ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με
Εφαρμογή σε Πιεζοηλεκτρική Ευφυή Δοκό

Κιλιμπέρης Χαράλαμπος

Χανιά 2008

στην Θεοδοσία και στον Μάνο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρακάτω διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την καταλυτική συμβολή του κ. Γεωργίου Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, ο οποίος με εισήγαγε στην ασαφή λογική και με υποστήριξε καθ' όλη την διάρκεια της ενασχόλησής μου με το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης μεγάλη υπήρξε η συνεισφορά του κ. Γεωργίου Κ. Ταϊρίδη, μεταπτυχιακού φοιτητή του τμήματος των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης , καθώς η βάση των πειραμάτων μας ήταν το ασαφές σύστημα που ο ίδιος δημιούργησε στο πλαίσιο της ερευνητικής του εργασίας για το μεταπυχιακό δίπλωμα ειδίκευσής του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Στράτο Βούρο, μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος των Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την σημαντική συμβολή του στα αρχικά στάδια της παρακάτω εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου Μιχάλη, Ζωή και Ευαγγελία για την καθημερινή τους υποστήριξη. Τέλος θα θελα να ευχαριστήσω τον Κωνσταντίνο Στουραΐτη για την συνολική υποστήριξή του.

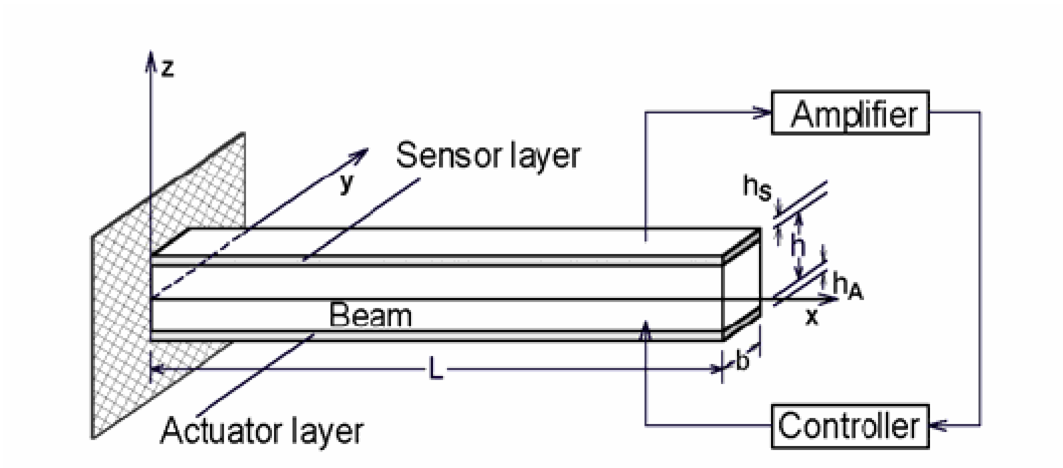
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διπλωματική εργασία έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Γεωργίου Σταυρουλάκη στο τμήμα των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η παραμετροποίηση διαφόρων στοιχείων ενός προκατασκευασμένου συστήματος ασαφούς ελέγχου, και η εξαγωγή συμπερασμάτων και συγκρίσεων με τα αρχικά αποτελέσματα. Η διάταξη έχει σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί χωρίς παραμετρική διερεύνηση των δυνατοτήτων του ασαφούς ελεγκτή από τον κ. Γεώργιο Κ. Ταϊρίδη στα πλαίσια της μεταπτυχιακής του διατριβής.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από μία πρόβολο δοκού στην οποία εφαρμόστηκε ένας ασαφής ελεγκτής, με σκοπό τον έλεγχο των ταλαντώσεών της και την επιβολή μίας δύναμης ελέγχου ώστε αυτή να παραμένει όσο είναι αυτό εφικτό στην θέση ηρεμίας της. Παρακάτω περιγράφεται και γραφικά η διάταξή μας.



Σχήμα 1 Αναπαράσταση συστήματος

Αυτή η διάταξη μπορεί να έχει εφαρμογή σε λεπτές κατασκευές όπως ιστούς, στην μείωση θορύβου κάποιου μηχανήματος ή ακόμα και στα τζάμια ενός αυτοκινήτου.

2. ΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ

Ο ελεγκτής της διάταξής μας είναι τύπου MISO (multiple inputs, single output) και έχει 2 εισόδους (θέση, ταχύτητα) και μία έξοδο (δύναμη ελέγχου). Είναι κατασκευασμένος με την βοήθεια του πακέτου Fuzzy Toolbox του Matlab.

Ένας τέτοιος ασαφής ελεγκτής λειτουργεί ως εξής. Έχει μια βάση δεδομένων η οποία καλείται βάση γνώσης όπου αποθηκεύονται οι κανόνες ελέγχου οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην διαδικασία. Ενδεικτικά παρατίθενται οι κανόνες του αρχικού μας συστήματος.

Displacement / Velocity	Far_L	Close_L	Equilibrium	Close_R	Far_R
Left	Max	Med^+	Low^+	Null	Low^-
Null	$High^+$	Low^+	Null	Low^-	$High^-$
Right	Low^+	Null	Low^-	Med^-	Min

Πίνακας 1 Κανόνες του αρχικού ασαφούς συστήματος

Οι κανόνες αυτοί διατάσσονται σύμφωνα με την λογική και μετά από σχετικές δοκιμές. Για παράδειγμα εάν η δοκός βρίσκεται σε θέση κοντά αριστερά (Close_L) από την θέση ηρεμίας της και έχει μηδενική (Null) ταχύτητα, θα πρέπει να ασκηθεί μικρή δύναμη από το σύστημα προς τα δεξιά (Low^+).

Έχοντας ορίσει τα ασαφή σύνολα, είναι πλέον δυνατή η μετάφραση των λεκτικών κανόνων της βάσης γνώσης σε μαθηματικούς κανόνες. Ενδεικτικά παρατίθεται κώδικας από το περιβάλλον του Matlab.

```
%Add Rules
ruleList=[
    1 1 9 1 1
    1 2 8 1 1
    1 3 6 1 1
    2 1 7 1 1
    2 2 6 1 1
    2 3 5 1 1
    3 1 6 1 1
    3 2 5 1 1
    3 3 4 1 1
    4 1 5 1 1
    4 2 4 1 1
    4 3 3 1 1
    5 1 4 1 1
    5 2 2 1 1
    5 3 1 1 1];
a = addrule(a,ruleList);
```

- Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην είσοδο που περιγράφει την θέση. Εν προκειμένω στο αρχικό μας σύστημα, το 1 αναφέρεται στην θέση Far_L, το 2 στην θέση Close_L, το 3 στην θέση ηρεμίας Equilibrium, το 4 στην θέση Close_R και τέλος το 5 στην θέση Far_L.

- Η δεύτερη στήλη αναφέρεται στην είσοδο που περιγράφει την ταχύτητα, και αντίστοιχα ν στήλες όσες και οι είσοδοι του συστήματος. Συγκεκριμένα το 1 περιγράφει την κατεύθυνση Left της ταχύτητας, το 2 την μηδενική ταχύτητα και το 3 την κατεύθυνση Right της ταχύτητας.

- Η τρίτη στήλη είναι η μετάφραση των λεκτικών κανόνων σε μαθηματικούς κανόνες και αναφέρεται στην έξοδο του συστήματός μας, την δύναμη ελέγχου. Η κωδικοποίηση αυτή γίνεται από μας λογικά. Στο αρχικό μας σύστημα οι κανόνες έχουν μεταφραστεί ως εξής:

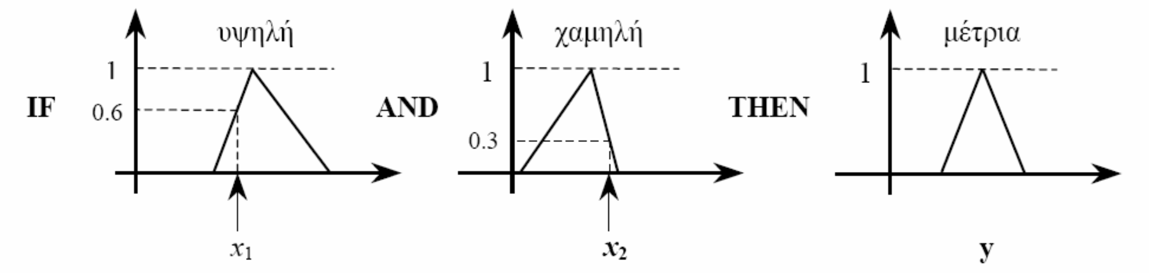
Displacement / Velocity	Far_L	Close_L	Equilibrium	Close_R	Far_R
Left	Max$^{(9)}$	Med$^{+(7)}$	Low$^{+(6)}$	Null$^{(5)}$	Low$^{-(4)}$
Null	High$^{+(8)}$	Low$^{+(6)}$	Null$^{(5)}$	Low$^{-(4)}$	High$^{-(2)}$
Right	Low$^{+(6)}$	Null$^{(5)}$	Low$^{-(4)}$	Med$^{-(3)}$	Min$^{(1)}$

Πίνακας 2 Κωδικοποίηση κανόνων του αρχικού ασαφούς συστήματος

- Η τέταρτη στήλη είναι ο συντελεστής της κάθε μεταβλητής, στην προκειμένη περίπτωση πάντα ίσος με την μονάδα.

- Τέλος η πέμπτη στήλη αναφέρεται στον λογικό τελεστή AND, ο οποίος παραμένει σταθερός στην πορεία των πειραμάτων μας, και χρησιμοποιείται από τον μηχανισμό συμπερασμού ο οποίος περιγράφεται πιο κάτω.

Ο ασαφοποιητής αναλαμβάνει την μετατροπή των πραγματικών τιμών των μεταβλητών εισόδου του ελεγκτή σε ασαφή σύνολα. Συγκεκριμένα για κάθε αριθμητική είσοδο υπολογίζεται ο βαθμός συμμετοχής στο αντίστοιχο ασαφές σύνολο αιτίου του κάθε κανόνα. Ο βαθμός συμμετοχής σε κάποιο ασαφές σύνολο μπορεί να θεωρηθεί ως ο βαθμός ‘’ενεργοποίησης’’ της αντίστοιχης συζευγμένης πρότασης-αιτίου.



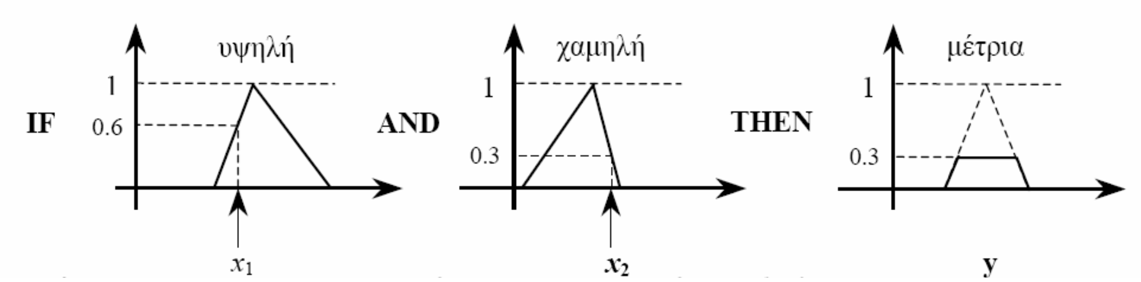
Σχήμα 2 Ασαφοποίηση δύο αριθμητικών εισόδων

Ο μηχανισμός συμπερασμού, στην συγκεκριμένη περίπτωση ο μηχανισμός Mamdani, αναλαμβάνει να παράγει μέσω συνεπαγωγών τα ασαφή σύνολα των συμπερασμάτων.

Ασαφοποίηση	**Ασαφές Σημείο**
Τελεστής "ΚΑΙ"	Min
Τελεστής "OR"	Max
Τελεστής συνεπαγωγής	Mamdami (min)
Τελεστής σύνθεσης	max-min
Αποασαφοποίηση	Οτιδήποτε

Σχήμα 3 Μηχανισμός ασαφούς συμπερασμού του Mamdani

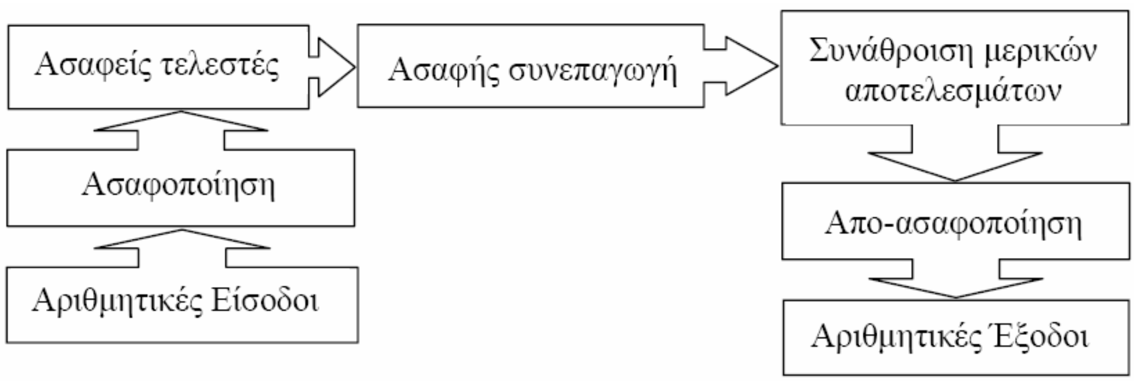
Δηλαδή το σύστημα χρησιμοποιεί έναν λογικό τελεστή, στην προκειμένη περίπτωση τον τελεστή AND, μεταξύ των τιμών των εισόδων και εξάγει ένα σύνολο αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4 Αποτέλεσμα ασαφούς συνεπαγωγής κατά Mamdani

Το σύνολο αποτελεσμάτων που προκύπτει, αναλαμβάνει ο αποασαφοποιητής να μετατρέψει σε πραγματικούς αριθμούς έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετάδοση της δράσης ελέγχου στην διαδικασία. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αποασαφοποίησης, στην περίπτωσή μας θα χρησιμοποιήσουμε την αποασαφοποίηση μέσου των μεγίστων (Middle of Maxima – MOM).

Το παρακάτω σχήμα συνοψίζει τα προηγούμενα βήματα που εμπλέκονται στον υπολογισμό της αριθμητικής εξόδου ενός ασαφούς συστήματος από αριθμητικές εισόδους.



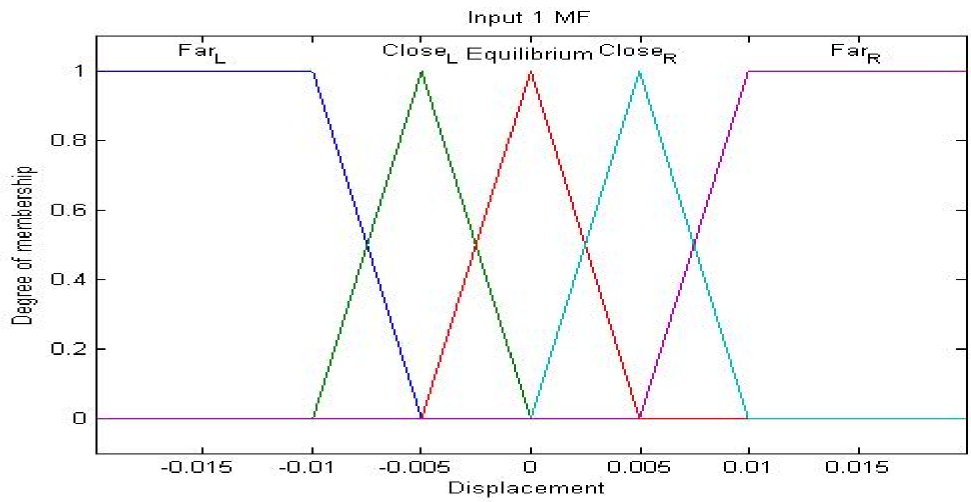
Σχήμα 5 Διάγραμμα παραγωγής αριθμητικής εξόδου σε ένα ασαφές σύστημα από αριθμητικές εισόδους

3. ΑΡΧΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ

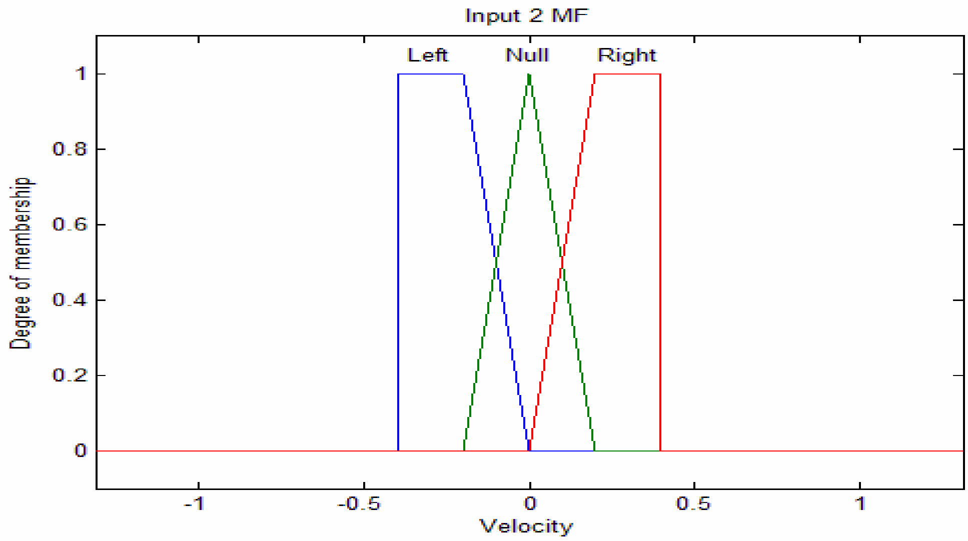
Η πρώτη είσοδος του συστήματος είναι η Displacement (θέση), η οποία περιγράφει την θέση του δοκαριού σε σχέση με την θέση ηρεμίας του. Η μεταβλητή αυτή περιγράφεται από 5 συναρτήσεις συμμετοχής, τις εξής: Far_L, Close_L, Equilibrium, Close_R, Far_R.

Η δεύτερη είσοδος τους συστήματος αφορά την μεταβλητή Velocity (ταχύτητα), η οποία περιγράφει την ταχύτητα ανάλογα με την κατεύθυνση που κινείται το δοκάρι και περιγράφεται από 3 συναρτήσεις συμμετοχής, την Left, Null, Right.

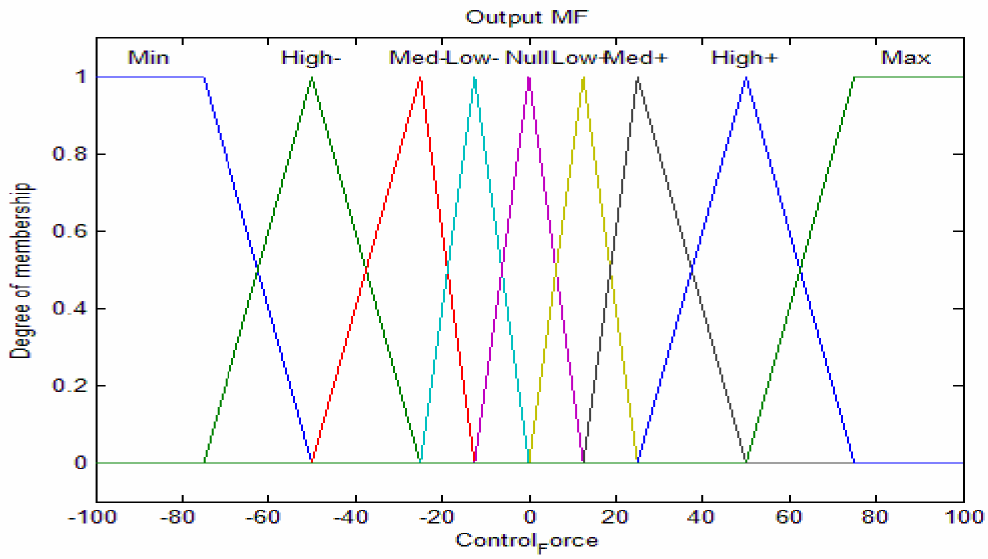
Η έξοδος του συστήματος είναι η μεταβλητή Control Force (δύναμη ελέγχου), η οποία είναι η δύναμη κατά διεύθυνση που πρέπει να ασκηθεί στο δοκάρι ώστε αυτό να επανέλθει στην θέση ηρεμίας του. Η μεταβλητή αυτή περιγράφεται από 9 συναρτήσεις συμμετοχής, τις εξής: Min, High-, Med-, Low-, Null, Low+, Med+, High+, Max.



3.1 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της πρώτης εισόδου (Displacement)

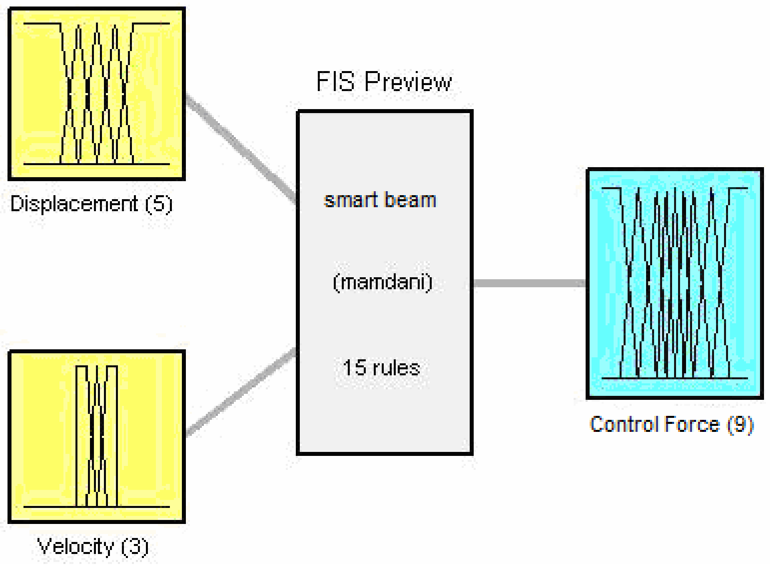


3.2 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της δεύτερης εισόδου (Velocity)



3.3 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου (Control Force)

Για να περιγράψουμε το παραπάνω σύστημα χρησιμοποιήσαμε 15 κανόνες, οι οποίοι επιλέχθηκαν με βάση την λογική και μετά από σχετικές δοκιμές. Οι κανόνες έχουν συντελεστή 1 και χρησιμοποιήθηκε ο λογικός τελεστής AND. Ως μέθοδος αποασαφοποίησης επιλέχθηκε η μέθοδος μέσου των μεγίστων. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά το σύστημα, οι κανόνες, τα διαγράμματα ταχύτητας, επιτάχυνσης και θέσης, καθώς και η επιφάνεια που περιγράφει την σχέση μεταξύ των εισόδων (Displacement & Velocity) και εξόδου (Control Force) σε ασαφές περιβάλλον.



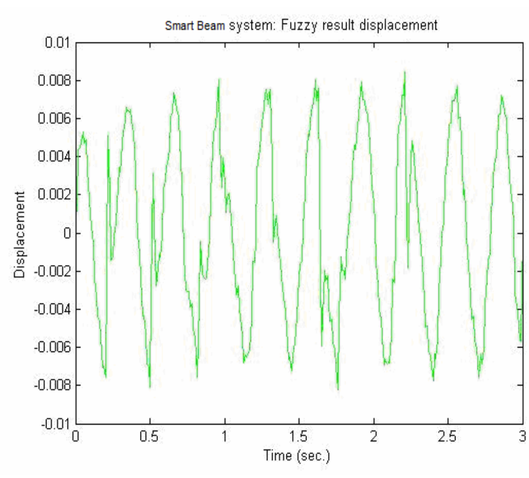
Σχήμα 6 Περιγραφή συστήματος αρχικής δοκιμής

Το σύνολο των κανόνων φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

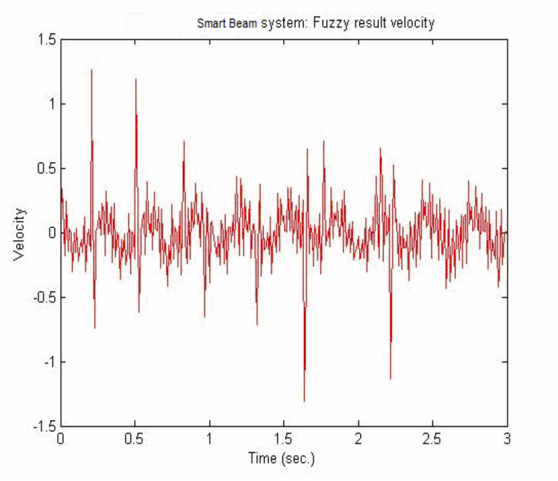
Displacement / Velocity	Far_L	Close_L	Equilibrium	Close_R	Far_R
Left	Max	Med^+	Low^+	Null	Low^-
Null	$High^+$	Low^+	Null	Low^-	$High^-$
Right	Low^+	Null	Low^-	Med^-	Min

Πίνακας 3 Κανόνες του αρχικού ασαφούς συστήματος

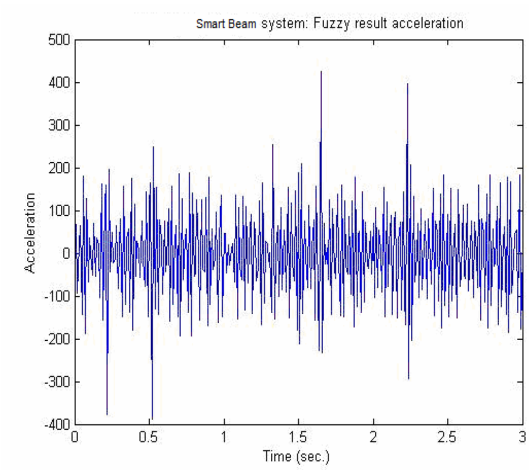
Ακολουθούν τα διαγράμματα και η επιφάνεια του ασαφούς συστήματος:



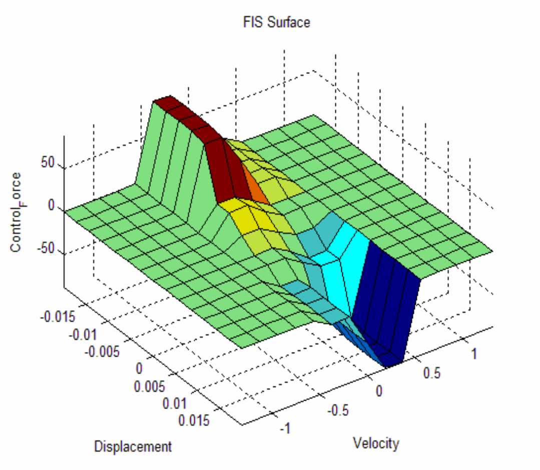
3.4 Διάγραμμα διακύμανσης θέσης



3.5 Διάγραμμα διακύμανσης ταχύτητας



3.6 Διάγραμμα διακύμανσης επιτάχυνσης



3.7 Επιφάνεια ασαφούς συστήματος

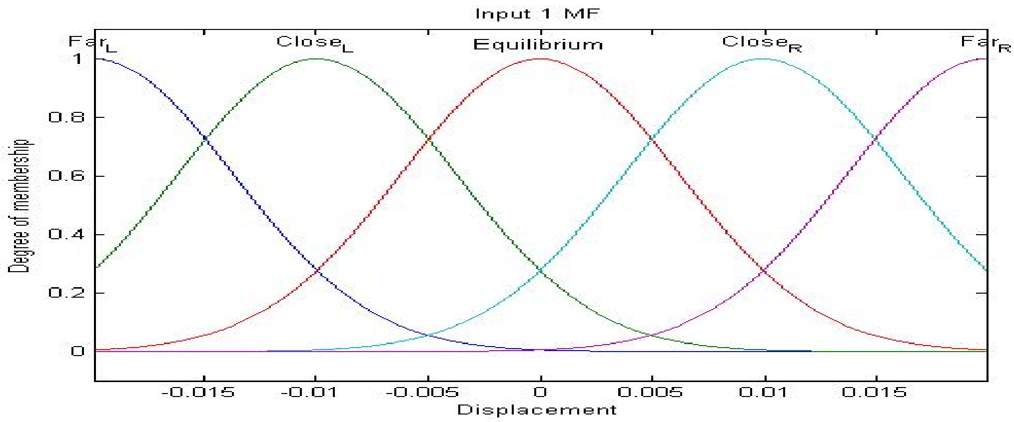
Εξάγουμε από το διάγραμμα τα εξής χαρακτηριστικά: ελάχιστη και μέγιστη τιμή, εύρος και μέσο εύρος τιμών.

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-0,008212	0,00844	0,01665	0,004637
Velocity	-1,314	1,256	2,57	0,2615
Acceleration	-387,6	424,8	812,3	121,7

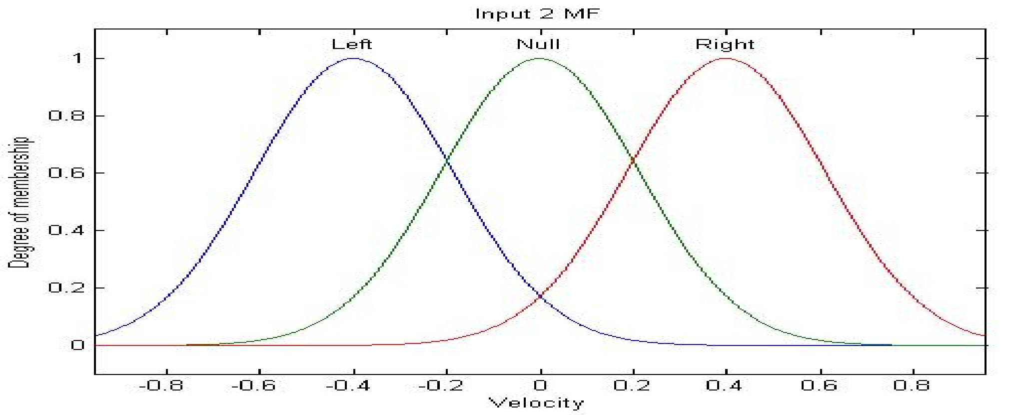
Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά διαγραμμάτων

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ GAUSS

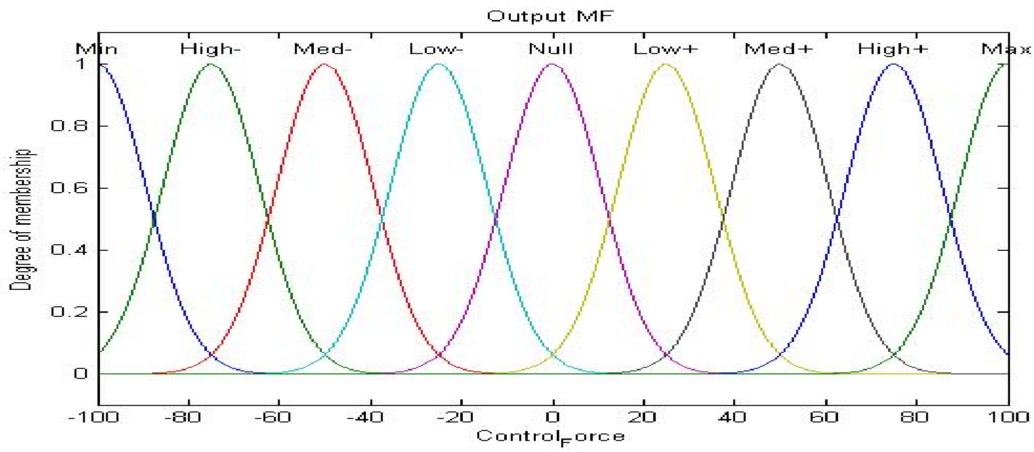
Αρχικά, θα επέμβουμε στην μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής των εισόδων και της εξόδου μετατρέποντάς τες από τριγωνικές σε μορφή Gauss. Το υπόλοιπο σύστημα παραμένει το ίδιο. Σύμφωνα με την θεωρία ελέγχου αναμένουμε μικρότερες τιμές ως προς την ταχύτητα.



4.1 Συνάρτηση συμμετοχής μορφής Gauss της πρώτης εισόδου (Displacement)

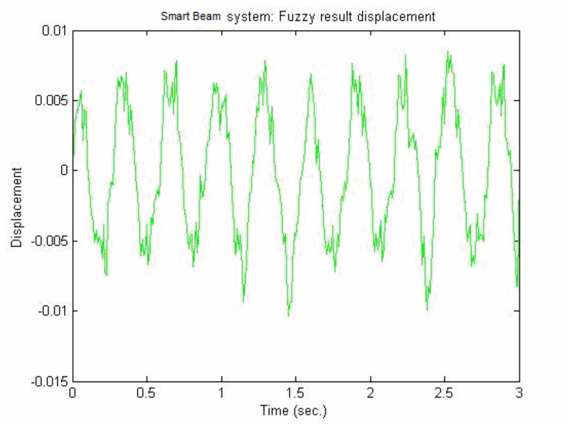


4.2 Συνάρτηση συμμετοχής μορφής Gauss της δεύτερης εισόδου (Velocity)

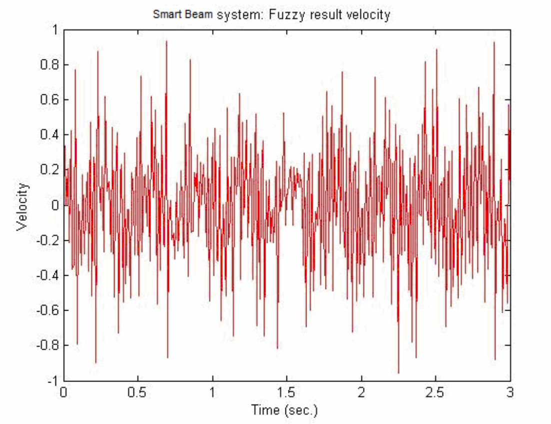


4.3 Συνάρτηση συμμετοχής μορφής Gauss της εξόδου (Control Force)

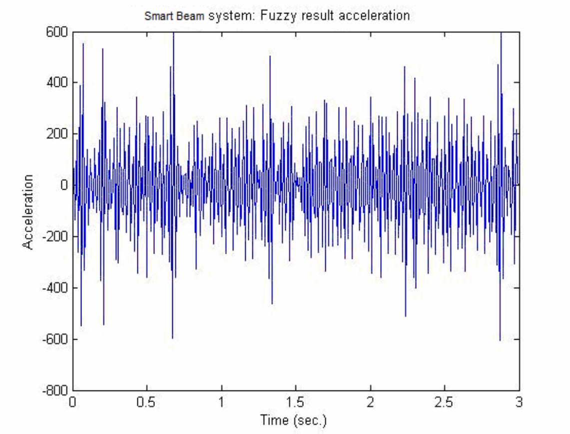
Ακολουθούν τα διαγράμματα και η επιφάνεια του ασαφούς συστήματος:



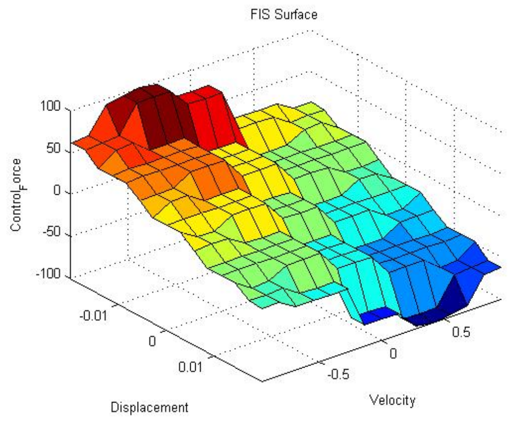
4.4 Διάγραμμα διακύμανσης θέσης



4.5 Διάγραμμα διακύμανσης ταχύτητας



4.6 Διάγραμμα διακύμανσης επιτάχυνσης



4.7 Επιφάνεια ασαφούς συστήματος

Εξάγουμε από τα διαγράμματα τα εξής χαρακτηριστικά: ελάχιστη και μέγιστη τιμή, εύρος και μέσο εύρος τιμών.

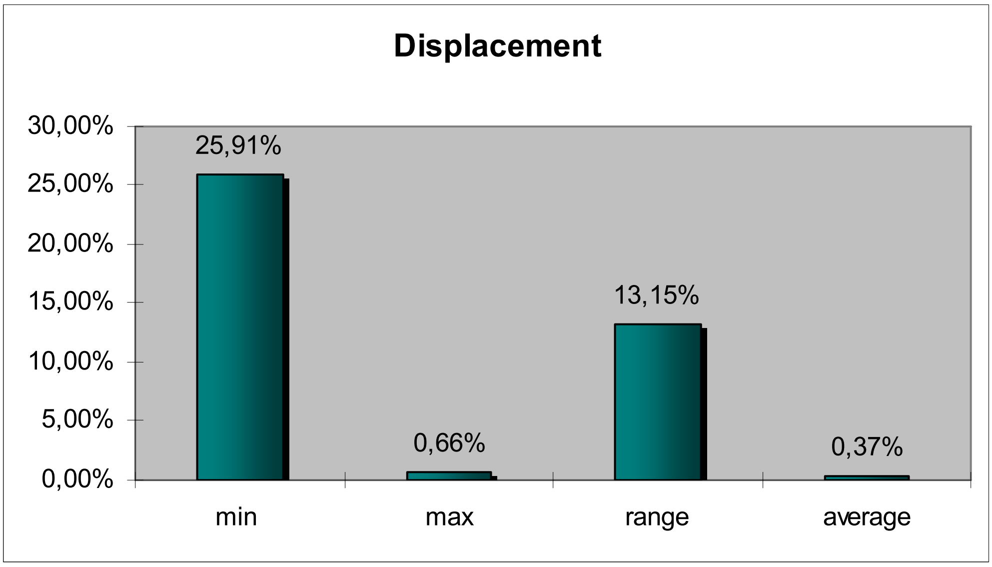
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-0,01034	0,008496	0,01884	0,004654
Velocity	-0,9567	0,933	1,89	0,3859
Acceleration	-603,8	597,2	1201	232,6

Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά διαγραμμάτων

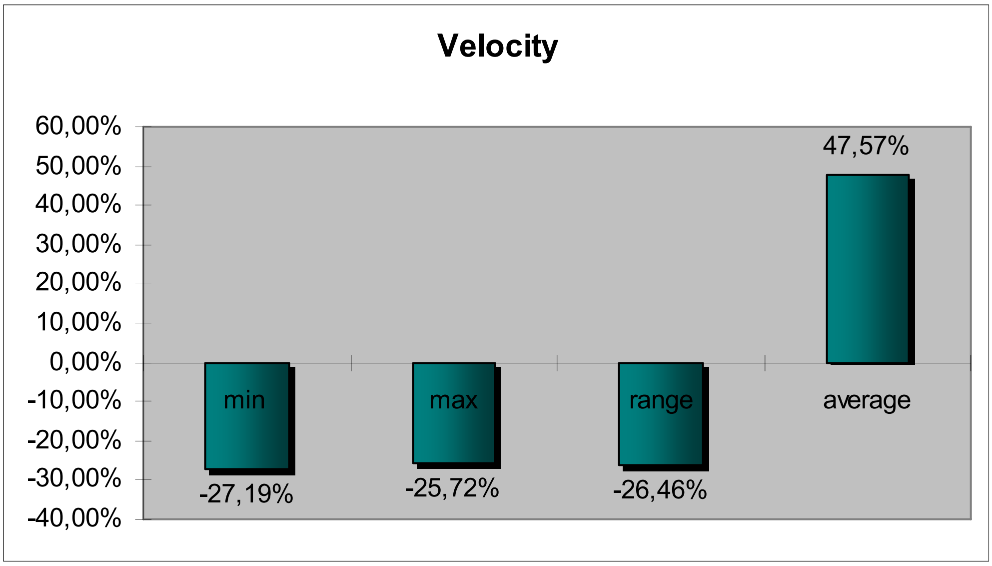
Συγκρίνουμε τα νέα μεγέθη με τα μεγέθη της αρχικής δοκιμής και καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα μέσω της μαθηματικής σχέσης (β-α)/α%, όπου β η παραμετροποιημένη δοκιμή και α η αρχική δοκιμή.

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	25,91%	0,66%	13,15%	0,37%
Velocity	-27,19%	-25,72%	-26,46%	47,57%
Acceleration	55,78%	40,58%	47,85%	91,13%

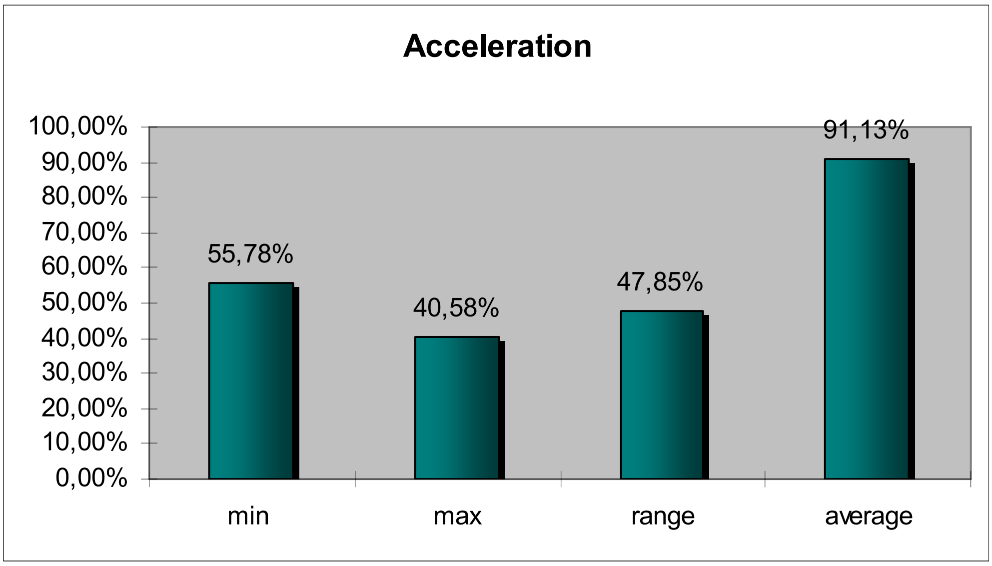
Πίνακας 6 Συγκρίσεις τιμών με την αρχική δοκιμή (%)



4.8 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης (%)

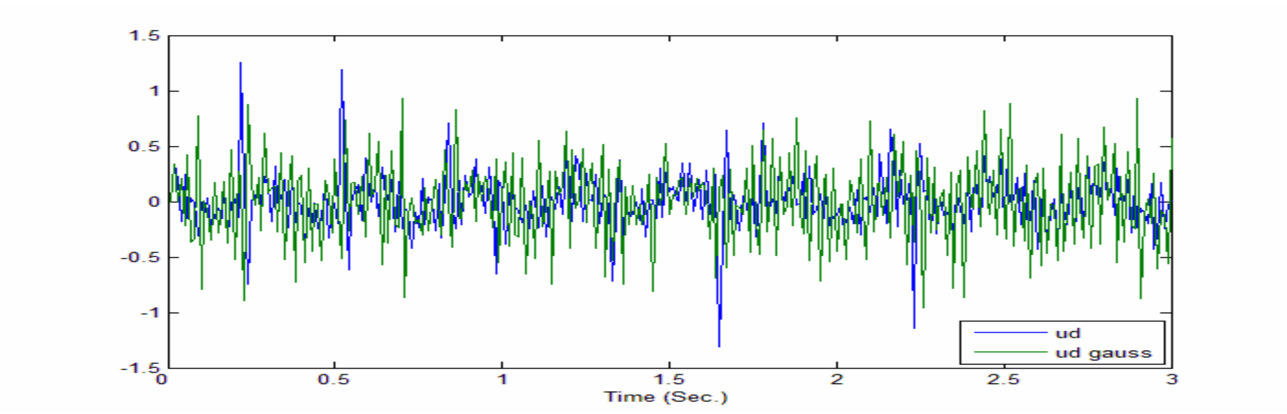


4.9 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας (%)



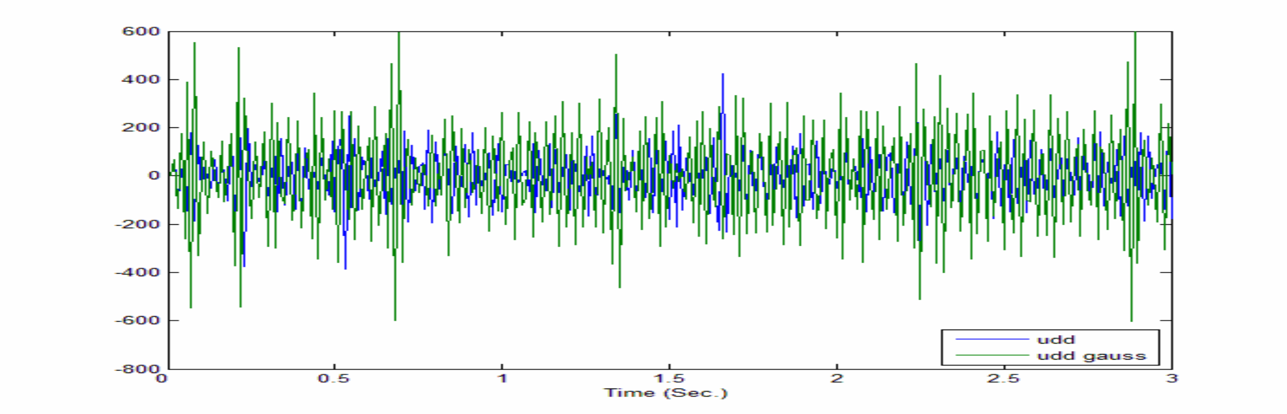
4.10 Διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης (%)

Βλέπουμε ότι η μετατροπή των συναρτήσεων συμμετοχής από τριγωνικές σε Gauss μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα ως προς την ταχύτητα της προβόλου, καθώς έχουμε μια μείωση της τάξης του 27,19% στο κάτω όριο, μια μείωση της τάξης του 25,72% στο άνω όριο και μια συνολική μείωση του εύρους τιμών της ταχύτητας της τάξης του 26,46%. Βλέπουμε όμως ότι αυξήθηκε το μέσο εύρος τιμών της ταχύτητας κατά 47,57%.



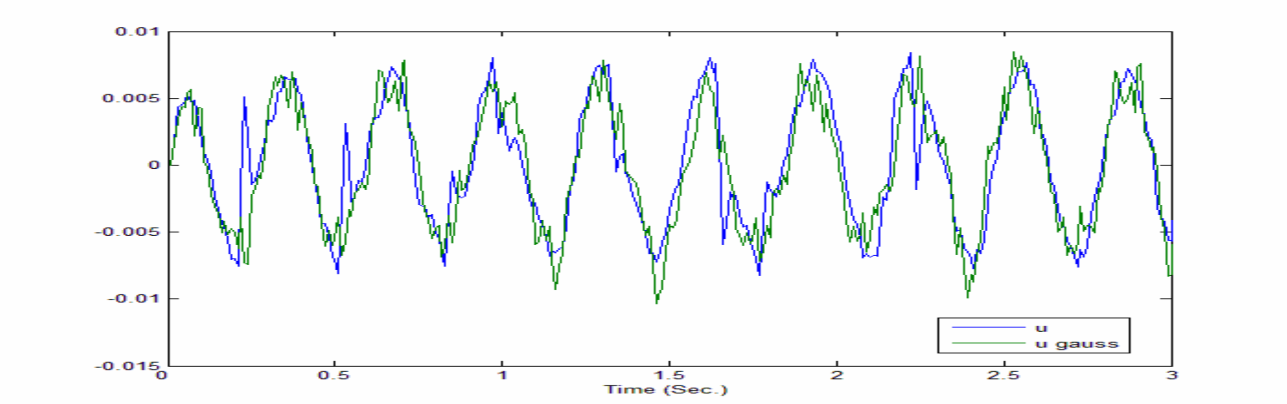
4.11 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας

Σε σχέση τώρα με την επιτάχυνση που αναπτύσσεται βλέπουμε ότι έχουμε αύξηση σε όλα τα μεγέθη, 55,78% στο κάτω όριο, 40,58% στο άνω, 47,58% στο συνολικό εύρος τιμών και 91,13% στο μέσο εύρος τιμών της.



4.12 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης

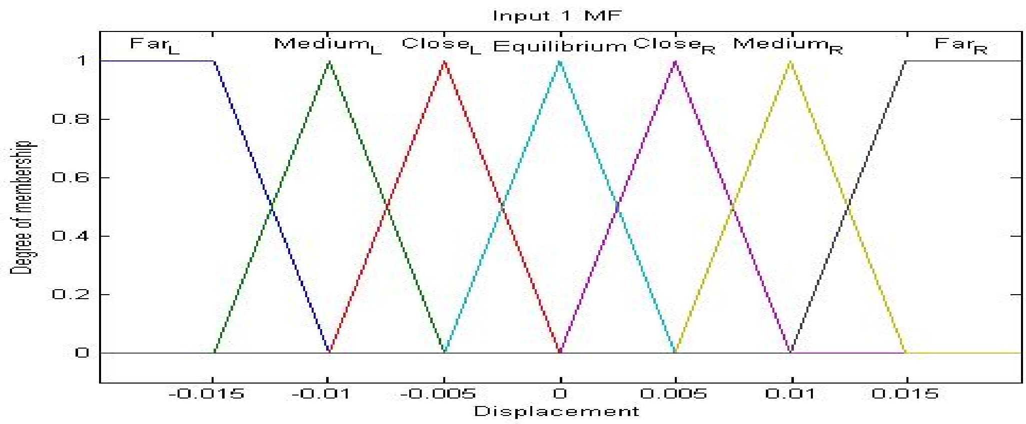
Επίσης, παρατηρούμε ότι ο έλεγχος είναι λιγότερο αποτελεσματικός καθώς έχουμε αύξηση της τάξης του 25,91% στο κάτω όριο του πεδίου τιμών της ταλάντωσης, οριακή αύξηση 0,66% στο άνω όριο, αύξηση στο συνολικό εύρος τιμών κατά 13,15% και μηδενική αύξηση του μέσου εύρους τιμών κατά 0,37%.



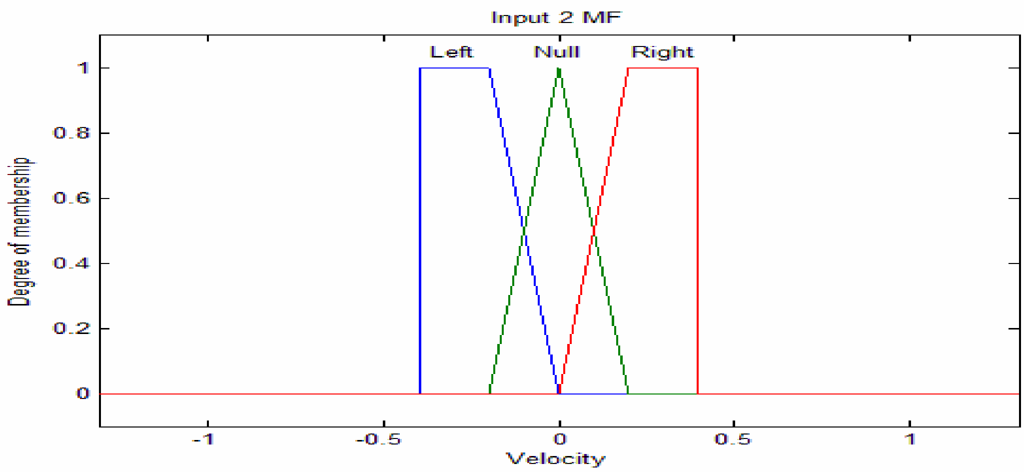
4.13 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης

5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ 1ης ΕΙΣΟΔΟΥ (DISPLACEMENT)

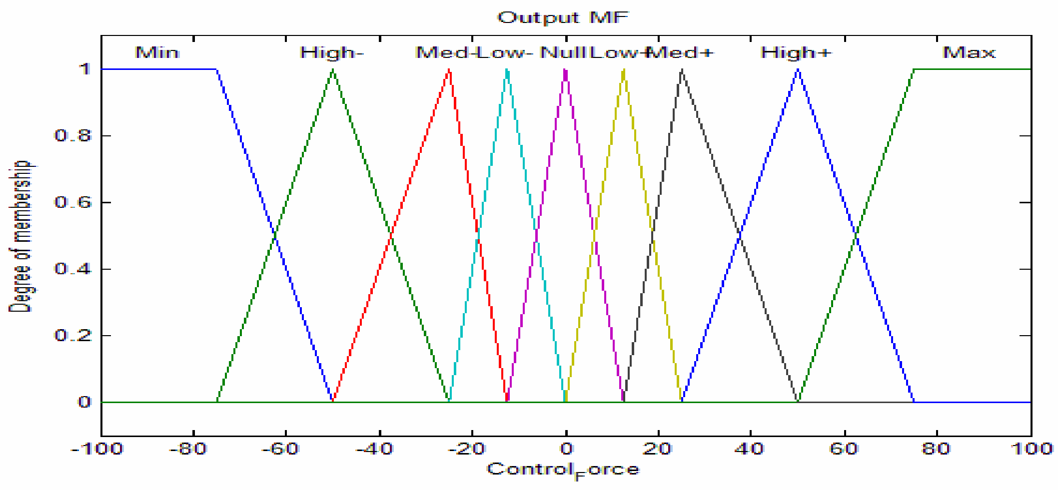
Θα προσθέσουμε στο αρχικό μας σύστημα, στην μεταβλητή Displacement δύο ακόμα συναρτήσεις συμμετοχής, την Medium_L και την Medium_R, ανάμεσα στην Far_L και Close_L και Close_R και Far_R αντίστοιχα. Η άλλη είσοδος του συστήματος αλλά και η έξοδος θα παραμείνουν οι ίδιες. Έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα.



5.1 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της πρώτης εισόδου (Displacement)

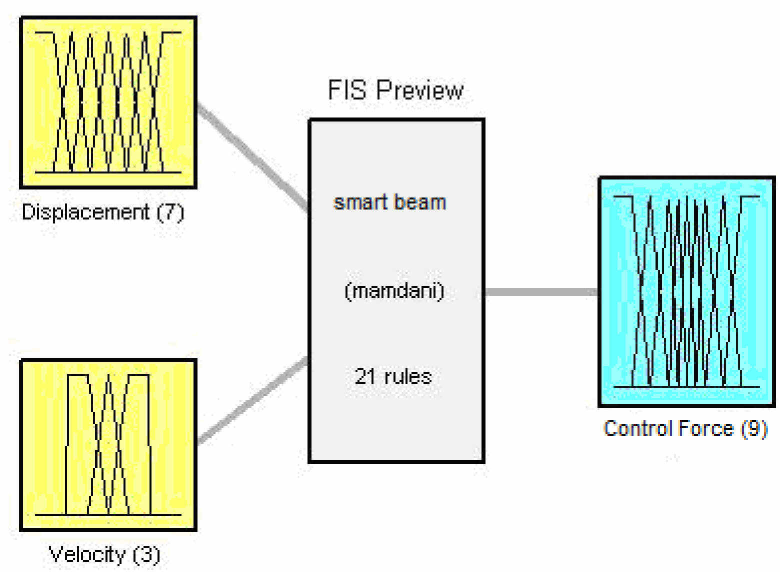


5.2 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της δεύτερης εισόδου (Velocity)



5.3 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου (Control Force)

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούμε 21 κανόνες αντίστοιχα, μετά από σχετικές δοκιμές. Οι κανόνες αυτοί έχουν συντελεστή 1 και συνδέονται μεταξύ τους με τον τελεστή and. Ο ελεγκτής παρέμεινε ο ίδιος. Ως μέθοδος αποασαφοποίησης επιλέχθηκε η μέθοδος μέσου των μεγίστων. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά το σύστημα, οι κανόνες, τα διαγράμματα ταχύτητας, επιτάχυνσης και θέσης, καθώς και η επιφάνεια που περιγράφει την σχέση μεταξύ των εισόδων (Displacement & Velocity) και εξόδου (Control Force) σε ασαφές περιβάλλον.



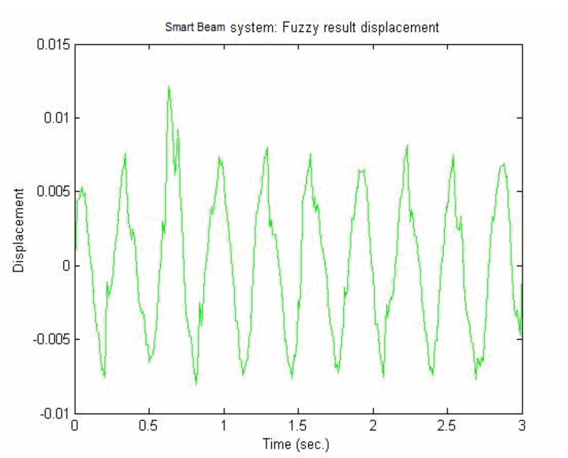
Σχήμα 7 Περιγραφή συστήματος παραμετροποίησης 1ης εισόδου

Το σύνολο των κανόνων φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

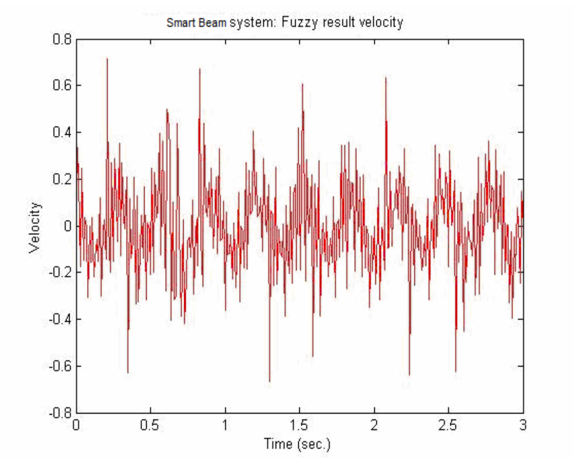
Displacement / Velocity	Far_L	Med_L	Close_L	Equilibrium	Close_R	Med_R	Far_R
Left	Max	High^{+}	Med^{+}	Low^{+}	Null	Low^{-}	Med^{-}
Null	High^{+}	Med^{+}	Low^{+}	Null	Low^{-}	Med^{-}	High^{-}
Right	Med^{+}	Low^{+}	Null	Low^{-}	Med^{-}	High^{-}	Min

Πίνακας 7 Κανόνες του ασαφούς συστήματος (με τροποποιημένη την 1η είσοδο)

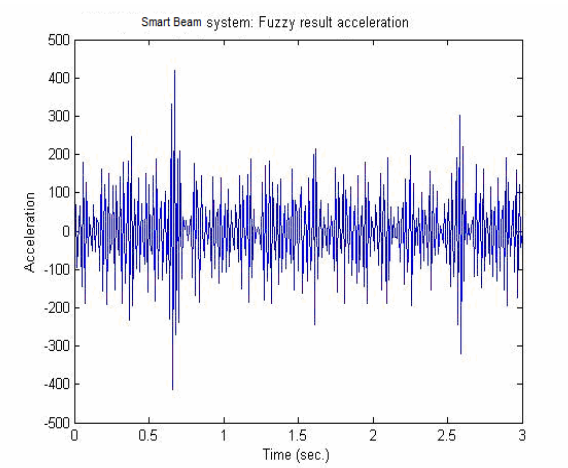
Ακολουθούν τα διαγράμματα και η επιφάνεια του ασαφούς συστήματος:



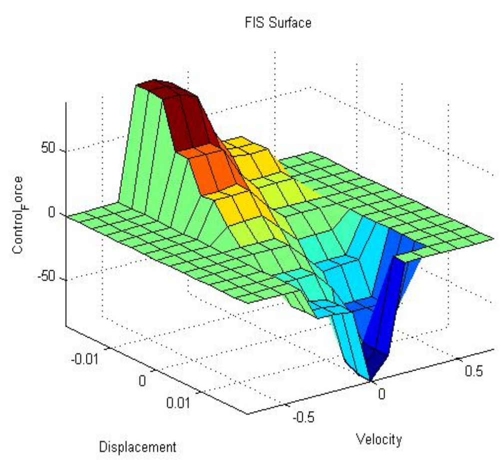
5.4 Διάγραμμα διακύμανσης θέσης



5.5 Διάγραμμα διακύμανσης ταχύτητας



5.6 Διάγραμμα διακύμανσης επιτάχυνσης



5.7 Επιφάνεια ασαφούς συστήματος

Εξάγουμε από τα διαγράμματα τα εξής χαρακτηριστικά: ελάχιστη και μέγιστη τιμή, εύρος και μέσο εύρος τιμών.

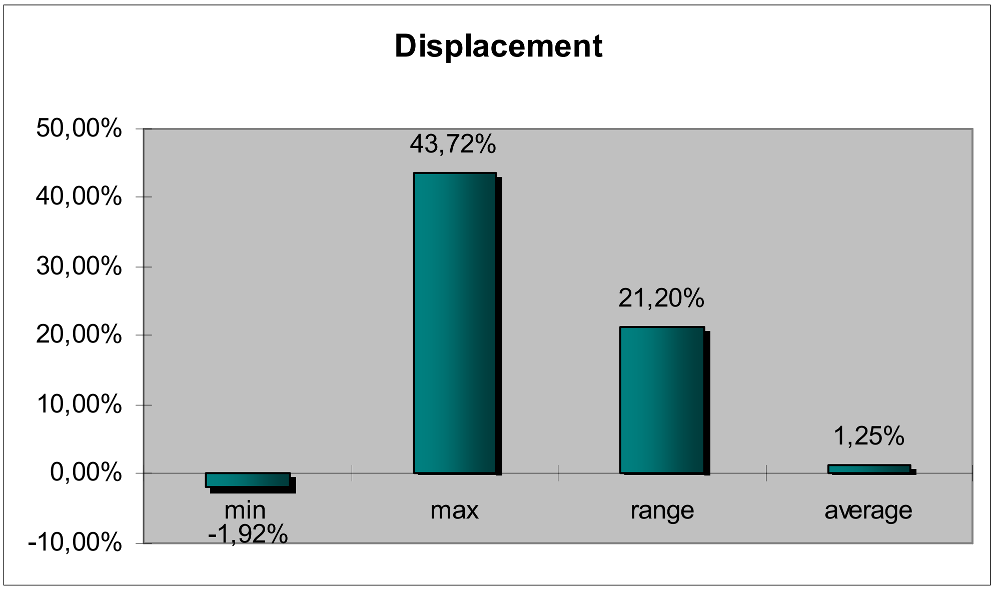
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-0,008054	0,01213	0,02018	0,004712
Velocity	-0,6657	0,7136	1,379	0,2233
Acceleration	-415	418,5	833,5	122,1

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά διαγραμμάτων

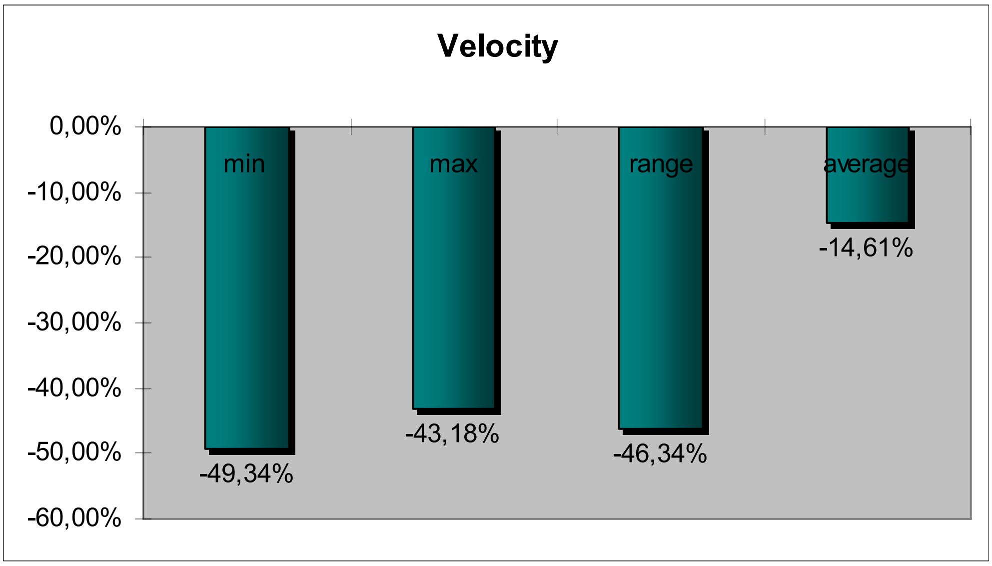
Συγκρίνουμε τα νέα μεγέθη με τα μεγέθη της αρχικής δοκιμής και καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα μέσω της μαθηματικής σχέσης (β-α)/α%, όπου β η παραμετροποιημένη δοκιμή και α η αρχική δοκιμή.

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-1,92%	43,72%	21,20%	1,25%
Velocity	-49,34%	-43,18%	-46,34%	-14,61%
Acceleration	7,07%	-1,48%	2,61%	0,33%

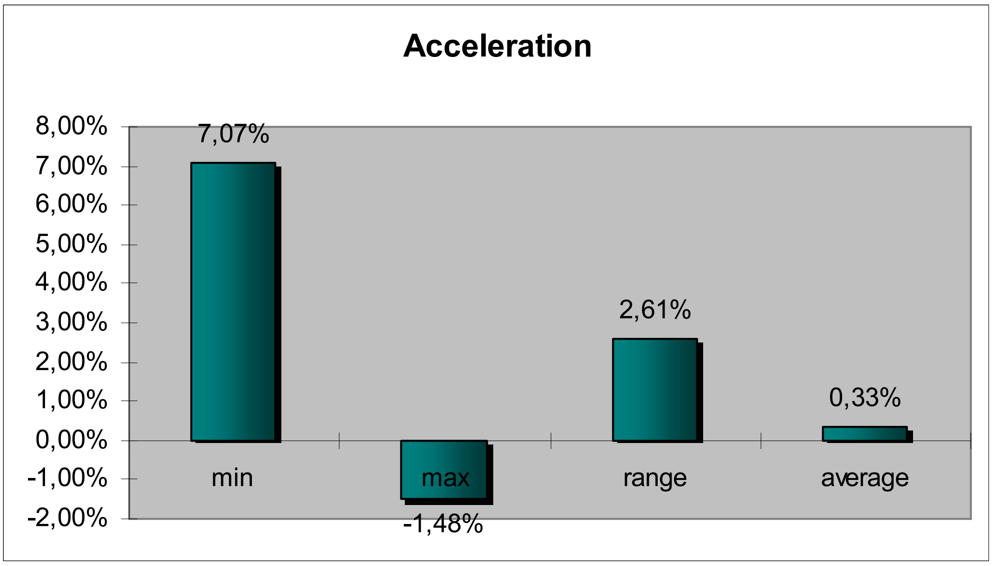
Πίνακας 9 Συγκρίσεις τιμών με την αρχική δοκιμή (%)



5.8 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης (%)

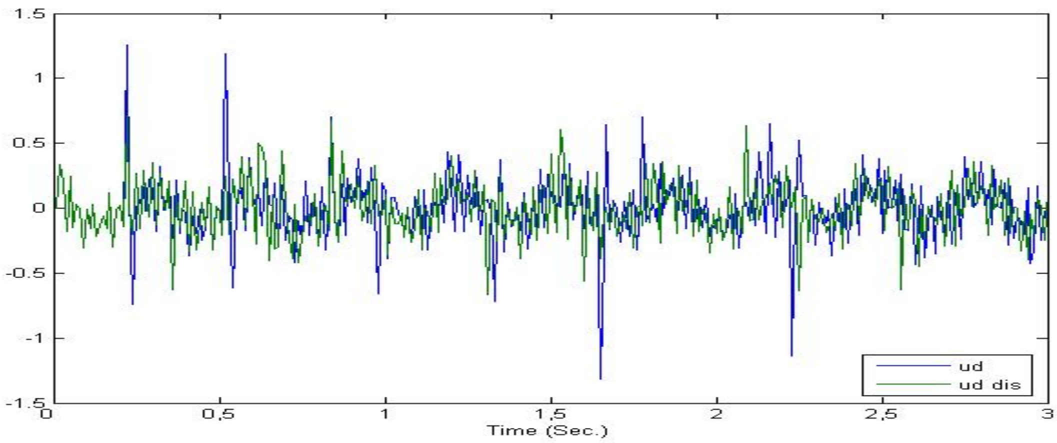


5.9 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας (%)



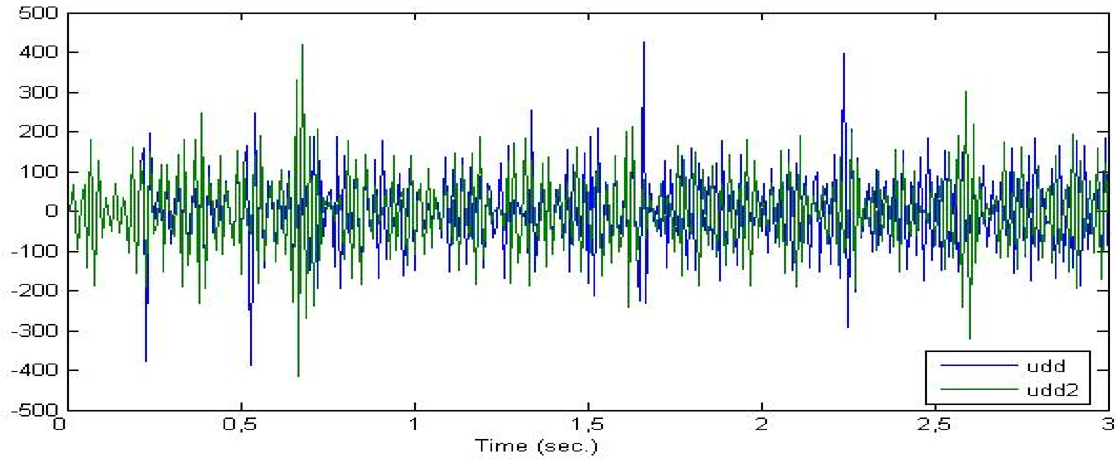
5.10 Διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης (%)

Παρατηρούμε ότι ο εμπλουτισμός της πρώτης εισόδου (Displacement) μας δίνει εξαιρετικά καλύτερα αποτελέσματα ως προς την ταχύτητα της προβόλου, καθώς έχουμε μια μείωση της τάξης του 49,34% στο κάτω όριο, μια μείωση της τάξης του 43,18% στο άνω όριο και μια συνολική μείωση του εύρους τιμών της ταχύτητας της τάξης του 46,34%. Βλέπουμε όμως ότι μειώθηκε και το μέσο εύρος τιμών της ταχύτητας κατά 14,61%.



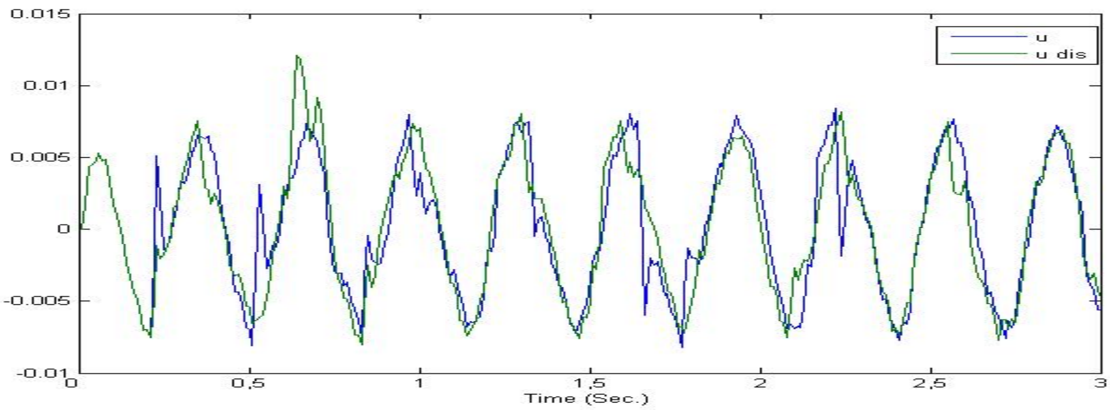
5.11 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας

Σε σχέση τώρα με την επιτάχυνση που αναπτύσσεται βλέπουμε ότι έχουμε μια αύξηση 7,07% στο κάτω όριο, μια μείωση 1,48% στο άνω, αύξηση 2,61% στο συνολικό εύρος τιμών και ουσιαστικά ίδιο μέσο εύρος τιμών (ισχνή αύξηση 0,33%).



5.12 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης

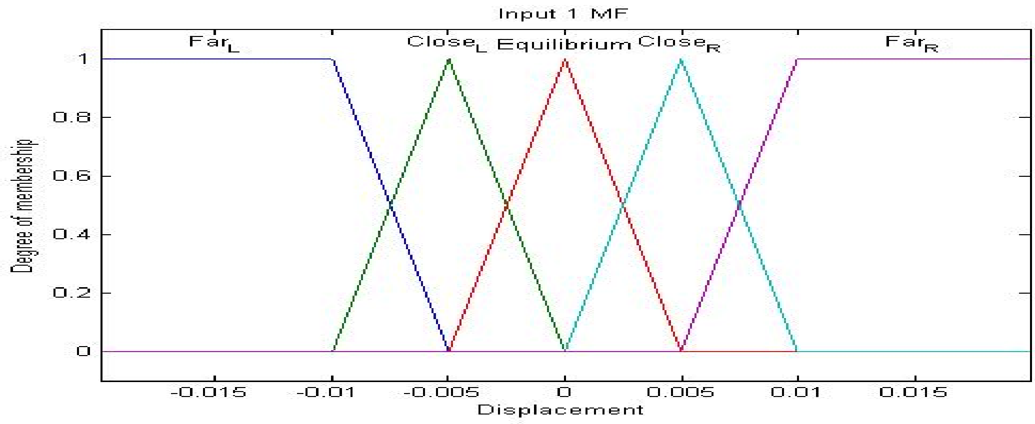
Σχετικά με την ταλάντωση, δηλαδή την αποτελεσματικότητα του ελέγχου, έχουμε μείωση του κάτω ορίου κατά 1,92%, αύξηση του πάνω ορίου κατά 43,72%, αύξηση συνεπώς του εύρους κατά 21,20%, και αύξηση του μέσου εύρους τιμών κατά 1,25%.



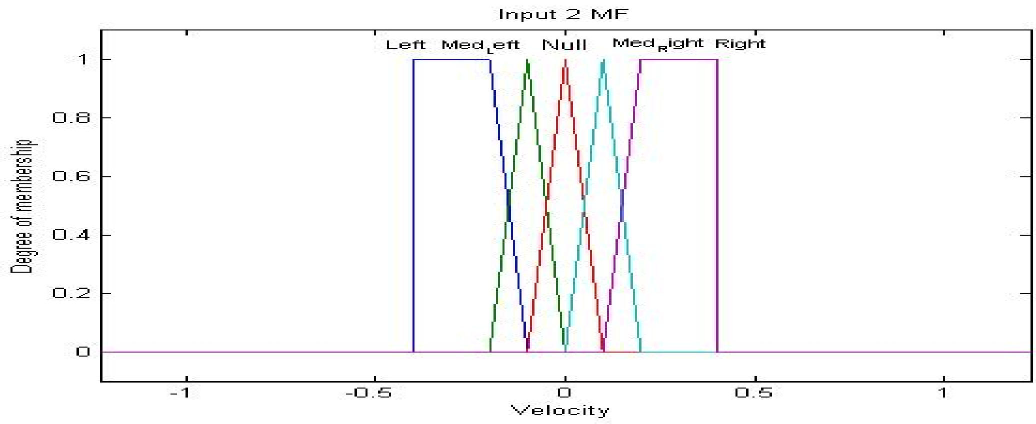
5.13 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης

6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ 2ης ΕΙΣΟΔΟΥ (VELOCITY)

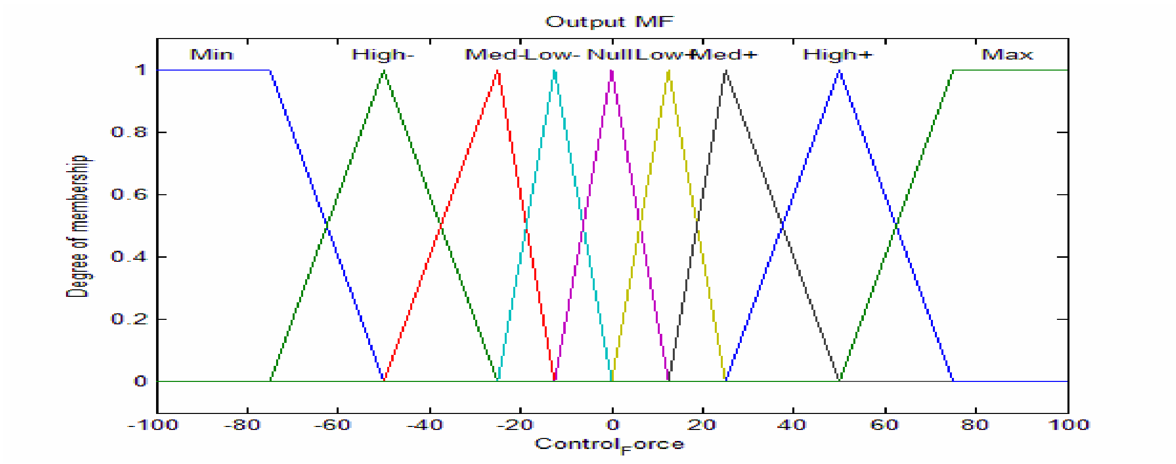
Θα προσθέσουμε στο αρχικό μας σύστημα, στην μεταβλητή Velocity δύο ακόμα συναρτήσεις συμμετοχής, την Med_L και την Med_R, ανάμεσα στην Left και Null και Null και Right αντίστοιχα. Η άλλη είσοδος του συστήματος αλλά και η έξοδος θα παραμείνουν οι ίδιες. Οπότε έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα.



6.1 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της πρώτης εισόδου (Displacement)

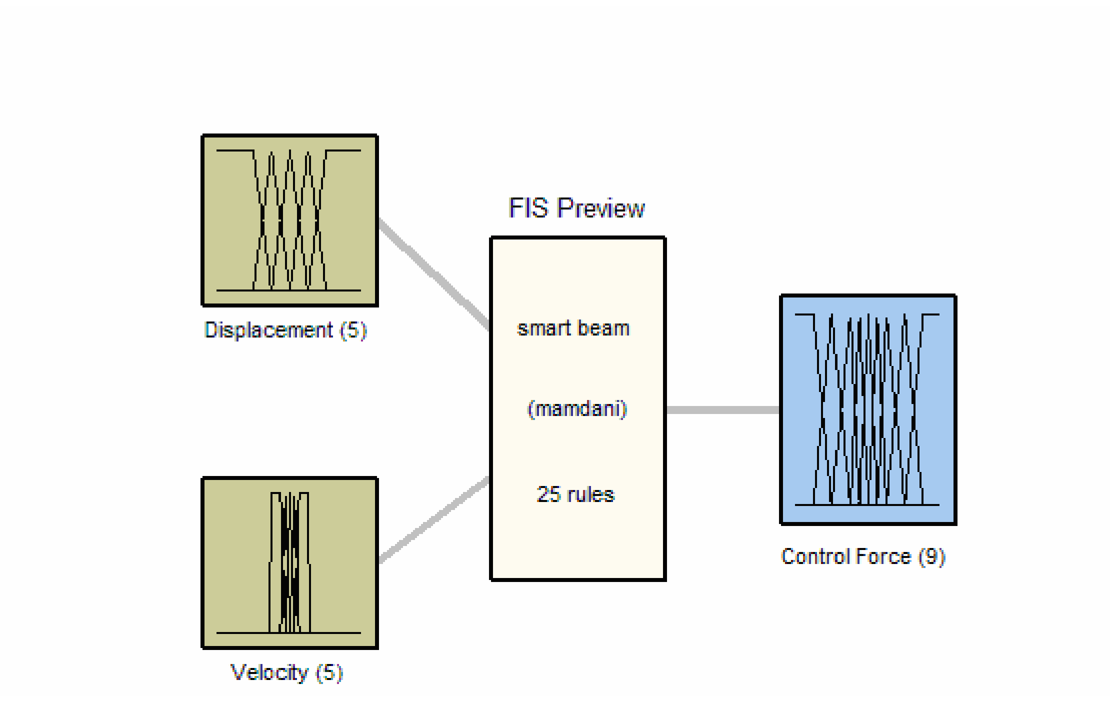


6.2 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της δεύτερης εισόδου (Velocity)



6.3 Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου (Control Force)

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήσαμε 25 κανόνες, εμπειρικά και μετά από σχετικές δοκιμές και σύγκριση αποτελεσμάτων. Οι κανόνες αυτοί έχουν συντελεστή 1 και συνδέονται μεταξύ τους με τον τελεστή and. Ο ελεγκτής παραμένει ο ίδιος. Ως μέθοδος αποασαφοποίησης επιλέχθηκε η μέθοδος μέσου μεγίστου. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά το σύστημα, οι κανόνες, τα διαγράμματα ταχύτητας, επιτάχυνσης και θέσης, καθώς και η επιφάνεια που περιγράφει την σχέση μεταξύ των εισόδων (Displacement & Velocity) και εξόδου (Control Force) σε ασαφές περιβάλλον.



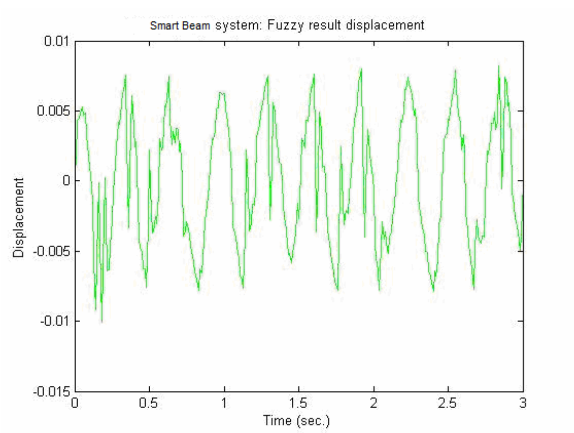
Σχήμα 8 Περιγραφή συστήματος παραμετροποίησης 2ης εισόδου

Το σύνολο των κανόνων όπως προέκυψαν φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

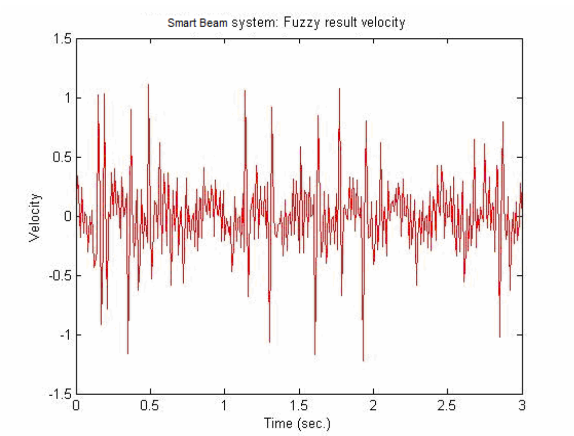
Displacement / Velocity	Far_L	Close_L	Equilibrium	Close_R	Far_R
Left	Max	Med$^+$	Low$^+$	Null	Low$^-$
Med_L	High$^+$	Med$^+$	Low$^+$	Null	Med$^-$
Null	High$^+$	Low$^+$	Null	Low$^-$	High$^-$
Med_R	Med$^+$	Null	Low$^-$	Med$^-$	High$^-$
Right	Low$^+$	Null	Low$^-$	Med$^-$	Min

Πίνακας 10 Κανόνες του ασαφούς συστήματος (με τροποποιημένη την 2^η είσοδο)

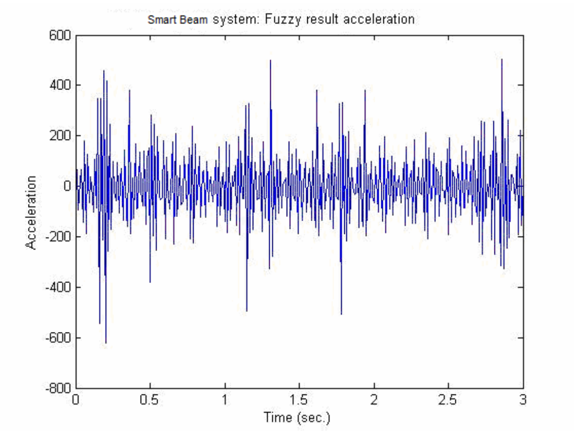
Ακολουθούν τα διαγράμματα και η επιφάνεια του ασαφούς συστήματος:



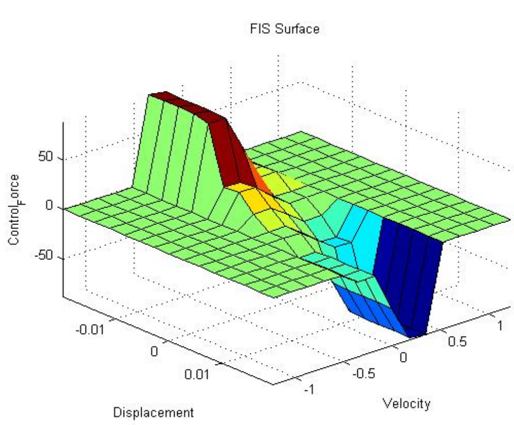
6.4 Διάγραμμα διακύμανσης θέσης



6.5 Διάγραμμα διακύμανσης ταχύτητας



6.6 Διάγραμμα διακύμανσης επιτάχυνσης



6.7 Επιφάνεια ασαφούς συστήματος

Εξάγουμε από τα διαγράμματα τα εξής χαρακτηριστικά: ελάχιστη και μέγιστη τιμή, εύρος, και μέσο εύρος τιμών.

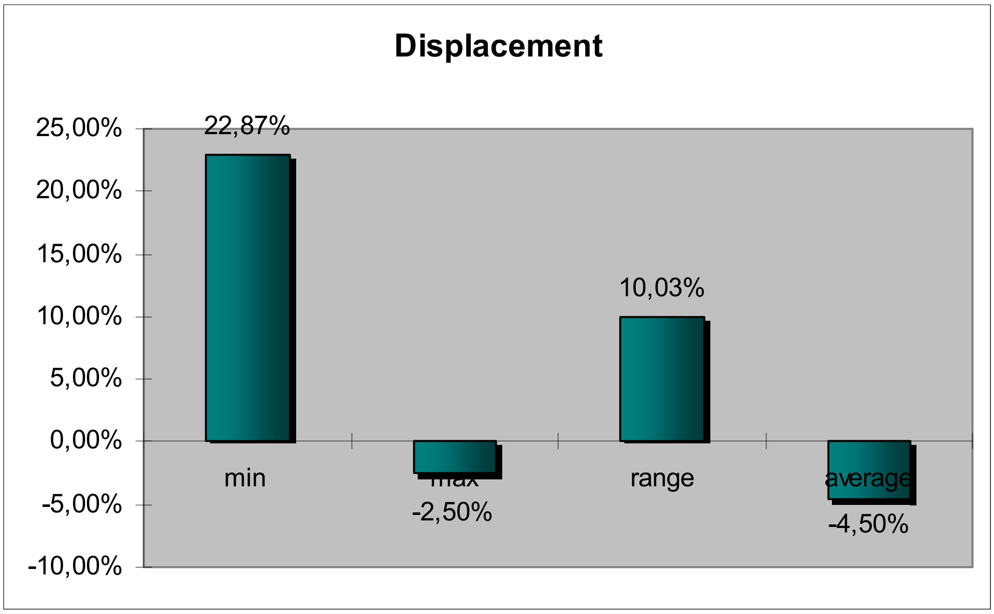
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-0,01009	0,008229	0,01832	0,0045
Velocity	-1,228	1,106	2,334	0,3358
Acceleration	-621,2	505,1	1126	168,3

Πίνακας 11 Χαρακτηριστικά διαγραμμάτων

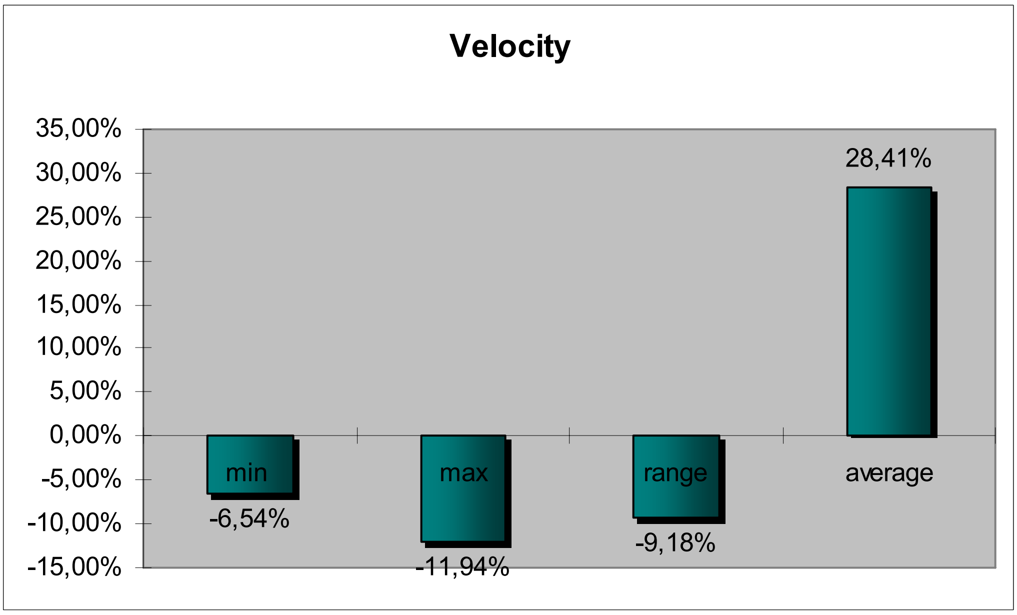
Συγκρίνουμε τα νέα μεγέθη με τα μεγέθη της αρχικής δοκιμής και καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα μέσω της μαθηματικής σχέσης (β-α)/α%, όπου β η παραμετροποιημένη δοκιμή και α η αρχική δοκιμή.

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	22,87%	-2,50%	10,03%	-4,50%
Velocity	-6,54%	-11,94%	-9,18%	28,41%
Acceleration	60,27%	18,90%	38,62%	38,29%

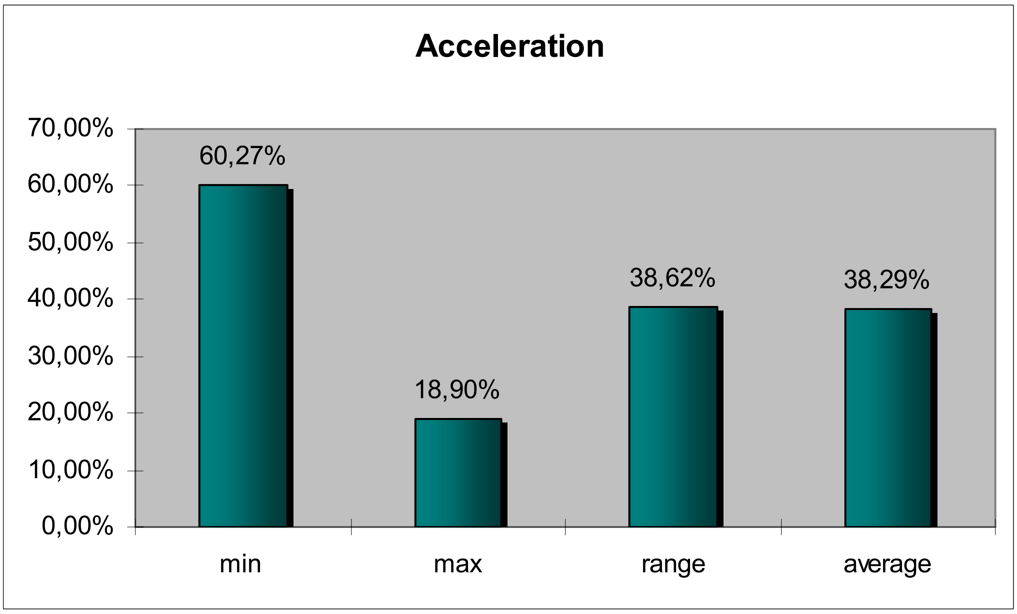
Πίνακας 12 Συγκρίσεις τιμών με την αρχική δοκιμή (%)



6.8 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης (%)

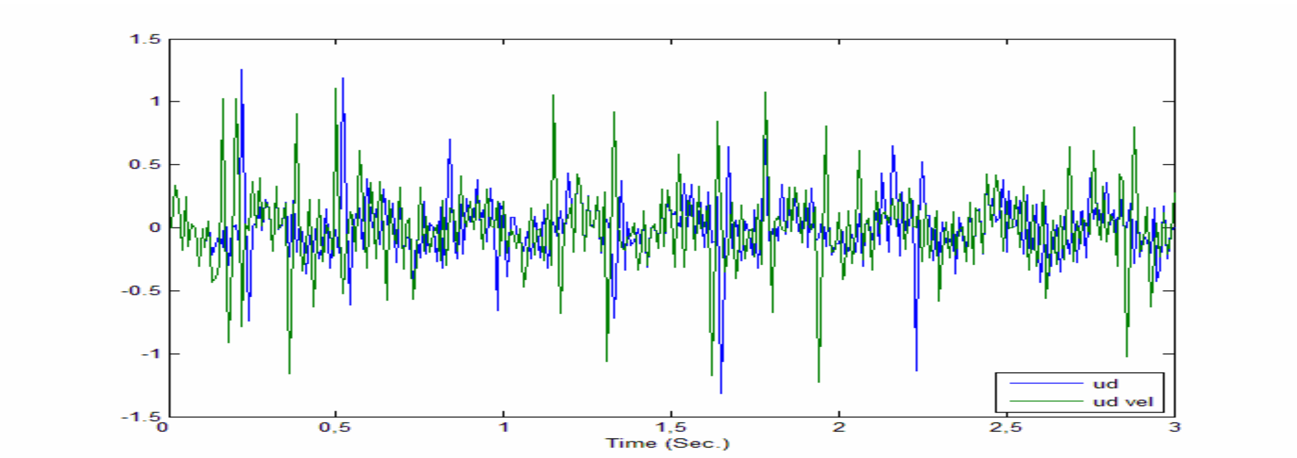


6.9 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας (%)



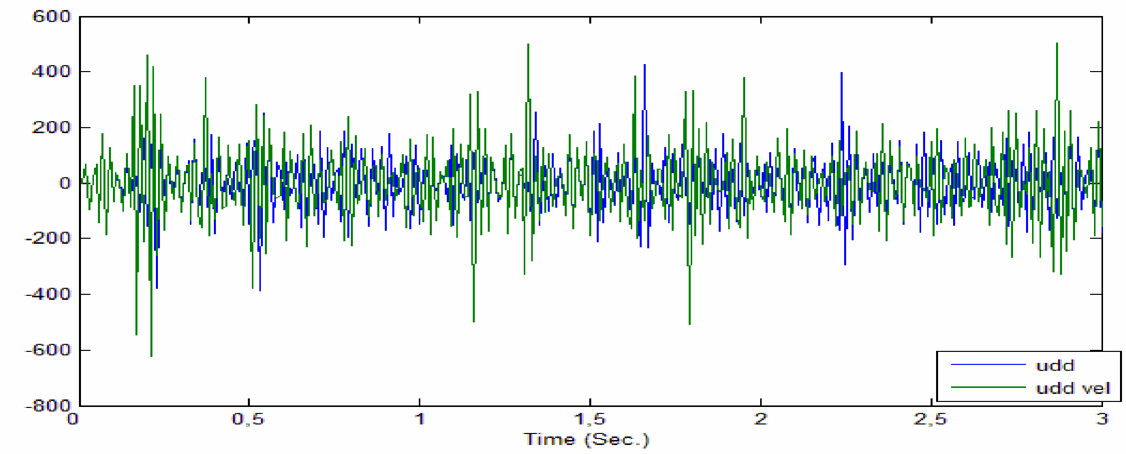
6.10 Διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης (%)

Παρατηρούμε ότι ο εμπλουτισμός της δεύτερης εισόδου (Velocity) μας δίνει σχετικά καλύτερα αποτελέσματα ως προς την ταχύτητα της προβόλου, καθώς έχουμε μια μείωση της τάξης του 6,54% στο κάτω όριο, μια μείωση της τάξης του 11,94% στο άνω όριο και μια συνολική μείωση του εύρους τιμών της ταχύτητας της τάξης του 9,18%. Βλέπουμε όμως ότι αυξήθηκε το μέσο εύρος τιμών της ταχύτητας κατά 28,41%.



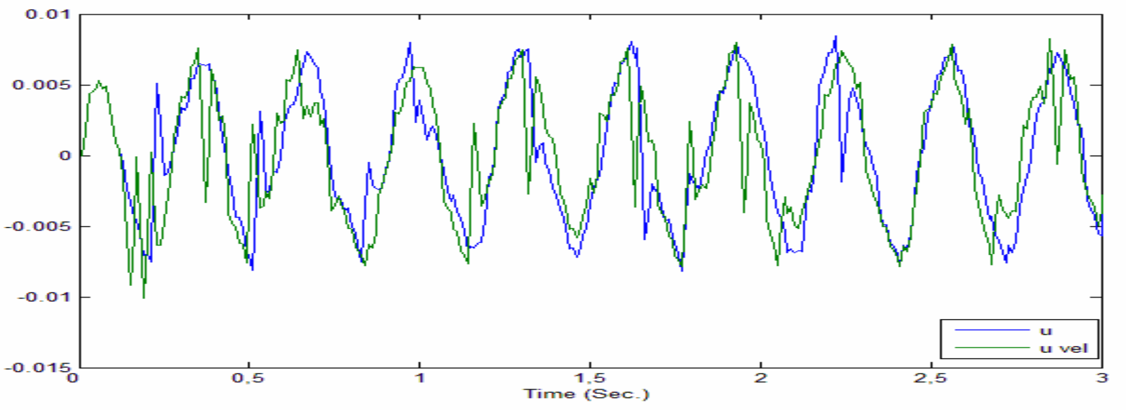
6.11 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας

Σε σχέση τώρα με την επιτάχυνση που αναπτύσσεται βλέπουμε ότι έχουμε αύξηση σε όλα τα μεγέθη, 60,27% στο κάτω όριο, 18,90% στο άνω, 38,62% στο συνολικό εύρος τιμών και 38,29% στο μέσο εύρος τιμών της.



6.12 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης

Σχετικά με την ταλάντωση, δηλαδή την αποτελεσματικότητα του ελέγχου, έχουμε αύξηση του κάτω ορίου κατά 22,87%, μείωση του πάνω ορίου κατά 2,5%, αύξηση συνεπώς του εύρους κατά 10,03%, αλλά έχουμε μείωση του μέσου εύρους τιμών κατά 4,50%. Δηλαδή το σύστημα δουλεύει ποιο ομαλά αλλά έχει ποιο έντονο χτύπημα.

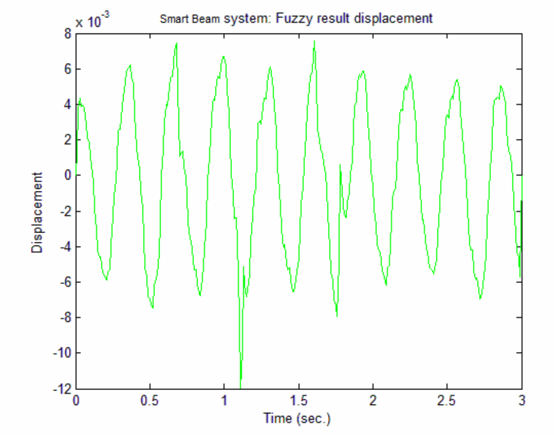


6.13 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης

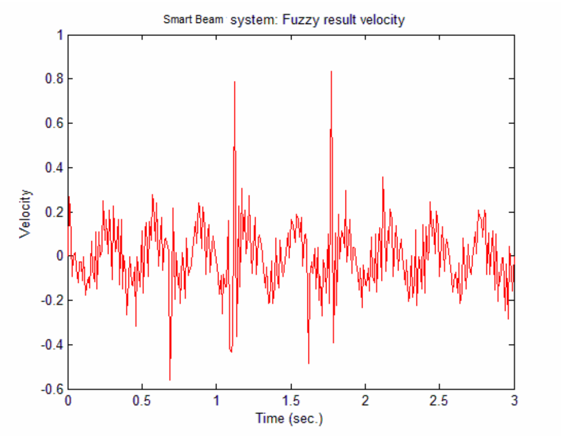
7. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτή την παράγραφο θα δούμε την συμπεριφορά του συστήματός μας εάν επέμβουμε στην απόσβεση. Όσο πιο μεγάλη απόσβεση έχει το σύστημα τόσο πιο μικρές οι αναμενόμενες αιχμές σε ταχύτητα και επιτάχυνση. Εν προκειμένω αυξήσαμε την απόσβεση κατά 50%, και παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα. Το υπόλοιπο σύστημα παρέμεινε το ίδιο, οπότε και έχουμε 15 κανόνες, οι οποίοι έχουν συντελεστή 1, και συνδέονται με τον τελεστή and. Οι συναρτήσεις συμμετοχής παραμένουν οι ίδιες.

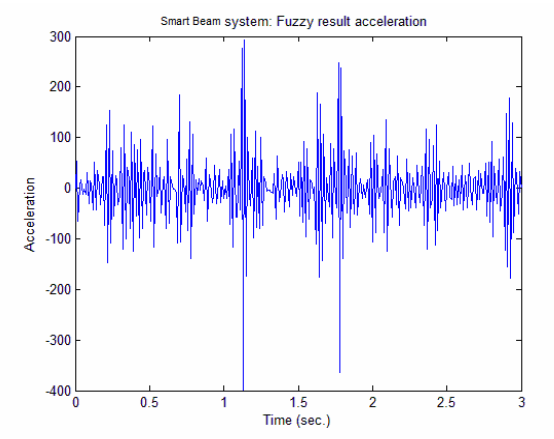
Ακολουθούν τα διαγράμματα και η επιφάνεια του ασαφούς συστήματος.



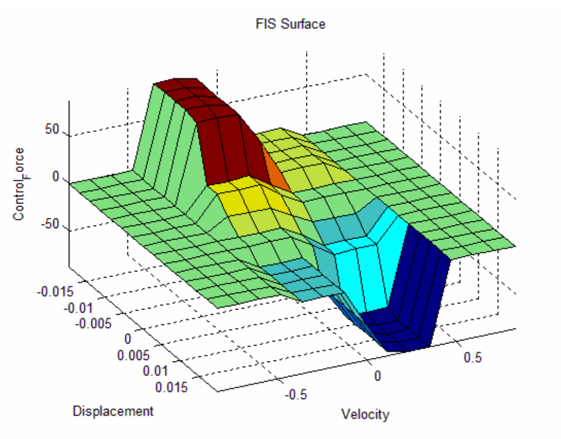
7.1 Διάγραμμα διακύμανσης θέσης



7.2 Διάγραμμα διακύμανσης ταχύτητας



7.3 Διάγραμμα διακύμανσης επιτάχυνσης



7.4 Επιφάνεια ασαφούς συστήματος

Εξάγουμε από τα διαγράμματα τα εξής χαρακτηριστικά: ελάχιστη και μέγιστη τιμή, εύρος, και μέσο εύρος τιμών.

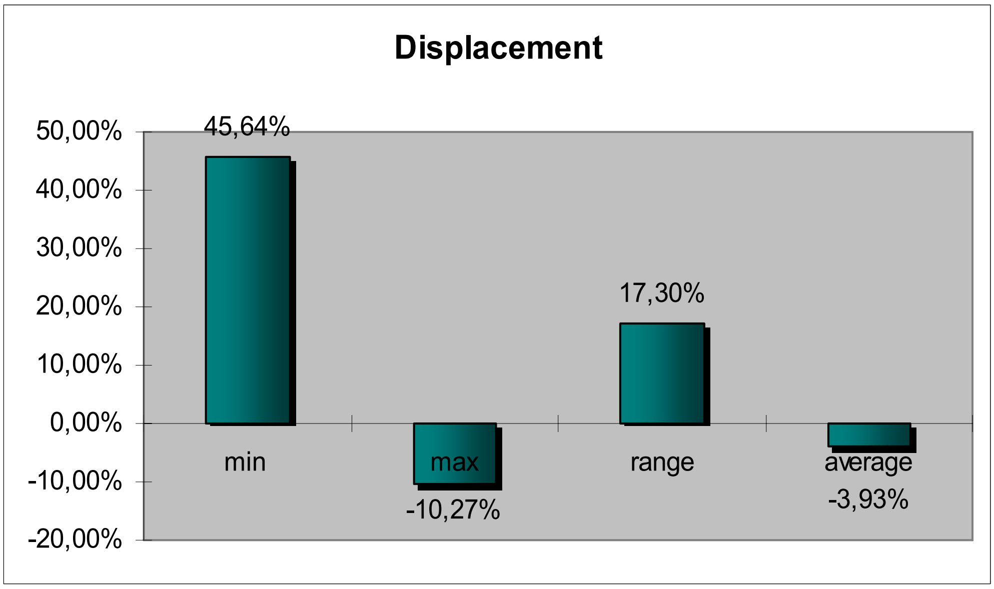
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-0,01196	0,007573	0,01953	0,004323
Velocity	-0,5597	0,8336	1,393	0,1601
Acceleration	-399,2	292,4	691,6	79,37

Πίνακας 13 Χαρακτηριστικά διαγραμμάτων

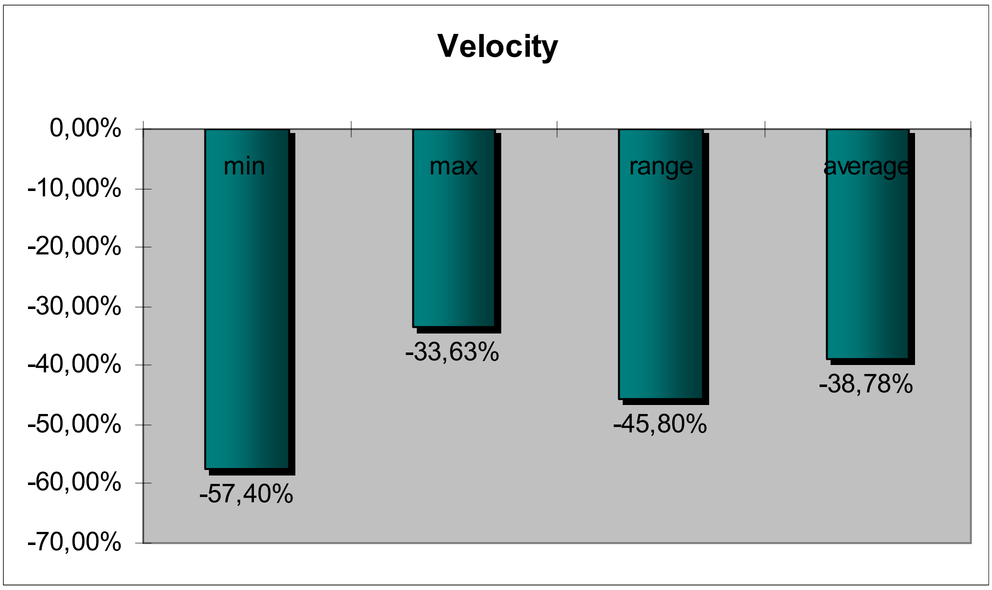
Συγκρίνουμε τα νέα μεγέθη με τα μεγέθη της αρχικής δοκιμής και καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα μέσω της μαθηματικής σχέσης (β-α)/α%, όπου β η παραμετροποιημένη δοκιμή και α η αρχική δοκιμή.

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	45,64%	-10,27%	17,30%	-3,93%
Velocity	-57,40%	-33,63%	-45,80%	-38,78%
Acceleration	2,99%	-31,17%	-14,86%	-34,78%

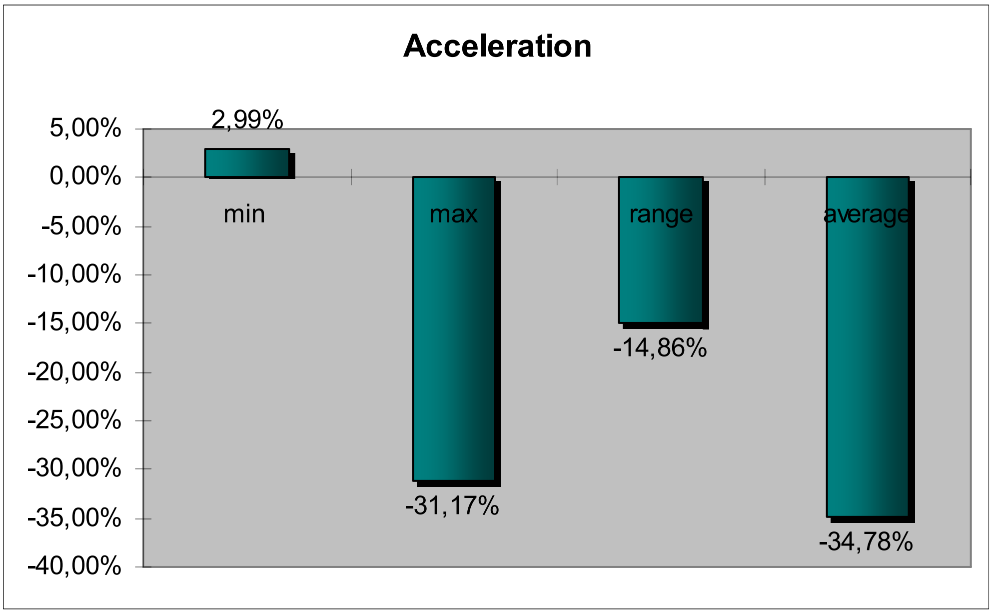
Πίνακας 14 Συγκρίσεις τιμών με την αρχική δοκιμή (%)



7.5 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης (%)

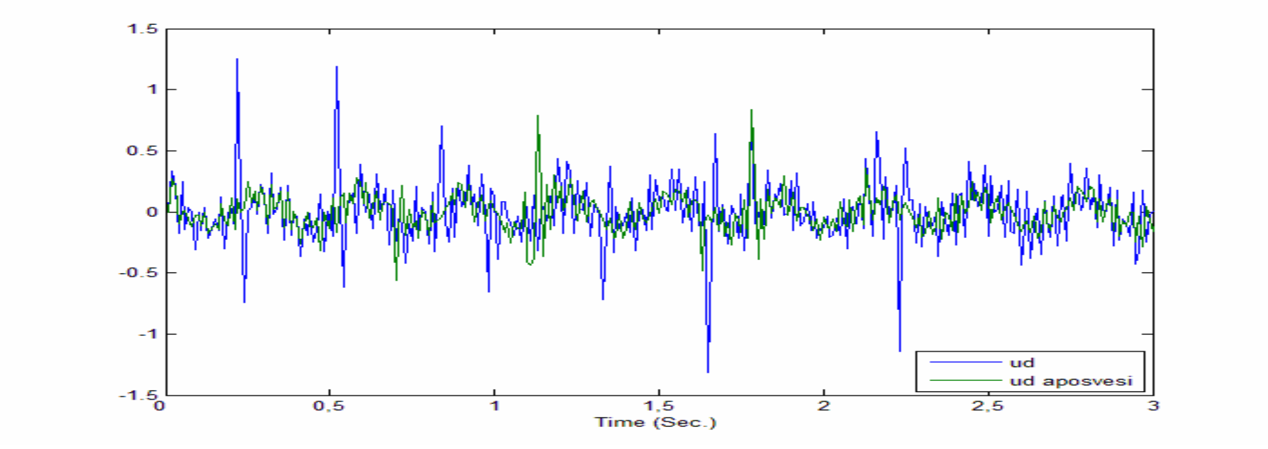


7.6 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας (%)



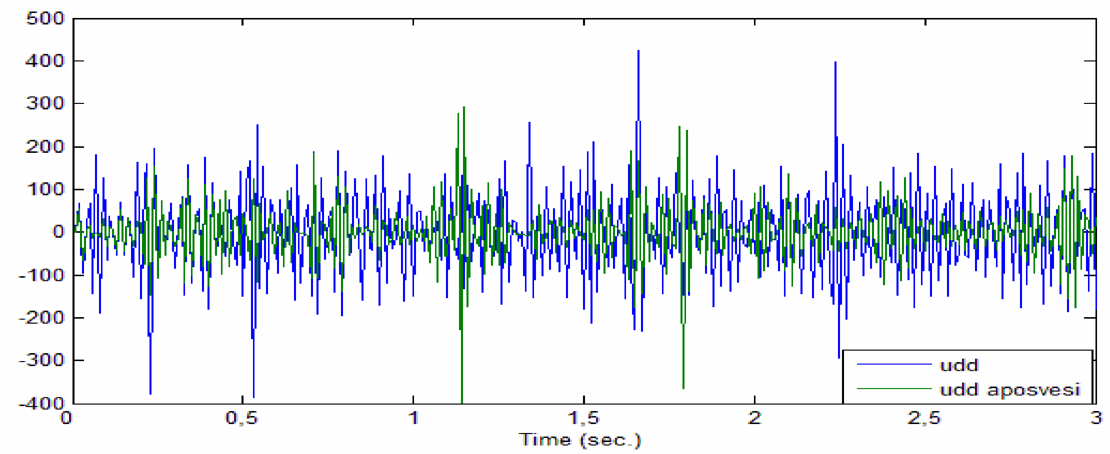
7.7 Διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης (%)

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της απόσβεσης κατά 50% μας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την ταχύτητα της προβόλου, ενδεικτικά έχουμε μια μείωση της τάξης του 57,40% στο κάτω όριο, μια μείωση της τάξης του 33,63% στο άνω όριο και μια συνολική μείωση του εύρους τιμών της ταχύτητας της τάξης του 45,80%. Επίσης βλέπουμε ότι μειώθηκε το μέσο εύρος τιμών της ταχύτητας κατά 38,78%.



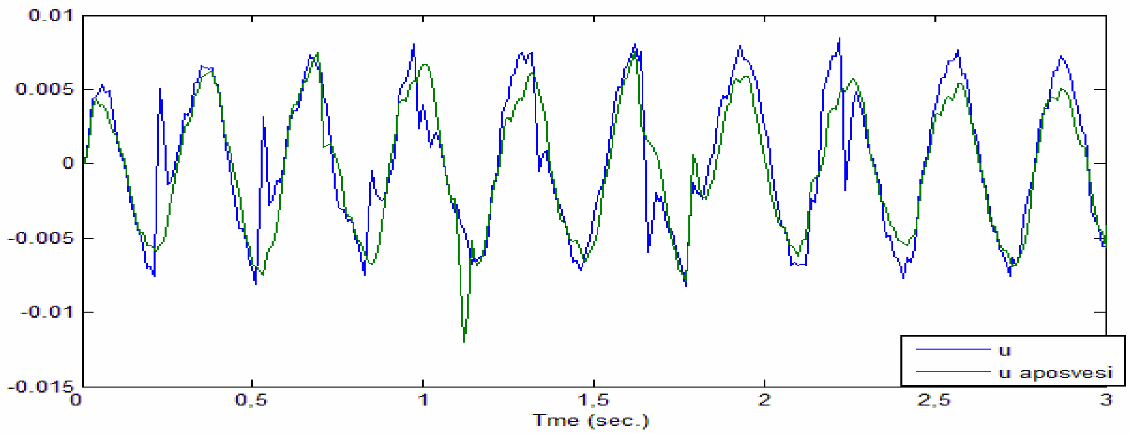
7.8 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας

Σε σχέση τώρα με την επιτάχυνση που αναπτύσσεται βλέπουμε ότι έχουμε μια αμελητέα αύξηση στο κάτω όριο της τάξης του 2,99%, μια μείωση της τάξης του 31,17% στο άνω, μείωση 14,86% στο συνολικό εύρος τιμών και 34,78% στο μέσο εύρος τιμών της.



7.9 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης

Σχετικά με την ταλάντωση, δηλαδή την αποτελεσματικότητα του ελέγχου, έχουμε αύξηση του κάτω ορίου κατά 45,64%, μείωση του πάνω ορίου κατά 10,27%, αύξηση συνεπώς του εύρους κατά 17,30%, αλλά έχουμε μείωση του μέσου εύρους τιμών κατά 3,93%. Δηλαδή το σύστημα δουλεύει ποιο ομαλά αλλά έχει ποιο έντονο χτύπημα.

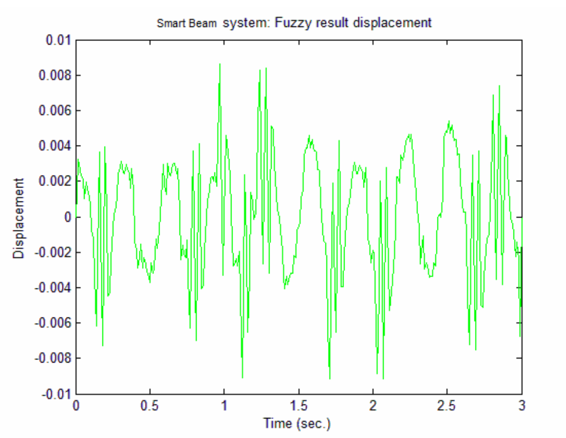


7.10 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης

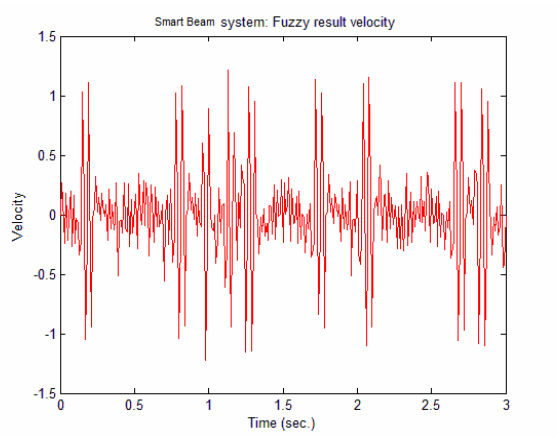
8. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Ένα πεδίο παραμετροποίησης είναι η εξωτερική φόρτιση. Στην προκειμένη περίπτωση μειώσαμε την εξωτερική φόρτιση κατά 20%. Το υπόλοιπο σύστημα παρέμεινε το ίδιο, οπότε και έχουμε 15 κανόνες, οι οποίοι έχουν συντελεστή 1 και συνδέονται με τον τελεστή and. Οι συναρτήσεις συμμετοχής παραμένουν οι ίδιες.

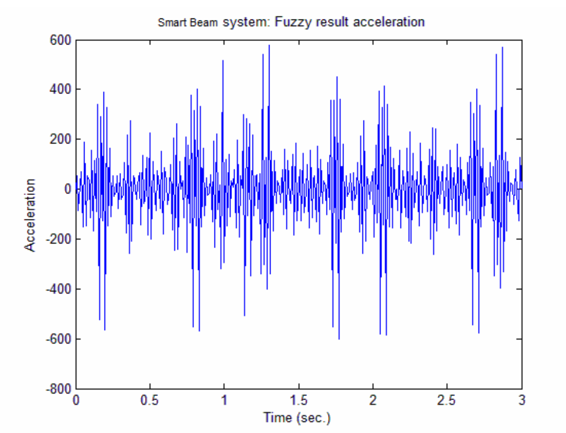
Ακολουθούν τα διαγράμματα και η επιφάνεια του ασαφούς συστήματος.



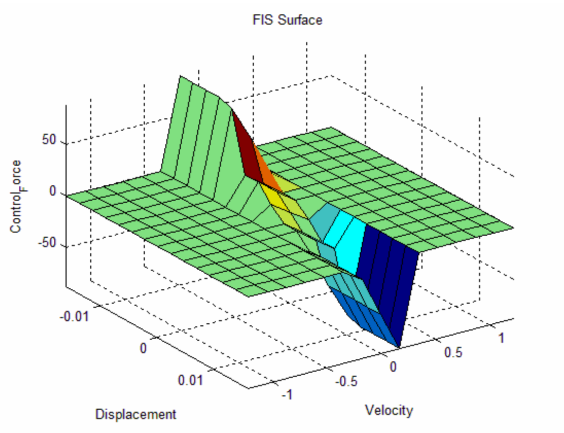
8.1 Διάγραμμα διακύμανσης θέσης



8.2 Διάγραμμα διακύμανσης ταχύτητας



8.3 Διάγραμμα διακύμανσης επιτάχυνσης



8.4 Επιφάνεια ασαφούς συστήματος

Εξάγουμε από τα διαγράμματα τα εξής χαρακτηριστικά: ελάχιστη και μέγιστη τιμή, εύρος, και μέσο εύρος τιμών.

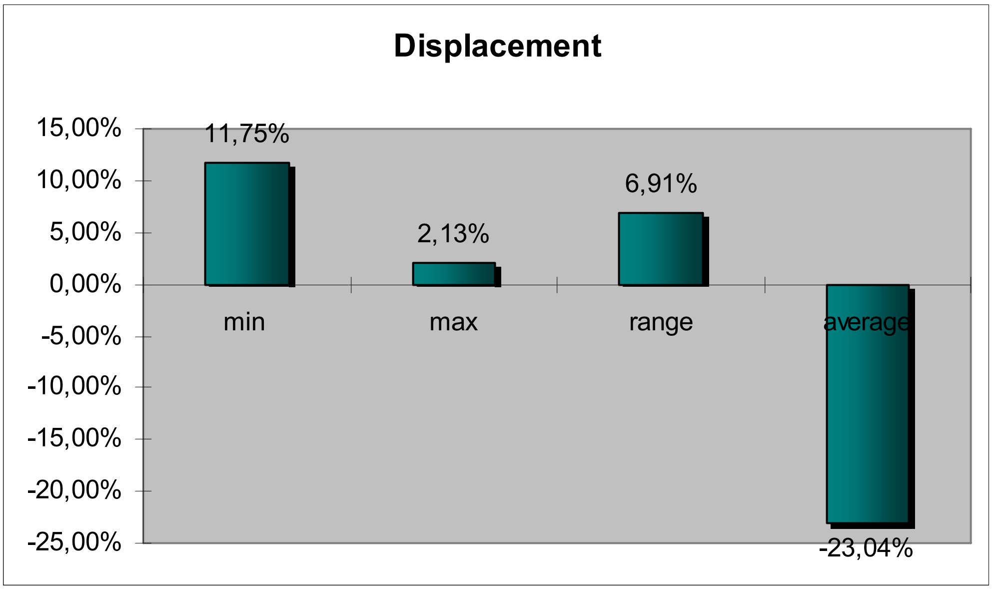
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-0,009177	0,00862	0,0178	0,003327
Velocity	-1,221	1,211	2,432	0,3977
Acceleration	-602,1	578,7	1181	209,6

Πίνακας 15 Χαρακτηριστικά διαγραμμάτων

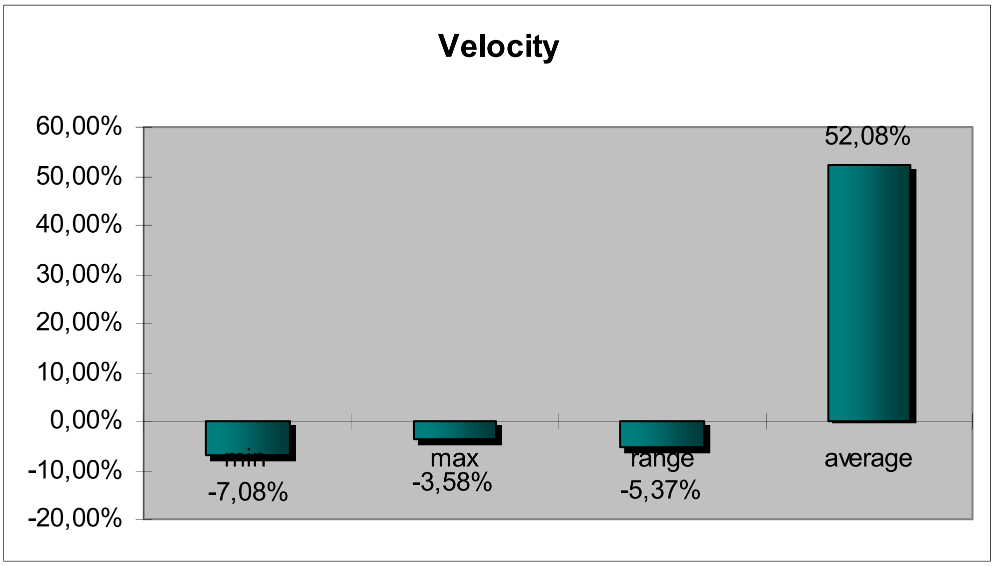
Συγκρίνουμε τα νέα μεγέθη με τα μεγέθη της αρχικής δοκιμής και καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα μέσω της μαθηματικής σχέσης (β-α)/α%, όπου β η παραμετροποιημένη δοκιμή και α η αρχική δοκιμή.

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	11,75%	2,13%	6,91%	-23,04%
Velocity	-7,08%	-3,58%	-5,37%	52,08%
Acceleration	55,34%	36,23%	45,39%	72,23%

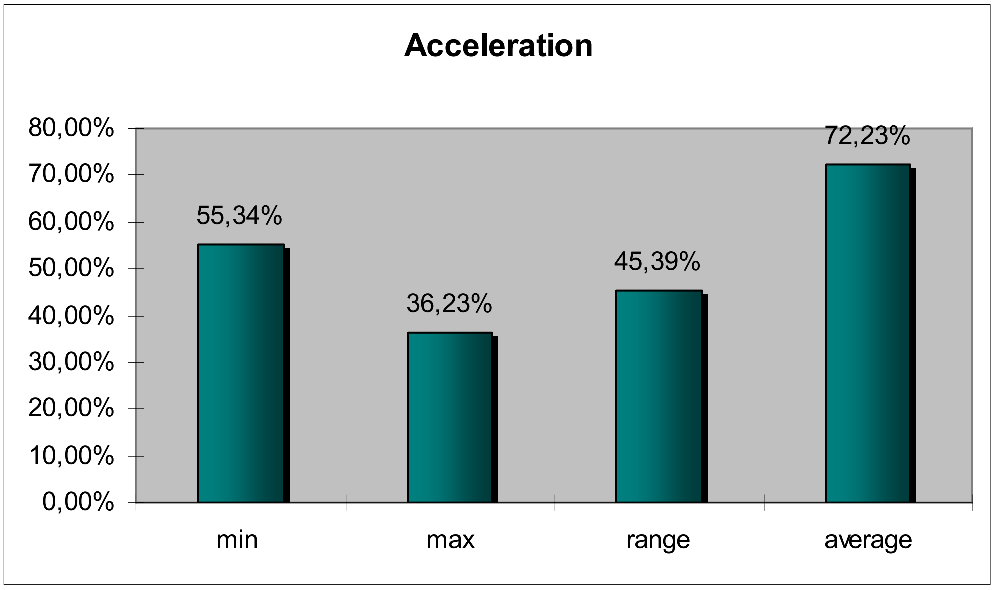
Πίνακας 16 Συγκρίσεις τιμών με την αρχική δοκιμή (%)



8.5 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης (%)

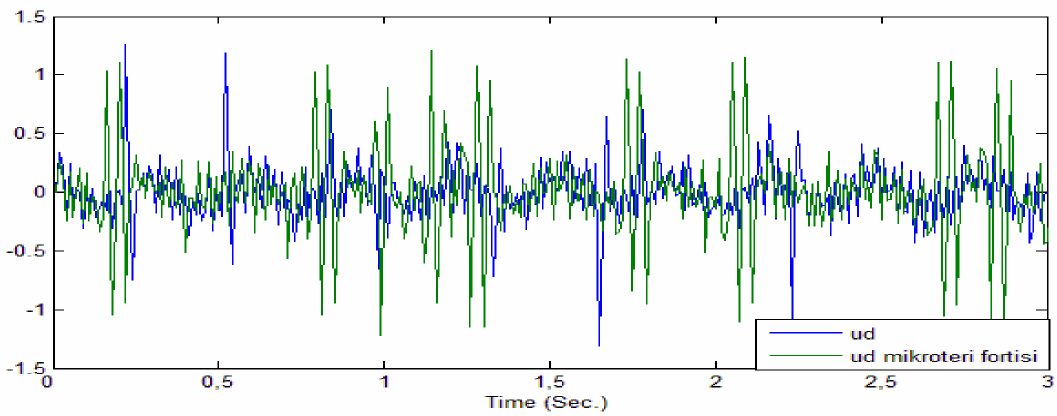


8.6 Διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας (%)



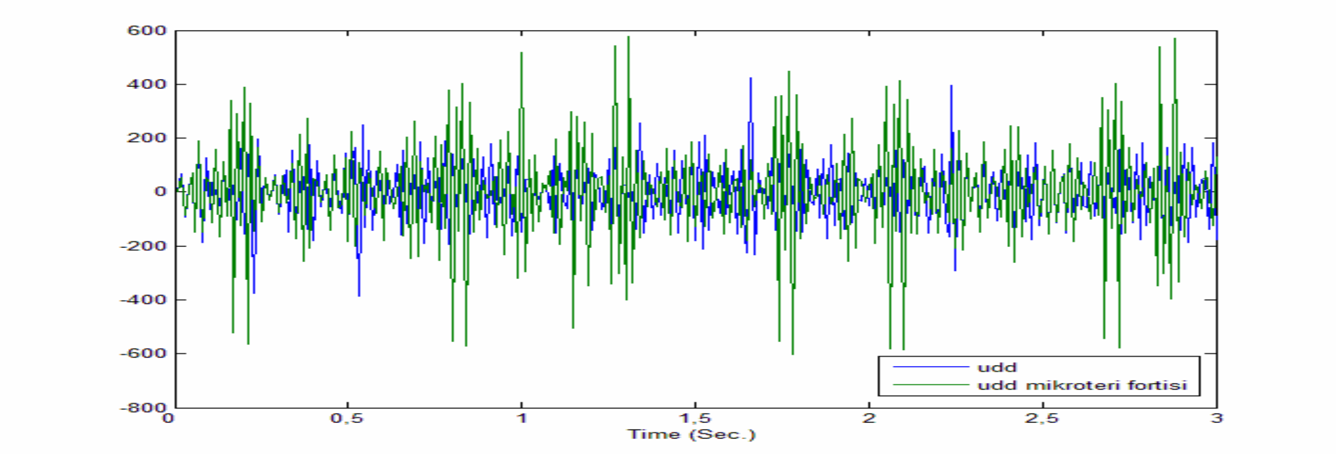
8.7 Διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης (%)

Παρατηρούμε ότι η μείωση της εξωτερικής δύναμης κατά 20% μας δίνει, ως προς την ταχύτητα της προβόλου, μια μείωση της τάξης του 7,08% στο κάτω όριο, μια μείωση της τάξης του 3,58% στο άνω όριο και μια συνολική μείωση του εύρους τιμών της ταχύτητας της τάξης του 5,37%. Βλέπουμε όμως ότι αυξήθηκε το μέσο εύρος τιμών της ταχύτητας κατά 52,08%.



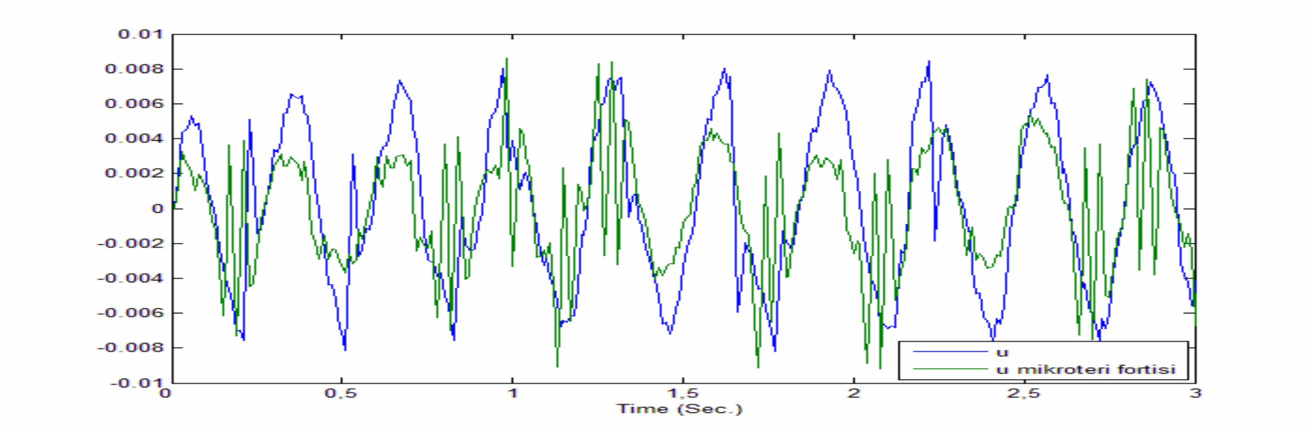
8.8 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταχύτητας

Σε σχέση τώρα με την επιτάχυνση που αναπτύσσεται βλέπουμε ότι έχουμε μια αύξηση σε όλα τα μεγέθη. Στο κάτω όριο αύξηση 55,34%, 36,23% στο άνω, 45,39% στο συνολικό εύρος τιμών και 72,23% στο μέσο εύρος τιμών της.



8.9 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της επιτάχυνσης

Σχετικά με την ταλάντωση, δηλαδή την αποτελεσματικότητα του ελέγχου, έχουμε μικρή αύξηση του κάτω ορίου κατά 11,75%, αύξηση του πάνω ορίου κατά 2,13%, αύξηση συνεπώς του εύρους κατά 6,91%, αλλά έχουμε μεγάλη μείωση του μέσου εύρους τιμών κατά 23,04%. Δηλαδή το σύστημα δουλεύει ποιο ομαλά αλλά έχει ποιο έντονο χτύπημα.

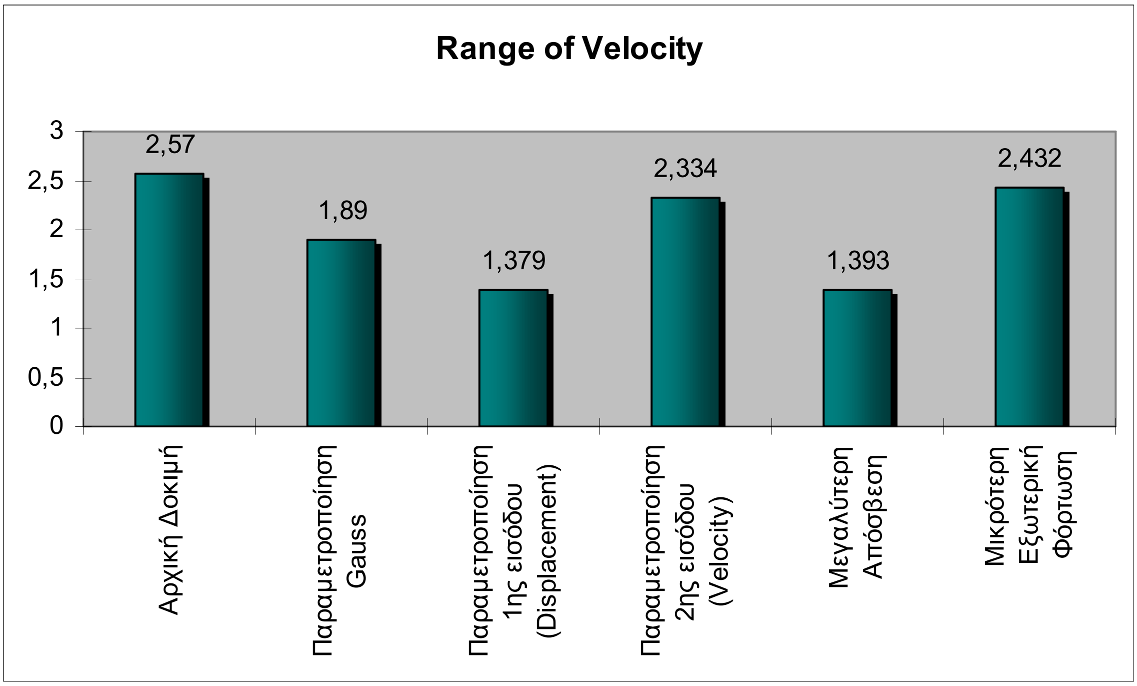


8.10 Συγκριτικό διάγραμμα αυξομείωσης της ταλάντωσης

9. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Παρακάτω θα παρουσιαστούν κάποιες συγκεντρωτικές συγκρίσεις έτσι ώστε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα ως προς το ποια τροποποίηση μας δίνει σχετικά καλύτερα αποτελέσματα.

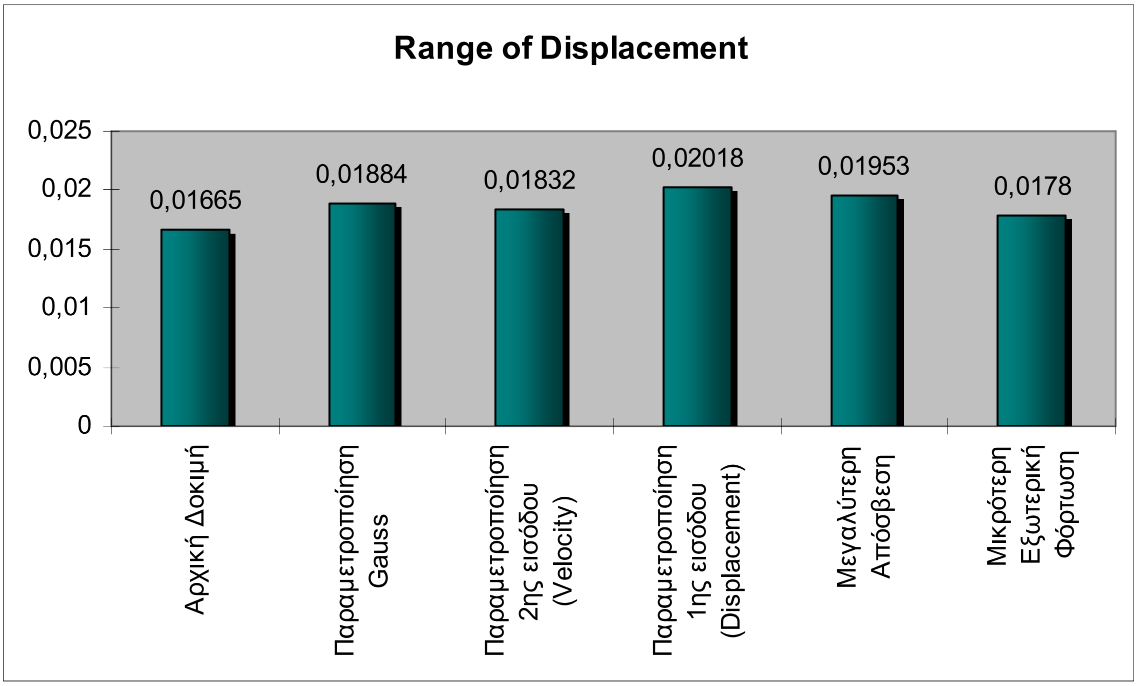
Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των παραμετροποιήσεων σε σχέση με το εύρος τιμών ταχύτητας που αναπτύσσει η πρόβολος κατά την διάρκεια του ελέγχου.



9.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα εύρους ταχύτητας

Παρατηρούμε ότι έστω και οριακά όλες μας οι παραμετροποιήσεις επέτυχαν μείωση του εύρους της ταχύτητας. Μεγαλύτερη μείωση έχουμε στην παραμετροποίηση της 1ης εισόδου (46,34%) καθώς και στην αύξηση της απόσβεσης (45,80%). Οριακή μείωση παρατηρούμε στην μείωση της εξωτερικής φόρτισης.

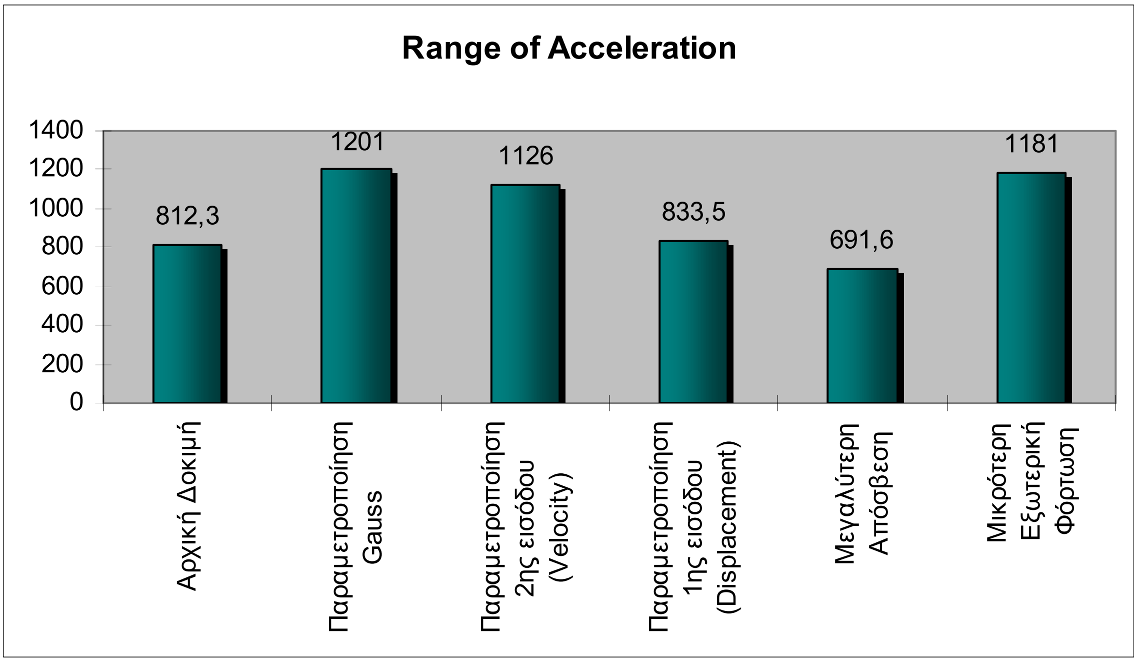
Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των παραμετροποιήσεων σε σχέση με το εύρος τιμών της ταλάντωσης της προβόλου κατά την διάρκεια του ελέγχου.



9.2 Συγκεντρωτικό διάγραμμα εύρους ταλάντωσης

Παρατηρούμε ότι σε αντίθεση με την ταχύτητα, σε όλα μας τα πειράματα έχουμε αύξηση του εύρους ταλάντωσης που εκτελεί η πρόβολος. Αυτό σύμφωνα με την θεωρία ελέγχου είναι αναμενόμενο καθώς όταν έχουμε μείωση ταχύτητας, δηλαδή βελτίωση της υλοποιησιμότητας, έχουμε και μεγαλύτερες μετακινήσεις, δηλαδή μικρότερη αποτελεσματικότητα. Μεγαλύτερη αύξηση παρατηρούμε στην παραμετροποίηση της 1^{ης} εισόδου (21,20%), κάτι το αναμενόμενο καθώς παρατηρήσαμε πριν την μεγαλύτερη μείωση στην ταχύτητα.

Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των παραμετροποιήσεων σε σχέση με το εύρος τιμών της επιτάχυνσης που αναπτύσσει η πρόβολος κατά την διάρκεια του ελέγχου.



9.3 Συγκεντρωτικό διάγραμμα εύρους επιτάχυνσης

Εδώ παρατηρούμε ότι εκτός από την παραμετροποίηση που αφορά την αύξηση της απόσβεσης σε όλες τις άλλες παραμετροποιήσεις έχουμε αύξηση της επιτάχυνσης που αναπτύσσει η πρόβολος. Παρατηρούμε επίσης ότι η επιτάχυνση σαν μεταβλητή δεν επηρεάζεται από την ταλάντωση ή την ταχύτητα καθώς δεν μπορούμε να εξάγουμε κάποιου είδους εξάρτησή της με τις δύο αυτές μεταβλητές.

Παρακάτω θα προσπαθήσουμε να κατατάξουμε τις παραμετροποιήσεις, γνώμονες η υλοποιησιμότητα, δηλαδή η μικρότερη καταπόνηση του υλικού, και η αποτελεσματικότητα του ελέγχου. Δύο έννοιες που βρίσκονται συνεχώς σε αντιδιαστολή σύμφωνα με την θεωρία ελέγχου.

Ο πίνακας που ακολουθεί είναι ο συγκεντρωτικός πίνακας ποσοστών αυξομείωσης του εύρους τιμών των παραμετροποιήσεων σύμφωνα πάντα με την αρχική δοκιμή μας.

	Παραμετροποίηση Gauss	Παραμετροποίηση 1ης εισόδου	Παραμετροποίηση 2ης εισόδου	Μεγαλύτερη Απόσβεση	Μικρότερη Εξωτερική Φόρτωση
Displacement	13,15%	21,20%	10,03%	17,30%	6,91%
Velocity	-26,46%	-46,34%	-9,18%	-45,80%	-5,37%
Acceleration	47,85%	2,61%	38,62%	-14,86%	45,39%

Πίνακας 17 Συγκεντρωτικές συγκρίσεις εύρους τιμών με την αρχική δοκιμή (%)

Στον παρακάτω πίνακα θα γίνει η κατάταξη των δοκιμών σύμφωνα με το κριτήριο της υλοποιησιμότητας, δηλαδή των μικρότερων τιμών ταχύτητας-επιτάχυνσης.

Velocity	Acceleration
1. Παραμετροποίηση 1ης εισόδου (-46,34%)	**1. Μεγαλύτερη Απόσβεση (-14,86%)**
2. Μεγαλύτερη Απόσβεση (-45,80%)	**2. Παραμετροποίηση 1ης εισόδου (2,61%)**
3. Παραμετροποίηση Gauss (-26,46%)	**3. Παραμετροποίηση 2ης εισόδου (38,62%)**
4. Παραμετροποίηση 2ης εισόδου (-9,18%)	**4. Μικρότερη Εξωτερική Φόρτωση (45,39%)**
5. Μικρότερη Εξωτερική Φόρτωση (-5,37%)	**5. Παραμετροποίηση Gauss (47,85%)**

Πίνακας 18 Κατάταξη παραμετροποιήσεων ως προς την ταχύτητα και επιτάχυνση (%)

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα καταλήγουμε στην παρακάτω κατάταξη ως προς ποια παραμετροποίηση έδωσε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την μικρότερη καταπόνηση του υλικού, δηλαδή την μεγαλύτερη υλοποιησιμότητα.

Κατάταξη
1. Μεγαλύτερη Απόσβεση
2. Παραμετροποίηση 1ης εισόδου
3. Παραμετροποίηση Gauss
4. Παραμετροποίηση 2ης εισόδου
5. Μικρότερη Εξωτερική Φόρτωση

Πίνακας 19 Κατάταξη με κριτήριο την υλοποιησιμότητα

Αντίστοιχα θα κατατάξουμε τις παραμετροποιήσεις με γνώμονα την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα του ελέγχου.

Κατάταξη
1. Μικρότερη Εξωτερική Φόρτωση
2. Παραμετροποίηση 2ης εισόδου
3. Παραμετροποίηση Gauss
4. Μεγαλύτερη Απόσβεση
5. Παραμετροποίηση 1ης εισόδου

Πίνακας 20 Κατάταξη με κριτήριο την αποτελεσματικότητα

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Georgios K. Tairidis, Georgios E. Stavroulakis, Daniela G. Marinova, and Emmanuel C. Zacharenakis, Classical and soft robust active control of smart beams, Chapter 11, pp. 165-177, In: M. Papadrakakis. D.C. Charmpis, N.D. Lagaros, Y. Tsompanakis Volume Editors Computational Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Taylor and Franzis 2008 (in press)

[2] Γεώργιος Σταυρουλάκης, Σημειώσεις μαθήματος, Εισαγωγή στην Μηχατρονική, Χανιά 2008 (διατίθεται μέσω της ιστοσελίδος του μαθήματος στον ιστοτόπο ασύγχρονης τηλεκπαίδευσης του τμηματος eclass.ergasya.tuc.gr)

[3] Σταύρος Βολογιαννίδης, Ευφυής Έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές, Διδακτικές Σημειώσεις Τμήματος Πληροφορικής και Επικοινωνιών, Τομέας Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών και Βιομηχανικών Εφαρμογών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών.

[4] Βασίλης Καμπουρλάζος, Ευφυή Συστήματα, Εργαστηριακές Ασκήσεις, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Βιομηχανικής Πληροφορικής, Τομέας Υπολογιστικών Συστημάτων, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας.

[5] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Department of Electrical Engineering, The Ohio State University, 1998

[6] Γ.Ε. Ταϊρίδης, Διατριβή για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος 2008 (υπό προετοιμασία)

[7] Ροβέρτος-Ε Κινγκ, Ευφυής Έλεγχος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004

[8] Design and robust optimal control of smart beams with application on vibrations suppression, Advances in Engineering Software, Volume 36, Issues 11-12, November-December 2005, Pages 806-813
G.E. Stavroulakis, G. Foutsitzi, E. Hadjigeorgiou, D. Marinova, C.C. Baniotopoulos

[9] Vibration Control of Active Structures (Solid Mechanics and Its Applications) (Hardcover), by Andre Preumont Kluwer Academic Publishers, 2002.