1093
Με έλεγχο	0.0023	0.0926
Μεταβολή % (απόλυτη)	56.1643	15.2911

Πίνακας 5.3.2.2

Ο πίνακας 5.3.2.2 παρουσιάζει ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε σχέση με τη μείωση της μέγιστης μετατόπισης, η οποία είναι σχεδόν ίδια με αυτή του πίνακα 5.3.2.1, δηλαδή την περίπτωση εξωτερικών δυνάμεων σε τρία σημεία. Παρ' όλα αυτά η μείωση της μέγιστης ταχύτητας στην περίπτωση των πέντε φορτίσεων είναι σαφώς καλύτερη από αυτή του πίνακα 5.2.2.1 φθάνοντας ένα ποσοστό 15%, χωρίς βέβαια το αποτέλεσμα να είναι αρκετά ικανοποιητικό.

6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έπειτα από τις παραπάνω δοκιμές στην αμφίπακτη πλάκα, μεταβάλλοντας το πλήθος και τη θέση των ελεγκτών, όπως και το πλήθος και τη θέση των δυνάμεων που ασκούνται στην πλάκα, καταλήγουμε σε μερικά συμπεράσματα όσον αφορά τη σωστή τοποθέτηση των ελεγκτών για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος στο πρόβλημά μας. Αυτό επιτυγχάνεται παρατηρώντας τους πίνακες του 5^{ου} κεφαλαίου, όπου μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε τις περιπτώσεις στις οποίες τα εξαγόμενα του πειράματος είναι αρκετά ικανοποιητικά.

Συγκεκριμένα, όταν ο έλεγχος γίνεται με την τοποθέτηση

- **δύο ελεγκτών στα άκρα της πλάκας**, έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, με ποσοστιαία μείωση της μετατόπισης κατά 70% και της ταχύτητας κατά 30%.
- **ενός ελεγκτή στο άκρο της πλάκας** όπου η μετατόπιση μειώνεται κατά 69% και η ταχύτητα κατά 28%.
- **δύο ελεγκτών τοποθετημένων στο 1/3 και 2/3 της πλάκας**, όπου η μετατόπιση μειώνεται κατά 67% και η ταχύτητα κατά 26%.

Συμπερασματικά, είδαμε ότι ο ασαφής ελεγκτής λειτουργεί αρκετά ικανοποιητικά για το μοντέλο αμφίπακτης πλάκας που εξετάσαμε πετυχαίνοντας αξιοσημείωτα μείωση των ταλαντώσεων τόσο στο πεδίο των μετατοπίσεων όσο και σε αυτό των ταχυτήτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ταϊρίδης Γεώργιος, Προσομοίωση σύνθετων ευφυών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009
- [2] Ροβέρτος Ε. Κινγκ, Υπολογιστική νοημοσύνη στον έλεγχο συστημάτων, Εκδόσεις Τραυλός 1998
- [3] IoannisPapachristou, SalonikosSalonikidis, GeorgiosK. TairidisandGeorgiosE. Stavroulakis, Adaptivefuzzycontrolof smart structures - ANFIS, 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Athens, 30 June – 2 July 2011
- [4] G.E. Stavroulakis, I. Papachristou, S. Salonikidis, I. Papalaïos and G. K. Tairidis: Neurofuzzy control for smart structures, CSC2011, The Second International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering, Chania, Greece, 6-9 September 2011, invited lecture
- [5] Β. Ραυτόπουλος, Εφαρμογές Ευφυούς Ελέγχου στον Έλεγχο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010
- [6] Ιωάννης Μανδουραράκης, Έρευνα για την εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος διαχείρισης Ήπιων Μορφών Ενέργειας σε οικιακή/βιομηχανική κλίμακα με τη χρήση ασαφούς λογικής, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2011
- [7] Τσαγκάρης Αντώνης, Έλεγχος σύνθετων πιεζοηλεκτρικών πλακών με χρήση ασαφούς λογικής, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013
- [8] G.E. Stavroulakis, G.A. Foutsitzi, E.P. Hadjigeorgiou, D.G. Marinova, E.C. Zacharenakis, C.C. Baniotopoulos, Numerical experiments on smart beams and plates.
- [9] G. Foutsitzi, D. Marinova, G. Stavroulakis, E. Hadjigeorgiou, Vibration control analysis of smart piezoelectric composite plates, 2nd International Conference “From Scientific Computing to Computational Engineering” 2nd IC-SCCE, Athens, 5-8 July, 2006
- [10] G.K. Tairidis, G.E. Stavroulakis, D.G. Marinova, E.C. Zacharenakis: Classical and soft robust active control of smart beams. Ch. 11, pp. 165-178, In: Computational Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Eds. M. Papadrakaïkis, D.C. Charmpis, Y. Tsompanakis, Nikos D. Lagaros, CRC Press – Taylor & Francis Group, London, 2009.

- [11] G.K. Tairidis, G.E. Stavroulakis, D.G. Marinova, E.C. Zacharenakis: Classical and soft robust active control of smart beams. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, M. Papadrakakis et al. Eds, Rethymno, Crete, Greece, 13-16 June 2007

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δρ. Βολογιαννίδης Σταύρος, Ευφυής Έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές διδακτικές Σημειώσεις Τμήματος Πληροφορικής και Επικοινωνιών, ΤΕΙ Σερρών
2. D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrak, An introduction to fuzzy control. 2nd edition, Springer Verlag, 1996
3. G. Foutsitzi, E. Hadjigeorgiou, D. Marinova, G. Stavroulakis, Analysis and control of smart viscoelastic beams, 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics Limassol, 29 June – 1 July 2005

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (Περιγραφή αλγορίθμου αριθμητικής ολοκλήρωσης)

Ο αλγόριθμος της αριθμητικής ολοκλήρωσης συντάχθηκε στο περιβάλλον της Matlab[1],[10],[11]. Η φιλοσοφία της λειτουργίας του έχει ως εξής:

Αρχικά ορίζονται οι σταθερές β και γ της μεθόδου Houbolt με τις τιμές 0.25 και 0.5 αντίστοιχα. Επίσης ορίζονται παραμετρικά, δηλαδή συναρτήσει των δυο προηγούμενων σταθερών, οι μεταβλητές $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ σύμφωνα με τους τύπους που παρατίθενται στην υποενότητα 4.4.

Στη συνέχεια ορίζεται το χρονικό διάστημα της ολοκλήρωσης t (0 έως 3 sec) και το βήμα dt (0,001 sec). Προκύπτει έτσι ένα πλήθος υποδιαστημάτων που αριθμεί τα 3000.

Φορτώνονται τα μητρώα μάζας, δυσκαμψίας και απόσβεσης όπως προέκυψαν από τον αλγόριθμο που προσομοιώνει τη σύνθετη πλάκα.

Ορίζονται η συχνότητα, το πλάτος της φόρτισης, οι κόμβοι επιβολής του και οι κόμβοι ελέγχου.

Δημιουργείται το διάνυσμα φόρτισης και ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων.

Αρχικοποιούνται τα διανύσματα της μετατόπισης της ταχύτητας και της επιτάχυνσης για πριν και μετά τον έλεγχο καθώς και αυτό της δύναμης ελέγχου.

Ορίζονται οι αρχικές συνθήκες δηλαδή μηδενίζονται οι τιμές της μετατόπισης της ταχύτητας και της επιτάχυνσης για $t=0$.

Υπολογίζονται οι ενδιάμεσοι πίνακες K^* και F^* και ξεκινάει ένας βρόχος σε κάθε επανάληψη του οποίου υπολογίζεται η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση του επόμενου βήματος.

Στη συνέχεια ορίζουμε τον κόμβο ή τους κόμβους που πρόκειται να εφαρμοσθεί ο έλεγχος και υπολογίζουμε τη μέγιστη μετατόπιση και ταχύτητα του. Τα δεδομένα αυτά μαζί με το πλάτος της φόρτισης δίνονται στον fuzzy ελεγκτή που περιγράφηκε στην υποενότητα 4.3, ο οποίος με τη σειρά του τα χρησιμοποιεί για να δημιουργήσει τις παραμετρικά ορισμένες συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων και της εξόδου.

Ακολουθεί ένας βρόχος που υπολογίζει τη μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση του κόμβου που ασκείται ο έλεγχος σε κάθε βήμα, συνυπολογίζοντας τη δύναμη ελέγχου που παράχθηκε από τον ελεγκτή και τις εξωτερικές φορτίσεις που ασκούνται σε αυτόν.

Τέλος τυπώνονται οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων όπως παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.