

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών



Διπλωματική εργασία

[Νευροασαφής έλεγχος σε μοντέλο
πλάκας από πιεζοηλεκτρικά υλικά]

Επιμέλεια εργασίας: Τσόκας Βασίλειος

Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρακάκης Γεώργιος
Συνεπιβλέποντες: Σταυρουλάκης Γεώργιος, Κανέλλος Φώτιος

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή, πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη των καθηγητών κ. Σταυρακάκη Γ. και Καλαϊτζάκη Κ., σε συνεργασία και με τη συνεπίβλεψη του καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης κ. Σταυρουλάκη Γ. Τους ευχαριστώ. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον μεταδιδάκτορα κ. Ταϊρίδη Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη.

Βασίλης Τσόκας

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
1. Εισαγωγή.....	3
2. Θεωρητικά στοιχεία	4
2.1. Συστήματα ελέγχου	4
2.1.1. Συστήματα βρόχου ανατροφοδότησης	4
2.1.2. Συστήματα κλειστού βρόχου	4
2.1.3. Συστήματα ανοιχτού βρόχου.....	4
2.2. Ασαφής λογική και έλεγχος	4
2.2.1. Αριστοτέλεια λογική	4
2.2.2. Ασαφής λογική και ασαφή σύνολα	5
2.2.3. Ασαφής έλεγχος	6
2.2.4. Βασικές μέθοδοι ασαφούς ελέγχου	7
2.3. Νευρωνικός και νευροασαφής έλεγχος	8
2.3.1. Νευρωνικός έλεγχος	8
2.3.2. Νευροασαφής έλεγχος (ANFIS).....	10
2.3.3. Το εργαλείο ANFIS	11
2.4. Πιεζοηλεκτρισμός.....	11
3. Μοντελοποίηση.....	12
3.1. Τα πεπερασμένα στοιχεία για την επίλυση της πλάκας.....	12
3.2. Παρουσίαση του προβλήματος	14
3.3. Περιγραφή του μοντέλου	15
3.4. Ελεγκτής.....	17
3.5. Προβλήματα με το SIMULINK	25
4. Αποτελέσματα.....	26
1 ^η Προσομοίωση	26
2 ^η Προσομοίωση	27
3 ^η Προσομοίωση	28
4 ^η Προσομοίωση	29
5 ^η Προσομοίωση	30
6 ^η Προσομοίωση	31
7 ^η Προσομοίωση	32
8 ^η Προσομοίωση	33
9 ^η Προσομοίωση	34
5. Συμπεράσματα.....	35
Βιβλιογραφία	36

1. Εισαγωγή

Η χρήση ασαφών συστημάτων και νευρωνικών δικτύων είναι πολύ αποτελεσματική στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ακόμα και πολύ σύνθετων συστημάτων. Σε αυτή την εργασία θα χρησιμοποιήσουμε έναν συνδυασμό των τεχνικών αυτών, δηλαδή έναν νευροασαφή ελεγκτή και θα εξετάσουμε την απόδοσή του, στο πλαίσιο της προσομοίωσης ενός συστήματος ελέγχου μιας σύνθετης κατασκευής.

Το σύστημά μας αποτελείται από μια πλάκα, πακτωμένη ως προς τη μία της πλευρά η οποία είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Όταν η πλάκα υπόκειται σε ταλάντωση, το σύστημα της ασκεί μέσω των σημείων ελέγχου, κατάλληλη δύναμη για να αποσβέσει την ταλάντωση με βέλτιστο τρόπο.

Το μοντέλο της πλάκας έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης [3]. Ο ελεγκτής δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας το fuzzy toolbox της MATLAB και εκπαιδεύθηκε με δεδομένα που προέκυψαν από αριθμητικά πειράματα.

2. Θεωρητικά στοιχεία

2.1. Συστήματα ελέγχου

2.1.1. Συστήματα βρόχου ανατροφοδότησης

Ένα σύστημα ελέγχου βρόχου ανατροφοδότησης αποτελείται από πέντε θεμελιώδη στοιχεία.

- Τη διαδικασία (process) που υπόκειται στον έλεγχο
- Ένα σύστημα αισθητήρων (sensor) που μετρά και αποτυπώνει την κατάσταση της διαδικασίας
- Ένα πομπό (transmitter) που μετατρέπει τις μετρήσεις σε (ηλεκτρονικό) σήμα
- Έναν ελεγκτή (controller) που λαμβάνει το σήμα του ελεγκτή και αποφασίζει αν η τρέχουσα κατάσταση του συστήματος είναι αποδεκτή ή όχι
- Έναν ενεργοποιητή (actuator) που λειτουργεί ως το τελικό στοιχείο ελέγχου που εφαρμόζει διόρθωση στο σύστημα σύμφωνα με τις οδηγίες του ελεγκτή

2.1.2. Συστήματα κλειστού βρόχου

Για μια συνεχή διαδικασία, το σύστημα βρόχου επιχειρεί να διατηρήσει μια μεταβλητή ελέγχου στην επιθυμητή της τιμή(ονομαστική τιμή). Ο ελεγκτής αφαιρεί την τρέχουσα μέτρηση από την ονομαστική τιμή για να παράξει ένα σήμα σφάλματος. Το μέγεθος και η διάρκεια του σήματος σφάλματος καθορίζει την τιμή της εξόδου του ελεγκτή, η οποία υποδεικνύει τη διόρθωση που θα εφαρμοστεί από τον ενεργοποιητή.

Για παράδειγμα ένα αυτοκίνητο εξοπλισμένο με cruise control χρησιμοποιεί ένα ταχύμετρο για να μετρά και να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του οχήματος. Αν το αυτοκίνητο ταξιδεύει με υπερβολικά χαμηλή ταχύτητα, ο ελεγκτής δίνει οδηγία στον επιταχυντή να τροφοδοτήσει με περισσότερο καύσιμο τη μηχανή. Αν ταξιδεύει πολύ γρήγορα, δίνει εντολή επιβράδυνσης.

Το αυτοκίνητο είναι η διαδικασία, το ταχύμετρο ο αισθητήρας, και ο επιταχυντής είναι ο ενεργοποιητής. Η ταχύτητα του αυτοκινήτου είναι η μεταβλητή ελέγχου.

2.1.3. Συστήματα ανοιχτού βρόχου

Οι ελεγκτές ανοιχτού βρόχου δε χρησιμοποιούν ανατροφοδότηση. Εφαρμόζουν μια και μόνον διόρθωση όταν δοθεί η αντίστοιχη εντολή και υποθέτουν πως τα επιθυμητά αποτελέσματα θα επιτευχθούν. Αυτοί οι ελεγκτές μπορούν επίσης να μετρούν τα αποτελέσματα των εντολών τους, αλλά αυτές οι μετρήσεις δεν αποτελούν μέρος της διαδικασίας ελέγχου.

2.2. Ασαφής λογική και έλεγχος

2.2.1. Αριστοτέλεια λογική

Η κλασική δίτιμη (Αριστοτέλεια) λογική είναι γνωστή από την Αρχαιότητα (500 π.Χ.), θεμελιώθηκε από τους αρχαίους Έλληνες φιλόσοφους (Αριστοτέλης, Πυθαγόρας, Στωικοί-Χρύσιππος, κ.λπ.) και αποτελεί τη βάση της λεγόμενης δυτικής σκέψης και του δυτικού πολιτισμού.

Σύμφωνα με την κλασική δίτιμη λογική μια λογική πρόταση μπορεί να πάρει μόνον δύο τιμές, δηλ. μπορεί να είναι αληθής ή ψευδής (1 ή 0), αποκλείοντας τρίτη λύση (Αρχή της Απόκλεισης του Τρίτου). Έτσι σύμφωνα με τη Δίτιμη Λογική, αν μια λογική πρόταση δεν είναι αληθής

(άσπρη) τότε θα είναι αναγκαία ψευδής (μαύρη), ενώ αν δεν είναι ψευδής τότε θα είναι αναγκαία αληθής.

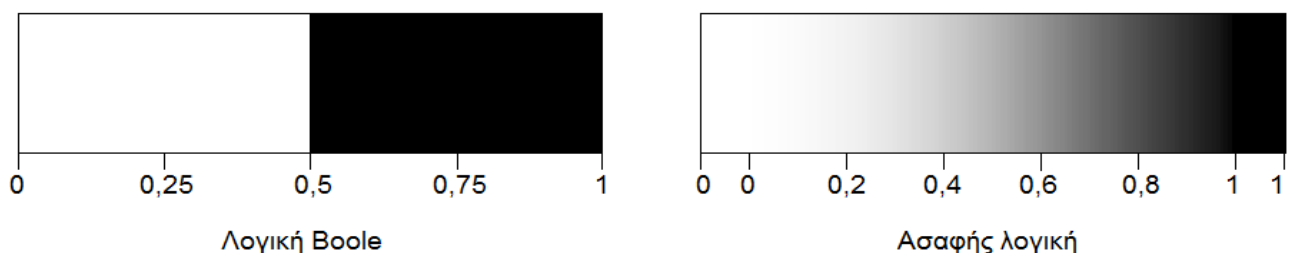
Το παράδοξο του Κρητικού Επιμενίδη: "Κρήτες άει ψεύσται": Ο Επιμενίδης λέει ότι οι Κρητικοί λένε πάντα ψέματα. Ο Επιμενίδης όμως είναι Κρητικός. Άρα ο Επιμενίδης λέει ψέματα, ότι οι Κρητικοί ψεύδονται. Άρα οι Κρητικοί λένε την αλήθεια. Άρα και ο Επιμενίδης λέει την αλήθεια. Άρα οι Κρητικοί είναι ψεύτες, κ.ο.κ. (φαύλος κύκλος).

2.2.2. Ασαφής λογική και ασαφή σύνολα

*So far as laws of mathematics refer to reality they are not certain
and so far as they are certain, they do not refer to reality*

[A. Einstein]

Πρόκειται για μια μαθηματική λογική που επιχειρεί να λύνει προβλήματα θέτοντας τιμές σε ένα ανακριβές φάσμα δεδομένων με σκοπό να καταλήξει στο ακριβέστερο δυνατό συμπέρασμα. Η Ασαφής λογική είναι σχεδιασμένη να αντιμετωπίζει τα προβλήματα με τον ίδιο τρόπο που θα το έκανε ένας έμπειρος χειριστής: λαμβάνοντας υπόψη όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες και παίρνοντας την καλύτερη δυνατή απόφαση δεδομένης της εισόδου.



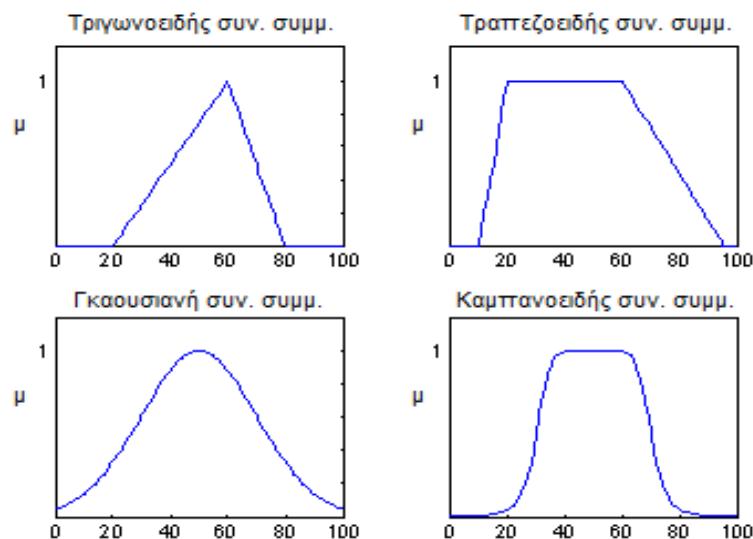
Με την ασαφή λογική θα θέλαμε ξεκινώντας από τη δίτιμη κλασσική λογική 0-1 (Αριστοτέλεια λογική, ή λογική Boole), την πλειότιμη λογική και τη θεωρία των πιθανοτήτων, να τις επεκτείνουμε εισάγοντας ασάφεια, αοριστία, αβεβαιότητα, έτσι ώστε αφενός να προσεγγίζει την εκφραστική δύναμη και απλότητα της φυσικής γλώσσας, αλλά και αφετέρου να περισώζει όσο το δυνατόν περισσότερο τη γνωστή μαθηματική δομή της κλασσικής λογικής.

Έτσι, τα αίτια που έκαναν αναπόφευκτη την επέκταση της δίτιμης λογικής και οδήγησαν στη δημιουργία πλειότιμων λογικών όπως η Ασαφής Λογική (δηλ. σε λογικές με πάνω από δύο τιμές), ήταν κυρίως η ανάγκη μαθηματικοποίησης της φυσικής-καθομιλουμένης γλώσσας του ανθρώπου και της φυσικής ασάφειας που διέπει την ανθρώπινη νοημοσύνη-συμπεριφορά, καθώς και η αναγκαιότητα για μια πιο ρεαλιστική θεώρηση της έννοιας της αβεβαιότητας στην πράξη.

Ασαφές Σύνολο (fuzzy set) A είναι ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών $(x, u_A(x))$ όπου $x \leftarrow X$ και $u_A(x) \leftarrow [0, 1]$.

- Το σύνολο X αποτελεί ένα ευρύτερο σύνολο αναφοράς που περιλαμβάνει όλα τα αντικείμενα στα οποία μπορεί να γίνει αναφορά.

- Η τιμή $\mu_A(x)$ λέγεται **βαθμός αληθείας** (*degree of truth*), συμβολίζει το βαθμό της συγγένειας του x στο A και παίρνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$, κατά πόσο δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει το στοιχείο x στο σύνολο A
- Η συνάρτηση $\mu_A(x)$ ονομάζεται **συνάρτηση συμμετοχής** (membership function) και στην πράξη μπορεί να προέρχεται από:
 1. Υποκειμενικές εκτιμήσεις
 2. Προκαθορισμένες και απλοποιημένες μορφές
 3. Συχνότητες εμφανίσεων και πιθανότητες
 4. Φυσικές μετρήσεις
 5. Διαδικασίες μάθησης και προσαρμογής (συνήθως με νευρωνικά δίκτυα)
- Το ευρύτερο δυνατό σύνολο (universal set) μέσα στο οποίο ορίζονται τα υπόλοιπα σύνολα είναι πάντα **διακριτό**.



[Εικόνα 2.1]: Είδη συναρτήσεων συμμετοχής

2.2.3. Ασαφής έλεγχος

Τα ασαφή συστήματα (Fuzzy inference systems, FIS) είναι επίσης γνωστά ως συστήματα ασαφών κανόνων ή ασαφή μοντέλα. Οι κανόνες των λεκτικών μεταβλητών μπορεί να έχουν τη μορφή των καθορισμένων κανόνων (πχ *velocity = high*), των τελεστών κατάστασης (IF *grade* ≥ 8.5 THEN *excellent*) ή ακόμα και απλών τελεστών (GO TO). Οι ιδιότητες του συνόλου κανόνων είναι η πληρότητα (fullness), η συνοχή (consistency), η συνέχεια (continuity) και η αλληλεπίδραση (interaction). Ένα ασαφές σύστημα συνήθως περιγράφεται από περισσότερους του ενός κανόνα.

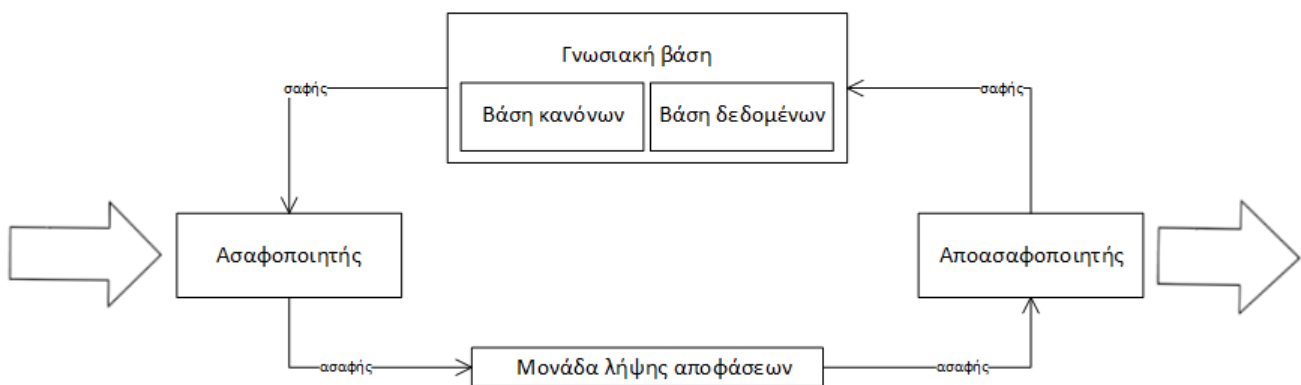
Η διαδικασία της σύμπτυξης των κανόνων ενός συστήματος λέγεται συσσωμάτωση (aggregation). Στην περίπτωση όπου οι επιμέρους κανόνες σχετίζονται με τον τελεστή AND, η συσσωμάτωση γίνεται με σύζευξη (conjunction) των επιμέρους κανόνων, παίρνοντας την τομή τους. Αν οι επιμέρους κανόνες σχετίζονται με το λογικό τελεστή OR, η συσσωμάτωση γίνεται με διαχωρισμό των επιμέρους κανόνων, παίρνοντας την ένωσή τους.

Οι μέθοδοι της σύζευξης και του διαχωρισμού είναι επίσης γνωστές ως μέθοδοι του ελάχιστου (min) και του μέγιστου (max) αντίστοιχα.

Ένα ασαφές σύστημα αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Βάση κανόνων(IF – THEN rules)
- Βάση δεδομένων(σύνολο συναρτήσεων συμμετοχής)
- Μονάδα λήψης απόφασης
- Ασαφοποιητής
- Αποασαφοποιητής

Η λειτουργία του ασαφούς συστήματος γίνεται ως εξής: Οι σαφείς είσοδοι μετατρέπονται σε ασαφείς μέσω της ασαφοποίησης. Τότε, το σύνολο των κανόνων συντάσσεται και μαζί με τα δεδομένα, σχηματίζουν τη γνωσιακή βάση δεδομένων. Ακολούθως, λαμβάνεται η απόφαση με συμπερασμό και προκύπτει η ασαφής έξοδος. Τέλος, η έξοδος αποασαφοποιείται. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



[Εικόνα 2.2]: Τυπικό ασαφές σύστημα

2.2.4. Βασικές μέθοδοι ασαφούς ελέγχου

Η μέθοδος Mamdani που είναι και η πιο διαδεδομένη, παρουσιάστηκε από τους Mamdani και Assilian το 1975(Mamdani & Assilian, 1975). Δέκα χρόνια αργότερα, οι Takagi και Sugeno εισήγαγαν τη δική τους μέθοδο (Takagi & Sugeno, 1985). Αυτές οι δύο μέθοδοι έχουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά. Η κύρια διαφορά τους σχετίζεται με τις συναρτήσεις συμμετοχής των εξόδων τους. Στη μέθοδο Mamdani, οι συναρτήσεις συμμετοχής είναι ασαφή σύνολα. Αντίθετα, στη μέθοδο Sugeno οι έξοδοι είναι είτε γραμμικές συναρτήσεις, είτε σταθερές τιμές. Τα βασικά πλεονεκτήματα κάθε μιας από αυτές τις μεθόδους ασαφούς συνεπαγωγής συνοψίζονται ως εξής:

Η μέθοδος Mamdani:

Είναι μια διαισθητική μέθοδος, ευρέως αποδεκτή, που προσαρμόζεται καλά στα πραγματικά προβλήματα. Είναι σχετικά απλή και δουλεύει καλά ακόμα και για σύνθετα μοντέλα, χωρίς να θυσιάζει την ακρίβεια. Τα βασικά βήματα της διαδικασίας υλοποίησης της μεθόδου Mamdani είναι:

1. Ασαφοποίηση των εισόδων με τη χρήση συναρτήσεων συμμετοχής
2. Ορισμός των λεκτικών κανόνων του ασαφούς συστήματος

3. Αξιολόγηση των κανόνων
4. Υπολογισμός των εξόδων του συστήματος
5. Αποασαφοποίηση
6. Ασαφείς και νευροασαφείς τεχνικές ελέγχου

Η μέθοδος Sugeno:

Είναι μια μέθοδος υπολογιστικά ακριβής, που δουλεύει πολύ αποτελεσματικά συνδυαστικά με γραμμικές τεχνικές καθώς και με τεχνικές βελτιστοποίησης. Επιπλέον, η μέθοδος Sugeno παρουσιάζει εγγυημένα συνεχή επιφάνεια εξόδου και επιδέχεται μαθηματικής ανάλυσης

Τα βήματα υλοποίησης της μεθόδου αυτής, είναι παρόμοια με της μεθόδου Mamdani που είδαμε παραπάνω:

1. Ασαφοποίηση των εισόδων με τη χρήση συναρτήσεων συμμετοχής
2. Ορισμός των λεκτικών κανόνων του ασαφούς συστήματος
3. Αξιολόγηση των κανόνων
4. Υπολογισμός των εξόδων του συστήματος

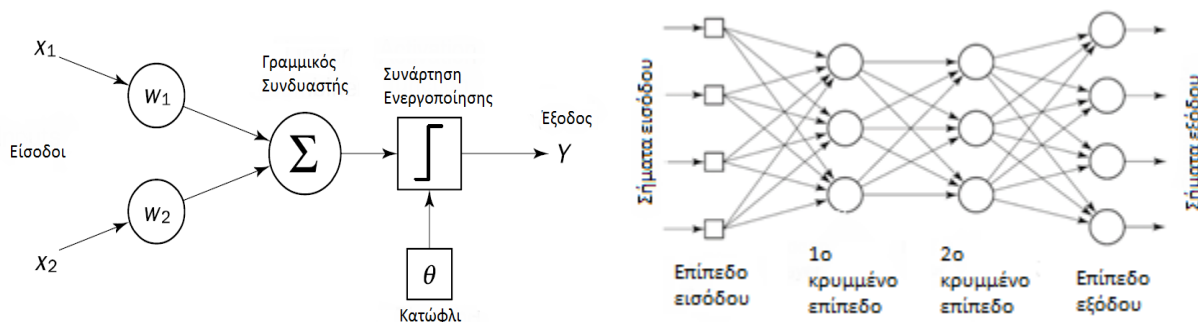
Στους ελεγκτές που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο, η ασαφοποίηση των εισόδων και η κατηγοριοποίησή τους σε συναρτήσεις συμμετοχής είναι επίσης παρόμοια με τη μέθοδο Mamdani.

Ωστόσο, το βασικό πλεονέκτημα των ελεγκτών τύπου Sugeno είναι το γεγονός ότι μπορούν να εκπαιδευτούν με τη χρήση του προσαρμοστικού, νευρο-ασαφούς συστήματος (ANFIS) το οποίο θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

2.3. Νευρωνικός και νευροασαφής έλεγχος

2.3.1. Νευρωνικός έλεγχος

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) είναι συστήματα επεξεργασίας πληροφοριών, τα οποία αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό απλούστερων μονάδων, τους νευρώνες. Οι νευρώνες είναι ουσιαστικά μη γραμμικοί επεξεργαστές ειδικού τύπου που κωδικοποιούν την πληροφορία με την μορφή προσαρμοζόμενων συντελεστών βάρους και μιας μη γραμμικής συνάρτησης εξόδου. Οι βασικές αυτές μονάδες ενεργοποιούν (μερικώς, ολικώς ή καθόλου) τις εξόδους τους ως απόκριση στις εξόδους άλλων, συγκεκριμένων για κάθε δίκτυο, νευρώνων και σε κάποιες εξωτερικές εισόδους. Τα βάρη αναπροσαρμόζονται βάσει μιας διαδικασίας εκπαίδευσης ώστε να ελαχιστοποιούν μια συνάρτηση κόστους. Το δίκτυο μέσω της εκπαίδευσης μαθαίνει μια επιθυμητή απεικόνιση, χωρίς να απαιτείται να σχεδιασθεί εκ των προτέρων ειδικά για αυτήν. Ένας νευρώνας και ένα τυπικό ΝΔ φαίνονται στην εικόνα 2.3



[Εικόνα 2.3] : Νευρώνας Σχήμα 2: Τυπικό ΝΔ 4 επιπέδων

Υπάρχουν πολλοί τύποι δικτύων, κατάλληλοι για ευρύ πεδίο εφαρμογών. Ένα ΤΝΔ χαρακτηρίζεται βασικά από τον τύπο των νευρώνων του και τον τρόπο που αυτοί συνδέονται μεταξύ τους. Κάθε νευρώνας μπορεί να θεωρηθεί ότι σχηματίζεται από τρεις διαδοχικές μονάδες: έναν αθροιστή με προσαρμοζόμενα βάρη, ένα γραμμικό δυναμικό σύστημα που περιέχει την κατάσταση του νευρώνα και μία μη γραμμική συνάρτηση εξόδου. Αν απαιλειφθεί το δυναμικό σύστημα προκύπτουν στατικά ΤΝΔ, τα όποια είναι καταλληλότερα για την αναπαράσταση μη δυναμικών προβλημάτων. Το πλήρες (δυναμικό) ΤΝΔ είναι πολυπλοκότερο και απαιτεί επίπονη διαδικασία εκπαίδευσης, αλλά λύνει ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων

Η επιστημονική κοινότητα μέσω των ΤΝΔ προσπαθεί να μιμηθεί τον τρόπο λειτουργίας του νευρικού συστήματος των ζωντανών οργανισμών: οι νευρώνες και ο τρόπος σύνδεσης τους δεν είναι παρά μια (υπερ)απλουστευμένη μοντελοποίηση των βιολογικών νευρώνων. Αν και η όλη φιλοσοφία είναι απλή στην σύλληψη, τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι σημαντικά, σε βαθμό ώστε να αποτελούν την ενδεδειγμένη λύση για πολλά πολύπλοκα προβλήματα. Τα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται κυρίως σε δύο γενικές κατηγορίες προβλημάτων: την αναγνώριση προτύπων και την προσέγγιση συναρτήσεων.

Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται εφαρμογές όπως η αναγνώριση φωνής, η αναγνώριση χαρακτήρων και η μηχανική όραση, ενώ στην δεύτερη ο έλεγχος και η αναγνώριση συστημάτων, διεργασιών ή οικονομικών μοντέλων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ΤΝΔ έναντι άλλων μεθόδων είναι [3, σελ. 94]:

- Η *ικανότητα μάθησης*, η όποια τους επιτρέπει να προσαρμόζονται εύκολα σε ευρύ φάσμα παραμέτρων του προβλήματος ή και αλλαγές τους σε πραγματικό χρόνο (αγγλ. on-line).
- Η *μαζικά παράλληλη διάταξη τους*, η οποία τους προσδίδει σχετικά με το μέγεθος τους μεγάλη υπολογιστική ισχύ με μικρό χρόνο απόκρισης.
- Η *κατανεμημένη αναπαράσταση της γνώσης*. Κάθε μονάδα πληροφορίας δεν αποθηκεύεται οργανωμένα στους νευρώνες, αλλά κατανέμεται σε αυτούς. Αυτό επιτρέπει αφ' ενός την διενέργεια παράλληλων υπολογισμών και αφ' ετέρου προσδίδει υψηλότερη αντοχή σε βλάβες.
- Η *αντοχή σε βλάβες*, δηλαδή σε διακοπή λειτουργίας κάποιου νευρώνα. Αυτή δεν υφίσταται για κάθε δίκτυο παρά μόνο αν ληφθεί υπ' όψιν κατά την σχεδίαση της τοπολογίας του ΝΔ και επιλεγεί κατάλληλος αλγόριθμος εκπαίδευσης.
- Η *συσχετιστική αποθήκευση της πληροφορίας*, δηλ. ανάλογα με το περιεχόμενο κι όχι σε διευθύνσεις μνήμης, όπως στους συμβατικούς υπολογιστές. Έτσι είναι πολύ εύκολο να ανακληθούν παραλλαγμένες μορφές των προτύπων που διδάχθηκαν.

- Μεγαλύτερη *σθεναρότητα* έναντι θορύβου ή παραλλαγμένων προτύπων, ως αποτέλεσμα της προηγούμενης ιδιότητας, δηλ. *ικανότητα γενίκευσης* των διδαχθέντων προτύπων.
- *Ενεργός αναπαράσταση της πληροφορίας*, με την έννοια ότι η πληροφορία δεν είναι παθητικά ταξινομημένη σε μια εξωτερική βάση δεδομένων, αλλά με την μορφή των βαρών γίνεται οργανικό κομμάτι της μονάδας επεξεργασίας της.

Η ιδιόμορφη φύση των ΤΝΔ εμπεριέχει και ορισμένα μειονεκτήματα:

- *Η γνώση παρέχεται αποκλειστικά μέσω της εκπαίδευσης*. Είναι πολύ δύσκολο να κωδικοποιηθεί η τυχόν προϋπάρχουσα γνώση στο ΤΝΔ με άλλο, αμεσότερο τρόπο. Εξαίρεση αποτελούν λίγες κατηγορίες ΤΝΔ (π.χ. δίκτυα Hopfield), αλλά και παραλλαγές γνωστών αρχιτεκτονικών, η τοπολογία των οποίων προσαρμόζεται στο εκάστοτε σύστημα προς προσέγγιση.
- *Είναι αδύνατη η ανάκτηση της γνώσης σε απλή μαθηματική μορφή*, όπως επίσης και η ανάλυση του τρόπου με τον οποίο το ΤΝΔ «σκέπτεται», αντίθετα π.χ. με τα έμπειρα συστήματα.
- Η χρήση των ΝΔ για *εξαγωγή λογικών συμπερασμάτων* με την μορφή διαδοχικών αναγωγικών βημάτων είναι πολύ δύσκολη, αν και έχει επιχειρηθεί.
- Η *μάθηση είναι συχνά αργή*, ειδικά αν χρησιμοποιούνται απλοί αλγόριθμοι εκπαίδευσης όπως ο κλασικός αλγόριθμος Οπισθοδιάδοσης σφάλματος (Back Propagation-BP of errors) και μεγάλα, πλήρως διασυνδεδεμένα δίκτυα. Ακόμη και με τις υπάρχουσες βελτιώσεις το πρόβλημα αμβλύνεται αλλά δεν εξαλείφεται.
- *Δεν υπάρχει πάντα εγγύηση ότι η εκπαίδευση θα συγκλίνει στις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων*. Αξιοσημείωτες εξαιρέσεις αποτελούν τα νευρωνικά δίκτυα που ενσωματώνονται σε αρχιτεκτονικές ελέγχου, όπου με κλασικές τεχνικές του προσαρμοστικού ελέγχου εγγυάται η σύγκλιση του δικτύου.

2.3.2. Νευροασαφής έλεγχος (ANFIS)

Είναι γνωστό πως οι συμβατικές προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση συστημάτων, οι οποίες βασίζονται σε μαθηματικά εργαλεία (όπως οι διαφορικές εξισώσεις), δεν αποδίδουν ικανοποιητικά για σύνθετα συστήματα που περιέχουν αβεβαιότητα (π.χ. οικονομικά συστήματα). Αντίθετα, εφαρμόζοντας ασαφείς if-else κανόνες, ένα σύστημα ασαφούς ελέγχου μπορεί να εκφράσει την ποιοτική πλευρά της ανθρώπινης λογικής χωρίς να χρησιμοποιεί κάποιο ακριβές μαθηματικό μοντέλο του συστήματος. Η ασαφής μοντελοποίηση με την οποία ασχοληθήκαμε παραπάνω, έχει βρει πολλές πρακτικές εφαρμογές σε προβλήματα ελέγχου (όπως για παράδειγμα στην Τεχνητή Νοημοσύνη).

Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή έχει κάποια βασικά προβλήματα:

1. Δεν υπάρχει κάποιος τυποποιημένος τρόπος για τη μετατροπή της εμπειρίας και της γνώσης σε βάση κανόνων και δεδομένων ενός ασαφούς συστήματος
2. Η έλλειψη προσαρμοστικότητας των συστημάτων αυτών ώστε να μπορούν να ρυθμίζουν τις συναρτήσεις συμμετοχής για να μειώνουν το σφάλμα

Τα προβλήματα αυτά προσπάθησε να υπερβεί ο Jang εισάγοντας το GNN - based Fuzzy Inference System. Ένα Γενικευμένο Νευρωνικό Δίκτυο (Generalized Neural Network, GNN), είναι ένα πολυεπίπεδο (multilayer) εμπροσθοτροφοδοτούμενο (feed-forward) δίκτυο, όπου κάθε κόμβος εφαρμόζει μια συγκεκριμένη μέθοδο (function) το σήμα εισόδου και επίσης διατηρεί ένα σύνολο παραμέτρων. Επί πλέον, χρησιμοποιούν ένα φίλτρο Kalman, για να

επιταχύνουν τη σύγκλιση και να μειώσουν την πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικά ελάχιστα. Με αυτό τον τρόπο, ένα σύστημα ασαφούς ελέγχου δημιουργήθηκε, με παραμέτρους που μπορούν να ανανεώνονται και επίσης με τη δυνατότητα να ενσωματώνει γνώση από τις προσομοιώσεις.

2.3.3. Το εργαλείο ANFIS

Το ANFIS είναι ένα προσαρμοστικό, νευροασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων που βασίζεται στη μέθοδο Sugeno Takagi. Αρχικά κατασκευάζεται το μηχανικό μοντέλο του συστήματος. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που προέκυψαν για να εκπαιδευτεί ένας νευροασαφής ελεγκτής. Ο ελεγκτής που προέκυψε από αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ολόκληρου του συστήματος.

Η εξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται με τη χρήση προσαρμοστικών νευρονικών δικτύων. Αυτό σημαίνει ότι δεν εισάγει ο χειριστής τη βάση κανόνων του συστήματος με τη χρήση τελεστών if – then , αλλά αυτή προκύπτει αυτόματα. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων χρησιμοποιούνται νευρονικά δίκτυα οπισθοδιάδωσης.

Παρόλο που υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί σχετικά με το γεγονός ότι δεν μπορεί εύκολα στα συστήματα αυτά να αποκρυσταλωθεί η υπάρχουσα εμπειρία σε επίπεδο κανόνων, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά και ακριβή, ενώ ενδείκνυνται ιδιαίτερα για την αναγνώριση δομικών σφαλμάτων.

2.4. Πιεζοηλεκτρισμός

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ανακαλύφθηκε το 1880 από τους Jacque και Pierre Curie (Curie & Curie, 1880). Αφορά την ιδιότητα συγκεκριμένων στερεών, κυρίως κρυστάλλων και κεραμικών, να παράγουν ηλεκτρικό φορτίο ως αποτέλεσμα μιας εφαρμοζόμενης μηχανικής διέγερσης.

Υπάρχουν δύο μορφές του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Η άμεση και η αντίστροφη. Στην πρώτη περίπτωση, προκύπτει ένα ηλεκτρικό φορτίο όταν μια εξωτερική δύναμη επιδρά στο πιεζοηλεκτρικό υλικό. Στη δεύτερη περίπτωση, μια μηχανική τάση προκύπτει από την εφαρμογή ηλεκτρικής διέγερσης στο υλικό. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα υλικά που εμφανίζουν την αντίστροφη μορφή, εμφανίζουν και την άμεση και αντίστροφα.

Γενικά, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ανισοτροπικό. Για παράδειγμα, συμβαίνει σε υλικά με κρυσταλλική δομή, χωρίς κέντρο συμμετρίας. Σε ορισμένα κεραμικά υλικά, εμφανίζονται ηλεκτρικά δίπολα τυχαίου προσανατολισμού όταν ψύχονται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, γνωστή ως θερμοκρασία Curie, παρουσία ηλεκτρικού πεδίου. Μετά τη διαδικασία της ψύξης και την απομάκρυνση του ηλεκτρικού πεδίου, τα υλικά αυτά μετατρέπονται μόνιμα σε πιεζοηλεκτρικά.

3. Μοντελοποίηση

3.1. Τα πεπερασμένα στοιχεία για την επίλυση της πλάκας

Χρησιμοποιήσαμε τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method) για τη διακριτοποίηση της πλάκας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήσαμε τετράγωνα ισοπαραμετρικά στοιχεία αποτελούμενα από τέσσερις (4) κόμβους και πέντε (5) βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο:

$$\{u_0, v_0, w_0, \theta_x, \theta_y\}$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε τις σημειογραφίες:

$$\{u\} = \{u, v, w\}^T \quad \{\bar{u}\} = \{u_0, v_0, w_0, \theta_x, \theta_y\}^T$$

Έτσι, οι εξισώσεις κίνησης μπορούν να γραφτούν ως:

$$\{u\} = [L_Z] \{\bar{u}\}$$

Όπου:

$$[L_Z] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -z \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Στη συνέχεια, το πεδίο της μετατόπισης μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$\{\bar{u}(x, y, t)\} = [L_Z][N]\{d_e\}$$

Όπου [N] ο πίνακας των σχηματικών συναρτήσεων και $\{d_e\}$ το διάνυσμα των μεταβλητών του κόμβου που δίνεται από:

$$[N] = [[N_1][N_2][N_3][N_4]] \quad [N_j] = N_j I_5, \quad j = 1, 2, 3, 4$$

$$\{d_e\} = \left\{ \{d_1\}^T, \{d_2\}^T, \{d_3\}^T, \{d_4\}^T \right\}^T$$

$$\{d_j\} = \{u_j, v_j, w_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}\}^T, \quad j = 1, 2, 3, 4$$

Έτσι, οι εξισώσεις ενός στοιχείου μπορούν να γραφτούν ως:

$$[M]_e \{\ddot{d}_e\} + [K_{uu}]_e \{d_e\} + [K_{u\phi}]_e \{\phi\}_e = \{F_{(m)}\}_e$$

$$[K_{\phi u}]_e^T \{d_e\} - [K_{\phi\phi}]_e \{\phi\}_e = \{F_{(q)}\}_e$$

Όπου M το μητρώο μάζας, K το μητρώο ελαστικότητας και F το διάνυσμα δύναμης, τα οποία υπολογίζονται:

$$\begin{aligned}
 [M]_e &= \sum_{k=1}^{nplies} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho_k [N]^T \left[\int_{z_k}^{z_{k+1}} [L_z]^T [L_z] dz \right] [N] |J| d\xi d\eta \\
 [K_{uu}]_e &= \sum_{k=1}^{nplies} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left[\int_{z_k}^{z_{k+1}} [B]^T [\bar{Q}]_k [B] dz \right] |J| d\xi d\eta \\
 \{F_m\}_e &= \int_{V_e} [N]^T \{f_v\}_e dV + \int_{S_e} [N]^T \{f_s\}_e dS + [N]^T \{F_c\}_e
 \end{aligned}$$

Με βάση τις εξισώσεις ενός στοιχείου, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, μπορούμε να γράψουμε τις γενικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 [M] \{\ddot{d}\} + [K_{uu}] \{d\} + [K_{u\phi}] \{\phi\} &= \{F_m\} \\
 [K_{\phi u}] \{d\} + [K_{\phi\phi}] \{\phi\} &= \{F_q\}
 \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, υποθέτουμε ότι οι ηλεκτρικοί βαθμοί ελευθερίας της παραπάνω εξίσωσης μπορούν να χωριστούν σε αυτούς της μέτρησης και αυτούς του ελέγχου

$$\{\phi\}_e = \{\phi_a, \phi_s\}^T,$$

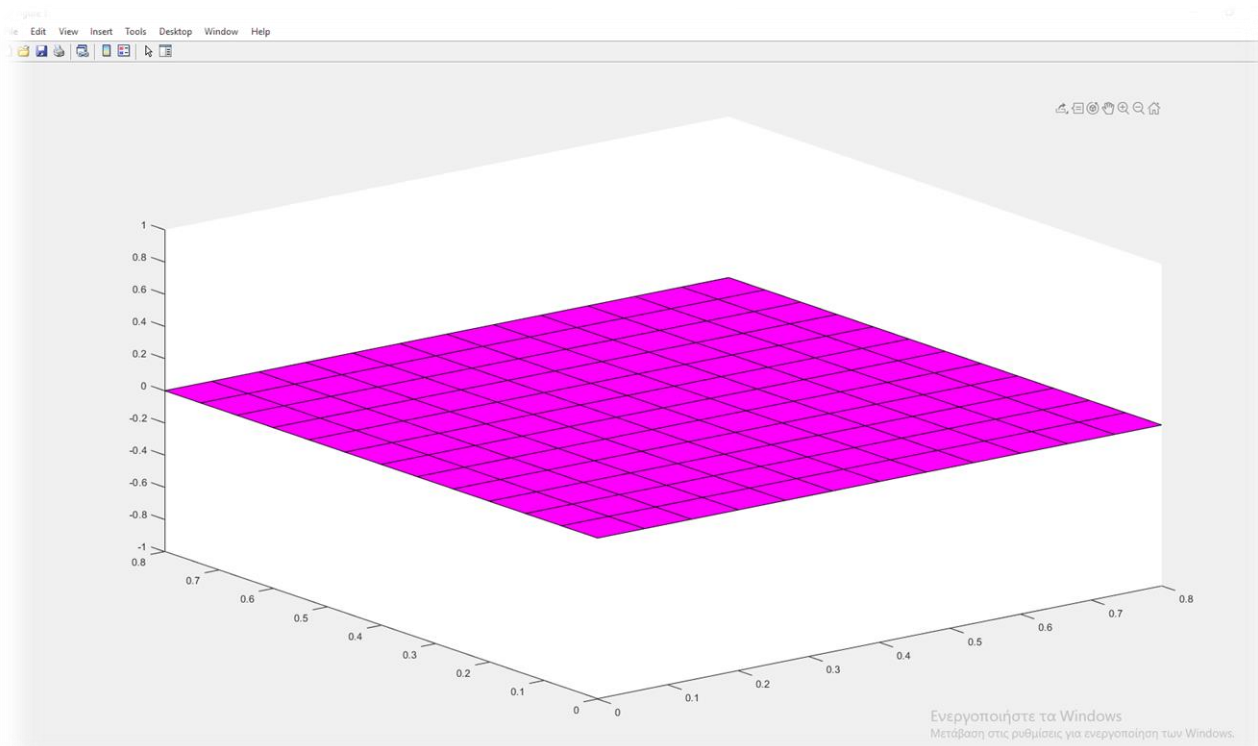
Όπου a = actuating και s = sensing, ο έλεγχος και η μέτρηση αντίστοιχα. Έτσι καταλήγουμε:

$$\begin{aligned}
 [M] \{\ddot{d}\} + [K_{uu}] \{d\} &= \{F_m\} - [K_{u\phi}]_a \{\phi\}_a \\
 \{\phi\}_s &= -[K_{\phi\phi}]_s^{-1} [K_{\phi u}]_s \{d\}
 \end{aligned}$$

Όπου:

$$[K_{uu}^*] = [K_{uu}] - [K_{u\phi}]_s [K_{\phi\phi}]_s^{-1} [K_{\phi u}]_s.$$

Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έξυπνες κατασκευές ελέγχου δονήσεων, στατικό ή δυναμικό έλεγχο σχήματος κλπ.



[Εικόνα 3.1]: Κατασκευή πλάκας

3.2. Παρουσίαση του προβλήματος

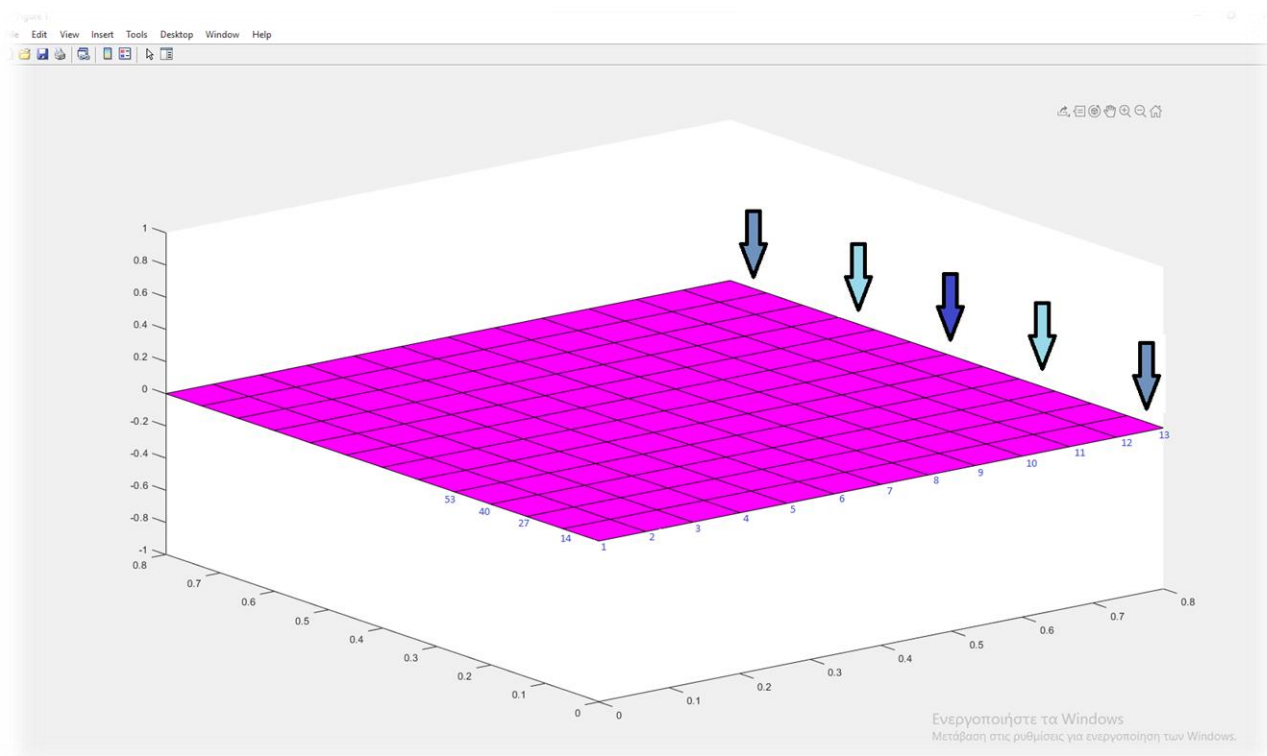
Στο πλαίσιο της διερεύνησής μας, λαμβάνουμε υπόψη μόνο την κάθετη μετατόπιση, θυσιάζοντας τα οφέλη μιας πιο ευρείας οπτικής, λόγω του μεγέθους του υπό εξέταση μοντέλου. Η πλάκα είναι πακτωμένη στη μία της πλευρά, αφήνοντας μια πλευρά ελεύθερη σε (κάθετη) κίνηση.

Το σύστημά μας είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Η λειτουργία τους είναι διπλή. Αφενός στη μέτρηση της ημιτονοειδούς διέγερσης στην οποία υπόκειται η πλάκα. Αφετέρου στην εφαρμογή της δύναμης ελέγχου την οποία ασκεί το σύστημά μας με σκοπό να αποσβέση την ταλάντωση.

Το σύστημα της πλάκας, υπόκειται σε ημιτονοειδή ταλάντωση και ο στόχος μας είναι να αποσβέσουμε αυτή την ταλάντωση ως προς το πλάτος, τη διάρκεια και τις ασκούμενες δυνάμεις, ελέγχοντας κατά το δυνατό καλύτερα τις καταπονήσεις που δέχεται. Για τον σκοπό αυτό θα αναπτυχθεί νευροασαφής ελεγκτής. Δε θα χρειαστεί να περιγράψουμε τη βάση κανόνων του ελεγκτή, καθώς λόγω της φύσης του, αυτοί θα προκύψουν από τη διαδικασία της εκπαίδευσης.

Στη συνέχεια θα προσομοιώσουμε την άσκηση εξωτερικής, ημιτονοειδούς δύναμης, ταυτόχρονα με τη δύναμη ελέγχου, στο σύστημά μας και θα μετρήσουμε τη βελτίωση ως προς τις μεταβολές των τιμών μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση.

Τέλος, θα εκτελέσουμε πειράματα για τη διερεύνηση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων της ασκούμενης δύναμης ελέγχου, καθώς και των σημείων στα οποία θα ασκείται ο έλεγχος.



[Εικόνα 3.2]: Η αριθμηση των κόμβων και τα σημεία ελέγχου

3.3. Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο της πλάκας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει κατασκευαστεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από την ομάδα του εργαστηρίου Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης του Πολυτεχνείου Κρήτης και συγκεκριμένα υπολογίζει τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε για να λύσουμε τις εξισώσεις κίνησης.

Η πλάκα είναι διαιρεμένη σε 144 πλακίδια, διαμορφώνοντας ένα σύστημα 169 κόμβων. Η πλάκα έχει 13 κόμβους σε κάθε πλευρά και το συνολικό μήκος της κάθε πλευράς είναι 0,8 μονάδες.

Σε κάθε κόμβο αντιστοιχούν πέντε βαθμοί ελευθερίας:

1. Μετατόπιση ως προς τον x άξονα
2. Μετατόπιση ως προς τον y άξονα
3. Μετατόπιση ως προς τον z άξονα
4. Στροφή θ_x
5. Στροφή θ_y

Στην αναπαράσταση της πλάκας στους άξονες x, y, z η αριθμηση των στοιχείων φαίνεται στην εικόνα 3.2 και γίνεται ως εξής. Το στοιχείο (0,0,0) είναι το 1, το (1,0,0) είναι το 2, το (12,0,0) είναι το 13, το (0,0,1) είναι το 14, το (12,0,1) είναι το 26 και ούτω καθεξής.

Θέλουμε να επιτύχουμε την πάκτωση της πλάκας ως προς τη μία της πλευρά. Ως εκ τούτου, τα στοιχεία 1, 14, 27, 40, 53, 66, 79, 92, 105, 118, 131, 144, 157 έχουν όλους τους βαθμούς ελευθερίας τους μηδενισμένους, το οποίο σημαίνει ότι δε μπορούν να εξαναγκαστούν σε μετατόπιση ως προς κανέναν άξονα, ούτε σε περιστροφή.

Το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση των κόμβων είναι:

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

Όπου M το μητρώο μάζας, C το μητρώο απόσβεσης και K το μητρώο δυσκαμψίας, \ddot{u} η επιτάχυνση, \dot{u} η ταχύτητα, u η μετατόπιση P , Z οι εξωτερικές δυνάμεις και δυνάμεις ελέγχου.

Το μητρώο απόσβεσης C υπολογίστηκε ως γραμμικός συνδυασμός των μητρώων μάζας και δυσκαμψίας (απόσβεση Rayleigh):

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

Αναφέραμε νωρίτερα ότι το σύστημά μας υπόκειται σε ημιτονοειδή ταλάντωση. Το ζητούμενο αυτής της εργασίας είναι ο προσδιορισμός της δύναμης ελέγχου την οποία πρέπει να ασκήσουμε έτσι ώστε να αποσβέσουμε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις μεταβολές στα υπό εξέταση μεγέθη, δηλαδή την επιτάχυνση, την ταχύτητα και τη μετατόπιση.

Η γενική μορφή της εξωτερικής διέγερσης είναι:

$$P = p_0 * \sin(\Omega * t)$$

Όπου p_0 το πλάτος της ταλάντωσης το οποίο θέτουμε ίσο με 1 και Ω η συχνότητα της ταλάντωσης. Θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος ως προς το βαθμό απόσβεσης των υπό εξέταση μεγεθών, τροποποιώντας κάθε φορά το σύστημα ως προς:

1. Τη συχνότητα Ω της ταλάντωσης της δύναμης ελέγχου (Τιμές 20, 25, 30)
2. Έναν πολλαπλασιαστή που ορίζουμε για τη δύναμη ελέγχου (Τιμές 0.6, 0.8)
3. Το πλήθος των σημείων στα οποία γίνεται ο έλεγχος (Τιμές 1, 3, 5)

Στα πειράματα που θα ακολουθήσουν, όταν αναφερόμαστε σε έλεγχο ενός σημείου εννοούμε το μέσο της πλευράς που είναι απέναντι από την πακτωμένη (μπλε βέλος).

Στον έλεγχο τριών σημείων συμπεριλαμβάνουμε και τα στοιχεία που βρίσκονται στις δύο άκρες της πλευράς (γκρι βέλη).

Στον έλεγχο πέντε σημείων ενεργοποιούμε όλα τα στοιχεία που υποδεικνύονται στο σχετικό σχήμα.

3.4. Ελεγκτής

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένας νευροασαφής ελεγκτής τύπου Sugeno ο οποίος δέχεται δύο εισόδους και παράγει μια έξοδο. Οι εισοδοί είναι οι μετατόπιση u και η ταχύτητα \dot{u} και η έξοδος είναι η δύναμη ελέγχου Z που πρέπει να ασκηθεί. Η βάση κανόνων του ελεγκτή δεν καθορίστηκε χειροκίνητα, αλλά προέκυψε από τη διαδικασία εκπαίδευσης του ελεγκτή, όπως θα εξηγήσουμε πιο κάτω.

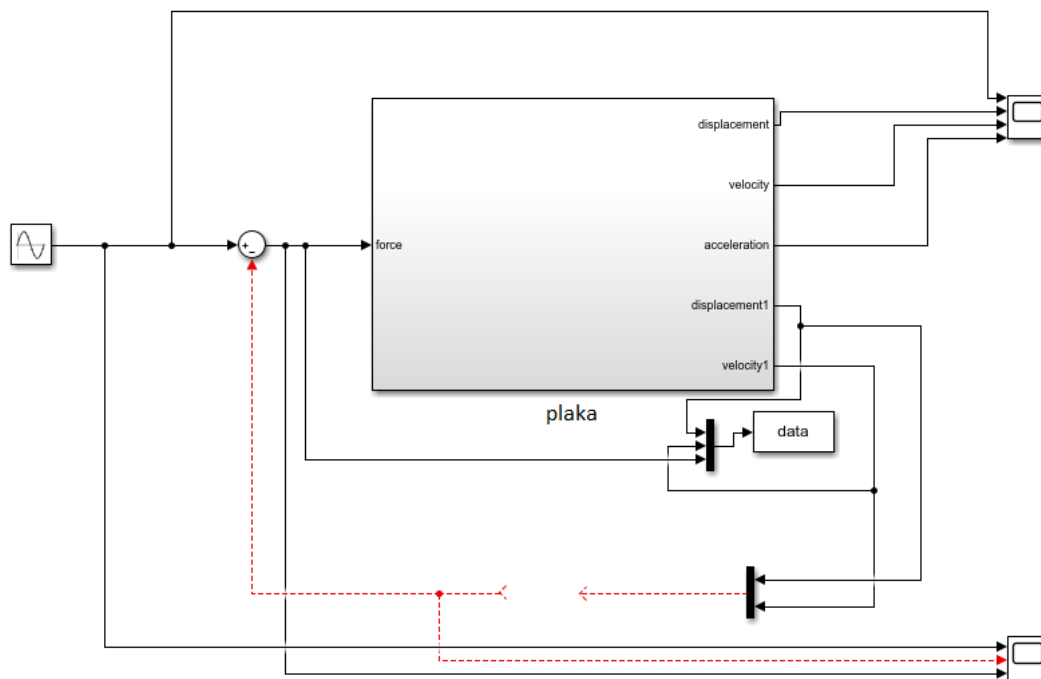
Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του μοντέλου και τη δοκιμή διαφορετικών παραμέτρων ελέγχου με σκοπό τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών τους.

Βήμα 1: Αρχικά εκτελέσαμε στο περιβάλλον της MATLAB το αρχείο που δημιούργησε το μοντέλο της πλάκας, δηλαδή τα μητρώα μάζας, υσκαμψίας και απόσβεσης.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πρόκειται για μια πλάκα που αποτελείται από 13×13 στοιχεία.

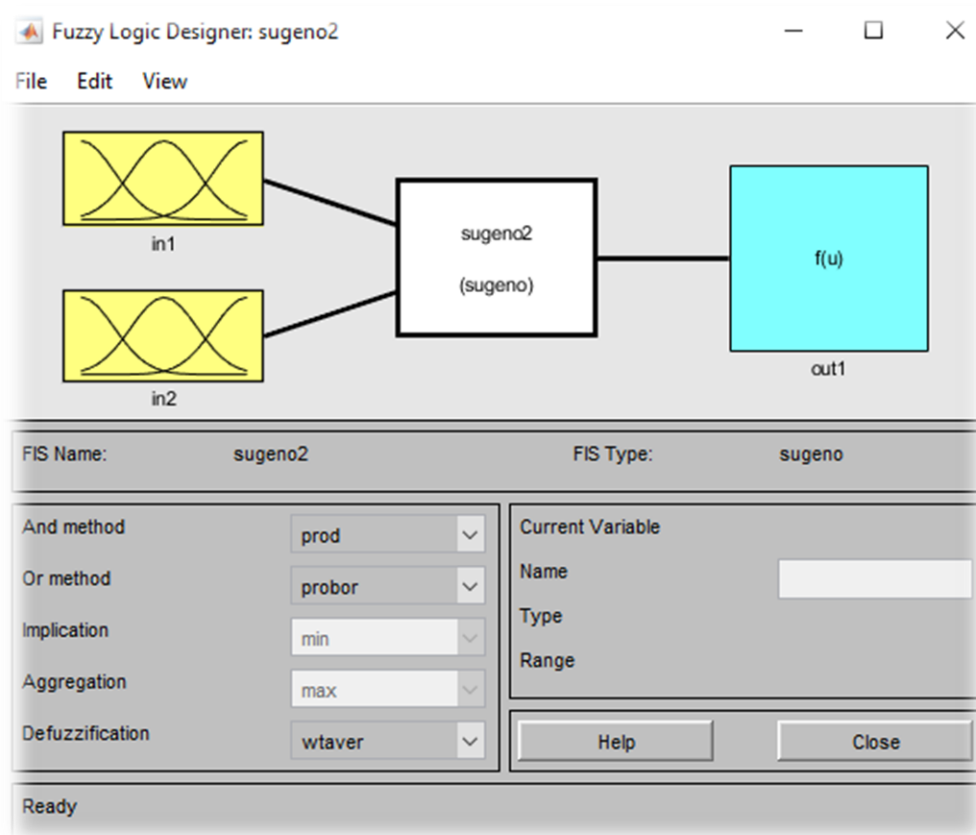
Βήμα 2: Εισάγουμε το μοντέλο μας στο περιβάλλον του Simulink για να κάνουμε την προσομοίωση του δυναμικού φαινομένου. Αρχικά χρησιμοποιούμε το μοντέλο χωρίς κανέναν έλεγχο και καταγράφουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στη μεταβλητή data.

Αυτό που κάνουμε εδώ είναι ότι καταγράφουμε τη συμπεριφορά του συστήματος όταν δεν υπόκειται σε κανέναν έλεγχο, έτσι ώστε να λάβουμε τα απαραίτητα δεδομένα για την εκπαίδευση του ελεγκτή μας.



[Εικόνα 3.3]: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος χωρίς έλεγχο

Βήμα 3: Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε την εργαλειοθήκη ασαφών συστημάτων (fuzzy toolbox) της MATLAB για να δημιουργήσουμε έναν ελεγκτή τύπου Sugeno, ο οποίος θα έχει δύο εισόδους και μια έξοδο.



[Εικόνα 3.4]: Ένας ελεγκτής τύπου sugeno με δύο εισόδους και μια έξοδο

Για να δημιουργήσουμε ένα καινούριο ελεγκτή, πληκτρολογούμε στο command window την εντολή:

fuzzy

και πατάμε enter. Αυτό θα μας ανοίξει ένα παράθυρο όπως της Εικόνας 3.4, στο οποίο μπορούμε να παραμετροποιήσουμε τον ελεγκτή μας ως προς τις εισόδους, τις εξόδους και τον τύπο του. Αφού τον αποθηκεύσουμε, μπορούμε να ξαναανοίξουμε το παράθυρο με τις επιλογές του με την εντολή:

fuzzy [controller_name]

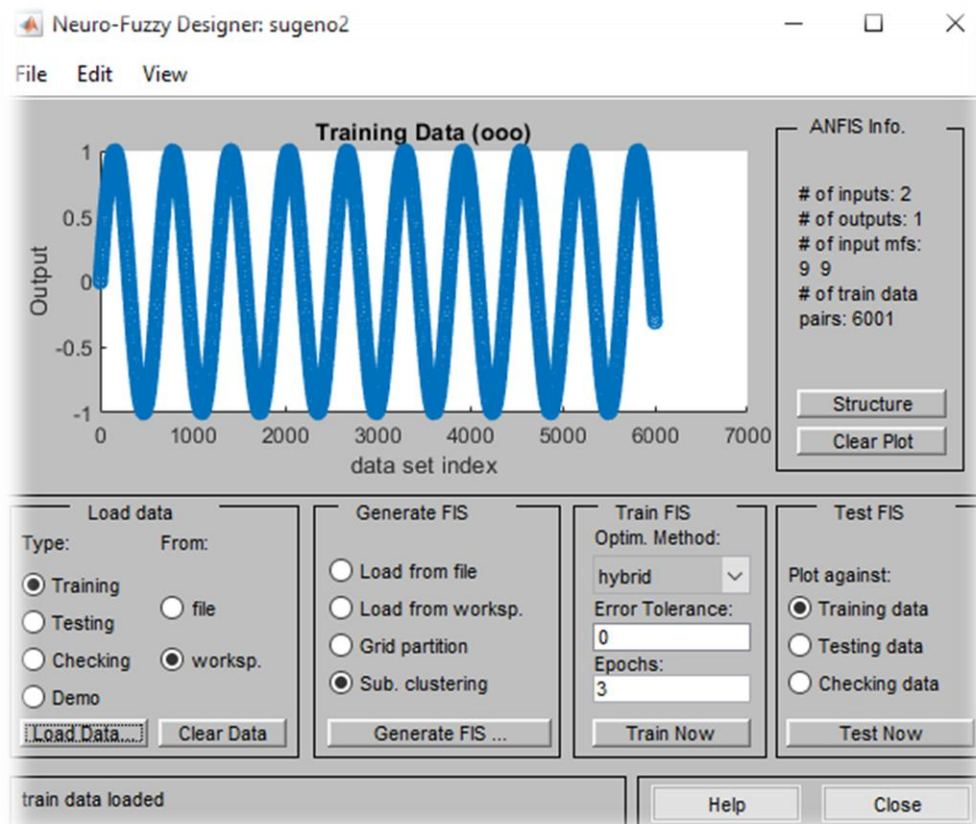
όπου [controller_name] το όνομα του ελεγκτή.

Βήμα 4: Σε αυτό το σημείο θα χρησιμοποιήσουμε το fuzzy toolbox για να εκπαιδεύσουμε τον ελεγκτή μας, με βάση τα δεδομένα από το προηγούμενο βήμα.

Έχουμε ήδη ανοίξει τον ελεγκτή μας και έχουμε προσδιορίσει τη μορφή των εισόδων και της εξόδου του. Τώρα θα τον εκπαιδεύσουμε πηγαίνοντας από το μενού Edit > Anfis. Θα επιλέξουμε να φορτωθούν τα δεδομένα από το workspace, αφού εκεί δημιουργήθηκαν κατά την εκτέλεση του συστήματος χωρίς έλεγχο. Συγκεκριμένα πατάμε το κουμπί Load Data και γράφουμε

data.signals.values

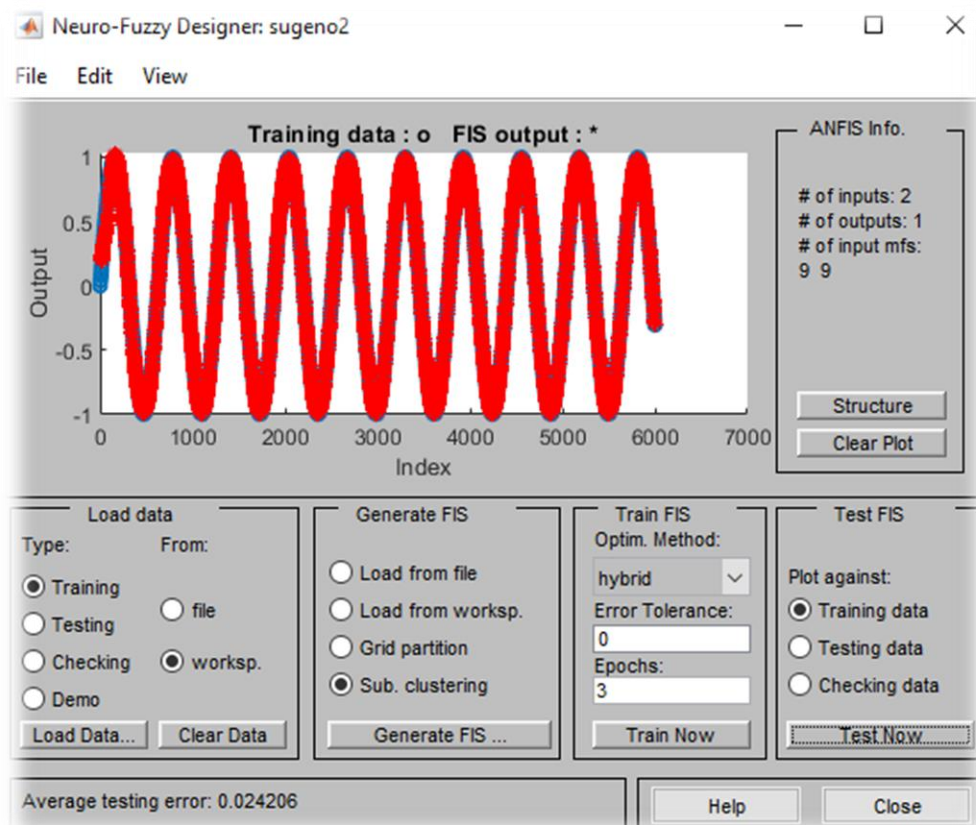
Οριστικοποιούμε την επιλογή μας και βλέπουμε τα δεδομένα μας να έχουν φορτωθεί στο παράθυρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5.



[Εικόνα 3.5]: Το παράθυρο εκπαίδευσης του ελεγκτή μόλις φορτώσαμε data

Στην περιοχή Generate FIS επιλέγουμε Sub clustering και στο Train FIS hybrid. Τέλος πατάμε Train Now και βλέπουμε το εξής (Εικόνα 3.6):

Έχει σχεδιαστεί μια κόκκινη γραμμή επάνω από τη μπλε που αντιστοιχούσε στα data της αρχικής προσομοίωσης. Φαίνεται ότι η γραμμή αυτή σχεδόν συμπίπτει με την αρχική, το οποίο δείχνει ότι η εκπαίδευση είχε αρκετά ικανοποιητικό αποτέλεσμα.



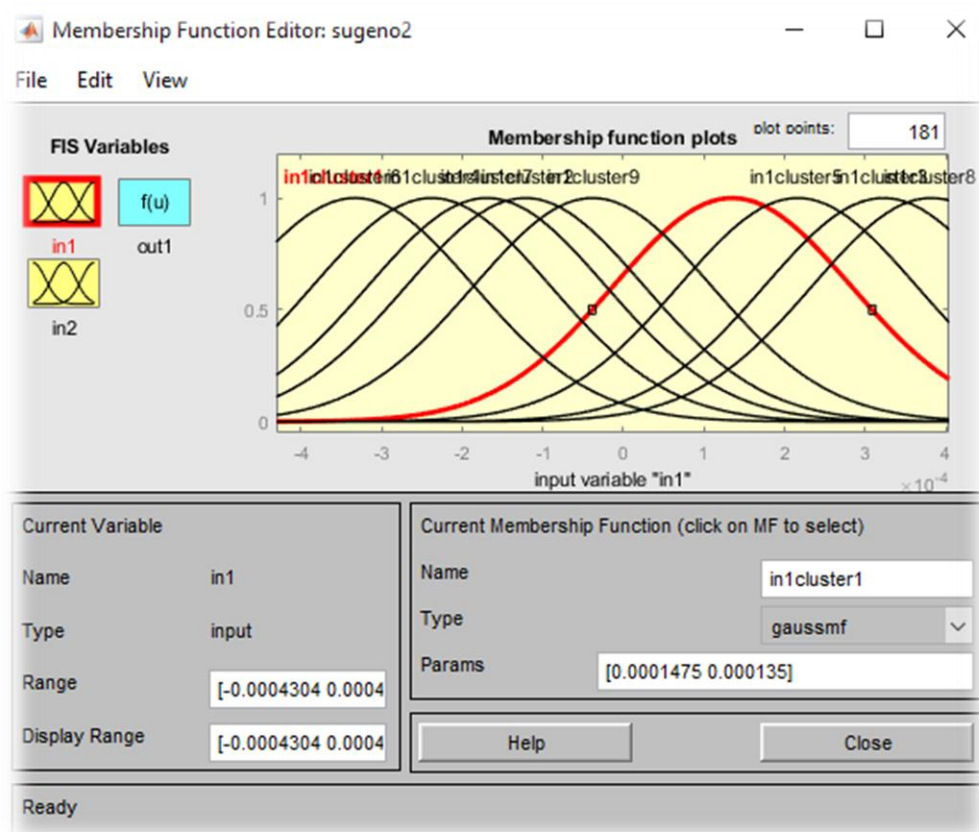
[Εικόνα 3.6]: Μετά την εκπαίδευση

Παρακάτω, στην Εικόνα 3.7 φαίνονται σχηματικά οι συναρτήσεις συμμετοχής της πρώτης εισόδου, που είναι η μετατόπιση. Βλέπουμε ότι οι τιμές ανήκουν σε εννέα διαφορετικές κατηγορίες (Clusters)

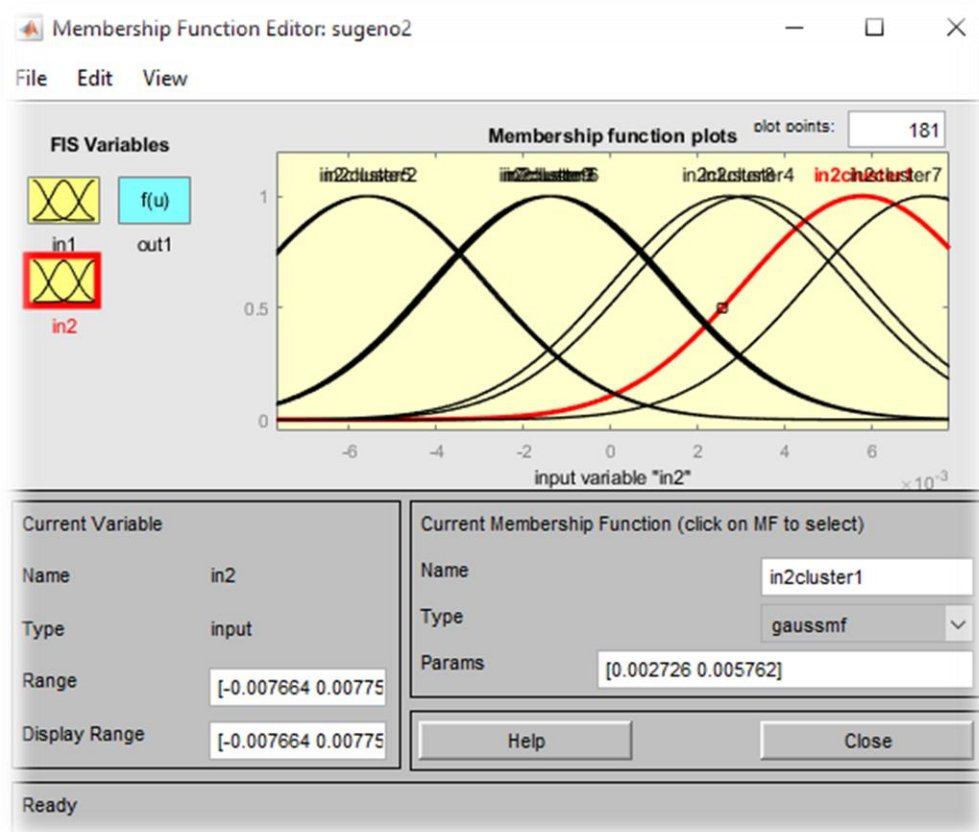
Στη Εικόνα 3.8 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής της δεύτερης εισόδου που είναι η ταχύτητα και

Τέλος, στις Εικόνες 3.9, 3.10 και 3.11 βλέπουμε σε διάφορες μορφές τους κανόνες της εξόδου που αντιστοιχεί στη δύναμη ελέγχου.

Η επιλογή των κατηγοριών έγινε με αυτόματο τρόπο κατά την εκπαίδευση, σύμφωνα με τη μέθοδο της αφαιρετικής κατηγοριοποίησης.



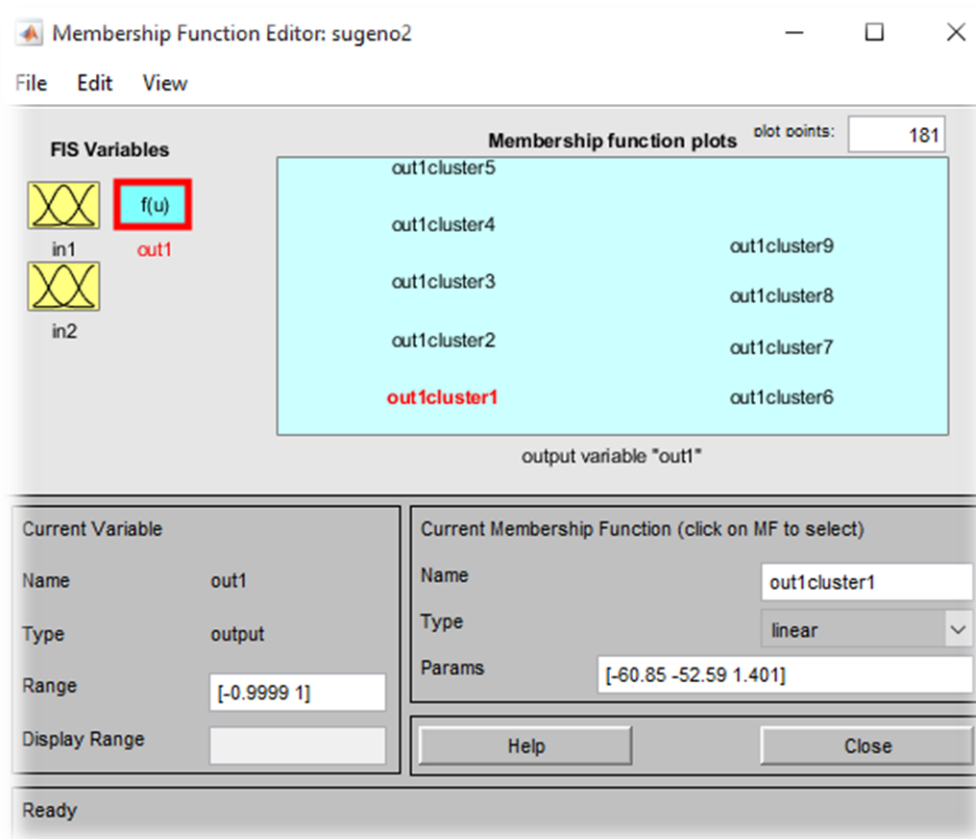
[Εικόνα 3.7]: Συναρτήσεις συμμετοχής της πρώτης εισόδου



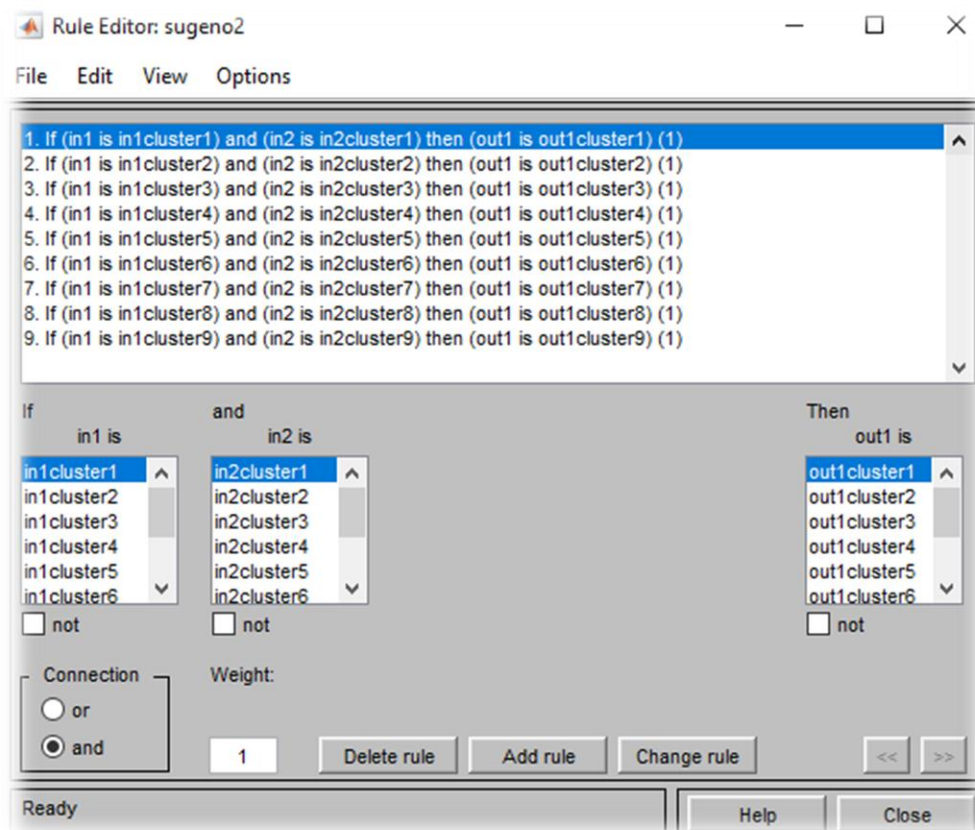
[Εικόνα 3.8]: Συναρτήσεις συμμετοχής της δεύτερης εισόδου

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι η διαδικασία εκπαίδευσης μας δίνει ένα σύνολο κανόνων, οι οποίοι αποφασίζουν τη δύναμη ελέγχου που θα ασκηθεί στο σύστημα ανάλογα με το που βρίσκονται οι είσοδοί του. Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας αυτοί οι κανόνες ήταν υπεραρκετοί καθώς παρέχουν αρκετά σύντομη και ομαλή επαναφορά του συστήματος στις αρχικές του συνθήκες.

Θα μπορούσαμε, ωστόσο, να τροποποιήσουμε αυτούς τους κανόνες, εφαρμόζοντας θεωρητικά ή πειραματικά αποκτημένη γνώση, όπως αν είχαμε κάποιου άλλου τύπου ελεγκτή, για να βελτιώσουμε ακόμα περισσότερο το αποτέλεσμα. Η χρήση των αποτελεσμάτων του νευροασαφούς ελέγχου με αυτή της εξειδικευμένης γνώσης της μηχανικής του προβλήματος θα είχε τη μέγιστη αποδοτικότητα.



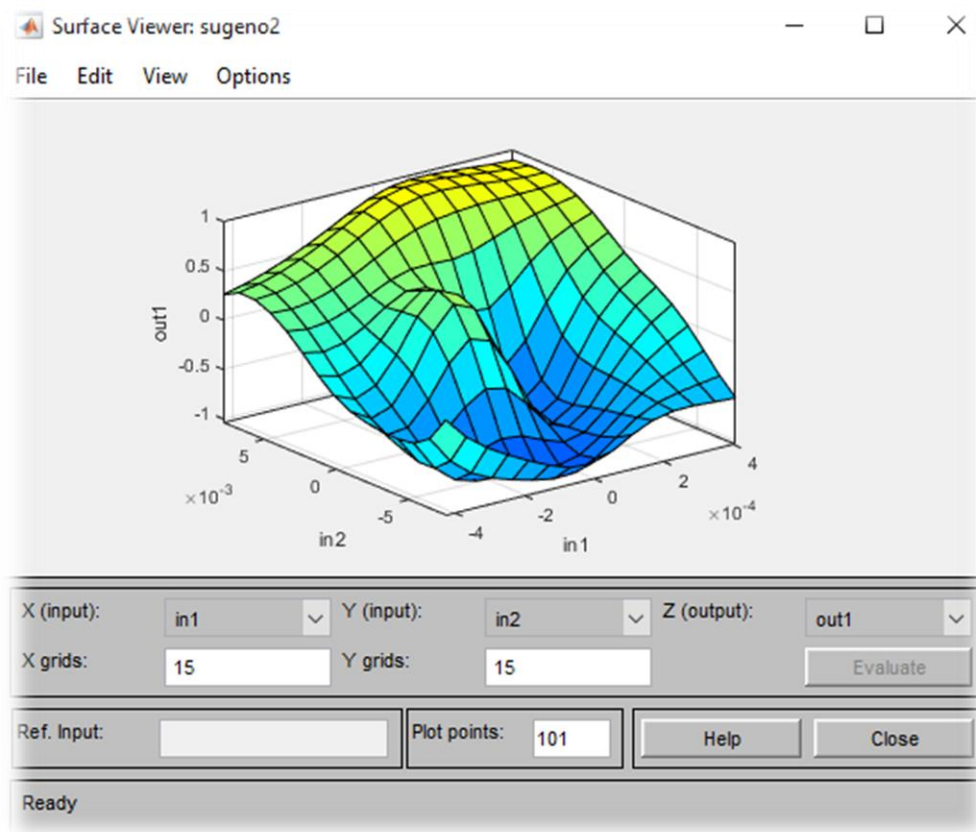
[Εικόνα 3.9]: Η έξοδος



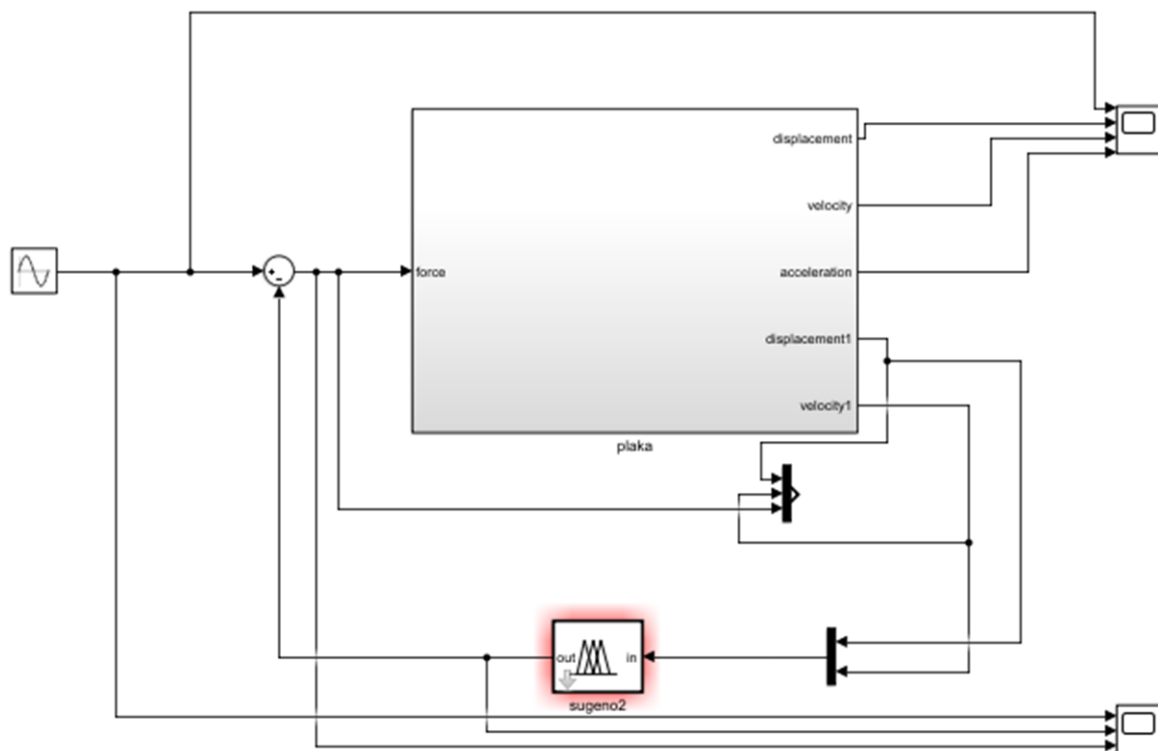
[Εικόνα 3.10]: Οι κανόνες του νευροασαφούς συστήματος

Αυτή η αναπαράσταση σημαίνει ότι:

1. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 1 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 1 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 1
2. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 2 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 2 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 2
3. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 3 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 3 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 3
4. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 4 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 4 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 4
5. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 5 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 5 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 5
6. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 6 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 6 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 6
7. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 7 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 7 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 7
8. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 8 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 8 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 8
9. Αν η πρώτη είσοδος ανήκει στο cluster 9 και η δεύτερη είσοδος στο cluster 9 τότε η έξοδος ανήκει στο cluster 9



[Εικόνα 3.11]: Οι κανόνες ως περιοχή



[Εικόνα 3.12]: Το σύστημα με τον έλεγχο με SIMULINK

3.5. Προβλήματα με το SIMULINK

Στο προηγούμενο σχήμα (Εικόνα 3.12), φαίνεται η απεικόνιση του συστήματος στο περιβάλλον SIMULINK της MATLAB. Παρατηρούμε ότι είναι το ίδιο σύστημα που χρησιμοποιήσαμε για να καταγράψουμε τα δεδομένα του μοντέλου, τα οποία εισάγαμε στη διαδικασία της εκπαίδευσης. Η διαφορά είναι ότι έχουμε αφαιρέσει το κομμάτι καταγραφής της μεταβλητής data, και έχουμε προσθέσει τον ελεγκτή, όπως προέκυψε από την εκπαίδευση. Παρατηρούμε ότι η δύναμη ελέγχου, που παράγεται από τον ελεγκτή, προστίθεται στη δύναμη διέγερσης του συστήματος.

Προέκυψε το πρόβλημα ότι το simulink καθυστερεί πάρα πολύ να κάνει τις προσομοιώσεις που του ζητήσαμε. Δοκιμάστηκε με διάφορες ρυθμίσεις, πάντα με το εξής αποτέλεσμα. Η προσομοίωση τρέχει μέχρι τα 0.12 δευτερόλεπτα σχετικά γρήγορα μάλιστα (σε μερικές ώρες), αλλά μένει εκεί όσο και να το αφήσουμε να τρέχει (έως και 2 μέρες).

Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν οι ακόλουθες τροποποιήσεις:

1. Μείωση του βήματος (original step) από $10 \cdot 128 \cdot \text{eps}$ που είναι το default σταδιακά μέχρι και σε $10 \cdot \text{eps}$
2. Αύξηση του περιθωρίου σφάλματος από $1 \cdot 10^{-5}$ μέχρι και σε $1 \cdot 10^{-3}$
3. Απενεργοποίηση του Zero Crossing Control
4. Απενεργοποίηση του Debugging
5. Δοκιμή όλων των διαθέσιμων solvers που μας δίνει το εργαλείο (ode45, ode23, ode113, ode15s, ode23s, ode23t, ode23tb) που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τρόπους ολοκλήρωσης και σε διαφορετικούς βαθμούς.
6. Όλους τους συνδυασμούς των παραπάνω σε Normal, Accelerator και Rapid Accelerator mode

Πιθανό να είχαμε καλύτερα αποτελέσματα σε ένα πιο δυνατό υπολογιστή, αλλά και πάλι δε θα μπορούσαν να είναι εντυπωσιακά καλύτερα. Φαίνεται πως το Simulink δε μπορεί να διαχειριστεί προβλήματα αυτού του μεγέθους

Αποφασίστηκε να προχωρήσουμε στα πειράματα παρακάμπτοντας το Simulink, χρησιμοποιώντας μόνο το Matlab. Συγκεκριμένα βασιστήκαμε στον αλγόριθμο ολοκλήρωσης Houbolt ο οποίος προγραμματίστηκε από τον κ. Ταϊρίδη.

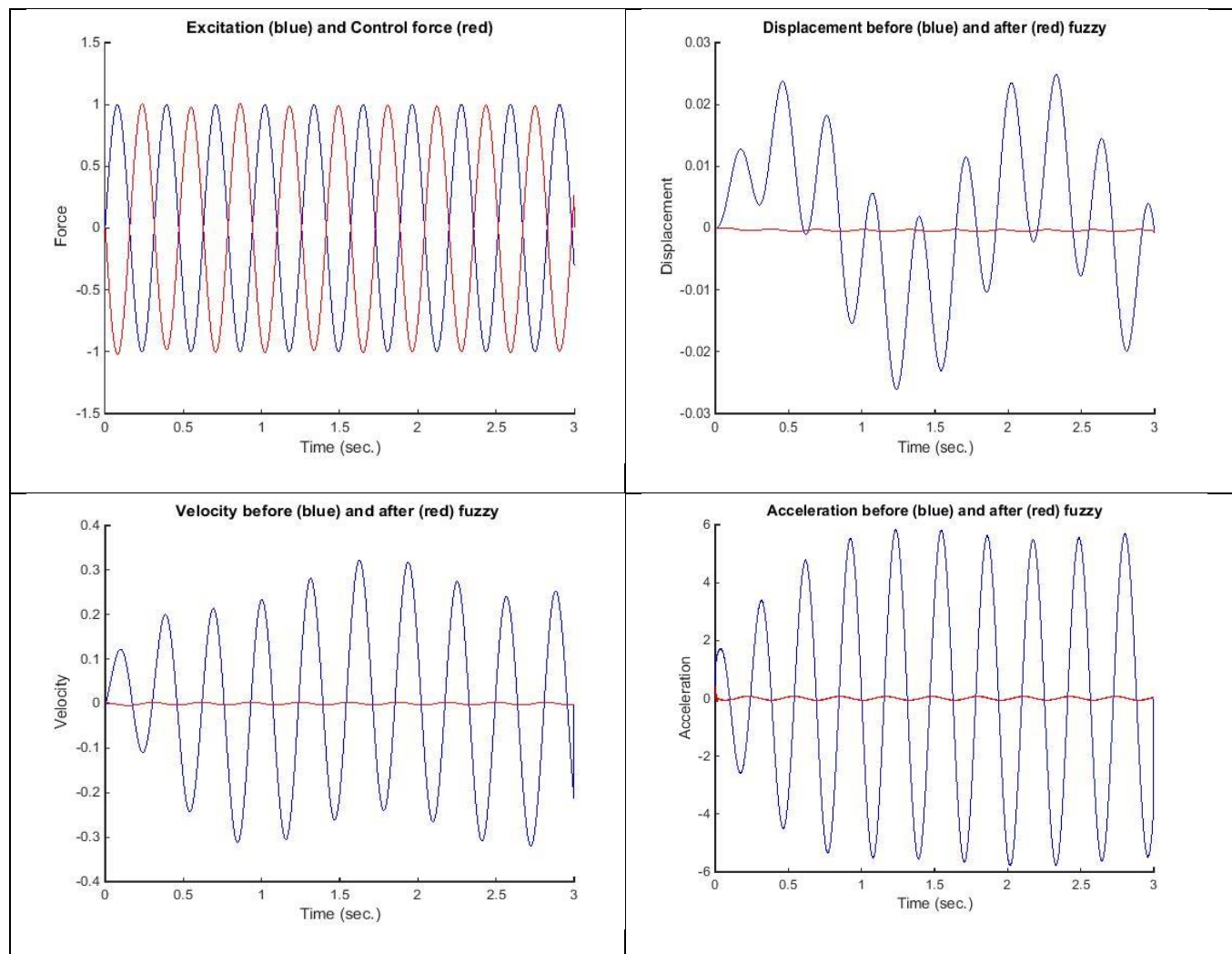
Λεπτομέρειες για το πως λειτουργεί ο αλγόριθμος αυτός, υπάρχουν αναλυτικά στην μεταπτυχιακή εργασία του κ. Ταϊρίδη [1] και για το λόγο αυτό δε θα επεκταθούμε περισσότερο στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Στη συνέχεια, θα τον εκτελέσουμε για τις διαφορετικές τιμές των παραμέτρων που θέλουμε να εξετάσουμε και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα στο επόμενο κεφάλαιο.

4. Αποτελέσματα

1^η Προσομοίωση

Φορτίο σε μία θέση, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: -0.08, Ω : 20, Πλάτος διέγερσης: 1

Γραφικές παραστάσεις:



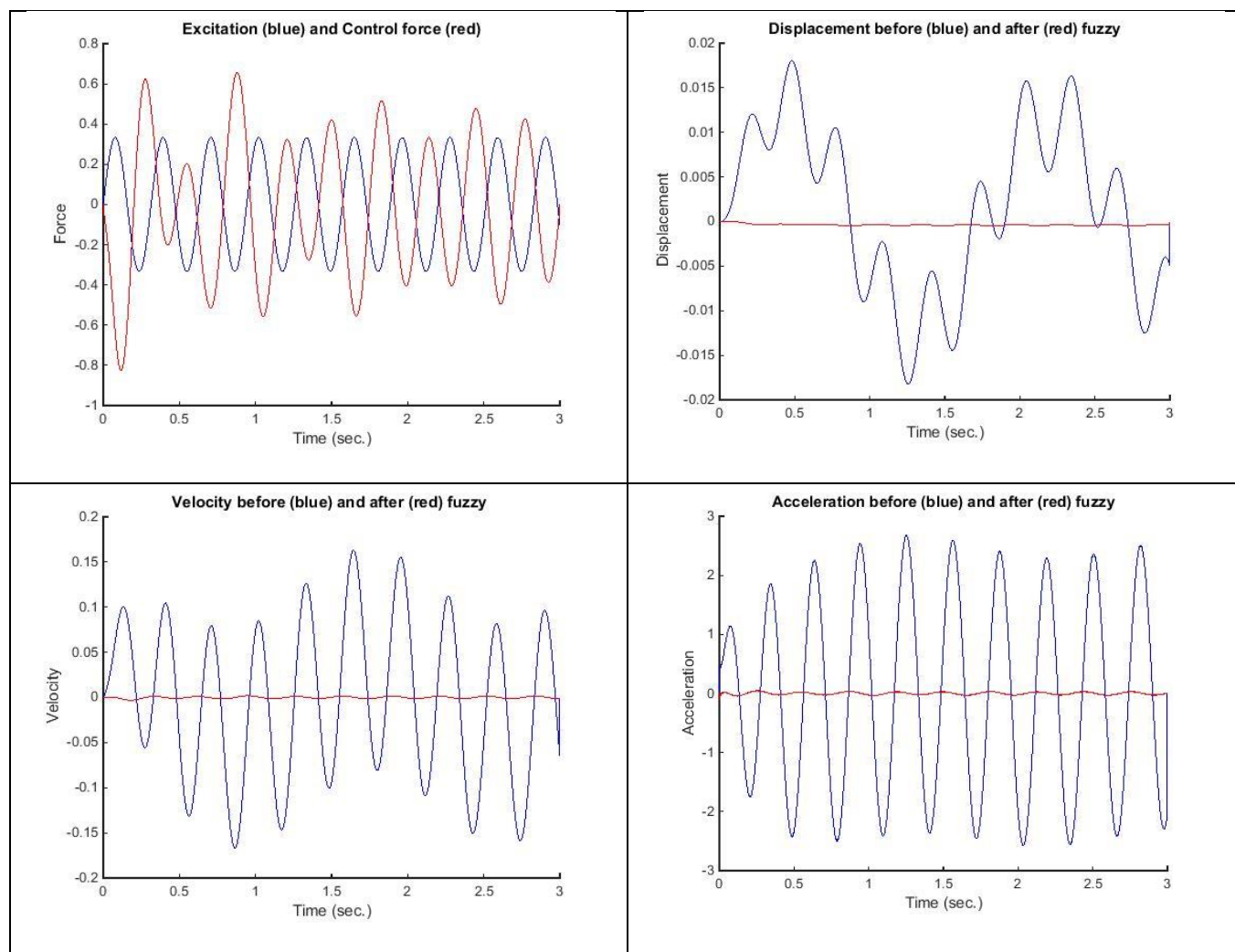
Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s²
Πριν τον έλεγχο	0,02607	0,3227	5.847
Μετά τον έλεγχο	0,00005631	0,004118	0,4136
Μεταβολή	99,7%	98,7%	99,9%

2^η Προσομοίωση

Φορτίο σε τρεις θέσεις, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: -0.08, Ω : 20, Πλάτος διέγερσης: 1

Γραφικές παραστάσεις:

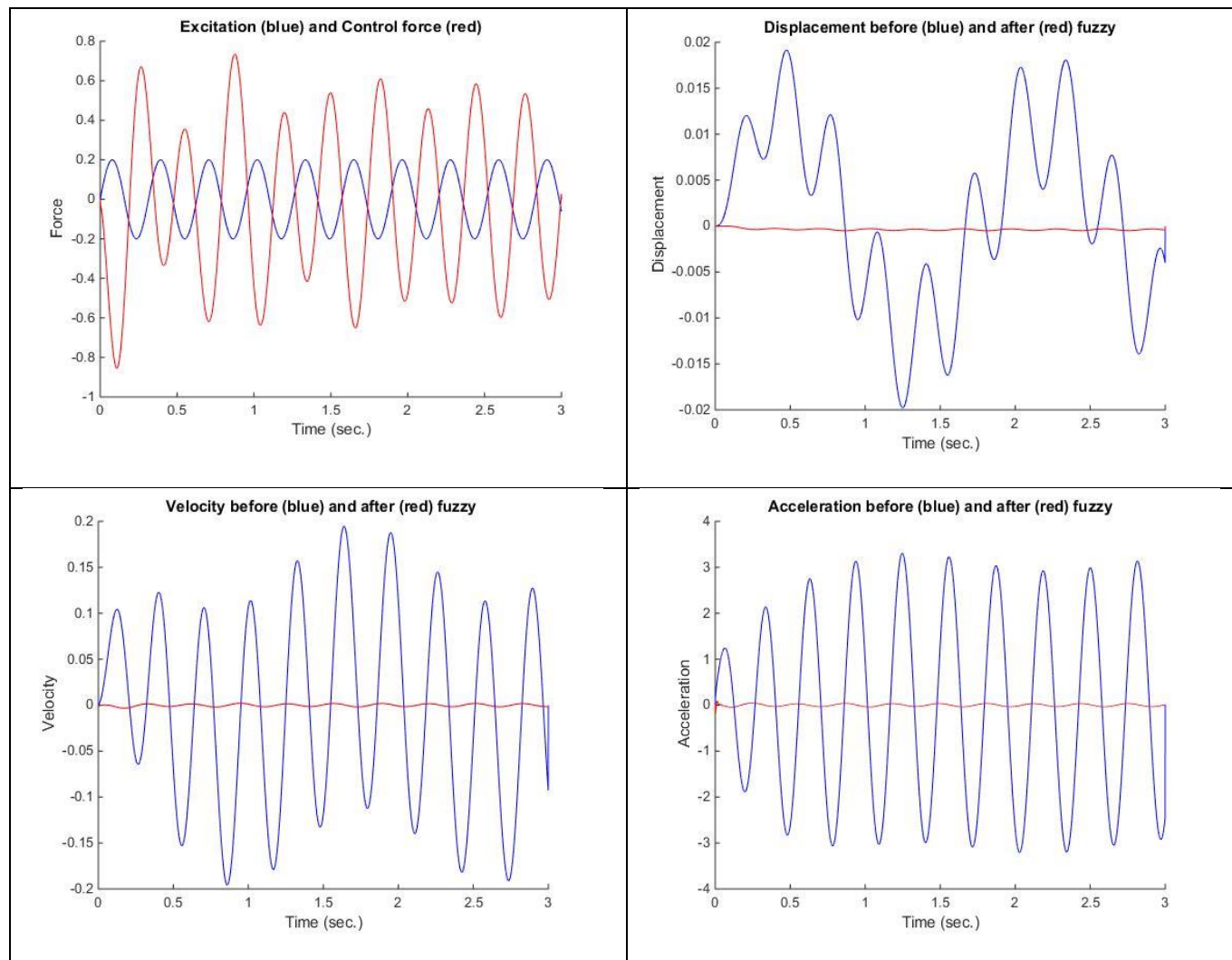


Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s²
Πριν τον έλεγχο	0,01822	0,1668	2,681
Μετά τον έλεγχο	0,0004497	0,00312	0,1048
Μεταβολή	97.5%	98,1%	96,1%

3^η Προσομοίωση

Φορτίο σε πέντε θέσεις, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: -0.08, Ω: 20, Πλάτος διέγερσης: 1



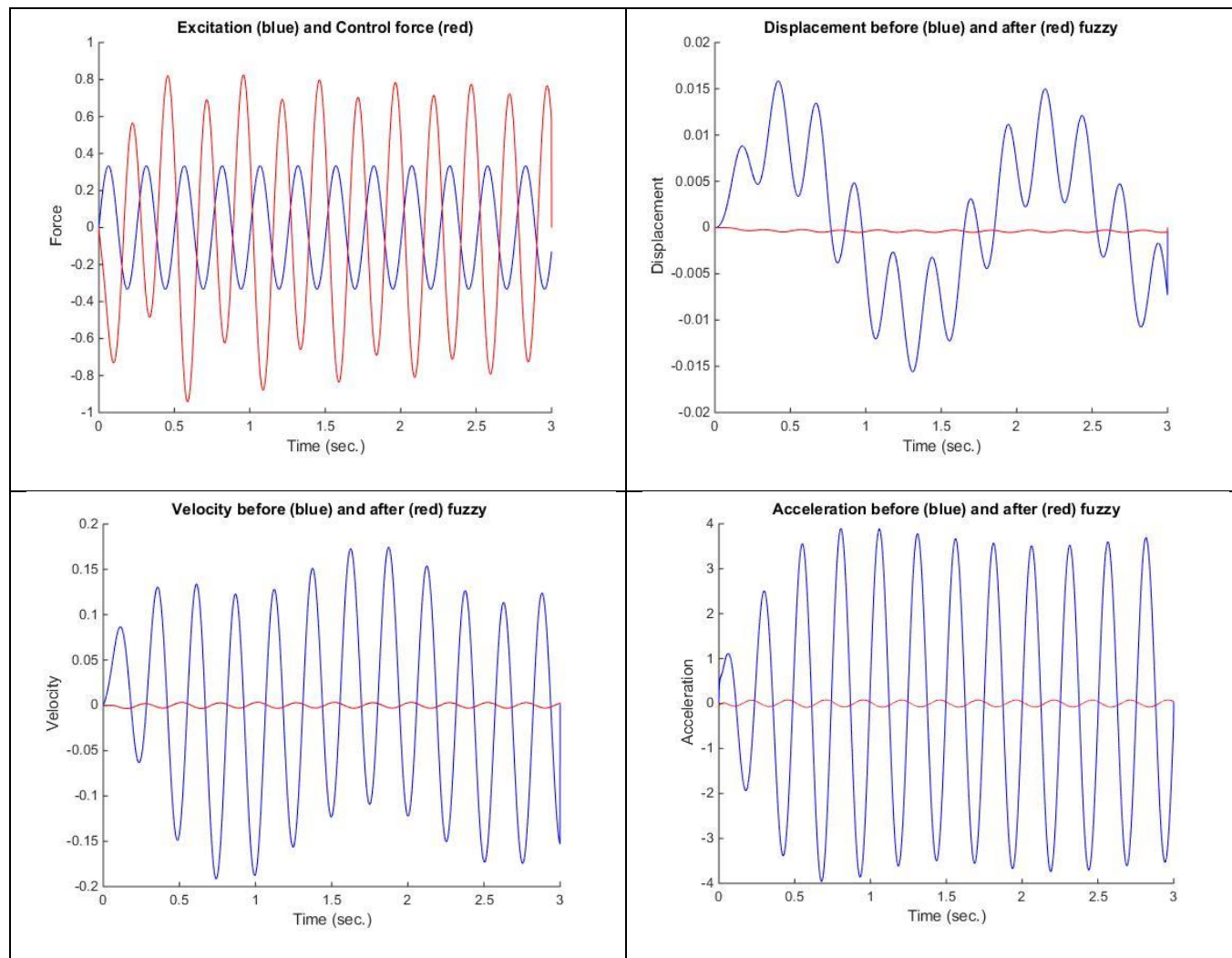
Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s ²
Πριν τον έλεγχο	0,01978	0,1957	3,307
Μετά τον έλεγχο	0,0003767	0,003276	0,1856
Μεταβολή	98.1%	98,3%	94,3%

Σημείωση: Προτιμούμε την εκδοχή με τα τρία φορτία. Η πρώτη εκδοχή, αν και δίνει μεταβολές κοντά στο 100% σε όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη, κρίνεται ως μη ρεαλιστική για το μοντέλο της πλάκας

4^η Προσομοίωση

Φορτίο σε τρεις θέσεις, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: -0.08, Ω : 25, Πλάτος διέγερσης: 1



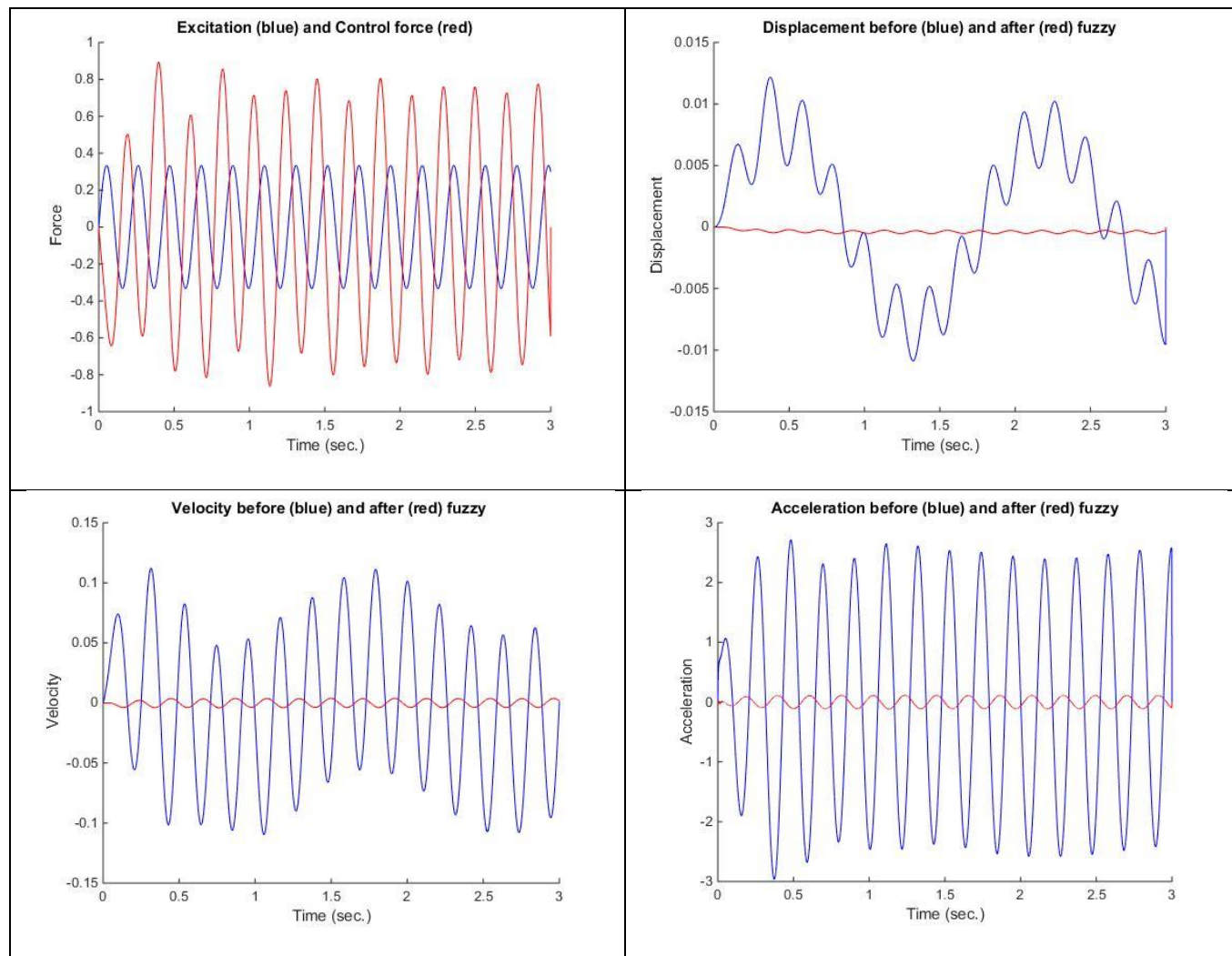
Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s ²
Πριν τον έλεγχο	0,01584	0,1914	3.965
Μετά τον έλεγχο	0,0005305	0,003549	0,08406
Μεταβολή	96.7%	98,1%	97,9%

Σημείωση: Για γωνιακή ταχύτητα $\Omega=25$ έχουμε ανεπαίσθητη μεταβολή στη μετατόπιση και την ταχύτητα, αλλά αρκετά καλύτερο αποτέλεσμα στην επιτάχυνση. Το σύστημα ανταποκρίνεται πολύ καλά

5^η Προσομοίωση

Φορτίο σε τρεις θέσεις, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: -0.08, Ω : 30, Πλάτος διέγερσης: 1



Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

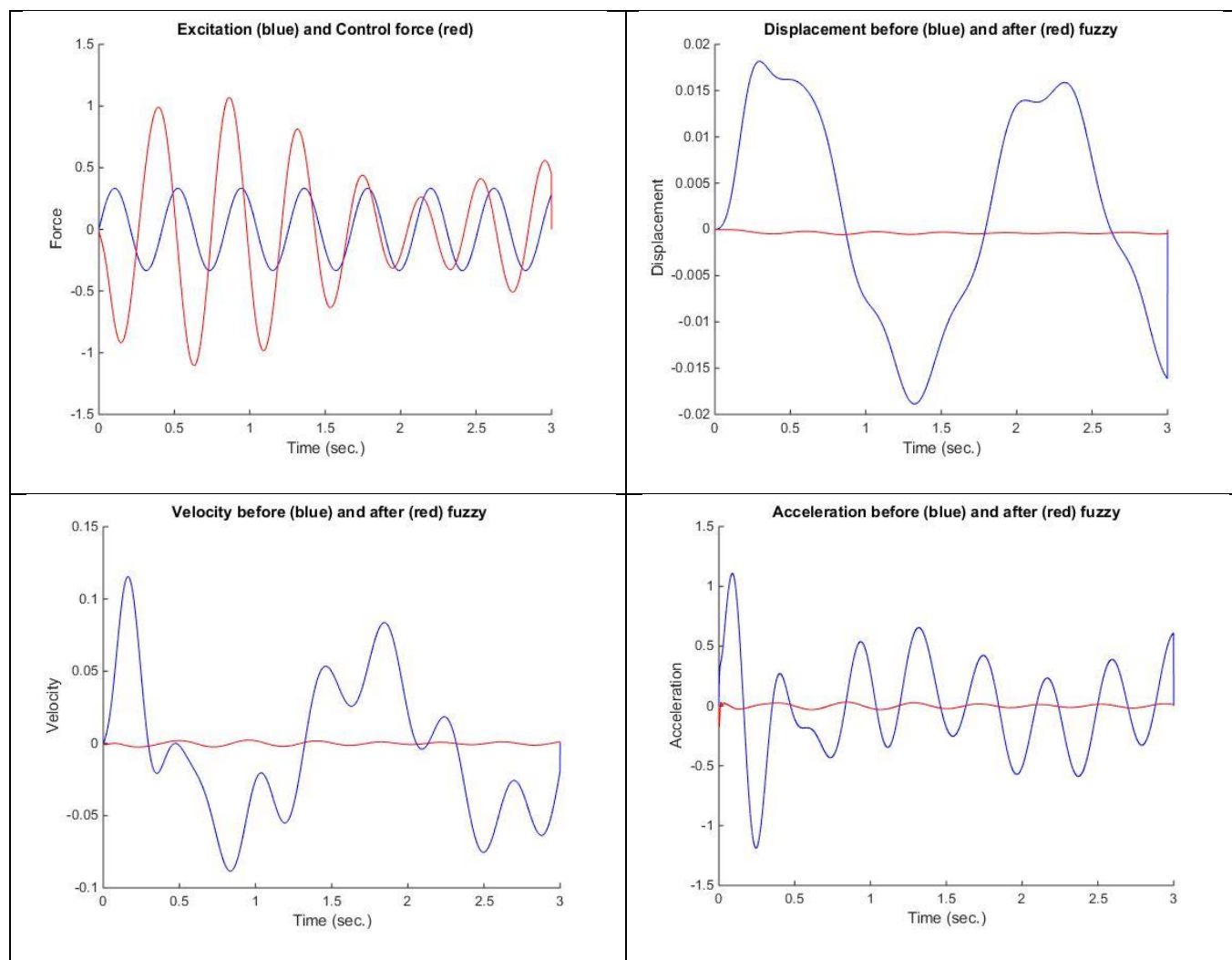
	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s ²
Πριν τον έλεγχο	0,01217	0,1122	2.966
Μετά τον έλεγχο	0,0005362	0,004026	0,1164
Μεταβολή	95.5%	96,4%	96,1%

Σημείωση: Για $\Omega=30$ οι επιδόσεις του συστήματος αρχίζουν να φθίνουν, ωστόσο η επιτάχυνση αποσβαίνεται ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό.

6^η Προσομοίωση

Φορτίο σε τρεις θέσεις, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: -0.08, Ω : 15, Πλάτος διέγερσης: 1

Γραφικές παραστάσεις:

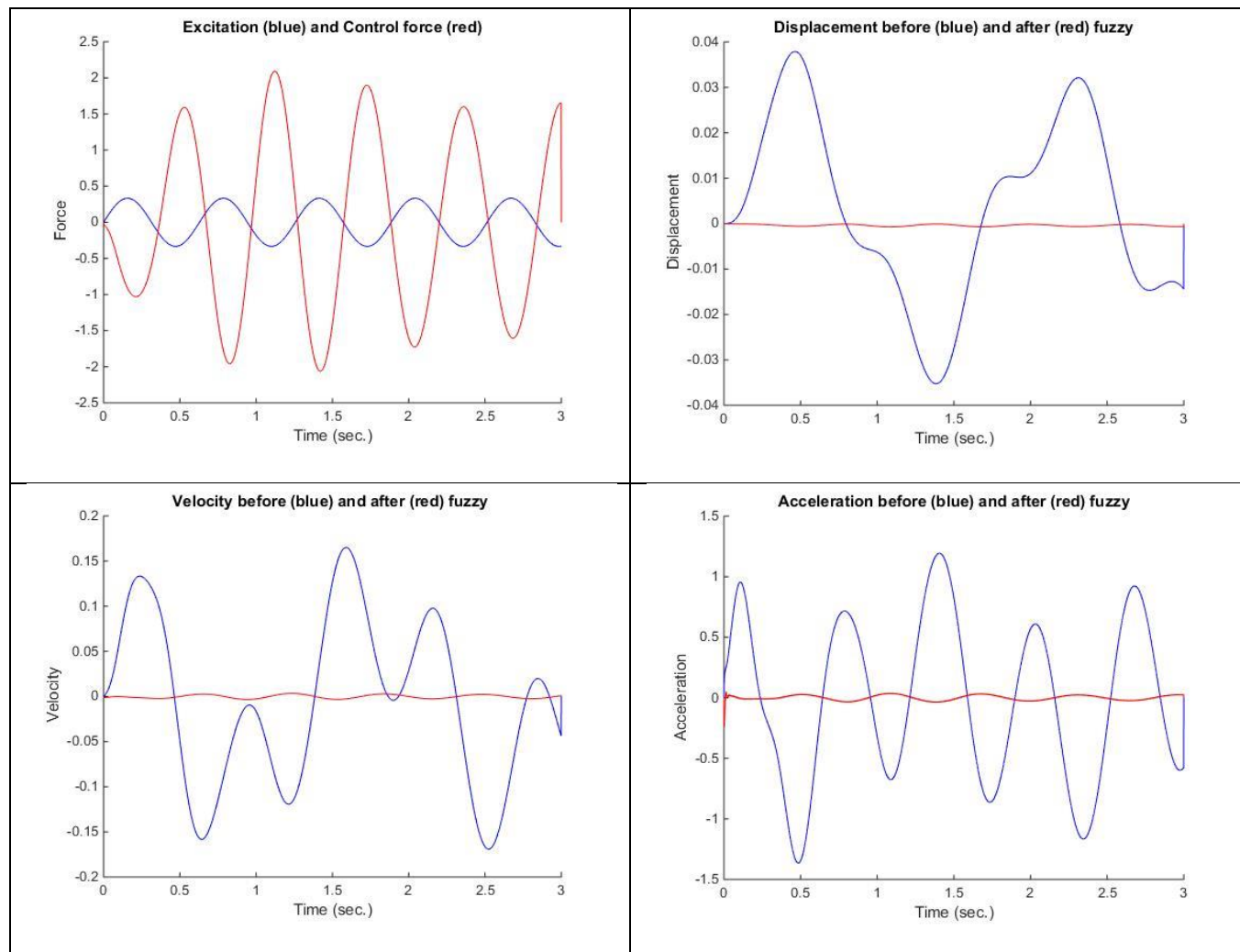


Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s²
Πριν τον έλεγχο	0,01887	0,1155	1.192
Μετά τον έλεγχο	0,0005633	0,002487	0,1715
Μεταβολή	97.0%	97,8%	85,6%

7^η Προσομοίωση

Φορτίο σε τρεις θέσεις, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: -0.08, Ω : 10, Πλάτος διέγερσης: 1



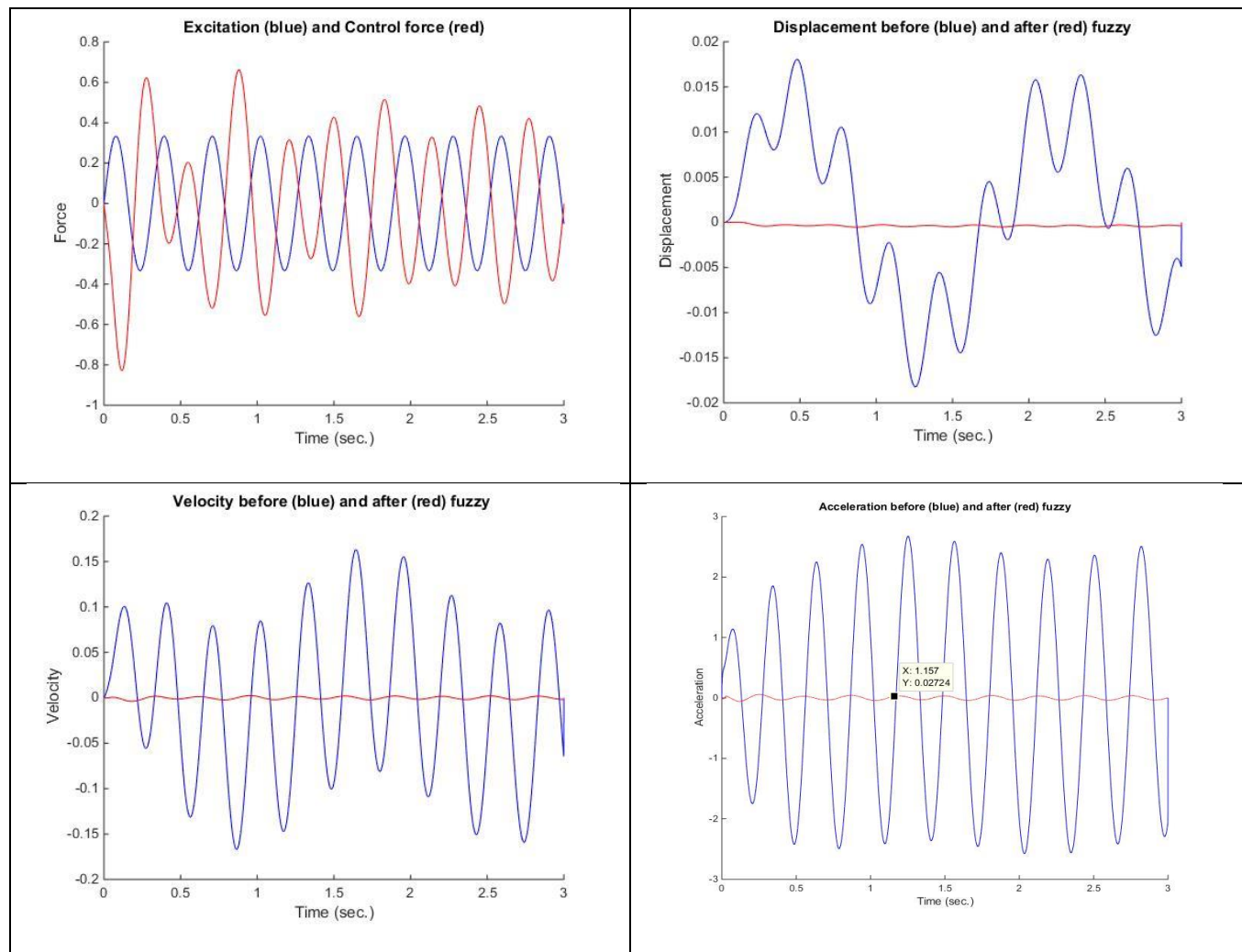
Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s ²
Πριν τον έλεγχο	0,03791	0,1692	1.368
Μετά τον έλεγχο	0,0007157	0,00337	0,2384
Μεταβολή	98.1%	98,0%	82,6%

Σημείωση: Όσο η γωνιακή ταχύτητα πέφτει, τείνουμε να παίρνουμε καλύτερες διορθώσεις ως προς τη μέγιστη τιμή μετατόπισης και ταχύτητας, η επιτάχυνση όμως διορθώνεται με εμφανώς χειρότερο τρόπο.

8^η Προσομοίωση

Φορτίο σε τρεις θέσεις, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: **-0.06**, Ω : 20, Πλάτος διέγερσης :1



Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

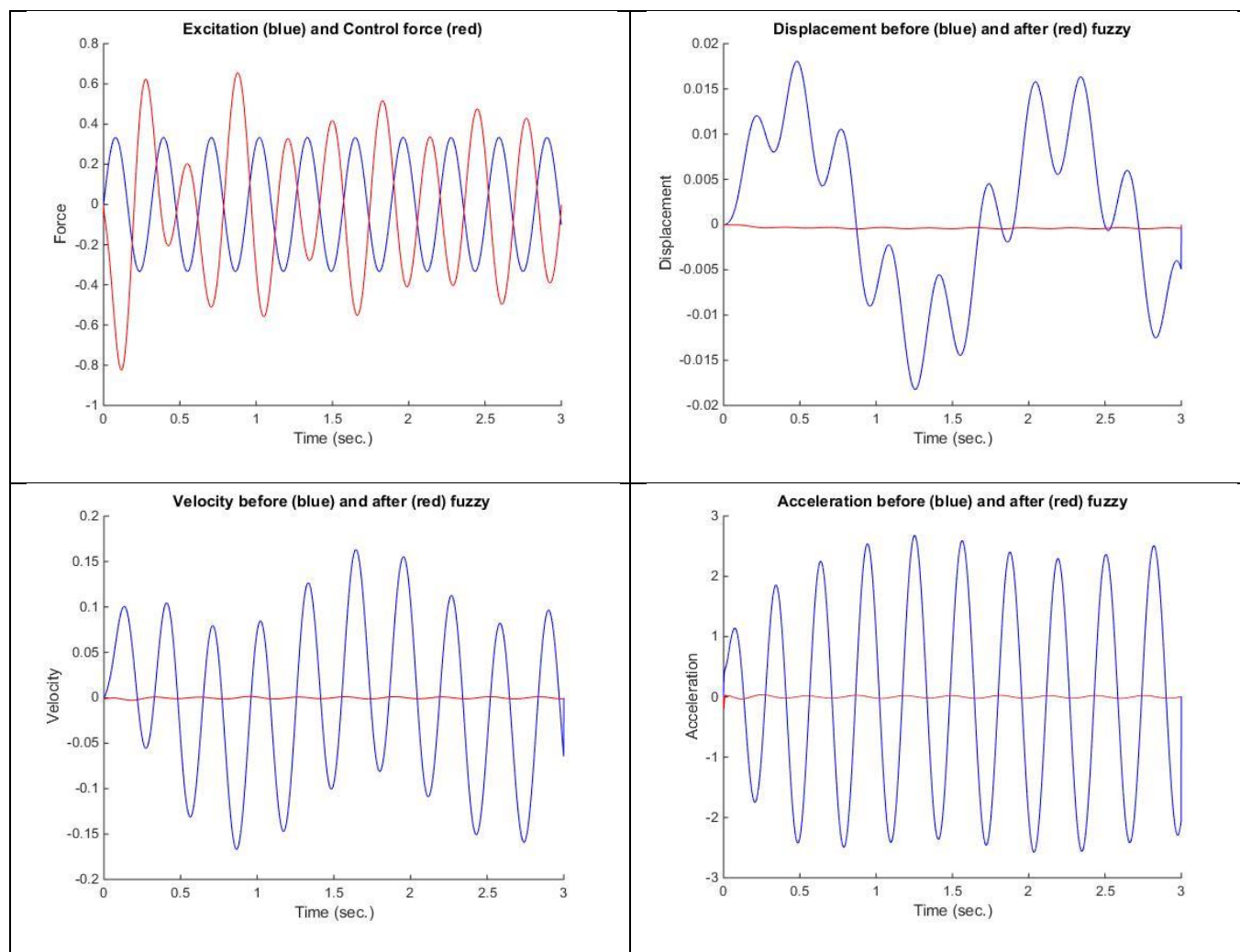
	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s²
Πριν τον έλεγχο	0,01822	0,1668	2.681
Μετά τον έλεγχο	0,0005357	0,003903	0,05992
Μεταβολή	97.1%	97,6%	97,7%

Σημείωση: Η βέλτιστη τιμή του πολλαπλασιαστή μας. Σχεδόν ίδια συμπεριφορά ως προς μετατόπιση και ταχύτητα. Καλύτερη ως προς την επιτάχυνση.

9^η Προσομοίωση

Φορτίο σε τρεις θέσεις, Πολλαπλασιαστής δύναμης ελέγχου: **-0.10**, Ω : 20, Πλάτος διέγερσης: 1

Γραφικές παραστάσεις:



Πίνακας μεταβολής των υπό εξέταση μεγεθών:

	Μετατόπιση (μέγιστο) m	Ταχύτητα (μέγιστο) m/s	Επιτάχυνση (μέγιστο) m/s²
Πριν τον έλεγχο	0,01822	0,1668	2.681
Μετά τον έλεγχο	0,0004783	0,002653	0,1848
Μεταβολή	97.4%	98,4%	93,1%

5. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, βλέπουμε ότι τις καλύτερες τιμές για τη βελτίωση των υπό εξέταση μεγεθών τις παίρνουμε στην πρώτη προσομοίωση, όπου όλες οι διορθώσεις είναι κοντά στο 100%. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε πλήρη εφαρμογή συνεγκατεστημένου ελέγχου, δηλαδή μετρήσεις και έλεγχο στο ίδιο σημείο της κατασκευής.

Προκειμένου να αποδείξουμε την ευρωστία του ελεγκτή που κατασκευάσαμε, δηλαδή την δυνατότητά του να λειτουργεί υπό διαφορετικές συνθήκες σε σχέση με αυτές για τις οποίες έχει εκπαιδευτεί, συνεχίσαμε τις δοκιμές και καταλήξαμε, μετά από εννέα προσομοιώσεις στις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών μας. Η ιδανική συνθήκη είναι το φορτίο και ο έλεγχος να ασκούνται σε τρεις θέσεις. Στην περίπτωση αυτή, είχαμε διόρθωση 97.1% όσον αφορά στη μετατόπιση, 97.6% όσον αφορά στην ταχύτητα και 97.7% όσον αφορά στην επιτάχυνση, που κρίνονται πολύ ικανοποιητικά.

Επίσης, τα αποτελέσματα πιστοποιούν την αρχική μας υπόθεση όπως αυτή διατυπώθηκε στο θεωρητικό σκέλος στην αρχή της εργασίας. Ότι δηλαδή τα νευρο-ασαφή συστήματα παρέχουν πολύ καλά αποτελέσματα ελέγχου, ενώ είναι και σχετικά εύκολα στη μοντελοποίησή τους. Ιδιαίτερα στον κατασκευαστικό κλάδο, όπου η επαναφορά ενός συστήματος στις αρχικές του συνθήκες ακινησίας, είναι κρίσιμο μέγεθος σχετικά με την ασφάλεια της κατασκευής, η χρήση της λογικής των νευρωνικών δικτύων μπορεί να μας δώσει εξαιρετικά αποτελέσματα. Άλλες χρήσιμες εφαρμογές περιλαμβάνουν το έλεγχο τροχιάς έξυπνων οχημάτων, τον έλεγχο ρομποτικών συσκευών, κλπ.

Βιβλιογραφία

- [1] Διπλωματική Εργασία: Προσομοίωση σύνθετων ευφυών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά.Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου, Ταϊρίδης Γεώργιος, 2009
- [2] Σημειώσεις Μαθήματος: Εισαγωγή στη Μηχατρονική, Σταυρουλάκης Γεώργιος, Χανιά, 2008
- [3] Διπλωματική Εργασία: Έλεγχος σύνθετων πιεζοηλεκτρικών πλακών με χρήση ασαφούς λογικής, Τσαγκάρης Αντώνιος, Χανιά, 2013
- [4] Διπλωματική Εργασία: Μελέτη για την απόδοση ενός ασαφούς συστήματος ελέγχου για την μείωση των ταλαντώσεων σε μηχανικές κατασκευές, ΣαλονικίδηςΣαλόνικος, Χανιά, 2012
- [5] Διπλωματική Εργασία: Νευροασαφής έλεγχος σε ευφυή ράβδο, Καταγάς Μιχαήλ, Χανιά, 2012
- [6] Ασαφή συστήματα, Θεωρία και εργαστηριακές ασκήσεις, Παπαδάκης Στέλιος & Αδαμίδης Παναγιώτης, Θεσσαλονίκη, 2004
- [7] Fuzzy modeling using generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm, R. Young, California, 1991
- [8] Artificial Neural Network Fuzzy Inference System (ANFIS) For Brain Tumor Detection, Minakshi Sharma, Dr Sourabh Mukharjee, 2012
- [9] Σημειώσεις Μαθήματος: Ευφυής έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές, Δρ Βολογιαννίδης Σταύρος, Σέρρες, 2014
- [10] Διδακτορική Διατριβή: Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση κατασκευών με ευφυή έλεγχο. Ταϊρίδης Γεώργιος, Χανιά, Ιούλιος 2016