

Χανιά 2018

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

Oresths **ΣΠΥΡΟΥ ΟΡΕΣΤΗΣ**

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρακάτω διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς τη καθοριστική συμβολή του Κυρίου Γεωργίου Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης ο οποίος μου έδωσε τις κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με την ασαφή λογική υποστηρίζοντάς με καθ' όλη τη διάρκεια ενασχόλησης μου με το συγκεκριμένο θέμα. Μεγάλη υπήρξε και η συνεισφορά του Κυρίου Ταϊρίδη Γεώργιου μεταπτυχιακού φοιτητή του τμήματος των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, καθώς μας παραχώρησε το ασαφές σύστημα που ίδιος δημιούργησε δίνοντάς μας τη δυνατότητα παραμετροποίησης των στοιχείων του. Στόχος της μελέτης μας, η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη παραμετροποίηση του ασαφούς συστήματος η οποία θα μας δώσει καλύτερα αποτελέσματα σε συνδυασμό με την εύρυθμη λειτουργία του ασαφούς ελεγκτή. Η συγκεκριμένη εργασία ήταν για εμένα μια σημαντική ευκαιρία ώστε να αναπτύξω τις γνώσεις μου γενικότερα στην μηχανολογία, αλλά και στην κατανόηση της συμπεριφοράς των σωμάτων υπό ταλάντωση ειδικότερα. Επιπλέον η ενασχόληση με κάτι τόσο ενδιαφέρον ήταν ένα επιπρόσθετο κίνητρο για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους που με έχουν στηρίξει όλα αυτά τα χρόνια της ακαδημαϊκής μου πορείας .

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ΣΕΛ.3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ	
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	ΣΕΛ.4
1.2 ΑΠΛΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ.....	ΣΕΛ.5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο ΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΣΑΦΗ ΛΟΓΙΚΗ	ΣΕΛ.8
2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ.....	ΣΕΛ.9
2.3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	ΣΕΛ.9
2.3.1 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΟΙ.....	ΣΕΛ.9
2.3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΣΑΦΩΝ ΣΥΝΟΛΩΝ.....	ΣΕΛ.11
2.3.3 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ	ΣΕΛ.13
2.3.4 ΠΡΑΞΕΙΣ ΑΣΑΦΩΝ ΣΥΝΟΛΩΝ.....	ΣΕΛ.15
2.3.5 ΛΕΚΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΤΕΣ.....	ΣΕΛ.18
2.4 ΑΣΑΦΗΣ ΚΑΝΟΝΕΣ.....	ΣΕΛ.19
2.5 ΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΚΤΕΣ.....	ΣΕΛ.20
2.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ.....	ΣΕΛ.23
2.6.1 ΤΟ ΑΣΑΦΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ MANDAMI.....	ΣΕΛ.23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΡΟΣ ΕΞΕΤΑΣΗ	
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	ΣΕΛ.27
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΕΛΕΓΚΤΗ.....	ΣΕΛ.28
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ.....	ΣΕΛ.30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΕΛΕΓΚΤΗ	
4.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΣΕ GAUSS.....	ΣΕΛ.32
4.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ 2 ^{ης} ΕΙΣΟΔΟΥ(ΤΑΧΥΤΑΣ).....	ΣΕΛ.39
4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ 1 ^{ης} ΕΙΣΟΔΟΥ (ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ)	ΣΕΛ.45
4.4 ΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΣΕΛ.52
4.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΣΕΛ.56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	ΣΕΛ.60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	ΣΕΛ.66

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή 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 συστήματος ασαφούς ελέγχου με απώτερο σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων και συγκρίσεων σε σχέση με τα αρχικά αποτελέσματα του αρχικού συστήματος υπό μελέτη.

Η πτυχιακή εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια:

Αρχικά παρουσιάζεται μια συνοπτική γενική θεωρητική επισκόπηση των ταλαντώσεων καθώς και το απλούστερο μοντέλο ταλάντωσης μιας διάταξης αποτελούμενη από μια μάζα και ένα ελατήριο ενός βαθμού ελευθέριας.

Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στην παρουσίαση των εννοιών που απαρτίζουν στοιχεία που αφορούν τη θεωρία του ασαφούς ελέγχου. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση του μοντέλου υπό εξέταση καθώς και του ασαφούς ελεγκτή που χρησιμοποιήσαμε για τον έλεγχο των ταλαντώσεων της διάταξης υπό μελέτη, με τη προσομοίωση της συμπεριφοράς της να γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού της Matlab.

Στο τέταρτο και μεγαλύτερο σε όγκο κεφάλαιο, εμφανίζονται αναλυτικά και με ενδελεχή απεικόνιση τα βήματα που ακολουθήσαμε για τις παραμετροποιήσεις του ασαφούς ελεγκτή των στοιχείων της διάταξης καθώς και οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων ταχύτητας, μετατόπισης, επιτάχυνσης σε σχέση με αρχικά μας αποτελέσματα. Στο πέμπτο κεφάλαιο απεικονίζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα μέσω των οποίων γίνονται οι συγκρίσεις και οι κατατάξεις των παραμετροποιήσεων με βάση την αποτελεσματικότητά του. Τέλος παρουσιάζεται η βιβλιογραφία και οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

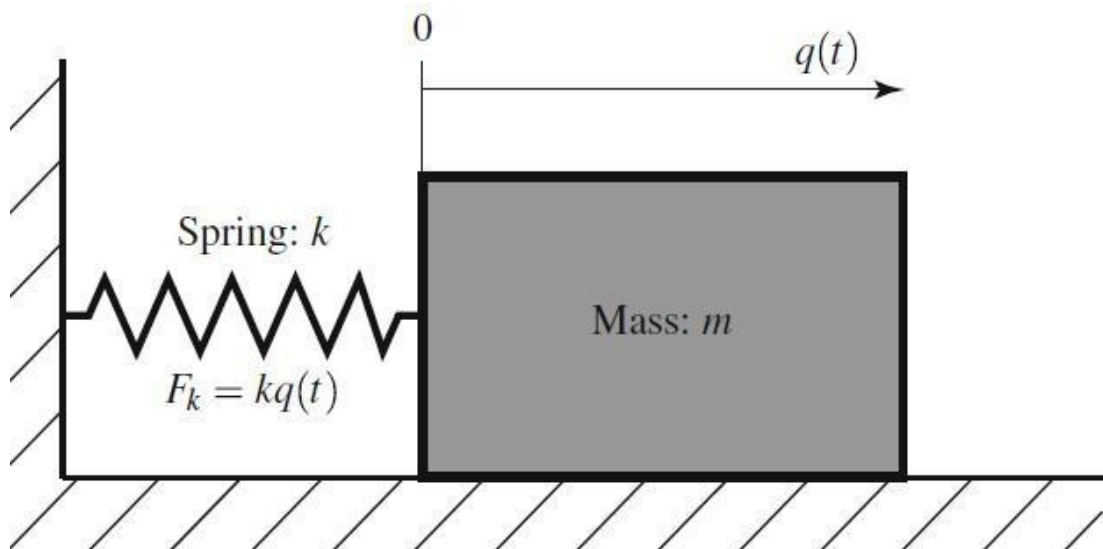
ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους σημαντικότερους, σε μέγεθος και εφαρμογή, κλάδους της φυσικής είναι οι ταλαντώσεις. Με τον όρο ταλαντώσεις καλύπτεται ένα ευρύτατο φάσμα φαινομένων τόσο μηχανικών όσο και ηλεκτρικών. Χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε παλινδρομική περιοδική μεταβολή οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους γύρω από μία κεντρική τιμή. Με άλλα λόγια ταλάντωση είναι η περιοδική μεταβολή ενός μεγέθους γύρω από μία τιμή. Οι ταλαντώσεις είναι πολλών ειδών, χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η μηχανική ταλάντωση και η ηλεκτρική ταλάντωση. Στην μηχανική ταλάντωση μεταβάλλεται αρμονικά η θέση ενός σώματος γύρω από την θέση ισορροπίας του ενώ στην ηλεκτρική ταλάντωση μεταβάλλεται αρμονικά η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Παράδειγμα μηχανικής ταλάντωσης είναι το εκκρεμές, το οποίο όταν αιωρείται, εκτελεί ταλάντωση. Αυτό σημαίνει πως παλινδρομεί (πηγαινοέρχεται) γύρω από την ίδια συγκεκριμένη θέση. Παράδειγμα ηλεκτρικής ταλάντωσης είναι το κύκλωμα LC. Στην πτυχιακή αυτή εργασία θα εστιάσουμε στις μηχανικές ταλαντώσεις.

1.2 ΑΠΛΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ

Η απλούστερη μορφή μηχανικής ταλάντωσης είναι αυτή ενός συστήματος με ένα βαθμό ελευθερίας (1 DOF), η μορφή του οποίου φαίνεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Ελεύθερη ταλάντωση μάζας m

Εφαρμόζοντας τον 2^ο Νόμο του Νεύτωνα ($\Sigma F = m \ddot{x}(t)$), εύκολα εξάγεται ότι η συμπεριφορά του συστήματος περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (1.1)$$

Όπου,

m: η μάζα του ταλαντευόμενου σώματος
k: η σταθερά του ελατηρίου
 $x(t)$: η μετατόπιση της μάζας συναρτήσει του χρόνου

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Το σύστημα είναι σε θέση ισορροπίας όταν το ελατήριο είναι στο φυσικό του μήκος. Η δύναμη που θεωρείται κατάλληλη να συντηρήσει μια ταλάντωση, θα πρέπει να τείνει να κρατήσει το σύστημα σε μια θέση ισορροπίας, οπότε θα πρέπει να είναι αντίθετη προς την απομάκρυνση από την θέση αυτή και όσο αυξάνεται η απομάκρυνση, τόσο να αυξάνεται και το μέτρο της δύναμης. Τέτοια χαρακτηριστικά διαθέτει η δύναμη ενός ελατηρίου που ορίσαμε ως $F(k)$ σχήμα (1.1) ή αλλιώς ως Δύναμη Επαναφοράς. Αν εκτρέψουμε την μάζα m σε μια αρχική τυχαία θέση x_0 , τότε αυτή θα εκτελέσει απλή αρμονική ταλάντωση με πλάτος $\pm x_0$, αφού δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις. Έτσι, μπορούμε να πούμε πως (σχέση 1.1) μετασχηματίζεται στην (1.2)

$$X(t) = X_0 \sin(2 \pi \cdot f_n \cdot t + \varphi) \quad (1.2)$$

Όπου :

f_n : Η πρώτη φυσική συχνότητα της ταλάντωσης

Συχνότητα ονομάζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των επαναλήψεων διά του χρονικού διαστήματος στο οποίο μετρήσαμε. Συμβολίζεται με s^{-1} και μετριέται σε δευτερόλεπτα εις τη μείον ένα.

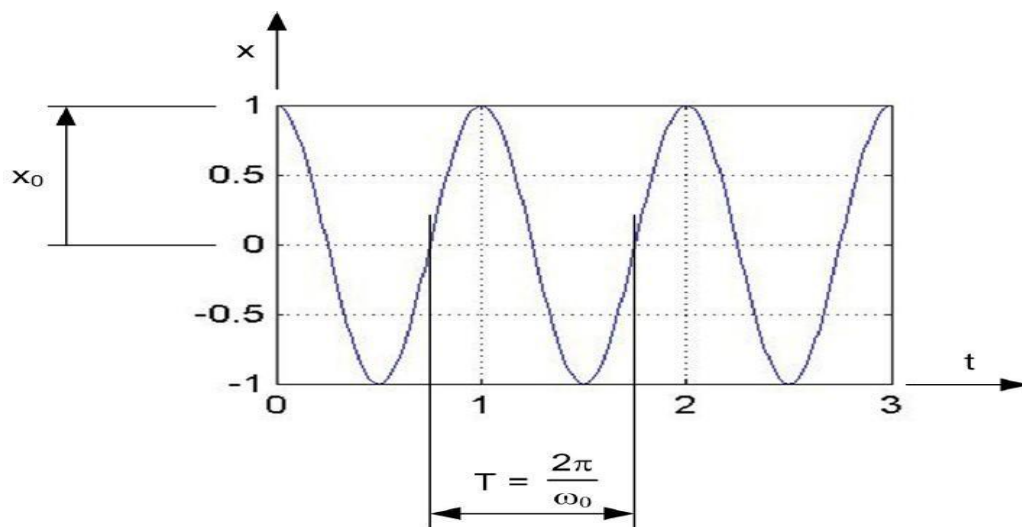
X_0 : Πλάτος της ταλάντωσης

Το μέγεθος που διαταράσσεται λαμβάνει μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή. Είναι αδύνατον να διαταράσσεται περιοδικά ένα μέγεθος, δηλαδή να είναι περιοδικό φαινόμενο, χωρίς να λαμβάνει μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή. Θεωρώντας ως μηδέν το σημείο όπου μηδενίζεται η δύναμη που συντηρεί την ταλάντωση, μετράμε ως πλάτος την μέγιστη απομάκρυνση από αυτό το σημείο, ως θετικά ορισμένη ποσότητα. Σε συμμετρικές ταλαντώσεις η μέγιστη θετική και η μέγιστη αρνητική απομάκρυνση είναι ίσες. Αυτή η απόλυτη τιμή της μέγιστης απομάκρυνσης ονομάζεται πλάτος της ταλάντωσης. Συμβολίζεται με X_0 και μετριέται στις κατάλληλες μονάδες, ανάλογα με την φύση της ποσότητας που μεταβάλλεται. Το πλάτος μιας ταλάντωσης δεν είναι πάντα σταθερό αλλά μπορεί να εξαρτάται, όπως και η φάση, από το χρόνο και άλλα μηχανικά στοιχεία του συστήματος. Η ενέργεια ενός ταλαντωτή εξαρτάται από το τετράγωνο του πλάτους της ταλάντωσης

φ : Τυχαία αρχική φάση

Εξαρτάται από το σημείο αρχής μέτρησης του χρόνου. Αν έχουμε να κάνουμε με μία μόνο ταλάντωση, τότε επιλέγουμε την αρχή μέτρησης του χρόνου έτσι ώστε να είναι $\varphi=0$.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Αντικαθιστώντας την σχέση (1.2) στην (1.1) και ύστερα από περαιτέρω πράξεις βρίσκουμε πως η περίοδος της απλής αρμονικής ταλάντωσης της μάζας m δίνεται από την εξίσωση:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.3)$$

κατά συνέπεια η περίοδος της ταλάντωσης θα δίνεται από τη σχέση:

$$T_n = \frac{1}{f_n} \quad (1.4)$$

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Ως περίοδος ονομάζεται το χρονικό διάστημα που χρειάζεται, για να ολοκληρωθεί μία επανάληψη του φαινομένου. Συμβολίζεται με T_n και μετριέται σε s. Ως συχνότητα όπως ήδη έχει αναφερθεί ονομάζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των επαναλήψεων διά του χρονικού διαστήματος στο οποίο μετρήσαμε. Συμβολίζεται με f_n και μετριέται σε δευτερόλεπτα εις τη μείον ένα ή Hz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

Ασαφής Έλεγχος

2.1 Εισαγωγή Στην Ασαφή Λογική

Η Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic) εισήχθη στα μέσα της δεκαετίας του 1960 από τον Lotfi A. Zadeh και αποτελεί τον θεωρητικό φορέα για την υλοποίηση μιας μεγάλης κατηγορίας Ευφυών Συστημάτων. Αποτελεί τη γενίκευση της κλασσικής λογικής, κατά την οποία μία έννοια μπορεί να κατέχει ένα βαθμό αλήθειας οπουδήποτε ανάμεσα στο 0 και το 1. Η κλασσική λογική εφαρμόζεται μόνο σε έννοιες οι οποίες είναι ολοκληρωτικά αληθείς (έχουν δηλαδή βαθμό αλήθειας 1) ή είναι ολοκληρωτικά λανθασμένες (έχουν δηλαδή βαθμό αλήθειας 0). Μία τέτοια γενίκευση κάνει δυνατό το χειρισμό κάποιων όρων όπως "ηλικιωμένος", "μεγάλος", "αδύνατος", τα οποία μπορούν να ανήκουν ταυτόχρονα σε δύο ή περισσότερα διαφορετικά σύνολα τιμών.

Τα συστήματα που στηρίζονται στην ασαφή λογική, χρησιμοποιούν μία συλλογή ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής και ασαφών AN-TOTE ("IF-THEN") κανόνων. Αυτό συγκρίνεται με τις υψηλές γλώσσες προγραμματισμού, όπου το πρόγραμμα αποτελείται από IF-THEN κανόνες.

Η Ασαφής Λογική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για περιπτώσεις στις οποίες οι κλασσικές-συμβατικές τεχνολογίες δεν είναι αποτελεσματικές, όπως σε συστήματα και μηχανήματα τα οποία δεν μπορούν με ακρίβεια να περιγραφούν από μαθηματικά μοντέλα, σε εκείνα τα οποία έχουν συγκεκριμένες αβεβαιότητες ή αντιφατικές καταστάσεις και τέλος σε συστήματα που είναι γλωσσικά ελεγχόμενα. Τα τελευταία χρόνια η τεχνική της ασαφούς λογικής έχει ευρεία εφαρμογή σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπως στην παραγωγή φωτογραφικών μηχανών, βιντεοκαμερών,

2.2 Βασικές Αρχές Της Ασαφούς Λογικής

Στην καθημερινή ζωή χρησιμοποιούνται έννοιες και πληροφορίες οι οποίες είναι ανακριβείς όπως “*κοντός άντρας*”, “*ξανθό κορίτσι*”, “*μεγάλο αγόρι*” κ.α. Σε αντίθεση, στα μαθηματικά πρέπει η περιγραφή να είναι ακριβής γιατί τα μαθηματικά δεν αναγνωρίζουν χαρακτηρισμούς και έννοιες, αλλά αριθμούς. Στην πραγματικότητα όμως κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, καθώς λίγα πράγματα είναι απλά και ακριβή, έτσι ώστε για κάποιους λεκτικούς όρους που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος καθημερινά στη φυσική του γλώσσα, όπως είναι “*μικρός*”, “*μέτριος*” και “*μεγάλος*”, δεν είναι δυνατόν μία μηχανή που χειρίζεται αριθμούς να μπορέσει να «αντιλαμβάνεται» το ίδιο αυτούς τους όρους. Σε αυτό το σημείο έρχεται η Ασαφής Λογική, η οποία μέσω της αναπαράστασης των λεκτικών όρων από τα ασαφή σύνολα, αποτελεί την γέφυρα επικοινωνίας ανάμεσα στον άνθρωπο και την μηχανή.

2.3 Ασαφή Σύνολα

Ο Zadeh με το βιβλίο του “Fuzzy Sets” το 1965, παρουσίασε τη θεωρία των ασαφών συνόλων (fuzzy set theory), σύμφωνα με την οποία μια τιμή μπορεί να ανήκει ταυτόχρονα σε πολλά υποσύνολα, στο κάθε ένα με ένα βαθμό συμμετοχής. Το ασαφές σύνολο είναι ένα τέτοιο υποσύνολο το οποίο περιλαμβάνει στοιχεία, που το κάθε ένα έχει ένα βαθμό συμμετοχής.

2.3.1 Βασικοί Όροι

Στην κλασική θεωρία των συνόλων, ένα σύνολο αποτελείται από ένα πεπερασμένο ή άπειρο αριθμό στοιχείων και μπορεί να αναπαρασταθεί από την απαρίθμηση των στοιχείων του ως εξής:

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$$

Τα στοιχεία όλων των συνόλων υπό μελέτη ανήκουν σε ένα **υπερσύνολο αναφοράς**

Αν αυτά τα στοιχεία a_i ($i=1, \dots, n$) του A είναι όλα μαζί ένα υποσύνολο του υπερσυνόλου αναφοράς X , το σύνολο A μπορεί να αναπαρασταθεί από όλα τα στοιχεία $x \in X$ από τη χαρακτηριστική συνάρτηση

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \alpha\nu \ x \in X \\ 0 & \alpha\lambda\lambda\iota\omega\varsigma \end{cases} \quad (2.1)$$

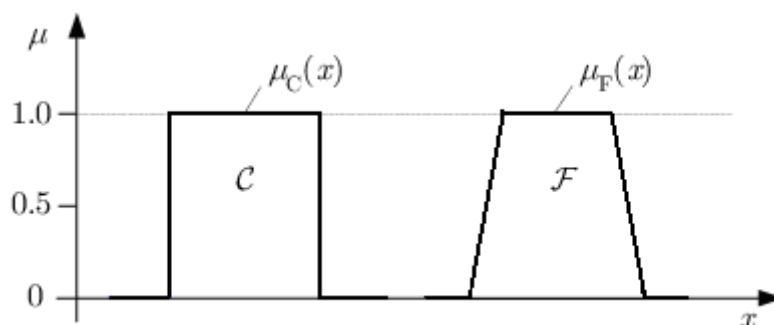
Στην κλασική θεωρία των συνόλων το $\mu_A(x)$ έχει μόνο τις τιμές 0 (false) και 1 (true) που είναι οι τιμές της αλήθειας. Τέτοια σύνολα επίσης ονομάζονται *crisp* σύνολα (*crispsets*). Τα μη-crisp σύνολα ονομάζονται *ασαφή* σύνολα (*fuzzysets*).

Ασαφές Σύνολο είναι οποιοδήποτε σύνολο το οποίο επιτρέπει τα μέλη του να έχουν διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής (συνάρτηση συμμετοχής) στο διάστημα $[0,1]$.

Για τα ασαφή σύνολα επίσης μπορεί να οριστεί μία συνάρτηση, η οποία ονομάζεται *Συνάρτηση Συμμετοχής* (Membership Function).

Η συνάρτηση συμμετοχής (ή *MF*) υποδεικνύει το βαθμό κατά τον οποίο το σύνολο x ανήκει στο σύνολο A , δηλαδή

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$$



Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστική συνάρτηση συμμετοχής ενός κλασσικού ή crisp συνόλου (αριστερά) και ενός ασαφούς συνόλου (δεξιά)

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Τα ασαφή σύνολα συχνά αναπαρίστανται από σύνολα διατεταγμένων ζευγών (orderedpairs) ως εξής

$$A = \int \{ \mu_A(x)/x \} \quad \eta \quad \sum \{ \mu_A(x)/x \} \quad \text{για } x \in X \quad (2.3)$$

Τα σύμβολα \int και \sum εκφράζουν το σύνολο και όχι το κλασικό ολοκλήρωμα ή το άθροισμα. Σε πιο απλή μορφή η παραπάνω σχέση (3) μπορεί να γραφεί ως

$$\mu_A(x) = \{ \mu_1(x)/x_1, \mu_2(x)/x_2, \dots, \mu_n(x)/x_n, \} \quad (2.4)$$

2.3.2 Βασικές Ιδιότητες Ασαφών Συνόλων

Κάποιες βασικές ιδιότητες των ασαφών συνόλων είναι οι εξής:

- Το ύψος (*height*) ενός ασαφούς συνόλου A , $\text{hgt}(A)$, ορίζεται ως

$$\text{hgt}(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x) \quad (2.5)$$

Τα ασαφή σύνολα των οποίων το ύψος είναι ίσο με το 1, ονομάζονται *κανονικά*.

- Ο πυρήνας (*core*) ενός ασαφούς συνόλου είναι το υποσύνολο του πεδίου ορισμού της συνάρτησης συμμετοχής για το οποίο το πεδίο τιμών παίρνει

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

τιμές ίσες με τη μονάδα.

$$\text{core}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (2.6)$$

- Το *σύνολο στήριξης (support set)* ενός ασαφούς συνόλου είναι το σύνολο των στοιχείων του υπερσυνόλου αναφοράς X για το οποίο ισχύει ότι

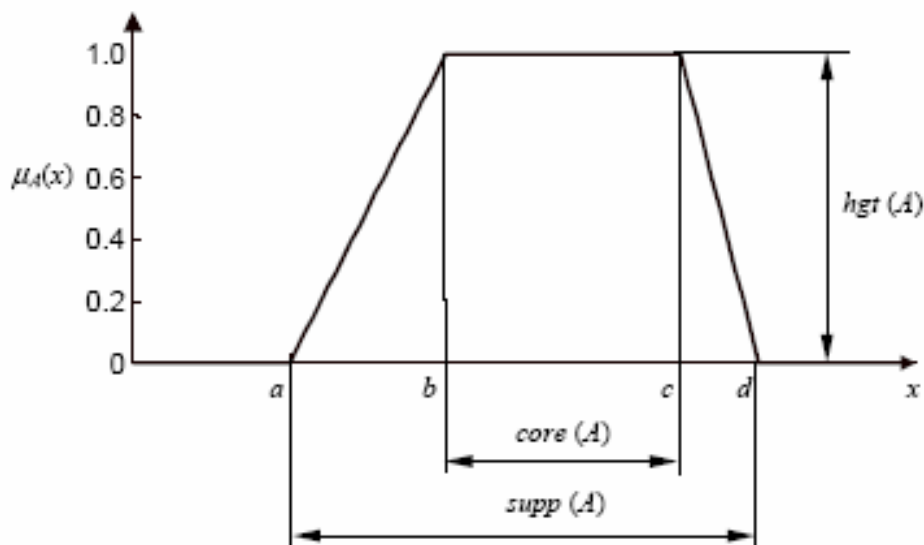
$$\text{supp}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (2.7)$$

Κανονικό ασαφές σύνολο (normal set) είναι το ασαφές σύνολο του οποίου ο πυρήνας δεν είναι κενό σύνολο, δηλαδή υπάρχει τουλάχιστον ένα στοιχείο του τέτοιου ώστε $\mu_A(x)=1$

Σύνολο α-τομής (α-cut) A_α είναι ένα κλασσικό ή crisp σύνολο το οποίο περιέχει όλα τα στοιχεία $x \in X$ που έχουν μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής από μία τιμή α .

$$A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad \text{όπου} \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (2.8)$$

Κυρτό ασαφές σύνολο (convex fuzzy set) είναι το ασαφές σύνολο το οποίο έχει μονότονα αύξουσα ή μονότονα φθίνουσα συνάρτηση συμμετοχής.



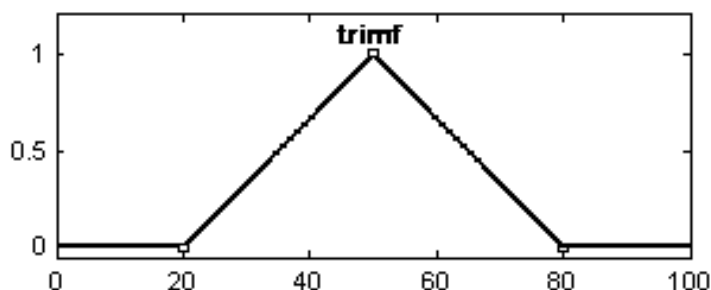
Σχήμα 2.2 Ύψος, υποστήριξη και πυρήνας ενός ασαφούς συνόλου

2.3.3 Συναρτήσεις Συμμετοχής

Υπάρχουν διάφοροι **τύποι συναρτήσεων συμμετοχής** (*Membership functions* ή *MF's*) που αναπαριστούν τα ασαφή σύνολα όπως είναι η *τριγωνική μορφή* (*triangular mf*), η *τραπεζοειδή* (*trapezoidal mf*), η *καμπανοειδή* (*generalized bell mf* ή *gbell mf*), η *γκουσιανή* (*Gaussian mf*), η *μορφή s* (*smf*), η *μορφή ρι* (*rimf*), η *μορφή z* (*zmf*), η *σιγμοειδή* (*sigmoidal mf*) ή ακόμα και μια συγκεκριμένη μαθηματική τιμή.

- **Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής** (*triangular mf*) χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους $\{a, b, c\}$, ως εξής:

$$\text{triangle}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$$

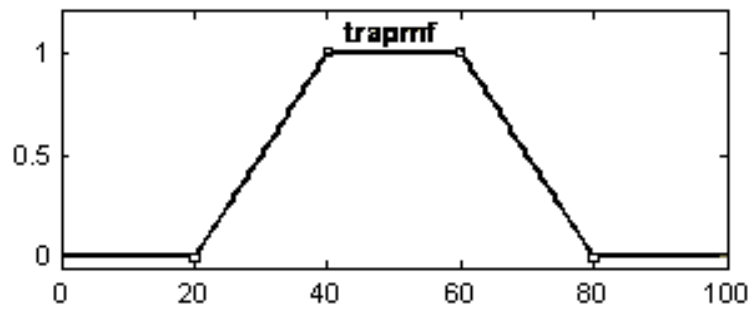


Σχήμα 2.3 Παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής ($x; 20, 50, 80$)

- **Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής** (*trapezoidal mf*) χαρακτηρίζεται από τις τέσσερις παραμέτρους $\{a, b, c, d\}$, ως εξής:

$$\text{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$

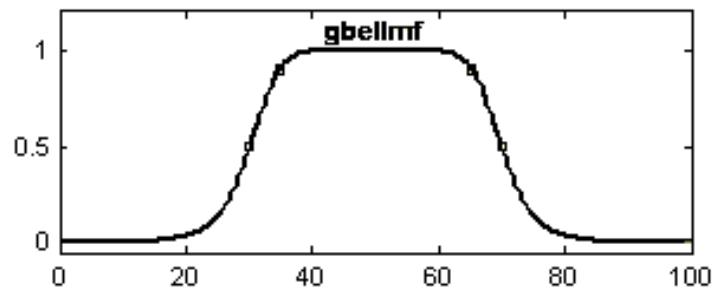
Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 2.4 Παράδειγμα τραπεζοειδής συνάρτησης συμμετοχής (x; 20, 40, 60, 80)

- **Η καμπανοειδής συνάρτηση συμμετοχής** (*generalizebell mf* ή *gbell mf*) χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους {a, b, c}, ως εξής:

$$bell(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}}$$

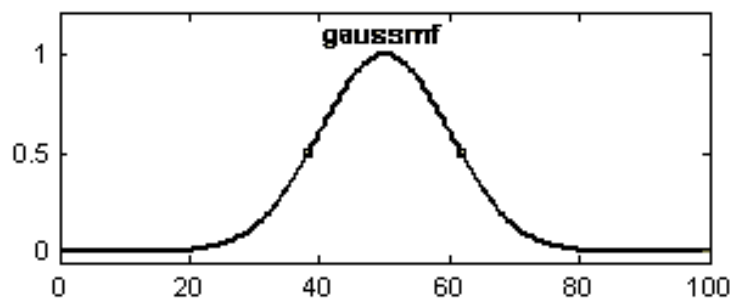


Σχήμα 2.5 Παράδειγμα καμπανοειδής συνάρτησης συμμετοχής (x; 20, 4, 50)

- **Η γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής** (*Gaussian mf*) χαρακτηρίζεται από τις δύο παραμέτρους {σ, c}, όπου το σ καθορίζει το πλάτος της συνάρτησης συμμετοχής (mf) και το c αναπαριστά το κέντρο της mf :

$$gaussian(x; \sigma, c) = e^{-\left(\frac{x - c}{\sigma}\right)^2}$$

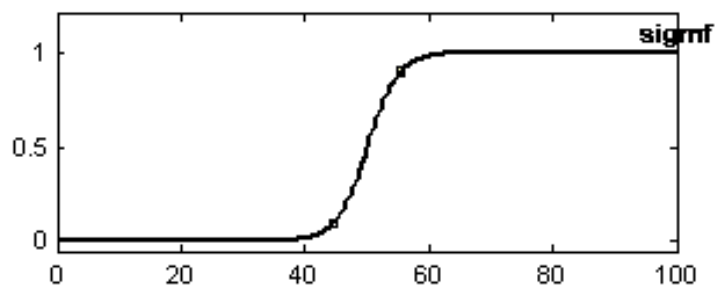
Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 2.6 Παράδειγμα γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής ($x; 10, 50$)

- Η **σιγμοειδή συνάρτηση συμμετοχής** (*sigmoidal mf*) χαρακτηρίζεται από τις δύο παραμέτρους $\{a, c\}$, ως εξής:

$$\text{sigmoid}(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$



Σχήμα 2.7 Παράδειγμα σιγμοειδής συνάρτησης συμμετοχής ($x; 0.4, 50$)

2.3.4 Πράξεις Ασαφών Συνόλων

Μεταξύ των ασαφών συνόλων ορίζονται ορισμένες πράξεις όπως είναι η *ένωση* (*union*), η *τομή* (*intersection*), το *γινόμενο* (*product*), το *αλγεβρικό άθροισμα* (*probor*) και το *συμπλήρωμα* (*complement*) ενός ασαφούς συνόλου.

- Η **ένωση** (*union*) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X \quad (2.9)$$

- Η **τομή** (intersection) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X \quad (2.10)$$

- Το **γινόμενο** (product) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{A \odot B}(x) = \mu_A(x) \bullet \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.11)$$

- Το **αλγεβρικό άθροισμα** (probor) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{A \oplus B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.12)$$

- Το **συμπλήρωμα** (complement) ενός ασαφούς συνόλου ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (2.13)$$

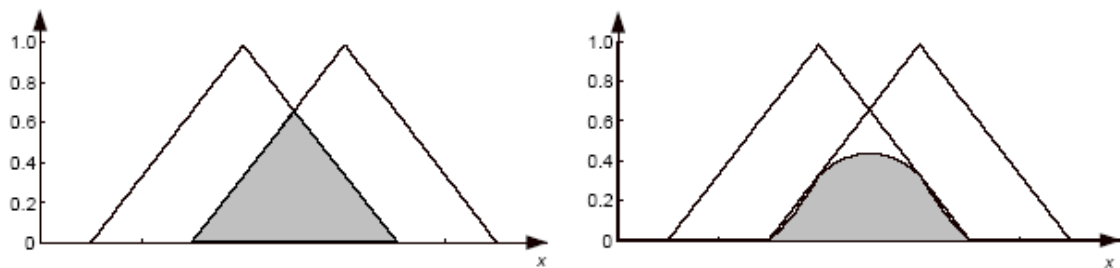
Αν η συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου A είναι μικρότερη ή ίση με τη συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου B , τότε το ασαφές σύνολο A είναι **υποσύνολο** (subset) του ασαφούς συνόλου B :

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

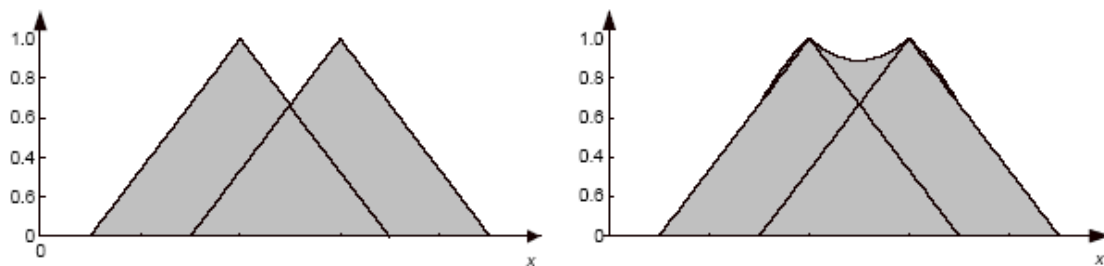
$$(A \subseteq B) \text{ αν } \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.14)$$

Ισότητα(identical) ασαφή σύνολα είναι δύο ασαφή σύνολα A και B όταν οι συναρτήσεις συμμετοχής τους σε όλα τα σημεία είναι όμοιες:

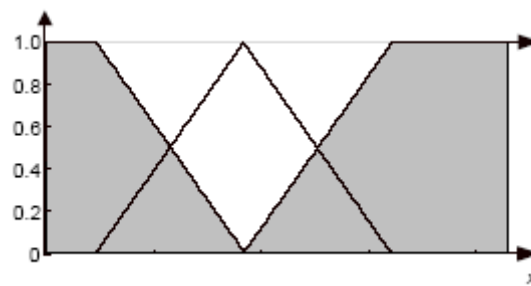
$$A = B \text{ αν } \mu_A(x) \equiv \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.15)$$



Σχήμα 2.8 Minimum (αριστερά) και Product (δεξιά) δύο ασαφή συνόλων



Σχήμα 2.9 Maximum (αριστερά) δύο ασαφή συνόλων και Probabilistic sum (δεξιά) δύο ασαφή συνόλων



Σχήμα 2.10 Complement ενός ασαφούς συνόλου

2.3.5 Λεκτικοί Τροποποιητές

Τα ασαφή σύνολα εκφράζουν ασαφή έννοιες που χρησιμοποιούνται καθημερινά στη φυσική γλώσσα του ανθρώπου, όπως είναι για παράδειγμα οι λεκτικοί όροι “κοντός”, “μέτριος” και “ψηλός”. Οι ασαφείς αυτές έννοιες έχουν τη δυνατότητα να παράγουν άλλες ασαφείς έννοιες με την χρήση *λεκτικών τροποποιητών ή φρακτών (linguistic modifiers or linguistic hedges)*, όπως “πολύ” (very), “πολύ πολύ” (very very), “ελαφρά” (slightly), “σχεδόν” (rather), “επιπλέον” (plus) και “λιγότερο” (minus). Για παράδειγμα ο λεκτικός όρος “ψηλός” με τους παραπάνω λεκτικούς τροποποιητές παράγει ασαφείς έννοιες όπως “πολύ ψηλός” (very tall), “πολύ πολύ ψηλός” (very very tall), “ελαφρώς ψηλός” (slightly tall) κτλ.

Αν “A” ένας λεκτικός όρος και $\mu_A(x)$ η συνάρτηση συμμετοχής του, τότε σύμφωνα με τα παραπάνω οι τροποποιημένοι όροι του που θα παραχθούν, θα έχουν τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής :

- “Very A”: $\mu_{veryA}(x) = \mu_A^2(x)$ (2.16)

- “Very Very A”: $\mu_{veryveryA}(x) = \mu_A^4(x)$ (2.17)

- “Plus A”: $\mu_{plusA}(x) = \mu_A^{1.25}(x)$ (2.18)

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

- “Minus A”: $\mu_{MinusA}(x) = \mu_A^{0.75}(x)$ (2.19)

- “Slightly A”: $\mu_{slightlyA}(x) = \sqrt{\mu_A(x)}$ (2.20)

2.4 Ασαφείς Κανόνες

Ένας ασαφής κανόνας (if-then rule) είναι στην πιο απλή μορφή του:

$$\text{"If } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B\text{"}$$

όπου το τμήμα «*If x is A*» είναι το τμήμα *υπόθεσης (premise part)* και το τμήμα «*then y is B*» είναι το τμήμα *απόφασης ή συμπεράσματος (consequent part)*.

Οι ασαφείς κανόνες είναι υποθετικές προτάσεις και αποτελούν απαραίτητα δομικά στοιχεία συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων. Για να γίνει αυτό κατανοητό αρκεί να ερμηνευτούν τα στοιχεία του παραπάνω κανόνα:

- A, B είναι τα ασαφή σύνολα τα οποία συνδυάζονται μεταξύ τους,
- x είναι η τιμή μιας μεταβλητής εισόδου η οποία παίρνει ένα βαθμό συμμετοχής στο ασαφές σύνολο A (*διαδικασία της ασαφοποίησης "fuzzyfication"*),
- y είναι η έξοδος του συστήματος που εξάγεται από μηχανισμό συμπεράσματος (inference engine) σε ασαφή μορφή και δηλώνει την απόφαση του κανόνα.

Το ασαφές συμπέρασμα μετά από-ασαφοποιείται με τον μηχανισμό της *αποσαφοποίησης (defuzzification)* ώστε στο τέλος να προκύψει μία σαφής τιμή.

Σε περίπτωση περισσότερων της μίας εισόδου $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ οι κανόνες έχουν την εξής μορφή:

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } A_2 \text{ and } \dots x_n \text{ is } A_n \text{ then } y \text{ is } B$$

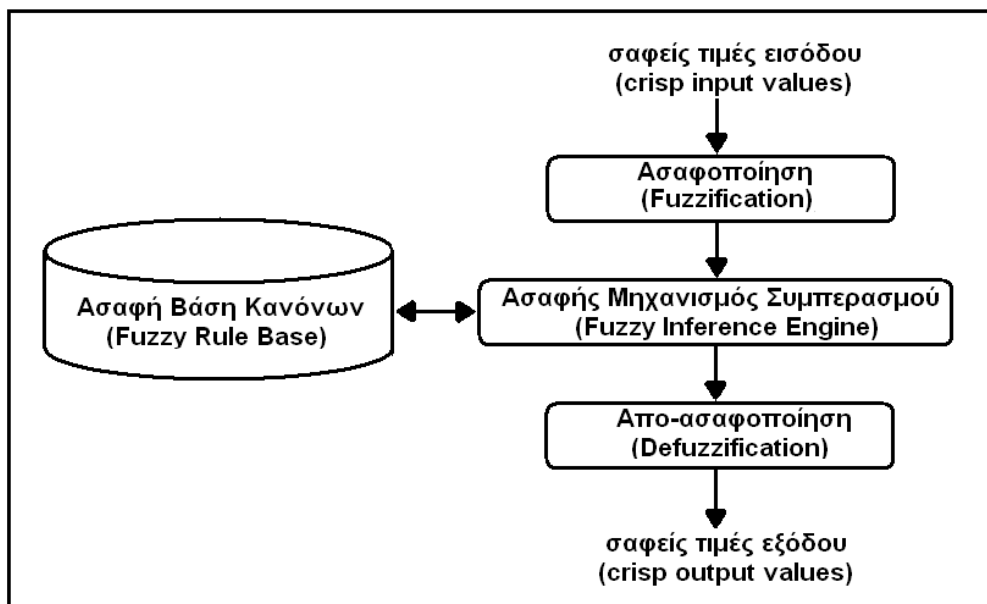
Ακολούθως μπορούν να υπάρχουν και παραπάνω από μία εξοδοι.

2.5 Ασαφείς Ελεγκτές

Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός **ασαφούς ελεγκτή (fuzzycontroller)** είναι:

- **Η βάση γνώσης (knowledgebase)** στην οποία είναι αποθηκευμένοι οι κανόνες (if-thenrules) για τον έλεγχο της διαδικασίας.
- **Τα ασαφή σύνολα (fuzzysets)** τα οποία χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν της μεταβλητές εισόδου και εξόδου με τους λεκτικούς όρους.
- **Ο ασαφοποιητής (fuzzifier)** ο οποίος μετατρέπει τις πραγματικές τιμές της εισόδου σε ασαφή σύνολα
- **Ο μηχανισμός συμπερασμού (inferenceengine)** ο οποίος επεξεργάζεται τις εξόδους του ασαφοποιητή και με χρήση της βάσης γνώσης εξάγει τα ασαφή σύνολα των συμπερασμάτων.
- **Ο από-ασαφοποιητής (defuzzifier)** ο οποίος μετατρέπει τα συμπεράσματα που εξάγει ο μηχανισμός συμπερασμού σε πραγματικούς αριθμούς για να
μπορεί
να γίνει μετάδοση της δράσης ελέγχου στην διαδικασία

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 2.11 Χαρακτηριστικό διάγραμμα ροής του ασαφούς συμπερασμού

Οι εισόδοι σε έναν ασαφή ελεγκτή είναι σήματα (δηλαδή σαφείς μεταβλητές) και επομένως πρέπει ο σχεδιαστής ενός ασαφούς ελεγκτή να κάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. **Λεκτική κατανομή των εισόδων:** Ο σχεδιαστής πρέπει να αναπαραστήσει τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου με τους λεκτικούς όρους.

2. **Διατύπωση των κανόνων:** Τα ασαφή σύνολα μετά την κατανομή των εισόδων και εξόδων αποθηκεύονται υπό τη μορφή συναρτήσεων συμμετοχής στον υπολογιστή και έπειτα ακολουθεί η διατύπωση των κανόνων.

3. **Καθορισμό του τύπου της ασαφούς συνεπαγωγής:** Μετά τη διατύπωση των κανόνων είναι απαραίτητος ο καθορισμός του ασαφούς τύπου συνεπαγωγής. Οι πιο γνωστοί τύποι ασαφούς συνεπαγωγής είναι:

α) του **Mamdani**, όπου χρησιμοποιείται ο τελεστής max-min, ο οποίος λαμβάνει το μικρότερο από τους βαθμούς συμμετοχής των ασαφοποιημένων τιμών και παράγει το *βαθμό εκπλήρωσης (degree of fulfillment)* του κάθε κανόνα. Ο βαθμός εκπλήρωσης του κανόνα δηλώνει τη βαρύτητα που έχει το αποτέλεσμα του κανόνα.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

β) του **Larsen**, όπου χρησιμοποιείται ο τελεστής max-product, ο οποίος πολλαπλασιάζοντας τους βαθμούς συμμετοχής των ασαφопоιημένων τιμών υπολογίζει το βαθμό εκπλήρωσης του κανόνα.

4. **Από-ασαφοποίηση**: Η από-ασαφοποίηση παράγει μία αυστηρή ή crisp τιμή από ένα ασαφές σύνολο. Είναι με λίγα λόγια, η αντίθετη διαδικασία από την ασαφοποίηση. Οι μέθοδοι από-ασαφοποίησης είναι:

- **Από-ασαφοποίηση κεντρικής τιμής** (Centroid defuzzycation ή center of area ή COA), όπου υπολογίζεται το κέντρο βάρους της κατανομής του ασαφούς συνόλου της εξόδου:

$$x'_{COA} = \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (2.21)$$

- **Από-ασαφοποίηση μέσου όρου των μεγίστων** (Mean of Maxima ή MOM), όπου υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών εξόδου που έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής:

$$x'_{MOM} = \frac{1}{m} \sum \max \mu(x) \quad (2.22)$$

- **Από-ασαφοποίηση μικρότερου από τους μεγίστους** (Smallest of maxima ή SOM), όπου υπολογίζεται από τις μέγιστες τιμές εξόδου εκείνη που έχει το μικρότερο βαθμό συμμετοχής.
- **Από-ασαφοποίηση μεγαλύτερου από τους μεγίστους** (Largest of maxima ή LOM), όπου υπολογίζεται από τις μέγιστες τιμές εξόδου εκείνη που έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι η μέθοδος από-ασαφοποίησης της κεντρικής τιμής ή κεντρώου (Centroid ή COA), εξαιτίας της ικανότητάς της να παρουσιάζει σε σχέση με τις άλλες μεθόδους το πιο μικρό σφάλμα.

2.6 Συστήματα Ασαφούς Λογικής

Τα Συστήματα Ασαφούς Λογικής διαφοροποιούνται ανάλογα με τις μορφές που μπορεί να πάρει ένας κανόνας. Οι πιο γνωστές από αυτές τις μορφές είναι:

- **Τύπου Mamdani:** είναι η μορφή που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή "*If x is A then y is B*", και ονομάστηκε έτσι προς τιμή του Ebrahim Mamdani, που ήταν ένας από τους πρώτους που εφάρμοσε την Ασαφή Λογική. Οι έξοδοι των κανόνων της μορφής αυτής είναι ασαφή σύνολα.
- **Τύπου Sugeno – Takagi:** είναι ένας κανόνας της μορφής "*If x is A then y is c*", όπου το c είναι αριθμός ή και ένα crisp ασαφές σύνολο.
- **Τύπου Takagi - Sugeno – Kang ή T-S-K:** είναι μία επέκταση του προηγούμενου κανόνα και αποτελεί έναν από τους κυριότερους τύπους ασαφούς κανόνα ο οποίος χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές ανάπτυξης ασαφών συστημάτων. Έχει τη μορφή "*If x is A then y is $c_0 + c_1 x$* ", όπου $c_0, c_1 \in R$. Οι έξοδοι των κανόνων της μορφής αυτής είναι συναρτήσεις των εισόδων.

2.6.1 Το Ασαφές Μοντέλο Mamdani

Το **ασαφές μοντέλο Mamdani** προτάθηκε σαν μία πρώτη προσπάθεια ελέγχου ενός συστήματος -συγκεκριμένα ενός συνδυασμού μία ατμομηχανής και ενός λέβητα- από ένα σύνολο ασαφών κανόνων (fuzzy if-then rules) .

Η διαδικασία του ασαφούς συμπερασμού του μοντέλου Mamdani εκτελείται αρχικά με την **ασαφοποίηση** των τιμών των εισόδων (fuzzyfication), την **εκτίμηση των κανόνων** (rule evaluation), την **συνάθροιση** (aggregation) των συμπερασμάτων των εξόδων και τέλος την **από-ασαφοποίηση** τους (defuzzification). Στο σχήμα 2.12 αναπαρίστανται τα βήματα της διαδικασίας αυτής.

1ο βήμα: Στη διαδικασία της **ασαφοποίησης** καθορίζεται ο βαθμός κατά τον οποίο οι τιμές των εισόδων ανήκουν στο καθένα από τα ασαφή σύνολα.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

2ο βήμα: Στη συνέχεια αφού οι είσοδοι ασαφοποιηθούν, εφαρμόζονται στα υποθετικά μέρη (antecedents) των κανόνων. Αν ένας κανόνας έχει πολλές υποθέσεις, τότε μέσω των τελεστών AND ή OR δίνεται ένα αριθμός που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα της εκτίμησης του μέρους της υπόθεσης.

Αν χρησιμοποιηθεί ο τελεστής **AND** τότε υπάρχουν δύο περιπτώσεις: α) Αν ο AND χρησιμοποιείται ως **min (τελεστής ελαχίστου Mamdani)** τότε δίνεται ο μικρότερος αριθμός που εκφράζει την εκτίμηση του κανόνα, ενώ β) αν χρησιμοποιείται ως **prod (τελεστής γινομένου Larsen)** τότε δίνεται ένας αριθμός που εκφράζει το γινόμενο της εκτίμησης του κανόνα.

Επίσης αν χρησιμοποιηθεί ο τελεστής **OR** τότε υπάρχουν δύο περιπτώσεις: α) Αν ο OR χρησιμοποιείται ως **max (τελεστής μεγίστου Mamdani)** τότε δίνεται ο μεγαλύτερος αριθμός της αποτίμησης του κανόνα, ενώ β) αν χρησιμοποιείται ως **probor** (2.12) τότε δίνεται ένας αριθμός που εκφράζει το αλγεβρικό άθροισμα της εκτίμησης του κανόνα.

Ο αριθμός αυτός εφαρμόζεται στη συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος (consequent) και η συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος παρουσιάζεται είτε με ευθεία αποκοπή (clipping) είτε με διαβαθμισμένη αποκοπή (scaling) στο επίπεδο της τιμής της υπόθεσης του κανόνα. Η μέθοδος που η συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος παρουσιάζεται με ευθεία αποκοπή ονομάζεται **Συσχέτιση Ελαχίστου (Correlation Minimum)** ενώ η μέθοδος που παρουσιάζεται με διαβαθμισμένη αποκοπή ονομάζεται **Συσχέτιση Γινομένου (Correlation Product)**.

Η μέθοδος της Συσχέτισης Ελαχίστου προτιμάται για την απλότητα και τους γρήγορους μαθηματικούς της υπολογισμούς, παρόλο που παρουσιάζει απώλεια πληροφορίας εξαιτίας του ότι αποκόπτονται τα πάνω μέρη των συναρτήσεων συμμετοχής. Σε αντίθεση η μέθοδος της Συσχέτισης Γινομένου διατηρεί καλύτερα το σχήμα του ασαφούς συνόλου με αποτέλεσμα τη μικρότερη απώλεια πληροφορίας, καθώς η συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος του κανόνα προσαρμόζεται στον πολλαπλασιασμό των βαθμών συμμετοχής της τιμής των υποθέσεων του κανόνα.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

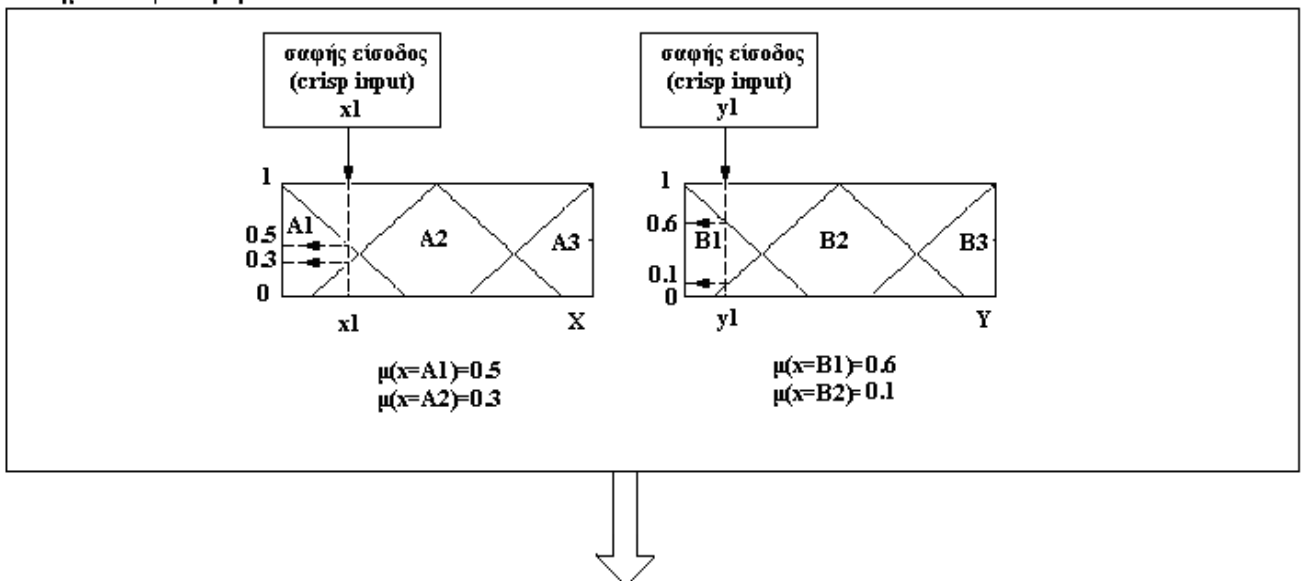
3ο βήμα: Σε αυτό το σημείο τα συμπεράσματα όλων των κανόνων συναθροίζονται.

Συνάθροιση(Aggregation) ονομάζεται η διαδικασία της συνένωσης των συμπερασμάτων όλων των κανόνων. Συγκεκριμένα οι συναρτήσεις συμμετοχής των συμπερασμάτων συνδυάζονται σε ένα ασαφή σύνολο.

4ο βήμα: Η **από-ασαφοποίηση** είναι η διαδικασία μετατροπής του ασαφούς συνόλου σε μία crisp τιμή. Υπάρχουν όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους πολλές μέθοδοι από-ασαφοποίησης όπως είναι η COA, MOM, SOM, LOM κτλ.

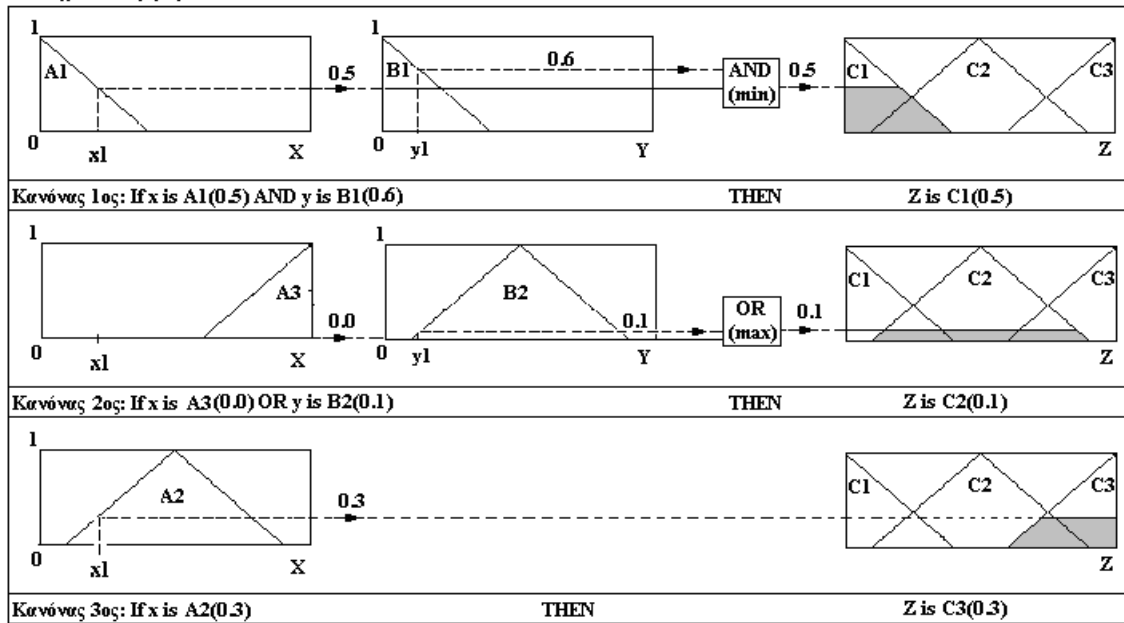
Σχήμα 2.12 Βασική δομή του Mamdani ασαφή συμπερασμού

1ο Βήμα: Ασαφοποίηση εισόδων

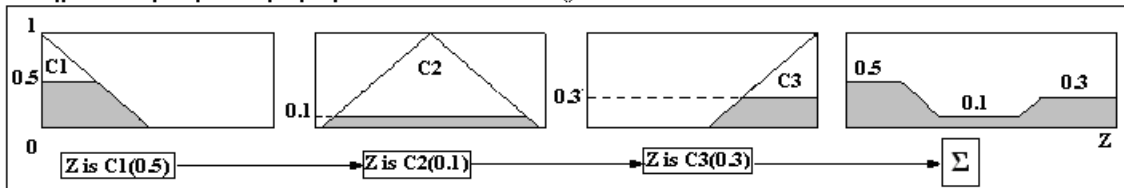


Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

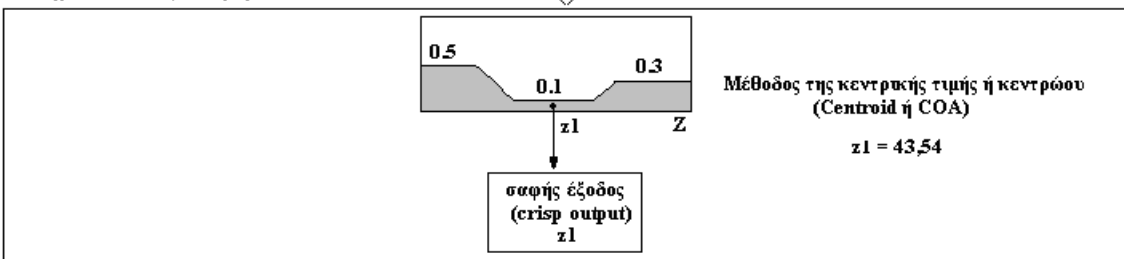
2ο Βήμα: Εκτίμηση κανόνων



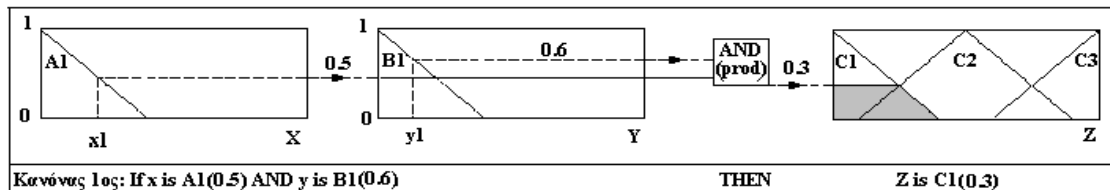
3ο Βήμα: Συνάθροιση των συμπερασμάτων των κανόνων



4ο Βήμα: Απο-ασαφοποίηση



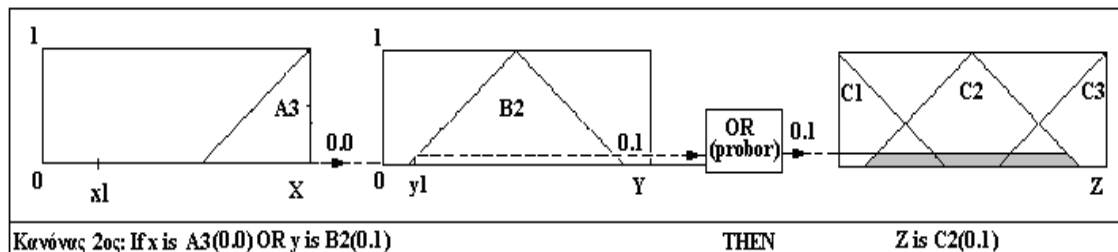
Ο κανόνας 1 μπορεί αν χρησιμοποιηθεί το AND(prod) να αναπαρασταθεί ως εξής (σχήμα 2.13):



Σχήμα 2.13 Ο τελεστής AND product στον ασαφή συμπερασμό

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Ο κανόνας 2 μπορεί αν χρησιμοποιηθεί το OR(probor) να αναπαρασταθεί ως εξής (σχήμα 2.14):

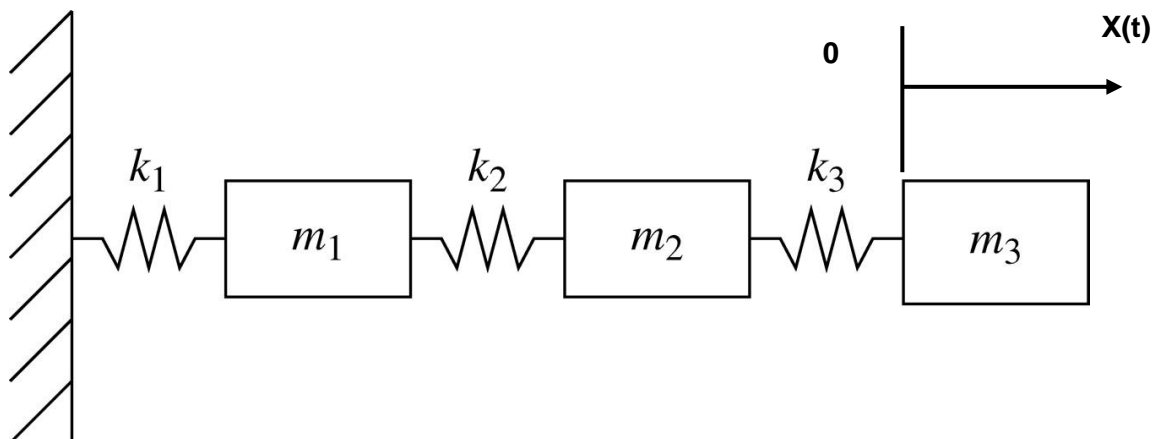


Σχήμα 2.14 Ο τελεστής OR probor στον ασαφή συμπερασμό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 Περιγραφή του προβλήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή του μοντέλου και των στοιχείων που το απαρτίζουν. Το σύστημα υπό μελέτη είναι ένα σύστημα που αποτελείται από τρεις μάζες συνδεδεμένες με τρία ελατήρια όπως παρουσιάζεται στο σχήμα ένα σύστημα με τρεις βαθμούς ελευθερίας. Στο σύστημα τοποθετείται ένας ασαφής ελεγκτής με σκοπό τον έλεγχο ταλαντώσεων της διάταξης καθώς και η παραμονή της δύναμης ελέγχου όσο είναι εφικτό στη θέση ηρεμίας της.



Σχήμα 3.1.1

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Χαρακτηριστικά συστήματος

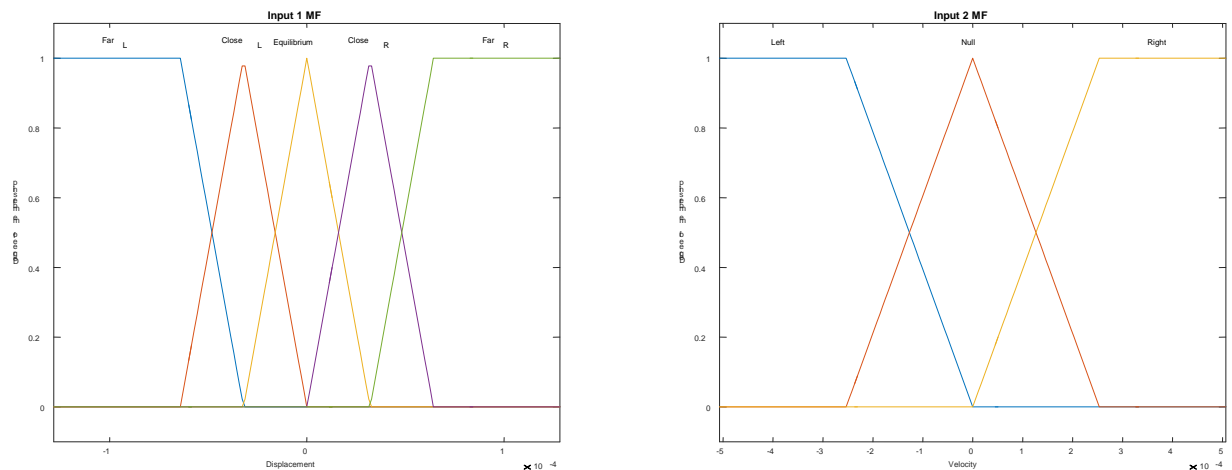
Οι σταθερές των ελατηρίων τεθήκαν $k_1=10000$ N/m, $k_2=5000$ N/m, $k_3=4000$ N/m οι μάζες τους αντίστοιχα $m_1=m_2=m_3=1000$ kg. Η Απόσβεση Rayleigh ίση με 0,01. Η εξωτερική φόρτιση είναι ημιτονοειδής, με το εύρος της να έχει τιμή 1N και τη συχνότητα της με τιμή $\omega = 7$ Hz. Η ολοκλήρωση στο χρόνο έγινε από $t=0$ s έως $t=0.9$ s, με βήμα που επιλέχτηκε μετά από δοκιμές να είναι $t = 0.001$ s. Ο χρόνος ολοκλήρωσης επιλέχτηκε να είναι τόσο μικρός διότι είχαμε σημαντικές αριθμητικές αστάθειες στα αποτελέσματα για τη μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση του συστήματος προς μελέτη.

3.2 Περιγραφή του Ασαφή Ελεγκτή

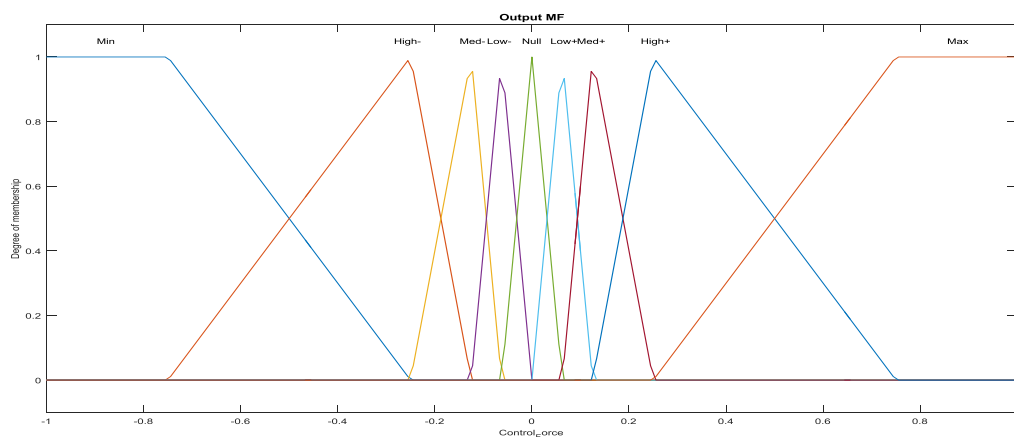
Ο ασαφής ελεγκτής μας είναι τύπου MISO (MULTIPLE INPUT SINGLE OUTPUT). Οι είσοδοι του αφορούν την ταχύτητα και τη μετατόπιση και η μοναδική έξοδος αφορά την δύναμη ελέγχου. Είναι κατασκευασμένος με τη βοήθεια του πακέτου του fuzzy toolbox της Matlab.

Αναλυτικότερα Η πρώτη είσοδος του συστήματος είναι η Displacement (θέση), η οποία περιγράφει την θέση του σημείου προς εξέταση 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 του συστήματος αφορά την μεταβλητή Velocity (ταχύτητα), η οποία περιγράφει την ταχύτητα ανάλογα με την κατεύθυνση που κινείται το σημείο της διάταξης 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 αντίστοιχο σημείο ελέγχου (μάζα) 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.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



3.2.1 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου τριγωνικής μορφής για μετατόπιση (Displacement –input 1 MF) για ταχύτητα (Velocity –input 2 MF)



3.2.2 Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου τριγωνικής μορφής για Δύναμη Ελέγχου (Control Force – output MF)

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 από-ασαφοποίησης επιλέχθηκε η μέθοδος μέσου των μεγίστων MOM. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά το σύστημα, οι κανόνες, τα διαγράμματα Ταχύτητας, Επιτάχυνσης και Μετατόπισης, καθώς και η επιφάνεια που περιγράφει την σχέση μεταξύ των εισόδων (Displacement & Velocity) και εξόδου (Control-Force) σε ασαφές περιβάλλον.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

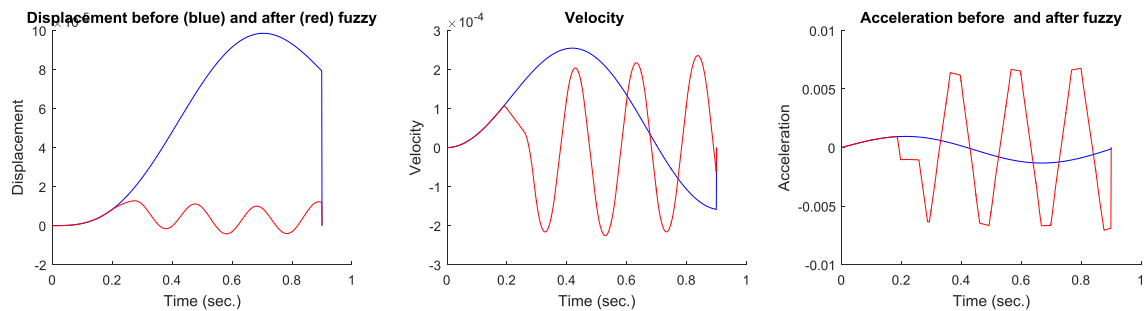
Displacement Velocity	Far_L	Close_L	Equilibrium	Close_R	Far_R
Left	Max	Med+	Low+	Null	Low-
Null	Med+	Low+	Null	Low-	Med-
Right	Low+	Null	Low-	Med-	Min

Πίνακας 1 Κανόνες Αρχικού Ασαφούς Συστήματος

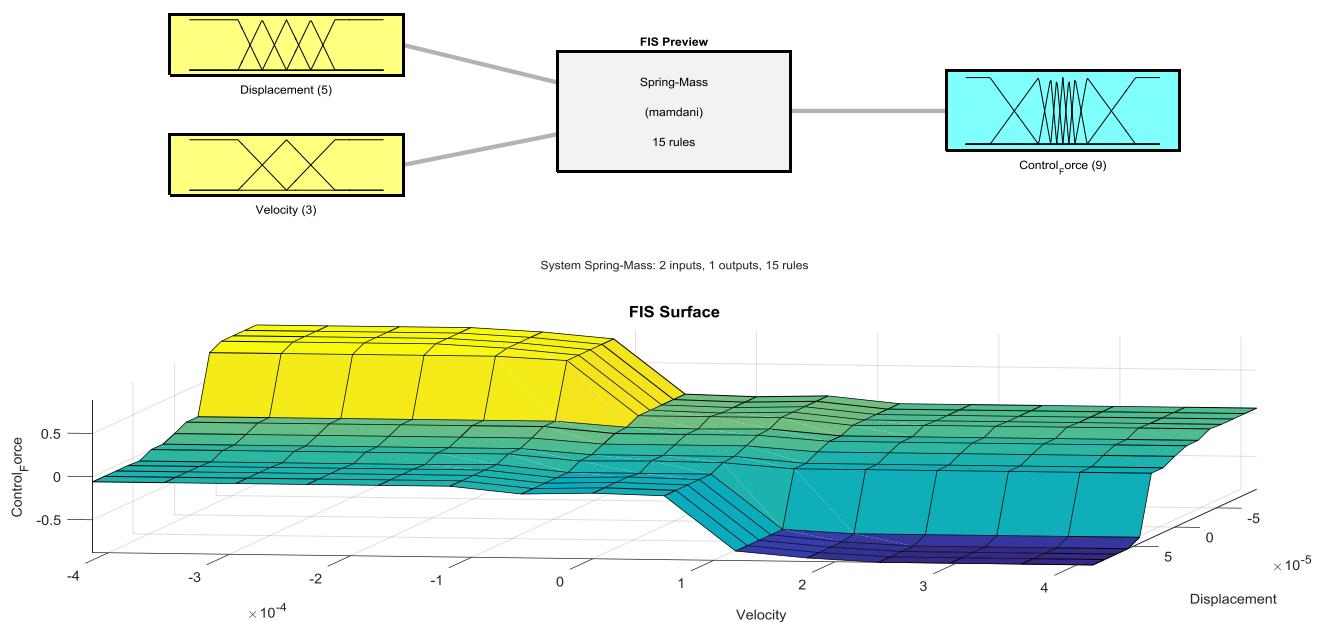
3.3 Αποτελέσματα Ασαφούς Συστήματος χωρίς παραμετροποίηση

Ακολουθούν τα διαγράμματα που αφορούν τις διακυμάνσεις Μετατοπίσεως-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης καθώς και η Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος για το αρχικό μας σύστημα με σημείο εφαρμογής της δύναμης και του ασαφούς ελέγχου το τρίτο. Προέκυψαν από τη χρήση του λογισμικού της Matlab ,όπου οι εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος μετασχηματίστηκαν με τέτοιο τρόπο στην ανάλογη προγραμματιστική γλώσσα .Απώτερος στόχος η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γραφικά πριν την εφαρμογή του Ασαφούς ελέγχου και μετά την εφαρμογή του σε κάποιο σημείο ελέγχου ($1^{ou}, 2^{ou}, 3^{ou}$) με την επιβολή εξωτερικής δύναμης στο αντίστοιχο σημείο. Μια από τις πολλές δυνατότητες του λογισμικού είναι η εξαγωγή των στατιστικών στοιχείων που απαρτίζουν τα γραφήματα (min,max,mean,median,std,range).Με αυτό το τρόπο μπορούμε να κάνουμε συγκρίσεις για τις ακραίες τιμές, το εύρος και το μέσο εύρος των στοιχείων που εξετάζουμε.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 3.3.1 Διαγράμματα Διακυμάνσεων Μετατόπισης-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης πριν τον Ασαφή Έλεγχο (Blue) μετά τον Ασαφή Έλεγχο (Red)



Σχήμα 3.3.2 Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη (max) και ελάχιστη τιμή (min), το μέσο εύρος (average) και εύρος τιμών (range) μετά την εφαρμογή του ελέγχου. Με μονάδες μέτρησης στο S.I m/s για ταχύτητα, m για μετατόπιση, m/s² για επιτάχυνση.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-4.204e-06	1.271e-05	1.691e-05	3.661e-06
Velocity	-0.0002257	0.0002356	0.0004613	2.909e-05
Acceleration	-0.007056	0.006765	0.01382	0.000273

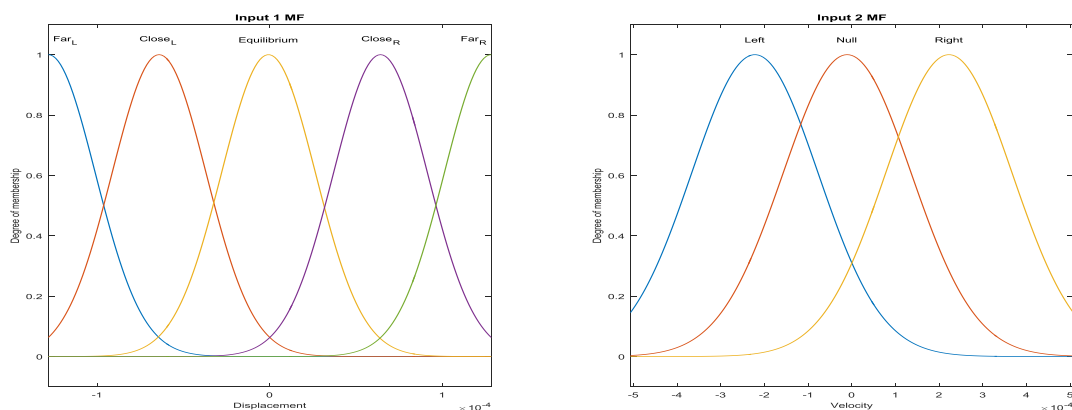
Πίνακας 2 Στατιστικά Αποτελέσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Παραμετροποιήσεις Του Ασαφούς Ελεγκτή

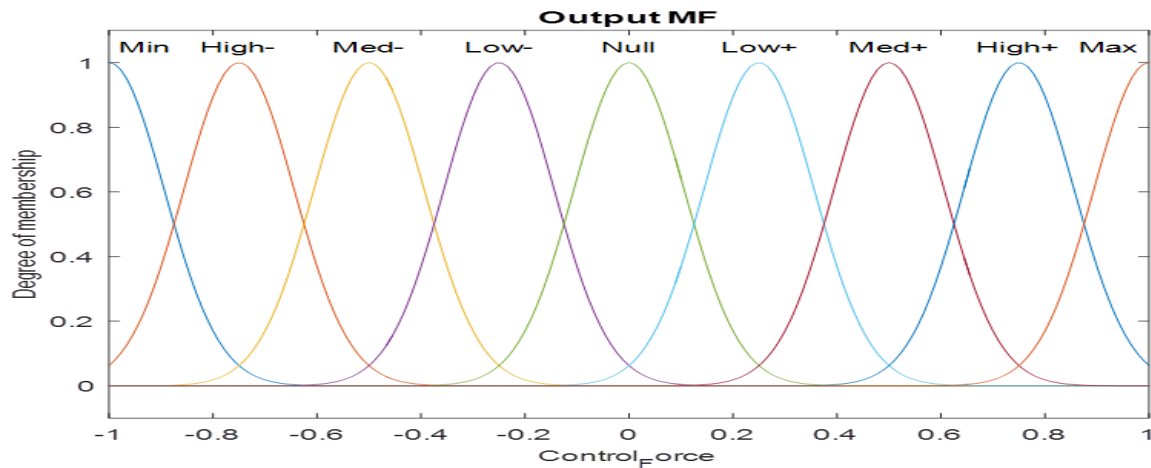
4.1 Μετατροπή Συναρτήσεων Συμμετοχής Gauss

Η πρώτη παραμετροποίηση που θα πραγματοποιήσουμε είναι η μετατροπή της μορφής των συναρτήσεων συμμετοχής εισόδου και εξόδου από τριγωνικές σε Gauss. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος θα παραμείνουν αμετάβλητα. Η διαδικασία μετατροπής των συναρτήσεων συμμετοχής θα γίνει σύμφωνα με τη θεωρία που έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 2 παράγραφος 2.2.3. Σύμφωνα με τη θεωρία ελέγχου αναμένουμε μείωση των τιμών που περιγράφουν τη παράμετρο της ταχύτητας του σημείου προς εξέταση.



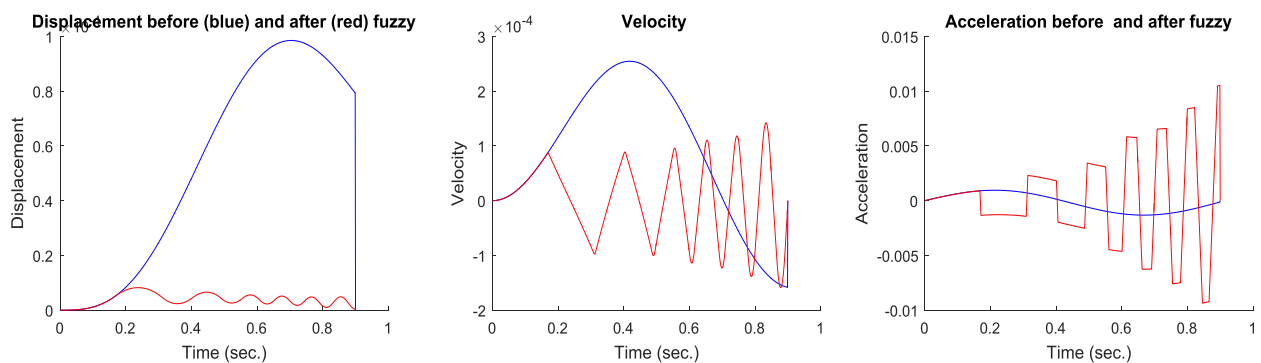
Σχήμα 4.1.1 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου μορφής Gauss για μετατόπιση (displacement –input 1 MF) για ταχύτητα (velocity – input 2 MF)

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



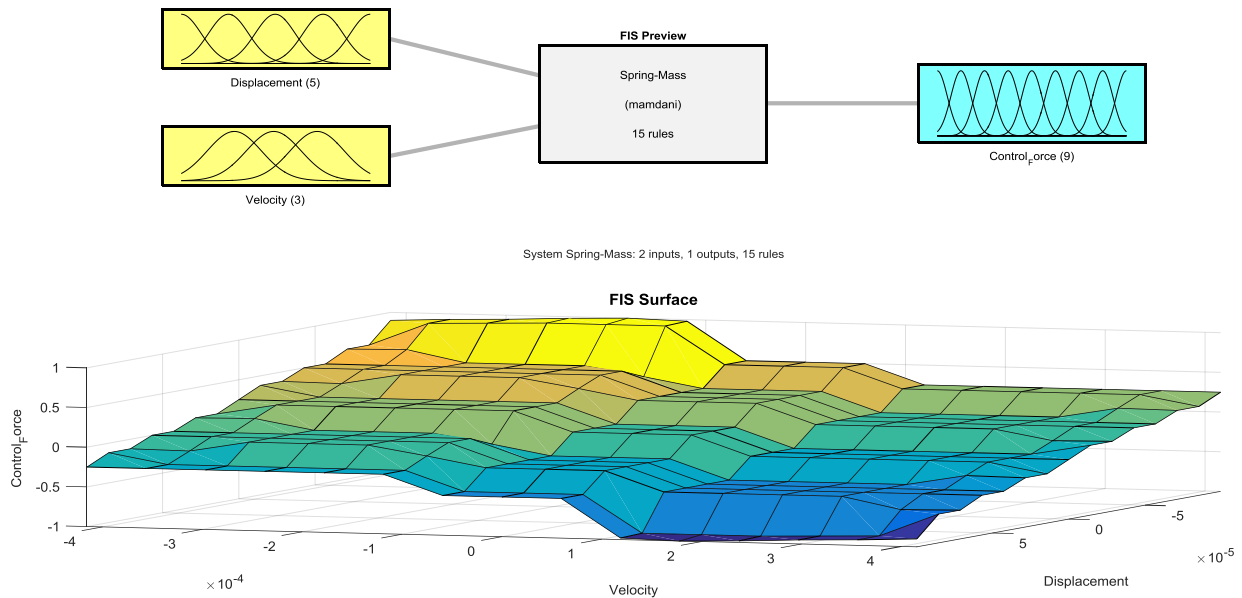
Σχήμα 4.1.2 Συνάρτηση συμμετοχής εξόδου μορφής Gauss για Δύναμη Ελέγχου (ControlForce –outputMF)

Ακολουθούν τα διαγράμματα που αφορούν τις διακυμάνσεις Μετατοπίσεως-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης καθώς και η Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος. Με μονάδες μέτρησης στο SI m/s για ταχύτητα, m για μετατόπιση, m/s² για επιτάχυνση αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1.3 Διαγράμματα Διακυμάνσεων Μετατόπισης-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης πριν τον Ασαφή Έλεγχο (Blue) μετά τον Ασαφή Έλεγχο (Red)

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 4.1.4 Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη (max) και ελάχιστη τιμή (min), το μέσο εύρος (average) και εύρος τιμών (range) μετά την εφαρμογή του ελέγχου. Με μονάδες μέτρησης στο SI m/s για ταχύτητα, m για μετατόπιση, m/s² για επιτάχυνση αντίστοιχα.

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	0	8.213e-06	8.213e-06	3.659e-06
Velocity	-0.0001588	0.0001419	0.0003007	6.851e-06
Acceleration	-0.009362	0.01052	0.01989	0.0002082

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Πίνακας 3 Στατιστικά Αποτελέσματα

Το επόμενο βήμα της μελέτης μας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετροποιημένης δοκιμής μας σε σχέση με τα αποτελέσματά της αρχικής που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 παράγραφος 3.2.1 μέσω της ακόλουθης σχέσης:

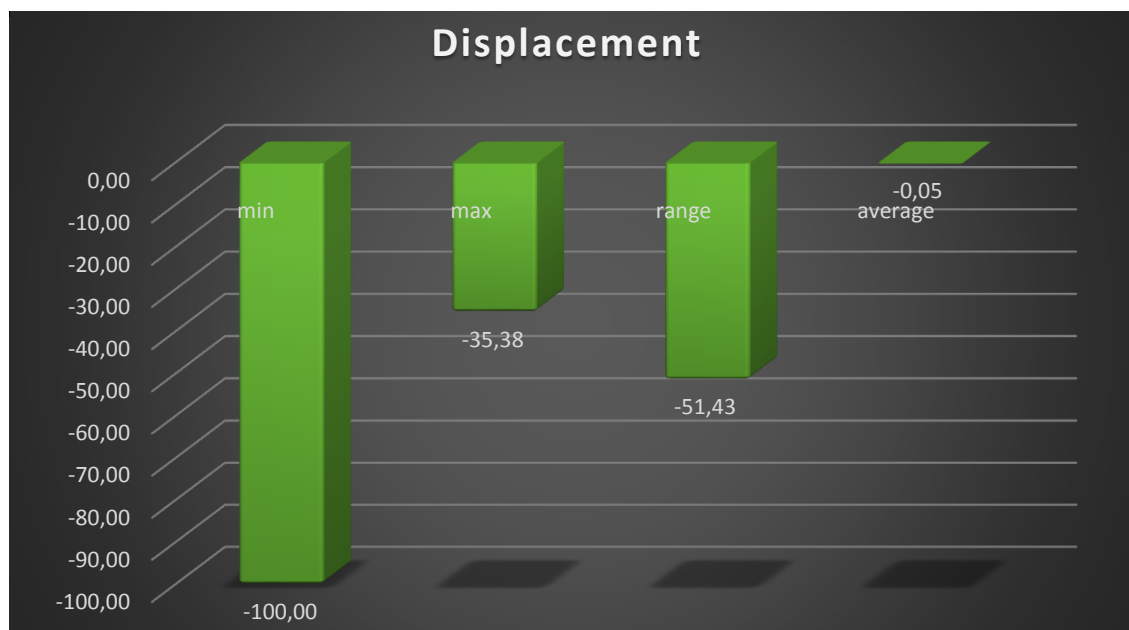
(Παραμετροποιημένη δοκιμή – Αρχική Δοκιμή)%

Αρχική Δοκιμή

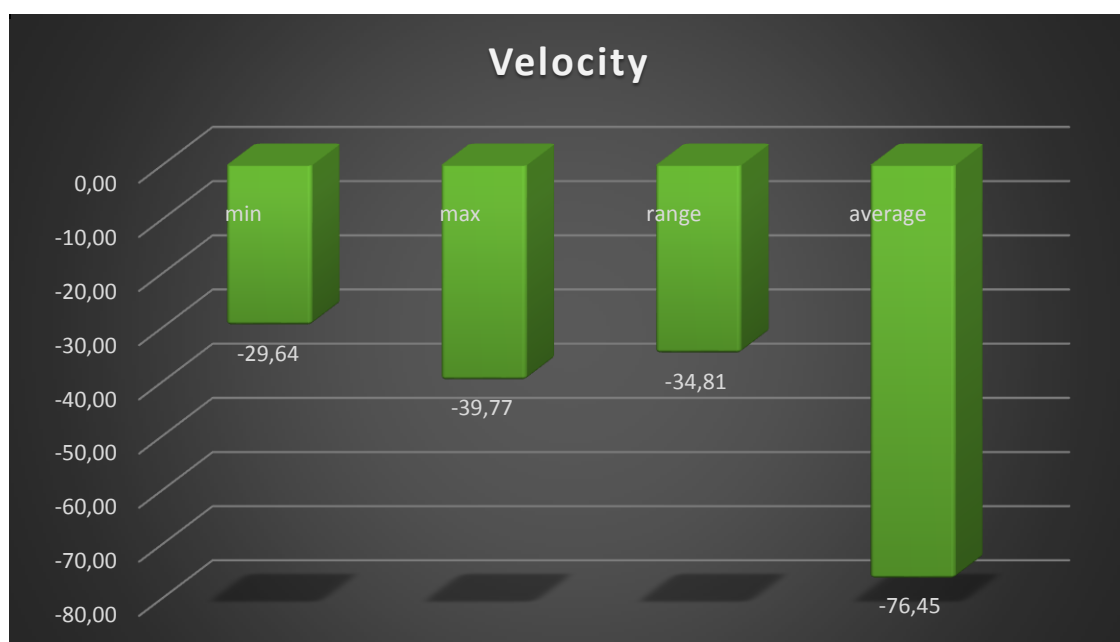
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-100,00	-35,38	-51,43	-0,055
Velocity	-29,64	-39,77	-34,81	-76,45
Acceleration	32,68	55,51	43,92	-23,74

Πίνακας 4 Συγκρίσεις τιμών σε σχέση με τις Αρχικές %

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

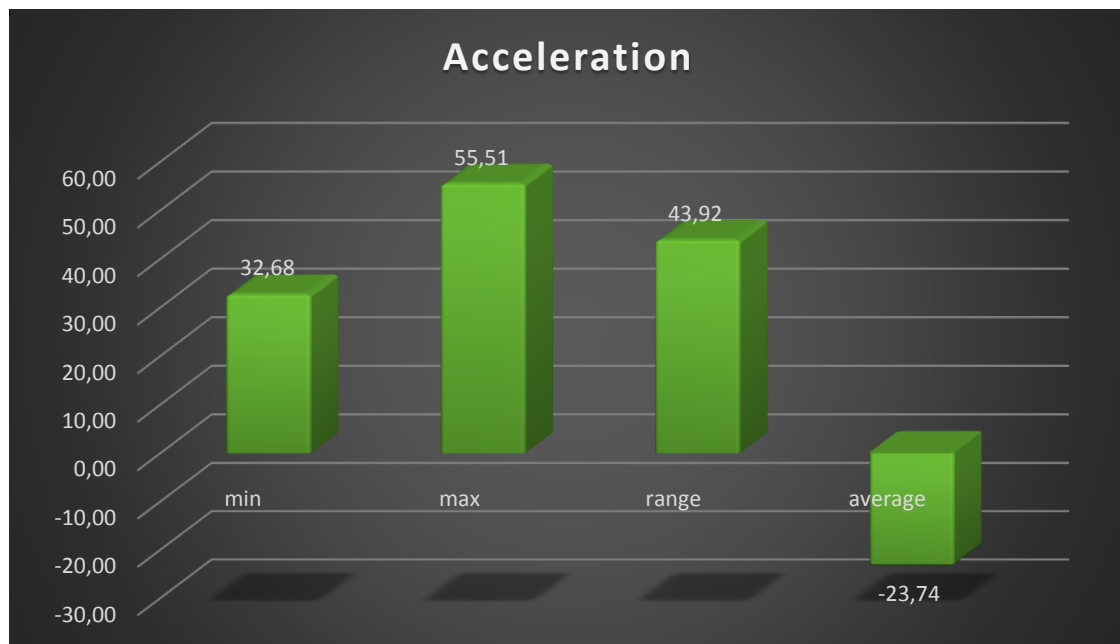


Σχήμα 4.1.5 Διάγραμμα αυξομείωσης ταλάντωσης



Σχήμα 4.1.6 Διάγραμμα αυξομείωσης Ταχύτητας

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



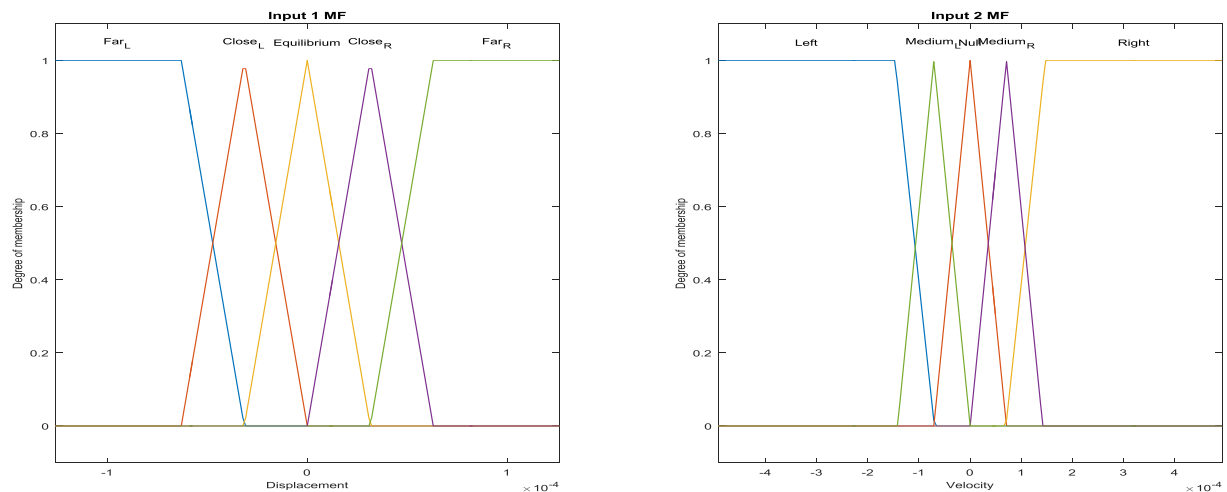
Σχήμα 4.1.7 Διάγραμμα αυξομείωσης Επιτάχυνσης

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

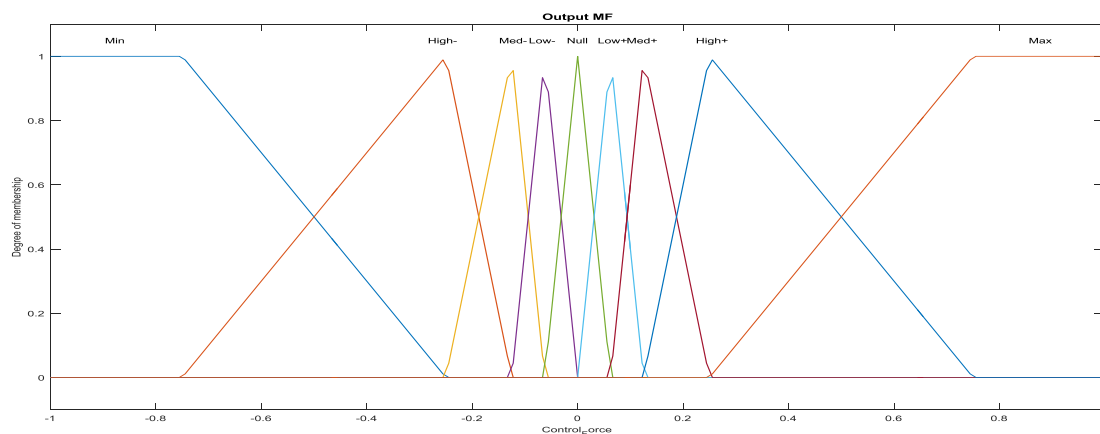
Παρατηρούμε ότι με την μετατροπή των τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής σε Gauss έχουμε καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη ταχύτητα και τη μετατόπιση της διατάξεως προς μελέτη. Αναλυτικότερα έχουμε μειώσεις στο άνω όριο της ταλάντωσης της τάξεως 39,77%, στο κάτω όριο 100%, στο εύρος 51,43% και στο μέσο εύρος τιμών μια μικρή μείωση της τάξεως 0,05% γεγονός που καθιστά τον έλεγχο αρκετά αποτελεσματικό. Όσο αφορά τη ταχύτητα έχουμε μειώσεις στο άνω όριο της τάξεως 39,77%, στο κάτω όριο 29,64% ,στο εύρος 34,81% και στο μέσο εύρος τιμών 76,45%. Σε σχέση με την επιτάχυνση παρατηρούμε αυξήσεις σε όλα τα μεγέθη εκτός του μέσου εύρους τιμών. Στο κάτω όριο έχουμε μείωση της τάξεως 32,68%, στο άνω όριο 55,51%, στο εύρος τιμών 43,92% καθώς και στο μέσο εύρος τιμών αύξηση της τάξεως 23,74%.

4.2 Παραμετροποίηση Ταχύτητας

Η δεύτερη παραμετροποίηση που θα πραγματοποιήσουμε αφορά μόνο την είσοδο της ταχύτητας του συστήματος υπό εξέταση. Προσθέτουμε στο αρχικό μας σύστημα δυο ακόμα συναρτήσεις συμμετοχής την *Medium_L* και την *Medium_R*, αναμεσά στη *Left* και *Null* και *Null* και *Right* αντίστοιχα. Η είσοδος που αφορά τη μετατόπιση θα παραμείνει ίδια καθώς και η έξοδος που αφορά τη δύναμη ελέγχου.



Σχήμα 4.2.1 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου τριγωνικής μορφής για μετατόπιση (Displacement –input 1 MF) για ταχύτητα (Velocity –input 2 MF)



Σχήμα 4.2.2 Συνάρτηση συμμετοχής εξόδου τριγωνικής μορφής για Δύναμη Ελέγχου (ControlForce –outputMF)

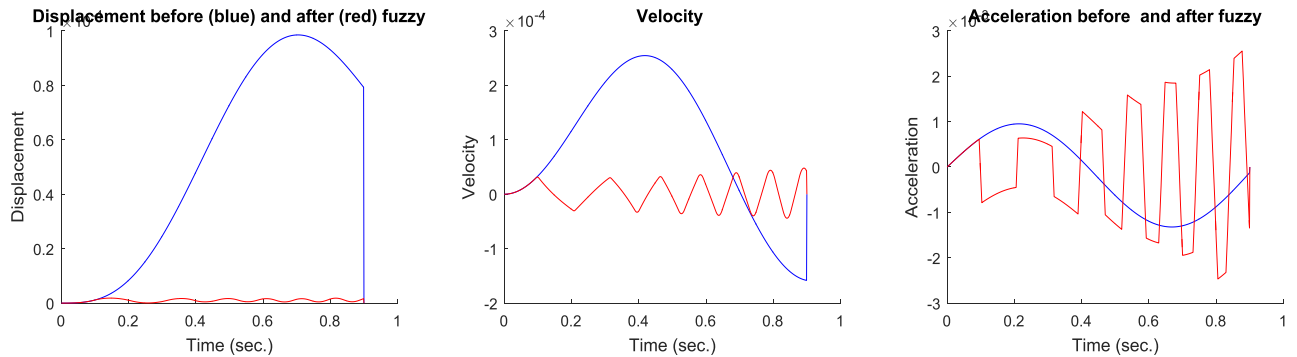
Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Σε αυτή τη περίπτωση για να μπορέσει να είναι λειτουργικό το σύστημά μας πρέπει να αλλάξουμε τους ασαφείς κανόνες της βάσης γνώσεως. Θα χρησιμοποιήσουμε 25 κανόνες μετά από σχετικές δοκιμές και συγκρίσεις αποτελεσμάτων που προηγήθηκαν. Οι κανόνες έχουν συντελεστή 1 και συνδέονται με τον τελεστή AND. Ο ελεγκτής παραμένει ίδιος με μέθοδο από-ασαφοποίησης αυτή του μέσου όρου των μεγίστων MOM. Ακολουθούν παρακάτω τα διαγράμματα που αφορούν τις διακυμάνσεις Μετατοπίσεως-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης η Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος καθώς και οι κανόνες που χρησιμοποιούμε για τη παραμετροποιημένη δοκιμή .

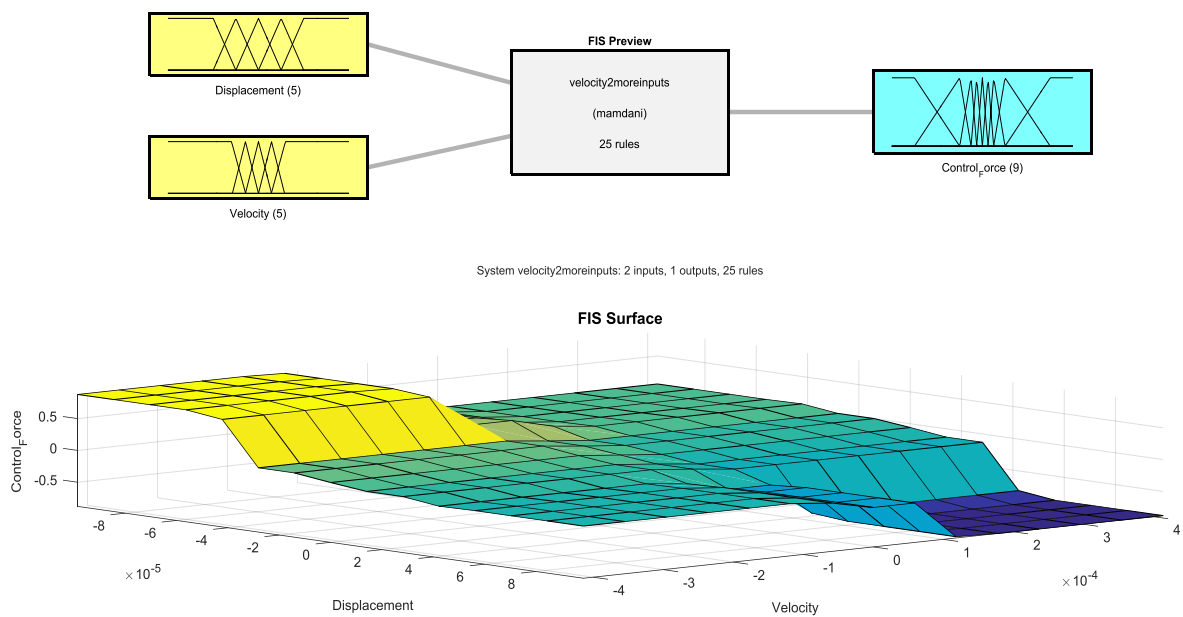
Velocity Displacement	Left	Medium_L	Null	Medium_R	Right
Far_L	Max	High+	High+	Med+	Low+
Close_L	Med+	Med+	Low+	Null	Null
Equilibrium	Low+	Low+	Null	Low-	Low-
Close_R	Null	Null	Low-	Med-	Med-
Far_R	Low-	Med-	High-	High-	Min

Πίνακας 5 Κανόνες ασαφούς συστήματος με τροποποιημένη την είσοδο της Ταχύτητας

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 4.2.3 Διαγράμματα Διακυμάνσεων Μετατόπισης-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης πριν τον Ασαφή Έλεγχο (Blue) μετά τον Ασαφή Έλεγχο (Red)



Σχήμα 4.2.4 Επιφάνεια Ασαφοποίησης

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη (max) και ελάχιστη τιμή (min), το μέσο εύρος (average) και εύρος τιμών (range) μετά την εφαρμογή του ελέγχου. Με μονάδες μέτρησης στο S.I m/s για ταχύτητα, m για μετατόπιση, m/s² για επιτάχυνση .

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	0	1.833e-06	1.833e-06	9.551e-07
Velocity	-4.405e-05	4.796e-05	9.201e-05	2.781e-06
Acceleration	-0.002469	0.002555	0.005024	0.000167

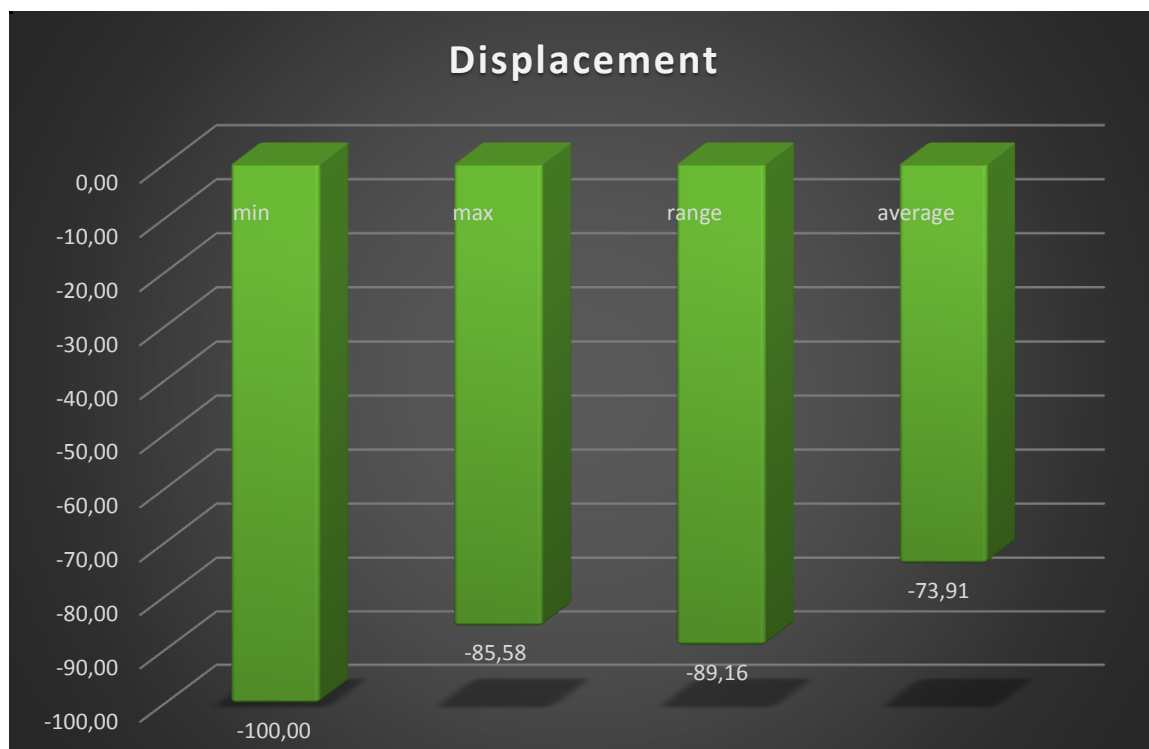
Πίνακας 6 Στατιστικά Αποτελέσματα

Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετροποιημένης δοκιμής μας σε σχέση με τα αποτελέσματα της αρχικής που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 παράγραφος 3.2.1 μέσω της σχέσης που έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4.1.

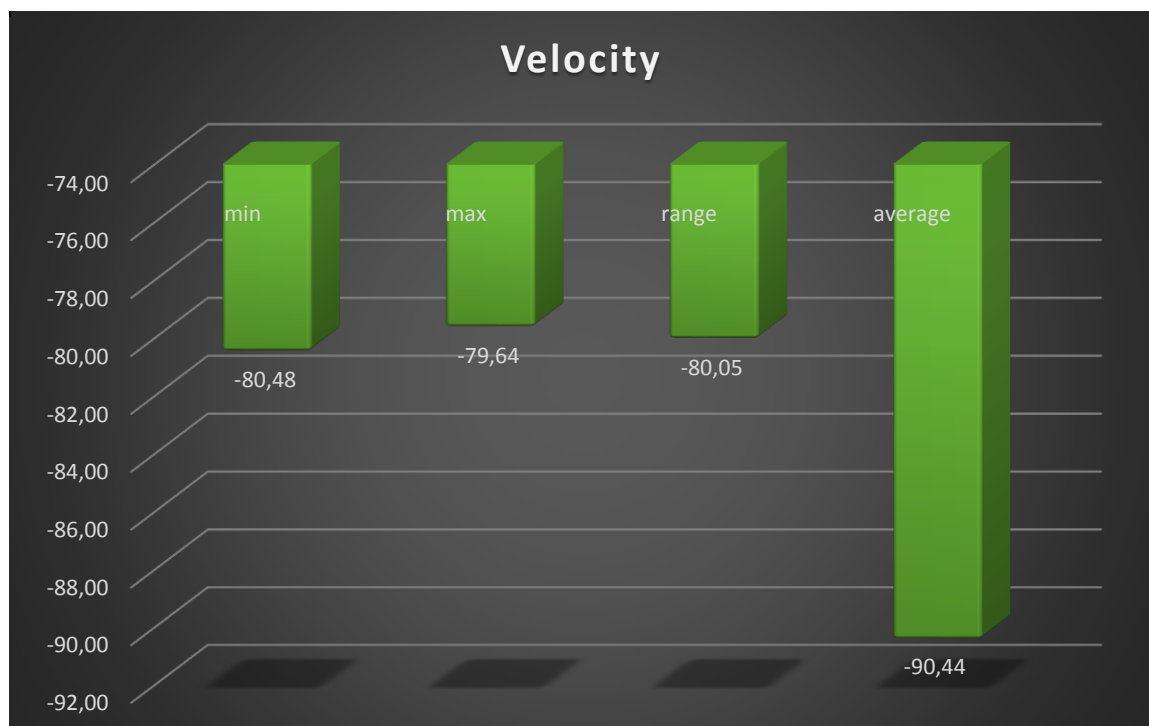
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-100,00	-85,58	-89,16	-73,91
Velocity	-80,48	-79,64	-80,05	-90,44
Acceleration	-65,01	-62,23	-63,65	-38,83

Πίνακας 7 Συγκρίσεις τιμών σε σχέση με τις Αρχικές %

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

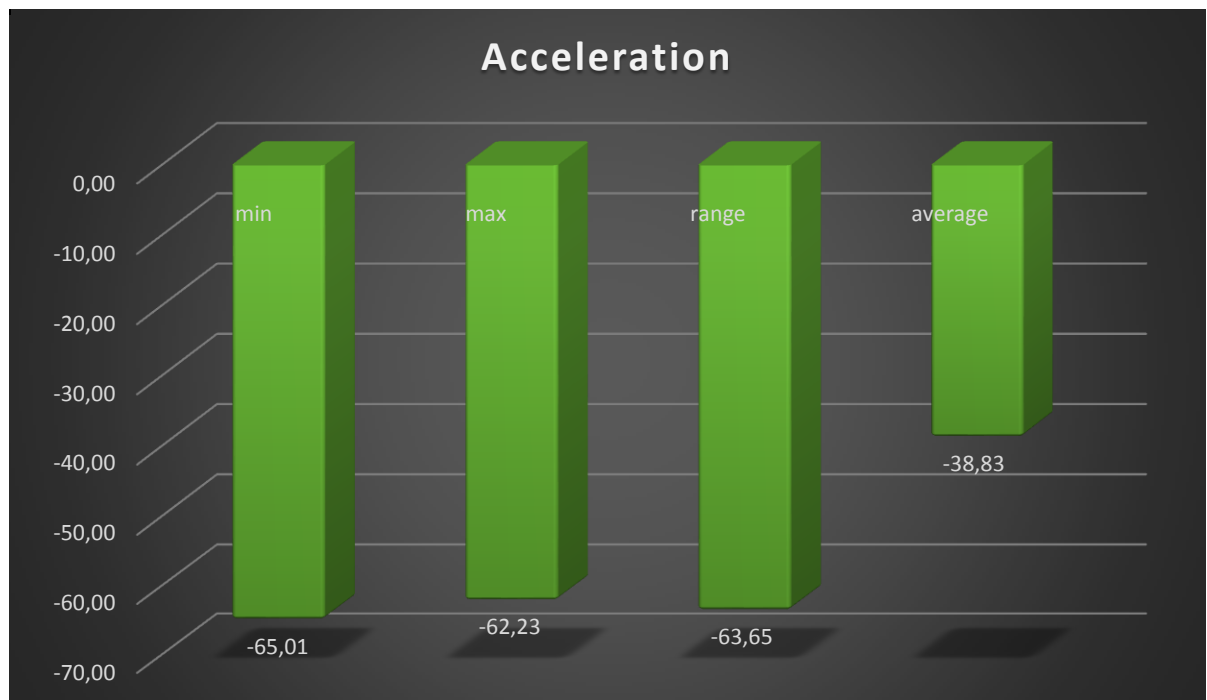


Σχήμα 4.2.5 Διάγραμμα αυξομείωσης ταλάντωσης



Σχήμα 4.2.6 Διάγραμμα αυξομείωσης Ταχύτητας

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



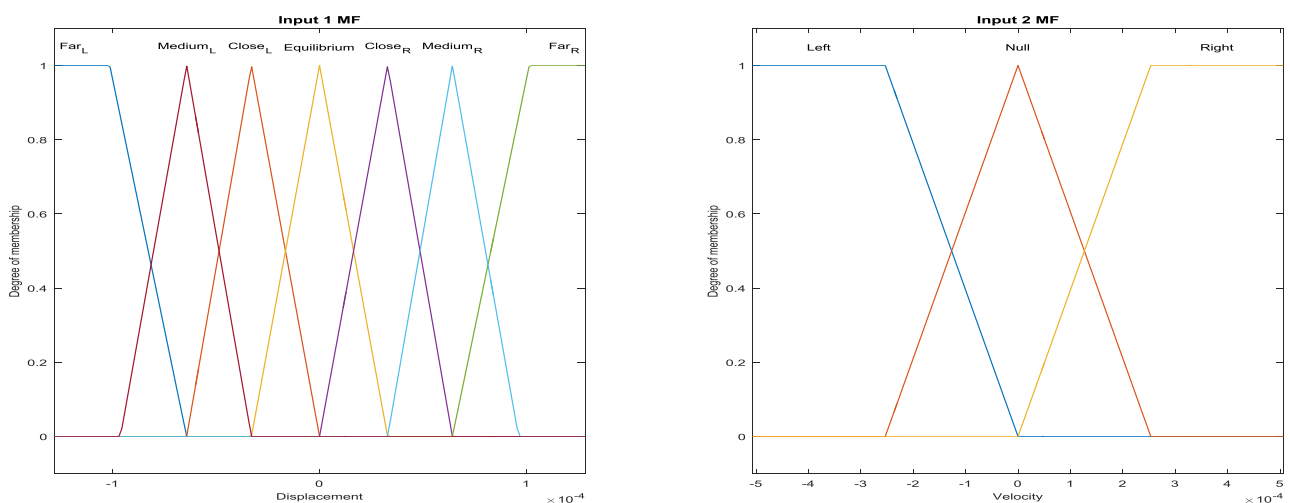
Σχήμα 4.2.7 Διάγραμμα αυξομείωσης Επιτάχυνσης

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρούμε ότι με την εισαγωγή δυο επιπροσθέτων τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής στην είσοδο της ταχύτητας έχουμε καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη ταχύτητα τη μετατόπιση καθώς και την επιτάχυνση της διατάξεως προς μελέτη. Αναλυτικότερα έχουμε μειώσεις στο άνω όριο της ταλάντωσης της τάξεως 85,58%, στο κάτω όριο 100%, στο εύρος 89,16% και στο μέσο εύρος τιμών μια μείωση της τάξεως 73,91% γεγονός που καθιστά τον έλεγχο αρκετά αποτελεσματικότερο σε σχέση με τη παραμετροποίηση που προηγήθηκε. Όσο αφορά τη ταχύτητα έχουμε μειώσεις στο άνω όριο της τάξεως 79,64%, στο κάτω όριο 80,48%, στο εύρος 80,05% και στο μέσο εύρος τιμών 90,44%. Σε σχέση με την επιτάχυνση παρατηρούμε μειώσεις σε όλα τα μεγέθη. Στο κάτω όριο έχουμε μείωση της τάξεως 65,01%, στο άνω όριο 62,23%, στο εύρος τιμών 63,65% καθώς και στο μέσο εύρος τιμών μείωση της τάξεως 38,83%.

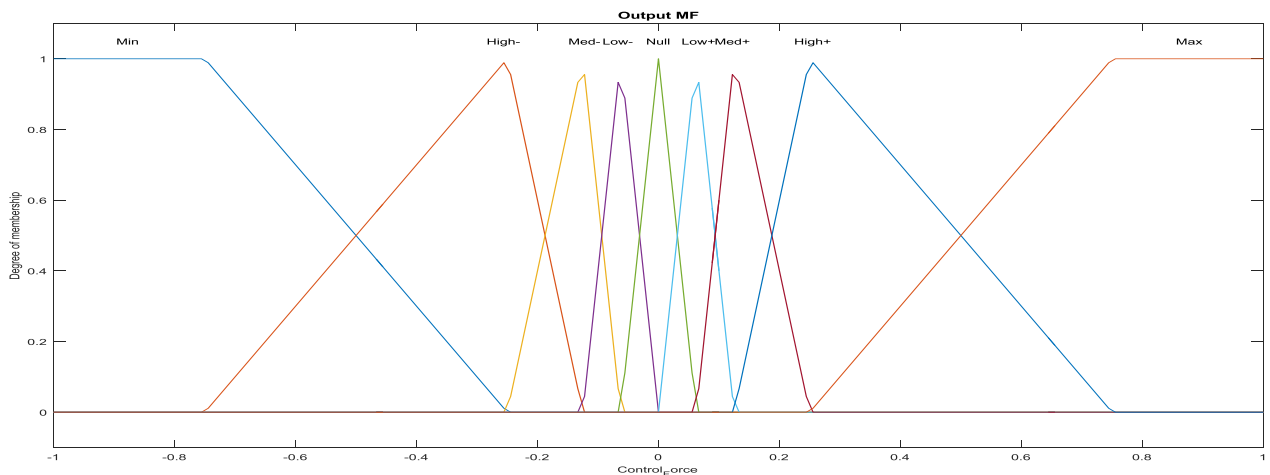
4.3 Παραμετροποίηση Μετατόπισης

Η τρίτη παραμετροποίηση που θα πραγματοποιήσουμε αφορά την μόνο είσοδο της μετατόπισης του συστήματος υπό εξέταση. Προσθέτουμε στο αρχικό μας σύστημα δυο ακόμα συναρτήσεις συμμετοχής την *Medium_L* και την *Medium_R*, ανάμεσα στη *Far_L* και *Close_L* και *Far_R*, *Close_R* αντίστοιχα. Η είσοδος που αφορά τη ταχύτητα θα παραμείνει ίδια καθώς και η έξοδος που αφορά τη δύναμη ελέγχου. Ακολουθούν οι συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων ταχύτητας μετατόπισης καθώς και της δύναμης ελέγχου.



Σχήμα 4.3.1 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου τριγωνικής μορφής για μετατόπιση (Displacement –input 1 MF) για ταχύτητα (Velocity –input 2 MF)

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 4.3.2 Συνάρτηση συμμετοχής εξόδου μορφής Gauss για Δύναμη Ελέγχου (ControlForce –outputMF)

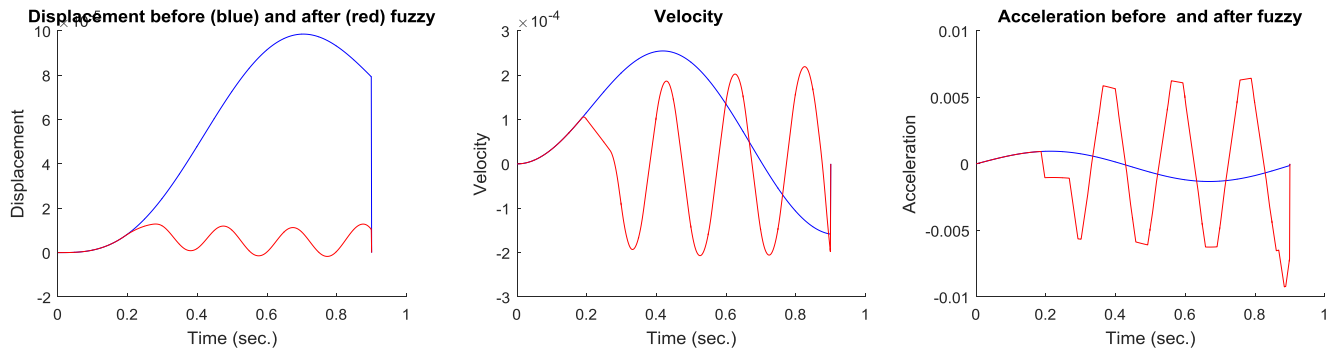
Σε αυτή τη περίπτωση για να μπορέσει να είναι λειτουργικό το σύστημά μας πρέπει επίσης να αλλάξουμε τους ασαφείς κανόνες της βάσης γνώσεως. Θα χρησιμοποιήσουμε 21 κανόνες μετά από σχετικές δοκιμές και συγκρίσεις αποτελεσμάτων που προηγήθηκαν. Οι κανόνες έχουν συντελεστή 1 και συνδέονται με τον τελεστή AND. Ο ελεγκτής παραμένει ίδιος με μέθοδο από-ασαφοποίησης αυτή του μέσου όρου των μεγίστων MOM. Ακολουθούν παρακάτω τα διαγράμματα που αφορούν τις διακυμάνσεις Μετατοπίσεως-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης η Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος καθώς και οι κανόνες που χρησιμοποιούμε για τη παραμετροποιημένη δοκιμή.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

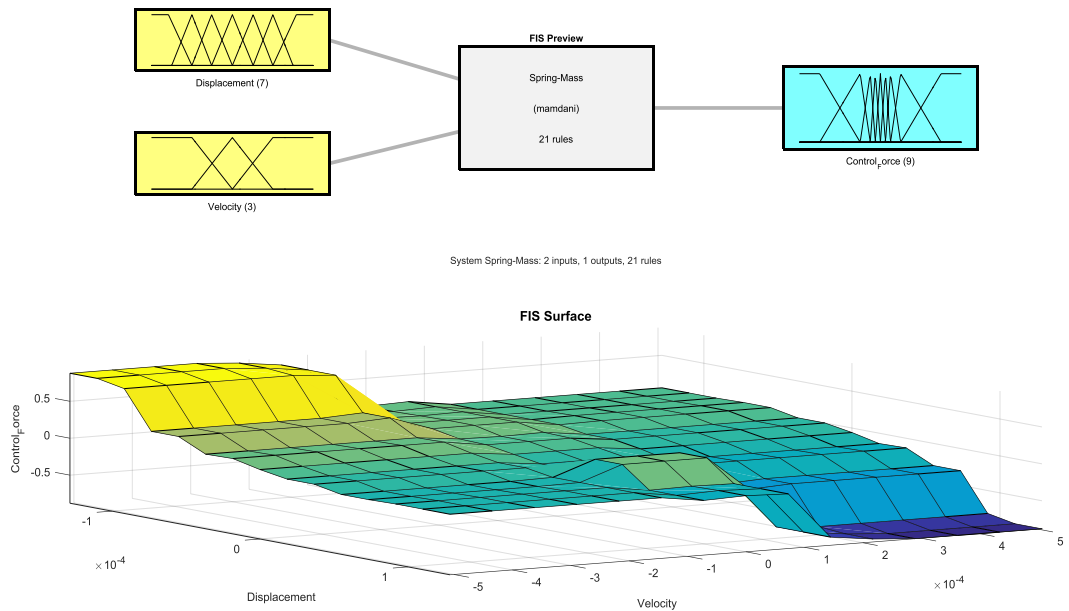
Velocity Displacement	Left	Null	Right
Far_L	Max	Med+	Low+
Medium_L	High+	Med+	Low+
Close_L	Med+	Low+	Null
Equilibrium	Low+	Null	Low-
Close_R	Null	Low-	Med-
Medium_R	Low-	Med-	High-
Far_R	Low-	Med-	Min

Πίνακας 8 Κανόνες Ασαφούς Συστήματος με τροποποιημένη την είσοδο της Ταχύτητας

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 4.3.4 Διαγράμματα Διακυμάνσεων Μετατόπισης-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης πριν τον Ασαφή Έλεγχο (Blue) μετά τον Ασαφή Έλεγχο (Red)



Σχήμα 4.3.5 Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη (max) και ελάχιστη τιμή (min), το μέσο εύρος (average) και εύρος τιμών (range) μετά την εφαρμογή του ελέγχου. Με μονάδες μέτρησης στο S.I m/s για ταχύτητα, m για μετατόπιση, m/s² για επιτάχυνση .

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-1.719e-06	1.288e-05	1.46e-05	5.116e-06
Velocity	-0.0002069	0.0002192	0.000426	2.673e-05
Acceleration	-0.009242	0.006437	0.01568	0.0002172

Πίνακας 9 Στατιστικά Αποτελέσματα

Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετροποιημένης δοκιμής μας σε σχέση με τα αποτελέσματα της αρχικής που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 παράγραφος 3.2.1 μέσω της σχέσης που έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4.1

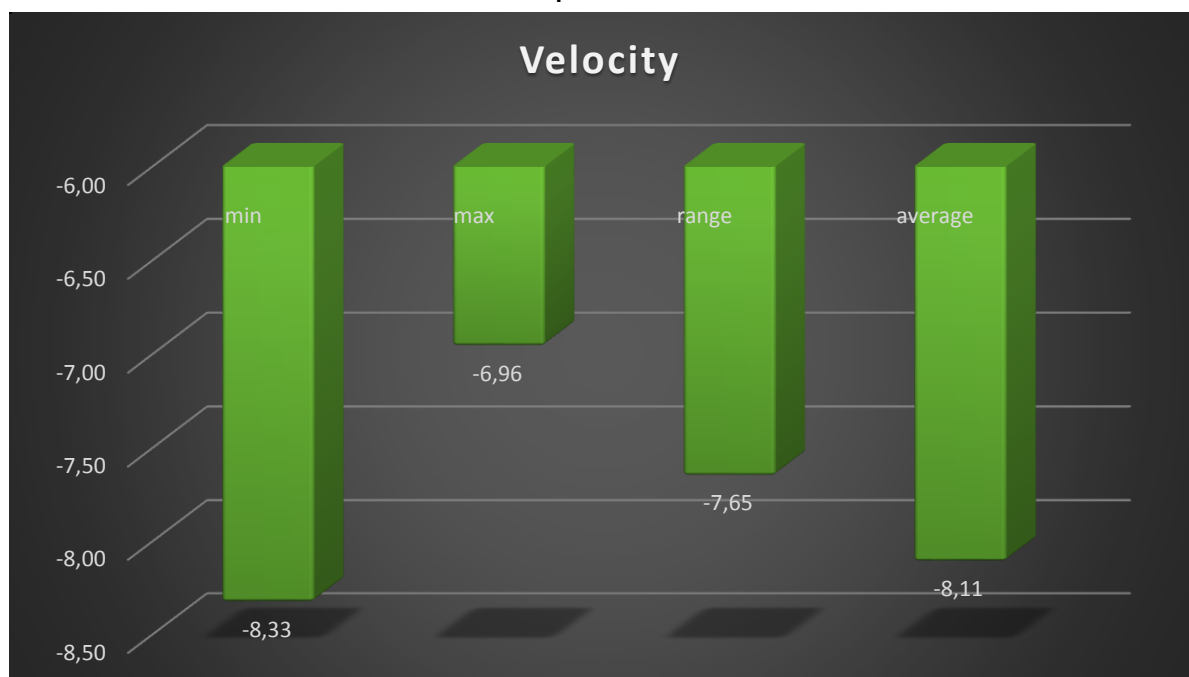
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-95,91	1,34	-13,66	39,74
Velocity	-8,33	-6,96	-7,65	-8,12
Acceleration	30,98	-4,85	13,46	-20,44

Πίνακας 10 Στατιστικά Αποτελέσματα

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

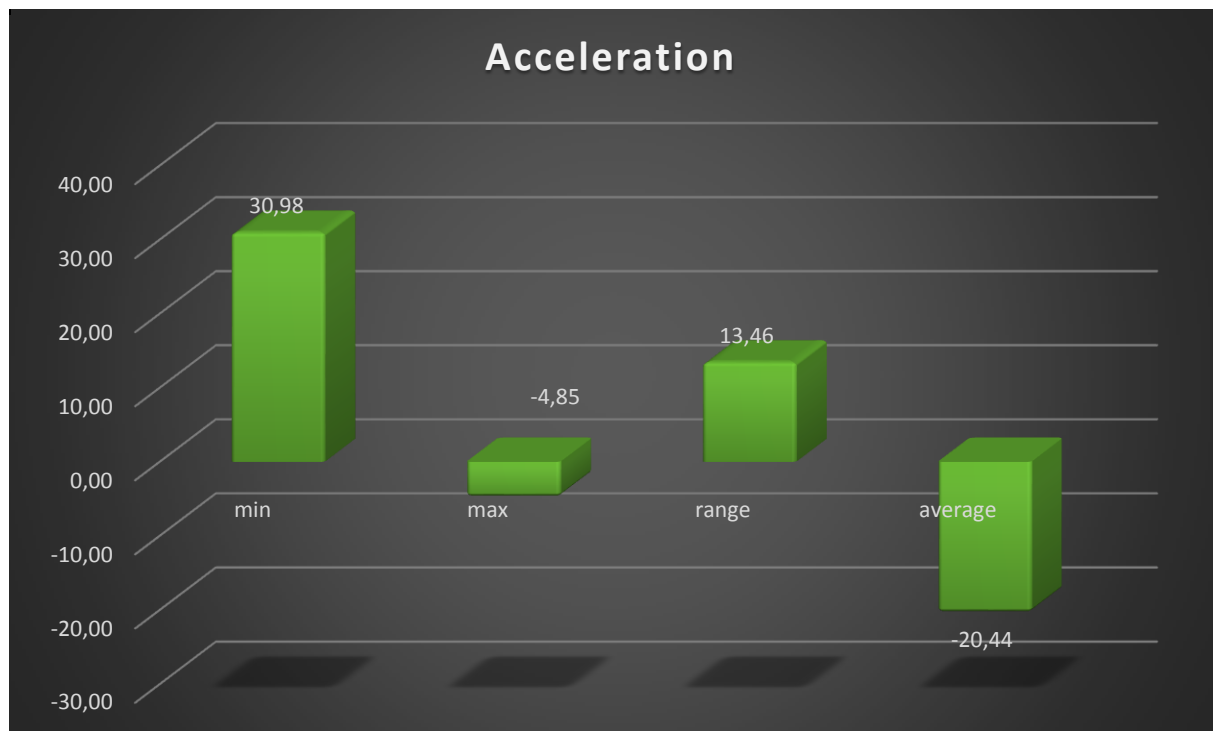


Σχήμα 4.3.6 Διάγραμμα αυξομείωσης ταλάντωσης



Σχήμα 4.3.7 Διάγραμμα αυξομείωσης Ταχύτητας

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



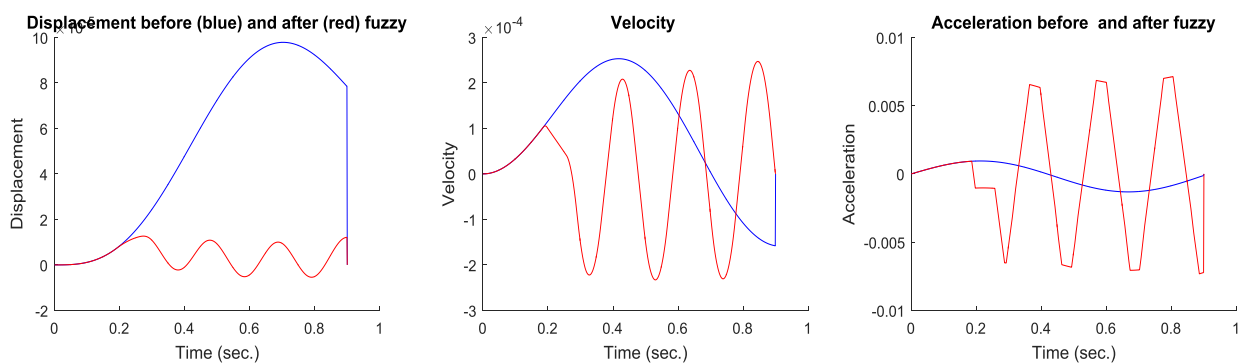
Σχήμα 4.3.8 Διάγραμμα αυξομείωσης Επιτάχυνσης

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρούμε ότι με την εισαγωγή δυο επιπρόσθετων τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής στη είσοδο της μετατοπίσεως έχουμε καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη ταχύτητα κυρίως της διατάξεως προς μελέτη. Αναλυτικότερα έχουμε αυξήσεις στο άνω όριο της ταλάντωσης της τάξεως 1,34%, στο κάτω όριο μείωση της τάξεως 95,91, στο εύρος αύξηση 13,66 % και στο μέσο εύρος τιμών μια μείωση της τάξεως 39,74%. Όσο αφορά τη ταχύτητα έχουμε μειώσεις στο άνω όριο της τάξεως 8,33%, στο κάτω όριο 6,96%, στο εύρος 7,65% και στο μέσο εύρος τιμών 8,12%. Σε σχέση με την επιτάχυνση παρατηρούμε μείωση μόνο στο μέσο εύρος και στο άνω όριο της ταλάντωσης. Στο κάτω όριο έχουμε αύξηση της τάξεως 30,98%, στο εύρος τιμών 13,46%, στο μέσο εύρος τιμών μείωση της τάξεως 38,83% όπως και στο άνω όριο 4,85%.

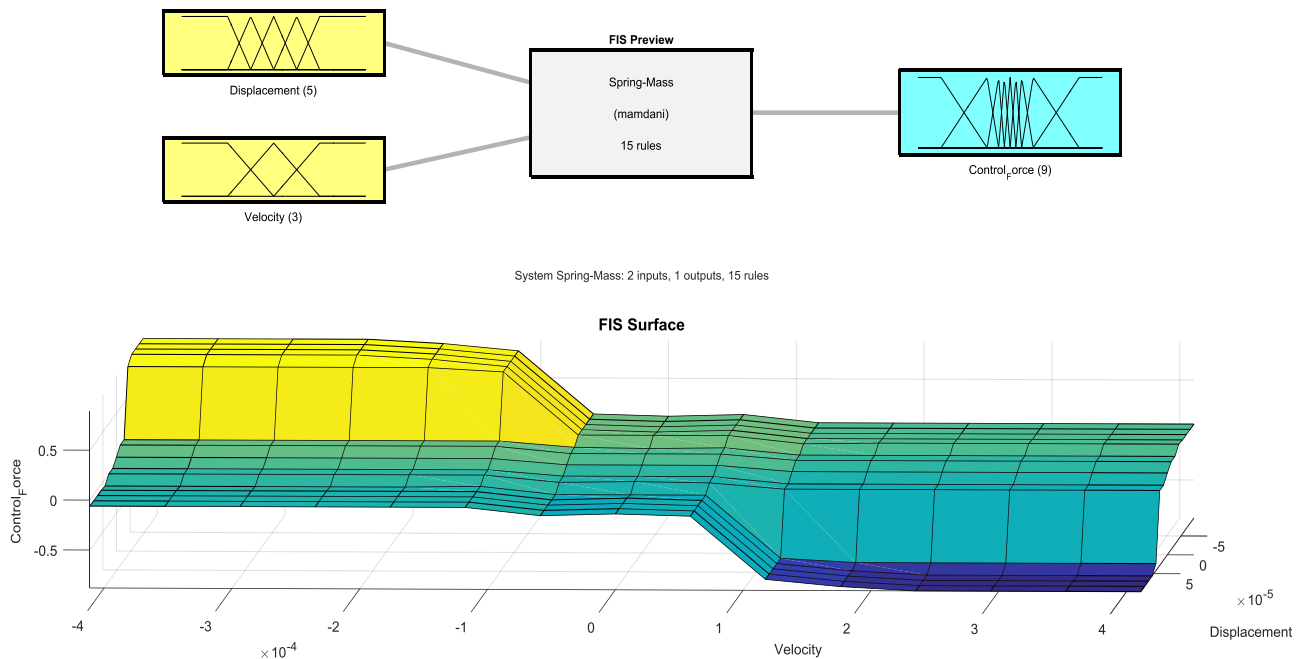
4.4 Τροποποίηση Απόσβεσης Συστήματος

Σε αυτή τη παράγραφο θα επέμβουμε στην απόσβεση του συστήματος που ορίζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση ως σταθερά Rayleigh. Στη παραμετροποίηση που πραγματοποιούμε αυξάνουμε την απόσβεση κατά 60% με το υπόλοιπο σύστημα να παραμένει αμετάβλητο σε όλα τα στοιχεία που αποτελείται. Ακολουθούν παρακάτω τα διαγράμματα που αφορούν τις διακυμάνσεις Μετατόπισης-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης η Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος.



Σχήμα 4.4.1 Διαγράμματα Διακυμάνσεων Μετατόπισης-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης πριν τον Ασαφή Έλεγχο (Blue) μετά τον Ασαφή Έλεγχο (Red)

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 4.4.2 Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη (max) και ελάχιστη τιμή (min), το μέσο εύρος (average) και εύρος τιμών (range) μετά την εφαρμογή του ελέγχου. Με μονάδες μέτρησης στο S.I m/s για ταχύτητα, m για μετατόπιση, m/s² για επιτάχυνση .

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-5.418e-06	1.265e-05	1.807e-05	3.157e-06
Velocity	-0.0002329	0.0002472	0.0004801	3.083e-05
Acceleration	-0.007321	0.00713	0.01445	0.0002956

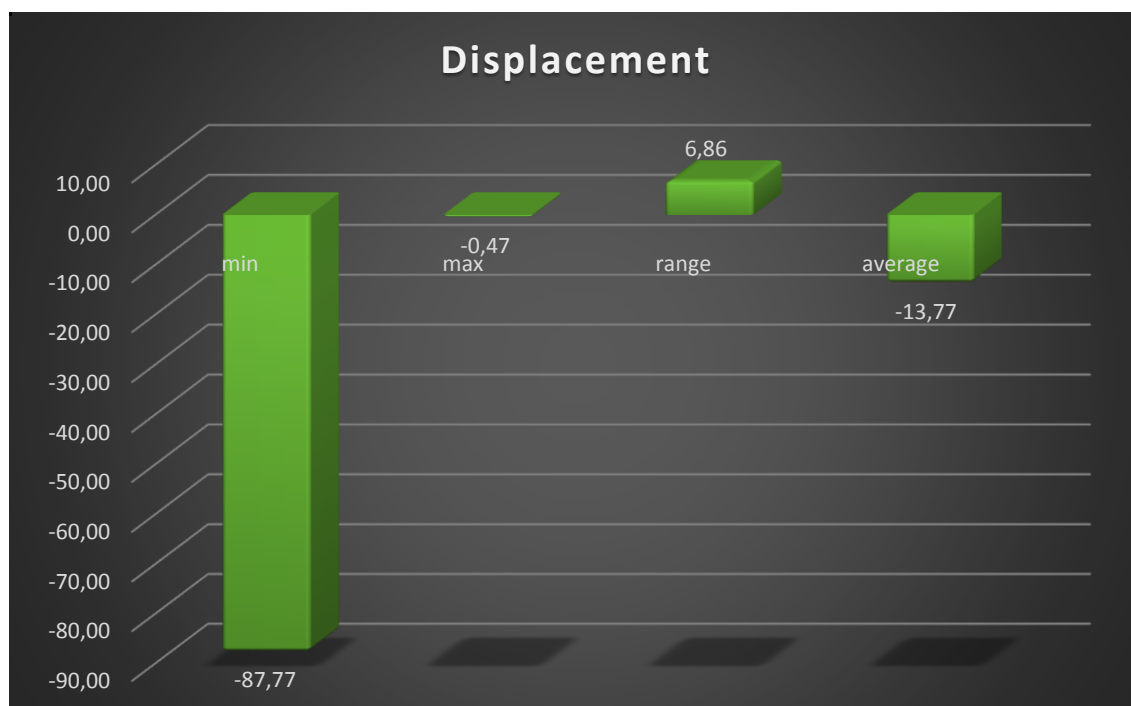
Πίνακας 11 Στατιστικά Αποτελέσματα

Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετροποιημένης δοκιμής μας σε σχέση με τα αποτελέσματα της αρχικής που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 παράγραφος 3.2.1 μέσω της σχέσης που έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4.1.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

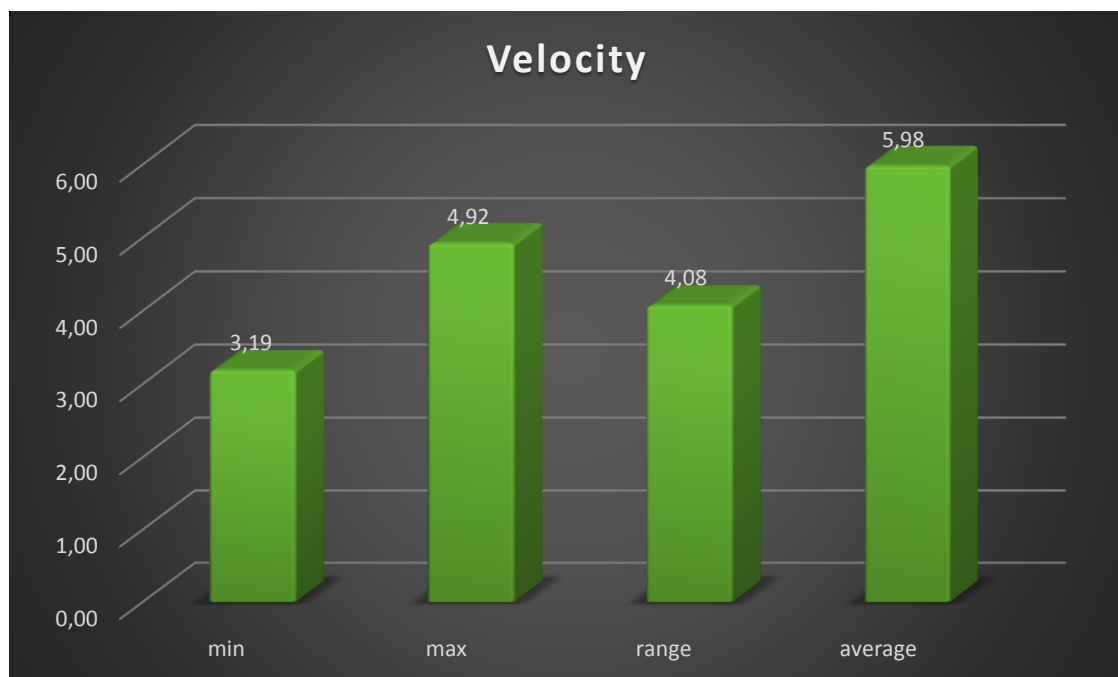
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-87,77	-0,47	6,86	-13,77
Velocity	3,19	4,92	4,08	5,98
Acceleration	3,76	5,40	4,92	8,39

Πίνακας 12 Συγκρίσεις τιμών σε σχέση με τις Αρχικές %

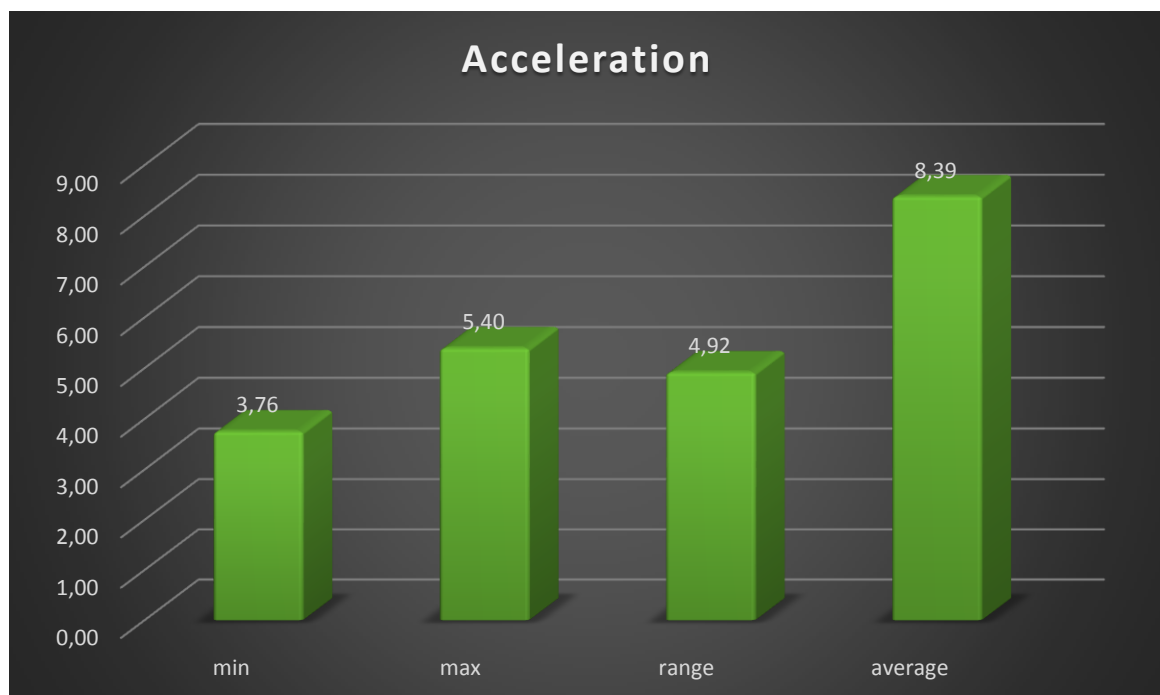


Σχήμα 4.4.3 Διάγραμμα αυξομείωσης ταλάντωσης

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 4.4.4 Διάγραμμα αυξομείωσης Ταχύτητας



Σχήμα 4.4.5 Διάγραμμα αυξομείωσης Επιτάχυνσης

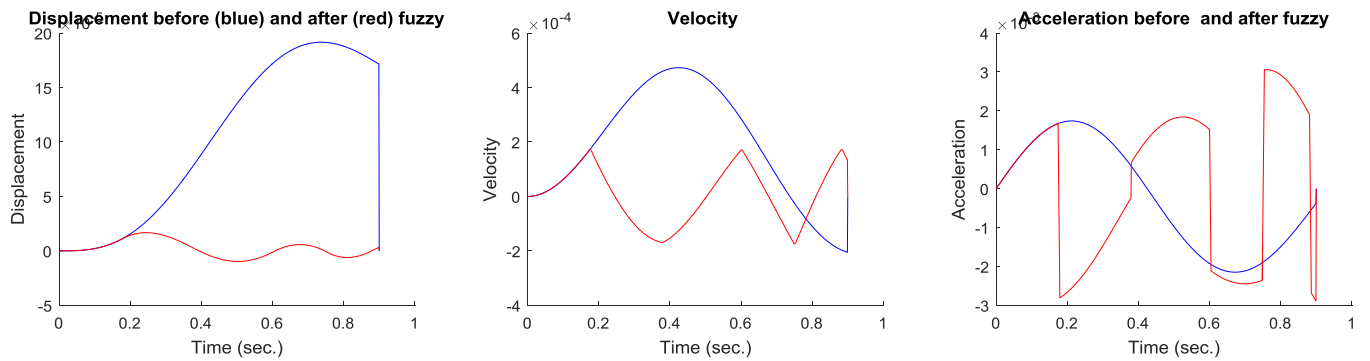
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρούμε ότι με την θα μεταβολή στην απόσβεση του συστήματος που ορίζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση ως σταθερά Rayleigh έχουμε καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη μετατόπιση κυρίως της διατάξεως προς μελέτη και κατ' επέκταση στην αποτελεσματικότητα του ελέγχου. Αναλυτικότερα έχουμε μειώσεις στο άνω όριο της ταλάντωσης της τάξεως 0,47%, στο κάτω όριο 87,77%, στο μέσο εύρος τιμών μια μείωση της τάξεως 13,77% και στο εύρος αύξηση της τάξεως 6,86%. Όσο αφορά τη ταχύτητα έχουμε αυξήσεις στο άνω όριο της τάξεως 4,92%, στο κάτω όριο 3,19%, στο εύρος 4,08% και στο μέσο εύρος τιμών 5,98%. Σε σχέση με την επιτάχυνση παρατηρούμε αυξήσεις σε όλα τα μεγέθη. Στο κάτω όριο έχουμε αύξηση της τάξεως 3,76%, στο εύρος τιμών 4,92%, στο μέσο εύρος τιμών της τάξεως 8,39% και στο άνω όριο 5,40%. Στη συγκεκριμένη παραμετροποίηση παρατηρούμε σχετικά χαμηλές αυξήσεις στα όρια ταχύτητας και επιτάχυνσης χωρίς όμως να επηρεάζουν ιδιαίτερα την αποτελεσματικότητα του ελέγχου.

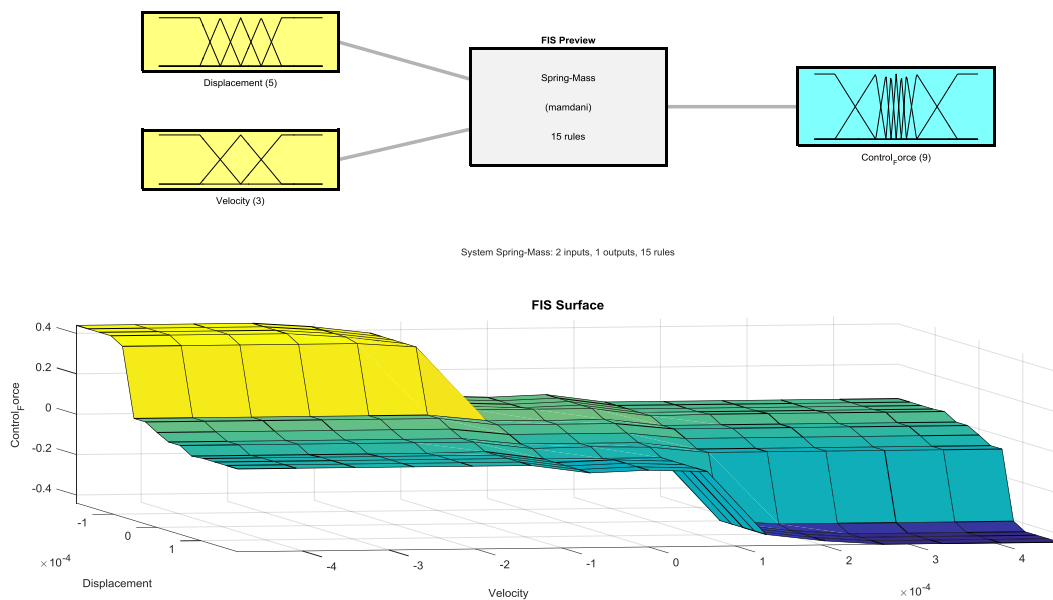
4.5 Παραμετροποιήσεις στοιχείων του συστήματος

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιούμε μετά από ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών που προηγήθηκαν παραμετροποιήσεις στο σημείο επιβολής της δύναμης φόρτισης, στο σημείο εφαρμογής του ελέγχου, στην μάζα m και σταθερά K των ελατηρίων καθώς στην συχνότητα και εύρος της δύναμης φόρτισης. Συγκεκριμένα επιλέγουμε σημείο επιβολής της δύναμης φόρτισης και του ελέγχου να είναι το δεύτερο από τα τρία της διάταξης (dof). Από τα τρία ελατήρια της διάταξης επιλέγουμε το δεύτερο μειώνοντας τη μάζα του από $m=1000\text{kg}$ σε $m=100\text{kg}$ μείωση της τάξεως 90%. Για το ίδιο ελατήριο μειώνουμε και τη σταθερά ελατηρίου, γνωστή και σαν σταθερά του Χουκ, που εκφράζει τη σκληρότητα ενός ελατηρίου από $K=5000\text{N/m}$ σε $K=500\text{N/m}$ μείωση της τάξεως 90%. Όσο αφορά τη συχνότητα της δύναμης εξωτερικής φόρτισης και το εύρος της, πραγματοποιούμε μειώσεις της τάξεως 62,21% και 50% αντίστοιχα. Το υπόλοιπο σύστημα παραμένει ίδιο σε σχέση με αυτό που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.2. Ακολουθούν παρακάτω τα διαγράμματα που αφορούν τις διακυμάνσεις Μετατοπίσεως-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης η Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 4.5.1 Διαγράμματα Διακυμάνσεων Μετατόπισης-Ταχύτητας-Επιτάχυνσης πριν τον Ασαφή Έλεγχο (Blue) μετά τον Ασαφή Έλεγχο (Red)



Σχήμα 4.5.2 Επιφάνεια Ασαφοποίησης του Ασαφούς Συστήματος

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά αποτελέσματα που αφορούν τη μέγιστη (max) και ελάχιστη τιμή (min), το μέσο εύρος (average) και εύρος τιμών (range) μετά την εφαρμογή του ελέγχου. Με μονάδες μέτρησης στο S.I m/s για ταχύτητα, m για μετατόπιση, m/s² για επιτάχυνση .

	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-9.7e-06	1.671e-05	2.641e-05	1.009e-06
Velocity	-0.0001744	0.0001727	0.0003471	1.039e-05
Acceleration	-0.002881	0.003061	0.005942	0.0001455

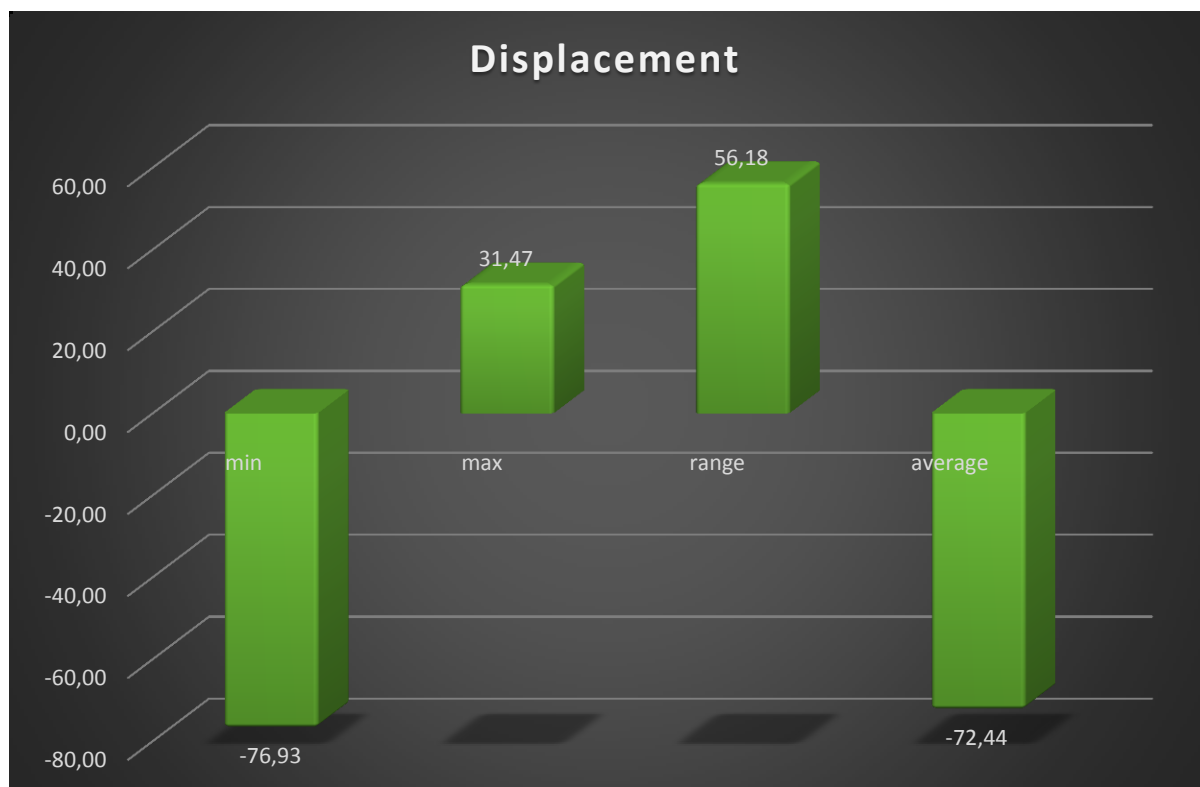
Πίνακας 13 Στατιστικά Αποτελέσματα

Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετροποιημένης δοκιμής μας σε σχέση με τα αποτελέσματα της αρχικής που παρουσιάστηκαν.

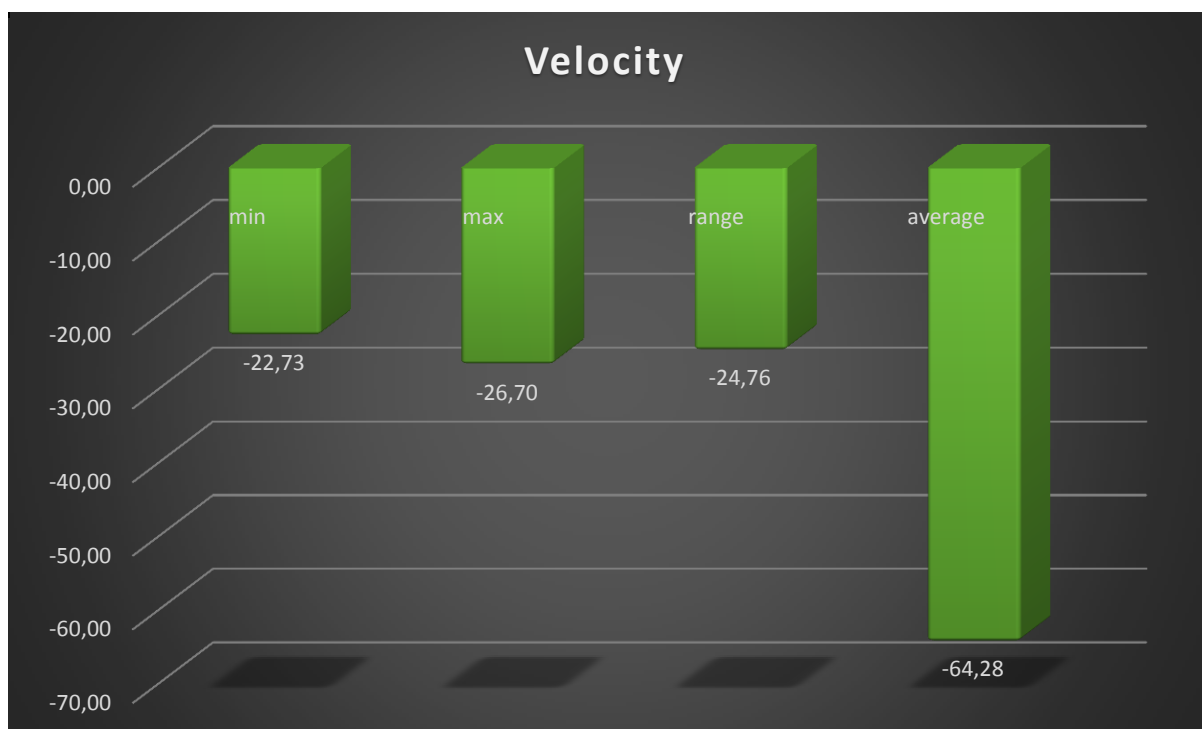
	Minimum	Maximum	Range	Average
Displacement	-76,93	31,47	56,18	-72,44
Velocity	-22,73	-26,70	-24,76	-64,28
Acceleration	-59,17	-54,75	-57,00	-46,70

Πίνακας 14 Συγκρίσεις τιμών σε σχέση με τις Αρχικές %

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

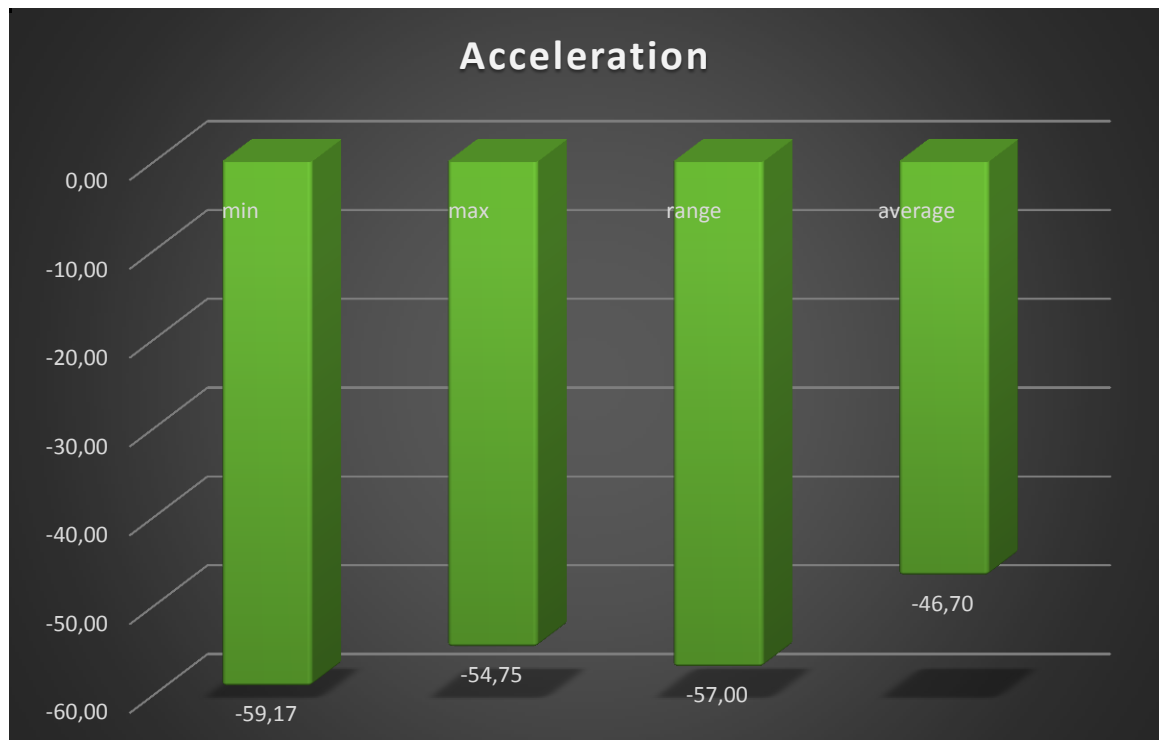


Σχήμα 4.5.2 Διάγραμμα αυξομείωσης Ταλάντωσης



Σχήμα 4.5.4 Διάγραμμα αυξομείωσης Ταχύτητας

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων



Σχήμα 4.5.5 Διάγραμμα αυξομείωσης Επιτάχυνσης

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

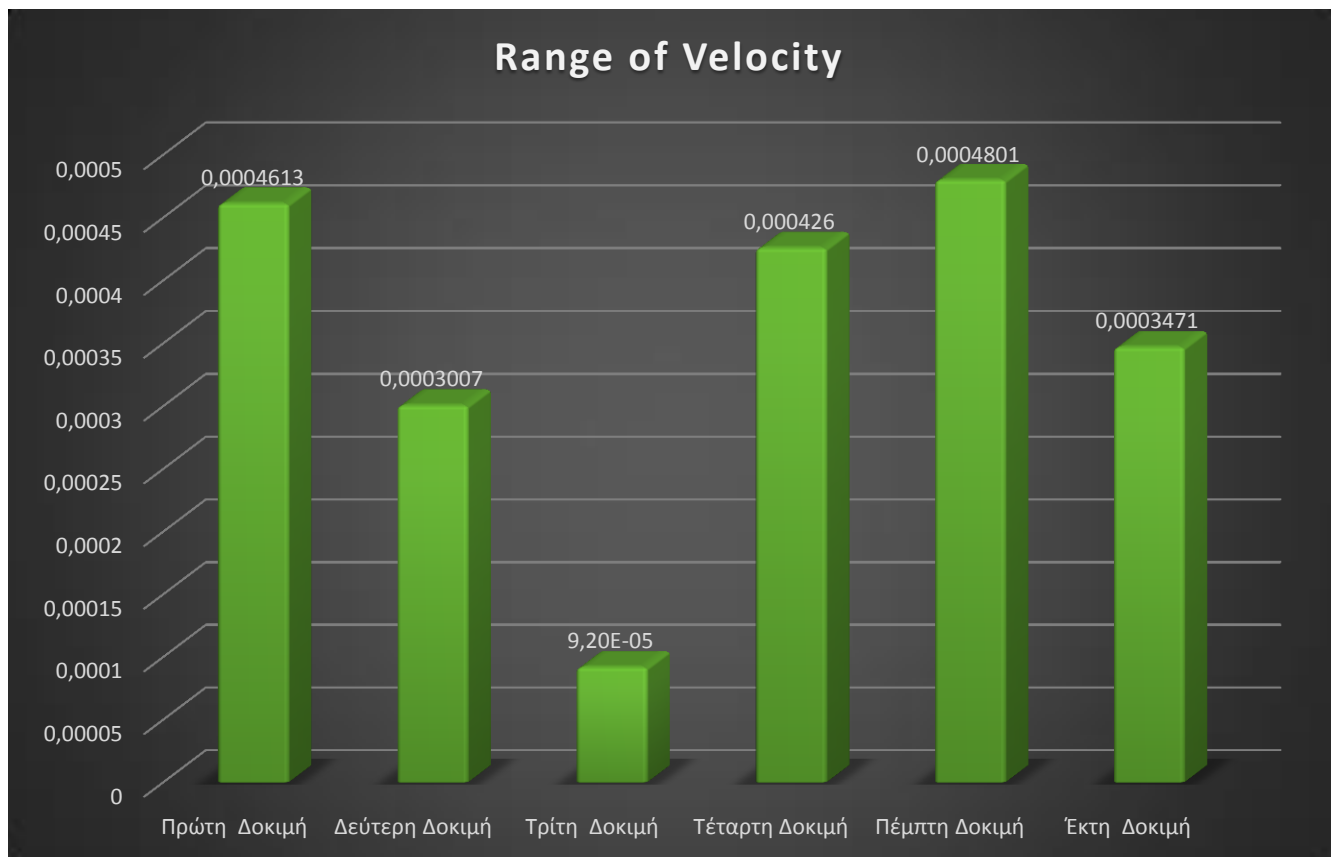
Παρατηρούμε ότι με τις παραμετροποιήσεις που προηγήθηκαν έχουμε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο αφορά τη ταχύτητα και την επιτάχυνση του συστήματος. Αναλυτικότερα έχουμε μειώσεις στο κάτω όριο της ταλάντωσης της τάξεως 76,93%, αύξηση στο άνω όριο 31,47% στο μέσο εύρος τιμών μείωση της τάξεως 72,44% και στο εύρος αύξηση της τάξεως 56,18%. Όσο αφορά τη ταχύτητα έχουμε μειώσεις στο άνω όριο της τάξεως 26,70%, στο κάτω όριο 22,73%, στο εύρος 24,76% και στο μέσο εύρος τιμών 64,28%. Σε σχέση με την επιτάχυνση παρατηρούμε μειώσεις σε όλα τα μεγέθη. Στο κάτω όριο έχουμε μείωση της τάξεως 59,17%, στο εύρος τιμών 57%, στο μέσο εύρος τιμών της τάξεως 46,70% και στο άνω όριο 26,70%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συγκεντρωτικά Διαγράμματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε κάποιες συγκεντρωτικές συγκρίσεις με σκοπό να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα ως προς το τύπο της τροποποίησης του συστήματος που μας αποφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα της διάταξης προς μελέτη. Η βέλτιστη παραμετροποίηση είναι εκείνη η οποία μας δίνει όσο το δυνατόν, λιγότερες καταπονήσεις της διάταξης προς μελέτη και των στοιχείων που την αποτελούν. Οι παραμετροποιήσεις σε συστήματα ασαφούς έλεγχου με εφαρμογή σε διατάξεις υπό ταλάντωση μπορούν να αποδειχτούν ιδιαίτερα χρήσιμες σε διάφορους τομείς της μηχανικής. Ένα παράδειγμα μιας πίο σύνθετης διάταξης από αυτή που έχει αναλυθεί θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι ένα σύστημα αναρτήσεων αυτοκινήτου. Η εύρεση του ασαφούς έλεγχου που επιφέρει όσο δυνατόν λιγότερες καταπονήσεις στα δομικά μέρη τους αυξάνει το χρόνο ζωής τους, μειώνοντας τους κραδασμούς που δέχεται το αμάξωμα και γενικότερα όλων των στοιχείων που αποτελούν ένα τροχό-κινούμενο όχημα.

Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των παραμετροποιήσεων που έχουν προηγηθεί σε σχέση με το εύρος τιμών της ταχύτητας που αναπτύσσει η διάταξη.



Σχήμα 5.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα εύρους Ταχύτητας

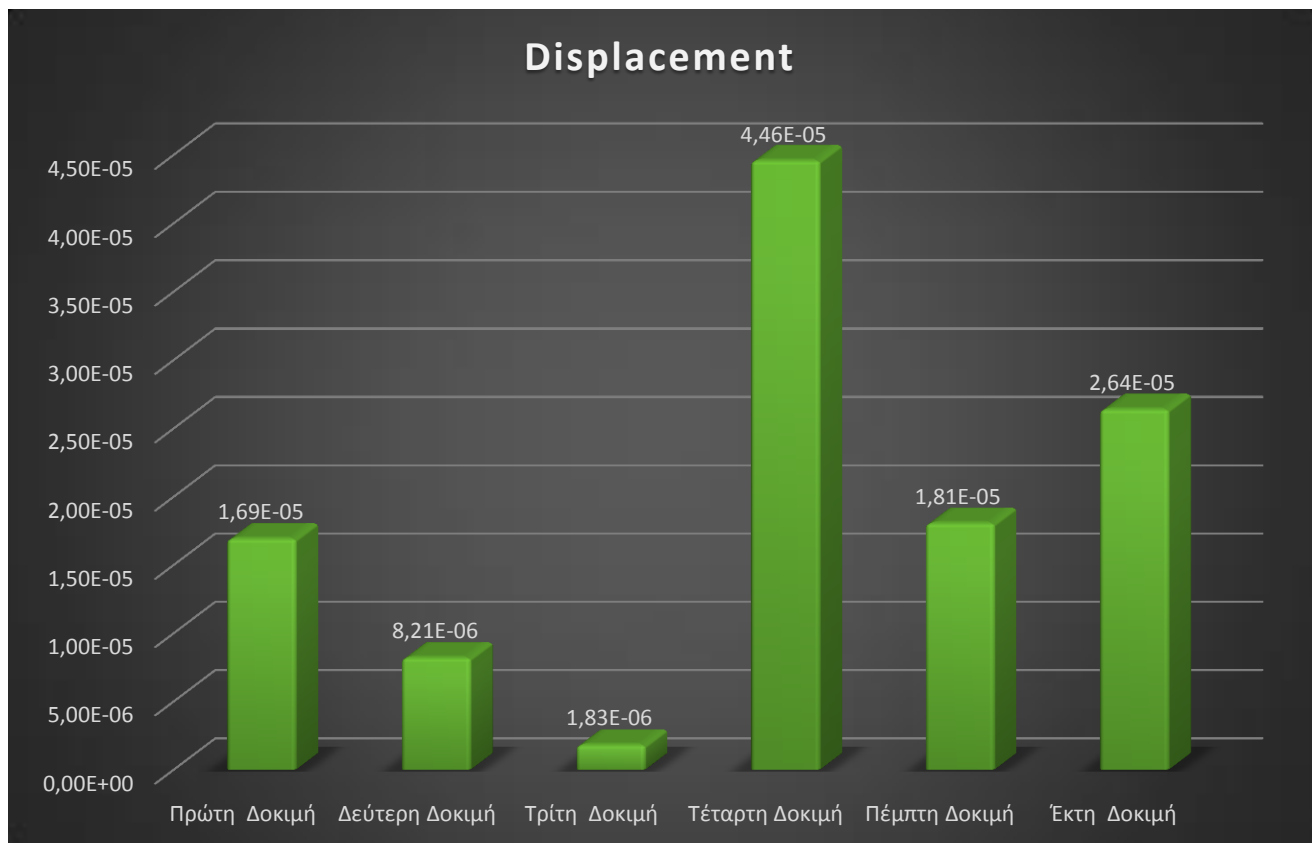
Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

- Πρώτη δοκιμή : Δοκιμή χωρίς καμία παραμετροποίηση (κεφάλαιο 3.1)
- Δεύτερη δοκιμή : Δοκιμή με συναρτήσεις συμμετοχής μορφής Gauss-**Parameterization 1** (κεφάλαιο 4.1)
- Τρίτη δοκιμή: Δοκιμή με παραμετροποιημένη την είσοδο της ταχύτητας-**Parameterization 2** (κεφάλαιο 4.2)
- Τέταρτη δοκιμή: Δοκιμή με παραμετροποιημένη την είσοδο της μετατόπισης – **Parameterization 3** (κεφάλαιο 4.3)
- Πέμπτη δοκιμή: Δοκιμή με παραμετροποιημένη την απόσβεση – **Parameterization 4** (κεφάλαιο 4.4)
- Έκτη δοκιμή: Δοκιμή με παραμετροποιημένα τα στοιχεία του συστήματος-**Parameterization 5** (κεφάλαιο 4.5)

Παρατηρούμε ότι έχουμε εξαιρετικά αποτελέσματα όσο αφορά τη μείωση του εύρους της ταχύτητας στην παραμετροποίηση των συναρτήσεων συμμετοχής από τριγωνικές σε Gauss καθώς και στην παραμετροποίηση της εισόδου της ταχύτητας μετά την εισαγωγή των δυο επιπρόσθετων συναρτήσεων συμμετοχής. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις πέτυχαν με τη σειρά τους μείωση του εύρους της ταχύτητας εκτός της πέμπτης που αφορά την αύξηση απόσβεσης του συστήματος. Μεγαλύτερη μείωση πετύχαμε με την παραμετροποίηση της εισόδου της ταχύτητας της τάξεως 80,05%. Ακολουθεί η παραμετροποίηση των συναρτήσεων συμμετοχής σε Gauss με μείωση της τάξεως 34,81%, η παραμετροποίηση των στοιχείων συστήματος με ποσοστό 24,76%. Τέλος η παραμετροποίηση της εισόδου της μετατόπισης με την εισαγωγή δυο επιπρόσθετων συναρτήσεων συμμετοχής πέτυχε τη μικρότερη μείωση της τάξεως του 7,63%.

Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των παραμετροποιήσεων που έχουν προηγηθεί σε σχέση με το εύρος τιμών της ταλάντωσης που αναπτύσσει η διάταξη κατά τη διάρκεια του ελέγχου.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

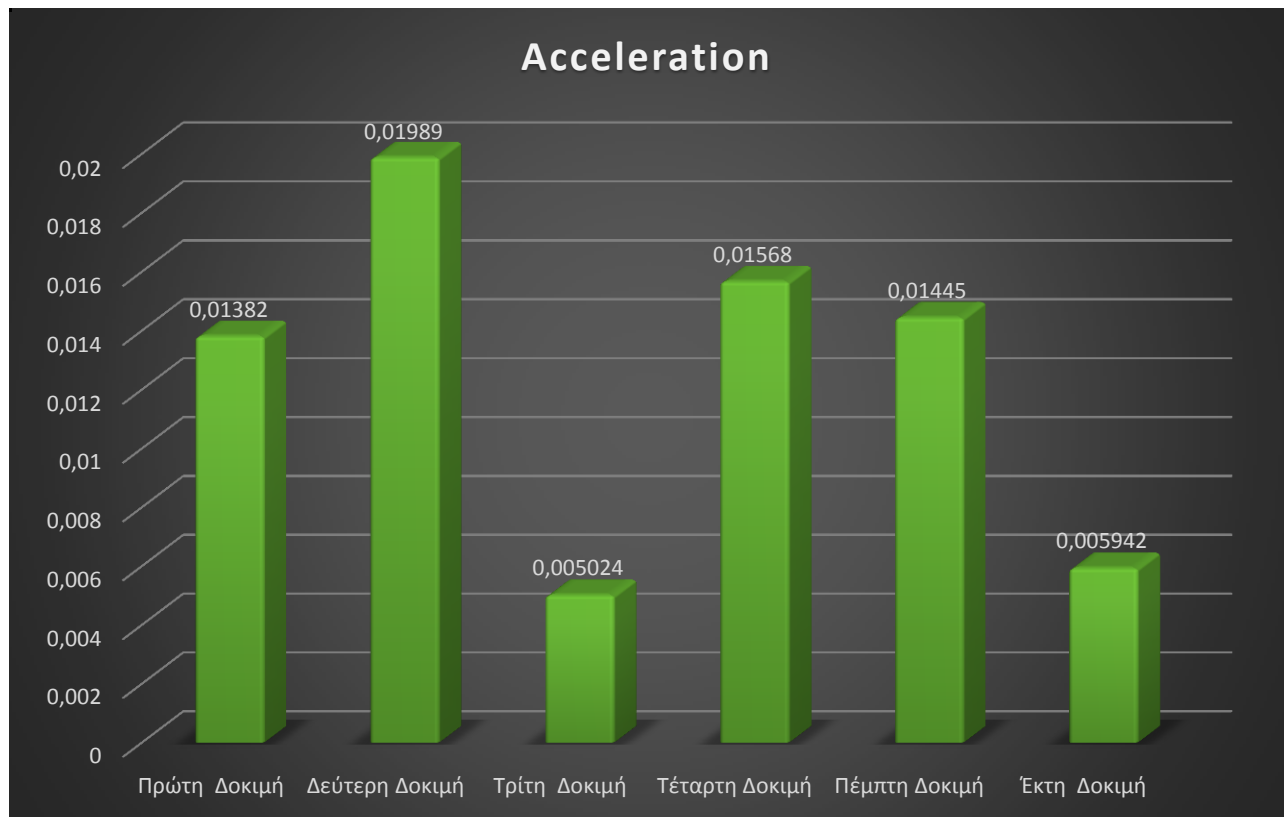


Σχήμα 5.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα εύρους Μετατόπισης

Παρατηρούμε ότι έχουμε εξαιρετικά αποτελέσματα όσο αφορά τη μείωση του εύρους της μετατοπίσεως στην παραμετροποίηση της εισόδου της ταχύτητας μετά την εισαγωγή των δυο επιπρόσθετων συναρτήσεων καθώς και στην παραμετροποίηση των συναρτήσεων συμμετοχής από τριγωνικές σε Gauss. Οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις δεν πέτυχαν κάποια μείωση του εύρους της ταλάντωσης εκτός της τέταρτης που αφορά τη παραμετροποίηση της εισόδου της μετατοπίσεως. Μεγαλύτερη μείωση πετύχαμε με την παραμετροποίηση της εισόδου της ταχύτητας της τάξεως 89,16%. Ακολουθεί η παραμετροποίηση των συναρτήσεων συμμετοχής σε Gauss με μείωση της τάξεως 51,43%. Τέλος η παραμετροποίηση της εισόδου της μετατόπισης μετά την εισαγωγή των δυο επιπρόσθετων τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής έδωσε τη χαμηλότερη μείωση στο εύρος της ταλάντωσης με ποσοστό 13,66%.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των παραμετροποιήσεων που έχουν προηγηθεί σε σχέση με το εύρος τιμών της επιτάχυνσεως που αναπτύσσει η διάταξη.



Σχήμα 5.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα εύρους Επιτάχυνσης

Παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα ότι μειώσεις στις τιμές της επιτάχυνσεως πετυχαίνουμε μόνο στην τρίτη δοκιμή που αφορά τη παραμετροποίηση της εισόδου της ταχύτητας καθώς και στη έκτη δοκιμή που αφορά τη παραμετροποίηση των στοιχείων της διάταξης όπως έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στις υπόλοιπες παραμετροποιήσεις έχουμε αυξήσεις στο εύρος της επιτάχυνσης. Ποιο συγκεκριμένα στη τρίτη δοκιμή έχουμε μείωση στο εύρος της τάξεως 63,65%, με την έκτη δοκιμή να ακολουθεί με μειώσεις της τάξεως 57%. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι μια μεγάλη αύξηση των επιταχύνσεων έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω καταπόνηση των υλικών της διάταξης προς μελέτη.

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Το επόμενο βήμα της μελέτης μας θα είναι η κατάταξη των παραμετροποιήσεων που προηγήθηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο με γνώμονα την υλοποιησιμότητα και την αποτελεσματικότητα του ελέγχου. Με τον όρο υλοποιησιμότητα αναφερόμαστε στην μικρότερη καταπόνηση των υλικών που απαρτίζουν τη διάταξη προς μελέτη.

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας των ποσοστών αυξομειώσεων του εύρους των τιμών που αντιστοιχούν σε κάθε παραμετροποίηση που πραγματοποιήσαμε σε σχέση με τη πρώτη δοκιμή μας.

	Parameteri zation 1	Parameteriz ation2	Parameteri zation 3	Parameteri zation 4	Parameteri zation 5
Displace ment	-51.43	-89.16	-13.66	6.86	56.18
Velocity	-34.81	-80.05	-7.65	4.08	-24.76
Accelera tion	43.92	-63.65	13.46	4.92	- 57.00

Πίνακας 15

Ακολουθεί η κατάταξη των παραμετροποιήσεων με βάση την υλοποιησιμότητα. Η κατάταξη γίνεται με γνώμονα τις μικρότερες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης.

Velocity
1- Parameterization 2 (-80.05%)
2- Parameterization 1 (-34.81%)
3- Parameterization 5 (-24.76%)
4- Parameterization 3 (-7.65%)
5- Parameterization 4 (4.08%)

Πίνακας 16 Κατάταξη Παραμετροποιήσεων ως προς την Ταχύτητα

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Acceleration
1- Parameterization 2 (-63.65%)
2- Parameterization 5 (-57.00%)
3- Parameterization 4 (4.92%)
4- Parameterization 3 (3.46%)
5- Parameterization 1 (43.92%)

Πίνακας17 Κατάταξη Παραμετροποιήσεων ως προς την Επιτάχυνση

Displacement
1- Parameterization 2 (-89.16%)
2- Parameterization 1 (-51.43%)
3- Parameterization 3 (-13.66%)
4- Parameterization 4 (6.86%)
5- Parameterization 5 (56.18%)

Πίνακας 18 Κατάταξη Παραμετροποιήσεων ως προς την Μετατόπιση

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γεώργιος Σταυρουλάκης, Σημειώσεις μαθήματος, Εισαγωγή στην Μηχανητρονική, Χανιά 2008 (διατίθεται μέσω της ιστοσελίδας του μαθήματος στον ιστοτόπο ασύγχρονης τηλεεκπαίδευσης του τμήματος eclass.ergasya.tuc.gr)
- [2] Σταύρος Βολογιαννίδης, Ευφυής Έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές, Διδακτικές Σημειώσεις Τμήματος Πληροφορικής και Επικοινωνιών, Τομέας Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών και Βιομηχανικών Εφαρμογών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών.
- [3] Ροβέρτος-Ε Κινγκ, Ευφυής Έλεγχος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004
- [4] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Department of Electrical Engineering, The Ohio State University, 1998
- [5] Γ.Ε. Ταϊρίδης, Διατριβή για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος 2008
- [6] Κιλιμπέρης Χαράλαμπος, Διπλωματική εργασία ,Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος 2008
- [7] Βασιλόπουλος Γεώργιος, Διπλωματική εργασία ,Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος 2013
- [8] ΕΜΠ, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστηριακές Σημειώσεις Μαθήματος Δυναμικής και Κατασκευών Ακαδημαϊκό έτος 2010-2011
- [9] Πανεπιστήμιο Αθηνών Τμήμα Φυσικής Διαλέξεις Μηχανικής 1 Χειμερινού Εξαμήνου 2016 Θεοχάρης Αποστολάτος & **Πέτρος Ιωάννου**
- [10] Time–frequency and time–scale analyses for structural health monitoring ,By Wieslaw J. Staszewski And Amy N. Robertson ,Department of Mechanical Engineering, Sheffield University 14 December 2006
- [11] Theory of Vibration, An Introduction Series, A.A. Shabana Department of Mechanical Engineering University of Illinois at Chicago USA, *Series Editor* Frederick F. Ling , Mechanical Engineering The University of Texas at Austin and William Howard Hart Professor Emeritus Department of Mechanical

Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ασαφούς Ελέγχου με Εφαρμογή σε
Σύστημα Μαζών Ελατηρίων

Engineering, Aeronautical Engineering and Mechanics Rensselaer
,Polytechnic Institute USA,SPRINGER

[12]Different control applications on a vehicle using fuzzy logic control,Nurkan Yagiz¹, Lemir Sakman¹ and RAHMI GUCLU², ¹Department of Mechanical Engineering, Istanbul University, Avcilar, Istanbul,Turkey,²Department of Mechanical Engineering, Yildiz Technical University, Besiktas,Istanbul, Turkey

[13]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)

[14]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

[15]<https://www.mathworks.com/support/learn-with-matlab-tutorials.html?requestedDomain=true>