

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΚΛΗ ΡΑΛΛΙΔΗ

**ΜΗ ΣΥΝΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΦΥΩΝ  
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΓΡΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2019

## Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	5
3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	8
4 ΝΕΥΡΟΑΣΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	11
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	14
5.1 ΚΟΜΒΟΣ 110.....	14
5.1.1 110-110 συνεγκατεστημένος έλεγχος (collocated) .....	15
5.1.2 110-165 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	16
5.1.3 110-286 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	17
5.1.4 110-330 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	18
5.2 ΚΟΜΒΟΣ 154.....	19
5.2.1 154-154 συνεγκατεστημένος έλεγχος (collocated) .....	20
5.2.2 154-165 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	21
5.2.3 154-231 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	22
5.3 ΚΟΜΒΟΣ 220.....	23
5.3.1 220-220 συνεγκατεστημένος έλεγχος (collocated) .....	24
5.3.2 220-231 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	25
5.3.3 220-286 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	26
5.3.4 220-330 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	27
5.4 ΚΟΜΒΟΣ 330.....	28
5.4.1 330-330 συνεγκατεστημένος έλεγχος (collocated) .....	29
5.4.2 330-121 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non collocated) .....	30
5.4.3 330-165 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	31
5.4.4 330-286 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated) .....	32
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	33
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	34

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Σταυρουλάκη για την καθοδήγηση και υποστήριξη του για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Ταϊρίδη, διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του και γενικότερα για τον χρόνο που αφιέρωσε για την επίλυση των αποριών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάμε μια αυθύπαρκτη πλάκα η οποία χωρίζεται σε 3 στρώματα (layers) και αφού εκπαιδεύσουμε έναν νευροασαφή ελεγκτή (Sugeno), χρησιμοποιώντας κατάλληλο σετ δεδομένων εκπαίδευσης (traindata) το οποίο λήφθηκε από την προσομοίωση του δυναμικού συστήματος (κατασκευή στρωματομόρφης πλάκας), εξετάζεται η μετατόπιση, η ταχύτητα και την επιτάχυνση που έχει ένα σημείο λόγω μιας δύναμης η οποία εφαρμόζεται πάνω της. Το σύστημα στο οποίο εφαρμόζουμε τον ασαφή ελεγκτή έχει κατασκευαστεί από τον κύριο Ταϊρίδη. Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείται μη συνεγκατεστημένος (non collocated) έλεγχος, έχοντας ως σημείο αναφοράς αποτελέσματα συνεγκατεστημένου (collocated) ελέγχου. Στον μη συνεγκατεστημένο έλεγχο το σημείο στο οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος είναι διαφορετικό από το σημείο στο οποίο εφαρμόζεται η δύναμη. Σκοπός είναι να μειωθεί το εύρος των τιμών των διαγραμμάτων της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της μετατόπισης μετά την διαδικασία του ελέγχου. Οι μετρήσεις γίνονται με τη βοήθεια του προγράμματος Simulink της Matlab.

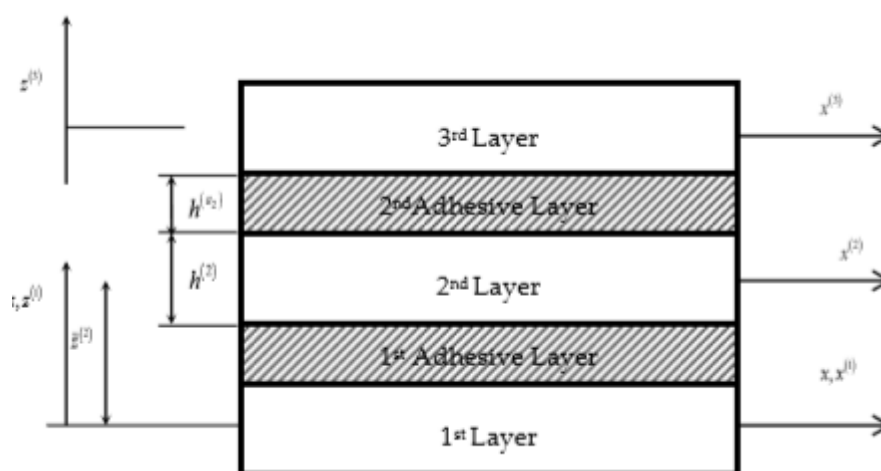
## 2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις πιο δυναμικές διαδικασίες για την αριθμητική προσεγγιστική επίλυση ποσοτικών προβλημάτων στην επιστήμη της Μηχανικής. Η μέθοδος αυτή μπόρεσε να εκμεταλλευτεί τη δύναμή του υπολογιστή στο να κατασκευάσει μία διακριτή προσέγγιση, να τη λύσει και να παραθέσει αποτελέσματα, περισσότερο από κάθε άλλη τεχνική στην επιστημονική υπολογιστική.

Η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, ή καλύτερα, των κόμβων. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού. Σε πολλές περιπτώσεις η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς (σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ανοίγματα, κοντά στο σημείο εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, κλπ.). Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του κόστους χωρίς να μειωθεί ακρίβεια της λύσης του προβλήματος. Λόγω όμως της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος διακριτοποίησης πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και μελέτης παρόμοιων κατασκευών.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική έχουμε μια συνθέτη πλάκα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, όπου η μια άκρη της είναι προσκολλημένη στον τοίχο και χωρίζεται σε τρία στρώματα που αποτελούνται από πιεζοηλεκτρικό υλικό ενώ ενδιάμεσα τους υπάρχει συγκολλητικό υλικό επιπλέον πληροφορίες μπορούν να βρεθούν (Han & Lee, 1998).

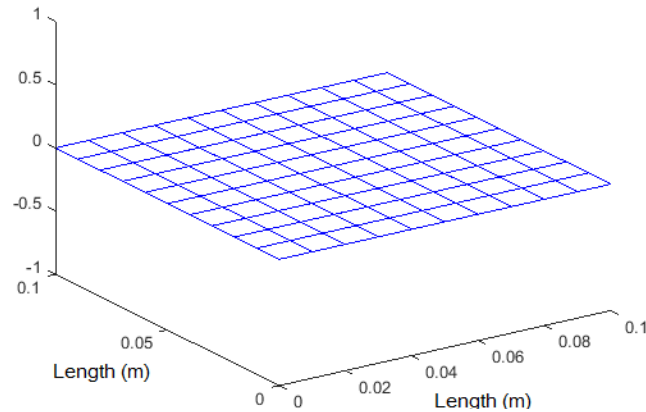
Το μήκος, το πλάτος και το πάχος ολόκληρης της πλάκας συμβολίζονται με  $L$ ,  $b$  και  $h$ , αντίστοιχα. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χειρίζεται πλάκες με έναν αυθαίρετο αριθμό ενεργοποιητών, αισθητήρων και ελαστικών στρώματων, συμπεριλαμβανομένων των κολλητικών στρώσεων μεταξύ τους.



Εικόνα 1 Μια σύνθετη πλάκα τριών στρώματων με συγκολλητικά υλικά

Η κατεύθυνση των ινών της πλάκας είναι  $[0 \pm 45/90]$ . Οι διαστάσεις της πλάκας είναι  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 1,3\text{mm}$ . Χρησιμοποιούνται  $10 \times 10$  ισοπαραμετρικά στοιχεία για την ανάλυση και επιλέγονται ρεαλιστικές οριακές συνθήκες (RBC), οδηγώντας σε ένα σύστημα

100 στοιχείων. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο αποτελείται από 12 κόμβους και κάθε κόμβος έχει 5 βαθμούς ελευθερίας (τρεις μεταφραστικές και δύο περιστροφικές). Επομένως, η δομή έχει 363 κόμβους και 1815 βαθμούς ελευθερίας. Το πλέγμα της δομής παρουσιάζεται στην Εικόνα 2 (Tairidis et al., 2015).



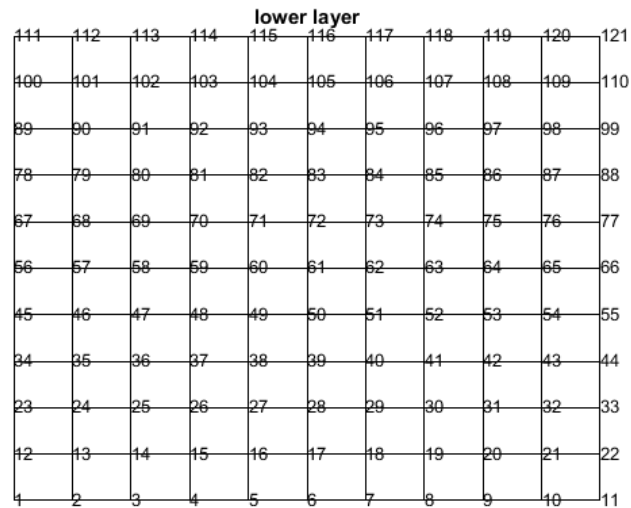
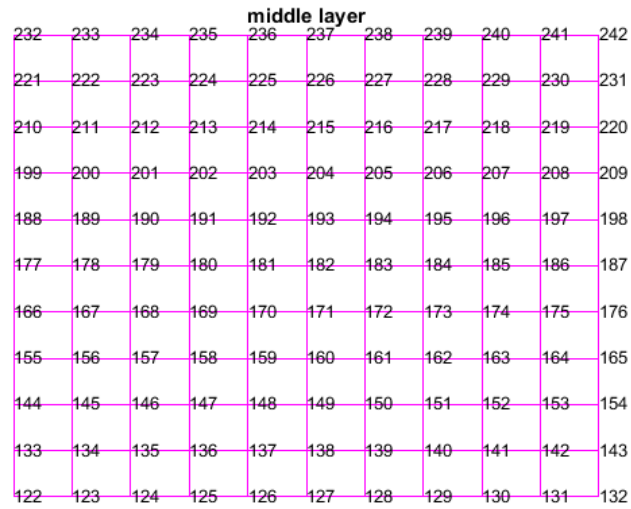
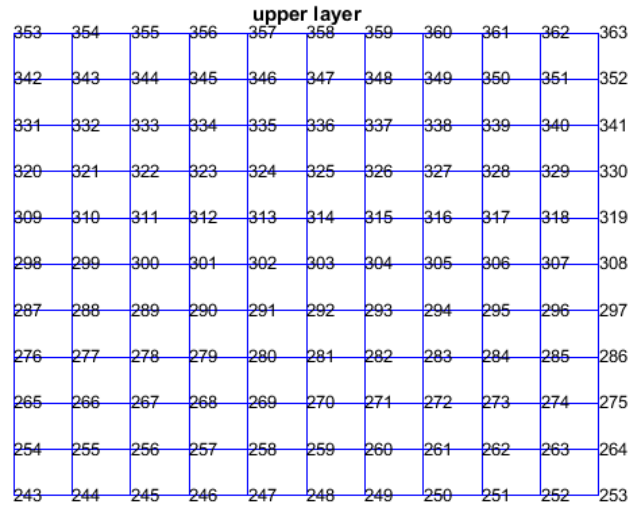
Εικόνα 2 Πλάκα χωρισμένη σε πεπερασμένα στοιχεία

Οι ιδιότητες του υλικού της πλάκας δίνονται στον ακόλουθο πίνακα ο οποίος αναλύει τα χαρακτηριστικά των υλικών που έχουμε στο σύστημα που εξετάζουμε:

Πίνακας 1 Σταθερές υλικού

Χαρακτηριστικά	Γραφίτης	Κόλλα	Πιεζοκεραμικό
$E_1$	130	1.78	59
$E_2$	9.6	1.78	59
$G_{12}$	4.8	-	-
$G_{23}$	3.2	-	-
$V_{12}$	0.31	0.3	0.34
$\rho$ (SI)	1570	1050	7400
$d_{31}=d_{32}$ (m/V)	-	-	$- 260 \cdot 10^{-12}$
Πάχος	0.1	0.05	0.2

Αφού τρέξουμε τον κώδικα τη Matlab βγαίνει το σχεδιάγραμμα των 363 κόμβων και των 3 στρωμάτων στα οποία χωρίζεται η κατασκευή της πλάκας που μελετάμε. Οι κόμβοι στους οποίους πραγματοποιείται ο έλεγχος βρίσκονται στην δεξιά πλευρά της πλάκας, δηλαδή στο ελεύθερο άκρο της. Η αριστερή πλευρά της κατασκευής είναι πακτωμένη στον τοίχο.



Εικόνα 3 Οι κόμβοι και η μορφή της πλάκας όπως εμφανίζονται αφού τρέξουμε τον κώδικα στη Matlab

### 3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

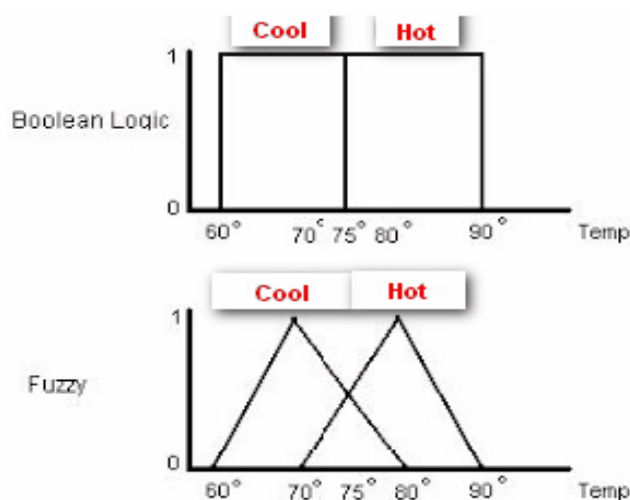
Η μοντελοποίηση και ο έλεγχος σύνθετων φυσικών διεργασιών, των οποίων η σχέση διέγερσης-απόκρισης χαρακτηρίζεται από ισχυρές μη γραμμικότητες από ανακρίβειες, ακόμα και από αντιφάσεις, είναι εφικτή στο πλαίσιο της ασαφούς λογικής. Οι δυνατότητες αυτές που δεν παρέχονται επαρκώς από τα κλασικά αυστηρά μαθηματικά εργαλεία μοντελοποίησης και ελέγχου καθιέρωσαν την ασαφή λογική ως ένα από τα πιο αποτελεσματικά και καθιερωμένα πλέον εργαλεία για το σύγχρονο μηχανικό και επιστήμονα. Εφαρμογές εμφανίζονται σε πεδία μοντελοποίησης (Modeling), πρόβλεψης (Prediction), ελέγχου (control), κατάταξη δειγμάτων σε κατηγορίες (Classification), αναγνώριση προτύπων (Pattern Recognition), συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support Systems), Θεωρία δυνατοτήτων (Possibility Theory), βελτιστοποίηση (Optimization)

Ο όρος ασαφής αναφέρεται σε πράγματα που δεν είναι ευδιάκριτα ή είναι αόριστα. Στον πραγματικό κόσμο πολλές φορές συναντάμε ένα πρόβλημα όπου δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε εάν είναι αληθές ή ψευδές, η ασαφής λογική παρέχει μια πολύτιμη ευελιξία στην εκλογίκευση του. Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να εξετάσουμε τις ανακρίβειες και τις αβεβαιότητες οποιασδήποτε κατάστασης.

Στην τιμή αλήθειας του συστήματος Boolean, όπως διατυπώθηκε από τον George Boole στο *The Laws of Thought* (1854), το 1.0 αντιπροσωπεύει την απόλυτη αλήθεια και το 0.0 αντιπροσωπεύει την απόλυτη ψευδή αξία. Στο ασαφές σύστημα, δεν υπάρχει λογική για απόλυτη αλήθεια και απόλυτη ψευδή αξία. Αλλά με την ασαφή λογική, υπάρχει ενδιαμέση τιμή, η οποία είναι εν μέρει αληθής και μερικώς ψευδής.

Για παράδειγμα, έστω ότι θέλουμε να χαρακτηρίσουμε τη θερμοκρασία ενός δωματίου με μέση το όριο των 24 βαθμών Κελσίου (περίπου 75 βαθμοί Φαρενάιτ). Αν η θερμοκρασία του δωματίου είναι 25 βαθμοί τότε το δωμάτιο θεωρείται ζεστό, ενώ αν είναι 23 θεωρείται κρύο.

Η ασαφής λογική βασίζεται στην αρχή ότι όλες οι παράμετροι ή οι έννοιες ενός συστήματος δεν έχουν μόνο μια έννοια, αλλά υποβάλλονται σε αξιολογήσεις/διαβαθμίσεις. Έννοιες όπως η απόσταση, η ταχύτητα, η θερμοκρασία, το ύψος, το βάρος, η εξυπηρέτηση κλπ. μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας κλίμακες. Για παράδειγμα, το δωμάτιο είναι πολύ κρύο, η εξυπηρέτηση είναι κάτω από του μετρίου και ούτω καθεξής. Με άλλα λόγια, η ασαφής λογική αντικατοπτρίζει τον τρόπο σκέψης των ανθρώπων, αποφεύγοντας σφάλματα γενίκευσης.



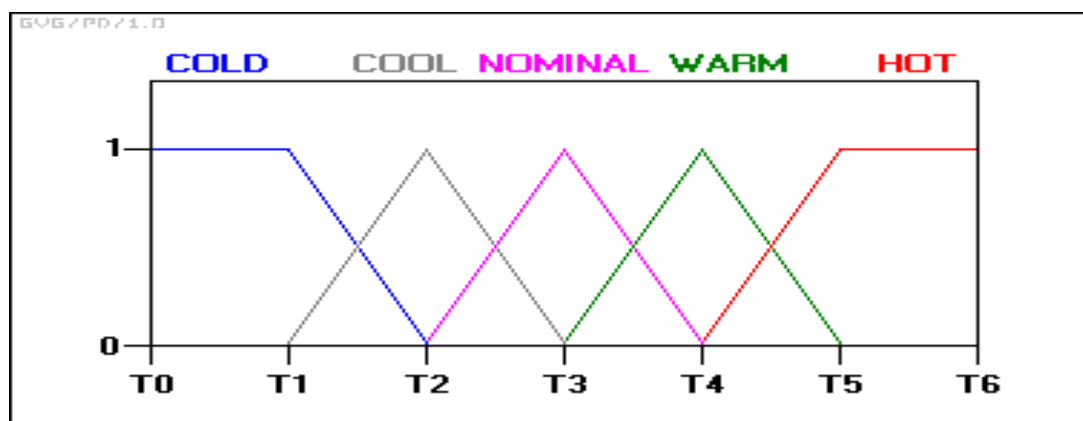
Εικόνα 4 Λογική Boole (πάνω) σε σύγκριση με την ασαφή λογική (κάτω)



Η ασαφής λογική πηγάζει από τη θεωρία των πιθανοτήτων, σύμφωνα με την οποία κάθε παράμετρος θα μπορούσε να ανήκει σε μια ομάδα με ένα ποσοστό από το 0 έως το 1.

Για παράδειγμα, μπορούμε να πούμε ότι ένα δωμάτιο θερμοκρασίας 27 βαθμών Κελσίου, είναι ζεστό με πιθανότητα 1, πολύ ζεστό με πιθανότητα 0,8 και κρύο με πιθανότητα 0.

Στην ασαφή λογική οι συναρτήσεις συμμετοχής αντιπροσωπεύουν το βαθμό της αλήθειας ως επέκταση της αποτίμησης. Οι βαθμοί της αλήθειας μπερδεύονται συχνά με τις πιθανότητες, αν και είναι εννοιολογικά διακριτές έννοιες, επειδή η ασαφής αλήθεια αντιπροσωπεύει την ένταξη σε αόριστα καθορισμένα σύνολα, όχι την πιθανότητα κάποιου γεγονότος ή κατάστασης. Οι λειτουργίες των συναρτήσεων συμμετοχής εισήχθησαν από τον Zadeh στην πρώτη εργασία σχετικά με τα ασαφή σύνολα (1965). Ο Zadeh, στη θεωρία του για τα ασαφή σύνολα, πρότεινε τη χρήση μιας συνάρτησης μέλους (με ένα εύρος που καλύπτει το διάστημα (0,1)) που λειτουργεί στο πεδίο όλων των πιθανών τιμών. Οι συναρτήσεις συμμετοχής σε ασαφή συστήματα είναι της μορφής :



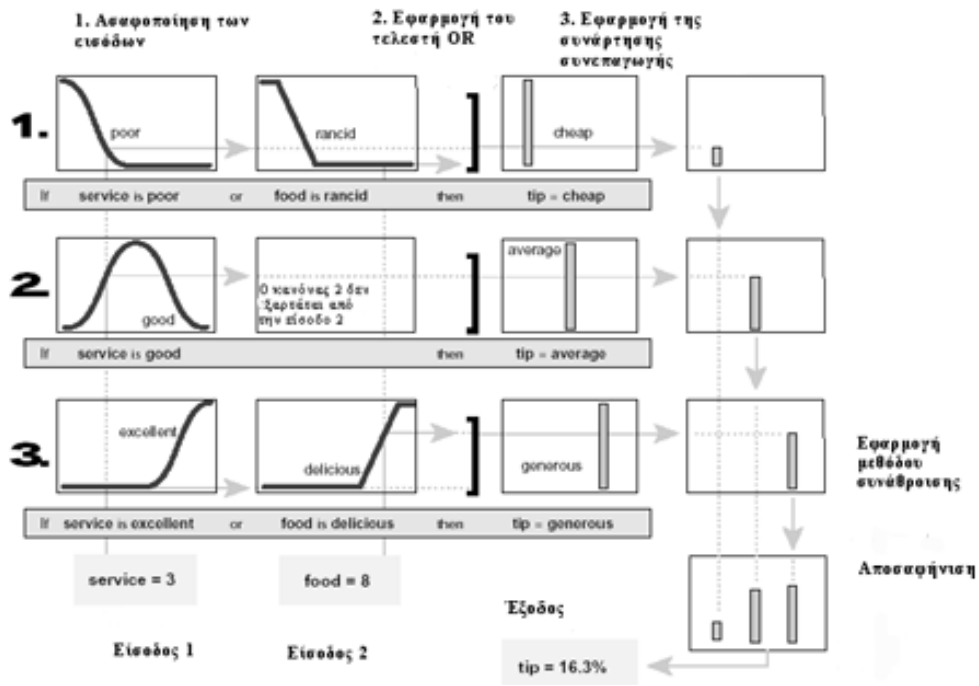
Εικόνα 5 Διάγραμμα που απεικονίζει τις συναρτήσεις συμμετοχής για την θερμοκρασία

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στη παρούσα διπλωματική είναι η μέθοδος Sugeno, η οποία εισήχθη το 1985. Η μέθοδος αυτή έχει ομοιότητες με τη μέθοδο των συστημάτων Mamdani. Για παράδειγμα τα 2 πρώτα βήματά της (ασαφοποίηση των εισόδων και εφαρμογή των τελεστών) είναι ακριβώς τα ίδια. Η κύρια διαφορά ανάμεσα στα δύο συστήματα έγκειται στο ότι οι συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο των συστημάτων Sugeno είναι μόνο γραμμικές ή σταθερές.

Ένας τυπικός ασαφής κανόνας σε συστήματα Sugeno μηδενικής τάξης έχει την μορφή:

If x is A and y is B then z = k

όπου A και B είναι τα ασαφή σύνολα της προϋπόθεσης ενώ k είναι μια αριθμητική τιμή. Αφού η συνέπεια του κανόνα είναι μια σταθερά τότε αυτό σημαίνει ότι το βήμα 3 εκφυλίζεται σε ένα απλό πολλαπλασιασμό ενώ το βήμα 4 καταλήγει να είναι η συγκέντρωση όλων των σταθερών.



Εικόνα 6 FIS Sugeno για το ποσοστό φιλοδωρήματος

Ένα σύστημα Sugeno πρώτης τάξης θα έχει κανόνες με τη γενική μορφή

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = p \cdot x + q \cdot y + r$$

όπου  $A$  και  $B$  είναι τα ασαφή σύνολα της προϋπόθεσης ενώ τα  $p, q, r$  είναι σταθερές.

Ένας τρόπος για να δούμε τα συστήματα πρώτης τάξης είναι να θεωρήσουμε ότι κάθε κανόνας προσδιορίζει τη θέση ενός κινούμενου singleton. Το singleton αυτό μπορεί να κινείται στο χώρο της εξόδου, με γραμμικό τρόπο και η θέση του εξαρτάται από τις τιμές των εισόδων.

Συστήματα Sugeno ανώτερης τάξης είναι εφικτά, όμως δεν προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις και ταυτόχρονα εισαγάγουν σημαντική πολυπλοκότητα.

## 4 ΝΕΥΡΟΑΣΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα νευρωνικά δίκτυα και τα ασαφή συστήματα έχουν αρκετά κοινά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός προβλήματος (π.χ. αναγνώριση προτύπου, παλινδρόμηση ή εκτίμηση πυκνότητας) εφόσον δεν υπάρχει κάποιο μαθηματικό μοντέλο του δεδομένου προβλήματος. Έχουν μόνο ορισμένα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα που σχεδόν εξαφανίζονται συνδυάζοντας και τις δύο έννοιες.

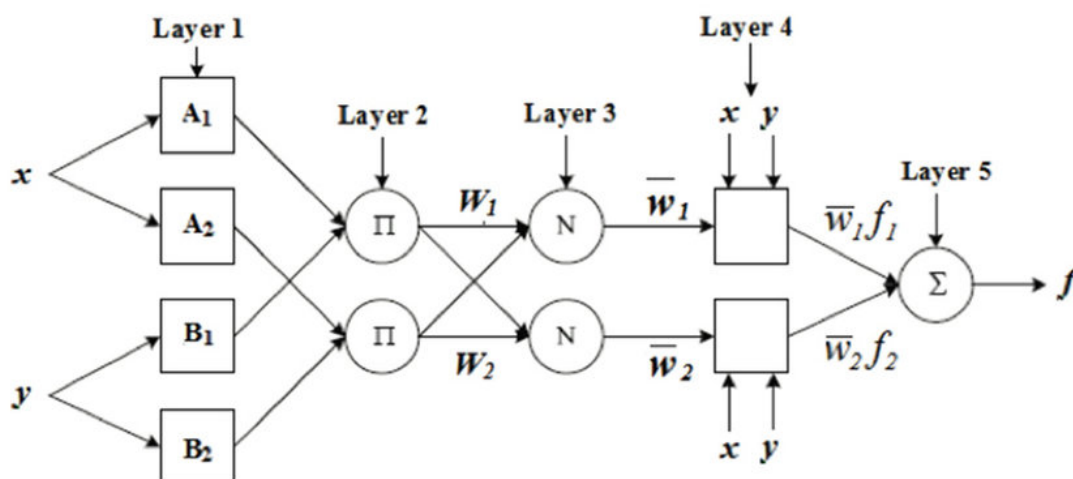
Τα νευρικά δίκτυα μπορούν να τεθούν σε λειτουργία μόνο εάν το πρόβλημα εκφράζεται από ένα επαρκές αριθμό παρατηρήσιμων παραδειγμάτων. Αυτές οι παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του μαύρου κουτιού (black box). Από τη μία πλευρά δεν πρέπει να δοθούν προηγούμενες γνώσεις σχετικά με το πρόβλημα. Από την άλλη πλευρά, ωστόσο, δεν είναι εύκολο να εξάγουμε κατανοητούς κανόνες από τη δομή του νευρικού δικτύου. Ένα ασαφές σύστημα απαιτεί γλωσσικούς κανόνες αντί να μάθουν από παραδείγματα ως προηγούμενη γνώση. Επιπλέον, οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου πρέπει να περιγράφουν γλωσσικά. Εάν η γνώση είναι ελλιπής, λάθος ή αντιφατική, τότε το ασαφές σύστημα πρέπει να συντονιστεί.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των νευρο-ασαφών συστημάτων όπως παρουσιάζονται από τους Jang and Sun, *Neuro Fuzzy Modeling and Control* 1995 συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Κατασκευή ευέλικτου, μη-τυπικού μοντέλου για τα δεδομένα εκπαίδευσης με τη μορφή ασαφών κανόνων (fuzzy rules).
2. Χρησιμοποίηση a priori γνώσης για το πρόβλημα.
3. Η αρχική γνώση μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί βάσει των δεδομένων εκπαίδευσης με νευρωνικούς αλγόριθμους μάθησης.
4. Η γνώση είναι άμεσα προσπελάσιμη με τη μορφή κανόνων (rules). Οι κανόνες είναι της μορφής : Εάν (if) <συνθήκες (conditions) > τότε (then) <αποτελέσματα (consequents)>.
5. Ο τρόπος διατύπωσης των κανόνων είναι πολύ κοντά στην κοινή ανθρώπινη λογική και συνεπώς η δυνατότητα των ασαφών συστημάτων για παροχή επεξηγήσεων του τρόπου εξαγωγής ενός συμπεράσματος είναι εξαιρετικά αποτελεσματική

Το ANFIS είναι ένα από τα πιο δημοφιλή προσαρμοστικά ασαφή συστήματα, αν όχι το πιο δημοφιλή. Μια διεξοδική μελέτη της προσαρμοστικότητας των ασαφών συστημάτων, ειδικά στον έλεγχο, καθώς και οι ιδιότητες σταθερότητάς τους μπορούν να βρεθούν στις κλασσικές μονογραφίες ως “Adaptive fuzzy systems and control: Design and stability analysis” (Wang, 1994)

Η αρχιτεκτονική του ANFIS βασίζεται σε ένα σύστημα ασαφούς έκβασης το οποίο με τη σειρά του εφαρμόζεται στο πλαίσιο των προσαρμοστικών νευρωνικών δικτύων και εισήχθη από τον Jyh-Shing R Jang στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας το 1993. (Jang, 1993).



Εικόνα 7 Η αρχιτεκτονική του ANFIS όπως προτάθηκε από τον Jang

Το Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (ANFIS) είναι ένα μοντέλο δικτύου το οποίο συνδυάζεται με το ασαφές σύστημα τύπου Sugeno με ικανότητα ασαφούς εκμάθησης. Ο κύριος στόχος του ANFIS είναι να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους του ισοδύναμου συστήματος ασαφούς λογικής χρησιμοποιώντας σύνολα δεδομένων εισόδου-εξόδου μέσω αλγορίθμου μάθησης. Συγκεκριμένα ένα νευροασαφές σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να "μάθει" λεκτικούς κανόνες και συναρτήσεις συμμετοχής ή να βελτιστοποιεί τους ήδη υπάρχοντες κανόνες ή συναρτήσεις συμμετοχής.

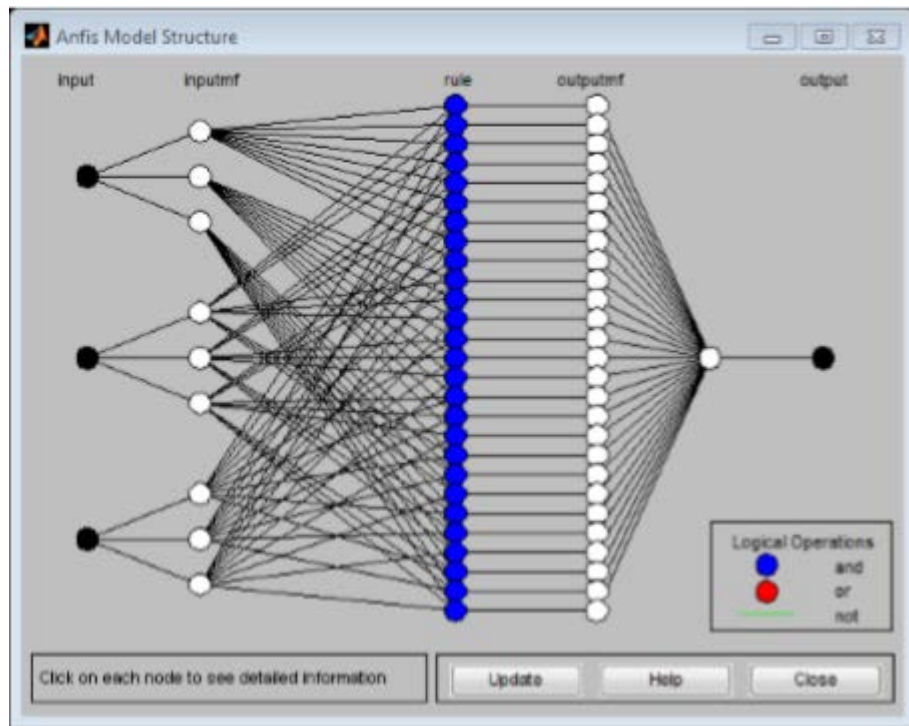
Οι συναρτήσεις συμμετοχής στην περίπτωση των νευροασαφών συστημάτων ονομάζονται κατηγορίες (clusters) και μπορούν να δημιουργηθούν με δύο τρόπους. Ο πρώτος ονομάζεται grid partition και ουσιαστικά δημιουργεί ένα νευροασαφές σύστημα μονής εξόδου κατηγοριοποιώντας τα δεδομένα εκπαίδευσης σε πλέγμα. Ο δεύτερος τρόπος ονομάζεται subtractive clustering και δημιουργεί το αρχικό μοντέλο χρησιμοποιώντας μια αφαιρετική διαδικασία πάνω στα δεδομένα.

Η διαδικασία μάθησης θα μπορούσε να είναι υβριδική, δηλαδή το προτεινόμενο μοντέλο ελέγχου μπορεί να κατασκευάσει μια χαρτογράφηση εισόδου-εξόδου που βασίζεται τόσο στην ανθρώπινη γνώση, όσο και σε ασαφή συστήματα, και κατάλληλα ζεύγη δεδομένων εισόδου / εξόδου. Ωστόσο, ακόμη και αν η ανθρώπινη τεχνογνωσία δεν είναι διαθέσιμη, εξακολουθεί να είναι δυνατή η διαμόρφωση των αρχικών παραμέτρων διαισθητικά και να δημιουργηθούν οι ασαφείς κανόνες χρησιμοποιώντας μια διαδικασία μάθησης για να προσεγγίσουν μια επιθυμητή απόδοση.

Αυτό σημαίνει ότι, αντί να επιλέγονται οι παράμετροι του ελεγκτή (συναρτήσεις συμμετοχής, κανόνες κλπ.) αυθαίρετα, μια αυτοματοποιημένη διαδικασία μπορεί να παρέχει προσαρμοσμένες λειτουργίες προσχώρησης για τις ασαφείς μεταβλητές (εισροές και εκροές) βάσει των διαθέσιμων δεδομένων του συστήματος. Επιπλέον, ένα σύνολο κανόνων ή άλλων παραμέτρων του ελεγκτή μπορούν να συμπεριληφθούν και, ίσως το πιο σημαντικό, ο ελεγκτής μπορεί να εκπαιδευτεί ώστε να είναι ανθεκτικός, δηλαδή ικανός να λειτουργεί υπό διαφορετικές συνθήκες (Tairidis 2016).

Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για δημιουργήσουμε ένα νευροασαφές σύστημα στην παρούσα εργασία είναι η Matlab και αυτό γίνεται με χρήση του fuzzy logic toolbox. Πιο συγκεκριμένα, η ρουτίνα ANFIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση ασαφών συστημάτων συνεπαγωγής τύπου Sugeno, χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Ουσιαστικά, με το ANFIS μπορεί να κατασκευαστεί ένα σύστημα ασαφούς συμπερασμού, χρησιμοποιώντας μόνο ένα προκαθορισμένο και αντιπροσωπευτικό σύνολο δεδομένων εισόδου / εξόδου. Οι παράμετροι του συστήματος μπορούν να ρυθμιστούν χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης του σφάλματος (backpropagation) είτε μόνο του, είτε σε συνδυασμό με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Αυτός ο συντονισμός επιτρέπει στα ασαφή συστήματα να μαθαίνουν από τα ίδια δεδομένα που μοντελοποιούν. Η μέθοδος μάθησης λειτουργεί με τρόπο παρόμοιο με αυτόν για την περίπτωση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.



Εικόνα 8 Μοντέλο ANFIS στη Matlab

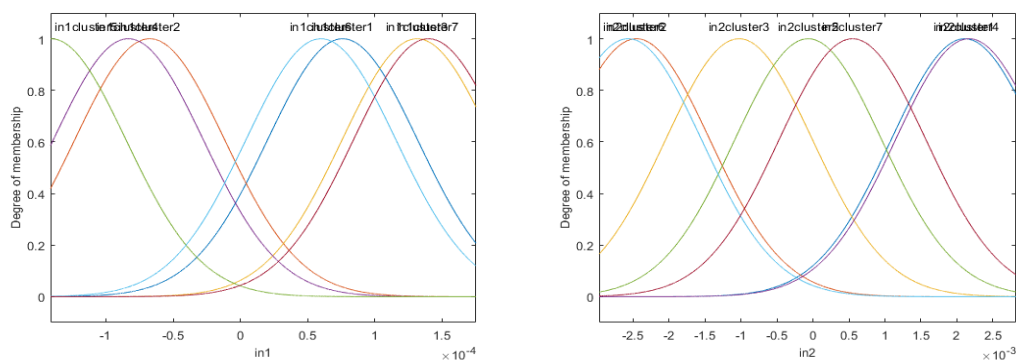
Η προσέγγιση της μοντελοποίησης αυτής είναι παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται στις τεχνικές αναγνώρισης συστημάτων. Πρώτα, δημιουργείται ένα παραμετροποιημένο μοντέλο και στη συνέχεια ένα σύνολο δεδομένων συλλέγεται και εφαρμόζεται. Οι παράμετροι του ασαφούς συστήματος θα ρυθμιστούν αυτόματα χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα μέχρι να επιτευχθεί ένα κριτήριο σφάλματος.

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τα παρακάτω αποτελέσματα έγιναν 35 δοκιμές, μεταξύ διαφορετικών σημείων, παίρνοντας 2 κόμβους από κάθε layer και εξετάζοντας τη δυνατότητα μη συνεγκατεστημένου (non-collocated) ελέγχου σε 6 σημεία για τον κάθε ένα από αυτούς.

### 5.1 ΚΟΜΒΟΣ 110

Όσον αφορά στον νευροασαφή ελεγκτή που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αυτός εκπαιδεύτηκε χρησιμοποιώντας κατάλληλο σετ δεδομένων εκπαίδευσης (traindata) το οποίο λήφθηκε από την προσομοίωση του δυναμικού συστήματος (κατασκευή στρωματόμορφης πλάκας). Οι συναρτήσεις συμμετοχής (clusters) και η επιφάνεια των κανόνων (surface) προέκυψαν ως εξής:

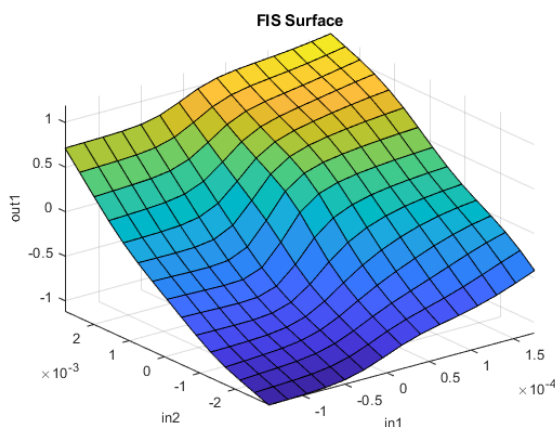


Εικόνα 9 Συναρτήσεις συμμετοχής (clusters) για τις εισόδους

Οι κανόνες του ελεγκτή μας προέκυψαν από τη διαδικασία εκπαίδευσης ως εξής:

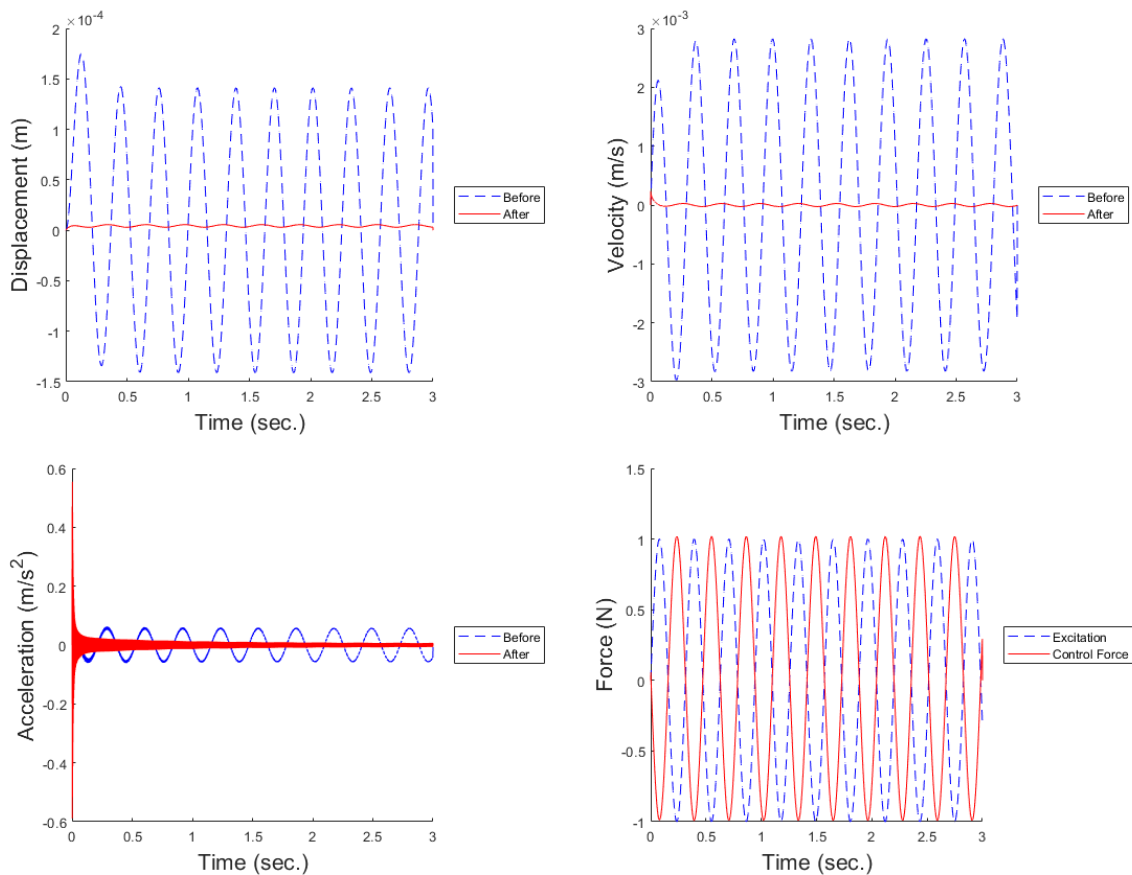
Πίνακας 2: Κανόνες νευροασαφούς συστήματος

In1 \ In2	CI1	CI2	CI3	CI4	CI5	CI6
CI1	Out1	----	----	----	----	----
CI2	----	Out2	----	----	----	----
CI3	----	----	Out3	----	----	----
CI4	----	----	----	Out4	----	----
CI5	----	----	----	----	Out5	----
CI6	----	----	----	----	----	Out6



Εικόνα 10 Γραφική παράσταση των κανόνων του ελεγκτή για τον κόμβο 110

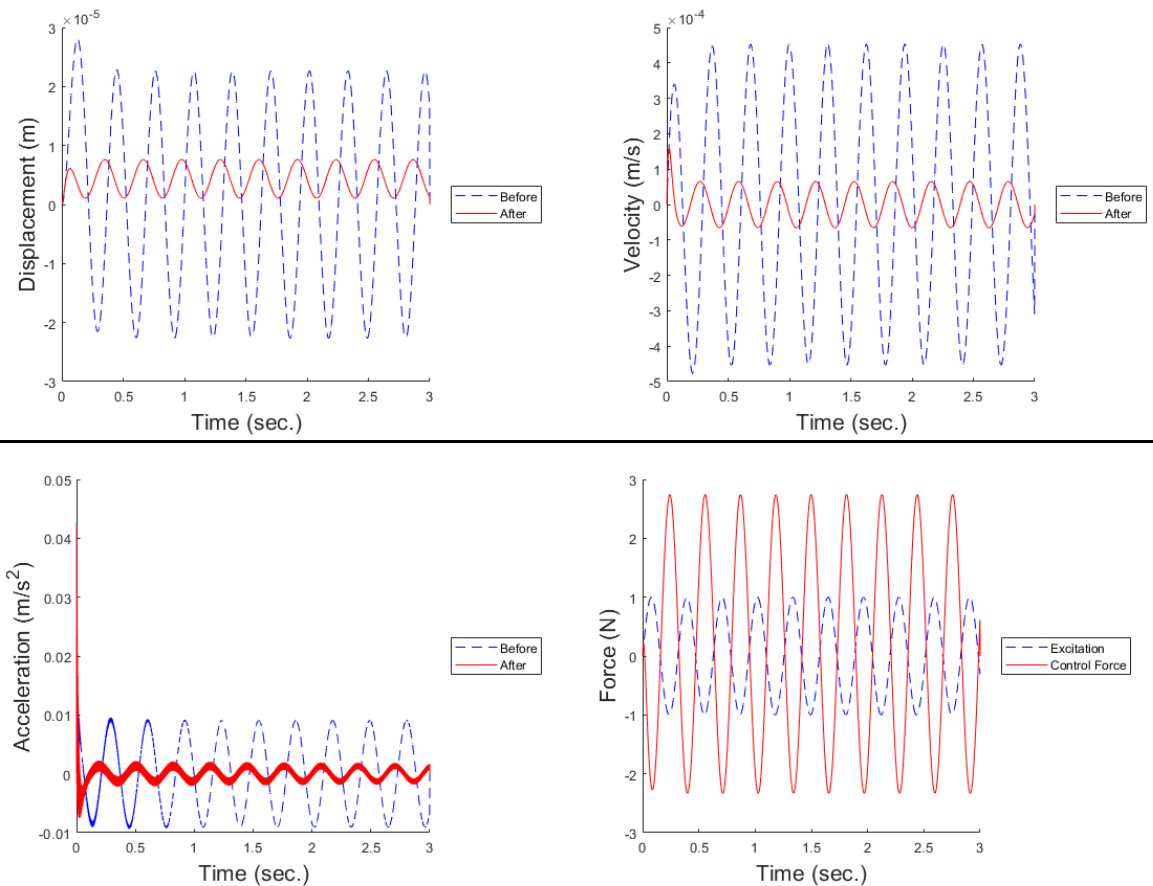
### 5.1.1 110-110 συνεγκατεστημένος έλεγχος (collocated)



Εικόνα 11 Μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση και δυνάμεις (πριν και μετά τον έλεγχο) για την περίπτωση συνεγκατεστημένου ελέγχου στον κόμβο 110

Εδώ βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά, γεγονός που οφείλεται στο ότι έχουμε συνεγκατεστημένο (collocated) έλεγχο, αφού η εξωτερική φόρτιση και η εφαρμογή της δύναμης ελέγχου γίνεται, μέσω του ενεργοποιητή, στο ίδιο σημείο.

### 5.1.2 110-165 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)

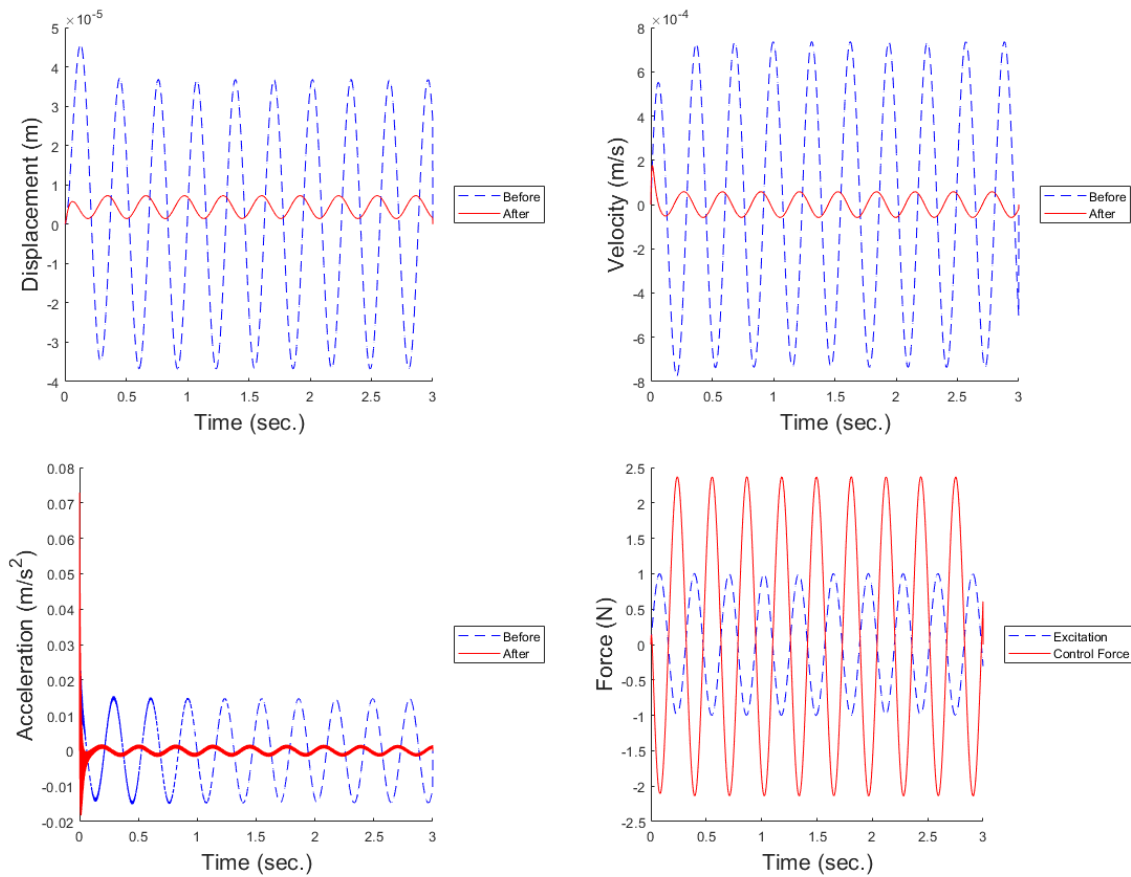


Εικόνα 12 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης για τον κόμβο 110 με τον έλεγχο να πραγματοποιείται στον κόμβο 165 (μη συνεγκατεστημένος έλεγχος)

Ο έλεγχος σε αυτή την περίπτωση αποδεικνύεται αρκετά ικανοποιητικός αφού στα διαγράμματα της μετατόπισης της επιτάχυνσης και της ταχύτητας το εύρος των τιμών σε σύγκριση με την προηγούμενη διαδικασία (χωρίς έλεγχο) μειώνονται και επιτυγχάνεται καταστολή των κραδασμών.



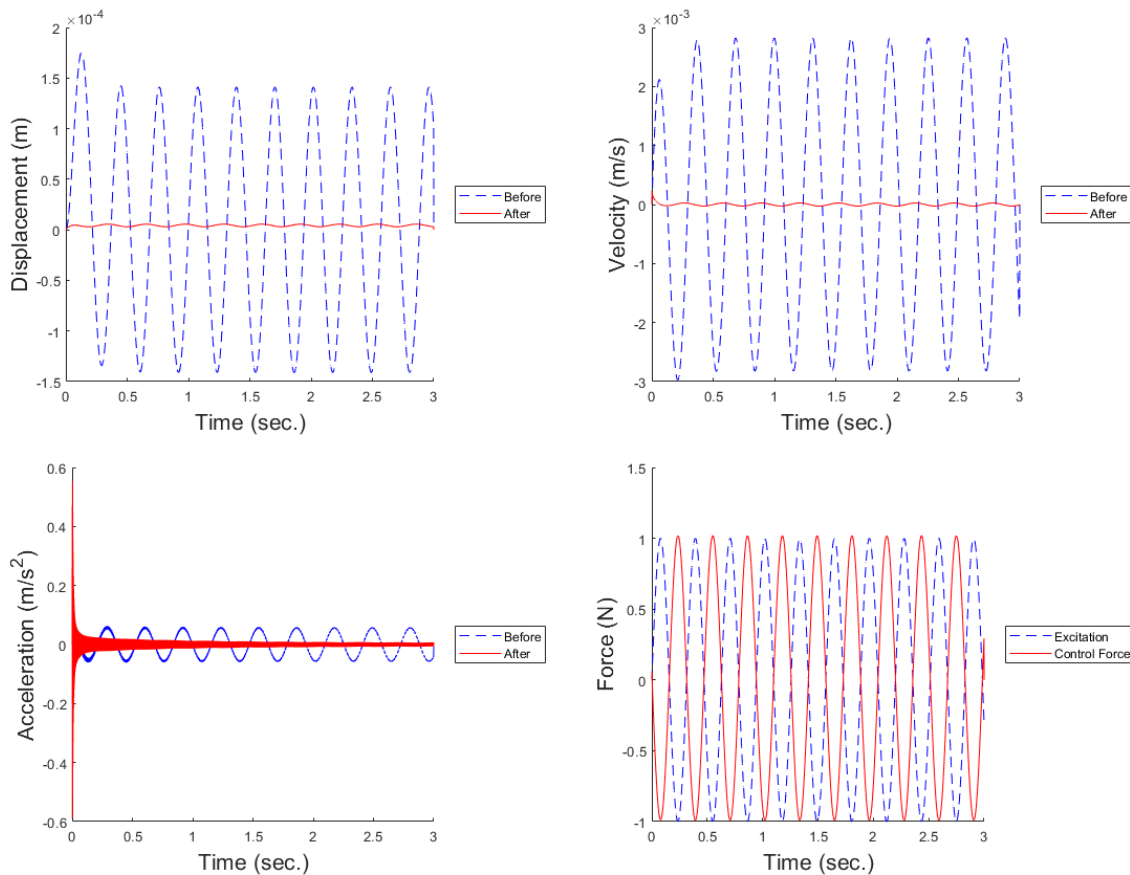
### 5.1.3 110-286 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)



Εικόνα 13 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης για εφαρμογή δύναμης στον 110 και έλεγχο στον 286

Τα διαγράμματα της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης έχουν μια μικρή βελτίωση σε σύγκριση με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης (110-165) που σημαίνει ότι ο έλεγχος είναι πολύ ικανοποιητικός.

#### 5.1.4 110-330 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)

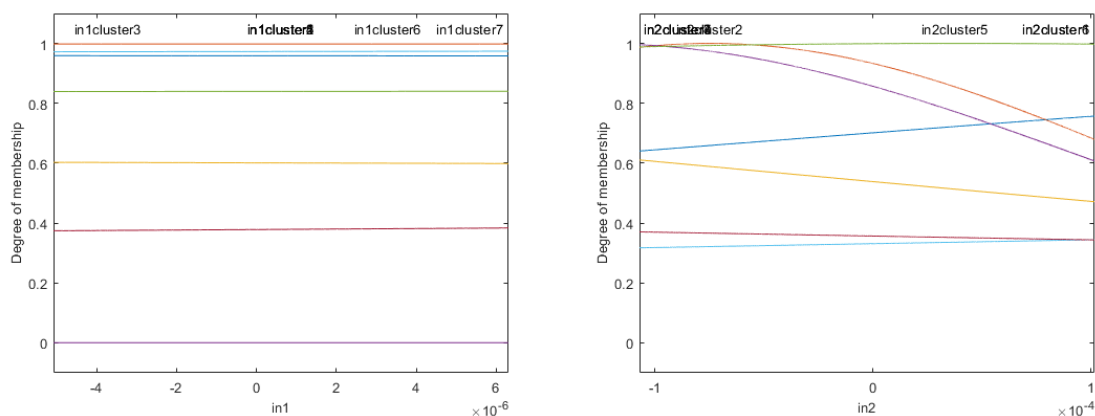


Εικόνα 14 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης για μη συνεγκατεστημένο έλεγχο μεταξύ των κόμβων 110 και 330

Όλα τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων είναι πάρα πολύ ενθαρρυντικά, αφού μέσα από τη διαδικασία του ελέγχου μειώνονται κατά πολύ τα εύρη των τιμών των διαγραμμάτων της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Επιπλέον η δύναμη ελέγχου είναι τελείως αντίδιαμετρική από την αρχική δύναμη που ασκήθηκε. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτή της περίπτωσης του συνεγκατεστημένου ελέγχου.

## 5.2 ΚΟΜΒΟΣ 154

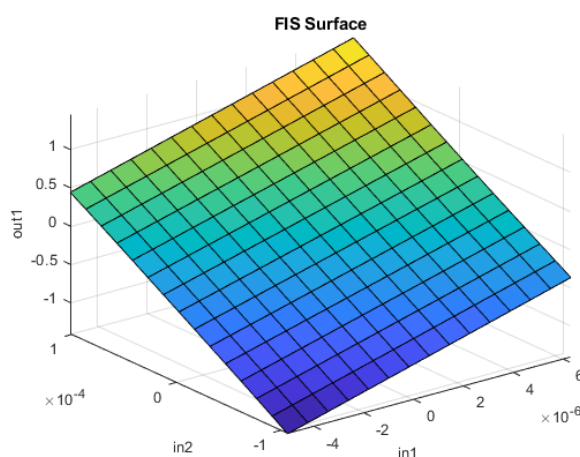
Ο ελεγκτής ως εισόδους δέχεται το πεδίο των μετακινήσεων και την ταχύτητα, στον κόμβο 154, και ως έξοδος προκύπτει η δύναμη ελέγχου. Οι συναρτήσεις συμμετοχής που περιγράφουν την είσοδο 1 είναι σχεδόν γραμμικής μορφής ενώ αυτές που περιγράφουν την είσοδο 2 έχουν τη μορφή καμπυλών. Αξίζει να αναφερθεί ότι και εδώ όπως και προηγουμένως, οι συναρτήσεις αυτές προκύπτουν με αυτόματο τρόπο από τη διαδικασία εκπαίδευσης.



Εικόνα 15 Διαγράμματα συναρτήσεων συμμετοχής εισόδου 1 και 2

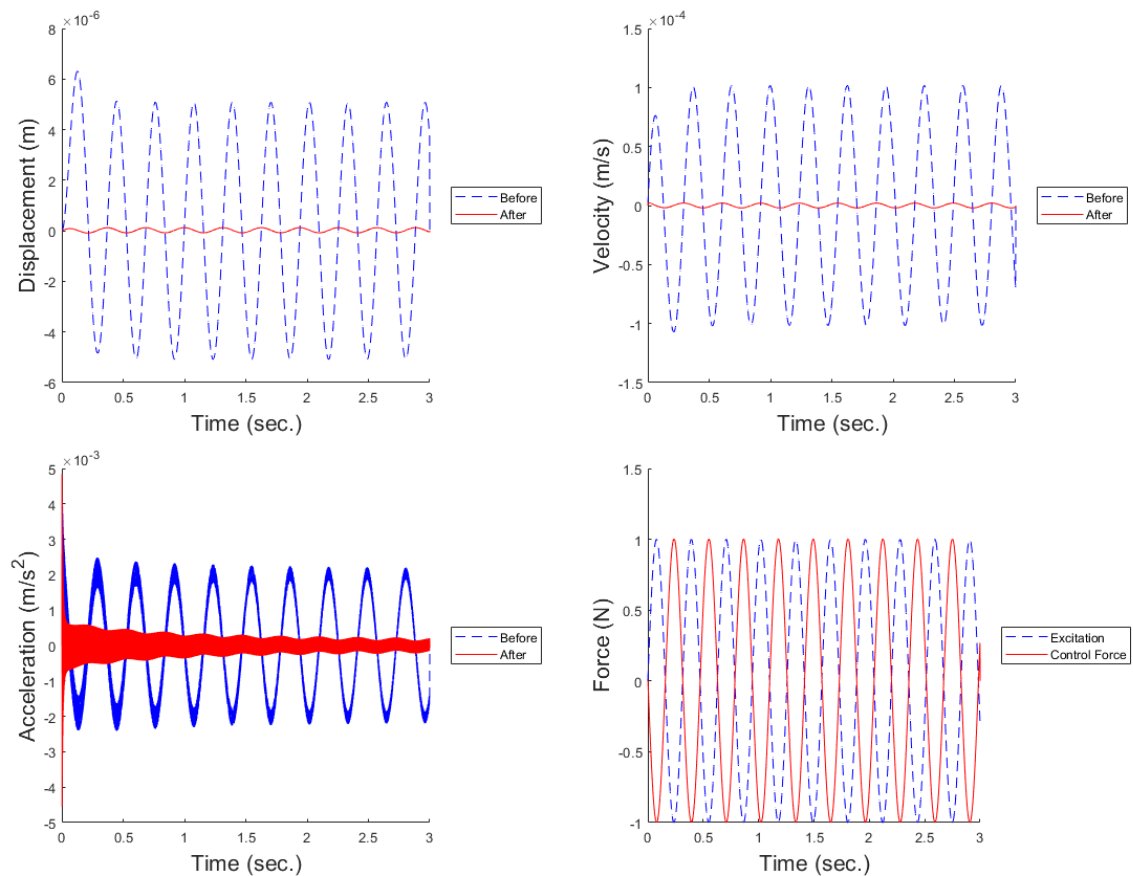
Οι κανόνες του ελεγκτή μας προέκυψαν από τη διαδικασία εκπαίδευσης πανομοιότυποι με την προηγούμενη περίπτωση (βλ Πίνακα 2).

Η επιφάνεια των κανόνων του συστήματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 16 Γραφική παράσταση των κανόνων του ελεγκτή για τον κόμβο 154

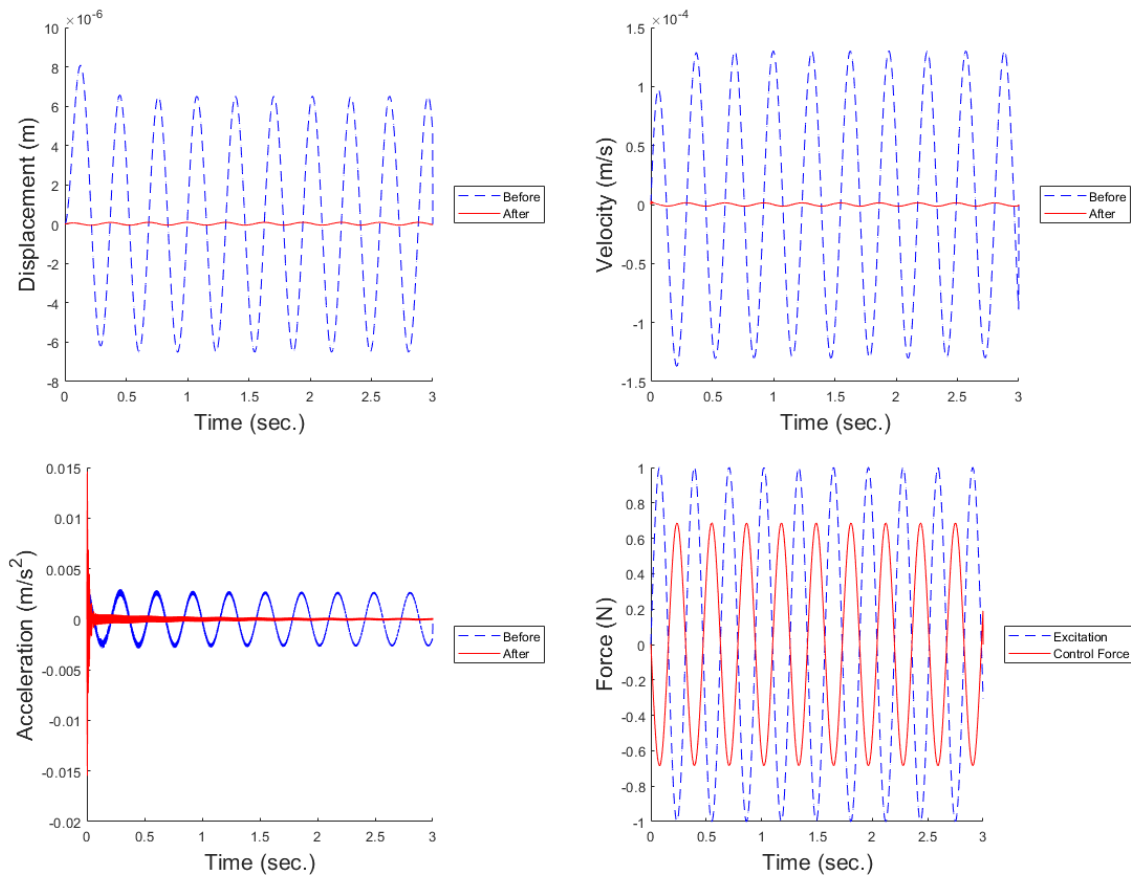
### 5.2.1 154-154 συνεγκατεστημένος έλεγχος (collocated)



Εικόνα 17 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δύναμης για συνεγκατεστημένο έλεγχο στον κόμβο 154

Ο έλεγχος έχει καλά αποτελέσματα όσον αφορά την μετατόπιση και την ταχύτητα ωστόσο παρόλο που το εύρος της επιτάχυνσης έχει μειωθεί αρκετά δεν είναι στα επίπεδα συνεγκατεστημένου ελεγχου που συναντήσαμε πιο πριν, 110-110, ή ακόμα και στην περίπτωση 110-330.

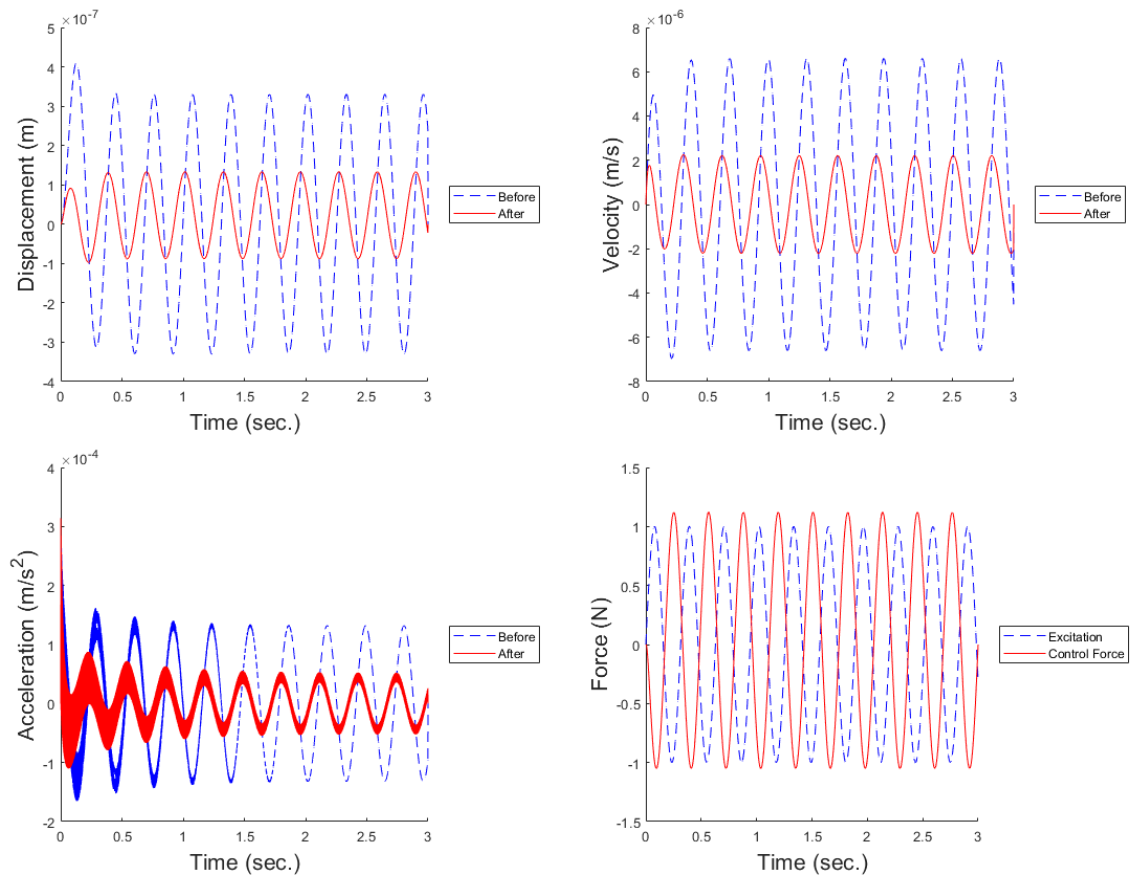
### 5.2.2 154-165 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)



Εικόνα 18 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων για περίπτωση μη συνεγκατεστημένου ελέγχου μεταξύ των κόμβων 154-165

Τα αποτελέσματα είναι πάλι πολύ ενθαρρυντικά, και καλύτερα από αυτά τη διαδικασίας του συνεγκατεστημένου ελέγχου, αφού οι τιμές της μετατόπισης, της ταχύτητας αλλά και της επιτάχυνσης μετά τον έλεγχο συγκεντρώνονται γύρω από τον άξονα x. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι κόμβοι 154 με 165 είναι πολύ κοντά μεταξύ τους οπότε έχουμε μια παρόμοια περίπτωση με αυτή του συνεγκατεστημένου ελέγχου.

### 5.2.3 154-231 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)

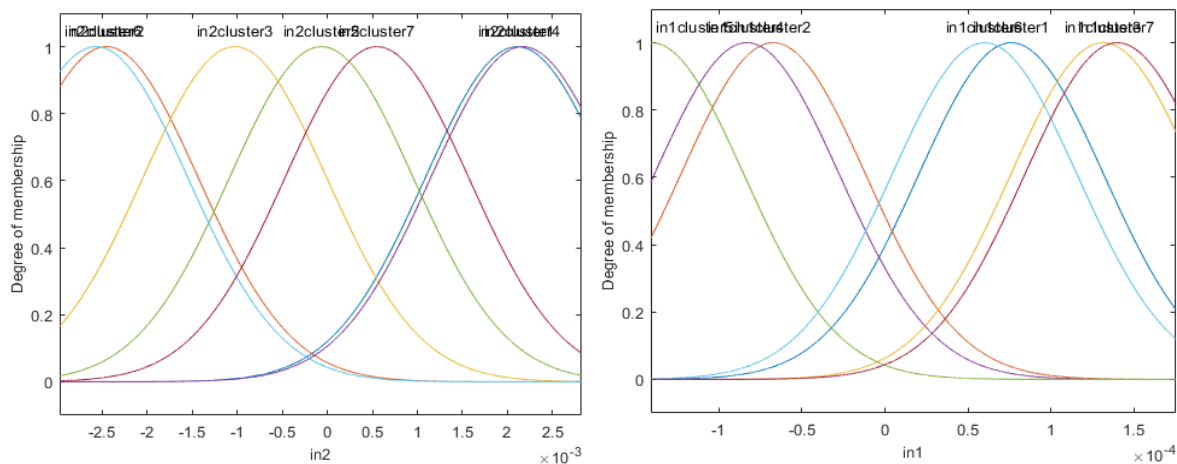


Εικόνα 19 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων για έλεγχο στο σημείο 154 και εφαρμογή δύναμης στο σημείο 231

Παρόλο που το εύρος των τιμών των διαγραμμάτων μειώνεται τα αποτελέσματα είναι μέτρια σε σύγκριση με κάποια από τα προηγούμενα που αναφέρθηκαν, ωστόσο πάλι επιτυγχάνεται ικανοποιητική καταστολή των κραδασμών.

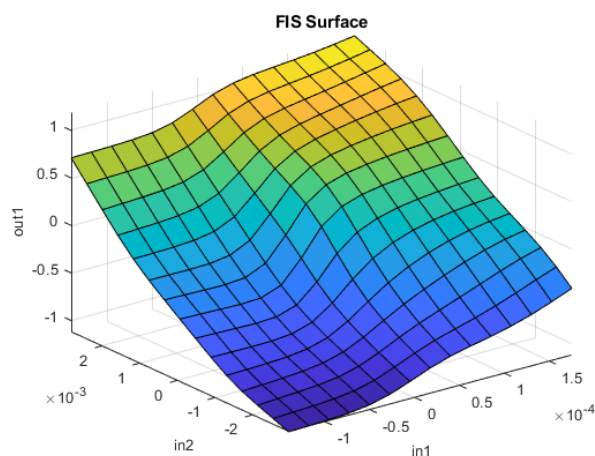
### 5.3 ΚΟΜΒΟΣ 220

Οι συναρτήσεις συμμετοχής ,1 και 2, οι οποίες έχουν επιλεγεί για την περιγραφή των εισόδων του ελεγκτή έχουν ημιτονοειδή μορφή όπως φαίνεται παρακάτω.



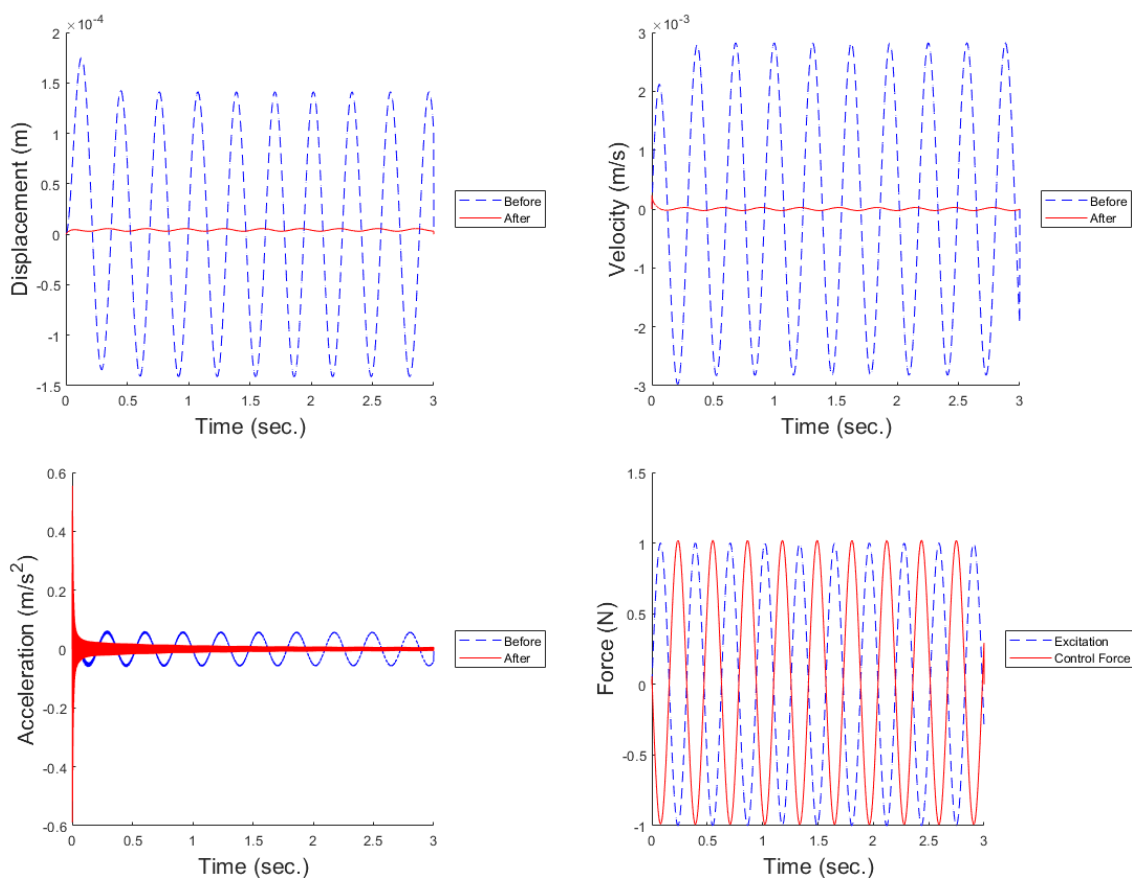
Εικόνα 20 Συναρτήσεις συμμετοχής για την εκπαίδευση του ελεγκτή

Οι κανόνες του ελεγκτή μας προέκυψαν από τη διαδικασία εκπαίδευσης πανομοιότυποι με την προηγούμενη περίπτωση (βλ Πίνακα 2).



Εικόνα 21 Γραφική παράσταση των κανόνων του ελεγκτή για τον κόμβο 220

### 5.3.1 220-220 συνεγκατεστημένος έλεγχος (collocated)

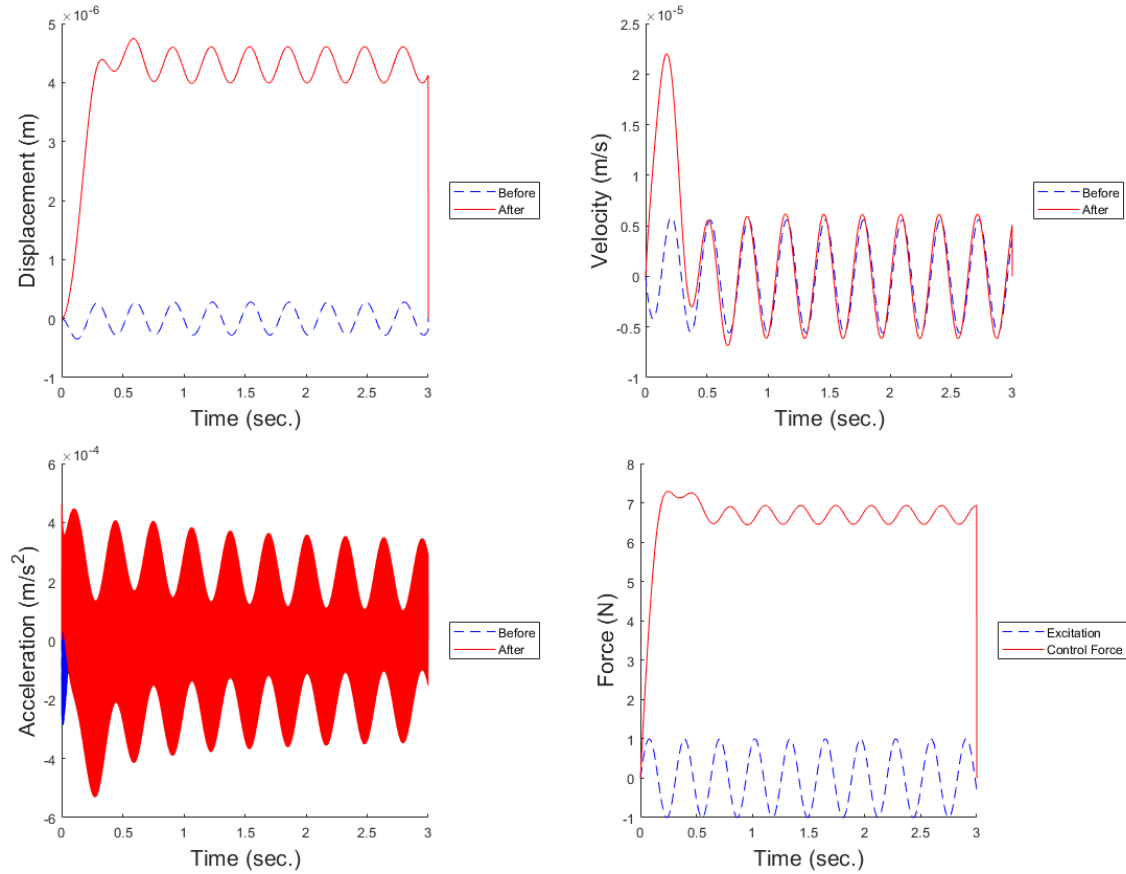


Εικόνα 22 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων για την περίπτωση συνεγκατεστημένου ελέγχου στον κόμβο 220

Ο συνεγκατεστημένος έλεγχος για τον κόμβο 220 είναι πολύ αποδοτικός αφού όλα τα διαγράμματα παρουσιάζουν αρκετά καλύτερες τιμές και μειώνονται κατά πολύ οι δονήσεις στην πλάκα



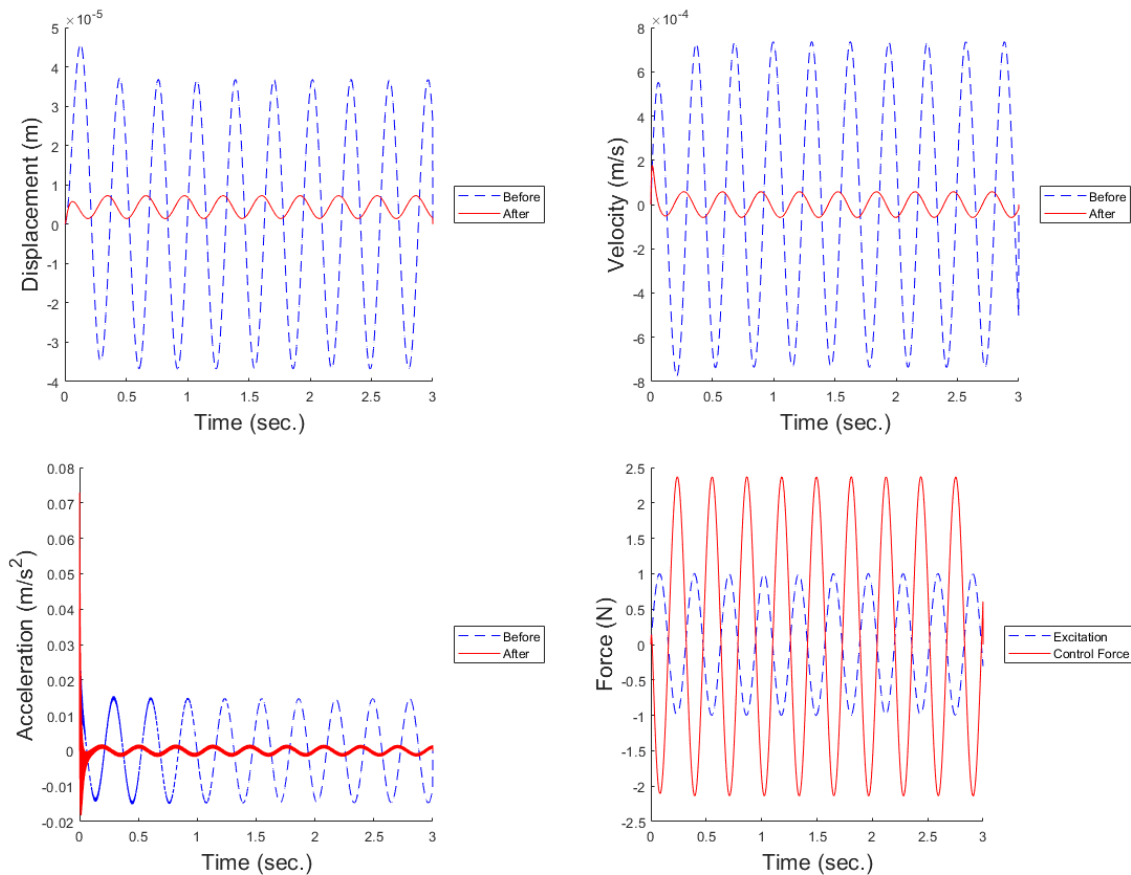
### 5.3.2 220-231 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)



Εικόνα 23 Διαγράμματα μετατόπισης, επιτάχυνσης, ταχύτητας και δυνάμεων για περίπτωση μη συνεγκατεστημένου ελέγχου μεταξύ των κόμβων 220 και 231

Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν ότι σε αυτή την περίπτωση ο μη συνεγκατεστημένος έλεγχος είναι ανεπαρκής, καθώς δεν βελτιώνει κανένα αποτέλεσμα από τα παραπάνω διαγράμματα.

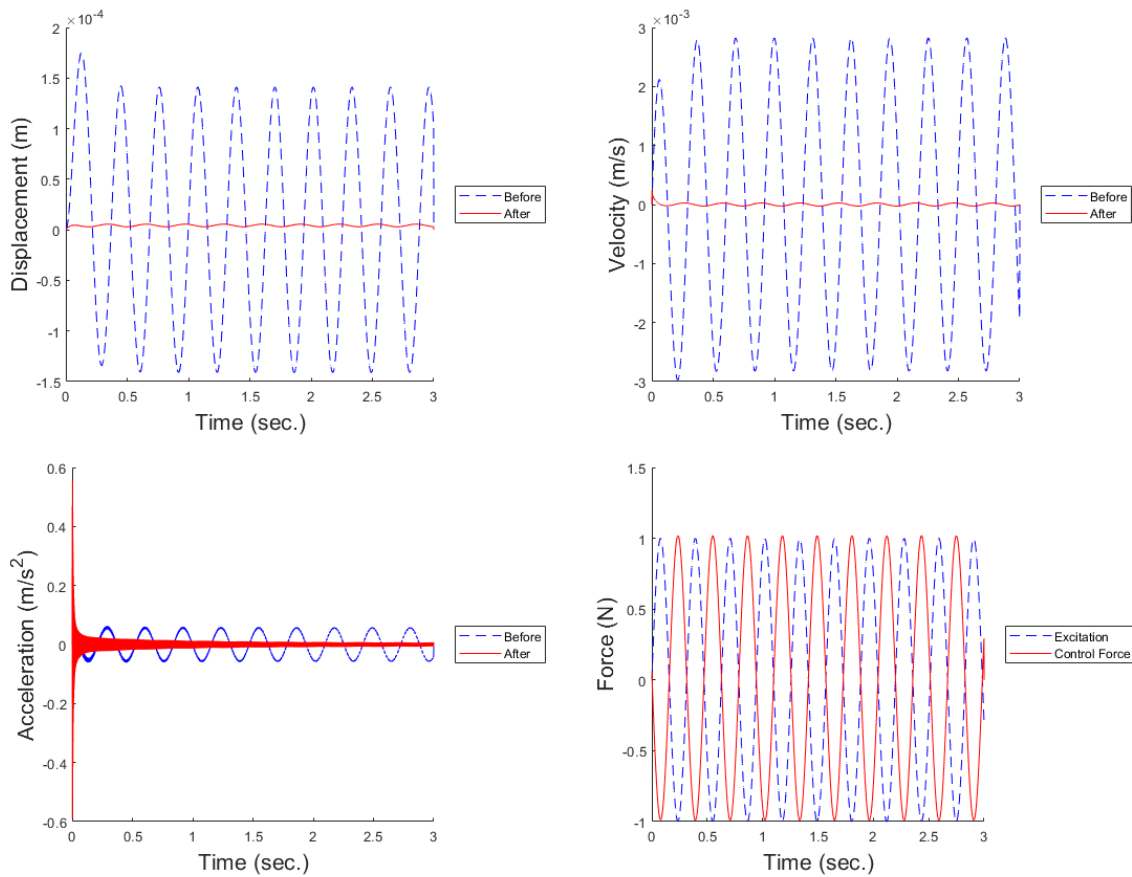
### 5.3.3 220-286 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)



Εικόνα 24 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων για την περίπτωση μη συνεγκατεστημένου ελέγχου μεταξύ των κόμβων 220 και 286

Τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι πολύ καλά αφού μειώθηκε το εύρος των τιμών που παίρνει η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Επιπλέον η δύναμη ελέγχου παίρνει αντιδιαμετρικές τιμές και αυξήθηκε κατά 250%.

### 5.3.4 220-330 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)

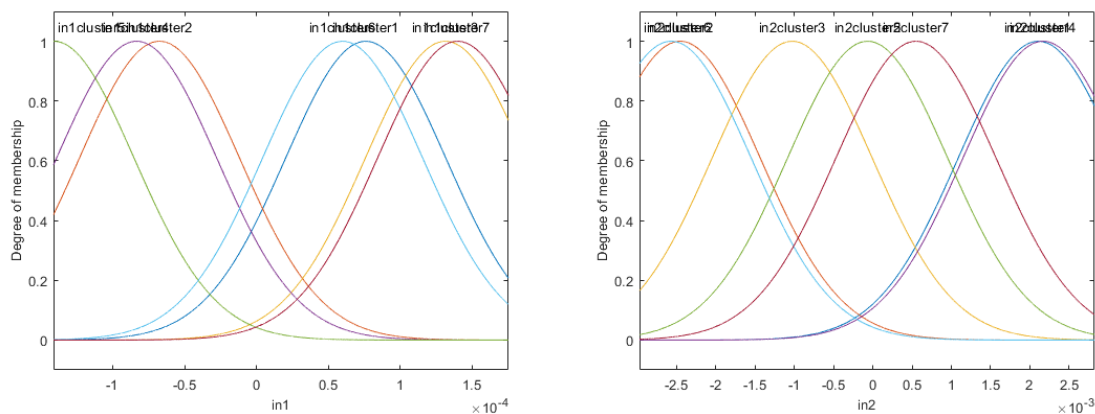


Εικόνα 25 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων για μη συνεγκατεστημένο έλεγχο μεταξύ των κόμβων 220 και 330

Όπως φαίνεται από την εικόνα 25 έχουμε μεγάλη αναστολή των κραδασμών σε όλα τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα του μη συνεγκατεστημένου ελέγχου μεταξύ των κόμβων 220-330 είναι παρόμοια με τον συνεγκατεστημένο έλεγχο 220-220.

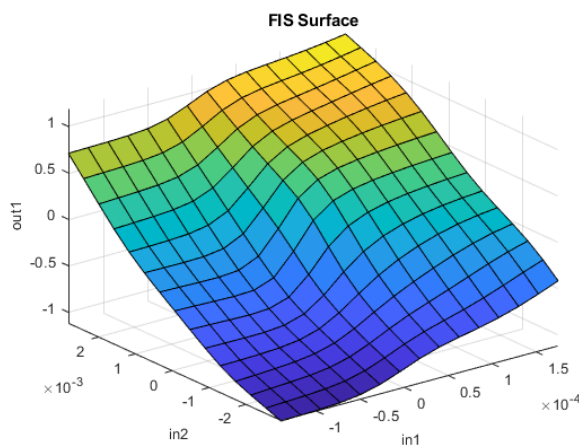
#### 5.4 ΚΟΜΒΟΣ 330

Οι συναρτήσεις συμμετοχής τόσο για την πρώτη είσοδο (ταχύτητα) όσο και για την δεύτερη (μετατόπιση) εμφανίζουν ημιτονοειδή μορφή.



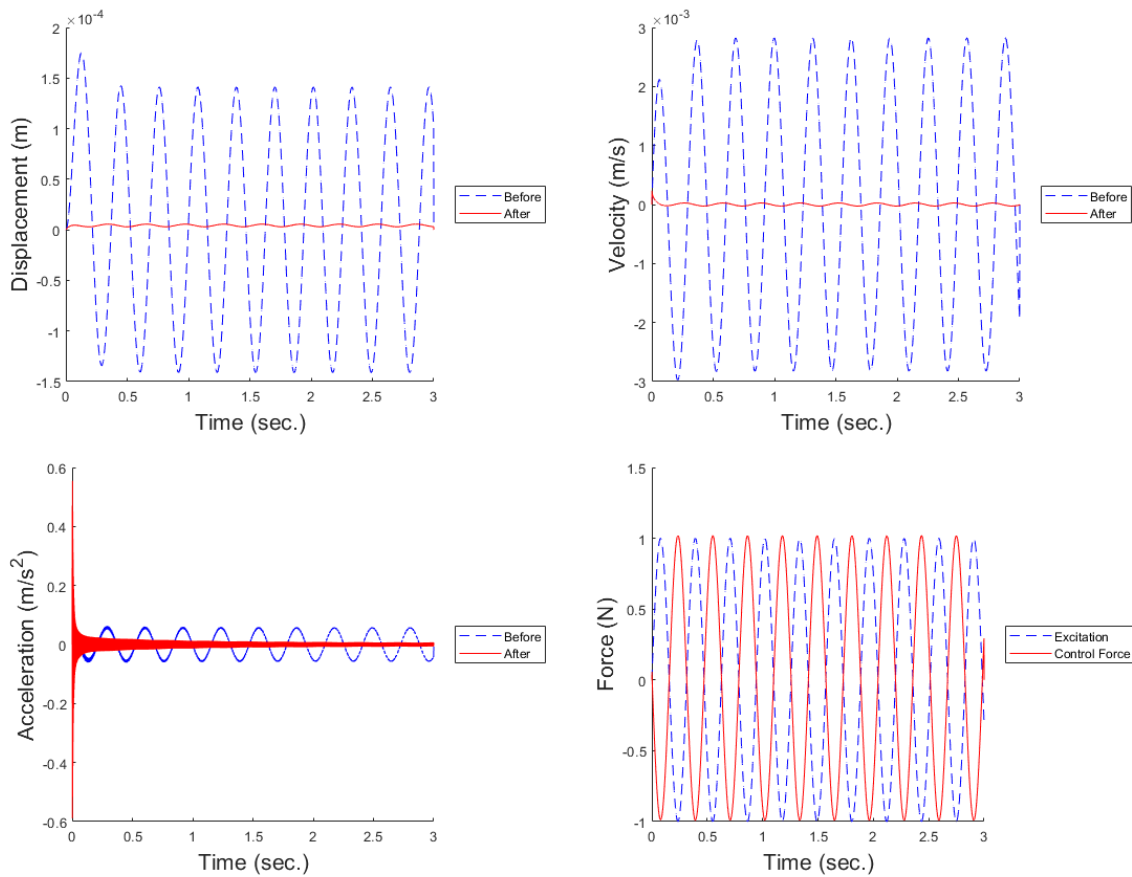
Εικόνα 26 Συναρτήσεις συμμετοχής για μεταβλητές εισόδου 1 και 2 σχετικά με τον κόμβο 330

Οι κανόνες του ελεγκτή μας προέκυψαν από τη διαδικασία εκπαίδευσης πανομοιότυποι με την προηγούμενη περίπτωση (βλ Πίνακα 2).



Εικόνα 27 Γραφική παράσταση των κανόνων του ελεγκτή για τον κόμβο 330

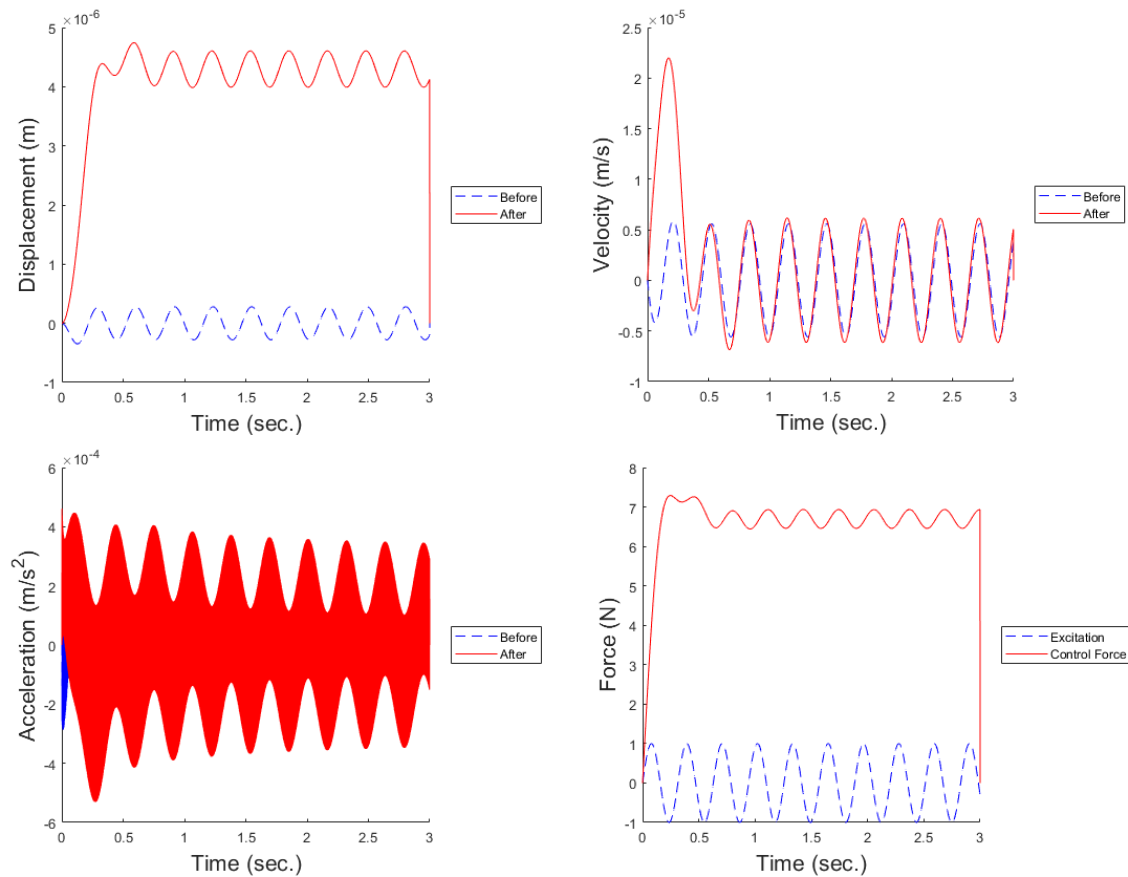
### 5.4.1 330-330 συνεγκατεστημένος έλεγχος (collocated)



Εικόνα 28 διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων για συνεγκατεστημένο έλεγχο στον κόμβο 330

Τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι πολύ καλά αφού οι κραδασμοί σε όλα τα διαγράμματα μειώνονται κατά πολύ εκτός της δύναμης ελέγχου που είναι αντιδιαμετρική της αρχικής δύναμης που ασκείται στην πλακά.

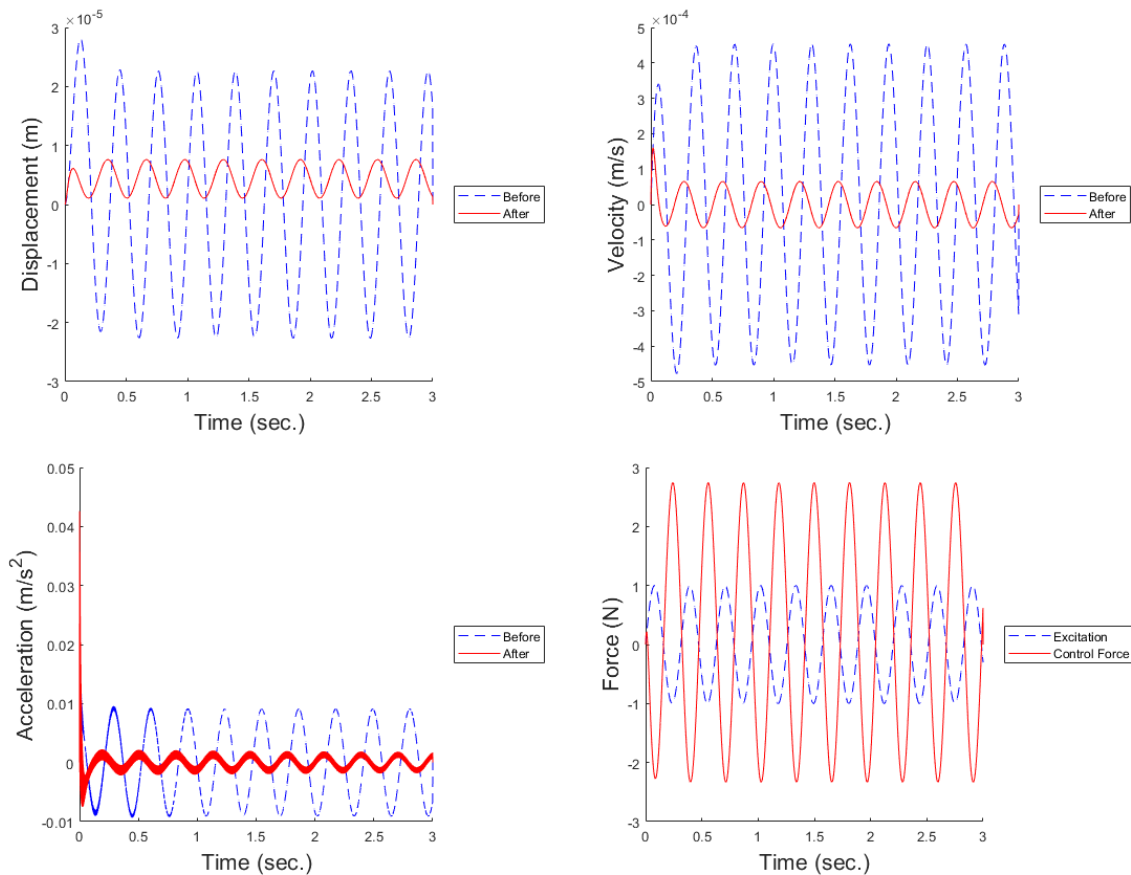
### 5.4.2 330-121 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non collocated)



Εικόνα 29 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων για περίπτωση μη συνεγκατεστημένου ελέγχου μεταξύ των κόμβων 330 και 121

Ο έλεγχος στο σημείο 330 για δύναμη που ασκείται στο σημείο 121 δεν είναι αποτελεσματικός αφού σε όλα τα διαγράμματα οι τιμές μετά τον έλεγχο λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές από ότι πριν.

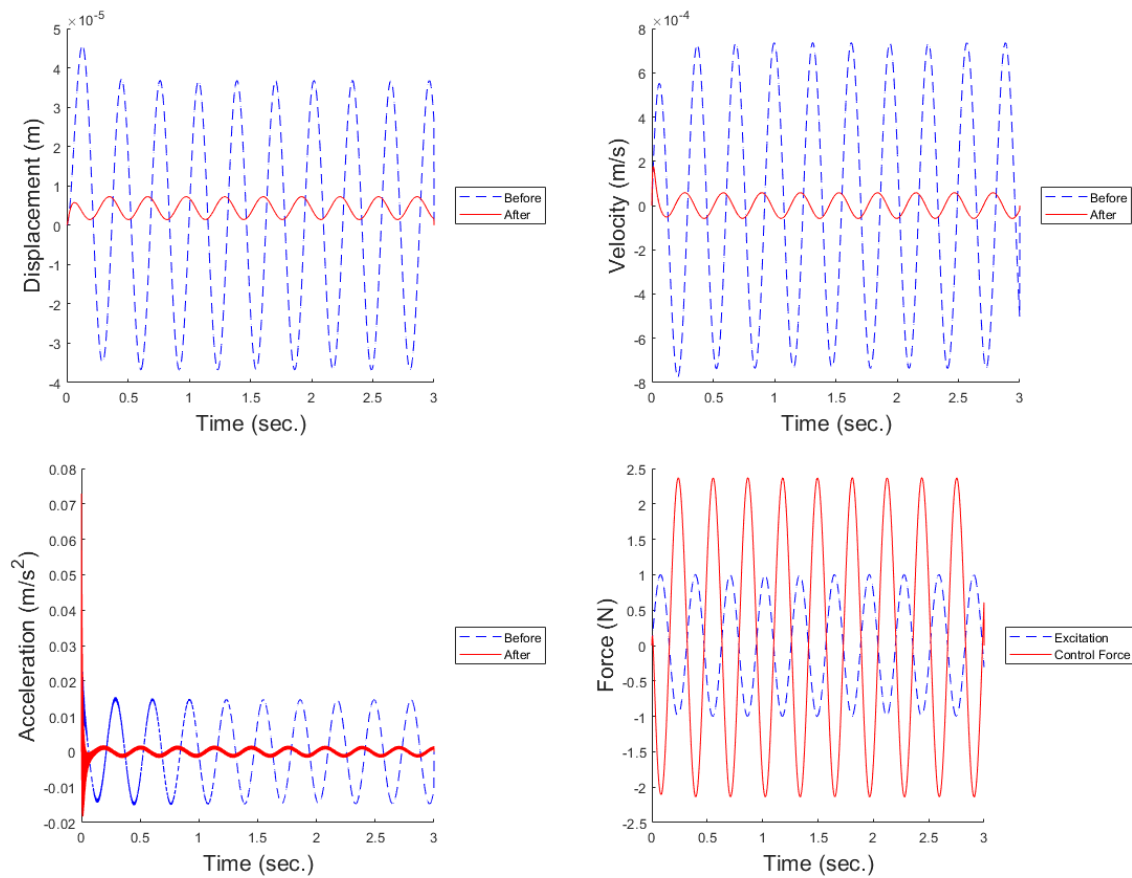
### 5.4.3 330-165 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)



Εικόνα 30 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων για μη συνεγκατεστημένο έλεγχο μεταξύ των κόμβων 330 και 165.

Ο έλεγχος στο σημείο 330 για δύναμη που ασκείται στον κόμβο 165 έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα αφού μειώνει τις τιμές της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης επιτυγχάνοντας την ελάττωση των δονήσεων .

#### 5.4.4 330-286 μη συνεγκατεστημένος έλεγχος (non-collocated)



Εικόνα 31 Διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης και δυνάμεων ελέγχου για μη συνεγκατεστημένο έλεγχο μεταξύ των κόμβων 330 με 286

Τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι πολύ καλά και πιο αποτελεσματικά ακόμα και από την προηγούμενη περίπτωση που είχαμε την δύναμη στον κόμβο 165. Η δύναμη ελέγχου είναι αντιδιαμετρική και το μέτρο της είναι κατά 250% μεγαλύτερο από την δύναμη που ασκούταν πριν.



## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, θα ταξινομήσουμε τα 35 αποτελέσματα του μη συνεγκατεστημένου ελέγχου που προέκυψαν ανάλογα με την αποτελεσματικότητά τους σε τρεις κατηγορίες όπως φαίνεται στον Πίνακα 3 παρακάτω.

ΑΝ=Ανεπαρκής έλεγχος

ΙΚ=Ικανοποιητικός έλεγχος

ΑΠ=Αποτελεσματικός έλεγχος

Τα αποτελέσματα του συνεγκατεστημένου ελέγχου δεν περιλαμβάνονται στον ακόλουθο πίνακα, δεδομένου ότι ήταν όλα ικανοποιητικά, όπως αναμενόταν.

Πίνακας 3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων μη συνεγκατεστημένου ελέγχου

Δύναμη Έλεγχος	22	121	165	231	286	330
11	ΑΝ	ΑΝ	ΑΝ	ΑΝ	ΑΝ	ΑΝ
110	ΑΝ	ΑΝ	ΙΚ	ΑΝ	ΑΠ	ΑΠ
154	ΑΝ	ΙΚ	ΑΠ	ΙΚ	ΑΝ	ΑΝ
220	ΑΝ	ΑΝ	ΙΚ	ΑΝ	ΑΠ	ΑΠ
275	ΑΝ	ΑΝ	ΑΝ	ΑΝ	ΑΝ	ΑΝ
330	ΑΝ	ΑΝ	ΙΚ	ΑΝ	ΑΠ	--

Από τους 35 συνολικά συνδυασμούς non-collocated ελέγχου που έγιναν υπήρξαν σημαντικές βελτιώσεις διαταραχών στις 11 από αυτές (38%), πάνω στην επιτάχυνση, την ταχύτητα και την μετατόπιση. Μάλιστα οι 6 από αυτές (20.5%) είχαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, με κάποια από αυτά να είναι τόσο αποτελεσματικά όσο με αυτά του συνεγκατεστημένου ελέγχου ή ακόμη και καλύτερα. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης για τη εκπαίδευση του ελεγκτή στον κόμβο 154 με άσκηση δύναμης στον κόμβο 165 ήταν καλύτερα από αυτά του συνεγκατεστημένου ελέγχου (154-154) κάτι που συμβαίνει πιθανώς επειδή πρόκειται για γειτονικούς κόμβους (βλ. Εικόνα 3) και στην ουσία ο έλεγχος είναι σχεδόν συνεγκατεστημένος. Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι παρά τις δυσκολίες που συναντά η μέθοδος του μη συνεγκατεστημένου ελέγχου, έναντι του συνεγκατεστημένου, καταφέραμε να ελέγξουμε σημαντικά ένα σύστημα στο οποίο η μέτρηση λαμβάνεται σε μια θέση και ο έλεγχος εφαρμόζεται σε μια διαφορετική θέση.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Boole George, (1854/2003). The Laws of Thought. Facsimile of 1854 edition, with an introduction by J. Corcoran. Buffalo: Prometheus Books (2003). Reviewed by James van Evra in Philosophy in Review 24 (2004): 167–169.

Han, J. H. & Lee, I., (1998). Analysis of composite plates with piezoelectric actuators for vibration control using layerwise displacement theory. Composites Part B, 29(5), pp. 621-632.

Jang, J.-S. R. & Sun, C.-T., (1995). Neuro-fuzzy modeling and control. Proceedings of the IEEE, 83(3), pp. 378-406.

Jang, J.-S. R., (1993). ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 23(3), pp. 665-685.

Tairidis, G. K., Foutsitzi, G. A., Koutsianitis, P., Drosopoulos, G. & Stavroulakis, G. E. (2015) Design and testing of fuzzy controllers on smart structures in the presence of delamination. Prague, Proceedings of the Fourth International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering

Tairidis G.K. (2016) Optimal design of smart structures with intelligent control, Ph.D. dissertation, Technical University of Crete, Chania,

Takagi, T. & Sugeno, M., (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 15(1), p. 116–132.

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

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Inform Control, Volume 8, pp. 338-353.

Ταϊρίδης Γεώργιος Κ., Προσομοίωση σύνθετων ευφυών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2009.

Καρύδης Πέτρος, Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Ηλεκτρονικό βιβλίο

Παπαδάκης Στυλιανός, Το νεύρο-ασαφές μοντέλο ANFIS: Πρόβλεψη τιμών συναλλάγματος με νεύρο-ασαφή συστήματα, διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2014

Παπαδάκης Στέλιος και Αδαμίδης Παναγιώτης Ασαφή Συστήματα: Θεωρία και Εργαστηριακές Ασκήσεις, ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Μάιος 2004

<https://www.geeksforgeeks.org/fuzzy-logic-introduction/>

<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-sugeno-type-fuzzy-inference.html>