

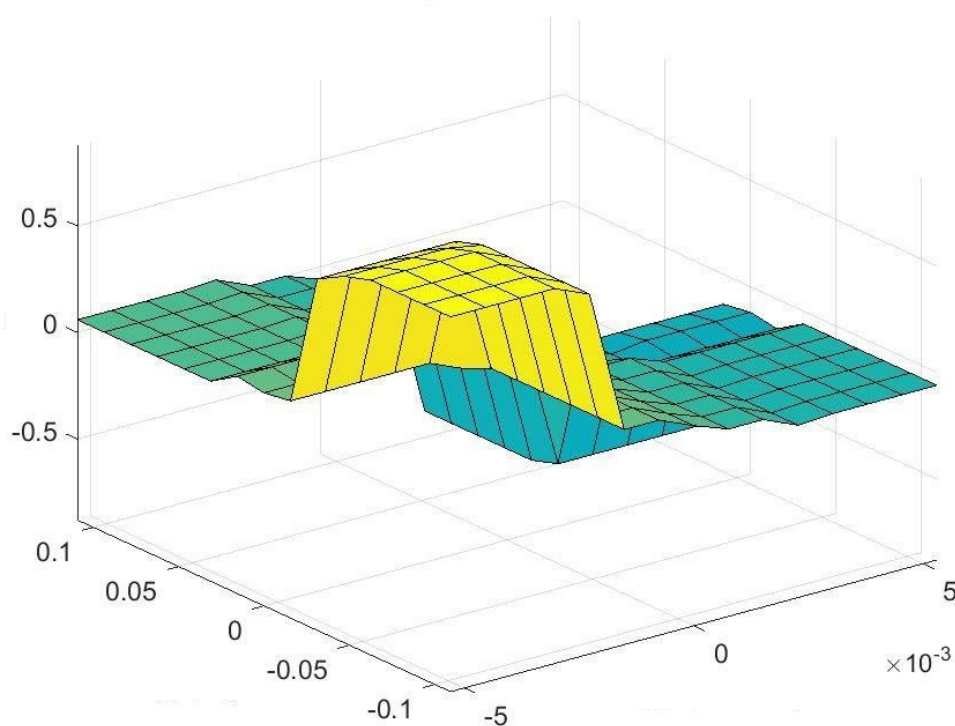


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής &
Βελτιστοποίησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ρύθμιση παραμέτρων ασαφούς ελέγχου σε ευφυείς
κατασκευές**



Επιμέλεια: Βαλσαμόπουλος Αθανάσιος

Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Χανιά, Φεβρουάριος 2017

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2. ΜΟΡΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ	4
2.4 Ασαφής έλεγχος και ασαφής λογική.....	7
2.5 Δομή Ασαφούς Ελεγκτή	8
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΗ	10
3.1 Μοντέλο σύνθετης πλάκας	10
3.2 Περιγραφή προβλήματος.....	12
3.3 Δομή ασαφούς ελεγκτή πλάκας.....	13
3.4 Αριθμητική ολοκλήρωση με χρήση μεθόδου Houbolt	17
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	19
4.1 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 33	21
4.1.1 Φόρτιση σε 4 σημεία (κόμβοι 7, 59, 111, 163)	21
4.1.2 Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)	24
4.1.3 Φόρτιση σε 7 σημεία (κόμβοι 7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)	27
4.2 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 59	30
4.2.1 Φόρτιση σε 4 σημεία (κόμβοι 7, 59, 111, 163)	30
4.2.2 Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)	33
4.2.3 Φόρτιση σε 7 σημεία (κόμβοι 7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)	36
4.3 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 85	39
4.3.1 Φόρτιση σε 4 σημεία (κόμβοι 7, 59, 111, 163)	39
4.3.2 Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)	42
4.3.3 Φόρτιση σε 7 σημεία (κόμβοι 7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)	45
4.4 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 137	48
4.4.1 Φόρτιση σε 4 σημεία (κόμβοι 7, 59, 111, 163)	48
4.4.2 Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)	51
4.4.3 Φόρτιση σε 7 σημεία (κόμβοι 7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)	54
5. Συμπεράσματα	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μελετώντας μία μηχανική κατασκευή θα παρατηρήσει κανείς ότι υπάρχουν ταλαντώσεις που προκαλούνται είτε λόγω εσωτερικών, είτε λόγω εξωτερικών δυνάμεων. Ο έλεγχος αυτών των ταλαντώσεων είναι κάτι στο οποίο οι μηχανικοί καλούνται να δώσουν λύση. Έτσι, στην διπλωματική αυτή εργασία, θα μελετήσουμε τον έλεγχο με εφαρμογή ασαφών τεχνικών ελέγχου.

Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή, θα χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο μίας διακριτοποιημένης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αφίπακτης πλάκας σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Μέσω ημιτονοειδών φορτίσεων θα δημιουργήσουμε ταλαντώσεις στην πλάκα τις οποίες έπειτα θα προσπαθήσουμε να εξομαλύνουμε κάνοντας διάφορες προσομοιώσεις στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab.

Για να το πετύχουμε αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε την επιστήμη της ασαφούς λογικής με βάση την οποία κατασκευάζεται ένας ασαφής ελεγκτής. Ο ελεγκτής αυτός έχει κατασκευαστεί από τον κ. Γεώργιο Ταϊρίδη στα πλαίσια της διπλωματικής του διατριβής [1] για τον έλεγχο ταλαντώσεων σε μηχανικό μοντέλο δοκού. Την μείωση των ταλαντώσεων πάνω στην υπό εξέταση πλάκα, την πετύχαμε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης και τροποποιώντας τις παραμέτρους του ελεγκτή

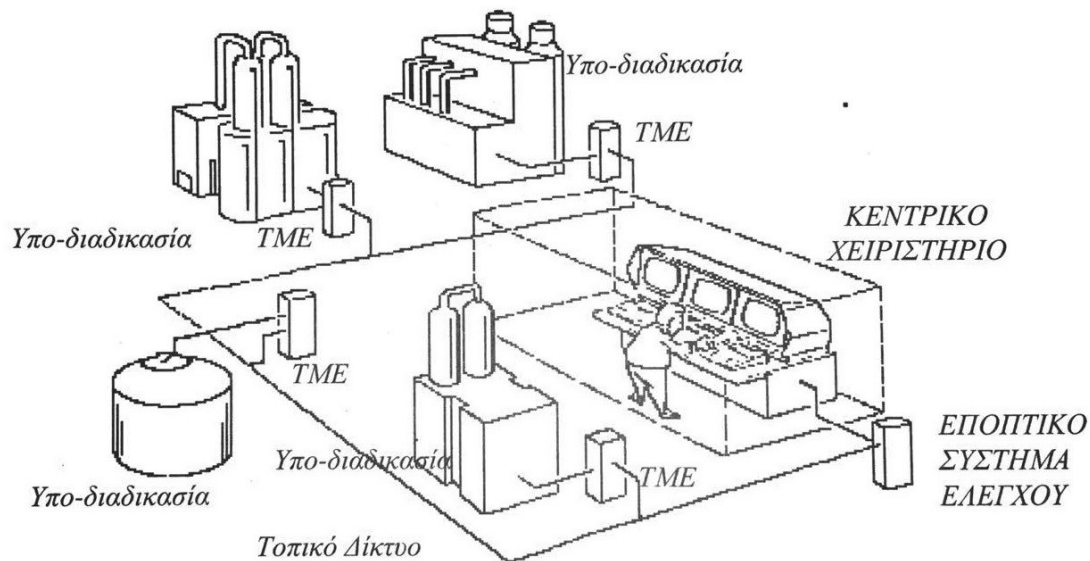
Η παρούσα εργασία έγινε υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του καθηγητή του τμήματος μηχανικών παραγωγής και διοίκησης του πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιου Σταυρουλάκη. Πολλές ευχαριστίες στον Δρ. Γεώργιο Ταϊρίδη που αφιέρωσε πολύ χρόνο για την καθοδήγηση του συγγραφέα.

2. ΜΟΡΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ

2.1 Συμβατικός Έλεγχος

Στον χώρο της βιομηχανίας, κάνοντας μία ιστορική αναδρομή, βλέπουμε ότι ο έλεγχος των βιομηχανικών διαδικασιών γινόταν κατά κανόνα χειροκίνητα, βασιζόμενος στη γνώση, την εμπειρία και την ευσυνειδησία των χειριστών της. Μέχρι και σήμερα, παρά την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την εξέλιξη του 'Αυτόματου Ελέγχου', ο έλεγχος των βιομηχανικών διαδικασιών δεν παύει να λαμβάνει υπόψιν την αξιοποίηση των τριών αυτών χαρακτηριστικών, στοχεύοντας τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας της παραγωγικής διαδικασίας αλλά και τη βέλτιστη ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος.

Η μακροσκοπική αυτή προσέγγιση ονομάζεται **Συμβατικός Κλασικός Έλεγχος (Classical Control)**, ένα είδος ελέγχου που πολλές φορές δημιουργεί δυσχέρειες στην εξαγωγή σωστού αποτελέσματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο **Εποπτικός Έλεγχος (DCS – Distributed Control System)** με **Τερματικές Μονάδες Ελέγχου (Remote Terminal Units – RTU)** και **Προγραμματισμένους Λογικούς Ελεγκτές (Programmable Logic Controllers – PLC)**, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.1.1 Δομή ενός Κατανεμημένου συστήματος ελέγχου

2.2 Μη Συμβατικός Έλεγχος (Πρακτικός Έλεγχος)

Στον Συμβατικό Έλεγχο προέκυπταν κάποια σφάλματα στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων, κάτι που οδήγησε στην ανάγκη ενίσχυσης αυτής της μορφής ελέγχου. Έτσι γεννήθηκε η έννοια του Μη Συμβατικού Ελέγχου, μία μορφή ελέγχου που έδωσε λύση σε προβλήματα του βιομηχανικού ελέγχου.

Παράλληλα, η τεχνολογική ανάπτυξη και η αύξηση της πολυπλοκότητας των συστημάτων ελέγχου, που δυσχέραιναν την εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς και η ανάγκη κατανόησης και αναπαραγωγής της ανθρώπινης ευφυΐας, οδήγησαν στη μελέτη πολλών ειδικοτήτων, όπως η νευρολογία, η ψυχολογία, η επιχειρησιακή έρευνα, η θεωρία συμβατικού ελέγχου, η βιομηχανική πληροφορική και οι επικοινωνίες. Ως αποτέλεσμα, αυτής της μελέτης, ήταν η γέννηση νέων εννοιών, όπως η **ασάφεια (fuzzy)**, ο **επαγωγικός συλλογισμός (inductive reasoning)**, ο **συνδεσμισμός (connectionism)** και η **παράλληλα κατανεμημένη εργασία (parallel distributed processing)** ορίζοντας ένα σύνολο που ασχολείται με ασαφείς και εμπειρικές καταστάσεις και ονομάστηκε **Εύκαμπτη Πληροφορική (soft computing)**.

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

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

Ένα σύστημα ονομάζεται ευφυές εφόσον έχει την ικανότητα, χωρίς αναφορά σε μικροσκοπικά πρότυπα της ελεγχόμενης διαδικασίας, να συμπεραίνει τη δράση ελέγχου από εμπειρικές υποδείξεις. Αυτή είναι και η διαφορά η οποία διαχωρίζει το μη-συμβατικό από το συμβατικό σύστημα.

Οι ευφυείς ελεγκτές χαρακτηρίζονται από τις εξής ιδιότητες:

- Ελέγχουν τον ίδιο χώρο κατάστασης
- Βασίζονται σε παράλληλα κατανεμημένους συνειρμικούς επεξεργαστές
- Εξασφαλίζουν γενίκευση
- Κωδικοποιούν και επεξεργάζονται ασαφή δεδομένα.

Συνήθως στη βιομηχανία, ο άνθρωπος-χειριστής είναι αυτός που κλείνει το βρόγχο μεταξύ των ελεγχόμενων μεταβλητών και των μεταβλητών ελέγχου. Με άλλα λόγια ο ανθρώπινος παράγοντας δεν εξαλείφεται θέτοντας ως στόχο τη συνεχή αύξηση της παραγωγικότητας αλλά και της ποσότητας με ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Συμπερασματικά, οι δράσεις ελέγχου του ανθρώπου-χειριστή είναι εμπειρικές, συχνά ακατανόητες, μη συστηματικές και υποκειμενικές. Ως αποτέλεσμα των

χαρακτηριστικών αυτών, οι δράσεις ελέγχου του ανθρώπου-χειριστή είναι επιρρεπείς σε σφάλματα, γεγονός που σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να γίνει και επικίνδυνο (Chernobyl).

2.3 Ευφυής Έλεγχος

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει συνεχής τεχνολογική ανάπτυξη, καθώς και συνεχής εξέλιξη της ανθρωπότητας, κάτι που συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις και πολύπλοκα προβλήματα στην επίτευξη σωστού ελέγχου των βιομηχανικών διαδικασιών. Λόγω λοιπόν των νέων αναγκών που δημιουργήθηκαν, αναπτύχθηκε μία νέα λογική, ο **ευφυής έλεγχος (intelligent control)** ο οποίος στοχεύει σε καλύτερα αποτελέσματα από τους προηγούμενους τύπους ελέγχου.

Μιλώντας για έναν ευφυή ελεγκτή, αναφερόμαστε σε ένα είδος ελεγκτή που έχει ως κυρίαρχο στόχο να λειτουργεί με τους ίδιους κανόνες του ανθρώπου-χειριστή χωρίς όμως τις ελλείψεις και τις αδυναμίες του. Ταυτόχρονα, λειτουργεί εξαλείφοντας χαρακτηριστικά του ανθρώπου-χειριστή που είναι συνυφασμένα με τις αντίξοες συνθήκες του εργασιακού περιβάλλοντος όπως την ασυνέπεια, την αναξιοπιστία αλλά και την παροδική κόπωση.

Οι βασικές αρχές ενός ευφυούς ελεγκτή είναι:

- **Ορθότητα (correctness)** : Η ικανότητα εκτέλεσης των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος με απόλυτη ασφάλεια.
- **Σθεναρότητα ή Ευρωσιτία (robustness)** : Η ικανότητα του συστήματος να παραμένει λειτουργικό κάτω από απρόβλεπτες και αντίξοες συνθήκες είτε αυτές είναι ενδογενείς ή εξωγενείς.
- **Επεκτασιμότητα (extendibility)** : Η δυνατότητα επέκτασης του υλικού και του λογισμικού χωρίς επανασχεδιασμό του συστήματος από την αρχή.
- **Επαναχρησιμοποίηση (reusability)** : Η ικανότητα χρησιμοποίησης των ίδιων υπολογιστικών υποσυστημάτων (ειδικά το λογισμικό) σε διαφορετικές αλλά παρόμοιες εφαρμογές.

Στον παρακάτω πίνακα διατάσσονται τα ευφυή συστήματα σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζονται την γνώση. Για τον έλεγχο των διαδικασιών, η επεξεργασία είναι πάντοτε αριθμητική, ενώ η γνώση μπορεί να είναι δομημένη ή μη. Οι μέθοδοι του ασαφούς και του νευρωνικού ελέγχου αποτελούν τον πυρήνα και εντάσσονται στην εξελισσόμενη περιοχή της Υπολογιστικής Νοημοσύνης [2] [3],[4].

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

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

Πίνακας 2.3.1 Κατάταξη των ευφυών συστημάτων στο χώρο της υπολογιστικής νοημοσύνης

2.4 Ασαφής έλεγχος και ασαφής λογική

Ο Lotfi A. Zadeh του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στο Berkeley των ΗΠΑ ήταν αυτός που εισήγαγε πρώτος την έννοια της ασαφούς λογικής στα μέσα της δεκαετίας του '60. Η βασική προϋπόθεση της ασαφούς λογικής είναι να θεωρήσουμε ότι ο περιβάλλον χώρος αποτελείται από στοιχεία που ανήκουν σε διάφορα σύνολα με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Η ασάφεια δημιουργεί μια πλειότιμη (αποτελούμενη από πολλές τιμές) έννοια στο χώρο της αβεβαιότητας (πχ. Αλήθεια, ψεύδος και ενδιάμεσες έννοιες). Πολλές φορές η θεωρία της Ασαφούς Λογικής μας βοηθάει στη δημιουργία μηχανισμών συμπερασμού ή συμπερασμάτων μέσω της χρησιμοποίησης της κωδικοποιημένης γνώσης και των τιμών των μεταβλητών της υπό έλεγχο διεργασίας. Η Ασαφής Λογική αποτελεί παράγωγο της κλασσικής λογικής Boolean . Εφαρμόζει τις γλωσσικές μεταβλητές πάνω σε μια συνεχή σειρά των τιμών αλήθειας που καθορίζονται μεταξύ του συμβατικού δυαδικού δηλ. [0, 1] και μπορεί συχνά να θεωρηθεί υποσύνολο της συμβατικής θεωρίας. Είναι κατάλληλη για τον έλεγχο μη γραμμικών συστημάτων καθώς είναι ικανή να χειριστεί τις κατά προσέγγιση πληροφορίες με έναν συστηματικό τρόπο. Τέλος επιλέγεται η χρήση της κατά την μοντελοποίηση πολυσύνθετων συστημάτων όπου υπάρχει ένα ανακριβές πρότυπο.

Οι λόγοι που καταστούν συμφέρουσα την χρησιμοποίηση της Ασαφούς λογικής στο σχεδιασμό ελεγκτών είναι οι εξής [5]:

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

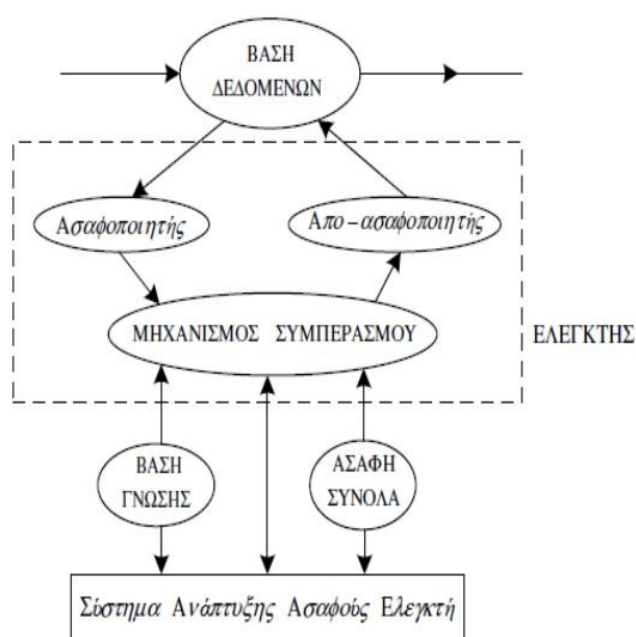
2.5 Δομή Ασαφούς Ελεγκτή

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

ΑΝ (κατάσταση της φυσικής διαδικασίας)

ΤΟΤΕ (δράση ελέγχου της διαδικασίας)

και υλοποιούνται ως λογικές συνεπαγωγές χρησιμοποιώντας τη θεωρία των ασαφών συνόλων



Εικόνα 2.5.1 Απαραίτητα δομικά στοιχεία ενός ελεγκτή

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

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

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΗ

3.1 Μοντέλο σύνθετης πλάκας

Η προσομοίωση και όλες οι μετρήσεις σε αυτή την εργασία γίνονται σε ένα μοντέλο τετραγωνικής αμφίπακτης πλάκας διαστάσεων 0.8m x 0.8m και υλικών με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά [12]:

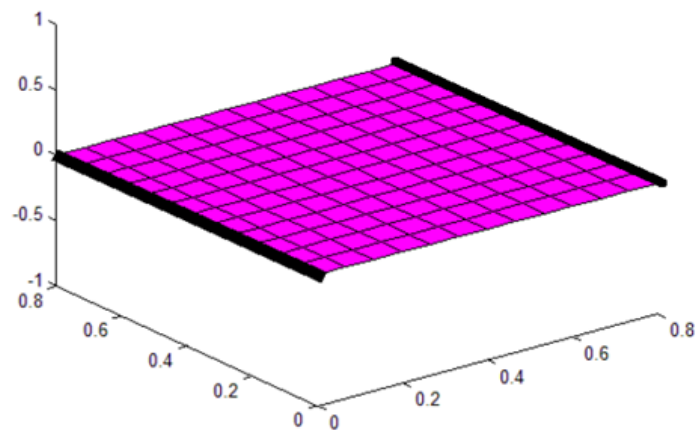
Ιδιότητα υλικού	Ελαστικό υλικό (T300/976 graphite-epoxy composite)	Πιεζοηλεκτρικό G1195N PZT
E_1 (GPa)	150	63
$E_2 = E_3$ (GPa)	9.0	63
G_{12} (GPa)	7.1	24.2
$G_{23} = G_{13}$ (GPa)	2.5	24.2
$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	0.3	0.3
ρ (kg/m ³)	1600	7600
$d_{13} = d_{23}$ (m/V)	-	$254 \cdot 10^{-12}$
$d_{42} = d_{51}$ (m/V)	-	$584 \cdot 10^{-12}$
Ply thickness (mm)	0.25	0.1

Πίνακας 3.1.1 Ιδιότητες υλικών

Σε αυτό το μοντέλο έχουν προστεθεί πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία στοχεύουν στη δημιουργία δυνάμεων για τον περιορισμό των ταλαντώσεων της πλάκας τις οποίες δημιουργούμε με ημιτονοειδείς φορτίσεις. Για τη διακριτοποίηση της πλάκας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα ο φορέας διαιρέθηκε σε 144 τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, οδηγώντας σε ένα σύστημα 169 κόμβων με 5 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Οι βαθμοί ελευθερίας αποτελούν τις συντεταγμένες κάθε στοιχείου, ώστε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τη θέση κάθε κόμβου στο χώρο. Από αυτούς, οι τρεις πρώτοι αντιστοιχούν στις μετατοπίσεις του κόμβου στις τρεις διαστάσεις του χώρου x, y και z αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιποι δύο, στις στροφές ως προς τους άξονες x και y. Για την εφαρμογή του ελέγχου θα μας απασχολήσει μόνο ο τρίτος από τους πέντε βαθμούς ελευθερίας κάθε κόμβου δηλαδή η μετατόπιση στον άξονα z. Η πλάκα είναι πακτωμένη στις δύο από τις τέσσερις πλευρές της. Πιο συγκεκριμένα, 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, και 13, 26, 39, 52, 65, 78, 91, 104, 117, 130, 143, 156, και 169 όπου είναι οι κόμβοι της άλλης μεριάς της πλάκας. Η πλάκα με τη στήριξη της φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Οι παχιές μαύρες γραμμές προσδιορίζουν τα σημεία των πακτώσεων.

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



Εικόνα 3.1.1 Αμφίπακτη πλάκα

Η διαφορική εξίσωση κίνησης του συστήματος, με την οποία περιγράφεται η δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου της αμφίπακτης πλάκας είναι:

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

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

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

όπως επίσης,

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

και

P , Z είναι οι εξωτερικές δυνάμεις και οι δυνάμεις ελέγχου

3.2 Περιγραφή προβλήματος

Το υπάρχον πρόβλημα, όπως έχουμε και εισαγωγικά αναφέρει, είναι η ρύθμιση των παραμέτρων του ευφυούς ελέγχου στο μοντέλο της αμφίπακτης πλάκας. Για να το πετύχουμε αυτό, αρκεί να μεταβάλλουμε παραμέτρους όπως η επιβολή των εξωτερικών φορτίσεων, η θέση του ελεγκτή και οι παράμετροι του ελέγχου, όπως λ.χ. η μέθοδος αποασαφοποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε. Στην παρούσα εργασία θα πειραματιστούμε και με τα τρία αυτά γεγονότα εξετάζοντας τις διαφορές που προκύπτουν αλλάζοντας τα σημεία εφαρμογής τους. Λόγω της διακριτοποίησης του μοντέλου μας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι εφικτό να επιλέξουμε ακριβώς το σημείο το οποίο θέλουμε να ασκήσουμε κάποιο είδος δύναμης όπως και ελέγχου.

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

$$P = p_0 * \sin(\omega t) \quad (3.2.1)$$

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

Για τη συχνότητα ορίζουμε την τιμή $\omega=20$ για την οποία έχει δειχθεί από παλιότερες εργασίες ότι ο έλεγχος λειτουργεί ικανοποιητικά [1], [7].

Επομένως η σχέση (3.2.1) μπορεί να γραφτεί :

$$P = \frac{1}{n} \sin(20t) \quad (3.2.2)$$

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

Όσον αφορά το δεύτερο γεγονός, τον έλεγχο των ταλαντώσεων, χρησιμοποιούμε τον ασαφή ελεγκτή για τον οποίο θα μιλήσουμε εκτενέστερα παρακάτω,

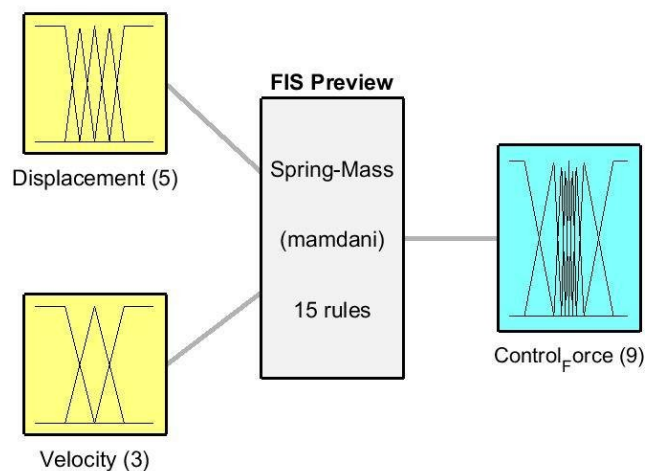
τοποθετώντας τον σε κατάλληλα σημεία πάνω στην πλάκα τα οποία επιλέγουμε πειραματιζόμενοι.

Τέλος, σχετικά με την μέθοδο αποασαφοποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε, έχουμε δύο πιθανά σενάρια, την μέθοδο **Κέντρου Βάρους (Center of area – centroid)** και την μέθοδο **Αποασαφοποίησης μέσου των μεγίστων (Middle of maxima – MOM)**.

Ο αλγόριθμος ο οποίος μας βοηθάει να κάνουμε τις διερευνήσεις για το τελικό αποτέλεσμα, συνδυάζει τη μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης Houbolt με έναν ασαφή ελεγκτή τύπου Mamdani και έχει δημιουργηθεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab[1]. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος δουλεύει λαμβάνοντας μια τιμή για τη δύναμη ελέγχου από τον ελεγκτή, για κάθε βήμα αριθμητικής ολοκλήρωσης. Από την έξοδο αυτή προκύπτουν οι τιμές της μετατόπισης και της ταχύτητας για το επόμενο βήμα, μέχρι την τελική εξάλειψη της ταλάντωσης όπου πετυχαίνουμε το σκοπό μας και είμαστε σε θέση να εξετάσουμε την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

3.3 Δομή ασαφούς ελεγκτή πλάκας

Στις προσομοιώσεις που θα κάνουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιήσουμε έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής ο οποίος πληροί όλες τις προϋποθέσεις ενός ασαφούς ελεγκτή όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο και δημιουργήθηκε από τον κ. Γεώργιο Ταϊρίδη στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής του διατριβής, με σκοπό τον περιορισμό των ταλαντώσεων μιας προβόλου δοκού [1],[10],[11]. Για την εξυπηρέτηση του σκοπού μας έχουμε κάνει τις ανάλογες προγραμματιστικές αλλαγές ώστε να προσαρμόσουμε τον ελεγκτή στο μοντέλο της πλάκας. Οι ελεγκτές με παρόμοια λειτουργία ονομάζονται ελεγκτές τύπου **Mamdani** με τον συγκεκριμένο να είναι MISO (multiple inputs, single output). Για τη δημιουργία του έγινε χρήση του πακέτου Fuzzy toolbox της Matlab.



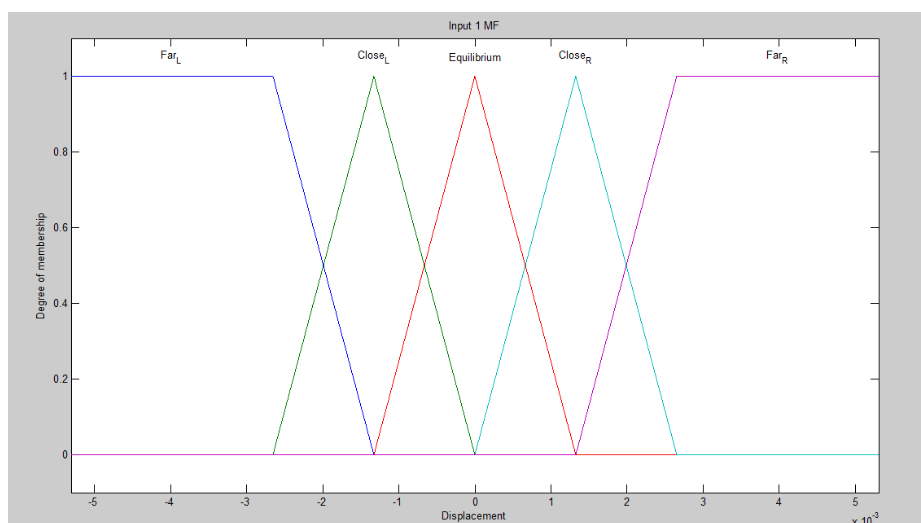
System Spring-Mass: 2 inputs, 1 outputs, 15 rules

Εικόνα 3.3.1 Ασαφής Ελεγκτής

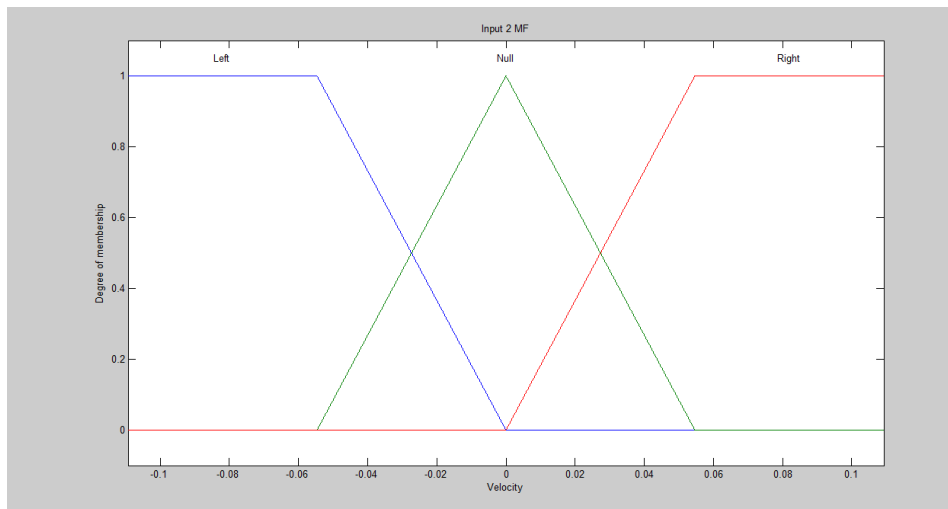
Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, δέχεται δύο εισόδους και χρησιμοποιώντας κατάλληλους κανόνες παράγει μία έξοδο.

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

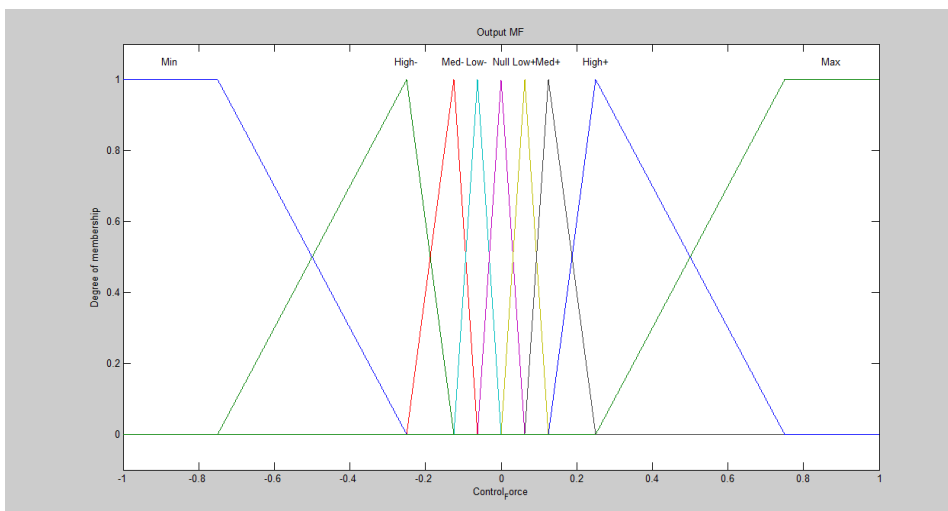
Στις επόμενες τρεις εικόνες βλέπουμε τα διαγράμματα των συναρτήσεων συμμετοχής που προκύπτουν ενεργοποιώντας τον αλγόριθμο του ελεγκτή, τα οποία απεικονίζουν τη μετατόπιση, την ταχύτητα και τη δύναμη ελέγχου αντίστοιχα.



Εικόνα 3.3.2 Συναρτήσεις συμμετοχής για τη μετατόπιση



Εικόνα 3.3.3 Συναρτήσεις συμμετοχής για την ταχύτητα



Εικόνα 3.3.4 Συναρτήσεις συμμετοχής για τη δύναμη ελέγχου

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

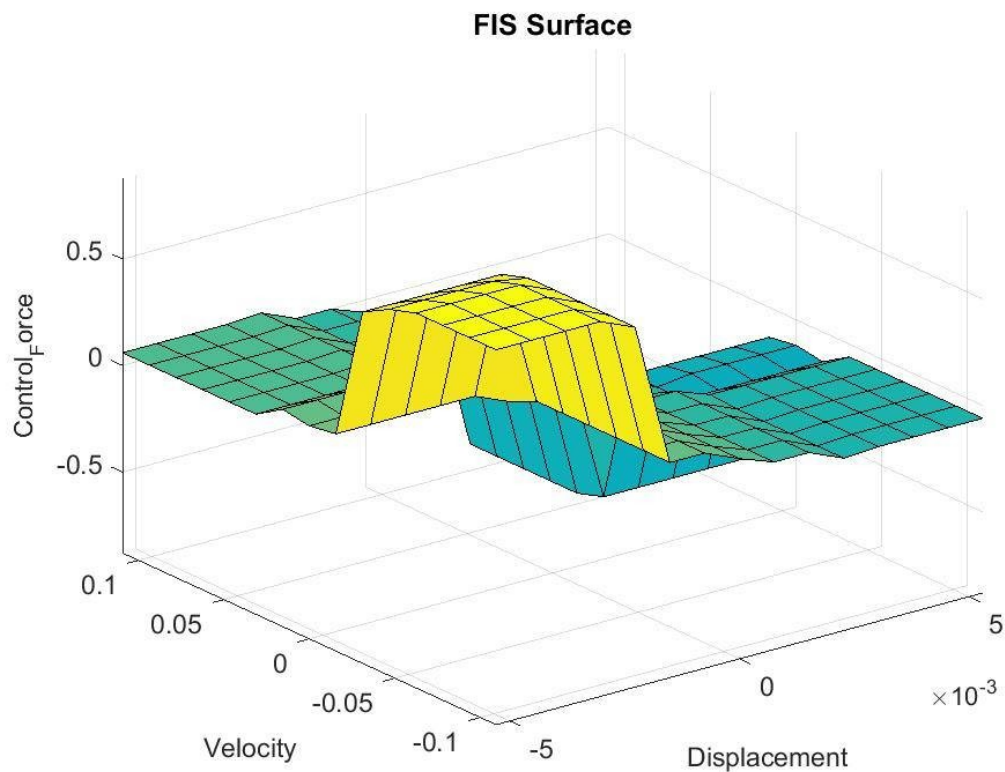
- a. **Av** (Η Μετατόπιση είναι πολύ κάτω) **ΚΑΙ** (Η Ταχύτητα είναι προς τα κάτω) **TOTE** (Η Δύναμη Ελέγχου είναι Μέγιστη – [Max])
- b. **Av** (Η Μετατόπιση είναι ισορροπημένη) **ΚΑΙ** (Η Ταχύτητα είναι προς τα κάτω) **TOTE** (Η Δύναμη Ελέγχου είναι Χαμηλή – [Low+])
- c. **Av** (Η Μετατόπιση είναι λίγο επάνω) **ΚΑΙ** (Η Ταχύτητα είναι προς τα κάτω) **TOTE** (Η Δύναμη Ελέγχου είναι Μηδενική – [Null])

Στον πίνακα 3.3.1 παρουσιάζεται μία σύνοψη του συνόλου των 15 κανόνων.

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

Πίνακας 3.3.1

Για τον προσδιορισμό της δύναμης ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν 2 μέθοδοι, η μέθοδος του μέσου μεγίστου (**Middle of maxima – MOM**) και η μέθοδος **Κέντρου Βάρους (Center of area – CENTROID)**. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποασαφοποίηση της εξόδου. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η τρισδιάστατη επιφάνεια του ασαφούς συστήματος, δηλαδή ο συσχετισμός των μετατοπίσεων και των ταχυτήτων με τη δύναμη ελέγχου.



Εικόνα 3.3.5 Επιφάνεια ασαφούς συστήματος

3.4 Αριθμητική ολοκλήρωση με χρήση μεθόδου Houbolt

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

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

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

Ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης είναι:

$$t = 3sec$$

με βήμα ολοκλήρωσης:

$$dt=0,001sec$$

Η τιμή του βήματος επιλέχθηκε ύστερα από κατάλληλες δοκιμές.

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

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

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

Αλγόριθμος Houbolt

Βήμα 1: Αρχικοποίηση μεταβλητών

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

Βήμα 2: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας (F^*): $K^*=K + c_1M + c_4\Lambda$

Αντιστροφή του (K^*) : $F^* = (K^*)^T$

Έναρξη βρόχου for από $t0$ έως tf

Βήμα 3: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας (P^*)

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

Υπολογισμός μεταβολής δύναμης ελέγχου u

Προσθήκη στην ποσότητα dF_m , $dF_m = dF_m + u$

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

Βήμα 4: Υπολογισμός του βήματος απόκρισης dX

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

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

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

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

Υπολογισμός μετατόπισης: $X(t+1) = X(t) + dX$

Τερματισμός του βρόχου for

Τέλος

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που πήραμε για κάθε διαφορετικό συνδυασμό μεθόδου αποασαφοποίησης, θέσης ελεγκτή και θέσης εφαρμογής φόρτισης. Για κάθε συνδυασμό το πρόγραμμα μας έδωσε τιμές και διαγράμματα για την ταχύτητα, την μετατόπιση την επιτάχυνση και την δύναμη ελέγχου που ασκείται στην πλάκα. Στοχεύοντας στον περιορισμό των ταλαντώσεων της αμφίπακτης πλάκας, ελπίζουμε αρχικά σε ομαλή μείωση της μετατόπισης. Προφανώς, λόγω της μείωσης της μετατόπισης, αναμένεται και μείωση της ταχύτητας. Αντιθέτως, η δύναμη ελέγχου αναμένουμε να είναι αρκετή αλλά και μη ομαλή, ώστε να έχουμε επιθυμητό αποτέλεσμα, γεγονός που θα επηρεάσει και την ομαλότητα της επιτάχυνσης.

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε αποτελέσματα μεταβάλλοντας τα ακόλουθα δεδομένα.

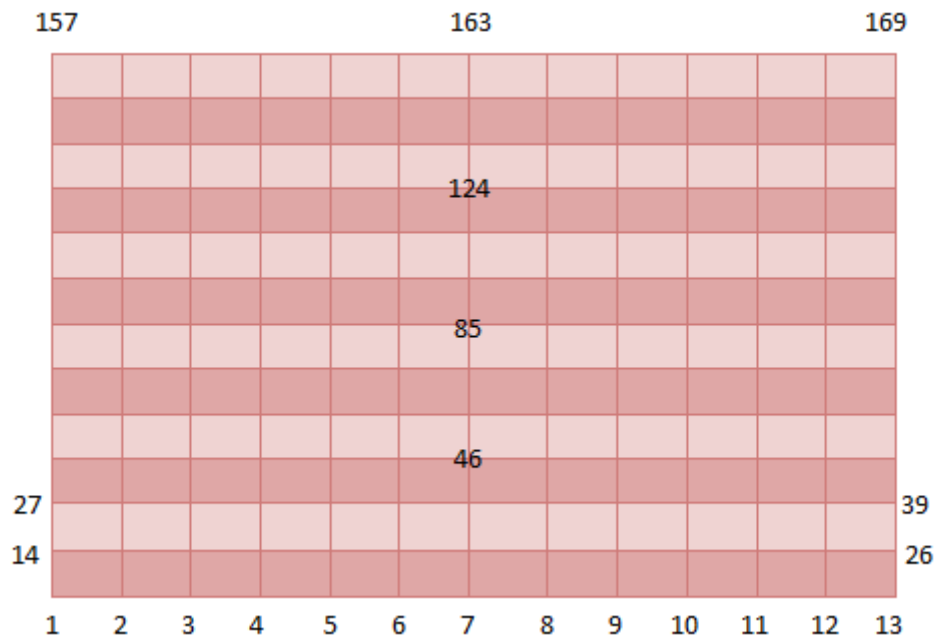
1. Τη θέση του ελεγκτή, δηλαδή τον κόμβο με βάση τον οποίο παίρνουμε τις ακόλουθες μετρήσεις.
2. Τις φορτίσεις οι οποίες ασκούνται στην πλάκα. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να είναι φορτίσεις τεσσάρων, πέντε ή επτά σημείων.
3. Την μέθοδο αποασαφοποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε.

Η αρίθμηση των στοιχείων παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα της εικόνας 4.1 ο οποίος παρουσιάζεται ως κάτοψη της εξεταζόμενης πλάκας:

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

Εικόνα 4.1 Αρίθμηση στοιχείων

Στη συνέχεια, βλέποντας πάλι την κάτοψη της εξεταζόμενης πλάκας, βλέπουμε την αρίθμηση των κόμβων στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Αρίθμηση κόμβων

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

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

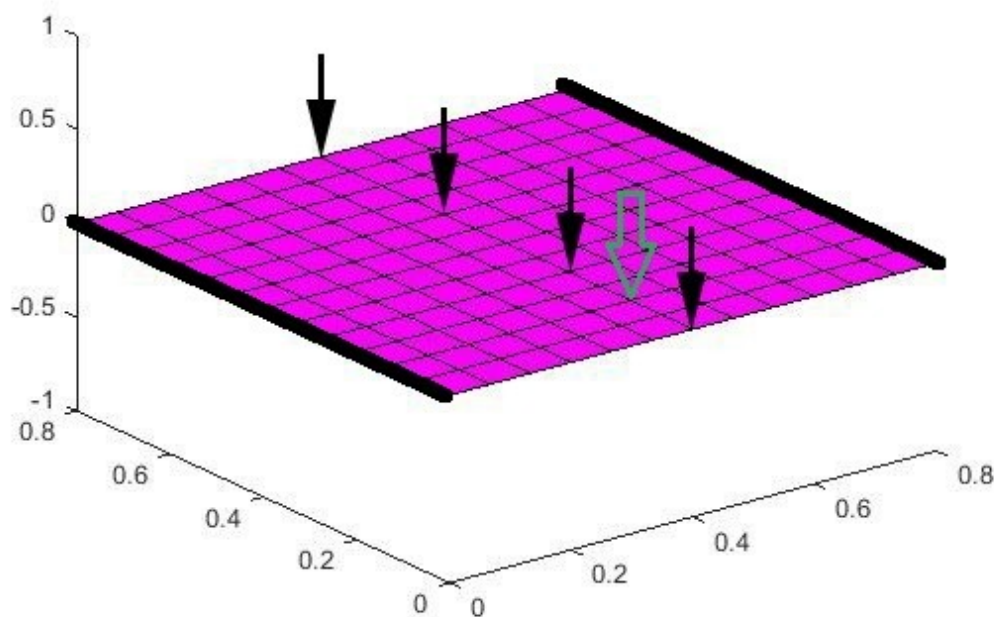
Όπου n , ο αριθμός των φορτίσεων που θέλουμε να ασκήσουμε.

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

Στις ακόλουθες δοκιμές, οι φορτίσεις θα είναι τεσσάρων, πέντε ή επτά σημείων όπως προαναφέραμε.

4.1 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 33

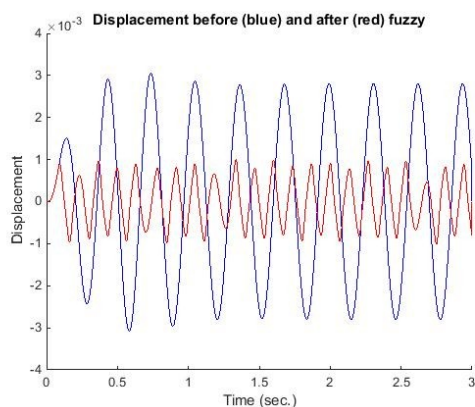
4.1.1 Φόρτιση σε 4 σημεία (κόμβοι 7, 59, 111, 163)



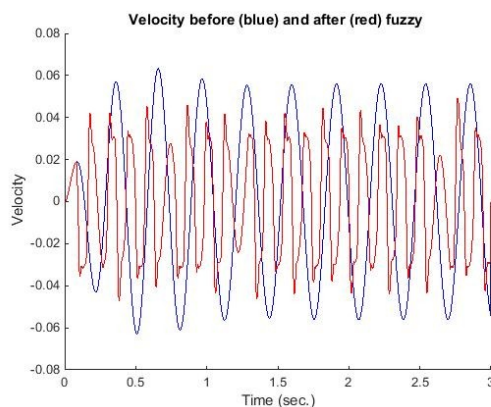
Εικόνα 4.1.1.1 Φόρτιση 4 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 33(πράσινο)

Με τη χρήση του αλγορίθμου ολοκλήρωσης τον οποίο περιγράψαμε στο 4^ο κεφάλαιο, προκύπτουν τα γραφήματα ανάλογα με την μέθοδο αποασαφοποίησης:

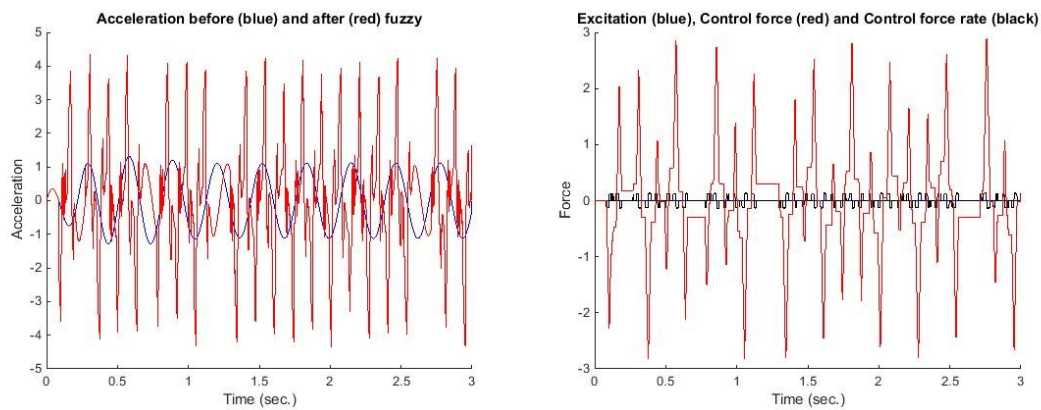
Μέθοδος MOM



α



β



γ

δ

Εικόνα 4.1.1.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

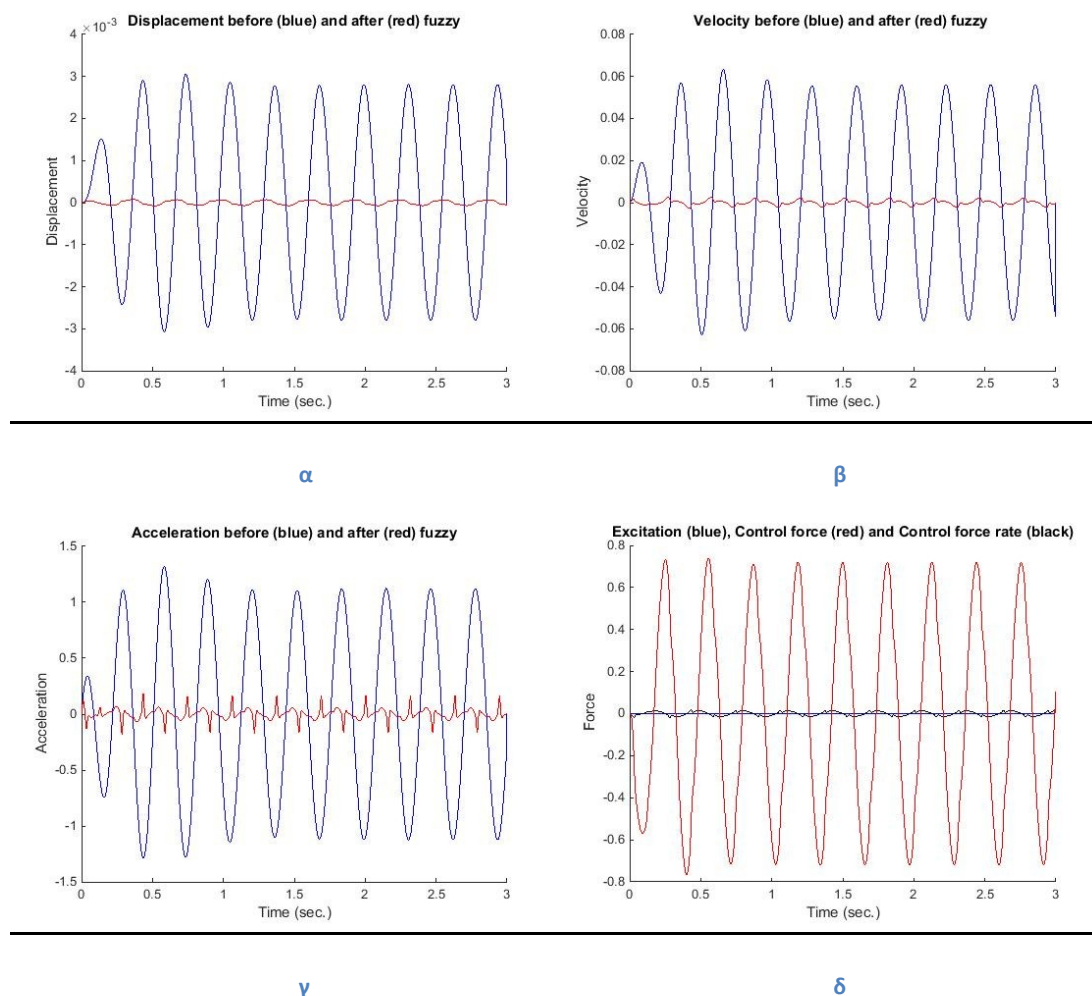
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0061	0.1261	2.6061
Με έλεγχο	0.0020	0.0964	8.6859
Μεταβολή (%)	-67.2014	-23.5989	233.2968

Πίνακας 4.1.1.1

Στην περίπτωση φόρτισης σε 4 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 33 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.1.1.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 67,20%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 23,56%
- Η επιτάχυνση σχεδόν τριπλασιάστηκε (αύξηση 233,3%)

Μέθοδος CENTROID



Εικόνα 4.1.1.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0061	0.1261	2.6061
Με έλεγχο	1.5020e-04	0.0052	0.3710
Μεταβολή (%)	-97.5506	-95.8797	-85.7635

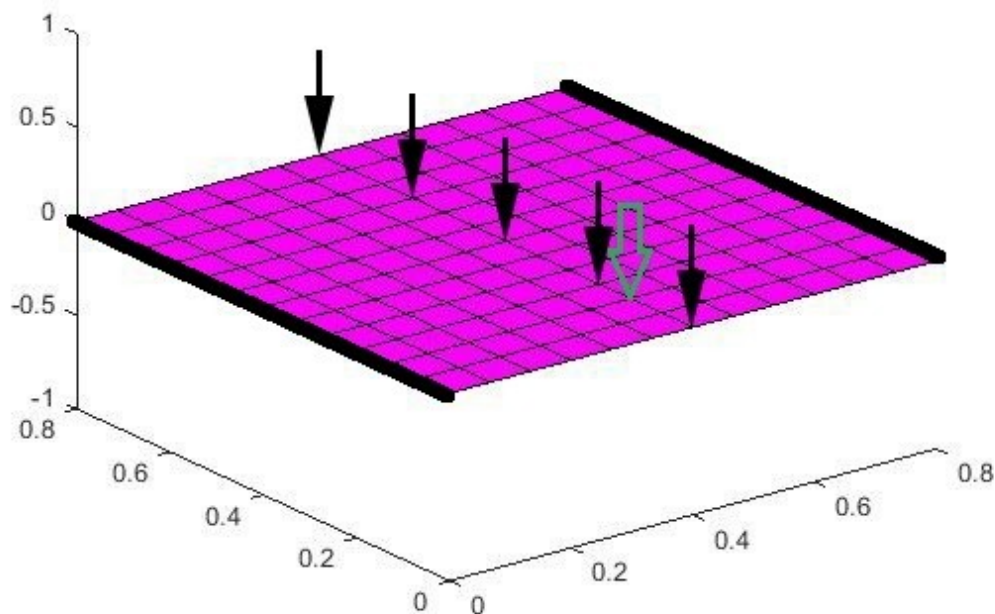
Πίνακας 4.1.1.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 4 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 33 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.1.1.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97,55%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 95,88%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85,76%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου σχεδόν τριπλασιάστηκε.

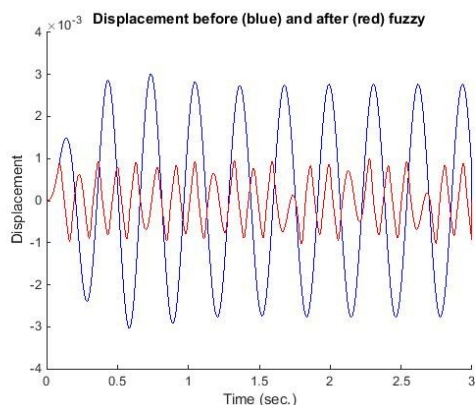
4.1.2 Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)



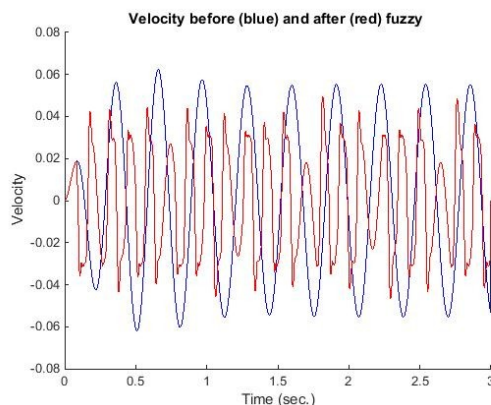
Εικόνα 4.1.2.1 Φόρτιση 5 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 33(πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

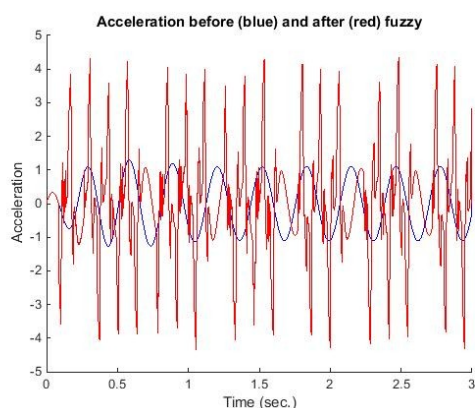
Μέθοδος MOM



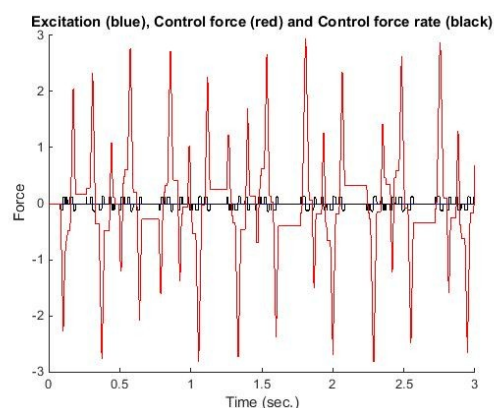
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.1.2.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

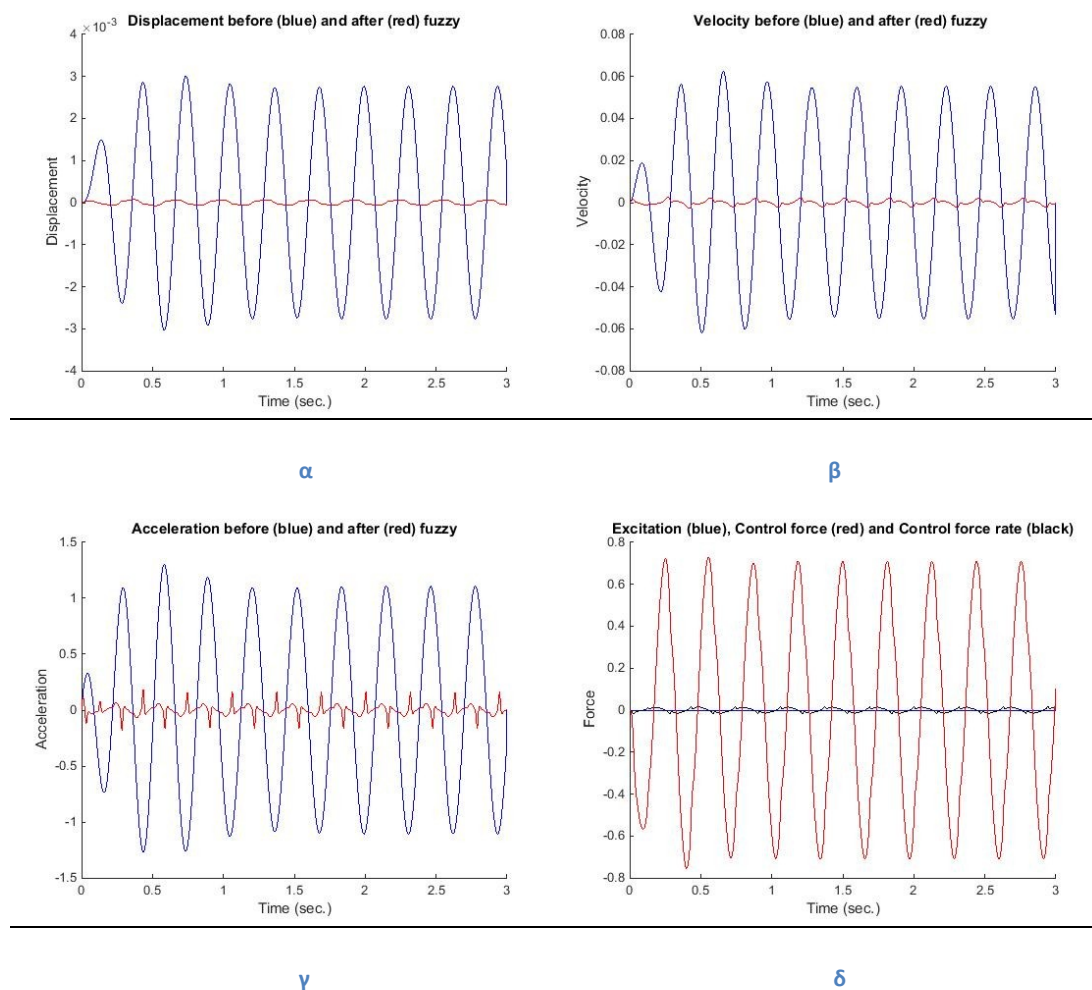
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0060	0.1243	2.5694
Με έλεγχο	0.0020	0.0960	8.6827
Μεταβολή (%)	-66.7348	-22.7612	237.9296

Πίνακας 4.1.2.1

Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 33 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.1.2.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 66,73%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 22,76%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 237,93%

Μέθοδος CENTROID



Εικόνα 4.1.2.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0060	0.1243	2.5694
Με έλεγχο	1.4593e-04	0.0050	0.3647
Μεταβολή (%)	-97.5865	-95.9411	-85.8045

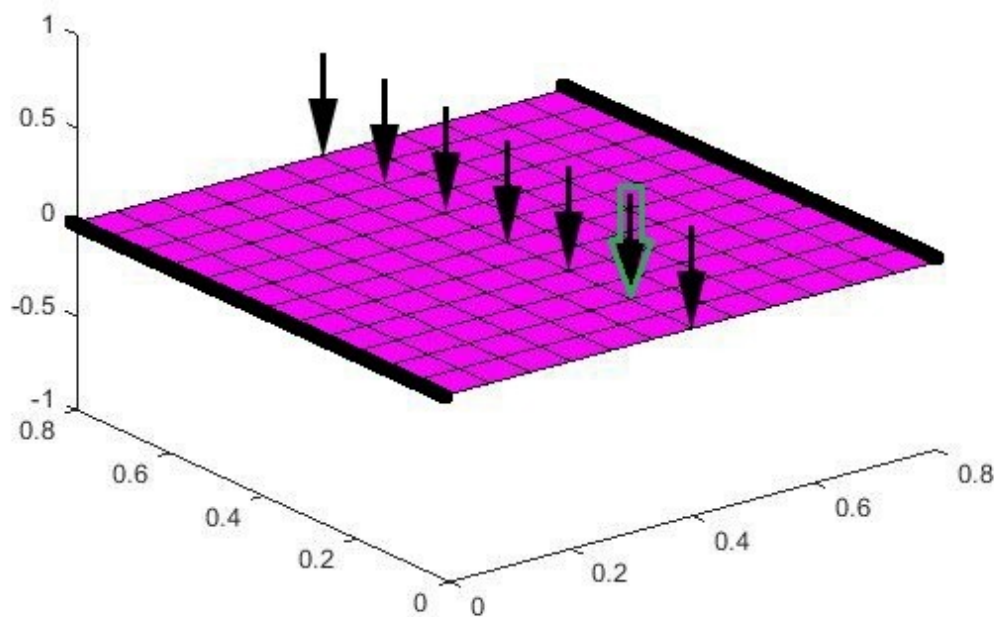
Πίνακας 4.1.2.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 33 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.1.2.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97,59%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 95,94%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85,80%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου σχεδόν τριπλασιάστηκε.

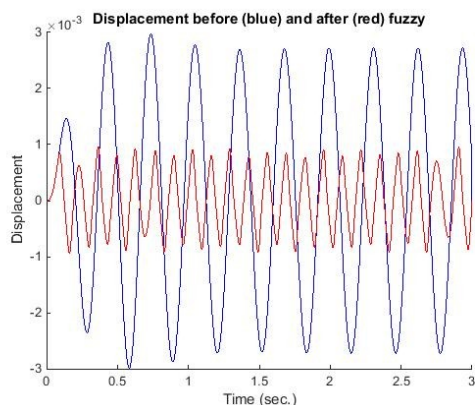
4.1.3 Φόρτιση σε 7 σημεία (κόμβοι 7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)



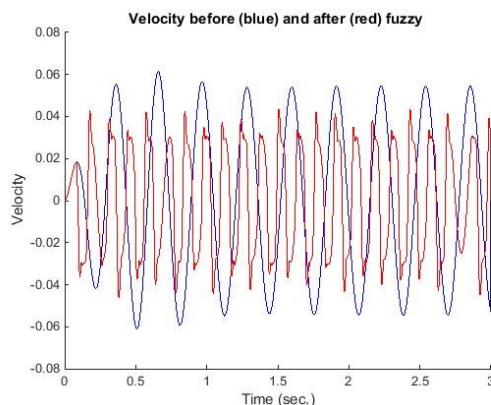
Εικόνα 4.1.3.1 Φόρτιση 7 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 33(πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

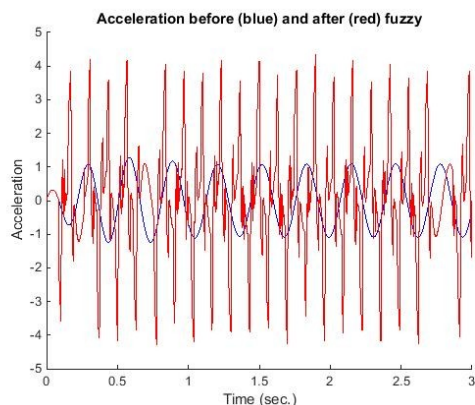
Μέθοδος MOM



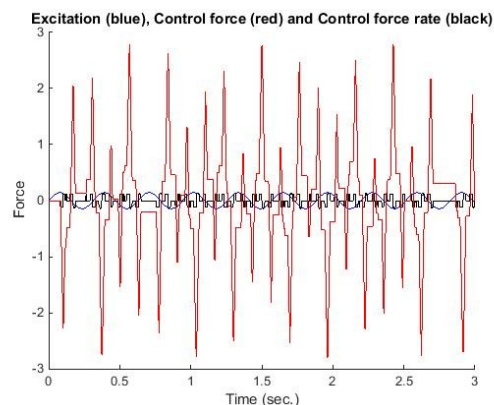
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.1.3.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

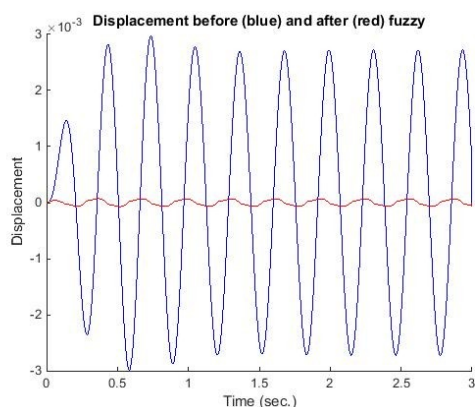
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0060	0.1224	2.5299
Με έλεγχο	0.0019	0.0897	8.6096
Μεταβολή (%)	-68.0292	-26.7367	240.3207

Πίνακας 4.1.3.1

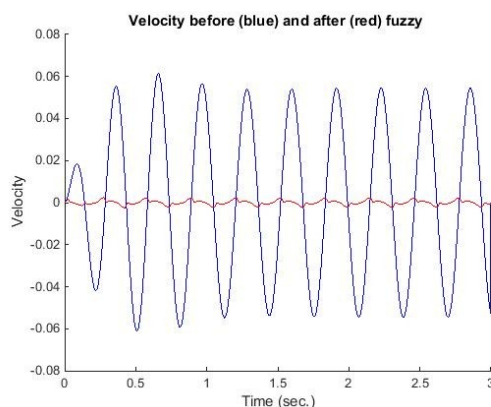
Στην περίπτωση φόρτισης σε 7 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 33 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.1.3.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 68,03%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 26,74%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 240,32%

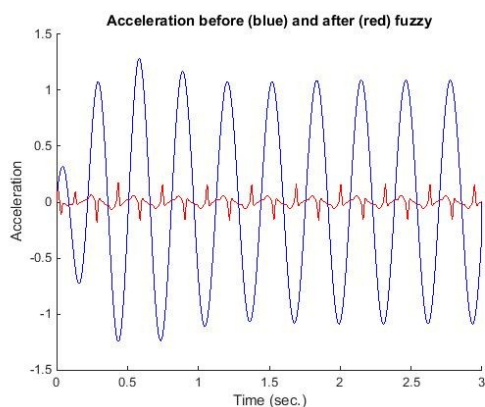
Μέθοδος CENTROID



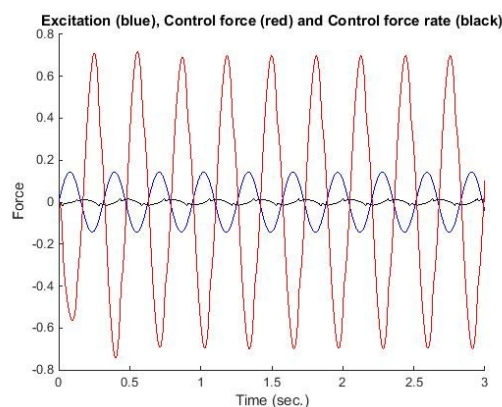
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.1.3.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0060	0.1224	2.5299
Με έλεγχο	1.4135e-04	0.0049	0.3572
Μεταβολή (%)	-97.6254	-96.0068	-85.8817

Πίνακας 4.1.3.2

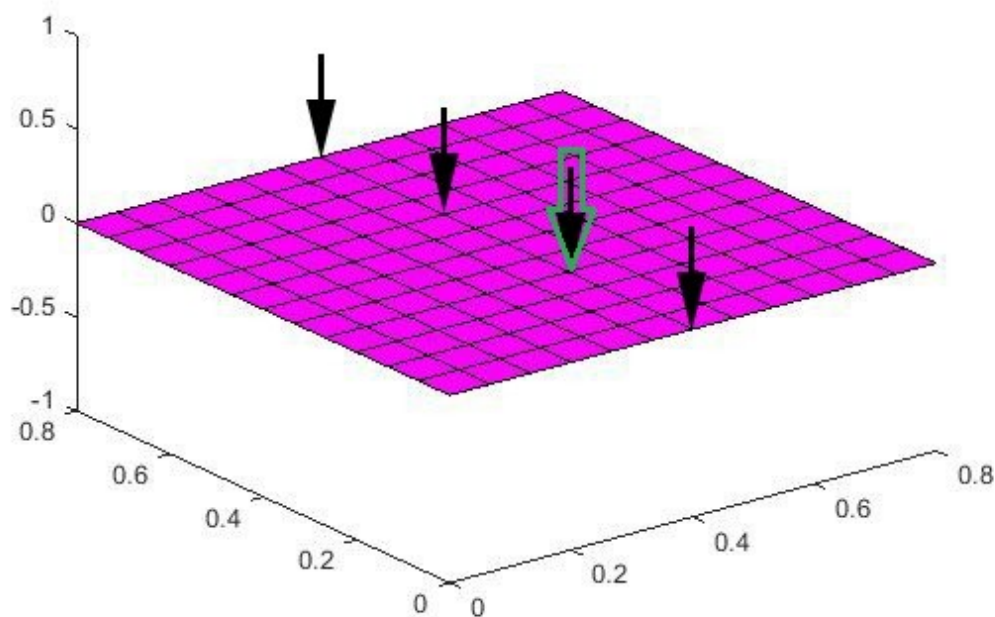
Στην περίπτωση φόρτισης σε 7 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 33 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.1.3.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97,63%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 96,01%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85,88%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου σχεδόν τριπλασιάστηκε.

4.2 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 59

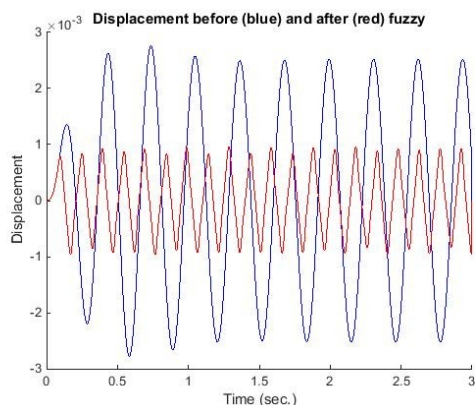
4.2.1 Φόρτιση σε 4 σημεία (κόμβοι 7, 59, 111, 163)



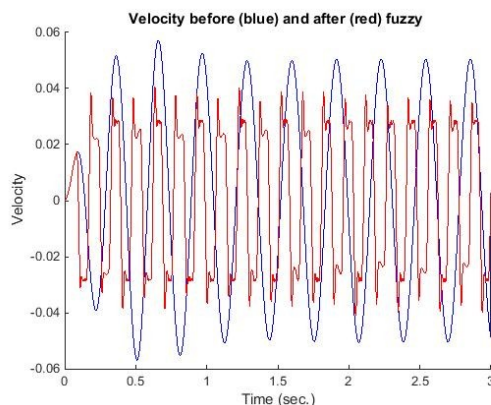
Εικόνα 4.2.1.1 Φόρτιση 4 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 59(πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

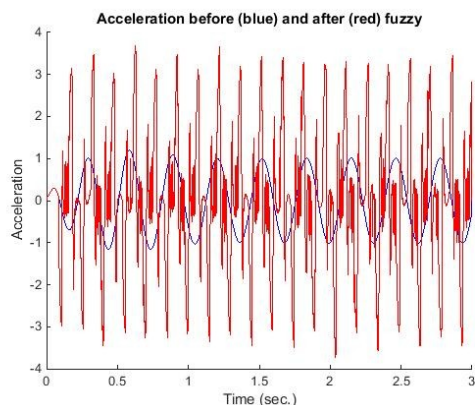
Μέθοδος MOM



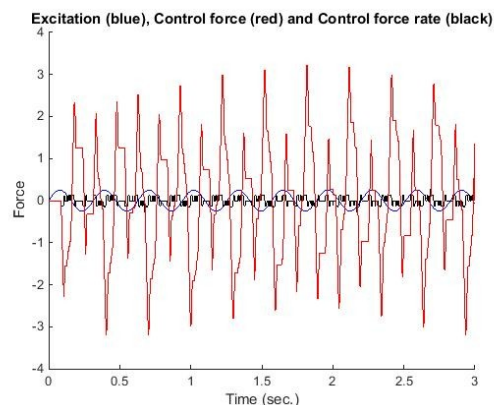
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.2.1.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

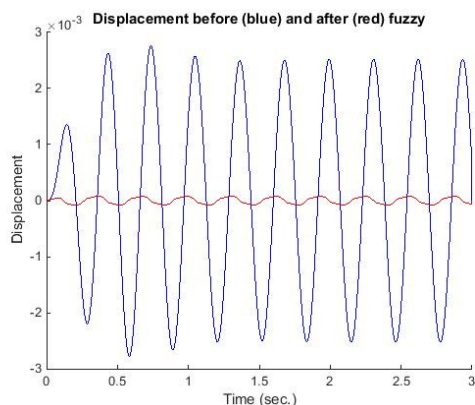
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0055	0.1140	2.3616
Με έλεγχο	0.0019	0.0817	7.4409
Μεταβολή (%)	-65.1149	-28.3299	215.0811

Πίνακας 4.2.1.1

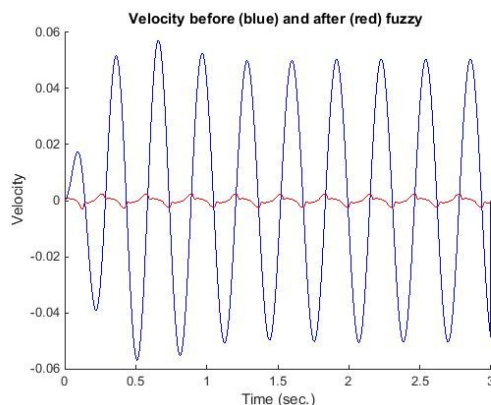
Στην περίπτωση φόρτισης σε 4 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 59 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.2.1.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 65,11%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 28.33%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 215.08%

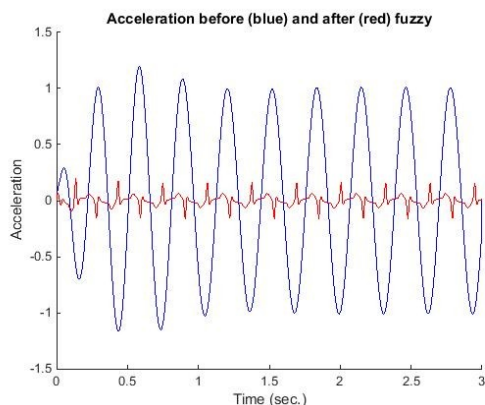
Μέθοδος CENTROID



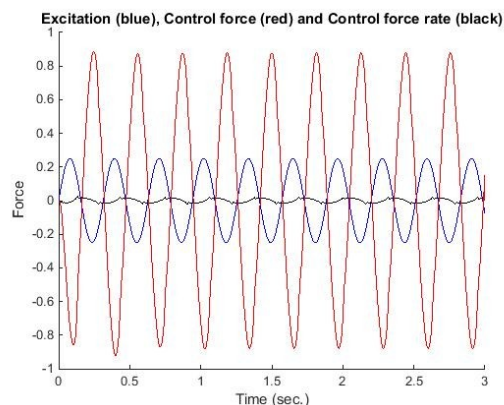
1



2



3



4

Εικόνα 4.2.1.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0055	0.1140	2.3616
Με έλεγχο	1.6066e-04	0.0054	0.3567
Μεταβολή (%)	-97.0978	-95.2800	-84.8945

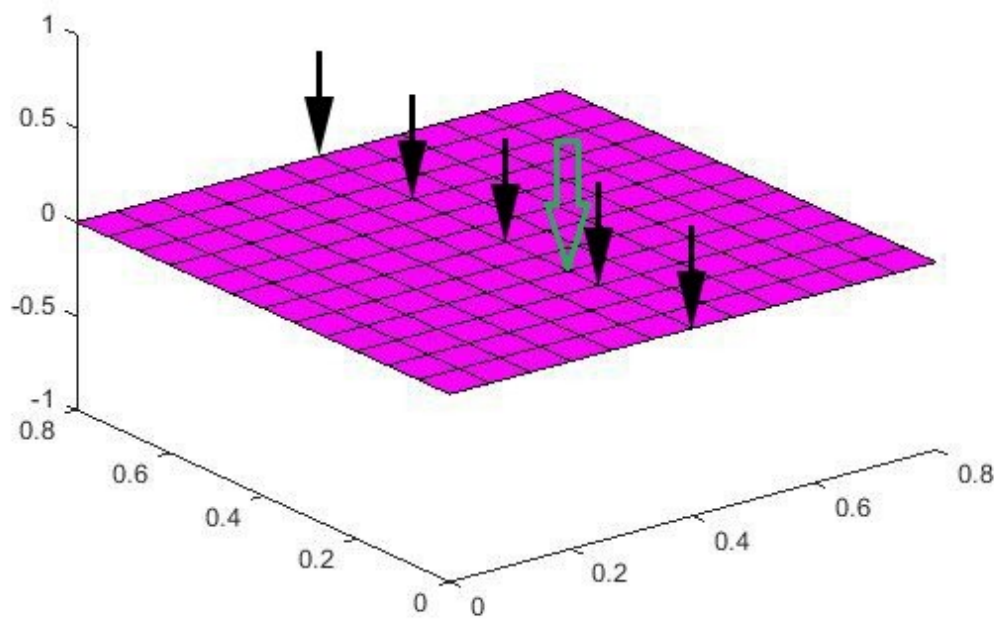
Πίνακας 4.2.1.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 4 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 59 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.2.1.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97.1%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 95.28%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 84.89%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

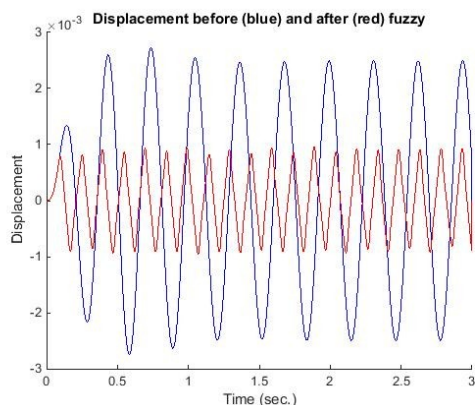
4.2.2 Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)



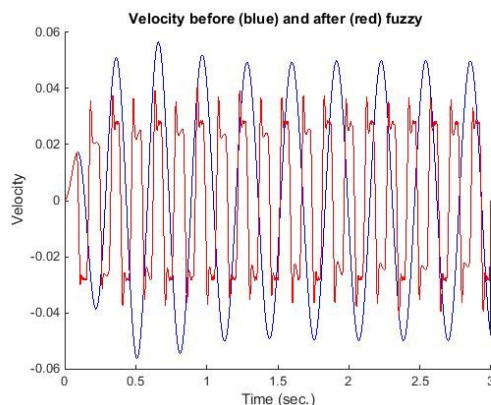
Εικόνα 4.2.2.1 Φόρτιση 5 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 59(πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

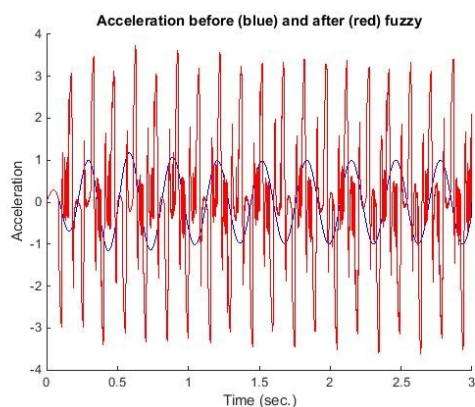
Μέθοδος MOM



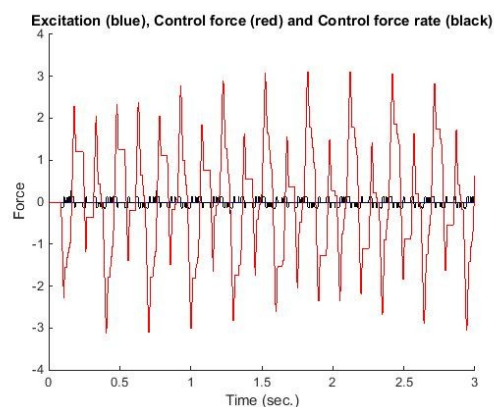
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.2.2.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

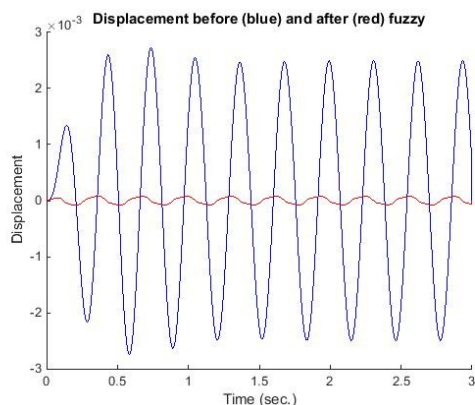
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0055	0.1127	2.3335
Με έλεγχο	0.0019	0.0812	7.3551
Μεταβολή (%)	-65.0230	-27.9099	215.1991

Πίνακας 4.2.2.1

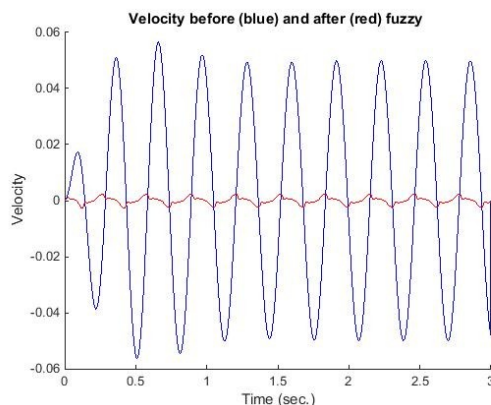
Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 59 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.2.2.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 65.02%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 27.91%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 215.20%

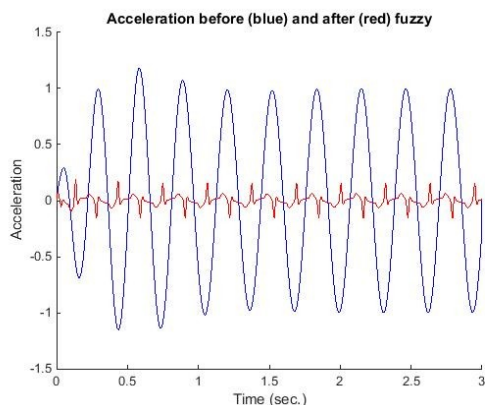
Μέθοδος CENTROID



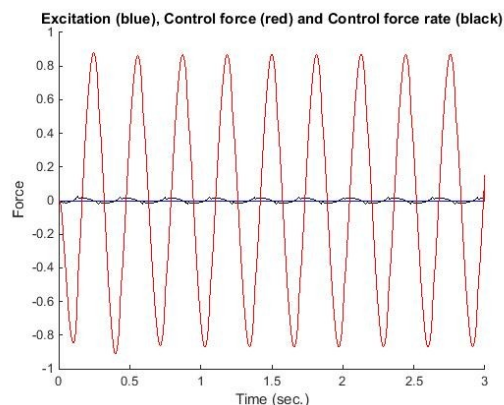
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.2.2.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0055	0.1127	2.3335
Με έλεγχο	1.5663e-04	0.0052	0.3460
Μεταβολή (%)	-97.1375	-95.3796	-85.1741

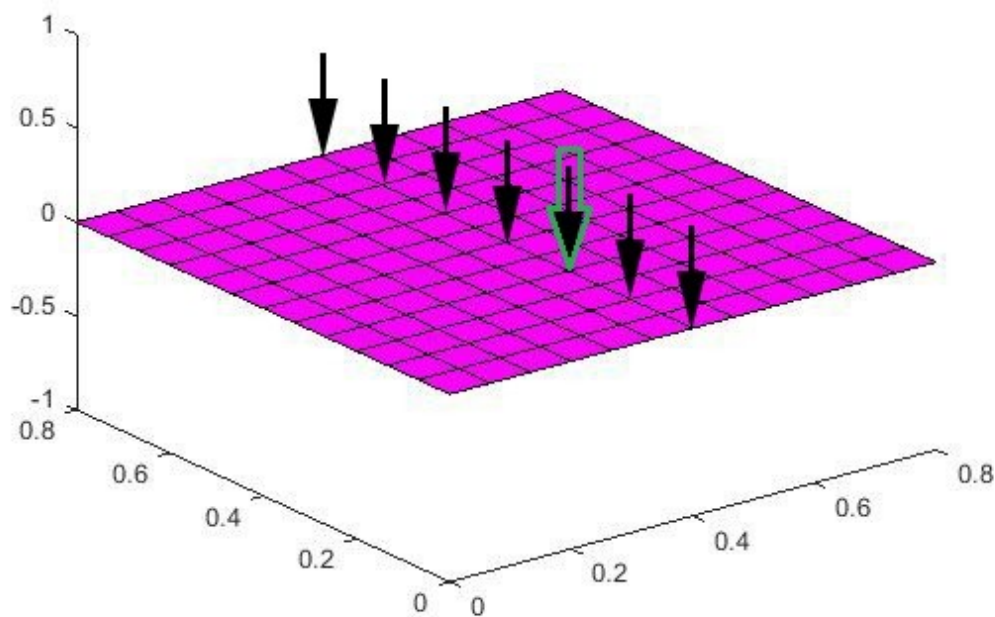
Πίνακας 4.2.2.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 59 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.2.2.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97.14%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 95.38%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85.17%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

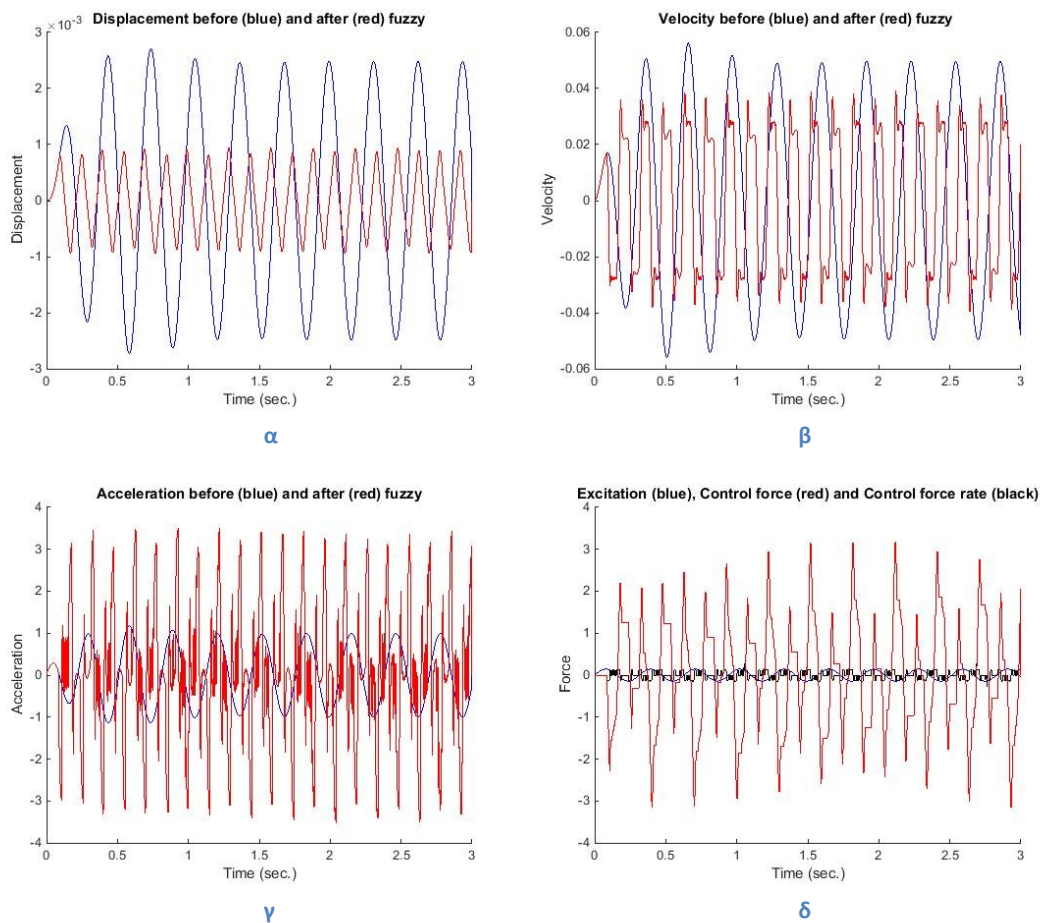
4.2.3 Φόρτιση σε 7 σημεία (κόμβοι 7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)



Εικόνα 4.2.3.1 Φόρτιση 7 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 59(πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

Μέθοδος MOM



Εικόνα 4.2.3.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

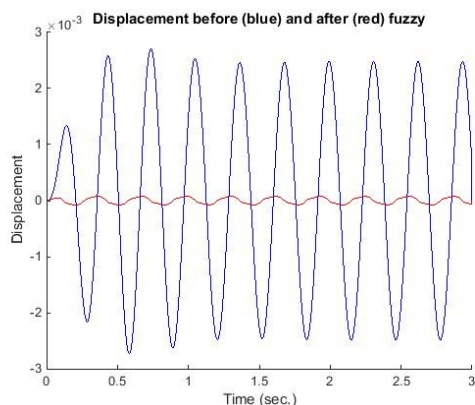
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0054	0.1120	2.3180
Με έλεγχο	0.0019	0.0790	7.0381
Μεταβολή (%)	-65.2412	-29.4936	203.6214

Πίνακας 4.2.3.1

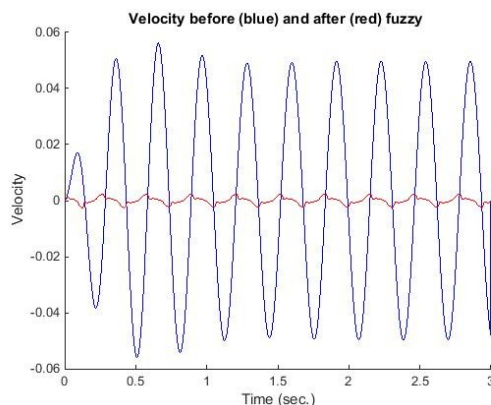
Στην περίπτωση φόρτισης σε 7 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 59 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.2.3.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 65.24%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 29.49%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 203.62%

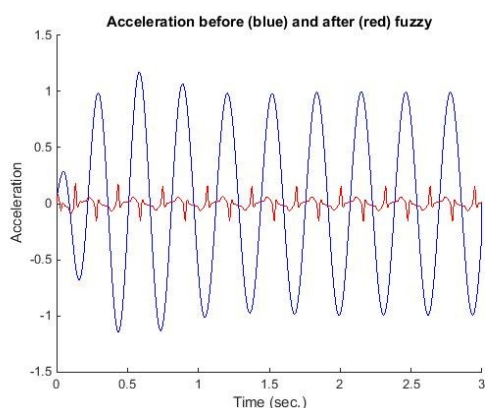
Μέθοδος CENTROID



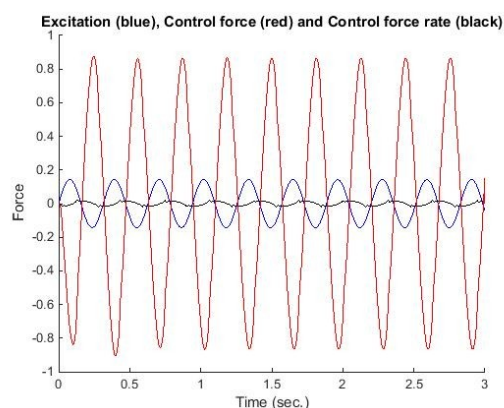
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.2.3.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0054	0.1120	2.3180
Με έλεγχο	1.5449e-04	0.0051	0.3370
Μεταβολή (%)	-97.1610	-95.4735	-85.4632

Πίνακας 4.2.3.2

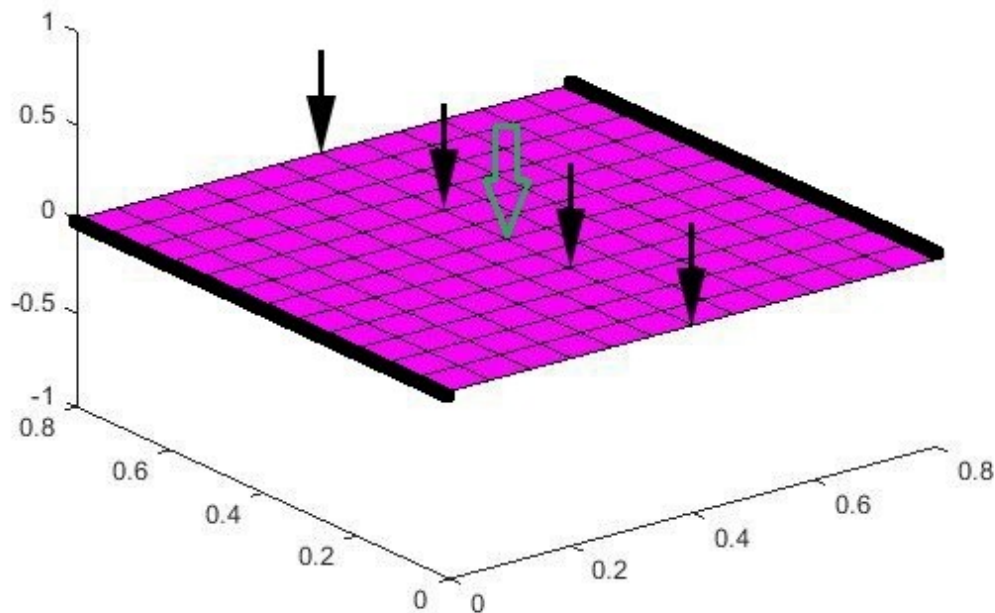
Στην περίπτωση φόρτισης σε 7 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 59 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.2.3.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97.16%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 95.47%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85.46%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

4.3 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 85

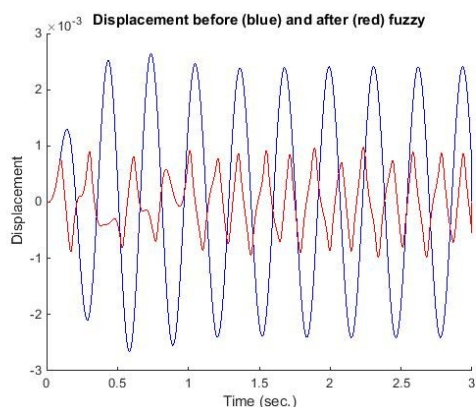
4.3.1 Φόρτιση σε 4 σημεία (κόμβοι 7, 59, 111, 163)



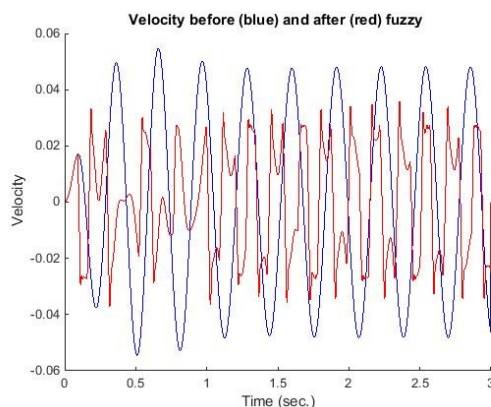
Εικόνα 4.3.1.1 Φόρτιση 4 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 85(πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

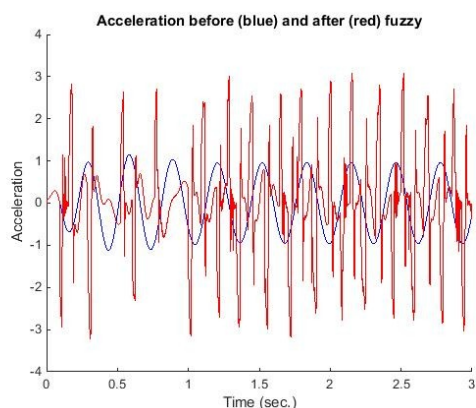
Μέθοδος MOM



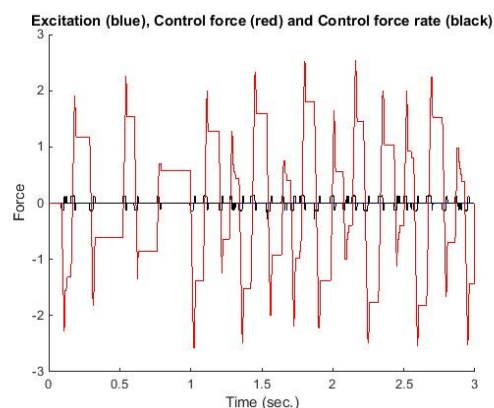
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.3.1.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

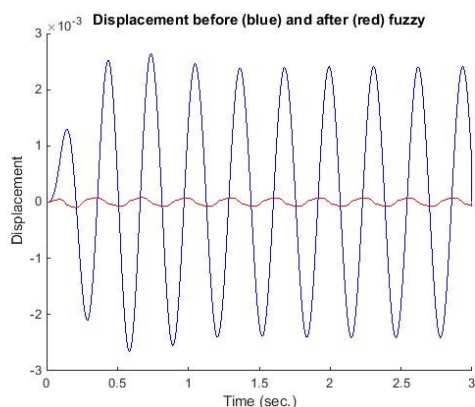
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1093	2.2664
Με έλεγχο	0.0020	0.0729	6.3072
Μεταβολή (%)	-63.1153	-33.2568	178.2892

Πίνακας 4.3.1.1

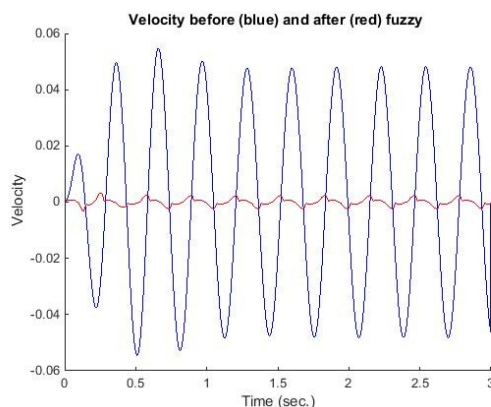
Στην περίπτωση φόρτισης σε 4 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 85 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.3.1.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 63,12%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 33,26%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 178,29%

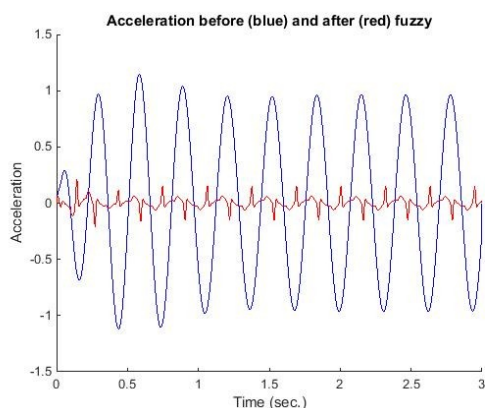
Μέθοδος CENTROID



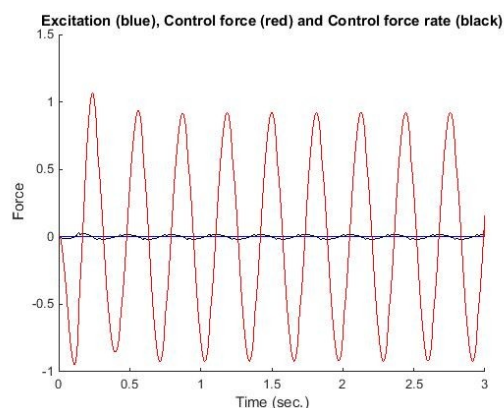
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.3.1.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1093	2.2664
Με έλεγχο	1.7610e-04	0.0064	0.4207
Μεταβολή (%)	-96.6765	-94.1216	-81.4386

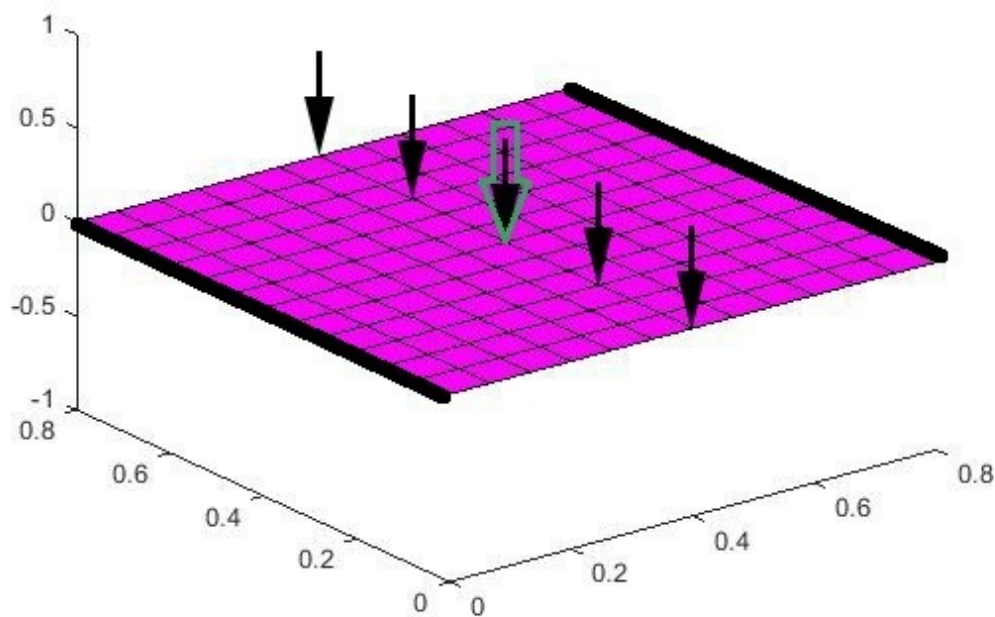
Πίνακας 4.3.1.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 4 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 85 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.3.1.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 96,68%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 94,12%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 81,44%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

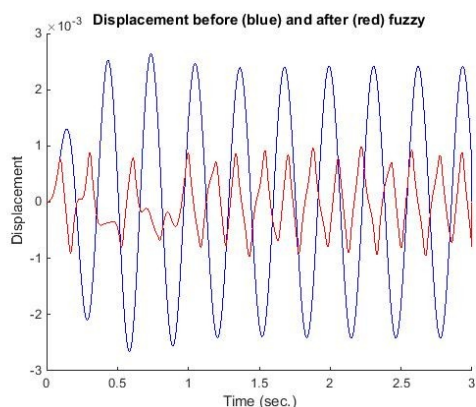
4.3.2 Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)



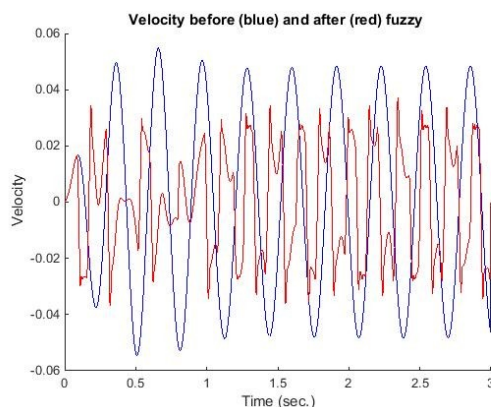
Εικόνα 4.3.2.1 Φόρτιση 5 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 85(πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

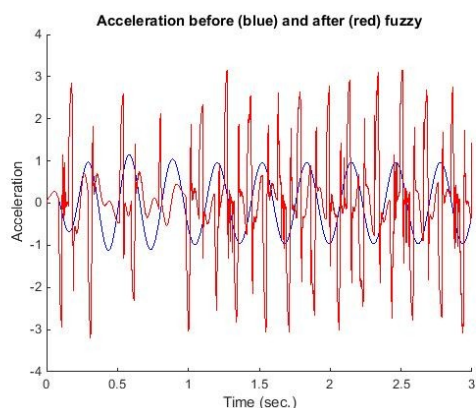
Μέθοδος MOM



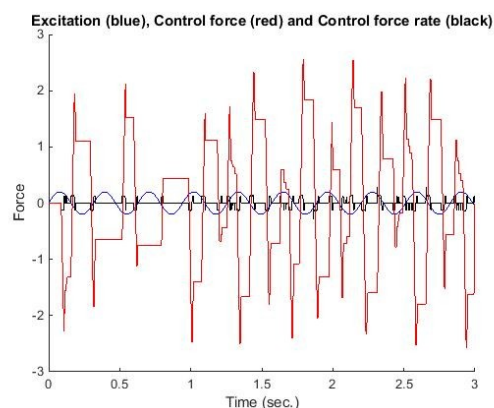
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.3.2.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

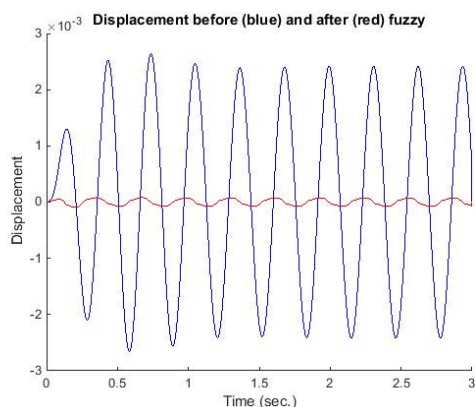
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1093	2.2643
Με έλεγχο	0.0020	0.0739	6.3675
Μεταβολή (%)	-63.0895	-32.3963	181.2186

Πίνακας 4.3.2.1

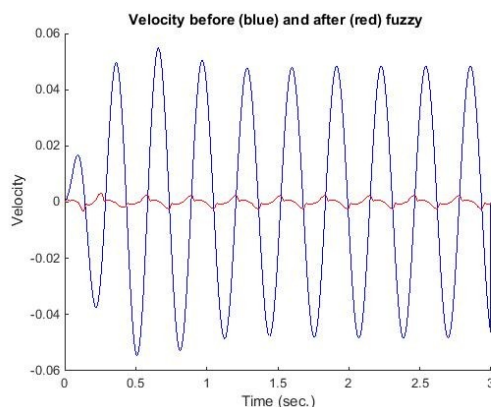
Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 85 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.3.2.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 63,09%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 32,40%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 181,22%

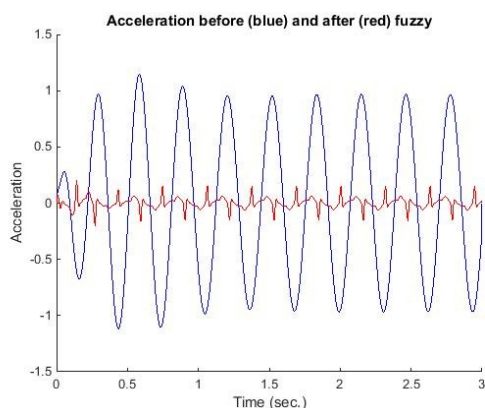
Μέθοδος CENTROID



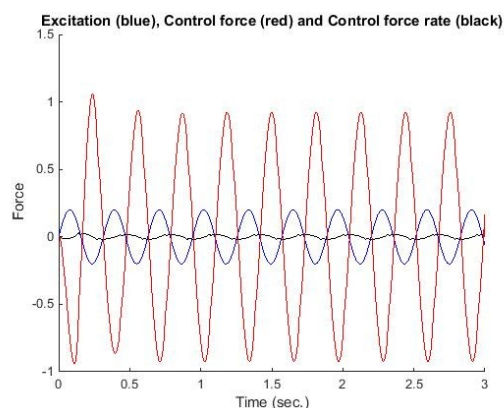
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.3.2.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1093	2.2643
Με έλεγχο	1.7511e-04	0.0063	0.4059
Μεταβολή (%)	-96.6990	-94.2516	-82.0756

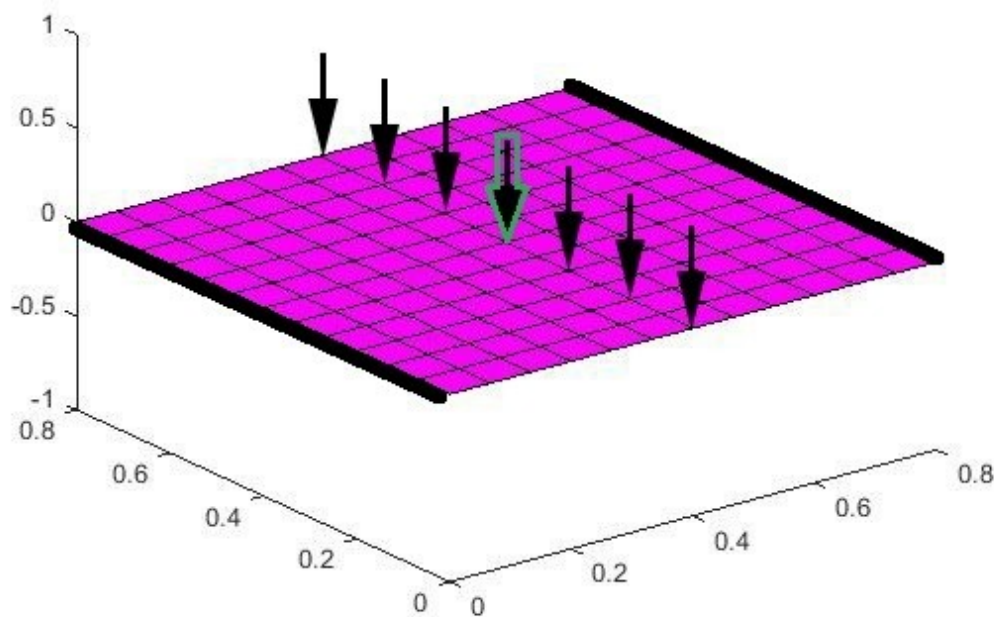
Πίνακας 4.3.2.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 85 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.3.2.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 96,70%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 94,25%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 82,08%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

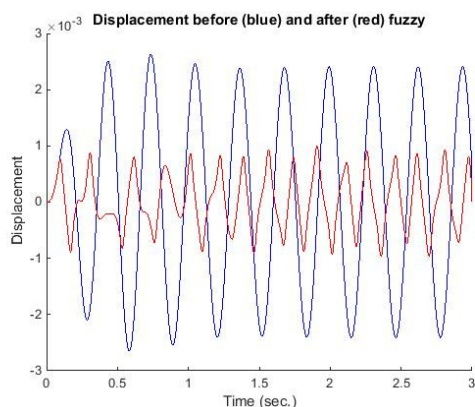
4.3.3 Φόρτιση σε 7 σημεία (κόμβοι 7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)



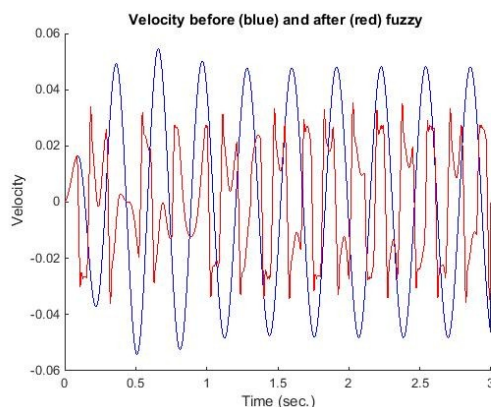
Εικόνα 4.3.3.1 Φόρτιση 7 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 85(πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

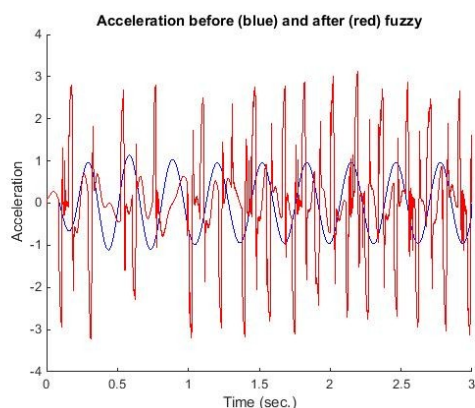
Μέθοδος MOM



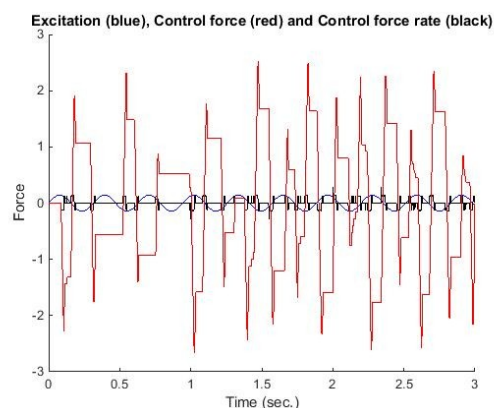
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.3.3.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

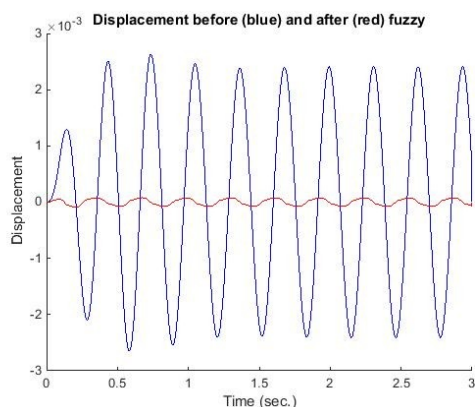
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1087	2.2511
Με έλεγχο	0.0020	0.0712	6.3666
Μεταβολή (%)	-62.9495	-34.5568	182.8212

Πίνακας 4.3.3.1

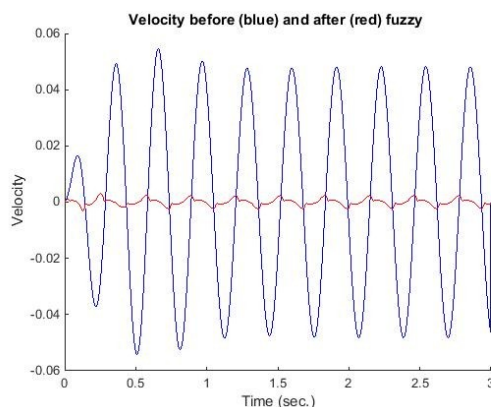
Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 85 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.3.3.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 62,95%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 34,56%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 182,82%

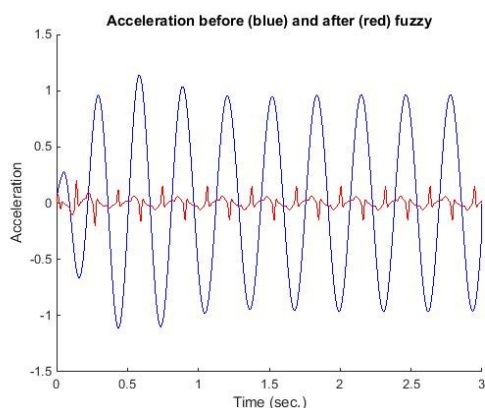
Μέθοδος CENTROID



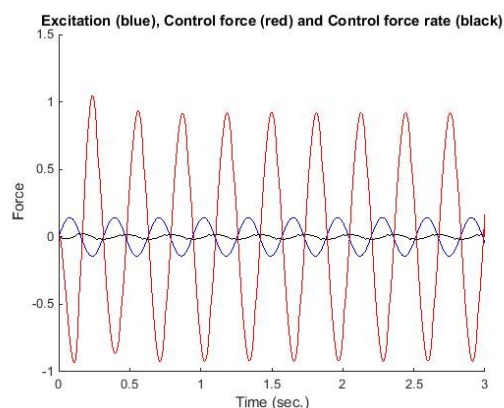
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.3.3.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0053	0.1087	2.2511
Με έλεγχο	1.7251e-04	0.0061	0.3968
Μεταβολή (%)	-96.7332	-94.3652	-82.3715

Πίνακας 4.3.3.2

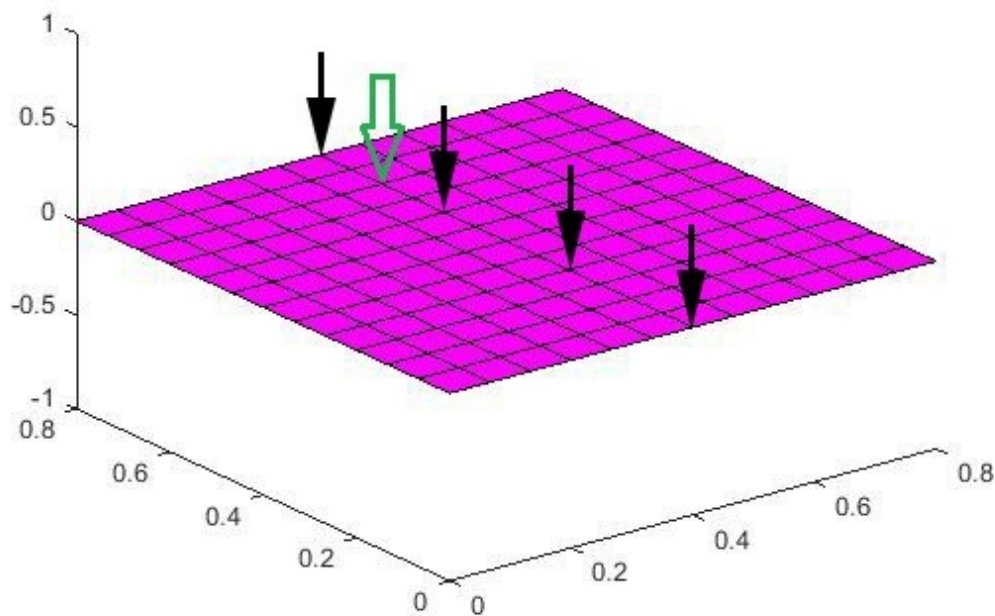
Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 85 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.3.3.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 96,73%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 94,36%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 82,37%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

4.4 Αποτελέσματα ως προς τον κόμβο 137

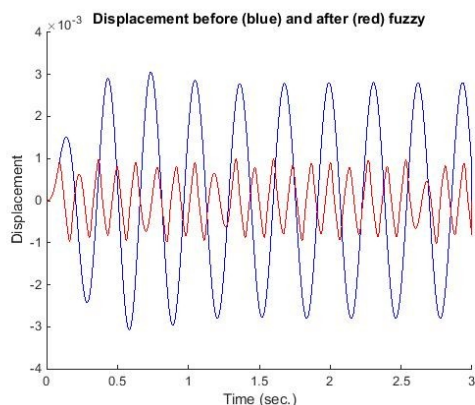
4.4.1 Φόρτιση σε 4 σημεία (κόμβοι 7, 59, 111, 163)



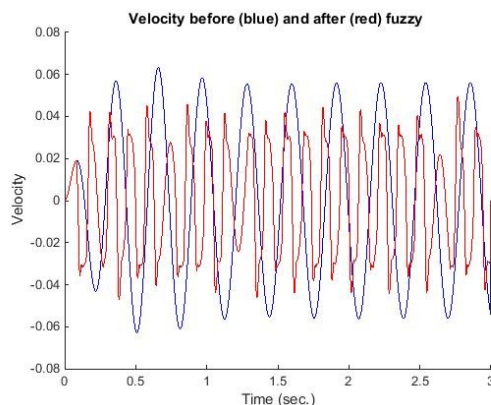
Εικόνα 4.4.1.1 Φόρτιση 4 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 137 (πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

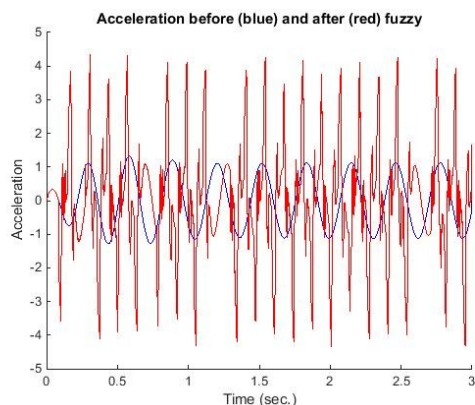
Μέθοδος MOM



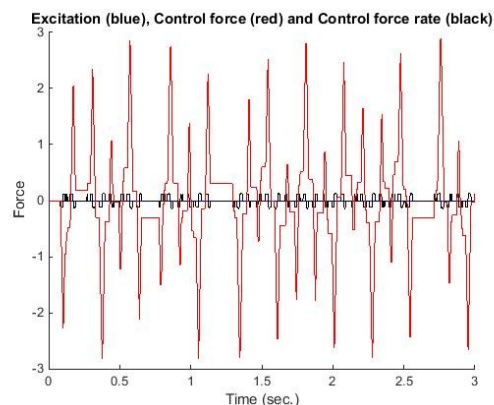
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.4.1.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

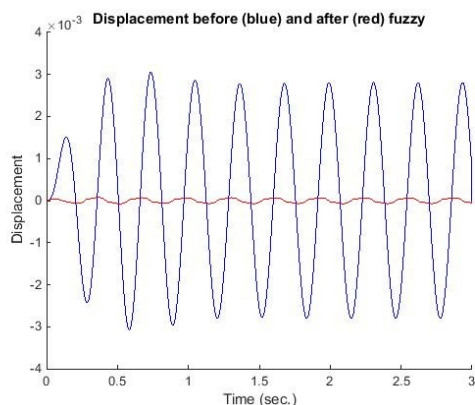
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0061	0.1261	2.6061
Με έλεγχο	0.0020	0.0964	8.6859
Μεταβολή (%)	-67.2014	-23.5989	233.2968

Πίνακας 4.4.1.1

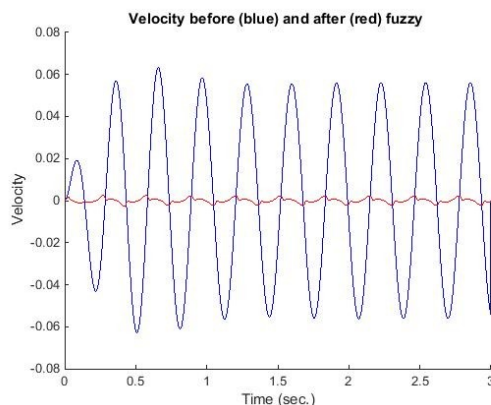
Στην περίπτωση φόρτισης σε 4 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 137 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.4.1.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 67,20%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 23,60%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 233,30%

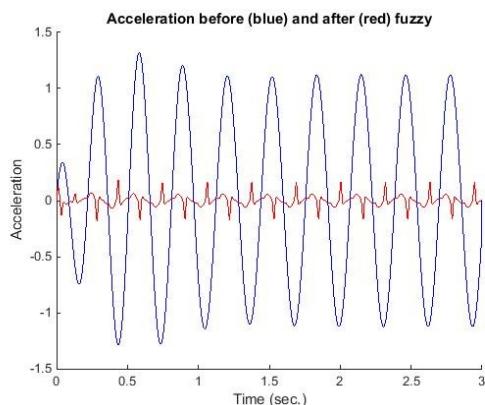
Μέθοδος CENTROID



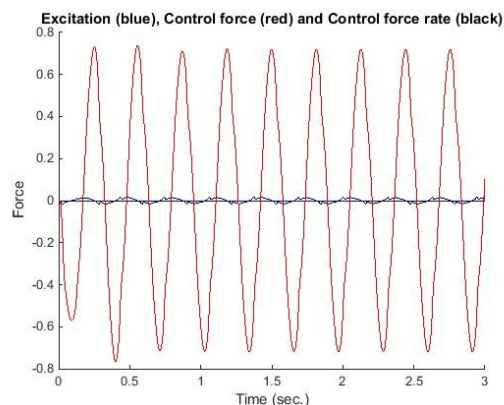
α



β



γ



δ

Εικόνα 4.4.1.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0061	0.1261	2.6061
Με έλεγχο	1.5020e-04	0.0052	0.3710
Μεταβολή (%)	-97.5506	-95.8797	-85.7635

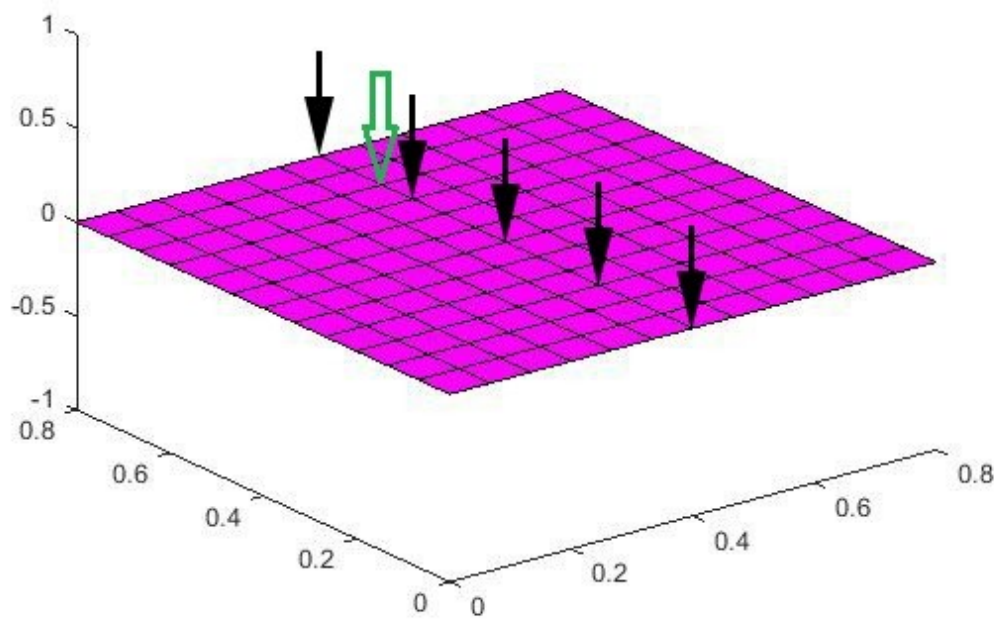
Πίνακας 4.4.1.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 4 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 137 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.4.1.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97,55%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 95,88%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85,76%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

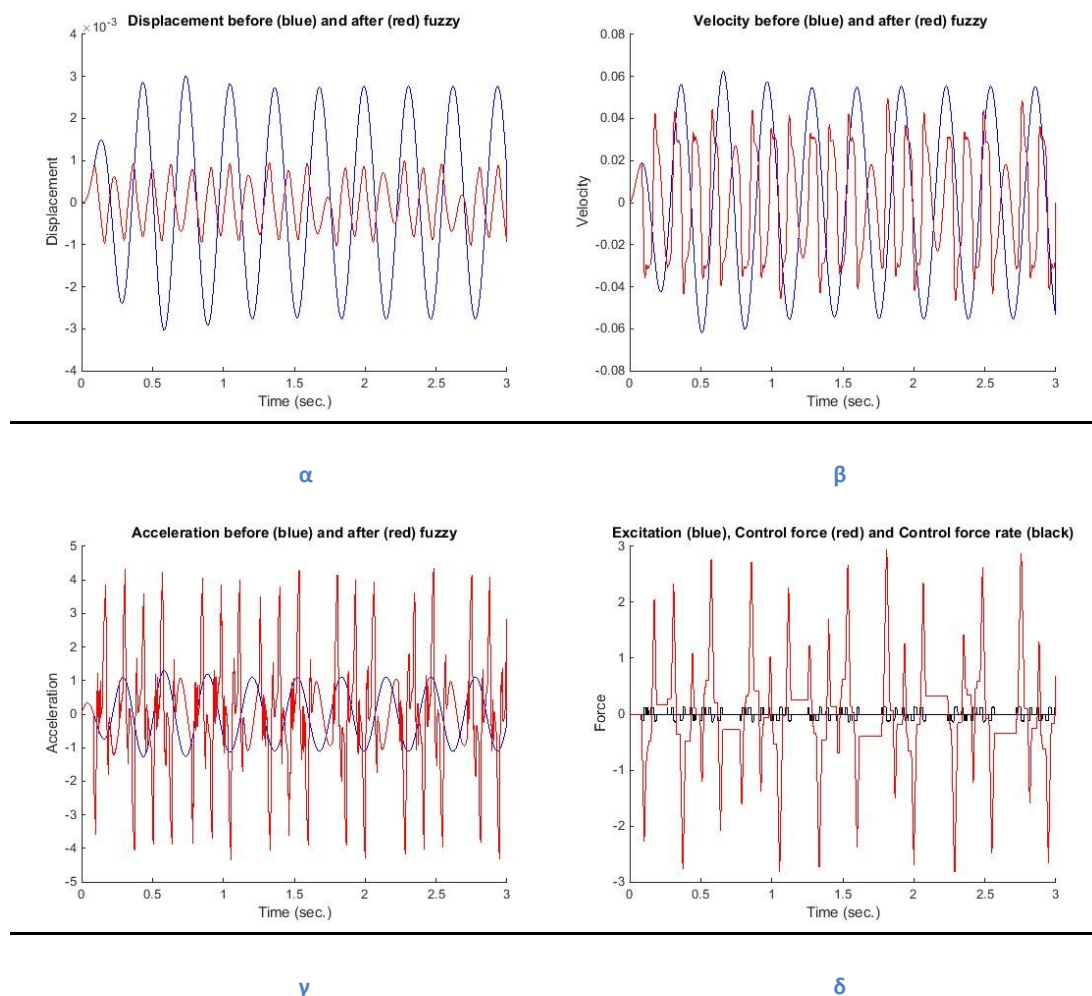
4.4.2 Φόρτιση σε 5 σημεία (κόμβοι 7, 46, 85, 124, 163)



Εικόνα 4.4.2.1 Φόρτιση 5 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 137 (πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

Μέθοδος MOM



Εικόνα 4.4.2.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

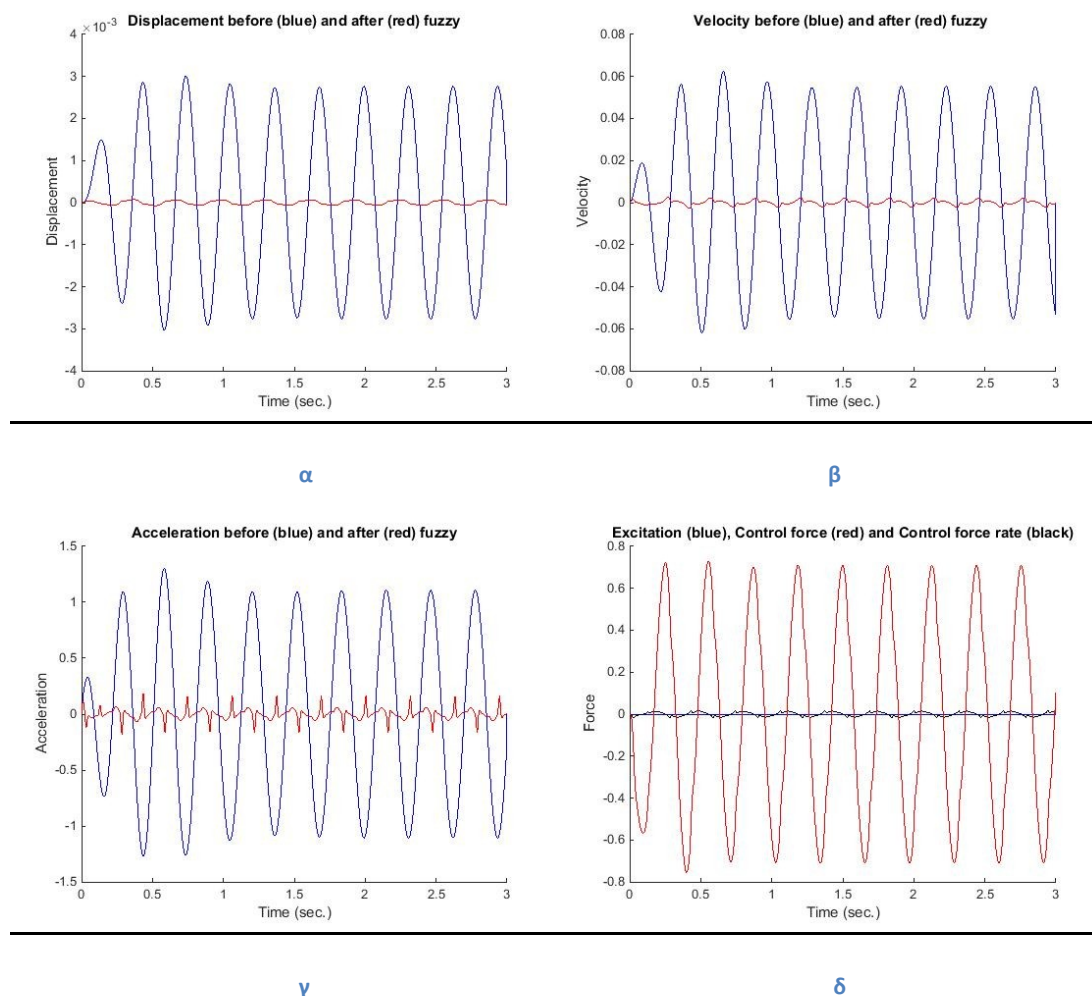
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0060	0.1243	2.5694
Με έλεγχο	0.0020	0.0960	8.6827
Μεταβολή (%)	-66.7348	-22.7612	237.9296

Πίνακας 4.4.2.1

Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 137 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.4.2.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 66,73%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 22,76%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 237,93%

Μέθοδος CENTROID



Εικόνα 4.4.2.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s^2)
Χωρίς έλεγχο	0.0060	0.1243	2.5694
Με έλεγχο	1.4593e-04	0.0050	0.3647
Μεταβολή (%)	-97.5865	-95.9411	-85.8045

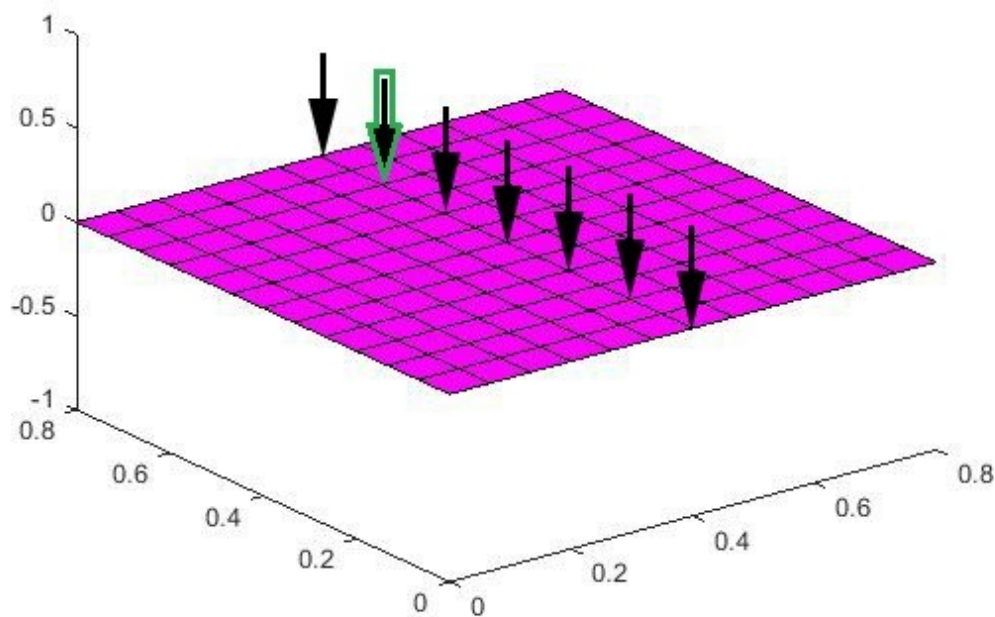
Πίνακας 4.4.2.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 5 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 137 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.4.2.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97,59%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 95,94%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85,80%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

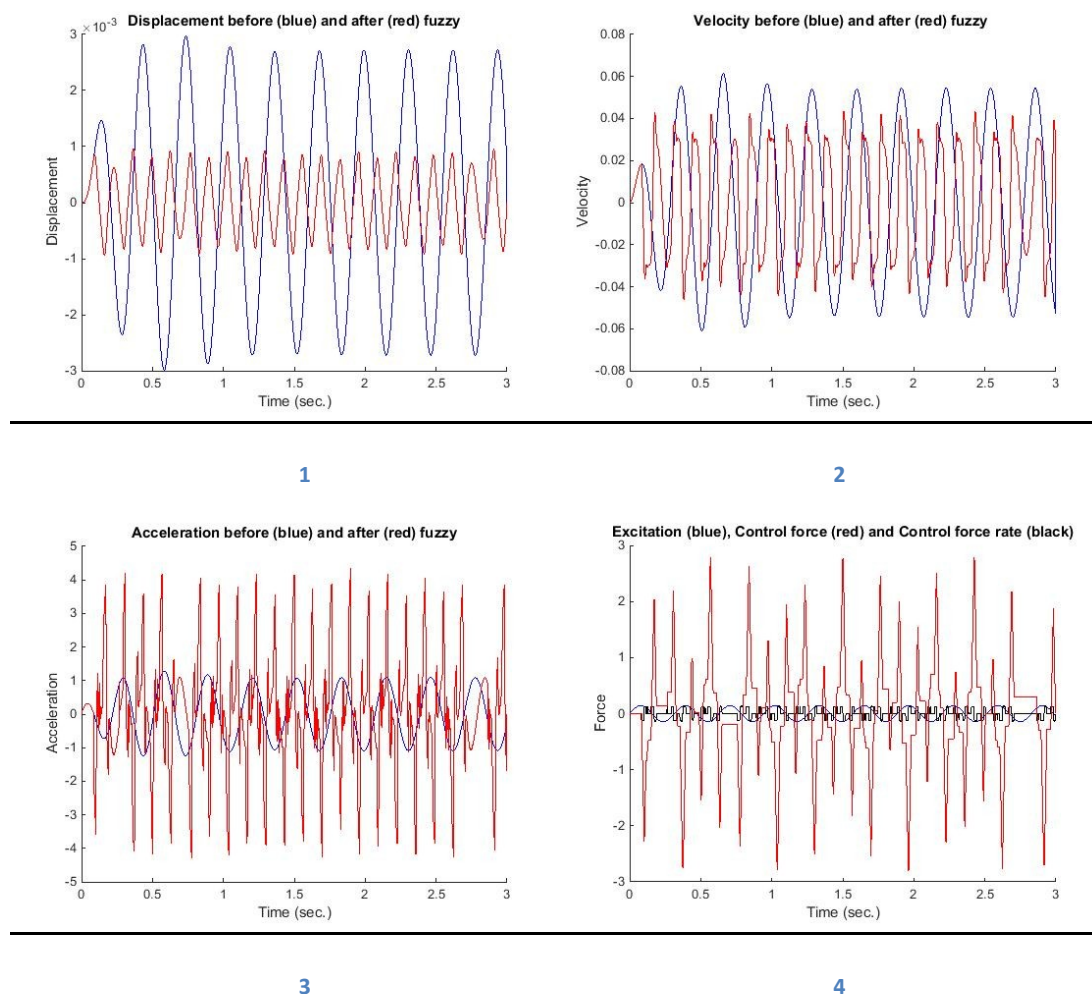
4.4.3 Φόρτιση σε 7 σημεία (κόμβοι 7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)



Εικόνα 4.4.3.1 Φόρτιση 7 σημείων (μαύρο) και τοποθέτηση ελεγκτή στον κόμβο 137 (πράσινο)

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:

Μέθοδος MOM



Εικόνα 4.4.3.2: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

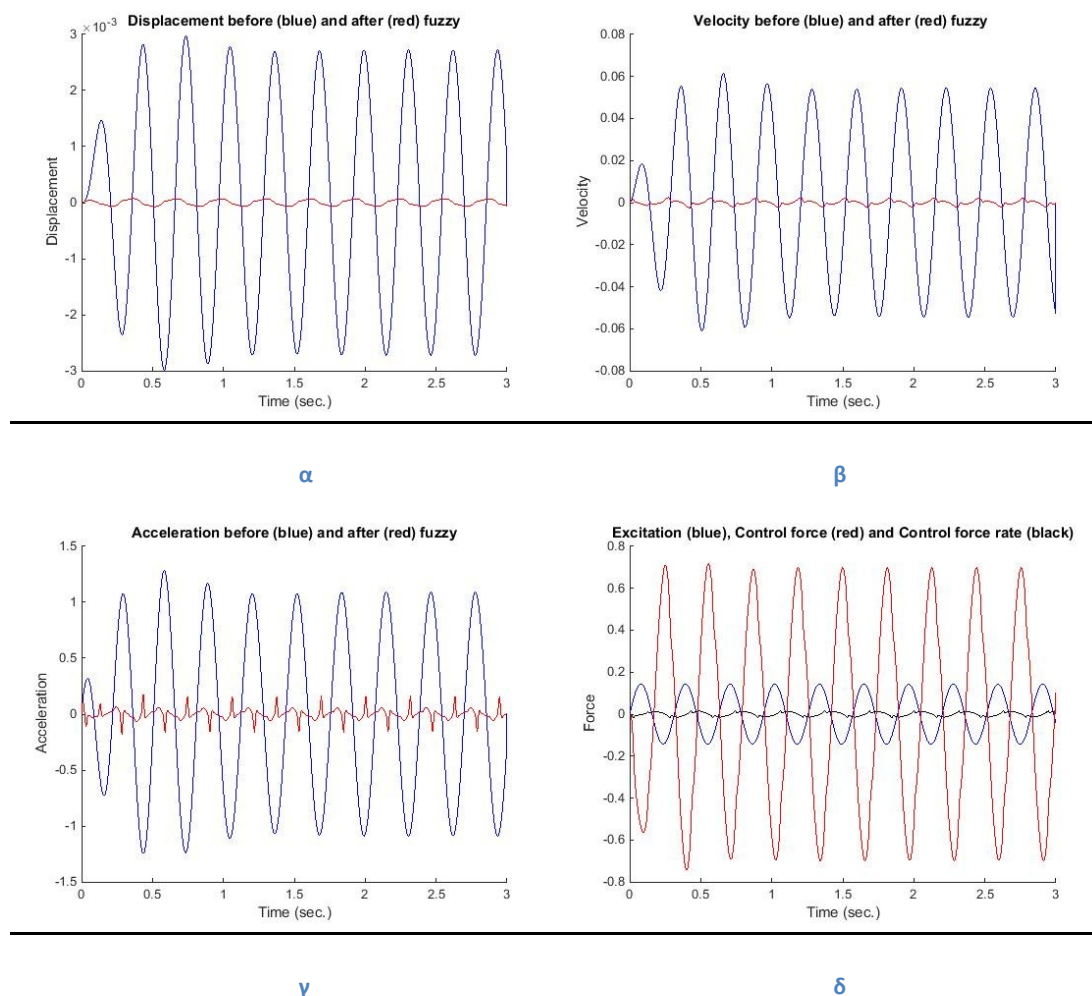
	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0060	0.1224	2.5299
Με έλεγχο	0.0019	0.0897	8.6096
Μεταβολή (%)	-68.0292	-26.7367	240.3207

Πίνακας 4.4.3.1

Στην περίπτωση φόρτισης σε 7 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 137 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης MOM, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.4.3.1):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 68,03%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 26,74%
- Η επιτάχυνση αυξήθηκε κατά 240,32%

Μέθοδος CENTROID



Εικόνα 4.4.3.3: α. Μετατόπιση (m) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, β. Ταχύτητα (m/s) πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, γ. Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά (κόκκινο) τον έλεγχο, δ. Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

	Μέγιστη μετατόπιση (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση (m/s ²)
Χωρίς έλεγχο	0.0060	0.1224	2.5299
Με έλεγχο	1.4135e-04	0.0049	0.3572
Μεταβολή (%)	-97.6254	-96.0068	-85.8817

Πίνακας 4.4.3.2

Στην περίπτωση φόρτισης σε 7 σημεία, τοποθέτησης του ελεγκτή στον κόμβο 137 και χρησιμοποιώντας την μέθοδο αποασαφοποίησης CENTROID, οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι οι εξής (Πίνακας 4.4.3.2):

- Η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97,63%
- Η ταχύτητα μειώθηκε κατά 96,01%
- Η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85,88%

Βλέπουμε ότι η μέθοδος CENTROID μας έδωσε και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Η μετατόπιση και η ταχύτητα του κόμβου είχαν αισθητά μεγαλύτερη μείωση με την χρήση της CENTROID. Επίσης, η επιτάχυνση στην CENTROID μειώθηκε δραματικά, σε αντίθεση με την περίπτωση της MOM όπου αυξήθηκε κατακόρυφα.

5. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα προέκυψαν, διενεργώντας κάποιες προσομοιώσεις στην αμφίπακτη πλάκα, μεταβάλλοντας την θέση και το πλήθος των φορτίσεων, την θέση του ελεγκτή και τέλος, αλλάζοντας σε κάθε σενάριο την μέθοδο αποασαφοποίησης σε MOM ή CENTROID. Καταγράφοντας λοιπόν τα αποτελέσματα από όλα τα διαφορετικά σενάρια που μελετήσαμε, το πρώτο πράγμα που παρατηρούμε είναι ότι η μέθοδος CENTROID μας δίνει πάντοτε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο MOM. Επίσης, λόγω συμμετρίας της αμφίπακτης πλάκας, τα σενάρια φόρτισης στα οποία ο ελεγκτής τοποθετήθηκε στους κόμβους 33 και 137, βλέπουμε ότι είναι πανομοιότυπα. Ακόμα, από τα 24 διαφορετικά σενάρια που μελετήσαμε, βλέπουμε ότι τα βέλτιστα αποτελέσματα, δηλαδή αυτά με τη μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση σε μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση, είναι τα εξής:

Σενάριο 1

- Φόρτιση της πλάκας σε 7 κόμβους (7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)
- Τοποθέτηση του ελεγκτή στον κόμβο 33
- Μέθοδος αποασαφοποίησης CENTROID

Σενάριο 2

- Φόρτιση της πλάκας σε 7 κόμβους (7, 33, 59, 85, 111, 137, 163)
- Τοποθέτηση του ελεγκτή στον κόμβο 137
- Μέθοδος αποασαφοποίησης CENTROID

Στα εν λόγω σενάρια, η μετατόπιση του κόμβου μειώθηκε κατά 97,63%, η ταχύτητα μειώθηκε κατά 96,01% και η επιτάχυνση μειώθηκε κατά 85,88%.

Είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα στα δύο αυτά σενάρια είναι ίδια, καθώς όπως προαναφέρθηκε υπάρχει συμμετρία στην αμφίπακτη πλάκα που χρησιμοποιούμε.

Κλείνοντας, πρέπει να σημειωθεί ότι ο ασαφής έλεγχος κρίθηκε αποτελεσματικότερος στην επίτευξη του αρχικού στόχου της διπλωματικής εργασίας. Μάλιστα, όχι μόνο επετεύχθη αποτελεσματικότερη εξομάλυνση των ταλαντώσεων πάνω στην πλάκα, αλλά η εξομάλυνση αυτή ήταν και αρκετά

σημαντική ως ποσοστό επί τοις εκατό. Συνεπώς, πλέον γνωρίζουμε ότι η χρήση ασαφούς ελέγχου θα μας παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στον έλεγχο των ταλαντώσεων σε μία μηχανική κατασκευή, και αντίστοιχα και σε άλλες περιπτώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

- [11] G.K. Tairidis, G.E. Stavroulakis, D.G. Marinova, E.C. Zacharenakis: Classical and soft robust active control of smart beams. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, M. Papadrakakis et al. Eds, Rethymno, Crete, Greece, 13-16 June 2007
- [12] Lam, K. Y., Peng, X. Q., Liu, G. R. & Reddy, J. N., 1997. A finite-element model for piezoelectric composite laminates. Smart Mater Struct, Volume 6, pp. 583-591.

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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