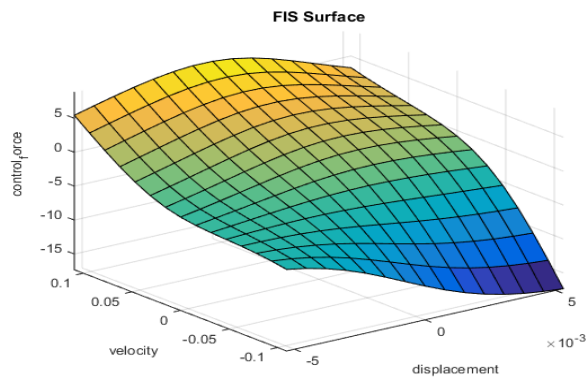




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής & Βελτιστοποίησης



ΝΕΥΡΟΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΜΦΙΠΑΚΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιμέλεια: Ορέστης Μήτρου-Κιντής
Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Ευχαριστίες

Η πορεία ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε έντονα διδακτική επιρροή σε προσωπικό επίπεδο.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη που με βοήθησε και καθοδήγησε στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Η βοήθειά του και οι παρατηρήσεις του ήταν πάντα εύστοχες και καίριες με σκοπό την διευκόλυνση της έρευνας και της υλοποίησης της. Ήταν πάντοτε στη διάθεσή μου για οποιαδήποτε απορία και ερώτημα μου παρουσιαζόταν.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Γεώργιο Ταϊρίδη διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης" για τον χρόνο που αφιέρωσε στην επίλυση αποριών και την αστείρευτη προθυμία του.

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	5
2.1 Ιστορική αναδρομή στην ασαφή λογική.....	5
2.2 Βασικές έννοιες και ιδιότητες ασαφών συνόλων.....	5
2.3 Κλασικός Έλεγχος	7
2.4 Ευφυής έλεγχος.....	9
3. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	11
3.1 Πιεζοηλεκτρισμός.....	11
3.2 Πιεζοηλεκτρικά ελάσματα.....	11
3.3 Πεπερασμένα στοιχεία.....	13
4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΜΦΙΠΑΚΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ.....	15
4.1 Μοντέλο αμφίπακτης πλάκας.....	15
4.2 Περιγραφή του προβλήματος.....	16
4.3 Η μέθοδος sugeno στην παρούσα εργασία	17
4.4 Μέθοδος ολοκλήρωσης στο υπάρχον πρόβλημα.....	21
5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	22
5.1 Περίπτωση εφαρμογής δύναμης στον κόμβο 7.....	23
5.1.1 Έλεγχος στον κόμβο 7.....	24
5.1.2 Έλεγχος στον κόμβο 85.....	25
5.1.3 Έλεγχος στον κόμβο 163.....	27
5.2.3 Έλεγχος στον κόμβο 163.....	33
5.3 Εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 163.	34
5.3.1 Έλεγχος στον κόμβο 7.....	34
5.3.2 Έλεγχος στον κόμβο 85.....	35
5.3.3 Έλεγχος στον κόμβο 163	38
5.4 Εφαρμογή δύναμης στους κόμβους 7 και 163, έλεγχος στο κέντρο (κόμβος 85)	40
5.5 Εφαρμογή δύναμης σε 3 σημεία.	42
5.5.1 Εφαρμογή ελέγχου στον κόμβο 85	42
5.6.1 Εφαρμογή του ελέγχου στον κόμβο 163	44
5.7 Εφαρμογή δύναμης σε 5 σημεία.	46
5.7.1 Εφαρμογή ελέγχου στον κόμβο 163.	46
5.7.2 Εφαρμογή ελεγκτή στον κόμβο 85.....	47
5.8 Αποτελέσματα ελεγκτή Mamdami.....	49
5.9 Σύγκριση Sugeno Mamdami.....	50
6. Συμπεράσματα.	52

6.1 Συμπεράσματα για τον ελεγκτή Sugeno	52
6.2 Συμπεράσματα ως προς την σύγκριση Sugeno Mamdami.	52
Βιβλιογραφία	54

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα της μηχανικής είναι ο έλεγχος των ταλαντώσεων στις διάφορες κατασκευές. Τα τελευταία χρόνια, η επιστήμη μας έχει εφοδιάσει με τα απαραίτητα εργαλεία, ώστε να μπορούμε με μεγάλη ακρίβεια να προβλέψουμε την μηχανική συμπεριφορά κάθε κατασκευής που κατασκευάζεται, με σκοπό την λήψη κατάλληλων μέτρων για την αντιμετώπιση προβλημάτων που δύναται να εμφανιστούν.

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

Η πλάκα στην πρώτη φάση της εργασίας διακριτοποιείται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Έπειτα, εφαρμόζονται ημιτονοειδείς φορτίσεις και ανά περιπτώσεις, τοποθετούμε τις φορτίσεις σε διάφορα σημεία της πλάκας. Στην συνέχεια ενεργοποιούμε τον νεύρο-ασαφή έλεγχο σε διάφορα σημεία της πλάκας, με σκοπό την βέλτιστη εξομάλυνση των φορτίσεων. Ο νεύρο ασαφής ελεγκτής που χρησιμοποιήσαμε έχει κατασκευαστεί από τον κ. Γεώργιο Ταϊριδη στο πλαίσιο της διπλωματικής του διατριβής.

Τέλος, θα αντιπαραβάλλουμε τα στοιχεία που λάβαμε από τις μετρήσεις μας, με στοιχεία παρόμοιας εργασίας, που είχε την ίδια πλάκα ως πεδίο φορτίσεων και ελεγκτή τύπου ασαφή ελέγχου. Σκοπός μας είναι να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα ασαφή, νεύρο ασαφή ελέγχου, και να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για το ποια μορφή ελέγχου είναι αποδοτικότερη και υπό ποιες συνθήκες.

Το προγραμματιστικό περιβάλλον το οποίο επιλέχθηκε για να γίνουν πράξη τα παραπάνω είναι αυτό της Matlab.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Γεωργίου Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

2. ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1 Ιστορική αναδρομή στην ασαφή λογική

Η αρχική ανάπτυξη της θεωρίας των συνόλων αναπτύχθηκε από τον Georg Cantor και τον Dedekind την δεκαετία του 1870. Αντίθετα με τις υπόλοιπες μαθηματικές θεωρίες που επικρατούσαν τότε, και που κυρίως εξέταζαν δομές, η συνολοθεωρία μελετάει σύνολα.

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

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

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

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

2.2 Βασικές έννοιες και ιδιότητες ασαφών συνόλων.

Η ασαφής λογική, παρόλο που η ονομασία της παραπέμπει σε κάτι ανακριβές, στην πραγματικότητα προσπαθεί να μοντελοποιήσει καταστάσεις αβέβαιης, και ελλιπούς πληροφορίας, ώστε να δώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα στην λύση ενός ασαφούς προβλήματος.

Η παραπάνω πρόταση μπορεί να γίνει κατανοητή με την παράθεση ενός παραδείγματος. Έστω το ασαφές σύνολο "Κάθισμα". Σε τι βαθμό ανήκουν σε αυτό τα ακόλουθα αντικείμενα: καρέκλα, καναπές, σκαμπό, πέτρα; Οι τιμές που μπορούν να λάβουν αυτά τα αντικείμενα θα είναι ένας αριθμός μεταξύ 0 και 1. Το 1 συνάδει απόλυτα με την έννοια του καθίσματος, ενώ το 0 καθόλου. Η καρέκλα θα μπορούσε να πάρει εύκολα την τιμή 1. Αντίθετα, η πέτρα θα λάβει μια τιμή κοντά στο 0, αλλά όχι ακριβώς 0, αφού κάποιος θα μπορούσε να κάτσει, αν και όχι άνετα, πάνω της.

Για να κάνουμε πιο κατανοητό το παράδειγμα, μπορούμε να το μοντελοποιήσουμε με μαθηματικά. Το ασαφές σύνολο "Κάθισμα" = A ως προς το σύνολο αναφοράς X μπορεί να παρασταθεί μέσω της παρακάτω συνάρτησης συμμετοχής.

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1], \text{ με } \mu_A(x) = \alpha, \alpha \in [0,1]$$

Ο αριθμός $\mu_A(x)$ δηλώνει το βαθμό συμμετοχής του στοιχείου x (καρέκλα, καναπές κλπ) στο ασαφές σύνολο A, δηλαδή σε ποιο βαθμό συμμετέχει-ανήκει ο καναπές, π.χ στο σύνολο κάθισμα.

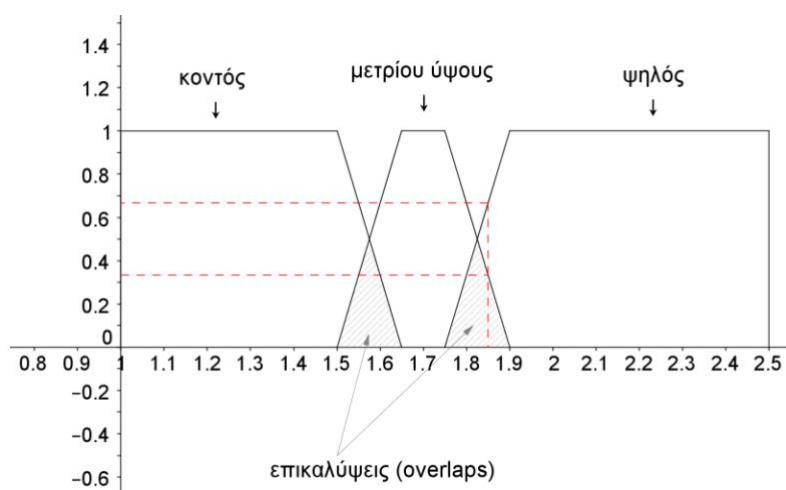
Οι πιθανές τιμές που μπορεί να πάρει το $\mu_A(x)$ είναι:

$\mu_A(x)=1$ για ολοκληρωτική συμμετοχή του στοιχείου στο σύνολο,

$\mu_A(x)=0$ για ανύπαρκτη συμμετοχή του στοιχείου στο σύνολο,

$0 < \mu_A(x) < 1$ για μερική συμμετοχή του στοιχείου στο σύνολο, δηλαδή ότι μπορεί να ανήκει κατά κάποιον βαθμό-ποσοστό στο ασαφές σύνολο A.

Ακόμα ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, για την περαιτέρω κατανόηση των ασαφών συνόλων είναι το ασαφές σύνολο "ύψος ανθρώπου". Κάποιος θα μπορούσε να πει ότι ένας άνθρωπος από ύψος 1,75 και άνω είναι ψηλός. Πράγματι είναι, άλλα κάποιος με ύψος 1,74 δεν είναι; Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί, αναπαριστώντας την λύση με ένα γράφημα που στον κατακόρυφο άξονα έχει τιμές 0-1 και δείχνει ποσοτικά το ύψος του, και στον οριζόντιο τις πιθανές τιμές ύψους ενός ανθρώπου πχ. 130cm-210cm. Οι γραφικές παραστάσεις που μας δίνουν το αποτέλεσμα στην ερώτηση "πόσο ψηλός είναι κάποιος;" για κάθε πιθανό ύψος, θα μπορούσαν να είναι όπως στο παρακάτω σχήμα ή και μιας άλλης μορφής.



Σχ. 2.1 Αναπαράσταση ασαφής μεταβλητής σε γράφημα.

Σύμφωνα λοιπόν με την ασαφή λογική και το γράφημα που παραθέσαμε παραπάνω, κάποιος με ύψος 185, είναι κατά 0,33% μετρίου ύψους και κατά 0,64% ψηλός. Παρατηρούμε δηλαδή, ότι η Ασαφής Λογική, εκφράζει την ασάφεια και την υποκειμενικότητα πάρα πολύ αποδοτικά και συγκεκριμένα.

Συνοψίζοντας, κάθε στοιχείο του χώρου λαμβάνει μία τιμή από το εύρος [0-1], η οποία φανερώνει το ποσοστό συμμετοχής του στοιχείου στο σύνολο. Αν π.χ. το στοιχείο πάρει την τιμή 1, έχει απόλυτη συμμετοχή, ενώ η τιμή 0 υποδεικνύει μηδενική συμμετοχή στο σύνολο. Αναλόγως μπορεί να πάρει και ενδιάμεσες τιμές. Αντίθετα στα κλασικά σύνολα ένα στοιχείο είτε λαμβάνει είτε δε λαμβάνει μέρος, δηλαδή μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές 0,1 και συμμετέχει μόνο αν πάρει την τιμή 1.

Έστω ένα σύνολο X , το οποίο περιλαμβάνει όλα τα υπό αναφορά αντικείμενα x . Ασαφές σύνολο A είναι ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών $(x, u_A(x))$ όπου $x \in X$ και $u_A(x) \in [0,1]$ και ονομάζεται βαθμός αληθείας (degree of truth).

Η u_A ονομάζεται συνάρτηση συγγένειας ή συνάρτηση συμμετοχής (membership function).

Η τιμή $u(x)$ μας δείχνει κατά πόσο το x ανήκει στο σύνολο X . Για παράδειγμα, το x =σκαμπό ανήκει στο ασαφές σύνολο X =κάθισμα σε βαθμό $u_{\text{ΚΑΘΙΣΜΑ}}(\text{σκαμπό})=0.8$

Οι τιμές $u_A(x)$ προκύπτουν με υποκειμενικά κριτήρια και εκτιμήσεις, ή με στατιστικά δείγματα και προηγμένες μορφές εκμαθήσεις, όπως τα νευρωνικά δίκτυα

Τέλος, σε ένα ασαφές σύνολο, ισχύουν όλοι οι τελεστές και οι ιδιότητες των κλασικών συνόλων, δηλαδή ισχύει η ισότητα, ανισότητα, τομή, ένωση, αντιμεταθετική ιδιότητα κλπ. Μοναδική εξαίρεση του κανόνα αποτελεί η αρχή του αποκλειόμενου μέσου, η οποία δεν ισχύει στα ασαφή σύνολα, καθώς ο αποκλεισμός ενός γεγονότος δε σημαίνει απαραίτητα ότι ισχύει το αντίθετο του. (Κόκκορας, 2011) (Ταϊρίδης, 2016)

2.3 Κλασικός Έλεγχος

Η κλασική, παραδοσιακή δίτιμη Αριστοτέλεια λογική, είναι γνωστή από την Αρχαιότητα. Πρώτοι την θεμελίωσαν οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι και αποτελεί την βάση της σκέψης του δυτικού πολιτισμού.

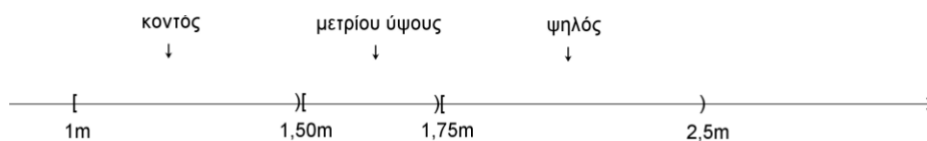
Κατά την κλασική λογική, μια πρόταση μπορεί να είναι είτε μόνο ψευδής, είτε μόνο αληθής. Δηλαδή, αν την αναγάγαμε σε ένα ψηφιακό σύστημα, δύναται να λάβει μόνο τις τιμές 0 και 1 για ψευδή και αληθή δήλωση αντίστοιχα, αποκλείοντας έτσι μια τρίτη λύση, δηλαδή ισχύει η "Αρχή της του Τρίτου Αποκλίσεως".

Κατά το συμβατικό ή κλασικό έλεγχο, η διεργασία και ο ελεγκτής περιγράφονται από γραμμικά μοντέλα διαφορικών εξισώσεων. Τα μοντέλα αυτά θεωρούνται γνωστά. Οι προδιαγραφές αποτελούνται από ένα σύνολο κριτηρίων, που αν πληρούνται, ο ελεγκτής θεωρείται επιτυχημένος. Τέτοια κριτήρια μπορεί να είναι η ταχύτητα, η θερμοκρασία και διάφορα άλλα μετρήσιμα μεγέθη.

Ανάγοντας τα παραπάνω σε μαθηματικά πρότυπα, η χαρακτηριστική συνάρτηση που μπορεί να παραστήσει ένα δίτιμο σύνολο A , ως προς το σύνολο αναφοράς X , είναι η παρακάτω.

$$I_A: X \rightarrow \{0,1\}, \text{ με } I_A(x) = 1, \text{ αν } x \in A \text{ και } I_A(x) = 0, \text{ αν } x \notin A$$

Για την καλύτερη κατανόηση, παραθέτουμε το παράδειγμα του ύψους του ανθρώπου, αλλά μελετώντας το με την κλασική λογική αυτή την φορά:



Σχ.2.2 Αναπαράσταση κλασικής λογικής σε γράφημα

Σύμφωνα με το σχήμα, η κλασική μεταβλητή ύψος μπορεί να πάρει 3 τιμές: κοντός, μέτρίου ύψους, ψηλός. Όπως φαίνεται, ένας άνθρωπος που έχει ύψος 1,49m χαρακτηρίζεται ως κοντός, ενώ κάποιος με ύψος 1,50m χαρακτηρίζεται μετρίου ύψους, παρότι έχουν μόνο ένα εκατοστό διαφορά στο ύψος τους.

Μειονεκτήματα αυτής της μορφής ελέγχου είναι ότι οι κανόνες που διέπεται είναι κυρίως εμπειρικοί και τα πρότυπα προσεγγιστικά. Δεν μπορεί να ανταπεξέλθει ορθά σε όλους εκείνους τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την διαδικασία, χρησιμοποιεί ποσοτικές περιγραφές και πολλές φορές όπως είδαμε και στο παραπάνω παράδειγμα είναι αναξιόπιστη και ανακριβής.

Η δίτιμη λογική, παρ'όλες της ανακρίβειες και τα μειονεκτήματα που φαίνεται πως έχει, έγινε αρκετά δημοφιλής γιατί ήταν πολύ απλή στην σύλληψη της ιδέας της και έδινε πάντα ένα βέβαιο αποτέλεσμα. Υπάρχει φαινομενικά μία απάντηση για κάποια ερώτηση, και κάτι είναι είτε σωστό είτε λάθος. Επιπρόσθετα, αν αποκλείσουμε το ένα, τότε θα είναι σίγουρα το άλλο. Αποδίδει δηλαδή μια απόλυτη βεβαιότητα και απλότητα στα αποτελέσματα που λαμβάνουμε.

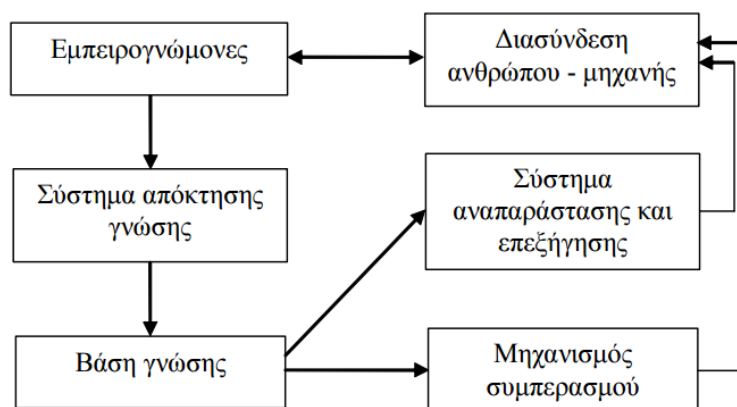
2.4 Ευφυής έλεγχος.

Ο βασικός στόχος του ευφυή ελέγχου, είναι να προσομοιώσει, όσο το δυνατόν καλύτερα, τον τρόπο σκέψης του ανθρώπου και τις αντιδράσεις του για την εύρεση μιας λύσης σε ένα πρόβλημα. Για να το πετύχει αυτό, πρέπει να συνδυάζει γνώσεις από ποικίλα επιστημονικά πεδία και διαφορετικούς τρόπους σκέψης, ώστε να μπορεί να δώσει την βέλτιστη απόφαση κάθε φορά για την παραγωγική διαδικασία.

Για να σχεδιαστεί ένας ευφυής ελεγκτής, πρέπει πρώτα να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα και να δημιουργηθούν κανόνες-αντιδράσεις, παρόμοιοι με τις αντιδράσεις που θα έκανε ένας άνθρωπος χειριστής στην εκάστοτε περίπτωση. Οι κανόνες δημιουργούνται μέσω γενετικών αλγορίθμων και διάφορων άλλων τεχνικών. Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιήσαμε και στον ελεγκτή της παρούσας εργασίας.

Στην συνέχεια, οι κανόνες αποθηκεύονται σε μία βάση και κωδικοποιούνται σε αριθμητική μορφή, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα δίκτυο από απλούς υπολογιστικούς κόμβους διασυνδεδεμένους μεταξύ τους. Ένα δίκτυο αυτής της μορφής ονομάζεται Νευρωνικό δίκτυο, και προσπαθεί να μιμηθεί το ανθρώπινο μυαλό.

Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι η επιλογή και υλοποίηση ενός μηχανισμού συμπερασμού, οπου στην είσοδο του λαμβάνει μετρήσεις και δεδομένα από την διαδικασία, έπειτα αξιοποιεί τη βάση γνώσης που έχει δημιουργηθεί προηγουμένως, και δίνει μια απάντηση στην έξοδο, που ανατροφοδοτείται στην ελεγχόμενη διαδικασία.



Σχ.3.1 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας (Δρ. Βολογιαννίδης Σταύρος)

Ο ευφυής έλεγχος συνήθως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως π.χ. στην γραμμή παραγωγής ενός εργοστασίου. Ένας ευφυής ελεγκτής διέπεται από τέσσερις βασικές αρχές, που αν τις καλύπτει θεωρείται πετυχημένος. Αυτές είναι η Ορθότητα, η Επεκτασιμότητα, η Ευρωστία, και η Επαναχρησιμότητα.

Συγκεκριμένα:

Ορθότητα είναι η ικανότητα του να εκτελεί με ασφάλεια τις απαιτήσεις του συστήματος.

Ως Επεκτασιμότητα ορίζεται η ικανότητα του να προσαρμόζεται στα νέα δεδομένα που προκύπτουν, χωρίς να χρειαστεί να σχεδιαστεί εκ νέου.

Ευρωστία είναι η δυνατότητα του να μπορεί να ανταπεξέλθει σε απρόβλεπτες συνθήκες, και να λάβει σωστές αποφάσεις.

Τέλος, Επαναχρησιμότητα είναι η ιδιότητα της χρησιμοποίησης του ίδιο λογισμικού σε παρόμοιες εφαρμογές. (Βολογιαννίδης Σταύρος, 2009)

3. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

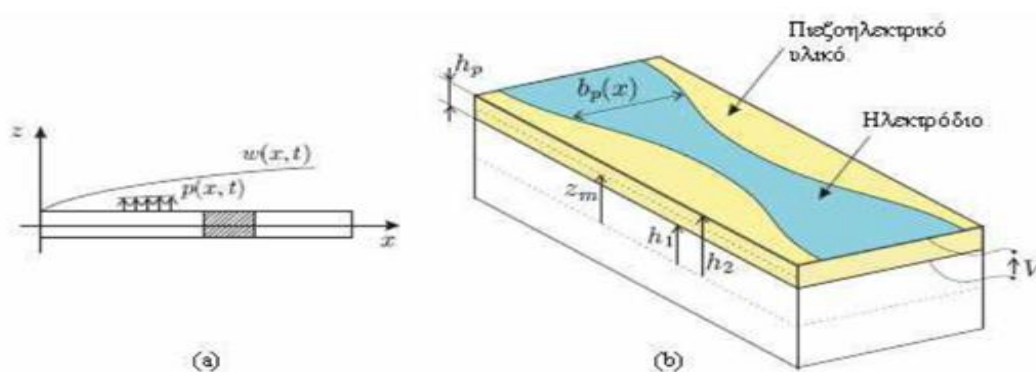
3.1 Πιεζοηλεκτρισμός

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τα αδέρφια Pierre και Jacques Curie το 1880. Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο υλικά με κρυσταλλικές ασυμμετρίες, όπως ο χαλαζίας, το αλάτι κ.α, έχουν την ιδιότητα να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται μηχανική τάση, πίεση ή ταλάντωση. Δύναται να συμβεί και το αντίστροφο, δηλαδή όταν εφαρμόζεται τάση σε ένα υλικό, αυτό να παραμορφώνεται. Για παράδειγμα, αν πιεζοηλεκτρικά υλικά υπόκεινται σε ηλεκτρικές διεγέρσεις κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλικών προσανατολισμών, τότε εμφανίζονται μηχανικές παραμορφώσεις κατά μήκος καλώς ορισμένων κρυσταλλικών προσανατολισμών. Αντίθετα, μπορεί να δημιουργηθεί και μια ηλεκτρική πόλωση φορτίου από μια μηχανική παραμόρφωση.

3.2 Πιεζοηλεκτρικά ελάσματα.

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

Μια τυπική εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών υλικών σε έλασμα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Με παρόμοιο τρόπο θα εφαρμοστεί και στο πρόβλημα μας.

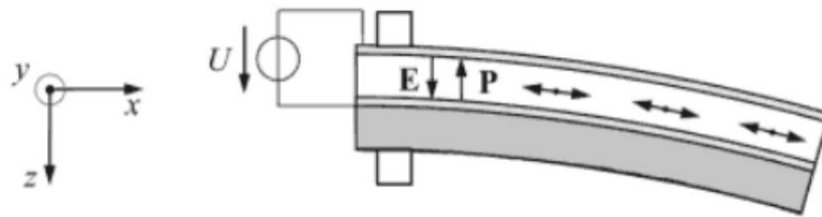


Σχ.3.1 Πιεζοηλεκτρική δοκός

Το παραπάνω σχήμα είναι ένα ενιαίο στοιχείο - προϊόν συγκόλλησης πιεζοηλεκτρικού υλικού, πάχους h_p , πολωμένου κατά τον άξονα z . Η μια πλευρά έχει ως ηλεκτρόδιο την υποστηρικτική κατασκευή δομή, ενώ στην άλλη υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο μεταβλητού πάχους

$b_r(x)$. Έχοντας λοιπόν δύο ηλεκτρόδια δημιουργείται ελεγχόμενη διαφορά δυναμικού. Μπορούμε δηλαδή, ελέγχοντας την τάση η οποία διαρρέει το πιεζοηλεκτρικό υλικό να το μετακινήσουμε στον άξονα z κατά την βούληση μας .

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



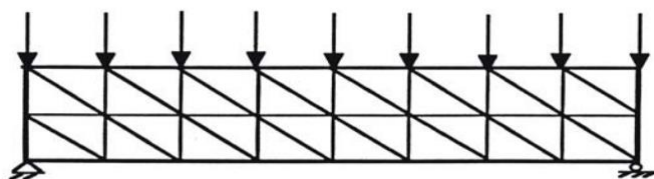
Σχ. 3.2 Παραμόρφωση κατά τον άξονα z ύστερα από ηλεκτρική διέγερση

3.3 Πεπερασμένα στοιχεία.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι η εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Είναι λοιπόν μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Έχει το πλεονέκτημα ότι δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, είναι ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικότερα σε προβλήματα που επιδέχονται μεταβολική διατύπωση στη μηχανική των συνεχών μέσων. Τα πεπερασμένα στοιχεία βασίζονται ουσιαστικά στο γεγονός ότι μπορούμε να επιτύχουμε μια καλή προσέγγιση της λύσης ενός προβλήματος μηχανικής όταν διαλέγουμε και επιλύουμε πολλές συναρτήσεις απλής μορφής με συστηματικό τρόπο. Τα μειονεκτήματα είναι οι πάρα πολλές πράξεις που προκύπτουν και η ανάγκη για μεγάλη επεξεργαστική ισχύ. Η μέθοδος όμως αυτή επιτρέπει τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικού υπολογιστή και με τα σύγχρονα πλέον μέσα δεν αποτελεί ουσιαστικό πρόβλημα.

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

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρωϊκή ανάλυση, η δυνατότητα μοντελοποίησης μιας πραγματικής κατασκευής σε πολλά μικρά συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων.



Σχ.3.2 Χρήση τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων για την διακριτοποίηση δοκού υπο φόρτιση

Για να γίνει χρήση μητρωϊκών μεθόδων, απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των

κόμβων, και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με αυτό τον τρόπο, οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων, ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων, οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους.

Υπάρχουν διαφορετικοί μέθοδοι για την ανάπτυξη της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Δύο από αυτές είναι η ενεργειακή μέθοδος και η μέθοδος του Galerkin. Η πρώτη βασίζεται στην ολική ενέργεια του σώματος ή της κατασκευής. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή και δεν απαιτεί την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Η ενεργειακή μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχει η δυνατότητα να εκφραστεί η ολική δυναμική ενέργεια του προβλήματος στα στερεά. Η μέθοδος του Galerkin εφαρμόζεται όταν δεν γνωρίζουμε την ολική δυναμική ενέργεια και ανήκει στην γενική κατηγορία των Σταθμικών Υπολοίπων. Είναι μια αρκετά γενική και πολύ δυνατή μέθοδος και μπορεί να εφαρμοστεί απ' ευθείας στην επίλυση διαφορικών εξισώσεων.

Ο τρόπος επίλυσης διάφορων προβλημάτων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι παρόμοιος σε όλες τις περιοχές που εφαρμόζεται. Για την επίλυση μιας κατασκευής, πρώτα την μοντελοποιούμε, έπειτα τη διακριτοποιούμε σε μικρά γεωμετρικά σχήματα, σχήματος τριγωνικού ή τετραγωνικού όπως είπαμε και παραπάνω. Οι ιδιότητες του υλικού και οι εξισώσεις που το χαρακτηρίζουν εξετάζονται στα πεπερασμένα στοιχεία σαν συνάρτηση των αγνώστων μετατοπίσεων στις κορυφές του πεπερασμένου στοιχείου. Λαμβάνουμε υπόψιν μας τις οριακές συνθήκες, καθώς και τα μηχανικά ή θερμικά φορτία που μπορεί να υπάρχουν και καταλήγουμε στις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής. Η λύση που αναζητούμε είναι η λύση του συστήματος των εξισώσεων ως προς τους αγνώστους, οι οποίοι είναι οι κομβικές μετατοπίσεις του συστήματος. Εφόσον γνωρίζουμε τις κομβικές μετατοπίσεις στα διάφορα σημεία της κατασκευής, μπορούμε να υπολογίσουμε τις τάσεις, τις παραμορφώσεις, και τις αντιδράσεις των στηρίξεων. (ΓΚΟΤΣΗΣ, 2005)

Για να εφαρμοστεί στην πράξη η μέθοδος, εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα cad κι έτσι δημιουργείται ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Στην συνέχεια, μια αυτοματοποιημένη διαδικασία στο πρόγραμμα χωρίζει το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και εισάγονται επιπλέον πληροφορίες και δεδομένα που απαιτούνται, όπως τιμές δυνάμεων κλπ. Το αρχείο με τα παραπάνω δεδομένα εισάγεται εκ νέου σε τρίτο πρόγραμμα, όπου θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Μερικά από τα γνωστότερα προγράμματα επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι τα ABAQUS, SOFISTIC, ADINA, NASTRAN κ.α. Τα προγράμματα αυτά παρέχουν υπορουτίνες, ώστε ο χρήστης να μπορέσει να τροποποιήσει ή να προσθέσει νέες καταστατικές εξισώσεις, ώστε να μπορέσει να βελτιώσει περαιτέρω το μοντέλο του.

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΜΦΙΠΑΚΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

4.1 Μοντέλο αμφίπακτης πλάκας

Οι προσομοιώσεις που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν σε μοντέλο τετραγωνικής αμφίπακτης πλάκας. Το μοντέλο δημιουργήθηκε από την κ. Γεωργία Φουτσίτζη, αναπληρώτρια καθηγήτρια του ΤΕΙ Ηπείρου (G. Foutsitzi, 5-8 July 2016). Τα χαρακτηριστικά της πλάκας είναι τα παρακάτω:

- Μήκος πλευράς : 0.8m
- Μέτρο ελαστικότητας : $150 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
- Μέτρο διάτμησης : $7.1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
- Πυκνότητα : 1600 kg/m^3

Για να περιορίσουμε τις ταλαντώσεις που δημιουργούνται από αρμονικές φορτίσεις προσθέσαμε πιεζοηλεκτρικά υλικά όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.

Στην συνέχεια, διακριτοποιήσαμε την πλάκα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, ο φορέας διαιρέθηκε σε 144 τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, οδηγώντας σε ένα σύστημα 169 κόμβων με 5 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. 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 πλευράς.

Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση της πλάκας είναι :

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

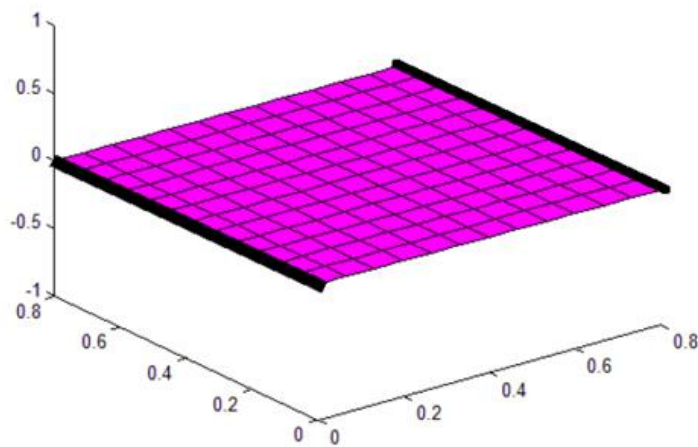
όπου: M , C , K είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας με την απόσβεση να είναι:

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

\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 $t_0=0$

Τέλος

P , Z είναι οι εξωτερικές δυνάμεις και οι δυνάμεις ελέγχου



Σχ.4.1 Το μοντέλο πλάκας που χρησιμοποιήθηκε

4.2 Περιγραφή του προβλήματος

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο περιορισμός των ταλαντώσεων στην παραπάνω πλάκα(σχ 4.1). Για να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση, εφαρμόζουμε έναν νευροασαφή ελεγκτή σε διάφορα σημεία της κατασκευής για να βρούμε το βέλτιστο σημείο, δηλαδή αυτό στο οποίο ελαχιστοποιούνται οι ταλαντώσεις.

Για την δημιουργία ταλαντώσεων χρησιμοποιήσαμε τον ακόλουθο τύπο ημιτονοειδούς φόρτισης : $P = p_0 \cdot \sin(\omega t)$

Η συχνότητα που επιλέχθηκε είναι $\omega = 20 \text{ rad/sec}$ και τελικά έχουμε την σχέση:

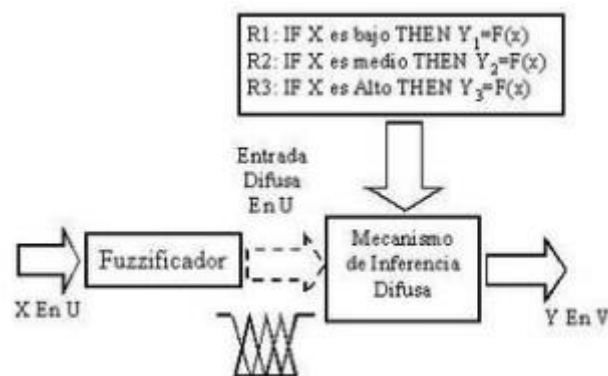
$$P = p_0 \cdot \sin(20t).$$

Ο όρος (p_0) καθορίζεται ανάλογα με τον αριθμό των σημείων φόρτισης, ώστε να μοιράζεται ισόποσα η δύναμη. Για παράδειγμα, αν έχουμε φόρτιση σε 1 σημείο θα είναι $p_0 = 1$, ενώ αν έχουμε φόρτισή σε 3 σημεία θα είναι $p_0 = 1/3$

Προκειμένου να πιστοποιήσουμε τα αποτελέσματα του νευροασαφή ελεγκτή τύπου Sugeno που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, πραγματοποιούμε σύγκριση με τον ελεγκτή τύπου Mamdani που είχε χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερη εργασία. Για να είναι επιτυχής η σύγκριση, ο ελεγκτής πρέπει να εφαρμοστεί στα ίδια σημεία που είχαν επιλεγεί και στην προηγούμενη εργασία (Πανιεράκης Γεράσιμος, 2016).

4.3 Η μέθοδος sugeno στην παρούσα εργασία

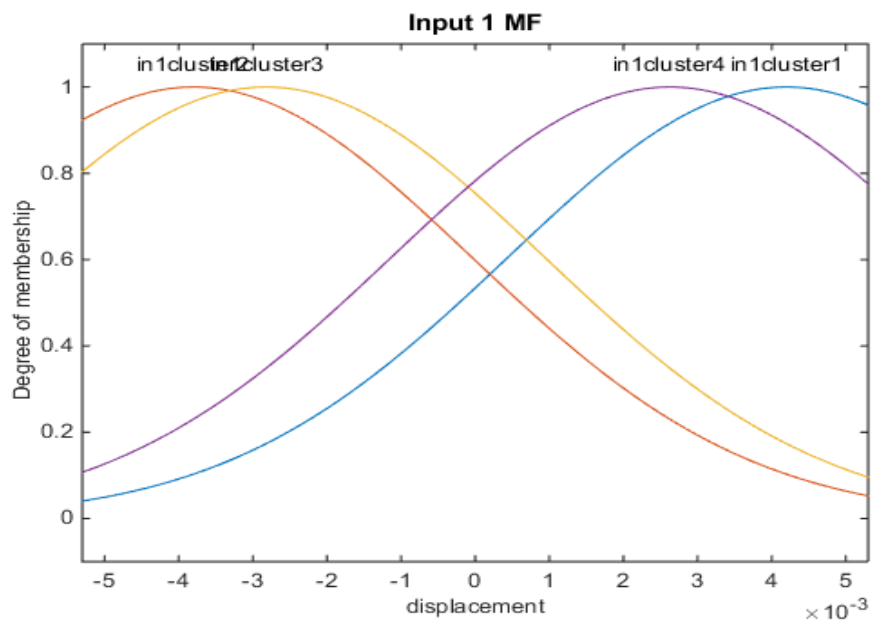
Η σχεδίαση ενός ελεγκτή κατά Sugeno, είναι από τις συνηθέστερες μεθοδολογίες σχεδίασης ασαφών συστημάτων. Το χαρακτηριστικό της σχεδίασης είναι ότι οι εισοδοί είναι λεκτικές μεταβλητές, οι τιμές των οποίων είναι ασαφή σύνολα. Οι εξοδοί δε, είναι αλγεβρικές εκφράσεις, συνήθως γραμμικές ή σταθερές. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής όλων είναι ένα σύνολο αριθμών οι οποίοι συνυπολογίζονται ο καθένας με κάποιον συντελεστή βαρύτητας και τελικά εξάγεται ένας αριθμός. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής: είναι μια υπολογιστικά ακριβής μέθοδος, λειτουργεί αποτελεσματικά σε συνδυασμό με γραμμικές τεχνικές και τεχνικές βελτιστοποίησης, έχει επιφάνεια εξόδου εγγυημένα συνεχή, και επιδέχεται μαθηματικής ανάλυσης.



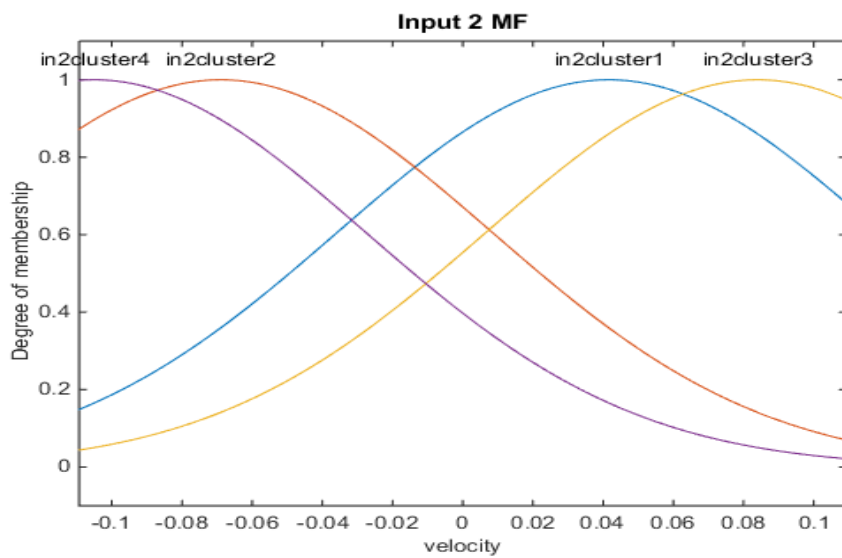
Σχ. 4.2 Γενική εικόνα ενός συστήματος Sugeno.

Ο νευροασαφής ελεγκτής του κ. Γεώργιου Ταϊρίδη (Tairidis, et al., 2013) λαμβάνει ως εισόδους το πεδίο μετακινήσεων (u) και την ταχύτητα της κατασκευής (\dot{u}) και ως έξοδο μας δίνει την αύξηση της δύναμης ελέγχου

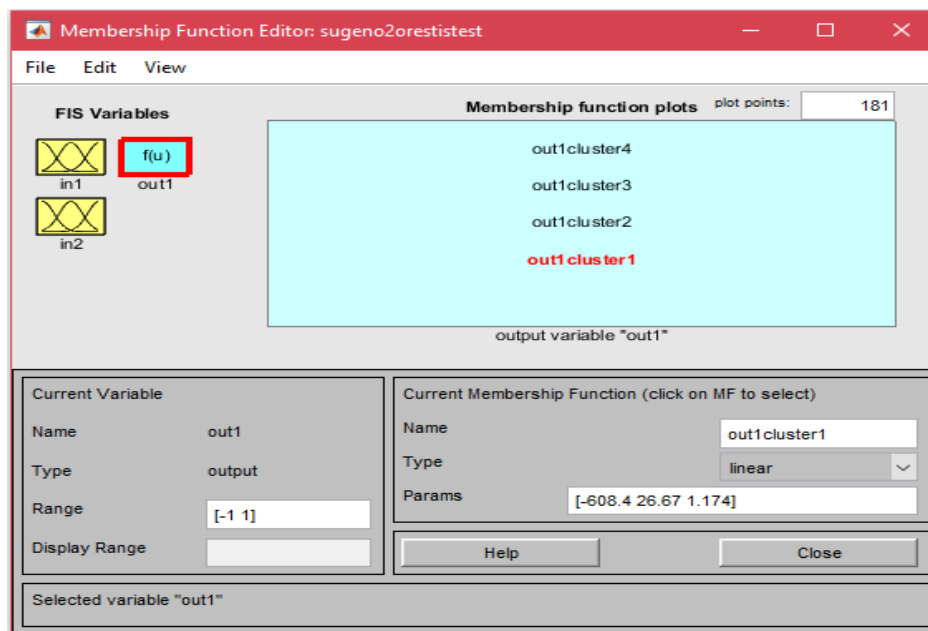
Οι συναρτήσεις συμμετοχής που επιλέχθηκαν για την περιγραφή των εισόδων του ελεγκτή είναι της μορφής gauss, ενώ της εξόδου είναι γραμμικές (linear).



Σχ. 4.3 Απεικόνιση συνάρτησης συμμετοχής της πρώτης εισόδου

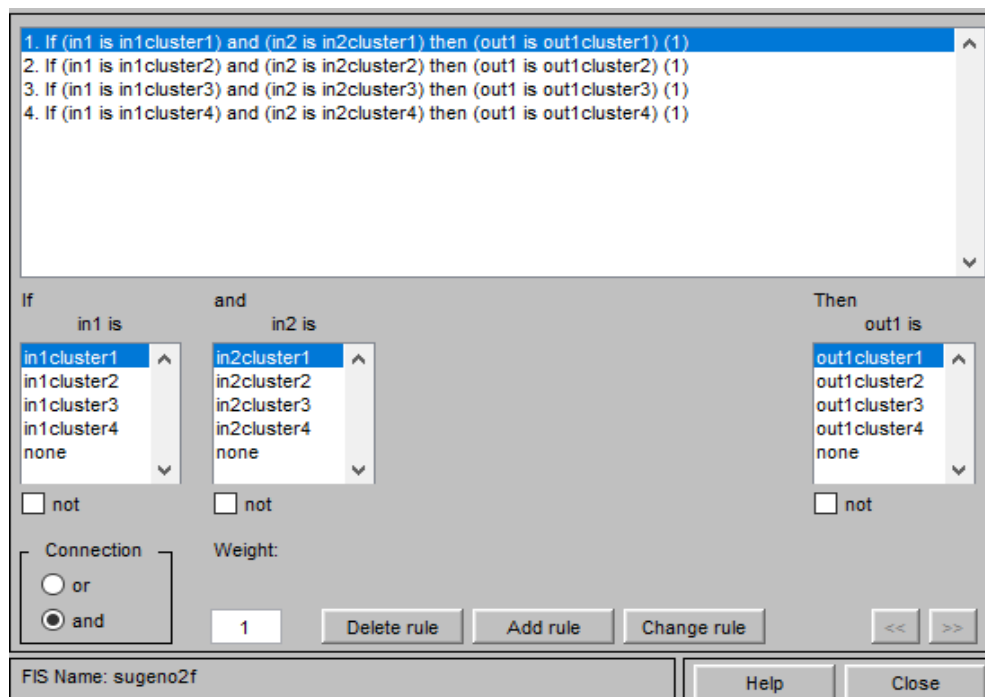


Σχ. 4.4 Απεικόνιση συνάρτησης συμμετοχής της δεύτερης εισόδου



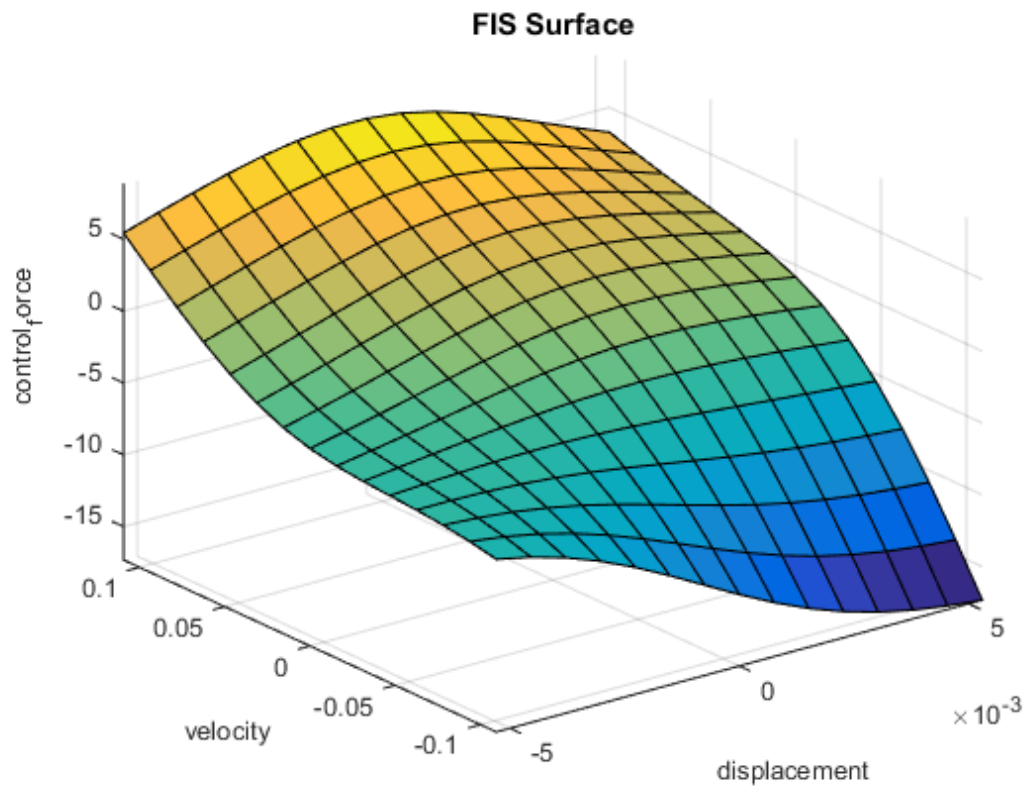
Σχ. 4.5 Απεικόνιση συνάρτησης συμμετοχής εξόδου

Για την περιγραφή του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν 4 κανόνες (fuzzy rules). Για την κατάρτιση των κανόνων αυτών έγινε χρήση των εντολών επιλογής και επανάληψης if, and, then, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



Σχ. 4.6 Κανόνες συστήματος

Η συσχέτιση των εισόδων με την έξοδο του ασαφούς ελεγκτή, παρουσιάζεται στην ακόλουθη τρισδιάστατη επιφάνεια. Για κάθε συνδυασμό τιμών ταχύτητας (velocity) και μετατόπισης (displacement) μας δίνει μια δύναμη επαναφοράς (control force).



Σχ. 4.7 Επιφάνεια συσχέτισης εισόδων, εξόδου ελεγκτή

4.4 Μέθοδος ολοκλήρωσης στο υπάρχον πρόβλημα

Μερικές από τις πιο γνωστές μεθόδους ολοκλήρωσης που υπάρχουν είναι οι : Μέθοδος Runge-Kutta, Houbolt , Wilson, Newmark , Gauss-Jacobi , Euler-Heun και άλλες. Η περισσότερο ενδεδειγμένη και σταθερή, για προβλήματα όπως της παρούσας εργασίας, είναι αυτή του Houbolt, οπότε και αυτή χρησιμοποιήσαμε. Σε αυτή την μέθοδο υπάρχουν δύο σταθερές, οι β και γ (ονομάζονται σταθερές Houbolt). Για προβλήματα σταθερής επιτάχυνσης οι σταθερές αυτές λαμβάνουν τιμές 0.25 και 0.50 αντίστοιχα. Το βήμα ολοκλήρωσης που έχει επιλεγεί είναι $dt=0.001sec$, και ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης ανέρχεται στα $t=3sec$

Οι εξισώσεις που υπολογίζουν τις σταθερές ολοκλήρωσης γνωρίζοντας τα παραπάνω είναι οι εξής :

$$c1=\frac{1}{\beta(dt)^2}, c2=\frac{1}{\beta(dt)}, c3=\frac{1}{2\beta}, c4=\frac{\gamma}{\beta(dt)}, c5=\frac{\gamma}{\beta}, c6=dt\left(\frac{\gamma}{2\beta}-1\right)$$

Ο αλγόριθμος περιγράφεται λογικά με τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1: Αρχικοποίηση μεταβλητών

- $X, \dot{X}, \ddot{X}, Fm, M, \Lambda, K, \theta, \gamma, c1, c2, c4, c5, c6$

Βήμα 2: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας (F^*) : $K^*=K + c1M + c4 \Lambda$

- Αντιστροφή του (K^*) : $F^* = (K^*)^{-1}$
- Έναρξη βρόχου for από $t0$ έως tf

Βήμα 3: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας (P^*)

- Υπολογισμός μεταβολής φορτίσεων: $dFm=Fm(t+1)-Fm(t)$
- Υπολογισμός μεταβολής δύναμης ελέγχου u
- Προσθήκη στην ποσότητα $dFm, dFm=dFm+u$
- Υπολογισμός της ποσότητας (P^*) με χρήση των μητρώων μάζας (M) και απόσβεσης (Λ) του συστήματος: $P^*=dFm+M[c2\ddot{X}(t)+c3\dot{X}(t)]+\Lambda[c5\dot{X}(t)+c6\ddot{X}(t)]$

Βήμα 4: Υπολογισμός του βήματος απόκρισης dX

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

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

- Υπολογισμός επιτάχυνσης: $\ddot{X}(t+1)=\ddot{X}(t)+c1dX-c2\dot{X}(t)-c3\ddot{X}(t)$
- Υπολογισμός ταχύτητας: $\dot{X}(t+1)=\dot{X}(t)+c4dX-c5\dot{X}(t)-c6\ddot{X}(t)$
- Υπολογισμός μετατόπισης: $X(t+1)=X(t)+dX$

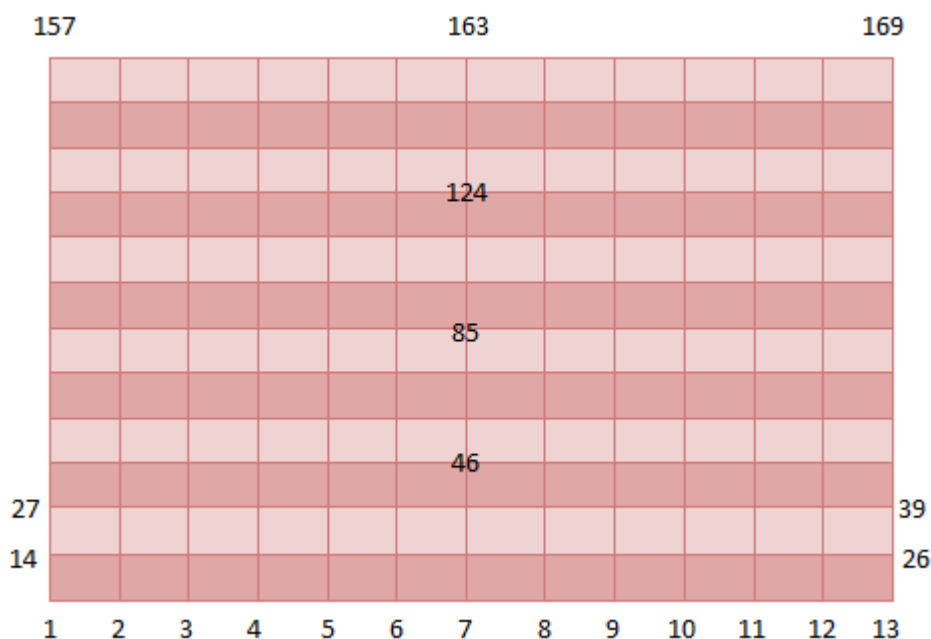
- **ΤΕΛΟΣ**

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα που λάβαμε κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, εφαρμόζοντας τις διάφορες παραμέτρους που λάβαμε υπόψιν μας. Πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση των ταλαντώσεων. Για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, θα παρουσιαστεί πίνακας για κάθε περίπτωση ξεχωριστά, που θα φέρει τα ποσοστά μείωσης της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης για δεδομένες τιμές της δύναμης ελέγχου. Αυτό που επιζητάμε και που παίζει τον σημαντικότερο ρόλο είναι η ικανοποιητική μείωση, κυρίως της μετατόπισης, χωρίς αυτό να γίνεται εις βάρος των υπολοίπων παραμέτρων.

Για τον έλεγχο των ταλαντώσεων, θα χρησιμοποιήσουμε έναν ελεγκτή σε διάφορους κόμβους και διαφορετικά σενάρια φόρτισης, σε ένα, τρία ή και πέντε σημεία ταυτόχρονα.

Τέλος, για να μπορέσει ο αναγνώστης να κατανοήσει που εφαρμόζεται η δύναμη και ο έλεγχος, παρουσιάζεται η παρακάτω αρίθμηση πλάκας ως προς τα σημεία και ως προς τους κόμβους που έχει διακριτοποιηθεί.



Σχ. 5.1 Αρίθμηση κόμβων

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

Σχ. 5.2 Αρίθμηση στοιχείων

Από εδώ κι έπειτα, όταν αναφερόμαστε στην πλάκα και στα σημεία που εφαρμόζουμε δυνάμεις και έλεγχο, θα χρησιμοποιούμε αυτό το σύστημα αναφοράς.

5.1 Περίπτωση εφαρμογής δύναμης στον κόμβο 7

Στην πρώτη περίπτωση, εφαρμόζουμε την ημιτονοειδή δύναμη στον κόμβο 7.

Υπενθυμίζουμε τον τύπο της ημιτονοειδούς φόρτισης που θα λάβει χώρα $P = p_0 \cdot \sin(\omega t)$ και στην περίπτωση μας $p_0=1$ και $\omega=20$ οπότε $P = \sin(20t)$

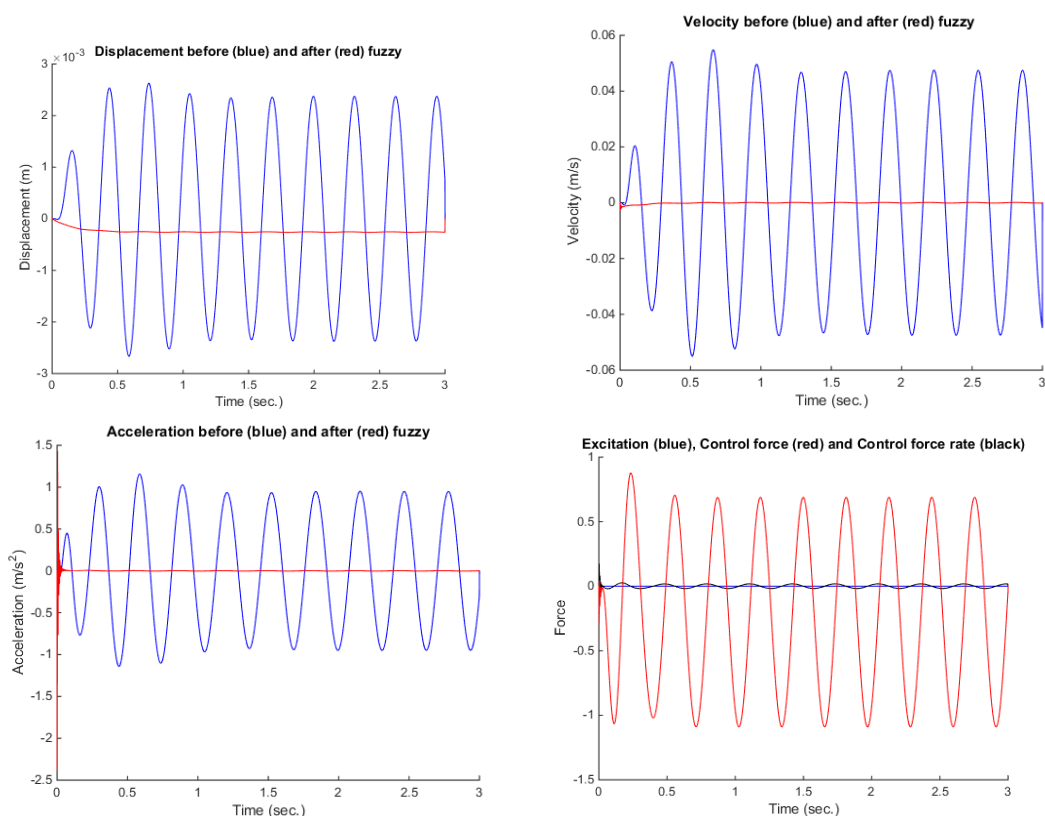
Στα διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης που θα παρουσιαστούν παρακάτω, οι μεταβολές πριν τον έλεγχο φαίνονται με μπλε χρώμα, ενώ μετά τον έλεγχο με κόκκινο. Στο διάγραμμα της δύναμης ελέγχου η διέγερση χρωματίζεται με μπλε, η δύναμη ελέγχου με κόκκινο, και ο ρυθμός της δύναμης ελέγχου με μαύρο.

5.1.1 Έλεγχος στον κόμβο 7

Σε αυτή την περίπτωση, θεωρούμε τον ελεγκτή στον κόμβο 7 και θα λάβουμε τα παρακάτω διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου, ταχύτητας/χρόνου, και δύναμης ελέγχου/χρόνου.

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση
Χωρίς έλεγχο	0.0151	0.3058	6.2017
Με έλεγχο	0.0112	0.2433	5.5581
Μεταβολή %	-25.6072	-20.4256	-10.3777

Πίνακας 5.1.1. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 7 και έλεγχο επίσης στον κόμβο 7.



Διαγράμματα 5.1.1 Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 7 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης επίσης στον κόμβο 7

5.1.2 Έλεγχος στον κόμβο 85

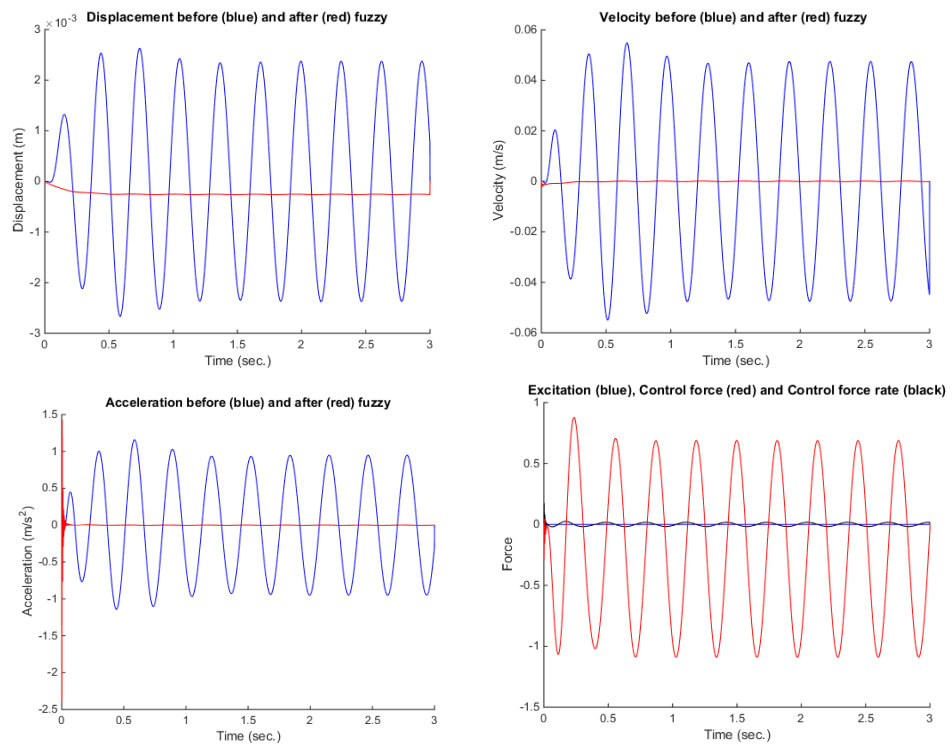
Στην περίπτωση αυτή, τοποθετούμε τον ελεγκτή στον κόμβο 85 (η φόρτιση παραμένει στον κόμβο 7).

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας μέγιστου εύρους μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές. Παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο στήλες για την μέγιστη επιτάχυνση. Αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι η επιτάχυνση ήταν πάρα πολύ μεγάλη μόνο για τις πρώτες χρονικές στιγμές και από κάποιο σημείο και ύστερα παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή. Για το λόγο αυτό, λάβαμε υπόψιν μας μια στήλη μόνο για τις τιμές μέχρι την χρονική στιγμή 0.3sec. Και μια δεύτερη στήλη για τις χρονικές στιγμές από 0,3sec. Παρατηρούμε ότι λαμβάνουμε τελείως διαφορετικές τιμές στις μεταβολές μας. Το φαινόμενο αυτό θα παρατηρηθεί συχνά από εδώ κι έπειτα σε πολλές περιπτώσεις.

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μέγιστη επιτάχυνση	Μέγιστη επιτάχυνσή από $t=0.3s$ και ύστερα ¹
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1098	2.2966	2.2966
Με έλεγχο	2.6332e-04	0.0028	3.8176	1.4531
Μεταβολή %	-95.0028	-97.4409	66.2263	-36.7290

Πίνακας 5.1.2. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 7 και έλεγχο στον κόμβο 85

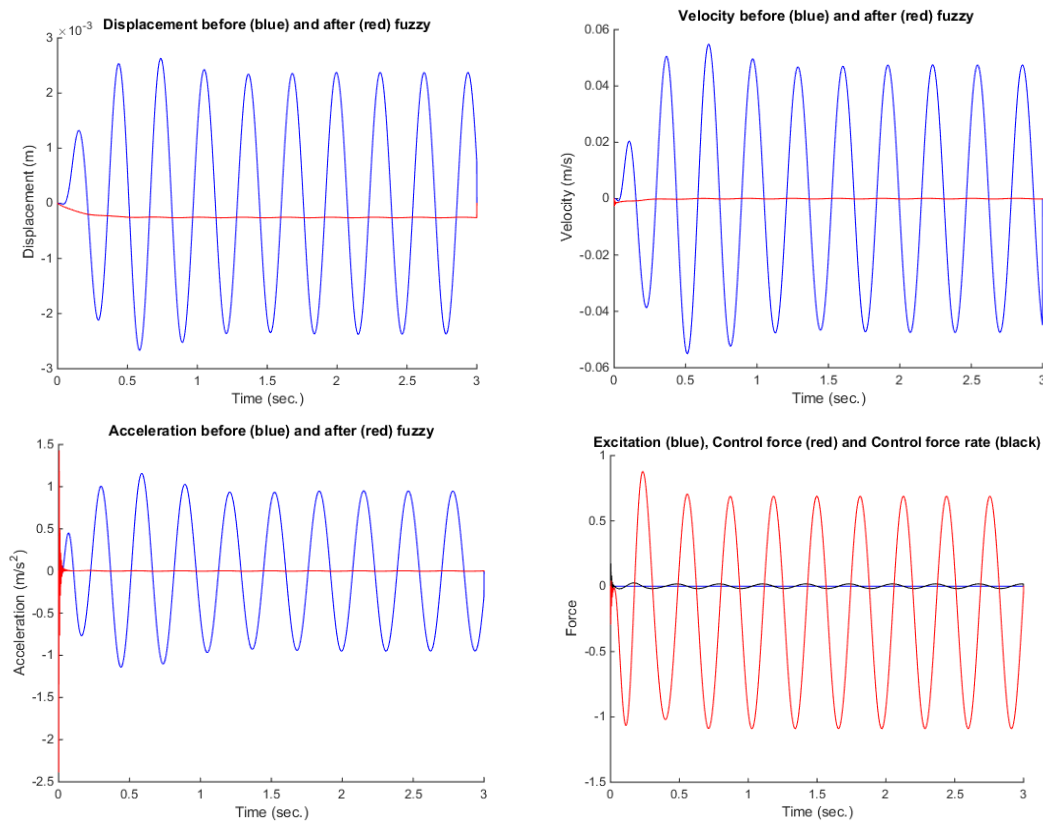
¹ Η επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη μόνο στις αρχικές στιγμές οπότε αν μετρήσουμε από την χρονική στιγμή $t=0.3sec$ και έπειτα θα έχουμε νέες τιμές



Διαγράμματα 5.1.2 Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 85 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 7.

5.1.3 Έλεγχος στον κόμβο 163

Τώρα τοποθετήσαμε τον ελεγκτή στον κόμβο 163 και πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



Διαγράμματα 5.1.3. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 163 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 7

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μέγιστη επιτάχυνση
Χωρίς έλεγχο	0.0042	0.0950	2.2362
Με έλεγχο	0.0017	0.0418	1.0694
Μεταβολή %	-60.2835	-55.9975	-52.1757

Πίνακας 5.1.3. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 7 και έλεγχο στον κόμβο 163

Συνοψίζοντας, στις παραπάνω περιπτώσεις τοποθετήσαμε αρχικά τον έλεγχο στον κόμβο 7, στην συνέχεια τον μετατοπίσαμε στο κέντρο της πλάκας στον κόμβο 85 και τελικά κατέληξε στο άλλο άκρο στον κόμβο 163.

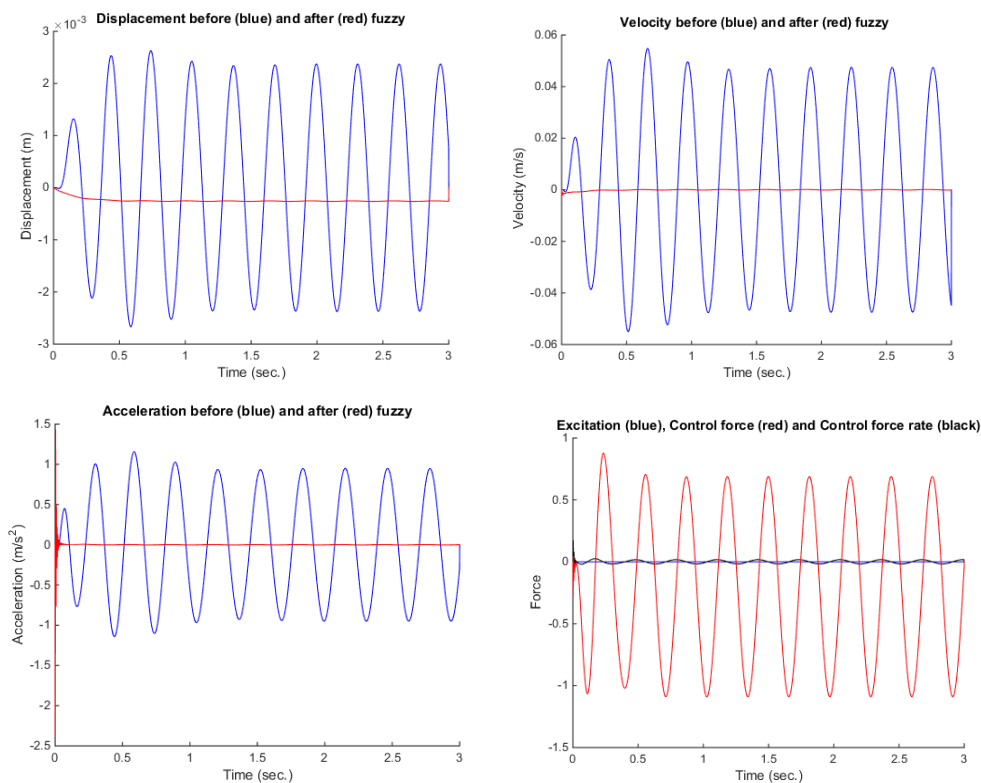
Το σημείο που, από τις μετρήσεις μας, αποδείχτηκε αποδοτικότερο να τοποθετήσουμε τον ελεγκτή για την μείωση της ταλάντωσης της πλάκας είναι το κεντρικό σημείο της πλάκας δηλαδή ο κόμβος 85. Τα ποσοστά μείωσης που επιτευχθήκαν από την επιλογή αυτή είναι εξαιρετικά μεγάλα. Συγκεκριμένα πετύχαμε μείωση κατά 95,0028% επι της μετατόπισης και 97,4409% στην ταχύτητα της. Όσο αφορά την επιτάχυνση, ήταν αυξημένη κατά 66,2263% για στιγμιαίο χρονικό διάστημα κατά την εφαρμογή του ελέγχου αλλά εξομαλύνθηκε και τελικά μειώθηκε κατά 36,7290% τη χρονική στιγμή $t=0.3 \text{ sec}$ και ύστερα.

5.2 Περίπτωση εφαρμογής δύναμης στον κόμβο 85

Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζουμε δύναμη στον κόμβο 85, ο οποίος είναι στο κέντρο βάρους της πλάκας και συχνά θα τον αναφέρουμε και ως κεντρικό κόμβο της πλάκας.

5.2.1 Έλεγχος στον κόμβο 7

Σε αυτή την περίπτωση θα εφαρμόσουμε τον ελεγκτή μας στον κόμβο 7 και θα πάρουμε ως αποτέλεσμα τα παρακάτω διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου, ταχύτητας/χρόνου και δύναμη ελέγχου/χρόνου.



Διαγράμματα 5.2.1. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 7 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 85

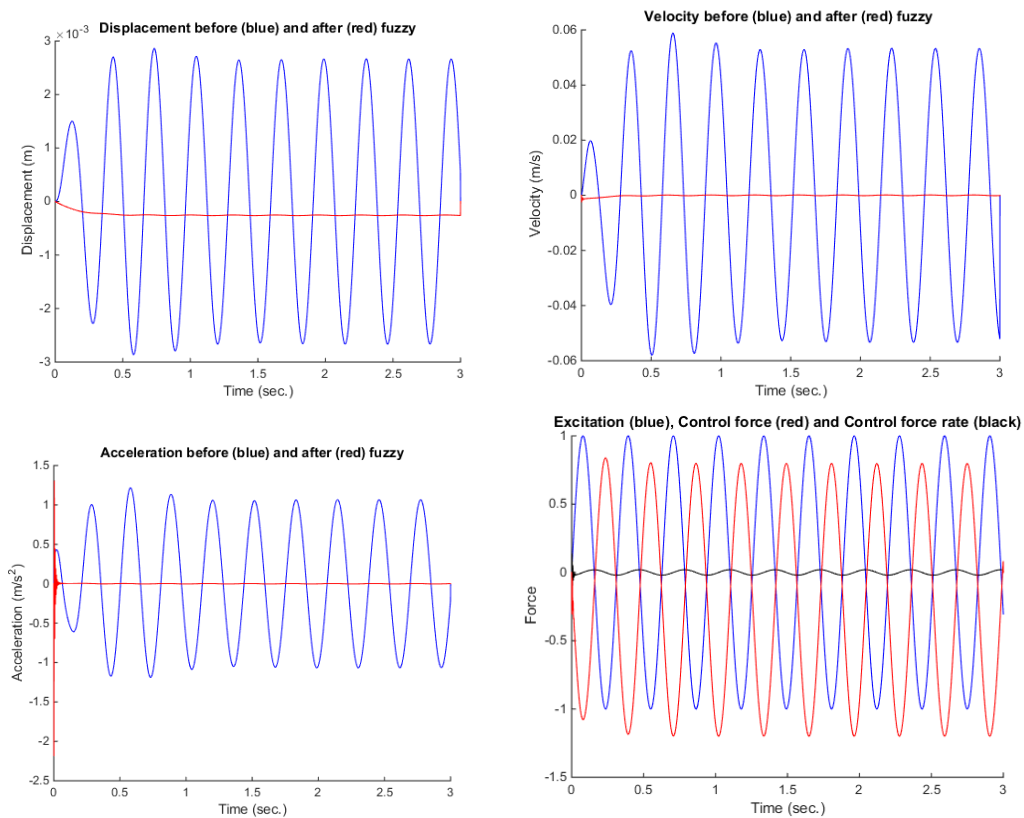
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μέγιστη επιτάχυνση	Μέγιστη επιτάχυνσή από $t=0.3s$ και ύστερα ²
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1098	2.2966	2.2966
Με έλεγχο	2.6332e-04	0.0028	3.8176	0.0214
Μεταβολή %	-95.0028	-97.4409	66.2263	-99.0678

Πίνακας 5.2.1. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 85 και έλεγχο στον κόμβο 7

² Η επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη μόνο στις αρχικές στιγμές οπότε αν μετρήσουμε από την χρονική στιγμή $t=0.3sec$ και έπειτα θα έχουμε νέες τιμές, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα.

5.2.2 Έλεγχος στον κόμβο 85

Σε αυτή την περίπτωση θα εφαρμόσουμε τον ελεγκτή μας στον κόμβο 85 και θα πάρουμε τα παρακάτω διαγράμματα επιτάχυνσής/χρόνου μετατόπισής/χρόνου ταχύτητας/χρόνου και δύναμης ελέγχου /χρόνου.



Διαγράμματα 5.2.2 Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 85 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 85

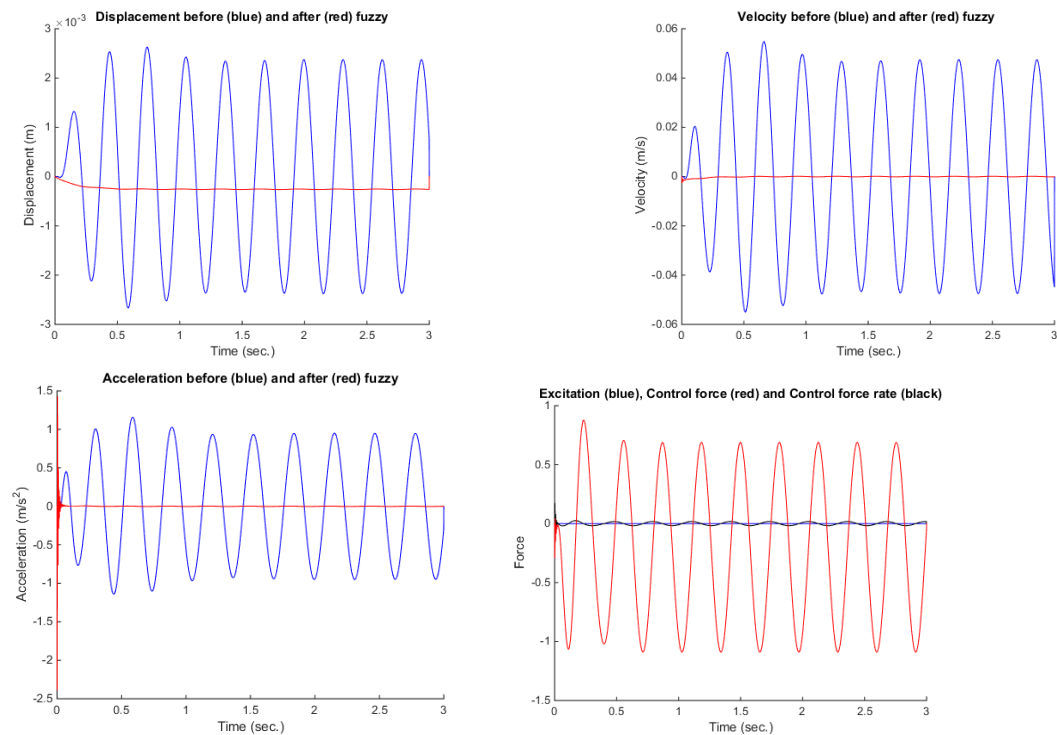
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση	Μεγιστή επιτάχυνσή από $t=0.3s$ και ύστερα ³
Χωρίς έλεγχο	0.0057	0.1168	2.4052	2.4052
Με έλεγχο	2.6402e-04	0.0026	3.4954	0.0187
Μεταβολή %	-95.3863	-97.7771	45.3234	-99.2239

Πίνακας 5.2.2. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 85 και έλεγχο στον κόμβο 85

³ Η επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη μόνο στις αρχικές στιγμές οπότε αν μετρήσουμε από την χρονική στιγμή $t=0.3sec$ και έπειτα θα έχουμε νέες τιμές

5.2.3 Έλεγχος στον κόμβο 163

Σε αυτή την περίπτωση θεωρήσαμε έλεγχο στον κόμβο 163 και ως τελικό αποτέλεσμα προέκυψαν τα εξής διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου, ταχύτητας/χρόνου και δύναμης ελέγχου/χρόνου. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζει και ο παρακάτω πίνακας.



Διαγράμματα 5.2.3 Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 163 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μέγιστη επιτάχυνση	Μέγιστη επιτάχυνσή από $t=0.3s$ και ύστερα ⁴
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1098	2.2966	2.2966
Με έλεγχο	2.6332e-04	0.0028	3.8176	0.0214
Μεταβολή %	-95.0028	-97.4409	66.2263	-99.0678

Πίνακας 5.2.3. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 85 και έλεγχο στον κόμβο 163

Περίληπτικά, για την περίπτωση αυτή, η εφαρμογή δύναμης τοποθετήθηκε στο κέντρο της πλάκας στον κόμβο 85 και ο έλεγχος αρχικά τοποθετήθηκε στον ίδιο κόμβο, έπειτα στον κόμβο 7 και τέλος στον κόμβο 163. Και στις τρεις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα της μείωσης ήταν πολύ καλά. Αποδοτικότερη επιλογή αποδείχτηκε ότι είναι η τοποθέτηση του ελεγκτή στο κεντρικό σημείο της πλάκας στον κόμβο 85 όπου παρατηρήθηκε μείωση κατά 95.3863% σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Τέλος, ενώ αρχικά παρατηρήθηκε αύξηση της επιτάχυνσης της πλάκας, αυτή ήταν μόνο για της αρχικές στιγμές και μερικές στιγμές αργότερα, και συγκεκριμένα από την στιγμή $t=0.3sec$, εξομαλύνθηκε και μειώθηκε κατά 99.2239% σε σχέση με την κατάσταση χωρίς ελεγκτή.

Κατά την περίπτωση αυτή συμπεράναμε κάτι ακόμα. Οι ελεγκτές, όταν τοποθετούνται μία φορά στον κόμβο 7 και άλλη στον 163, δίνουν τα ίδια αποτελέσματα, οπότε είναι εξίσου αποδοτικοί. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, μεταξύ των δύο επιλογών μπορούμε να τοποθετήσουμε όπου θέλουμε τον ελεγκτή χωρίς να υπάρχει διαφορά

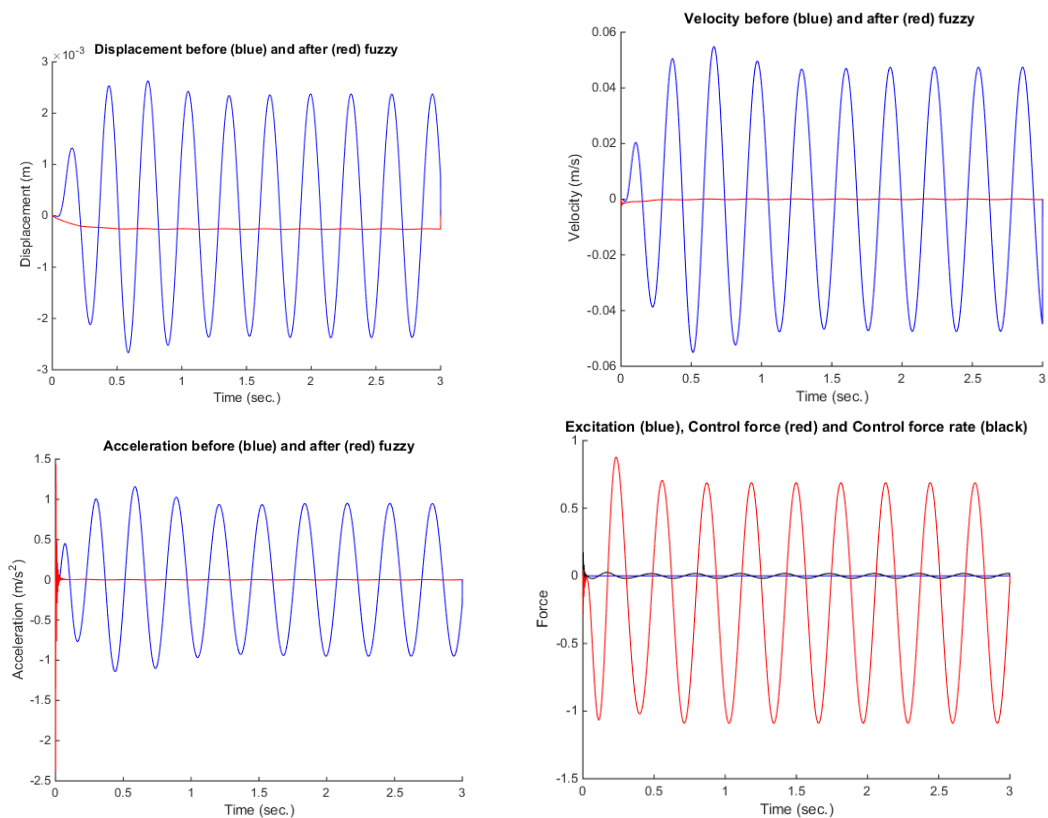
5.3 Εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 163.

Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζουμε ημιτονοειδής δύναμη στον κόμβο 163 και θα εξετάσουμε ανά περίπτωση πώς θα συμπεριφερθεί η πλάκα με εφαρμογή ελέγχου στον κόμβο 7, 85 και 163

5.3.1 Έλεγχος στον κόμβο 7

Στην προκειμένη περίπτωση εφαρμόζουμε ελεγκτή στον κόμβο 7 και ως αποτέλεσμα λαμβάνουμε τα παρακάτω διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου, ταχύτητας/χρόνου και δύναμης ελέγχου/χρόνου.

⁴ Η επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη μόνο στις αρχικές στιγμές, οπότε αν μετρήσουμε από την χρονική στιγμή $t=0.3sec$ και έπειτα θα έχουμε νέες τιμές



Διαγράμματα 5.3.1. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 7 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 163

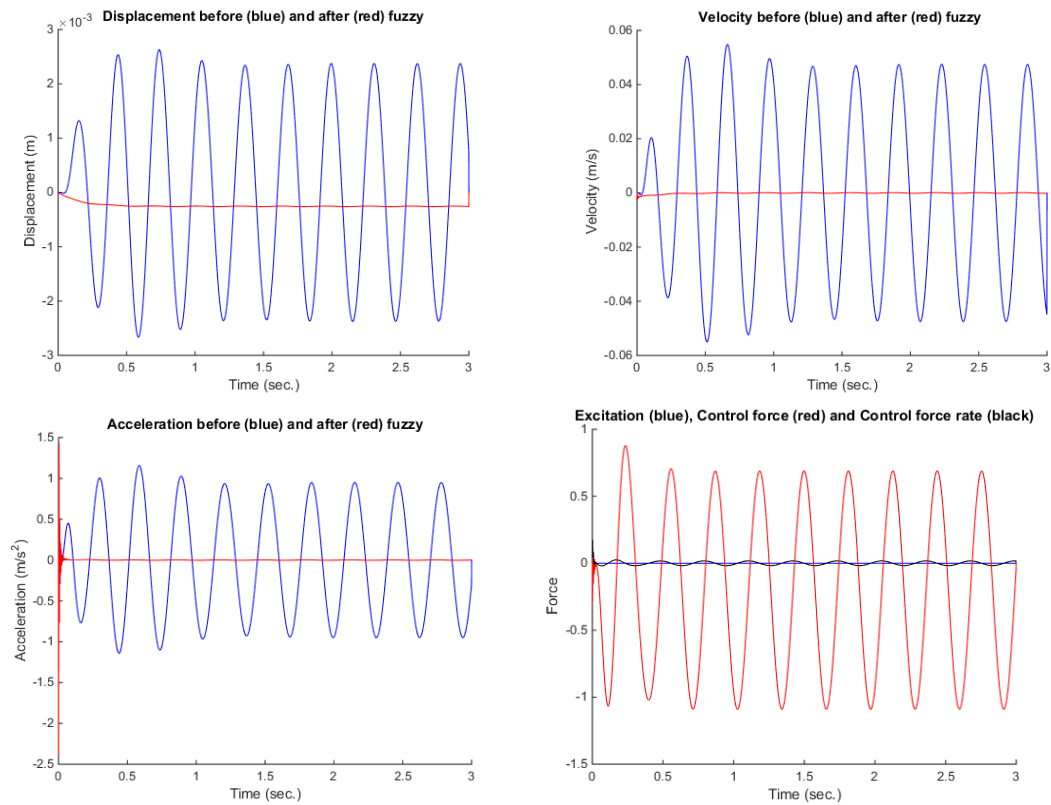
Συνοπτικά λαμβάνουμε τον παρακάτω πίνακα μεταβολών και μέγιστης μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης.

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση
Χωρίς έλεγχο	0.0042	0.0950	2.2362
Με έλεγχο	0.0017	0.0418	1.0694
Μεταβολή %	-60.2835	-55.9975	-52.1757

Πίνακας 5.3.1. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 163 και έλεγχο στον κόμβο 7

5.3.2 Έλεγχος στον κόμβο 85

Ομοίως, και στην περίπτωση αυτή εφαρμόσαμε τον ελεγκτή στον κόμβο 85 και πήραμε τα παρακάτω διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου, ταχύτητας/χρόνου και δύναμης ελέγχου/χρόνου.



Διαγράμματα 5.3.2. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 85 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 163

Ο συνοπτικός πίνακας με τις μεταβολές των αποτελεσμάτων είναι ο ακόλουθος:

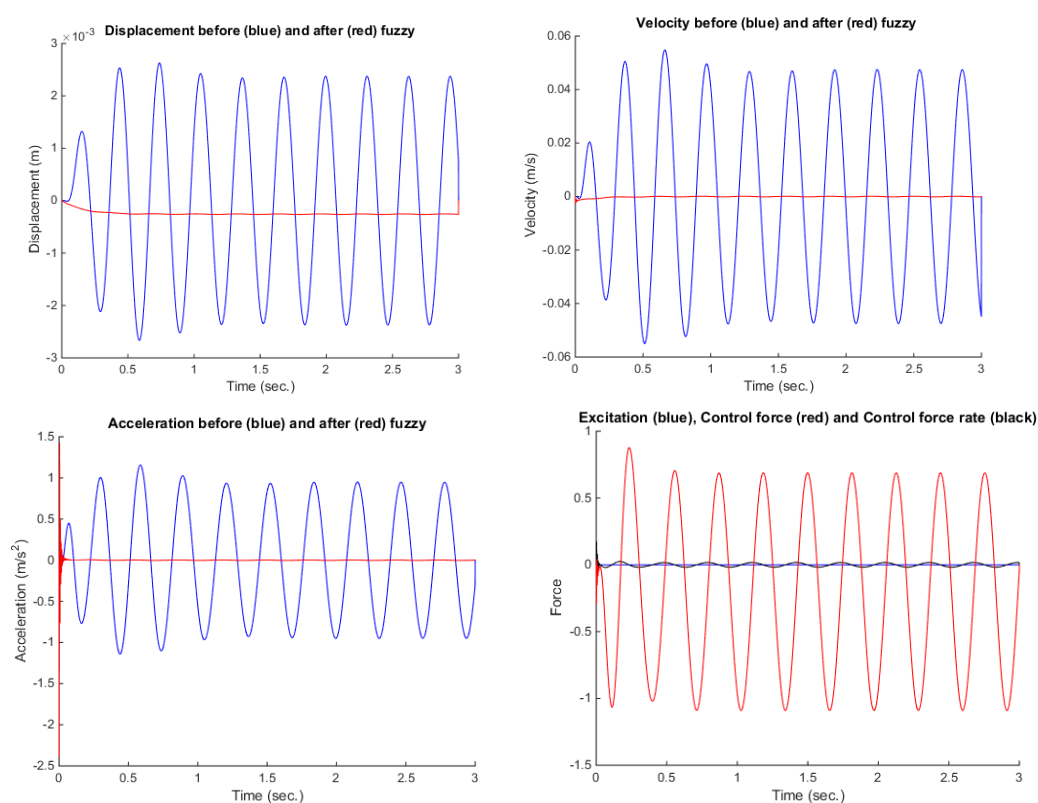
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση	Μεγιστή επιτάχυνσή από $t=0.3s$ και ύστερα ⁵
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1098	2.2966	2.2966
Με έλεγχο	2.6332e-04	0.0028	3.8176	1.4531
Μεταβολή %	-95.0028	-97.4409	66.2263	-36.7290

Πίνακας 5.3.2. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 163 και έλεγχο στον κόμβο 85

Η επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη μόνο στις αρχικές στιγμές οπότε αν μετρήσουμε από την χρονική στιγμή $t=0.3sec$ και έπειτα θα έχουμε νέες τιμές

5.3.3 Έλεγχος στον κόμβο 163

Στην ακόλουθη περίπτωση εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο ελέγχου στον κόμβο 163 της πλάκας λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, ταχύτητας/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου και δύναμης ελέγχου/χρόνου.



Διαγράμματα 5.3.3. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 163 και ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 163

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση
Χωρίς έλεγχο	0.0151	0.3058	6.2017
Με έλεγχο	0.0112	0.2433	5.5581
Μεταβολή %	-25.6072	-20.4256	-10.3777

Πίνακας 5.3.3. Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στον κόμβο 163 και έλεγχο στον κόμβο 163

Συνοψίζοντας, για την περίπτωση αυτή επιλέξαμε να τοποθετήσουμε την ημιτονοειδή δύναμη στον κόμβο 163, στην συνέχεια τοποθετήσαμε τον ελεγκτή στον ίδιο κόμβο με τον ελεγκτή(κόμβος 163), έπειτα αντιδιαμετρικά στον κόμβο 7, και τελικά στον κεντρικό κόμβο του συστήματος, δηλαδή στον κόμβο 85. Τα αποτελέσματα που πήραμε και σε αυτή την περίπτωση ήταν πολύ θετικά. Αποδοτικότερη επιλογή αποδείχτηκε η τοποθέτηση του ελεγκτή στον κεντρικό κόμβο της πλάκας κατά την οποία πέτυχε να μειώσει την μετατόπιση κατά 95,0028% και την ταχύτητα κατά 97,4409%. Ωστόσο, η επιτάχυνση παρουσίασε αύξηση κατά 66,2236% για να καταλήξει μερικές στιγμές αργότερα να μειωθεί και αυτή κατά 36,7290% από την αρχική κατάσταση. Λιγότερο αποδοτική ήταν η επιλογή μας να τοποθετήσουμε τον ελεγκτή στον ίδιο κόμβο που εφαρμόζεται και η δύναμη. Τα αποτελέσματα που πήραμε είναι μείωση μόλις 25,6072% και 2,04256% για την μετατόπιση και την ταχύτητα αντίστοιχα. Η επιτάχυνση όμως εμφανίστηκε μειωμένη από την πρώτη στιγμή κατά 10,3777%.

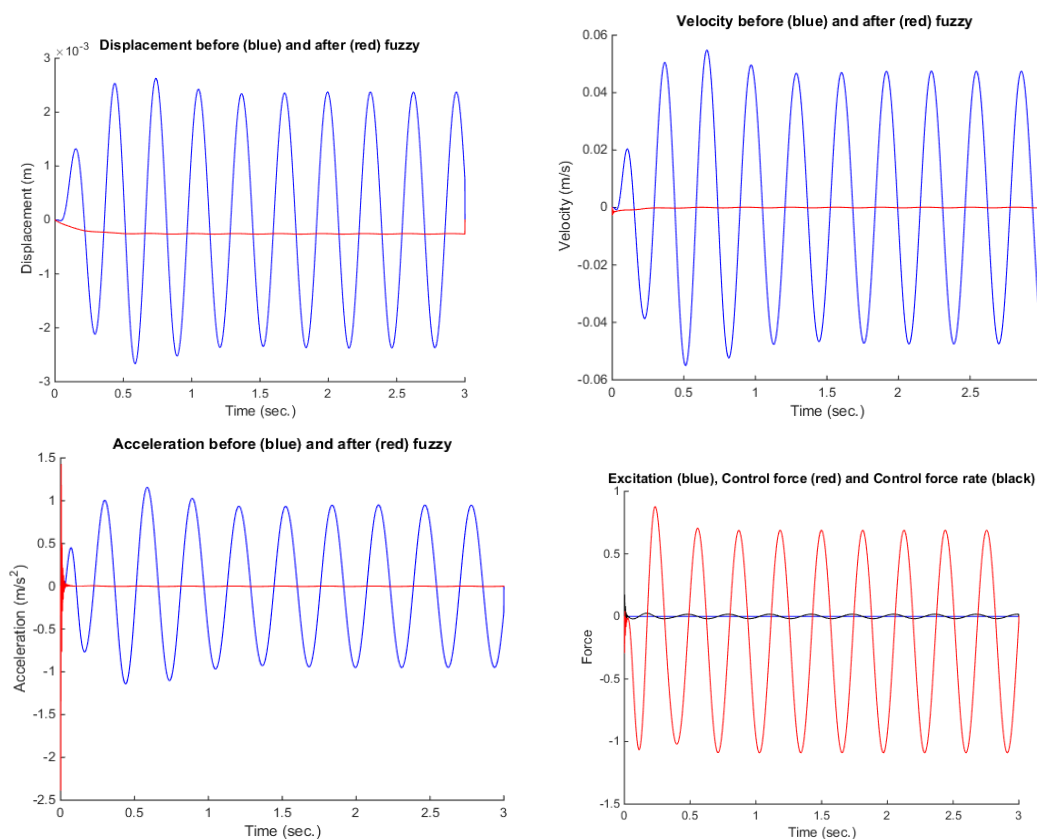
5.4 Εφαρμογή δύναμης στους κόμβους 7 και 163, έλεγχος στο κέντρο (κόμβος 85)

Στην περίπτωση αυτή εξακολουθούμε να έχουμε έναν ελεγκτή, αλλά πλέον προσθέτουμε ακόμα μια ημιτονοειδείς φόρτιση όποτε και έχουμε δύο φορτίσεις επί της πλάκας.

Ο τύπος της φόρτισης πλέον αλλάζει και γίνεται $P = p_0 \sin(\omega t)$. Θα είναι $p_0 = 1/2$ και $\omega = 20$ hertz οπότε και θα γίνει $P = 1/2 \sin(20t)$.

Το σημείο που εφαρμόζεται ο έλεγχος είναι το κέντρο βάρους της πλάκας (κόμβος 85) και οι φορτίσεις γίνονται εκατέρωθεν του στους κόμβους 7 και 163.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν ύστερα από την εφαρμογή των αλγορίθμων.



Διαγράμματα 5.4 Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 85 με ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 163 και 7

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει το μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές, για την περίπτωση φόρτισης στους κόμβους 163 και 7 και εφαρμογή ελέγχου στον κόμβο 85.

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση	Μεγιστή επιτάχυνσή από $t=0.3s$ και ύστερα ⁶
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1098	2.2966	2.2966
Με έλεγχο	2.6332e-04	0.0028	3.8176	0.0214
Μεταβολή %	-95.0028	-97.4409	66.2263	-99.0678

Πίνακας 5.4 Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στους κόμβους 163 και 7 και έλεγχο στον κόμβο 85

Σε αυτή την περίπτωση, θεωρήσαμε φόρτιση ταυτόχρονα στον κόμβο 7 και στον κόμβο 163. Έπειτα, τοποθετήσαμε τον ελεγκτή στον κεντρικό κόμβο του συστήματος, στον κόμβο 85. Τα αποτελέσματα που πήραμε είναι εξίσου ευνοϊκά με αυτά των προηγούμενων περιπτώσεων και παρατηρήσαμε πολύ μεγάλη μείωση της ταλάντωσης. Συγκεκριμένα, η μετατόπιση μειώθηκε κατά 95,0028% και η ταχύτητα κατά 97,4409%. Η επιτάχυνση σε αυτή την περίπτωση κατέληξε να είναι μειωμένη κατά 99,0678% παρόλο που εμφανίστηκε μια στιγμιαία αύξηση 66,2263% αρχικά.

⁶ Η επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη μόνο στις αρχικές στιγμές οπότε αν μετρήσουμε από την χρονική στιγμή $t=0.3sec$ και έπειτα θα έχουμε νέες τιμές.

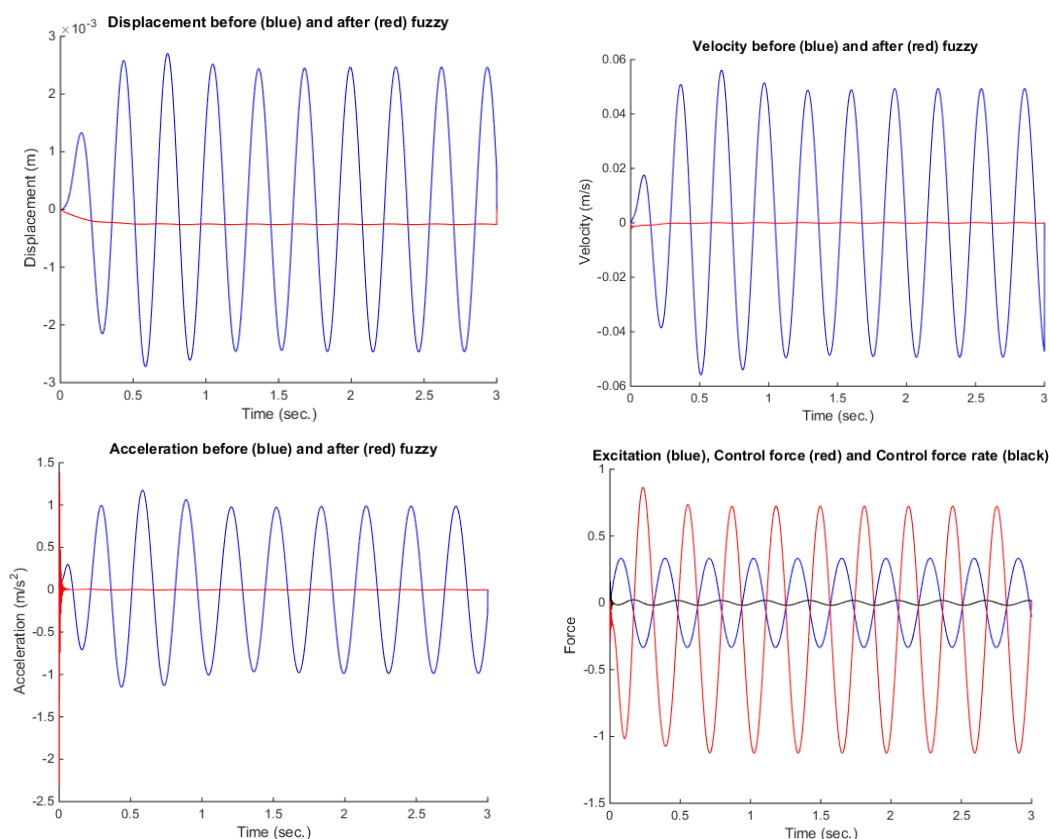
5.5 Εφαρμογή δύναμης σε 3 σημεία.

Στην περίπτωση αυτή εφόσον εφαρμόζουμε δύναμη σε 3 σημεία, στους κόμβους 7, 85 και 163, ο τύπος διαμορφώνεται ως ακολούθως: $P = p_0 \sin(\omega t)$. Στην περίπτωση αυτή έχουμε $p_0=1/3$ και $\omega=20\text{hertz}$. Τελικά ο τύπος είναι της μορφής $P = 1/3 \sin(20t)$.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις διάφορες υποπεριπτώσεις εφαρμογής ελέγχου.

5.5.1 Εφαρμογή ελέγχου στον κόμβο 85

Εφαρμόζουμε έλεγχο στο κεντρικό σημείο του συστήματος μας, δηλαδή στον κόμβο 85. Τα παρακάτω διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου ταχύτητας/χρόνου και δύναμης ελέγχου/χρόνου σε συνδυασμό με τον συνοπτικό πίνακα μας δίνουν εικόνα για την μείωση των ταλαντώσεων που επιφέραμε.



Διαγράμματα 5.5.1. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 85 με ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 163, 85 και 7

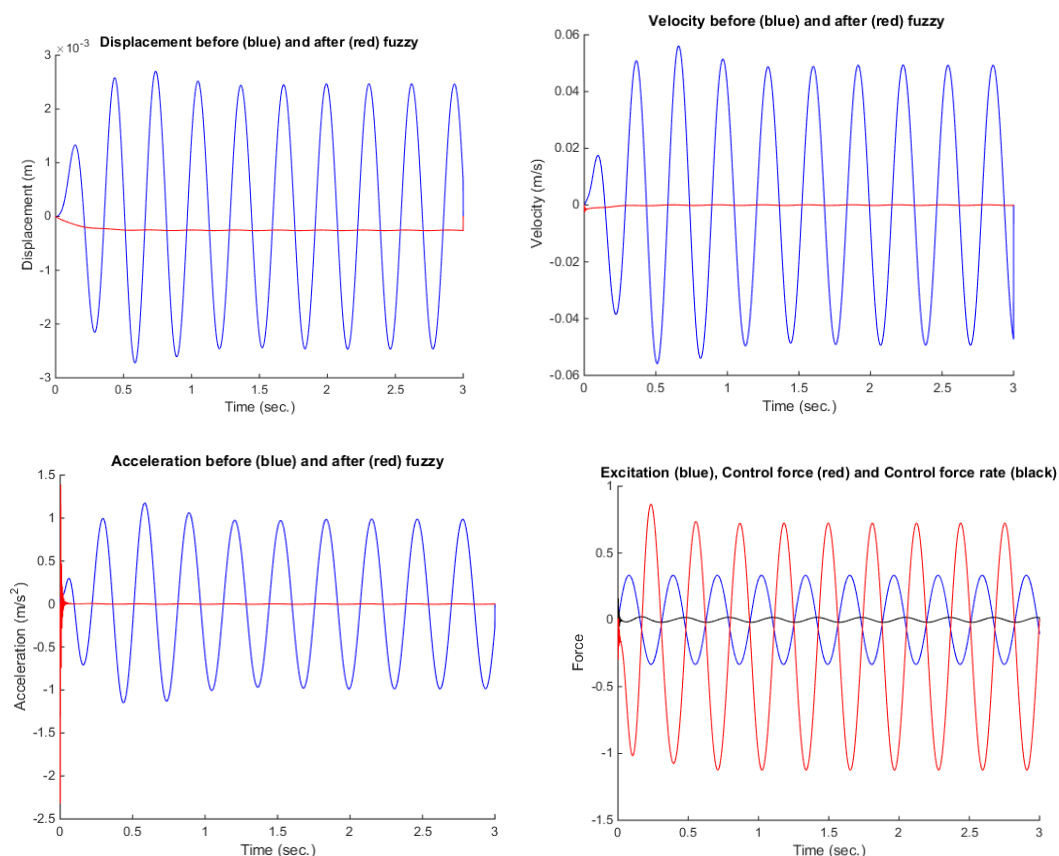
	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση	Μεγιστή επιτάχυνσή από $t=0.3s$ και ύστερα ⁷
Χωρίς έλεγχο	0.0054	0.1119	2.3213	2.3213
Με έλεγχο	2.6355e-04	0.0027	3.7102	0.0198
Μεταβολή %	-95.1419	-97.5526	59.8302	-99.1459

Πίνακας 5.5.1 Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στους κόμβους 163, 85 και 7 και έλεγχο στον κόμβο 85

⁷ Η επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη μόνο στις αρχικές στιγμές οπότε αν μετρήσουμε από την χρονική στιγμή $t=0.3sec$ και έπειτα θα έχουμε νέες τιμές

5.6.1 Εφαρμογή του ελέγχου στον κόμβο 163

Σε αυτή την περίπτωση, εφαρμόζουμε έλεγχο στον κόμβο 163. Τα διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου, ταχύτητας/χρόνου και δύναμης ελέγχου/χρόνου παρουσιάζονται παρακάτω. Στην συνέχεια ακολουθεί ο συνοπτικός πίνακας με το μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης μαζί με τις αντίστοιχες μεταβολές.



Διαγράμματα 5.6.1. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 163 με ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στον κόμβο 163, 85 και 7

Ο πίνακας έχει ως εξής:

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση
Χωρίς έλεγχο	0.0080	0.1633	3.3738
Με έλεγχο	0.0033	0.0715	1.6988
Μεταβολή %	-58.4715	-56.2197	-49.6469

Πίνακας 5.6.1 Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στους κόμβους 163, 85 και 7 και έλεγχο στον κόμβο 163

Στις παραπάνω περιπτώσεις τα σημεία εφαρμογής της δύναμης είναι τρία. Ο κόμβος 7,85 και 163 επιλέχθηκαν για την τοποθέτηση της ημιτονοειδούς φόρτισης. Αρχικά, για να μειώσουμε την ταλάντωση που προήλθε από την εφαρμογή της παραπάνω δύναμης επιλέξαμε να τοποθετήσουμε τον ελεγκτή στον κεντρικό κόμβο της πλάκας(κόμβος 85) και στην συνέχεια τον τοποθετήσαμε στον ακριανό κόμβο της πλάκας, δηλαδή στον κόμβο 163. Από τα αποτελέσματα που ευρέθηκαν από την διαδικασία αυτή συμπεράναμε ότι αποδοτικότερη είναι η τοποθέτηση του ελεγκτή στον κεντρικό κόμβο του συστήματος. Η μείωση που παρουσιάστηκε είναι 95,1419% για την μετατόπιση και 97,5526% για την ταχύτητα. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρήθηκε το φαινόμενο η επιτάχυνση να αυξάνεται κατά τις αρχικές στιγμές. Συγκεκριμένα για τις αρχικές στιγμές αυξήθηκε κατά 59,8302% και την χρονική στιγμή $t=0.3\text{sec}$ και ύστερα παρουσίασε μείωση 99,1459%. Πολύ λιγότερο αποδοτική αποδείχτηκε η επιλογή μας να τοποθετήσουμε τον ελεγκτή στον κόμβο 163, καθώς μείωσε μόλις κατά 58,4715% την μετατόπιση και 56,2197% την ταχύτητα. Το θετικό του στοιχείο ήταν ότι παρουσίασε σταθερή μείωση της επιτάχυνσης κατά 49,6469% από την πρώτη στιγμή.

5.7 Εφαρμογή δύναμης σε 5 σημεία.

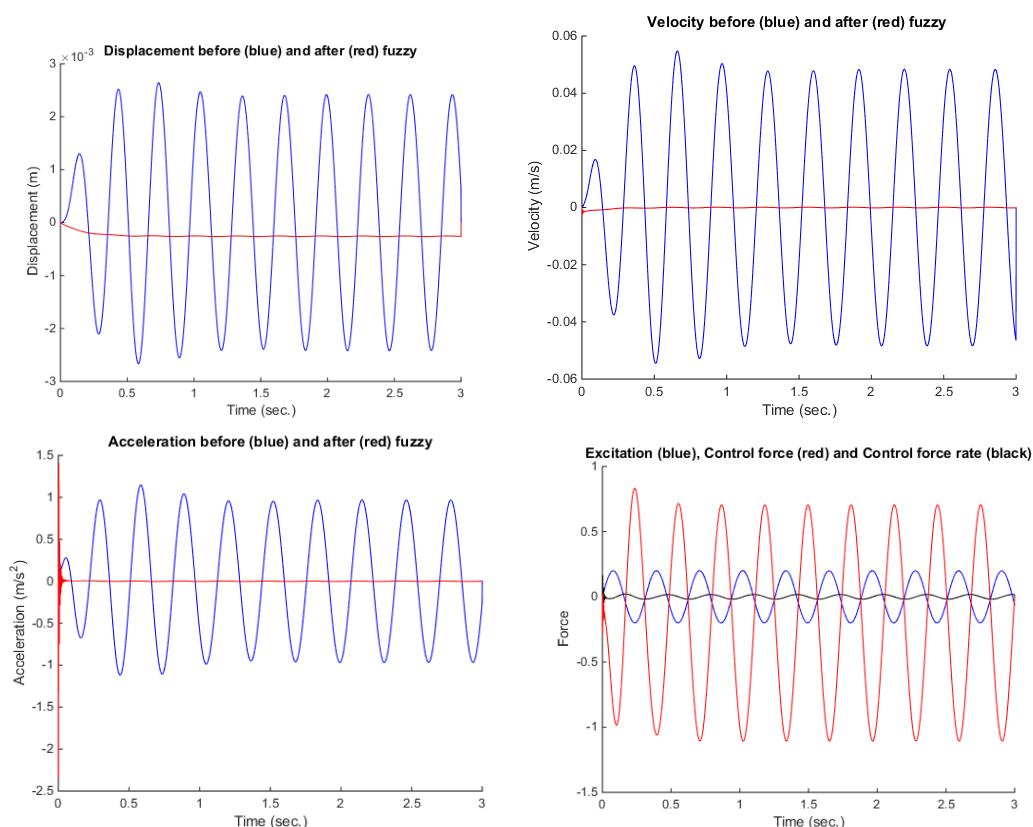
Στης παρακάτω περιπτώσεις εφαρμόζουμε την ημιτονοειδή φόρτιση σε 5 σημεία του δοκιμίου μας. Τα σημεία αυτά είναι οι κόμβοι 7,46,85,124,163.

Ο τύπος της ημιτονοειδούς φόρτισης σε αυτή την περίπτωση διαμορφώνεται ως εξής :

Λαμβάνει $p_0=1/5$, $\omega=20\text{hertz}$ και τελικά γίνεται 5 $P = 1/5 \cdot \sin(20t)$.

5.7.1 Εφαρμογή ελέγχου στον κόμβο 163.

Στην προκειμένη υποπερίπτωση τοποθετούμε τον ελεγκτή στον κόμβο 163 και λαμβάνουμε τα παρακάτω διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου, ταχύτητας/χρόνου και δύναμης ελέγχου/χρόνου. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο συνοπτικός πίνακας μεταβολών εύρους μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές.



Διαγράμματα 5.7.1. γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 163 με ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στους κόμβους 7,46,85,124,163.

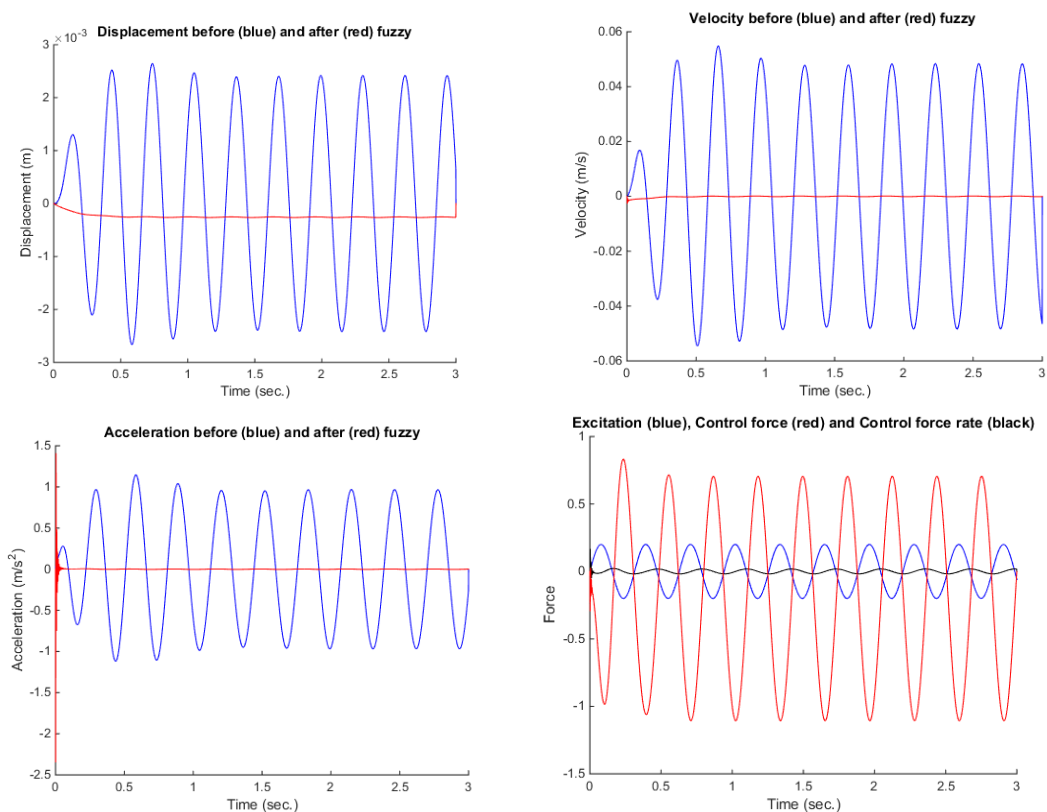
Ο πίνακας μεταβολών έχει ως εξής

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση
Χωρίς έλεγχο	0.0073	0.1491	3.0765
Με έλεγχο	0.0027	0.0575	1.3831
Μεταβολή %	-63.3508	-61.4211	-55.0432

Πίνακας 5.7.1 Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στους κόμβους 7,46,85,124,163 και έλεγχο στον κόμβο 163

5.7.2 Εφαρμογή ελεγκτή στον κόμβο 85

Στην τελευταία αυτή υποπερίπτωση ο ελεγκτής εφαρμόζεται στον κεντρικό κόμβο του συστήματος δηλαδή στον κόμβο 85. Τα διαγράμματα επιτάχυνσης/χρόνου, μετατόπισης/χρόνου ταχύτητας/χρόνου και δύναμης ελέγχου/χρόνου παρουσιάζονται στην συνέχεια μαζί με τον συνοπτικό πίνακα μεγίστου εύρους μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης συνοδευόμενο με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση.



Διαγράμματα 5.7.2. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στον κόμβο 85 με ταυτόχρονη εφαρμογή δύναμης στους κόμβους 7,46,85,124,163

	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστη ταχύτητα	Μεγιστή επιτάχυνση	Μεγιστή επιτάχυνσή από $t=0.3s$ και ύστερα ⁸
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1093	2.2643	2.2643
Με έλεγχο	2.6343e-04	0.0028	3.7592	0.0200
Μεταβολή %	-95.0342	-97.4684	66.00227	-99.1162

Πίνακας 5.7.2 Μέγιστο εύρος μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης με τις αντίστοιχες μεταβολές για την περίπτωση φόρτισης στους κόμβους 7,46,85,124,163 και έλεγχο στον κόμβο 85

Οι 5 κόμβοι που επιλέχθηκαν για την φόρτιση της πλάκας είναι οι 7,46,85,124,163 και σχηματίζουν την πιο ομοιόμορφη φόρτιση, σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, στο μέσο της πλάκας. Σε αυτή την περίπτωση, αρχικά τοποθετήσαμε τον έλεγχο στον κόμβο 163 και στην συνέχεια στον 85, που είναι και ο κεντρικός κόμβος του συστήματος. Αποδοτικότερη επιλογή αποδείχτηκε η τοποθέτηση του ελεγκτή στον κεντρικό κόμβο του συστήματος και η

⁸ Η επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη μόνο στις αρχικές στιγμές οπότε αν μετρήσουμε από την χρονική στιγμή $t=0.3s$ και έπειτα θα έχουμε νέες τιμές

μείωση που επιτεύχθηκε είναι 95,0342% επί της μετατόπισης και 97,4684% επί της ταχύτητας. Η επιτάχυνση παρουσιάστηκε αυξημένη κατά 66,0027% για τις αρχικές στιγμές, για να εναλλαχθεί σε μείωση κατά 99,1162% από την $t=0.3\text{sec}$ και έπειτα. Λιγότερο αποδοτικός βρέθηκε ο ελεγκτής στην θέση 163 της πλάκας αφού κατάφερε μείωση 63,3508% και 61,4211% για την μετατόπιση και την ταχύτητα αντίστοιχα. Η επιτάχυνση σε αυτή την περίπτωση παρουσίασε μείωση από την αρχική στιγμή με ποσοστό 55,0432%.

5.8 Αποτελέσματα ελεγκτή Mamdami

Στο κεφάλαιο αυτό θα κάνουμε αναφορά στα αποτελέσματα παλαιότερης εργασίας (Πανιεράκης Γεράσιμος, 2016) κατά την οποία είχε διερευνηθεί η ίδια πλάκα με εφαρμογή ίδιων ταλαντώσεων.

Οι κοινές περιπτώσεις που έχει η παρούσα εργασία με την παλαιότερη είναι οι περιπτώσεις κατά τις οποίες τοποθετούμε μοναδικό ελεγκτή στον κόμβο 163 και στον κόμβο 85. Οι φορτίσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον κόμβο 163 είναι στους κόμβους 7, 85, 163 και στους κόμβους 7, 46, 85, 124, 163. Για την τοποθέτηση του ελεγκτή στον κόμβο 85, έχουμε 4 κοινές υποθέσεις: 1^η είναι η περίπτωση της φόρτισης στον κόμβο 85, 2^η είναι η υπόθεση της φόρτισης στο άκρο της πλάκας κόμβος 163, 3^η είναι η περίπτωση κατά την οποία φορτίσαμε και τα δύο άκρα της πλάκας, κόμβοι 7 και 163 και τελευταία κοινή περίπτωση είναι η φόρτιση της πλάκας σε τρία σημεία (κόμβοι 7, 85, 163).

Αρχικά, για την περίπτωση ελέγχου στον κόμβο 163 και την εφαρμογή ημιτονοειδούς δύναμης στους κόμβους 7,85 και 163, ο ελεγκτής τύπου Mamdami μείωσε την μετατόπιση κατά 69,8922% και την ταχύτητα κατά 28,5898%. Όταν τοποθετήθηκε η ίδια φόρτιση στους κόμβους 7,46,85,124,163, η μείωση που κατάφερε να επιτύχει ο ίδιος ελεγκτής ήταν 70,4686% για την μετατόπιση και 26,5073% για την ταχύτητα.

Στην τελευταία κοινή περίπτωση ελέγχου, η τοποθέτηση του ελεγκτή έγινε στον κόμβο 85 και η φόρτιση στην πρώτη περίπτωση τοποθετήθηκε στον ίδιο κόμβο επιτυγχάνοντας μείωση 63,6221% και 34,6263% για την μετατόπιση και την ταχύτητα αντίστοιχα. Στην συνέχεια, το σημείο φόρτισης μετατοπίστηκε στον κόμβο 163. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε παρόμοιες μειώσεις 62,2394% για την μετατόπιση και 34,1603% για την ταχύτητα. Στη συνέχεια, φορτίστηκε η πλάκα σε δύο σημεία εκατέρωθεν του σημείου ελέγχου (κόμβοι 7 και 163). Πάλι δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές με τις προηγούμενες περιπτώσεις, με το νέο ποσοστό μείωσης να ανέρχεται στο 62,2394% και 34,1603% για την μετατόπιση και για την ταχύτητα αντίστοιχα. Τέλος, προστέθηκε φόρτιση και στον κεντρικό κόμβο (συνολικά σε αυτή την περίπτωση έχουμε φόρτιση στους κόμβους 7,85,163) και η μείωση που επιτεύχθηκε αυτή την φορά από τον ελεγκτή είναι 63,2593% για την μετατόπιση και 31,0234% για την ταχύτητα.

5.9 Σύγκριση Sugeno Mamdami

Στο κεφάλαιο αυτό, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα που μας έδωσε η μέθοδος Sugeno με τα αποτελέσματα της εργασίας στην οποία είχε χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Mamdami (Πανιεράκης Γεράσιμος, 2016).

Οι παράμετροι που δημιουργήθηκαν οι ελεγκτές είναι διαφορετικές, οπότε τα συμπεράσματα είναι σχετικά πρώιμα. Παρ' όλα αυτά θα πάρουμε μια καλή πρώτη εικόνα για της αποδόσεις των δύο ελεγκτών και θα γίνει μια πρώτη σύγκριση.

Οι κοινές περιπτώσεις που θα αναλυθούν είναι οι παρακάτω :

- **1.Περίπτωση ενός ελεγκτή στον κόμβο 163**
- 1.1Φόρτιση σε 3 σημεία (κόμβοι 7, 85, 163).
- 1.2Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163).
- **2.Περίπτωση ενός ελεγκτή στον κόμβο αναφοράς (κόμβος 85)**
- 2.1Φόρτιση στον κόμβο αναφοράς (κόμβος 85).
- 2.2Φόρτιση στο άκρο της πλάκας στον κόμβο 163.
- 2.3Φορτίσεις στα δυο άκρα της πλάκας στους κόμβους 7 και 163.
- 2.4Φορτίσεις σε τρία σημεία της πλάκας (κόμβοι 7, 85, 163).

Για την πρώτη περίπτωση 1.1, τα αποτελέσματα από τον ελεγκτή Mamdami είναι 69,8922% μείωση της μετατόπισης και 28,5898% της ταχύτητας. Για τον Sugeno είναι 58,4715% μείωση της μετατόπισης και 56,2197% της ταχύτητας. Παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής Mamdami είναι αποδοτικότερος κατά 10% όσο αφορά την μετατόπιση, συνεπώς είναι προτιμητέος στην περίπτωση που πρέπει να τοποθετηθεί ο ελεγκτής στον κόμβο 163 έχοντας φόρτιση στα σημεία 7,85,

Για την περίπτωση 1.2, δοκιμάσαμε για τον ίδιο κόμβο ελέγχου να τοποθετήσουμε φόρτιση σε 5 κόμβους. Και πάλι ο ελεγκτής Mamdami ήταν αποδοτικότερος όσο αφορά την μείωση ταλάντωσης επιτυγχάνοντας μείωση λίγο πάνω από 7%, ενώ ο Sugeno υπερτερούσε και πάλι στην μείωση της ταχύτητας επιτυγχάνοντας μείωση περίπου 35% παραπάνω από τον Mamdami. Αναλυτικά, οι μειώσεις που επιτευχθήκαν είναι 70.4686% και 26,5073% για την μετατόπιση και την ταχύτητα αντίστοιχα όσον αφορά τον έλεγχο με Mamdami και 63,3508% , 61,4211% για τον Sugeno.

Προχωρώντας στην περίπτωση 2.1, εφαρμόζουμε πλέον έλεγχο στον κόμβο αναφοράς. Τα αποτελέσματα που μας έδωσε η διαδικασία εφαρμόζοντας έλεγχο με Mamdami είναι μείωση 62,6221% και 34,6293% για μετατόπιση και ταχύτητα αντίστοιχα. Για την εφαρμογή ελέγχου με την μέθοδο sugeno πήραμε μείωση κατά 95,3863 για την μετατόπιση και κατά 97,7771% για την ταχύτητα. Στην περίπτωση αυτή, ο ελεγκτής Sugeno είναι κατά πολύ αποδοτικότερος και για την μείωση της μετατόπισης άνω του 30% αλλά και για την μείωση της ταχύτητας άνω του 60%.

Για την περίπτωση 2.2, τα αποτελέσματα που πήραμε από την διαδικασία εφαρμόζοντας τον ελεγκτή Mamdami είναι μείωση κατά 62.2394% της μετατόπισης και 34.1603% της ταχύτητας, ενώ πάλι ο ελεγκτής Sugeno εμφανίζεται αποδοτικότερος με μεγάλη διαφορά αφού μειώνει κατά 95.0028% την μετατόπιση και κατά 97.4409% την ταχύτητα.

Στην περίπτωση 2.3, εφαρμόζοντας έλεγχο μέσο Sugeno πέτυχαμε για ακόμη μία φορά τα βέλτιστα αποτελέσματα, μειώνοντας πάνω από 30% την μετατόπιση και πάνω από 35% την ταχύτητα σε σχέση με τον Mamdami. Συγκεκριμένα, ο ελεγκτής τύπου Sugeno πέτυχε μείωση 95,0028% για την μετατόπιση και 97,5526 στην ταχύτητα. Εφαρμόζοντας Mamdami, η μείωση της μετατόπισης ήταν 62,2394% και της ταχύτητας ήταν μόλις 34,1603%.

Στην τελευταία κοινή περίπτωση 2.4, θεωρήσαμε ταυτόχρονη φόρτιση σε τρία σημεία της πλάκας (7,85,163) και ο ελεγκτής μας, όπως και στις παραπάνω περιπτώσεις, βρισκόταν τοποθετημένος στον κόμβο 85. Τα αποτελέσματα που λάβαμε εφαρμόζοντας Mamdami είναι μείωση 63,2593% και 31,0234% για την μετατόπιση και την ταχύτητα. Στον αντίποδα, ο ελεγκτής τύπου Sugeno πέτυχε να είναι αποδοτικότερος επιτυγχάνοντας 95,1419% μείωση για την μετατόπιση και 97,5526% στην ταχύτητα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

6.1 Συμπεράσματα για τον ελεγκτή Sugeno

Έπειτα από δοκιμές, μεταβάλλοντας το πλήθος και την θέση εφαρμογής της δύναμης σε συνδυασμό με την μεταβολή της θέσης του ελεγκτή, καταλήξαμε στα παρακάτω.

Για τον ελεγκτή τύπου Sugeno, συμπεράναμε ότι επιφέρει πολύ μεγάλη μείωση της ταχύτητας και της μετατόπισης της πλάκας και ότι σε γενικές γραμμές είναι πάρα πολύ αποδοτικός, ανεξαρτήτως του σημείου που θα τοποθετηθεί.

Αποδοτικότερη επιλογή τοποθέτησης του ελεγκτή σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις είναι στο κέντρο της πλάκας δηλαδή στον κόμβο 85. Η επιλογή μας αυτή, αν και σχεδόν πάντα επιφέρει αυξημένη επιτάχυνση τις πρώτες χρονικές στιγμές, τελικά καταλήγει να μας δίνει πολύ μεγάλα ποσοστά μείωσης επιτάχυνσης μετατόπισης και ταχύτητας μεγαλύτερα του 90%.

6.2 Συμπεράσματα ως προς την σύγκριση Sugeno Mamdami

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των ελεγκτών Sugeno και Mamdami.

Παρατηρήσαμε τελικά ότι όταν ο έλεγχος εφαρμόζεται στον κόμβο 163 και έχουμε φόρτιση σε τρεις ή και πέντε κόμβους ταυτόχρονα, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε ελεγκτή τύπου Mamdami προκειμένου να επιτύχουμε μείωση της μετατόπισης της πλάκας. Αντίθετα, για να μειώσουμε την ταχύτητα, είναι αποδοτικότερος ο ελεγκτής τύπου Sugeno. Τα παραπάνω αποτελέσματα ωστόσο είναι παρόμοια καθώς οι μεταβολές που παρουσιάζουν είναι της τάξης του 10%. Στην περίπτωση της τοποθέτησης του ελεγκτή στον κεντρικό κόμβο του συστήματος, η επιλογή του ελεγκτή Sugeno είναι ξεκάθαρη με τα ποσοστά αποδοτικότητας του να είναι άνω του 30% σε σχέση με τον Mamdami, όσον αφορά την μείωση της ταχύτητας και της μετατόπισης.

Συνοψίζοντας:

Περιπτώσεις	Mamdami ποσοστό μείωσης μετατόπισης/ταχύτητας	Sugeno ποσοστό μείωσης μετατόπισης/ταχύτητας
Έλεγχος κόμβος 163		
Φόρτιση κόμβοι 7,85,163	69.8922%/28.5898%	58.4715%/56.2197%
Φόρτιση κόμβοι 7,46,85,124,163	70.4686%/26.5073%	63.3508%/61.4211%
Έλεγχος κόμβος 85		
Φόρτιση κόμβος 85	63.6221%/34.6293%	95.3863%/97.7771%
Φόρτιση κόμβος 163	62.2394%/34.1603%	95.0028%/97.4409%
Φόρτιση κόμβοι 7,163	62.2394%/34.1603%	95.0028%/97.4409%
Φόρτιση κόμβοι 7,85,163	63.2593%/31.0234%	95.1419%/97.5526%

Σχ 6.1 Συνοπτικός πίνακας σύγκρισης Sugeno , Mamdami

Τα συμπεράσματα που λάβαμε είναι απολύτως λογικά διότι και στην βιβλιογραφία αναφέρεται η υπεροχή της μεθόδου Sugeno. Συγκεκριμένα, υπογραμμίζεται η υπεροχή της όσο αφορά την μαθηματική ανάλυση. Λειτουργεί καλά με την βελτιστοποίηση και τις προσαρμοστικές τεχνικές και τέλος είναι και υπολογιστικά αποδοτικότερη. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερο για ποικίλους λόγους να χρησιμοποιήσουμε Sugeno ελεγκτές σε προβλήματα παρόμοια με το πρόβλημα που πραγματευτήκαμε στην εργασία αυτή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Foutsitzi G. A. , Marinova D. G. , Stavroulakis G. E. , Hadjigeorgiou E. P. , 5-8 july 2016. *Vibration control analysis of smart piezoelectric composite plates*. Athens, s.n.
- Ioannis Papachristou, Salonikos Salonikidis, Georgios K. Tairidis and Georgios E. Stavroulakis, 30 june-2 july 2011. *Adaptive fuzzy control of smart structures- ANFIS, 7th GRACM*. Athens: International Congress on Computational Mechanics,.
- Tairidis G. K., Papachristou I., Katagas M. & Stavroulakis G. E., 2013. *Neuro - fuzzy control of smart structures*. Chania, s.n.
- Tairidis, G. K., Stavroulakis, G. E., Marinova, D. G. & Zacharenakis, E. C., 2007. *Classical and soft robust active control of smart beams*. Rethymno, Crete, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering.
- Βολογιαννίδης Σταύρος, 2009. *Ευφυής Έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές*,. ΣΕΡΡΕΣ:ΤΕΙ ΣΕΡΡΩΝ.
- Γεώργιος, Ταϊρίδης., 2009. *Προσομοίωση ευφών συστημάτων με αισθητήρες διεγέρτες απο πιεζοηλεκτρικά υλικά. Συνδεσή με ευφυείς μεθόδους ελέγχου*.. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- ΓΚΟΤΣΗΣ, Κ. ΠΑΣΧΑΛΗΣ , 2005. *ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ*. s.l.:ΖΗΤΗ.
- Θεοδώρου, Γ. Α., 2010. *Εισαγωγή στην ΑΣΑΦΗ ΛΟΓΙΚΗ*. Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ.
- Κόκκορας, Φ., 2011. *Εισαγωγή στην Ασαφή Λόγική*. Θεσσαλία: ΤΕΙ Θεσσαλίας.
- Πανιεράκης Γεράσιμος, 2016. *Εφαρμογή ασαφούς ελέγχου για τον περιορισμό των ταλαντώσεων σε αμφίπακτη πλάκα*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Παπαδόπουλος, Β., 2013. *ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ*, Θεσσαλονίκη : Ζήτη.
- Παπαλαΐος, Η. Κ., 2013. *Προσομοίωση και Έλεγχος Ευφών Πιεζοηλεκτρικών Κατασκευών με χρήση Σύγχρονων Υπολογιστικών Συστημάτων*. Χανια: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Ταϊρίδης, Γ. Κ., 2016. *Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση κατασκευών με ευφυή έλεγχο*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.