



**Πολυτεχνείο Κρήτης**  
**Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και διοίκησης**

*«Συστήματα νευρο-ασαφούς ελέγχου»*

**Εμμανουήλ Κ. Τζαβιδας**

Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

" Copyright © Τζαβίδας Εμμανουήλ, 2016 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

## Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε με την υποστήριξη ενός αριθμού ανθρώπων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη χωρίς τη συνδρομή του οποίου, θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Ταιρίδη, διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τις πολύτιμες και καθοριστικές συμβουλές του καθώς και για τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε στις συναντήσεις μας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου που με βοήθησαν και με στήριξαν σε όλα τα στάδια της φοιτητικής μου καριέρας καθώς και στην διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εισαγωγή στα ασαφή, νευρο-ασαφή και νευρωνικά συστήματα και δίκτυα καθώς επίσης και η παρουσίαση των εργαλείων και μέσων που χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκπαίδευση αυτών των αλγορίθμων και την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται εφαρμογές τουANFIS σε μηχανικές κατασκευές(πλάκες,δοκοί) με σκοπό την ισορροπία ή τον έλεγχο ταλαντώσεων. Η προσομοίωση τους έγινε στο περιβάλλον της MATLAB με τη βοήθεια του Simulink. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα οφέλη από τη χρήση του ANFIS είναι πολλά, καθώς ο εκπαιδευμένος ελεγκτής είναι απλούστερος από άλλους, εξαλείφει την περίπλοκη μαθηματική διαδικασία μοντελοποίησης και είναι ισχυρότερος σε πιθανές μεταβολές.

## **Abstract**

The purpose of this work is the introduction to fuzzy, neuro-fuzzy and neural systems and networks as well as the presentation of tools that are widely used in order to train these algorithms and thus to achieve satisfactory results. Subsequently, ANFIS applications of mechanical structures (plates, beams) are illustrated. The purpose of ANFIS in those applications is the application of active vibration control. The simulation of the models is done within the MATLAB environment using Simulink. The results show the benefits of ANFIS, as it is simpler to use than other controllers, eliminates the complicated mathematical modeling process and is stronger in possible changes.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	8
2. Ασαφή Συστήματα.....	9
2.1 Εισαγωγή στη Ασαφή Λογική [1].....	9
2.2 Εισαγωγή στα Ασαφή Συστήματα [2].....	10
2.3 Η έννοια της Συνάρτησης Συμμετοχής [3].....	11
2.4 Αποασαφοποίηση [4] .....	13
3. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.....	15
4. Νευρο-ασαφή συστήματα [6] .....	17
4.1 Προσαρμοστικό Νευροασαφές Σύστημα Συνεπαγωγής - ANFIS[7].....	17
4.2 Περιορισμοί του ANFIS στην εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του Matlab .....	20
4.3 Ο αλγόριθμος της οπισθοδιάδοσης σφάλματος (backpropagation) .....	21
5. Εφαρμογές.....	22
5.1 Ανάστροφο Εκκρεμές.....	22
5.1.1 Εισαγωγή .....	22
5.1.2 ANFIS.....	25
5.1.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	27
5.1.4 Ελεγκτής ANFIS και συμβατικός ελεγκτής PID .....	28
5.2 Σχεδιασμός ελεγκτή ANFIS για τον ενεργό έλεγχο κραδασμών προβόλου πλάκας με πιεζοηλεκτρικά αυτοκόλλητα ως αισθητήρες/ενεργοποιητές [11] .....	31
5.2.1 Εισαγωγή .....	31
5.2.2 Μεθοδολογία .....	33
5.2.3 Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	34
5.2.5 Αποτελέσματα. ....	38
5.2.6 Συμπεράσματα .....	40
5.3 Νευροασαφές μοντέλο για την πρόβλεψη των δυναμικών χαρακτηριστικών των δοκών[12] .....	41
5.3.1 Εισαγωγή .....	41
5.3.2 Αναλυτικό Μοντέλο. ....	42
5.3.3 Νευρο-ασαφές Μοντέλο .....	44

5.3.4 Το στήσιμο και η δομή του πειράματος. ....	45
5.3.5 Μοντελοποίηση και αποτελέσματα. ....	48
5.3.6 Εκπαίδευση και Έλεγχος αποτελεσμάτων.....	50
5.3.7 Σύγκριση μεταξύ των Πειραματικών και Θεωρητικών Αποτελεσμάτων .....	50
5.4 Εφαρμογή του ANFIS για τον έλεγχο του ρυθμού ροής του νερού σε ένα μύλο επεξεργασίας ακατέργαστου μίγματος κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου.[13]. ..	56
5.4.1 Εισαγωγή . ....	56
5.4.2 Ανάπτυξη του ελεγκτή ANFIS .....	56
5.4.3 Πειραματικά Αποτελέσματα .....	59
5.4.4 Συμπεράσματα .....	60
5.5 Παρακολούθηση της κατάστασης εύρωστης βλάβης πρόβολου άξονα με τη χρήση Πειραματικού και νευρο-ασαφούς συστήματος συμπερασμού (ANFIS) [14] .....	61
5.5.1 Εισαγωγή . ....	61
5.5.2 Πειραματική Ανάλυση . ....	61
5.5.3 Πειραματικές Διαδικασίες και η αρχιτεκτονική τους.....	63
5.5.4 Ανάλυση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων . ....	63
5.5.5 Η δομή του ANFIS .....	67
5.5.6 Σχεδιασμός του Μοντέλου ANFIS για την Πρόβλεψη των ρωγμών.....	68
5.5.7 Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	68
5.5.8 Συμπεράσματα .....	69
6.Συμπεράσματα .....	71
7.Βιβλιογραφία .....	72

## 1. Εισαγωγή

Η ταχύτατη εξέλιξη της Υπολογιστικής Νοημοσύνης και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου έχει άμεση σχέση με την αύξηση της πολυπλοκότητας και την ανάγκη για πετυχημένο έλεγχο. Η αρχή έγινε το 1965, από τον LotfiZadeh, καθηγητή αυτομάτου ελέγχου στο UC Bercley, όπου θεμελίωσε τη θεωρία των ασαφών συνόλων ως ένα μέσο αντιμετώπισης προβλημάτων αλληλεπίδρασης ανθρώπου και μηχανής.

Η ασαφής λογική είναι ένα από τα τρία πεδία της Υπολογιστικής Νοημοσύνης. Τα υπόλοιπα δύο είναι τα νευρωνικά δίκτυα και οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, τα οποία εμφανίστηκαν μετέπειτα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθούν υβριδικά συστήματα όπως τα προσαρμοστικά νευρο-ασαφή, τα οποία συνδυάζουν τις δυνατότητες αυτών των πεδίων και εξαλείφονται τα ελαττώματά τους, όπως για παράδειγμα η έλλειψη ικανότητας μάθησης των ασαφών συστημάτων.

Ο στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εισαγωγή στην ασαφή λογική, στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και ιδιαίτερα στα προσαρμοστικά νευρο-ασαφή συστήματα (ANFIS). Παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά τους, τα προτερήματα και κάποια ελαττώματά τους καθώς και διάφορες μέθοδοι εκπαίδευσης τους που αποσκοπούν σε πιο ακριβή αποτελέσματα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται εφαρμογές στον τομέα της μηχανικής, καθώς παρότι η χρήση του ANFIS είναι ευρέως διαδεδομένη σε πολλούς τομείς όπως τα οικονομικά και η ιατρική, η απόδοση του στον συγκεκριμένο τομέα είναι εξαιρετική.



## 2. Ασαφή Συστήματα

### 2.1 Εισαγωγή στη Ασαφή Λογική [1]

Η ασαφής λογική έχει ως στόχο να διαμορφώσει ένα λογικό συλλογισμό με αόριστες ή ανακριβείς δηλώσεις. Ορίζει ότι η τιμή αληθείας (η οποία, σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται σε ένα βαθμό αλήθειας) μιας λογική σύνθετη πρόταση, όπως «ο Γιώργος είναι ψηλός και ο Στέλιος είναι πλούσιος», όπου καθορίζεται από την τιμή αλήθειας των συστατικών του. Η ασαφής λογική προέκυψε στο πλαίσιο της θεωρίας των ασαφών συνόλων, που θεσπίστηκε από το Zadeh (1965). Ένα ασαφές σύνολο αποδίδει ένα βαθμό συμμετοχής, συνήθως έναν πραγματικό αριθμό από το διάστημα  $[0,1]$   $[0,1]$ . Το πρότυπο σύνολο τιμών αλήθειας είναι  $[0,1]$   $[0,1]$ , όπου το 00 αντιπροσωπεύει "εντελώς ψευδείς", το 11 αντιπροσωπεύει "εντελώς αλήθεια», και οι άλλοι αριθμοί αναφέρονται σε μερική αλήθεια, δηλαδή, τους ενδιάμεσους βαθμούς αλήθειας.

Με βάση τους λογικούς κανόνες, εάν είναι γνωστό ένα μόνο μέρος από κάποια δεδομένα ή από κάποιο μέρος της γνώσης, τότε νέα γνώση μπορεί να εξαχθεί μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται λογική εξαγωγή συμπερασμάτων. Η βασική μορφή της είναι η εξής:

Δεδομένα: Το  $x$  είναι μέρος του συνόλου  $X$  και το  $y$  είναι μέρος του συνόλου  $Y$ .

Κανόνας: Αν το  $x$  είναι μέρος του συνόλου  $X$  και το  $y$  είναι μέρος του συνόλου  $Y$ , τότε το  $z$  είναι μέρος του συνόλου  $Z$ .

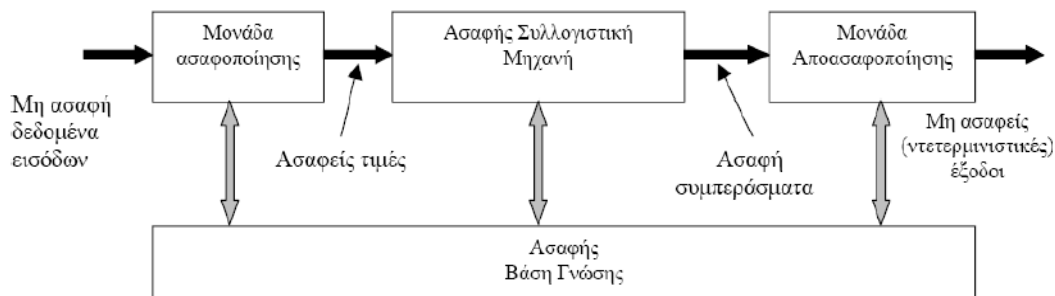
Συμπέρασμα/νέα γνώση: Το  $z$  είναι μέρος του συνόλου  $Z$ .

Σε πολλές περιπτώσεις όμως η λογική εξαγωγή συμπερασμάτων δε μπορεί να βοηθήσει σε σωστά συμπεράσματα αφού τα δεδομένα εκφράζονται με ασαφείς όρους, όπως π.χ. "το  $x$  είναι σχεδόν  $X$ " ή "το  $y$  είναι λίγο  $Y$ ". Αν όμως τα σύνολα  $X$ ,  $Y$  και  $Z$  είναι ασαφή, η ασαφής λογική εκφράζει την ασάφεια και προσφέρει ένα τρόπο εξαγωγής συμπερασμάτων από δεδομένα τα οποία είναι ανακριβή. Συγκεκριμένα αν είναι γνωστό το "πόσο πολύ" το  $x$  είναι  $X$  και το  $y$  είναι  $Y$ , τότε μπορεί να συναχθεί "πόσο πολύ" το  $z$  είναι  $Z$ , όπως ακριβώς μπορεί να υπολογίσει ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται σε διάφορες επιστημονικές και τεχνικές εφαρμογές, γιατί είναι εννοιολογικά απλή. Η ασαφής λογική σχεδιάστηκε ως μία καλύτερη μέθοδος για τη

διαλογή και τη διαχείριση των δεδομένων, αλλά έχει αποδειχθεί ότι είναι μια εξαιρετική επιλογή για πολλές εφαρμογές του συστήματος ελέγχου, δεδομένου ότι μιμείται τη λογική του ανθρώπου εγκεφάλου. Χρησιμοποιεί μια ασαφή, αλλά πολύ περιγραφική γλώσσα για να ασχοληθεί με τα δεδομένα εισόδου περισσότερο σαν ένα ανθρώπινο χειριστή, είναι πολύ ισχυρή και συγχωρεί ως ένα βαθμό πιθανά λάθη του χειριστή.

## 2.2 Εισαγωγή στα Ασαφή Συστήματα[2]

Ένα ασαφές σύστημα ελέγχου είναι ένα σύστημα ελέγχου που βασίζεται στην ασαφή λογική. Ένα τέτοιο σύστημα περιέχει επιμέρους συστήματα απόφασης και ελέγχου όπου χρησιμοποιούνται σε αβέβαιο περιβάλλον και μοντελοποιούνται με ασαφείς μεταβλητές. Οι μεταβλητές που εισάγονται σε ένα ασαφές σύστημα ελέγχου έχουν χαρτογραφηθεί από σύνολα συναρτήσεων συμμετοχής παρόμοια με το συγκεκριμένο, τα ασαφή σύνολα.



Εικόνα 1 : Απεικόνιση ενός Ασαφούς Συστήματος Ελέγχου

Ο σχεδιασμός του ασαφούς συστήματος ελέγχου βασίζεται σε εμπειρικές μεθόδους. Η γενική διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Καταγράφονται οι λειτουργικές προδιαγραφές των εισόδων και εξόδων του συστήματος.
- Τεκμηριώνονται τα ασαφή σύνολα για τις εισόδους.
- Τεκμηριώνεται το σύνολο των κανόνων.
- Καθορίζεται η μέθοδος ασαφοποίησης, όπου έχει ως στόχο να μετατρέψει τις αριθμητικές μεταβλητές εισόδου και εξόδου των κανόνων του συστήματος σε γλωσσικές μεταβλητές και να προσδιορίσει τις συναρτήσεις συμμετοχής.
- Ορίζεται η μονάδα αποασαφοποίησης, η οποία μετασχηματίζει τα ασαφή

συμπεράσματα / αποφάσεις σε πραγματικούς αριθμούς με σκοπό τη μετάδοση της δράσης ελέγχου στο σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα ασαφοποίησης (ασαφοποιητής) εκτελεί τις παρακάτω εργασίες:

- Δέχεται τις μη ασαφείς τιμές των εισόδων του συστήματος
- Απεικονίζει τις περιοχές μεταβολής των τιμών εισόδου σε κατάλληλα υπερσύνολα αναφοράς
- Ασαφοποιεί τις τιμές των εισόδων, αφού τις μετατρέπει σε ασαφή σύνολα.

Η μονάδα αποασαφοποίησης εκτελεί τις εξής δύο εργασίες:

- Παράγει ένα ποσοτικό αποτέλεσμα
- Αποασαφοποιεί τα αποτελέσματα που δίνει η ασαφής συλλογιστική μηχανή, δηλαδή τα μετατρέπει σε καθορισμένη μορφή για περαιτέρω χρήση από επόμενα συστήματα και διεργασίες.

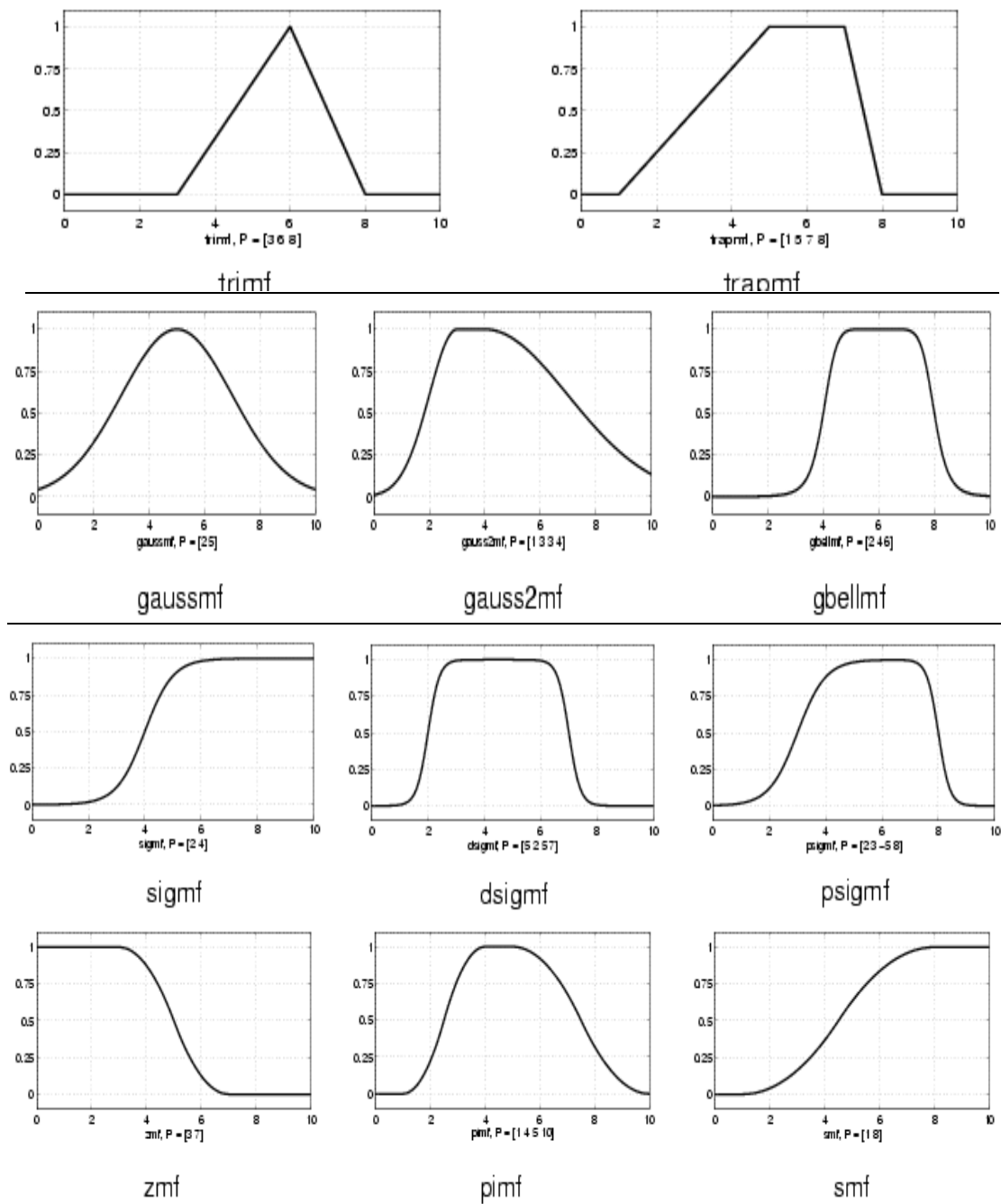
Στα ασαφή λογικά συστήματα, η ασαφής βάση γνώσης αντιπροσωπεύει τα γεγονότα των κανόνων και των γλωσσικών μεταβλητών που βασίζονται στη θεωρία ασαφών συνόλων έτσι ώστε τα συστήματα βάσης γνώσεων θα επιτρέψουν ένα προσεγγιστικό συλλογισμό.

Η ασαφής συλλογιστική μηχανή, η οποία είναι η βάση του ασαφούς συστήματος και περιλαμβάνει τη λογική με την οποία παράγονται οι αποφάσεις/αποτελέσματα.

### **2.3Η έννοια της Συνάρτησης Συμμετοχής[3]**

Η Συνάρτηση Συμμετοχής είναι μία λειτουργία που καθορίζει το βαθμό στον οποίο ένα δεδομένο εισόδου ανήκει σε ένα σύνολο και ορίζεται στο διάστημα  $[0,1]$ , αφού ποσοτικοποιεί το βαθμό συμμετοχής μιας μεταβλητής σε ένα γλωσσικό όρο. Οι συναρτήσεις συμμετοχής χρησιμοποιούνται στην ασαφοποίηση και αποασαφοποίηση με σκοπό τη χαρτογράφηση των μη ασαφών τιμών εισόδου σε ασαφείς γλωσσικούς όρους και αντίστροφα. Ο βαθμός συμμετοχής είναι συνεχής και παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1, όπου το 0 σημαίνει καθόλου συμμετοχή της τιμής στον λεκτικό όρο και το 1 σημαίνει

πλήρη συμμετοχή.



Εικόνα 2 : Τυπικές μορφές συναρτήσεων συμμετοχής

Ο Zadeh πρότεινε μια σειρά από συναρτήσεις συμμετοχής που κατατάσσονται σε δύο ομάδες: εκείνες που αποτελούνται από ευθείες γραμμές (γραμμικές) και εκείνες που

αποτελούνται από καμπύλες (μη γραμμικές). Στην πράξη, οι γραμμικές είναι πιο δημοφιλείς καθώς οι μη γραμμικές ΣΣ αυξάνουν τη διάρκεια του υπολογιστικού χρόνου.

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν πέντε βασικά σχήματα συναρτήσεων συμμετοχής: Τριγωνική ΣΣ, Τραπεζοειδής ΣΣ, Gaussian ΣΣ, Γενικευμένη Καμπανοειδής ΣΣ και Σιγμοειδής ΣΣ. Ανεξάρτητα από το σχήμα, μία ενιαία ΣΣ μπορεί να καθορίσει μόνο ένα ασαφές σύνολο. Συνήθως, περισσότερες από μία ΣΣ χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν μια μόνο μεταβλητή εισόδου.

## 2.4 Αποασαφοποίηση[4]

Οι Συναρτήσεις Συμμετοχής ορίζονται από τις παραμέτρους τους. Για παράδειγμα, οι εντολές :

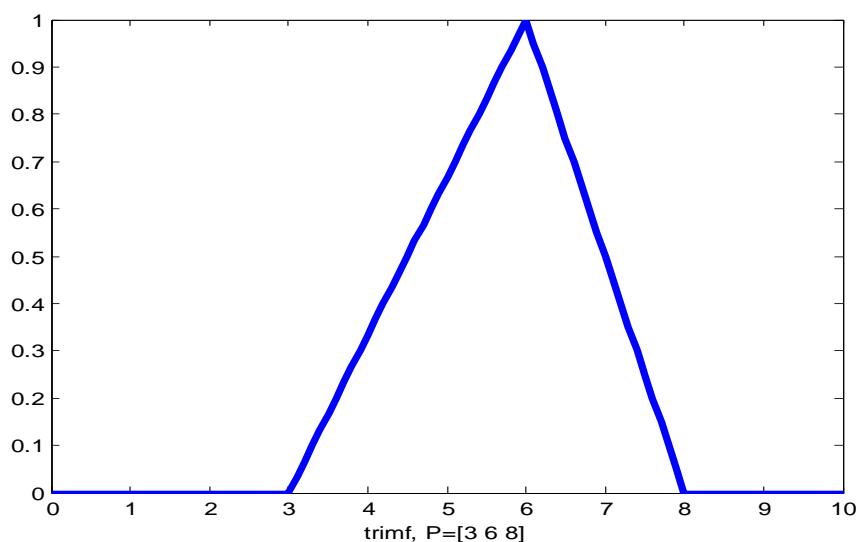
```
x=0:0.1:
```

```
xlabel('10;')
```

```
y=trimf(x,[3 6 8]);
```

```
plot(x,y)trimf, P=[3 6 8]'
```

σχηματίζουν και κάνουν την γραφική παράσταση μιας τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής με πεδίο ορισμού από 0 έως 10 και με κορυφές του τριγώνου στο 3, στο 6 και στο 8.



Εικόνα 3 : Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής

Ως αποασαφοποίηση ορίζεται η διαδικασία παραγωγής ενός ποσοτικού αποτελέσματος στη σαφή λογική. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι αποασαφοποίησης με σκοπό τη μετατροπή από τη γλωσσική μεταβλητή που μας δίνει ένα ασαφές σύστημα σαν έξοδο, σε μια τιμή. Ωστόσο, οι τρεις πιο διαδεδομένες είναι:

#### Μέθοδος Μέσου Μεγίστων (MOM)

Η μέθοδος του Μέσου Μεγίστων υπολογίζει το πιο πιθανό αποτέλεσμα, αγνοώντας το σχήμα της συνάρτησης συμμετοχής εξόδου. Αντί να υπολογίζει το μέσο όρο των βαθμών συμμετοχής των γλωσσικών όρων της εξόδου, επιλέγει την χαρακτηριστική τιμή της πιο έγκυρης εξόδου των γλωσσικών όρων.

#### Μέθοδος Κέντρου Βάρους (COG)

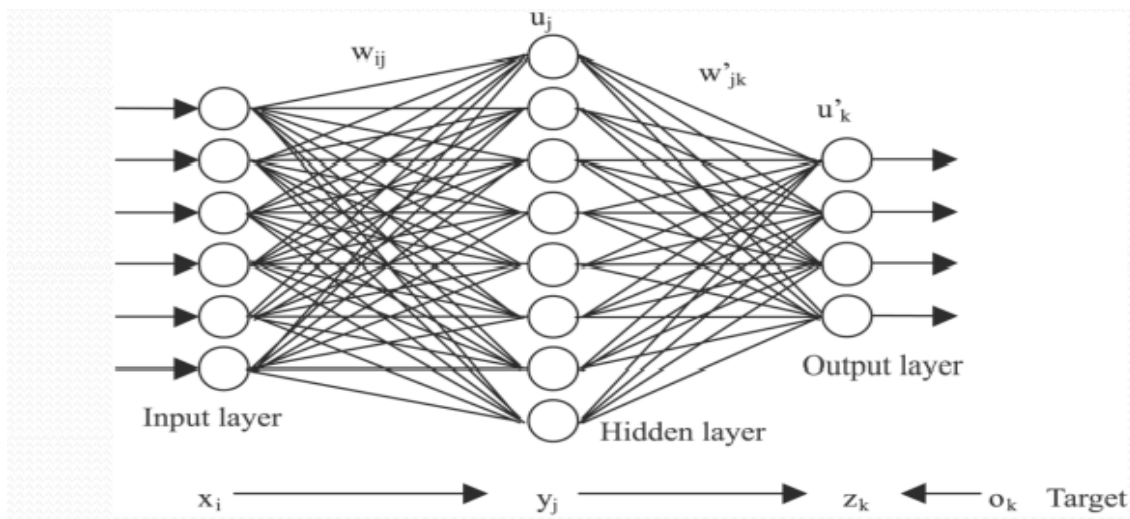
Σε αυτή τη μέθοδο, ο ασαφής ελεγκτής υπολογίζει πρώτα την περιοχή κάτω από τις διαβαθμισμένες συναρτήσεις συμμετοχής και εντός του εύρους της μεταβλητής εξόδου. Στη συνέχεια, ο ελεγκτής ασαφούς λογικής χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό του γεωμετρικού κέντρου της περιοχής.

#### Μέθοδος Ύψους (HM)

Σε αυτή τη μέθοδο, πρώτα υπολογίζεται το κέντρο βάρους κάθε συνάρτησης συμμετοχής στην έξοδο. Στη συνέχεια υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των επιμέρους κέντρων βάρους, σταθμισμένα σύμφωνα με το ύψος τους. Η απλότητά της Μεθόδου Ύψους την καθιστά δημοφιλή σε νευρο-ασαφή μοντέλα αφού μειώνει τους απαιτούμενους υπολογισμούς.

### 3. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ΤΝΔ) είναι ένα δίκτυο επεξεργασίας πληροφοριών που είναι εμπνευσμένο από τον τρόπο που επεξεργάζονται πληροφορίες τα βιολογικά νευρικά συστήματα, όπως ο εγκέφαλος. Το βασικό στοιχείο αυτού του δικτύου είναι η δομή του συστήματος επεξεργασίας πληροφοριών. Αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ιδιαίτερα διασυνδεδεμένων στοιχείων επεξεργασίας (νευρώνες) που εργάζονται από κοινού για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων. Τα ΤΝΔ, όπως και οι άνθρωποι, μαθαίνουν από παραδείγματα. Ένα ΤΝΔ έχει διαμορφωθεί για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως η ταξινόμηση δεδομένων, μέσα από μια διαδικασία μάθησης.



Εικόνα 4 : Σχηματική αναπαράσταση νευρωνικού δικτύου

Τα ΤΝΔ χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- 1) τα στατικά νευρωνικά δίκτυα που δεν περιέχουν στοιχεία με μνήμη αλλά μπορούν να έχουν ως εισόδους προηγούμενες τιμές των εισόδων και
- 2) τα δυναμικά νευρωνικά δίκτυα με στοιχεία μνήμης που είναι κατάλληλα για την προτυποποίηση μη-γραμμικών δυναμικών συστημάτων.

Ο προγραμματισμός ενός Νευρωνικού Δικτύου θα πρέπει να περάσει από μια περίοδο δοκιμής και λάθους, πριν καταλήξει σε ένα ικανοποιητικό σχεδιασμό καθώς είναι πολύπλοκα και είναι οι σημαντικότερες ανησυχίες των προγραμματιστών του συστήματος.

Ο σχεδιασμός ενός Νευρωνικού Δικτύου αποτελείται από:

- Κατανομή των νευρώνων σε διάφορα στρώματα.
- Επιλογή του τύπου των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων για διαφορετικά στρώματα, καθώς επίσης και μεταξύ των νευρώνων εντός ενός στρώματος.
- Καθορισμό του τρόπου που ένας νευρώνας δέχεται είσοδο και παράγει έξοδο.
- Προσδιορισμό της σύνδεσης εντός του δικτύου, επιτρέποντας το δίκτυο να μάθει τις κατάλληλες τιμές των βαρών σύνδεσης χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των Νευρωνικών Δικτύων είναι :

Προσαρμοστική μάθηση: Μια δυνατότητα να μάθουν πώς να κάνουν εργασίες με βάση τα στοιχεία που δίνονται για την εκπαίδευση τους.

Αυτόματη Οργάνωση: Ένα ΤΝΔ μπορεί να δημιουργήσει τη δική του οργάνωση και εκπροσώπηση των πληροφοριών που λαμβάνει κατά τη διάρκεια της εκμάθησής του.

Λειτουργία πραγματικού χρόνου: Οι υπολογισμοί μπορούν να διεξαχθούν παράλληλα, και οι ειδικές συσκευές υλικού που έχουν σχεδιαστεί επωφελούνται από αυτή τη δυνατότητα[5].



## 4. Νευρο-ασαφή συστήματα[6]

Τα νευρο-ασαφή συστήματα συνδυάζουν την τεχνολογία των νευρωνικών δικτύων και της ασαφούς λογικής. Ένα νευρο-ασαφές σύστημα είναι ένα ασαφές σύστημα που έχει εκπαιδευτεί από έναν αλγόριθμο μάθησης που προέρχεται από τη θεωρία των νευρωνικών δικτύων. Η ευρετική διαδικασία εκμάθησης λειτουργεί με τοπικές πληροφορίες και προκαλεί μόνο τοπικές τροποποιήσεις στο υποκείμενο ασαφές σύστημα. Η μαθησιακή διαδικασία δεν βασίζεται στη γνώση, αλλά γίνεται με γνώμονα τα δεδομένα. Ένα νευρο-ασαφές σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα (feedforward) ειδικό νευρωνικό δίκτυο τριών επιπέδων. Το πρώτο επίπεδο αντιπροσωπεύει μεταβλητές εισόδου, το μεσαίο (κρυφό) αντιπροσωπεύει ασαφείς κανόνες και το τρίτο αντιπροσωπεύει τις μεταβλητές εξόδου.

Τα ασαφή σύνολα κωδικοποιούνται ως (ασαφή) βάρη σύνδεσης. Μερικά νευρο-ασαφή μοντέλα χρησιμοποιούν περισσότερο από 3 επίπεδα και κωδικοποιούν ασαφή σύνολα ως συναρτήσεις ενεργοποίησης. Στην περίπτωση αυτή, είναι συνήθως δυνατόν να μετατραπούν σε μια αρχιτεκτονική 3 επιπέδων.

Η διαδικασία εκμάθησης του νευρο-ασαφούς συστήματος παίρνει τις σημασιολογικές ιδιότητες του υποκείμενου ασαφούς συστήματος υπόψη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη περιορισμών σχετικά με τις πιθανές τροποποιήσεις των παραμέτρων του συστήματος.

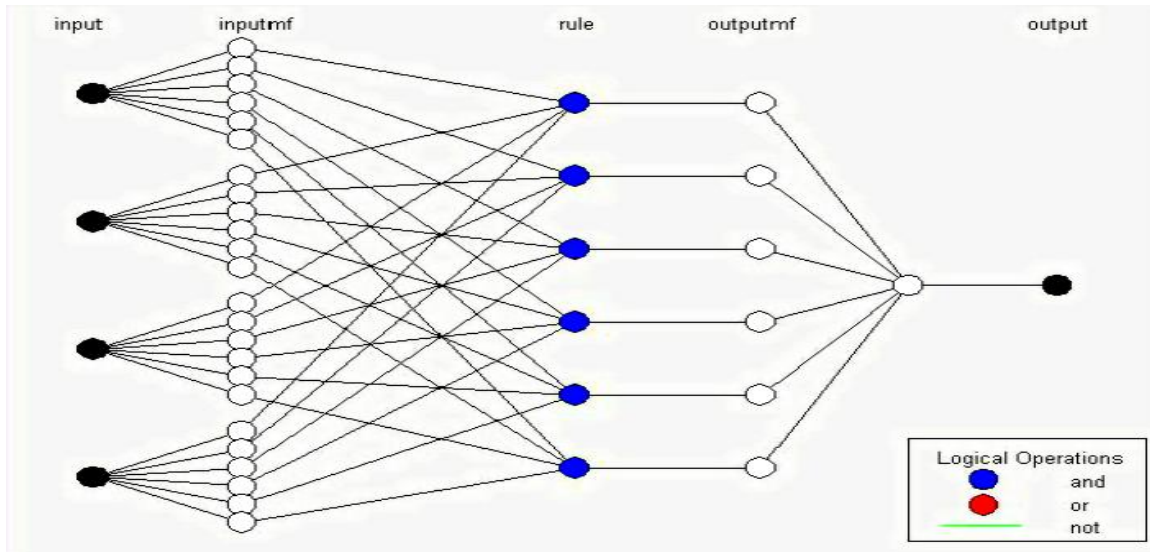
Ένα νευρο-ασαφές σύστημα προσεγγίζει μία  $n$ -διαστάσεων συνάρτηση που μερικώς δίνεται από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Οι ασαφείς κανόνες που κωδικοποιούνται εντός του συστήματος αντιπροσωπεύουν αόριστα δείγματα.

### 4.1 Προσαρμοστικό Νευροασαφές Σύστημα Συνεπαγωγής - ANFIS[7]

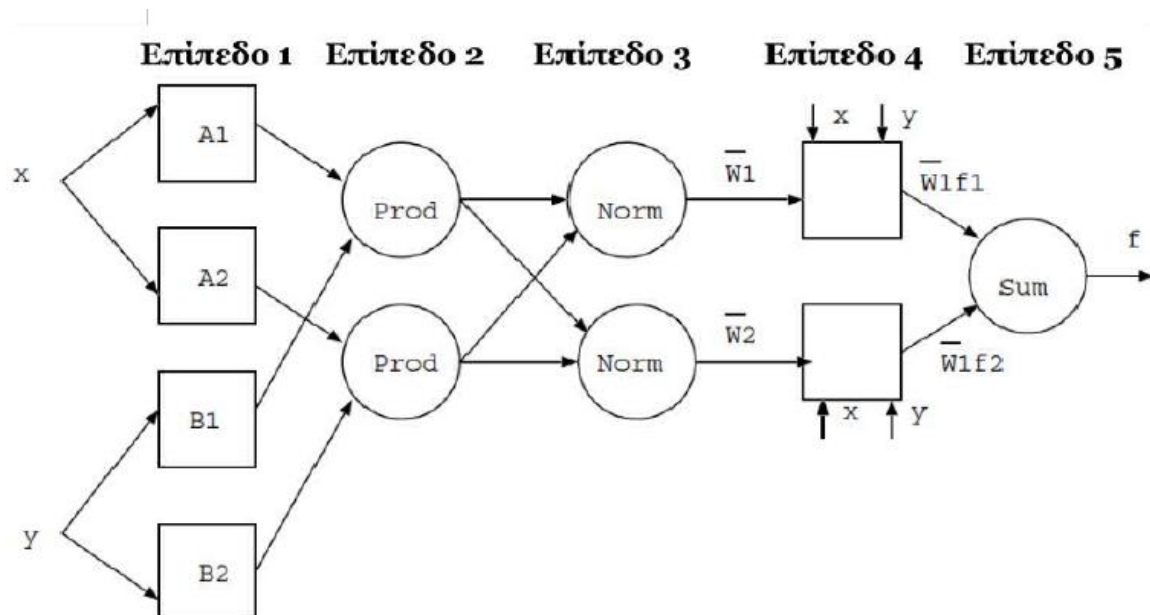
Το μοντέλο ANFIS είναι μια ευρέως εφαρμοσμένη κατηγορία υβριδικών νευρο-ασαφών ελεγκτών. Το ακρωνύμιο ANFIS προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System ή Adaptive Network-based Fuzzy Inference System.

Το προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμού είναι ένα ασαφές σύστημα συμπερασμού που υλοποιείται στο πλαίσιο ενός προσαρμοζόμενου νευρωνικού δικτύου. Χρησιμοποιώντας μια διαδικασία υβριδικής μάθησης, το ANFIS μπορεί να

κατασκευάσει μια λεπτομερή χαρτογράφηση εισόδου-εξόδου με βάση τόσο την ανθρώπινη γνώση ως ασαφείς εαν-τότε (if-then) κανόνες καθώς και κατά προσέγγιση συναρτήσεις συμμετοχής από τα προβλεπόμενα ζεύγη δεδομένων εισόδου-εξόδου για το νευρωνικό δίκτυο εκπαίδευσης.



Εικόνα 5 : Απεικόνιση των κόμβων ενός συστήματος ANFIS



Εικόνα 6 : Απεικόνιση των επιπέδων ενός συστήματος ANFIS

Περιγραφή αρχιτεκτονικής πενταεπίπεδης λειτουργίας του ANFIS:

Επίπεδο 1: Κάθε κόμβος  $i$  σε αυτό το επίπεδο είναι ένας προσαρμόσιμος κόμβος με μία συνάρτηση κόμβου

$$O_{i1}(x) = \mu_{A_i}(x)$$

όπου:  $x$  – η είσοδος στον κόμβο  $i$

$A_i$  - γλωσσική ταμπέλα (small, large, κλπ.) που σχετίζεται με τη συνάρτηση του κόμβου.

Με άλλα λόγια, το  $O_{i1}$  είναι ο βαθμός συμμετοχής του  $A_i$  και καθορίζει το βαθμό στον οποίο η είσοδος  $x$  ικανοποιεί την  $A_i$

Επίπεδο 2: Κάθε κόμβος σε αυτό το επίπεδο είναι ένας σταθερός (fixed) κόμβος  $\Pi$ , του οποίου η έξοδος είναι το γινόμενο όλων των εισερχόμενων σημάτων.

Επίπεδο 3: Κάθε κόμβος σε αυτό το επίπεδο είναι ένας σταθερός κόμβος  $N$ . Ο  $i$ -στός κόμβος υπολογίζει το λόγο του βαθμού ενεργοποίησης (firingstrength) του  $i$ -οστού κανόνα στο άθροισμα των βαθμών ενεργοποίησης όλων των κανόνων:

$$\bar{W} = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad i=1,2$$

Οι έξοδοι αυτού του επιπέδου ονομάζονται κοινωνικοποιημένοι βαθμοί ενεργοποίησης(normalized firing strengths)

Επίπεδο 4: Κάθε κόμβος  $i$  σε αυτό το επίπεδο είναι ένας προσαρμόσιμος κόμβος με μία συνάρτηση κόμβου

$$O_{4,i} = \bar{W}_i \cdot f_i = \bar{W}_i \cdot x + q_i \cdot y + r_i$$

όπου:

$W_i$  η έξοδος του επιπέδου  $i$

$\{p_i, q_i, r_i\}$  το σύνολο παραμέτρων.

Οι παράμετροι σε αυτό το επίπεδο αναφέρονται ως επακόλουθοι (consequent parameters).

Επίπεδο 5: Ο μοναδικός κόμβος σε αυτό το επίπεδο είναι ένας σταθερός κόμβος  $\Sigma$  που υπολογίζει τη συνολική έξοδο σαν το ολικό άθροισμα όλων των εισερχόμενων σημάτων-συναρτήσεων:

$$\text{overalloutput} = O_{5,i} = \sum \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum \bar{w}_i f_i}{\sum \bar{w}_i}$$

Εν συντομία, το πρώτο επίπεδο στη δομή του ANFIS εκτελεί έναν ασαφή σχηματισμό, το δεύτερο επίπεδο εκτελεί ασαφείς κανόνες. Το τρίτο επίπεδο εκτελεί την ομαλοποίηση των συναρτήσεων συμμετοχής και το τέταρτο επίπεδο είναι το συμπερασματικό μέρος των ασαφών κανόνων. Τέλος, το πέμπτο επίπεδο υπολογίζει την έξοδο του δικτύου.

Πρόκειται για ένα δικτύου με προσαρμοζόμενες παραμέτρους το οποίο λειτουργεί με σύστημα ασαφούς συλλογιστικής Sugeno.

## 4.2 Περιορισμοί του ANFIS στην εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του Matlab

- Πρέπει να είναι 1<sup>ης</sup> ή μηδενικής τάξης σύστημα Sugeno.
- Έχει μια έξοδο, που λαμβάνεται με τη μέθοδο αποσαφοποίησης σταθμισμένου μέσου.
- Όλες οι συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου πρέπει να είναι ίδιου τύπου, είτε γραμμικές είτε σταθερές.
- Δεν υπάρχει καμία κοινή χρήση κανόνα. Διαφορετικοί κανόνες δεν μπορούν να μοιραστούν την συνάρτηση συμμετοχής, δηλαδή ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής εξόδου πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των κανόνων
- Πρέπει να υπάρχουν βάρη σε κάθε κανόνα.
- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε συνάρτηση συμμετοχής, παρά μόνο προκαθορισμένες που επιβάλλουν οι ορισμοί του ANFIS.

Επιπλέον, το ANFIS δεν μπορεί να δεχθεί όλες τις επιλογές προσαρμογής που το βασικό ασαφές σύστημα συμπερασμού επιτρέπει. Δηλαδή, δεν μπορούν να δημιουργηθούν συναρτήσεις συμμετοχής και λειτουργίες αποασαφοποίησης. Θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν αυτές που παρέχονται. Παρουσιάζεται σφάλμα αν η δομή του FIS δεν συμμορφώνεται με αυτούς τους περιορισμούς[8].

#### 4.30 αλγόριθμος της οπισθοδιάδοσης σφάλματος (backpropagation)

Η προς τα πίσω διάδοση σφάλματος ή backpropagation είναι μια μέθοδος εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Θεωρείται μία από τις απλούστερες και πιο γενικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εποπτευόμενη εκπαίδευση των πολυεπίπεδων νευρωνικών δικτύων[9]. Μπορεί να διαιρεθεί σε δύο βήματα: τροφοδότηση προς τα εμπρός και όπισθεν διάδοσης. Οι λειτουργίες της μεθόδου μπορούν να χωριστούν σε 2 στάδια:

Στο στάδιο τροφοδότησης προς τα εμπρός (feedforward), ένα πρότυπο εισόδου εφαρμόζεται στο επίπεδο εισόδου και η επίδρασή του διαδίδεται από επίπεδο σε επίπεδο μέσω του δικτύου μέχρι να δημιουργηθεί μια έξοδος. Η πραγματική τιμή εξόδου του δικτύου στη συνέχεια συγκρίνεται με την αναμενόμενη τιμή εξόδου και ένα σήμα σφάλματος υπολογίζεται για κάθε ένα από τους κόμβους εξόδου. Δεδομένου ότι όλοι οι κρυφοί κόμβοι έχουν συμβάλει στα σφάλματα που εμφανίζονται στο επίπεδο της εξόδου, τα σήματα σφάλματος εξόδου μεταδίδονται προς τα πίσω από το στρώμα εξόδου για κάθε κόμβο στο κρυφό στρώμα που συνέβαλαν αμέσως στο στρώμα εξόδου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται στη συνέχεια, από επίπεδο σε επίπεδο, έως ότου κάθε κόμβος στο δίκτυο έχει λάβει ένα σήμα σφάλματος που περιγράφει τη σχετική συμβολή του στο συνολικό σφάλμα. Μόλις έχει καθοριστεί το σήμα σφάλματος για κάθε κόμβο, τα σφάλματα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τους κόμβους για να ενημερώσουν τις τιμές για κάθε βάρος σύνδεσης έως ότου το δίκτυο συγκλίνει σε μια κατάσταση που επιτρέπει σε όλα τα πρότυπα εκπαίδευσης να κωδικοποιηθούν. Ο αλγόριθμος της όπισθεν διάδοσης αναζητά την ελάχιστη τιμή της συνάρτησης σφάλματος στο διάστημα βάρους χρησιμοποιώντας μια τεχνική που ονομάζεται ο κανόνας δέλτα ή κλίση καθόδου. Τα βάρη που ελαχιστοποιούν την συνάρτηση σφάλματος τότε θεωρείται ότι είναι μια λύση για το πρόβλημα της μάθησης. Η συμπεριφορά του δικτύου είναι ανάλογη με έναν άνθρωπο που του παρουσιάζεται ένα σύνολο δεδομένων και καλείται να τα κατατάξει σε προκαθορισμένες κατηγορίες. Όπως ένας άνθρωπος, θα καταλήξει σε «θεωρίες» για το πώς τα δείγματα ταιριάζουν στις κατηγορίες. Αυτά στη συνέχεια ελέγχονται σύμφωνα με τις σωστές εξόδους για να διαπιστωθεί πόσο ακριβείς είναι οι εικασίες του δικτύου.

## 5. Εφαρμογές

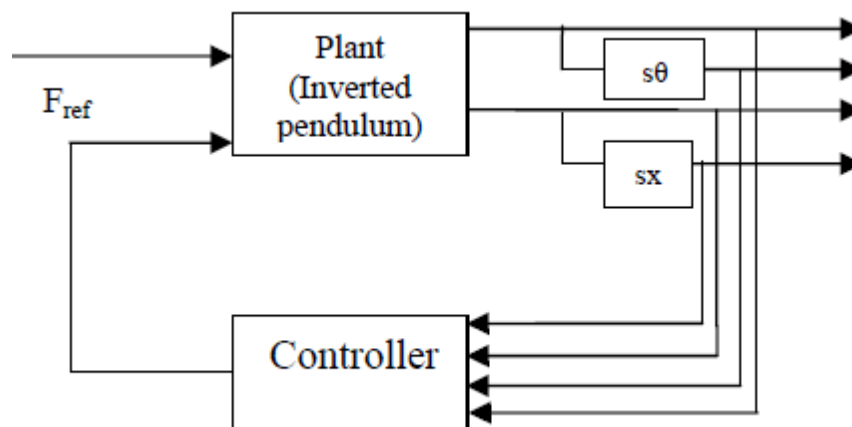
### 5.1 Ανάστροφο Εκκρεμές

Πρόκειται για ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα της εφαρμοσμένης μηχανικής. Η ράβδος που ισορροπεί πάνω στο καροτσάκι είναι ένα από τα πιο κλασσικά προβλήματα μη ευσταθούς και μη γραμμικού ελέγχου. Οι εξισώσεις και η συμπεριφορά του εκκρεμούς είναι παρόμοια με την απογείωση ενός πύραυλου[10].

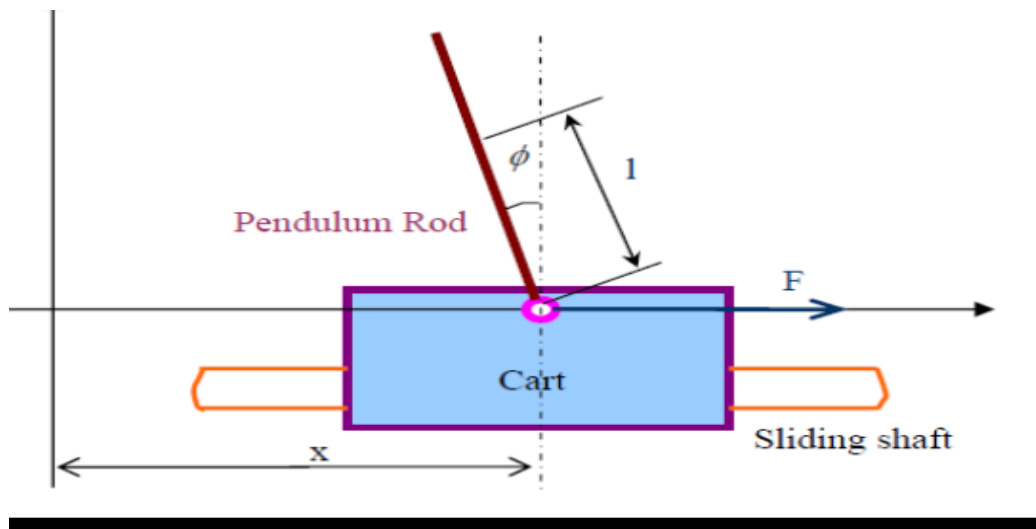
#### 5.1.1 Εισαγωγή

Για να ισορροπήσει η ράβδος, είναι απαραίτητο ένα σύστημα ελέγχου. Όπως είναι γνωστό, τα συστήματα ANFIS μοντελοποιούν την ανθρώπινη σκέψη-απόφαση βασιζόμενα σε κανόνες και είναι σε θέση να λύσουν περίπλοκα προβλήματα μη γραμμικού ελέγχου. Η εφαρμογή του ασαφούς ελεγκτή με τη χρήση των νευρωνικών δικτύων θα προσθέσει την ανθρώπινη νοημοσύνη στον ελεγκτή.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, αρχικά μοντελοποιείται το ανάστροφο εκκρεμές και το σύστημα ελέγχου. Έπειτα το σύστημα ελέγχου προσομοιώνεται στη Matlab(simulink) για βελτίωση της απόδοσης του, μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος του συστήματος, μειώνοντας τον αριθμό της βάσης κανόνων του. Αυτό ακολουθείται από την εφαρμογή και σύγκριση των ελεγκτών PID και ANFIS μέσω προσομοιώσεων.



Εικόνα 7 : Διάγραμμα του ανάστροφου εκκρεμούς με ανάδραση ελεγκτή ANFIS



Εικόνα 8 : Σύστημα ανάστροφου εκκρεμούς

Η εικόνα 7 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα ενός ανάστροφου εκκρεμούς με ελεγκτή ανάδρασης ANFIS. Η έξοδος της εγκατάστασης ( $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $x$ ,  $\dot{x}$ ) καταλήγει στον ελεγκτή ώστε να παράξει την απαιτούμενη δύναμη που χρειάζεται το εκκρεμές για να ισορροπήσει και ταυτόχρονα το καρότσι να διατηρήσει την αρχική του θέση. Το ανάστροφο εκκρεμές αποτελείται από ένα κινούμενο καρότσι και μία περιστρεφόμενη μπάρα που είναι ελεύθερη να ταλαντώνεται στο επίπεδο  $x$ - $y$ . Ωστόσο, το καρότσι περιορίζεται να κινείται μόνο στο επίπεδο  $x$ .

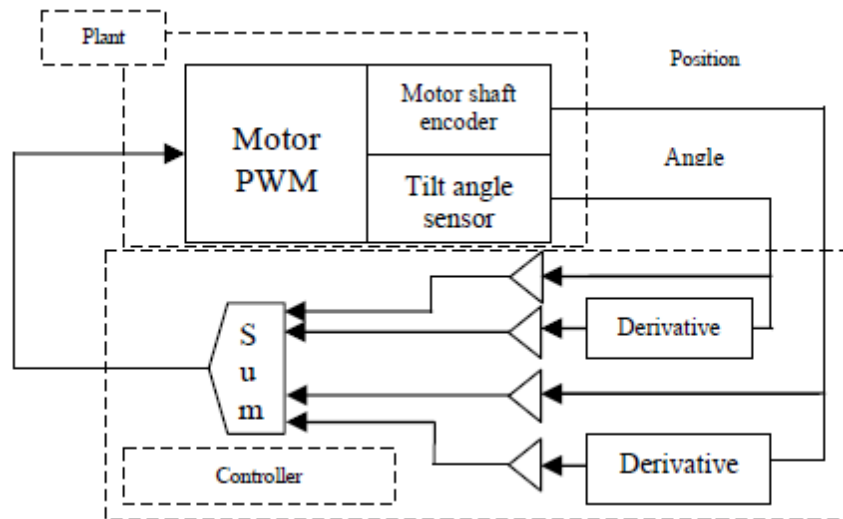
Η εικόνα 8,  $M$  είναι η μάζα του καλαθιού,  $m$  είναι η μάζα του εκκρεμούς,  $\beta$  ο συντελεστής τριβής,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $I$  είναι η ροπή αδράνειας του εκκρεμούς γύρω από τον στρόφω.

Από την εικόνα 8, το διάγραμμα ελευθέρου σώματος του εκκρεμούς, η καταστατική εξίσωση όσον αφορά τη δύναμη ελέγχου  $F$ , μπορεί να εκφραστεί :

$$(M+m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\dot{\theta}^2 \cos\theta - ml\dot{\theta}^2 \sin\theta = F(1)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl \sin\theta = -ml\ddot{x} \cos\theta(2)$$

Όπου  $l$  είναι η απόσταση από το κέντρο περιστροφής του άξονα της ράβδου προς το κέντρο μάζας της ράβδου. Το μοντέλο του ανεστραμμένου εκκρεμούς στη συνέχεια δημιουργήθηκε με τη χρήση του Simulink. Η είσοδος στην εγκατάσταση είναι η δύναμη διαταραχής που μεταδίδεται στο καρότσι. Η τρέχουσα γωνία και η γωνιακή ταχύτητα ανατροφοδοτείται στο σύστημα για τον υπολογισμό της γωνιακής επιτάχυνσης και της επιτάχυνσης του καροτσιού και του εκκρεμούς. Στη συνέχεια η γωνιακή επιτάχυνση και η επιτάχυνση ενσωματώνονται για να ληφθούν τα αποτελέσματα της γωνίας, γωνιακής επιτάχυνσης, θέσης και ταχύτητας. Συνολικά, ο αλγόριθμος εξισορρόπησης έχει 2 εξόδους από την εγκατάσταση και υπολογίζει τη δύναμη  $F$ , που απαιτείται για να ισορροπήσει το σύστημα.



Εικόνα 9 : Διάγραμμα μπλοκ ελέγχου

Η εικόνα 9 δείχνει πώς η  $F$  προσδιορίζεται από τη γωνία, γωνιακή ταχύτητα, τη θέση και την ταχύτητα που μετράται από τους αντίστοιχους αισθητήρες. Επίσης δείχνει ότι ο κωδικοποιητής άξονα του κινητήρα μετρά τη θέση του τροχού ενώ ο αισθητήρας γωνίας μετρά τη γωνία κλίσης του εκκρεμούς. Η γωνιακή ταχύτητα και η ταχύτητα του καροτσιού προέρχονται αντιστοίχως από τη μετρούμενη γωνία κλίσης και τη θέση του καλαθιού. Τα τέσσερα τρίγωνα C1, C2, C3 και C4 είναι οι κόμβοι που μεταφέρουν τα δεδομένα στα τέσσερα σημεία ανάδρασης. Στη συνέχεια αθροίζονται και τροφοδοτούνται

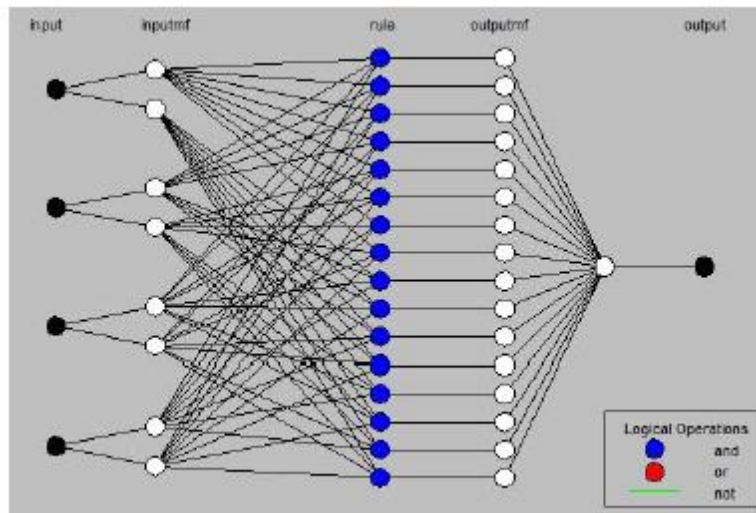


πίσω στο σύστημα ως η τάση του κινητήρα που οδηγεί το καρότσι. Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως :

$$F=(\theta * C1)+(\dot{\theta} * C2)+(x * C3)+(\dot{x} * C4) \quad (3)$$

### 5.1.2 ANFIS

Το ANFIS χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο υβριδικής μάθησης για τον προσδιορισμό των επακόλουθων παραμέτρων των συστημάτων ασαφούς συλλογιστικής τύπου Sugeno. Εδώ όλες οι εισόδους ANFIS χρησιμοποιούν 2 συναρτήσεις συμμετοχής. Χαρακτηριστικά αυτών των συναρτήσεων συμμετοχής είναι η δυνατότητα τους, μέσω κατάλληλης εκπαίδευσης από το ANFIS, να παρέχουν μια κατάλληλη δύναμη για την εξισορρόπηση του εκκρεμούς χρησιμοποιώντας το μοντέλο Takagi-Sugeno. Η εικόνα 10 δείχνει την δομή του ελεγκτή ANFIS.



Εικόνα 10 : Δομή του ANFIS ελεγκτή

Το ANFIS εκπαιδεύει το σύστημα για τη γωνία εισόδου, τη γωνιακή ταχύτητα, τη θέση και την ταχύτητα. Η δύναμη εξόδου υλοποιείται σε 5 επίπεδα. Εδώ για τη δημιουργία του FIS με τον επεξεργαστή ANFIS χρησιμοποιούμε δεδομένα εκπαίδευσης, τα οποία παίρνουμε από τη μέθοδο LQR. Έτσι, με τη βοήθεια νευρωνικών δικτύων έχουμε δημιουργήσει και εκπαιδεύσει ένα FIS, που ονομάζεται ANFIS .

#### A) Το πρώτο επίπεδο

Εδώ γίνεται η εκχώρηση των μεταβλητών εισόδου σε ασαφή σύνολα όπου οι καθαρές εισροές κατανέμονται σε ασαφείς τιμές.

#### B)Δεύτερο επίπεδο

Αυτό το επίπεδο ορίζει τη δημιουργημένη συνάρτηση συμμετοχής για κάθε είσοδο που δημιουργήθηκε στο πρώτο επίπεδο

#### Γ)Τρίτο επίπεδο

Οι κόμβοι σε αυτό το επίπεδο αντιπροσωπεύουν τους κανόνες που δημιουργούνται για διαφορετικούς συνδυασμούς και περιπτώσεις των εισροών. Αυτό το επίπεδο θα δώσει τις πληροφορίες που αφορούν ποιοι κανόνες είναι δυνατόν να τροφοδοτηθούν για διαφορετικές δυνατότητες των εισροών.

#### Δ)Τέταρτο επίπεδο

Αυτό το επίπεδο δημιουργεί εξόδους τύπου Sugeno-Takagi για κάθε προηγούμενη έξοδο.Εδώ μία συγκεκριμένη μη ασαφής τιμή δημιουργείται για κάθε κανόνα που τροφοδοτείται.

#### Ε)Πέμπτο επίπεδο

Ο ενιαίος κόμβος σε αυτό το επίπεδο υπολογίζει τη συνολική απόδοση ως το άθροισμα όλων των εισερχομένων . Ως εκ τούτου, η έξοδος ANFIS είναι σαφώς μια γραμμική λειτουργία μη ασαφών παραμέτρων. Η έξοδος του ανάστροφου εκκρεμούς είναι μια δύναμη και δίνεται από την εξίσωση:

$$F=(\theta * C1)+(\dot{\theta} * C2)+(x * C3)+\dot{x} * C4+C5 \quad (4)$$

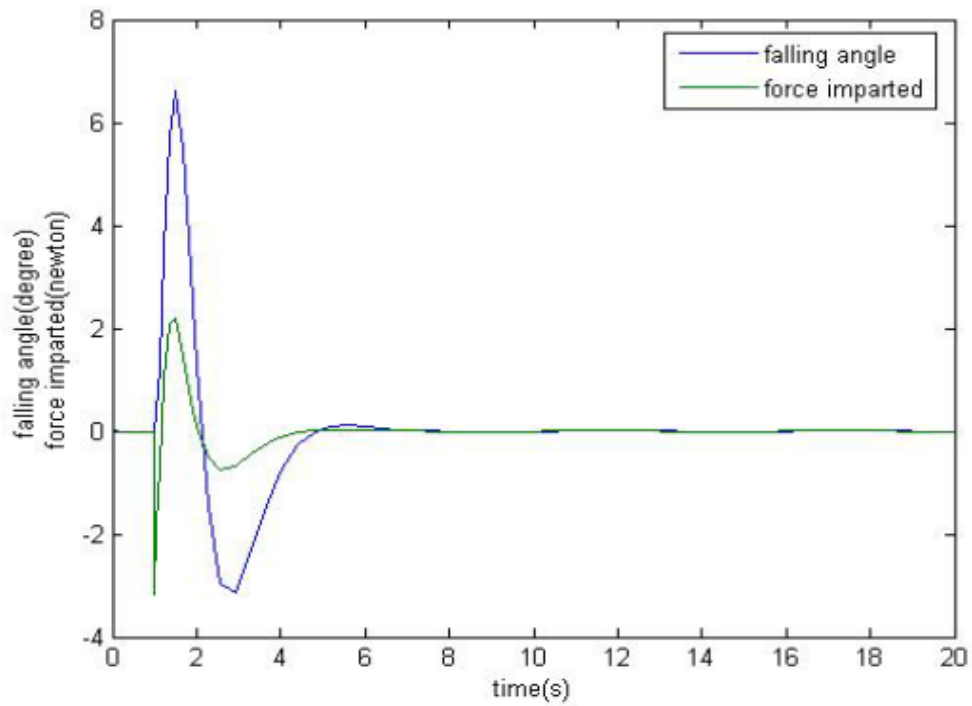
### 5.1.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Το μοντέλο Simulink προσομοιώνεται με σχετική ανοχή 0.001s. Οι εικόνες 6 και 7 παρουσιάζουν την προσομοίωση για τη γωνία εισόδου και η θέση και η δύναμη ελέγχου εξόδου με ράβδο μάζας 0,1 kg, καρότσι μάζας 1.0kg, ράβδο μήκους 1.0m, βήμα αναφοράς εισόδου το 1,0 και επιτάχυνση της βαρύτητας 9,8 m / s<sup>2</sup>. Λόγω της βηματικής απόκρισης, η πραγματική προσομοίωση του συστήματος ξεκινά τη στιγμή t = 1s. Με άλλα λόγια, η προσομοίωση του συστήματος ξεκινά μόνο όταν η δύναμη διαταραχής

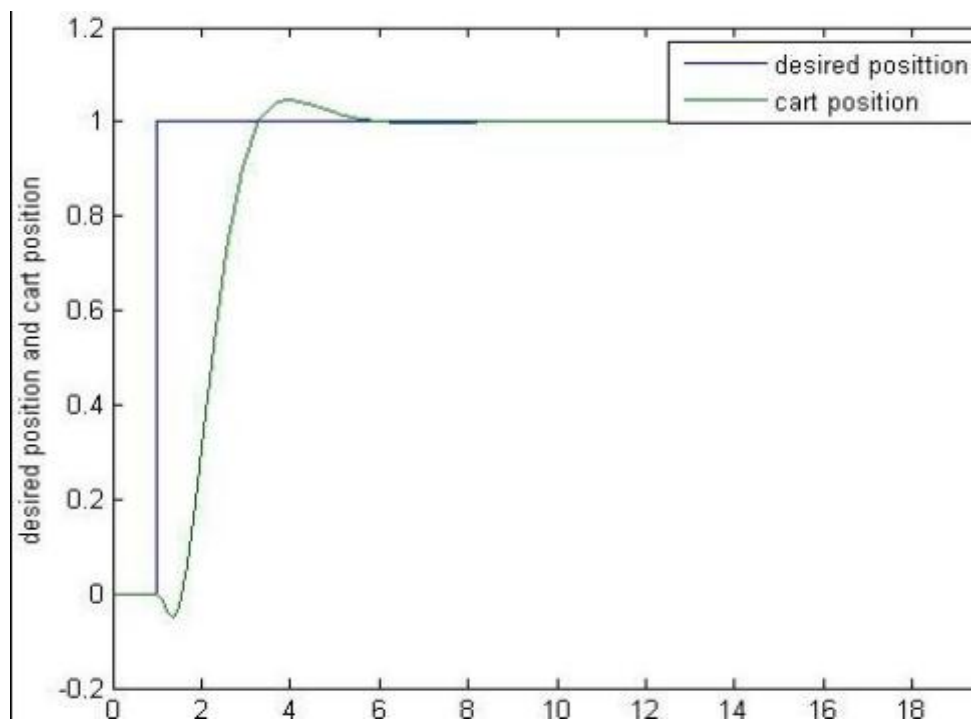
εφαρμόζεται στο σύστημα. Η εικόνα 8 δείχνει ότι το καρότσι είναι σε θέση να φτάσει στην επιθυμητή θέση του σε περίπου 6s, εξισορροπώντας το εκκρεμές. Η εικόνα 12 από την άλλη, δείχνει ότι με βήμα απόκρισης 1, μια δύναμη διαταραχής περίπου 3N προς την αντίθετη κατεύθυνση εφαρμόζεται στο σύστημα. Ως εκ τούτου, προκειμένου το καρότσι να φτάσει στην επιθυμητή θέση αναφοράς στην θετική κατεύθυνση και ταυτόχρονα να εξισορροπήσει το εκκρεμές στο μικρότερο δυνατό χρόνο, μία αρνητική δύναμη διαταραχής εφαρμόζεται στο σύστημα. Όταν εφαρμόζεται μια αρνητική δύναμη, το εκκρεμές μετατοπίζεται προς τη θετική κατεύθυνση λόγω της αδράνειας. Λόγω αυτού, ο ελεγκτής ANFIS θα εφαρμόσει την κατάλληλη δύναμη στην θετική κατεύθυνση για την εξισορρόπηση του εκκρεμούς. Αυτό εξηγεί τη δύναμη και την γωνία απόκρισης κατά την έναρξη της προσομοίωσης και της πολύ μικρή αρνητική μετατόπιση της θέσης του καροτσιού, όπως φαίνεται στην εικόνα 12.

#### ***5.1.4 Ελεγκτής ANFIS και συμβατικός ελεγκτής PID***

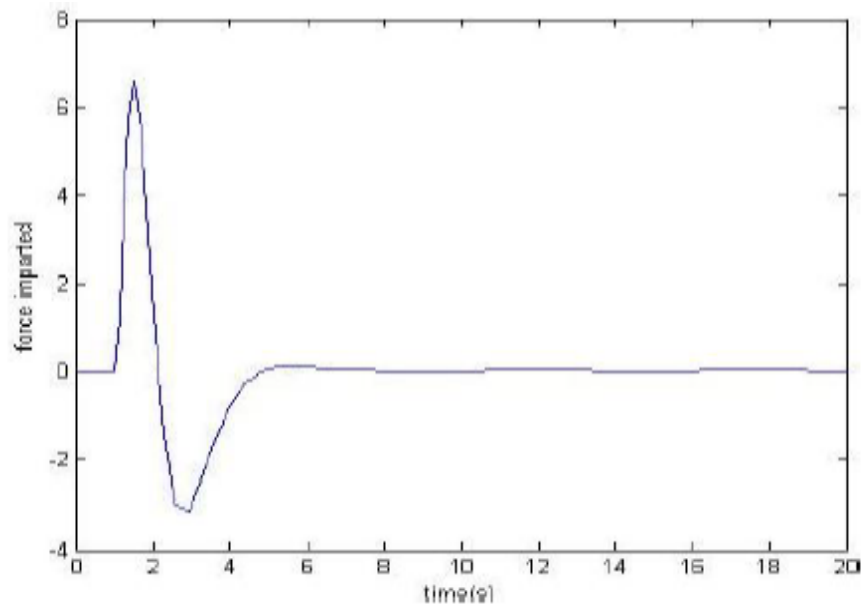
Οι εικόνες 14 και 15 δείχνουν τα αποτελέσματα συγκρίνοντας το ANFIS με το PID στο σύστημα του ανάστροφου εκκρεμούς. Για το ίδιο σύστημα παραμέτρων, το αναλογικό κέρδος του PID είναι  $K_p=9$ , το παράγωγο κέρδος  $K_d=14$  και το αναπόσπαστο κέρδος  $K_i=0.06$ . Τα δύο πρώτα γραφήματα δείχνουν ότι ο ελεγκτής ασαφούς λογικής δίνει μικρότερη υπερύψωση και μικρότερο χρόνο αποκατάστασης. Στα επόμενα δύο, η μάζα του καροτσιού αλλάζει χωρίς να τροποποιηθούν οι ελεγκτές. Η εικόνα 16 δείχνει ότι ο συμβατικός ελεγκτής απέτυχε πλήρως να εξισορροπήσει το εκκρεμές, αφού είχε σχεδιαστεί για την αρχική τιμή της μάζας του καροτσιού. Από την άλλη πλευρά, ο ελεγκτής ANFIS παρουσίασε μικρή μείωση της απόδοσης λόγω αυτής της αλλαγής της παραμέτρου όπως φαίνεται στην εικόνα 15. Αυτό αποδεικνύει ότι το ANFIS δε βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο του ανάστροφου εκκρεμούς και είναι πιο εύρωστο σε μαζικές διακυμάνσεις.



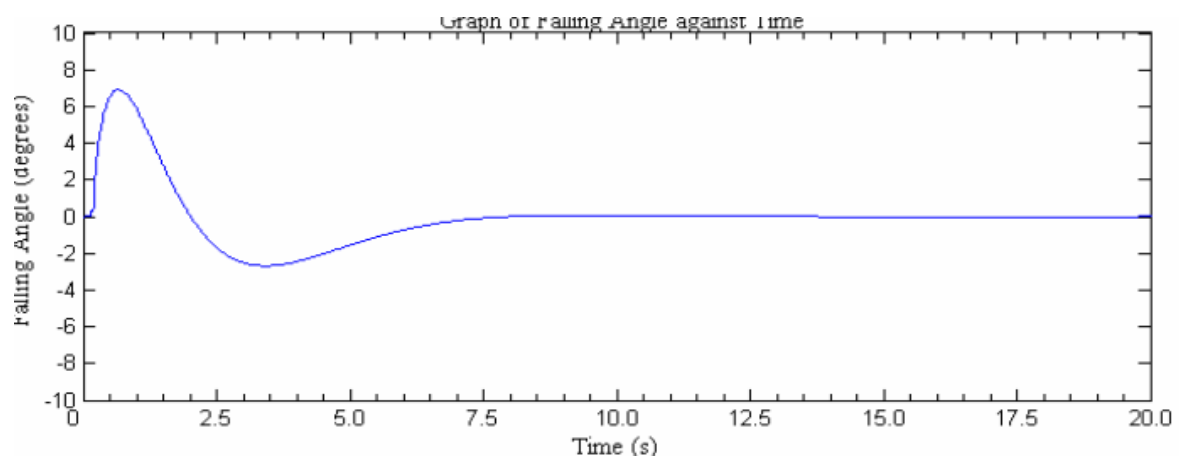
Εικόνα 11 : Πτώση γωνία σε σχέση με τη δύναμη μεταδιδόμενης ανταπόκρισης



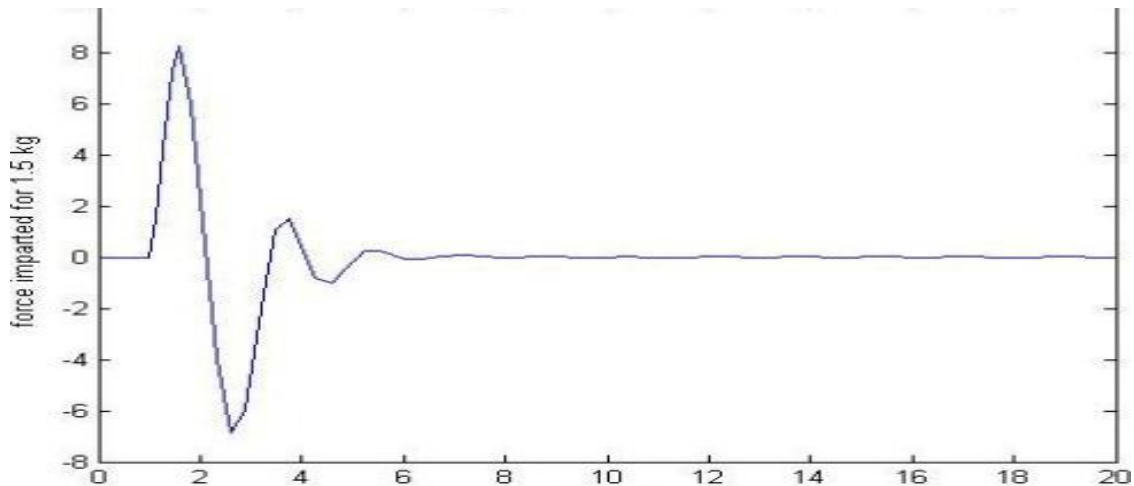
Εικόνα 12 : Επιθυμητή θέση σε σχέση με τη θέση ανταπόκρισης του καλαθιού



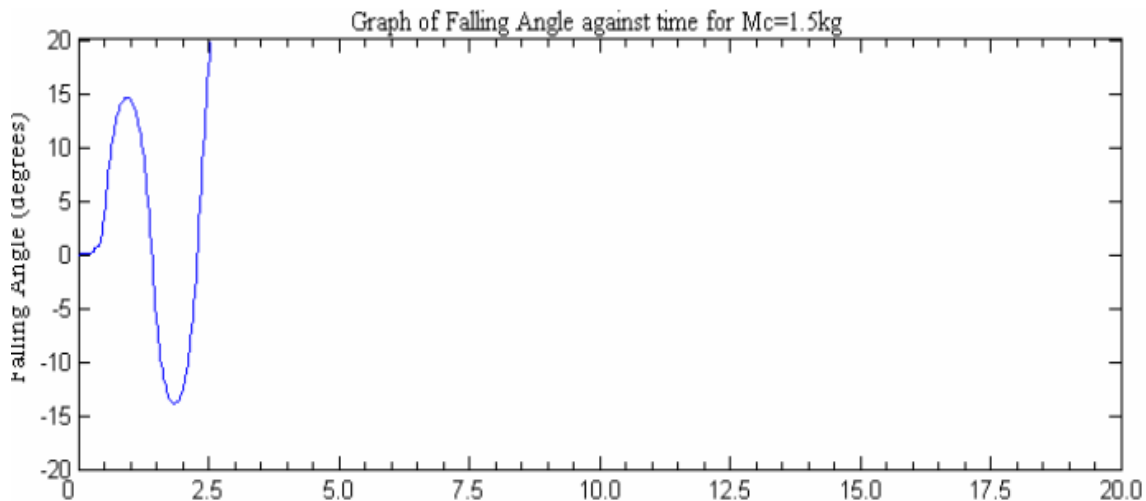
Εικόνα 13 : Falling angle response για τον ελεγκτή ANFIS



Εικόνα 14 : Falling angle response για το συμβατικό έλεγχο PID



Εικόνα 15 : Falling angle response για τον ελεγκτή ANFIS (αλλαγμένη μάζα)



Εικόνα 16 : Falling angle response για το συμβατικό έλεγχο PID (αλλαγμένη μάζα)

### 5.1.5 Συμπεράσματα

Ο ελεγκτής ANFIS δημιουργήθηκε στο περιβάλλον της Matlab, χρησιμοποιώντας το Simulink και το ANFIS Editor για τον έλεγχο του ανάστροφου εκκρεμους. Η μελέτη αυτή έδειξε ορισμένα δυνητικά οφέλη από τη χρήση του ελεγκτή ANFIS. Σε σύγκριση με τη σύγχρονη θεωρία ελέγχου, ο ελεγκτής ANFIS είναι απλούστερος να εφαρμοστεί, καθώς εξαλείφει την περίπλοκη μαθηματική διαδικασία μοντελοποίησης και χρησιμοποιεί ένα σύνολο κανόνων ελέγχου αντί αυτού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ελεγκτής ANFIS είναι πιο ισχυρός στις μεταβολές σε σύγκριση με το ελεγκτή PID.

## 5.2 Σχεδιασμός ελεγκτή ANFIS για τον ενεργό έλεγχο κραδασμών προβόλου πλάκας με πιεζοηλεκτρικά αυτοκόλλητα ως αισθητήρες/ενεργοποιητές[11]

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να βελτιστοποιήσει τη δόνηση της πλάκας με τη βοήθεια του ANFIS ελεγκτή. Η πλάκα είναι τετράγωνη, έτσι έχουμε συνολικά 64 τετράγωνα. Το σύστημα ελέγχου ANFIS εφαρμόστηκε για τη μελέτη της αποτελεσματικότητας και τη μετατόπιση των άκρων. Το γράφημα του χρόνου σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά επιθέματα σε διάφορα σημεία για να μάθουν τη βέλτιστη θέση και να καταστείλουν τις τρεις πρώτες λειτουργίες. Έχει παρατηρηθεί ότι ο ελεγκτής (ANFIS) είναι κατάλληλος γιατί ελέγχει αποτελεσματικά ώστε να καταστείλει τους τρεις πρώτους τρόπους δόνησης της προβόλου πλάκας. Η μετατόπιση και η ταχύτητα στα άκρα λαμβάνονται ως είσοδοι και η δύναμη ελέγχου λαμβάνεται ως η έξοδος στα εννέα διαφορετικά σημεία. Ο ελεγκτής αποτελείται από εννέα κανόνες που βασίζονται σε απλή ανθρώπινη αιτιολογία. Χρησιμοποιώντας επανυζημένες εξισώσεις, ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων από μια δισδιάστατη πρόβολο πλάκα οργανώνεται με πιεζοηλεκτρικό επίθεμα ζεύγους αισθητήρα-διεγέρτη.

### 5.2.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να βελτιστοποιήσει τη δόνηση της πλάκας με τη βοήθεια του ANFIS ελεγκτή. Η πλάκα είναι τετράγωνη, έτσι έχουμε συνολικά 64 τετράγωνα. Το σύστημα ελέγχου ANFIS εφαρμόστηκε για τη μελέτη της αποτελεσματικότητας και τη μετατόπιση των άκρων. Το γράφημα του χρόνου σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά επιθέματα σε διάφορα σημεία για να μάθουν τη βέλτιστη θέση και να καταστείλουν τις τρεις πρώτες λειτουργίες. Έχει παρατηρηθεί ότι ο ελεγκτής (ANFIS) είναι κατάλληλος γιατί ελέγχει αποτελεσματικά ώστε να καταστείλει τους τρεις πρώτους τρόπους δόνησης της προβόλου πλάκας. Η μετατόπιση και η ταχύτητα στα άκρα λαμβάνονται ως είσοδοι και η δύναμη ελέγχου λαμβάνεται ως οι έξοδοι στα εννέα διαφορετικά σημεία. Ο ελεγκτής αποτελείται από εννέα κανόνες που βασίζονται σε απλή ανθρώπινη αιτιολογία. Χρησιμοποιώντας επανυζημένες εξισώσεις, ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων από μια δισδιάστατη πρόβολο πλάκα οργανώνεται με πιεζοηλεκτρικό επίθεμα ζεύγους αισθητήρα-διεγέρτη.

Μια στρατηγική ελέγχου των κραδασμών κατά την οποία μια εξωτερική πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των δομικών δονήσεων καλείται ενεργός έλεγχος κραδασμών (AVC). Ουσιαστικά αποτελείται από αισθητήρες για να συλλάβει τη δυναμική της δομής, έναν επεξεργαστή για να χειριστεί τα σήματα του αισθητήρα, ενεργοποιητές και μια πηγή ενέργειας για την ενεργοποίηση των ενεργοποιητών. Διαφορετικές τεχνικές ελέγχου έχουν χρησιμοποιηθεί στον έλεγχο της ευέλικτης δομής. Σχεδιάστηκε ελεγκτής ασαφούς λογικής για τον ενεργό έλεγχο κραδασμών της πρόβολου πλάκας με πιεζοηλεκτρικό επίθεμα ως αισθητήρα/ενεργοποιητή. Στη συνέχεια μελετήθηκε η καταστολή του ελέγχου κραδασμών των ενεργών δομών που είναι εξοπλισμένες με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές. Χρησιμοποιήθηκε έλεγχος θετικής ανάδρασης θέσης (PPF) στον ενεργό έλεγχο των κραδασμών των ευέλικτων δομών. Παρουσιάστηκαν οι βασικές μορφές των έξυπνων συστημάτων στα οποία η απόδοση του δομικού συστήματος ενισχύεται από την παρουσία ενός ελεγκτή ανάδρασης κλειστού βρόχου όπου χρησιμοποιεί δεδομένα σχετικά με την απόκριση του συστήματος στην αξιολόγηση και την εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών, προκειμένου να βελτιώσει τις επιδόσεις του. Το πρόβλημα των κραδασμών λύθηκε χρησιμοποιώντας νόμους ελέγχου ασαφούς λογικής με διαφορετικές ομάδες συναρτήσεων συμμετοχής που θεσπίζονται για την καταστολή κραδασμών ενός ευέλικτου έξυπνου βραχίονα με τη χρησιμοποίηση ενός ζεύγους πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα /ενεργοποιητή και dual-mode ελεγκτές, ειδικά σχεδιασμένοι για την καταστολή του χαμηλότερου πλάτους ταλάντωσης κοντά στο σημείο ισορροπίας.

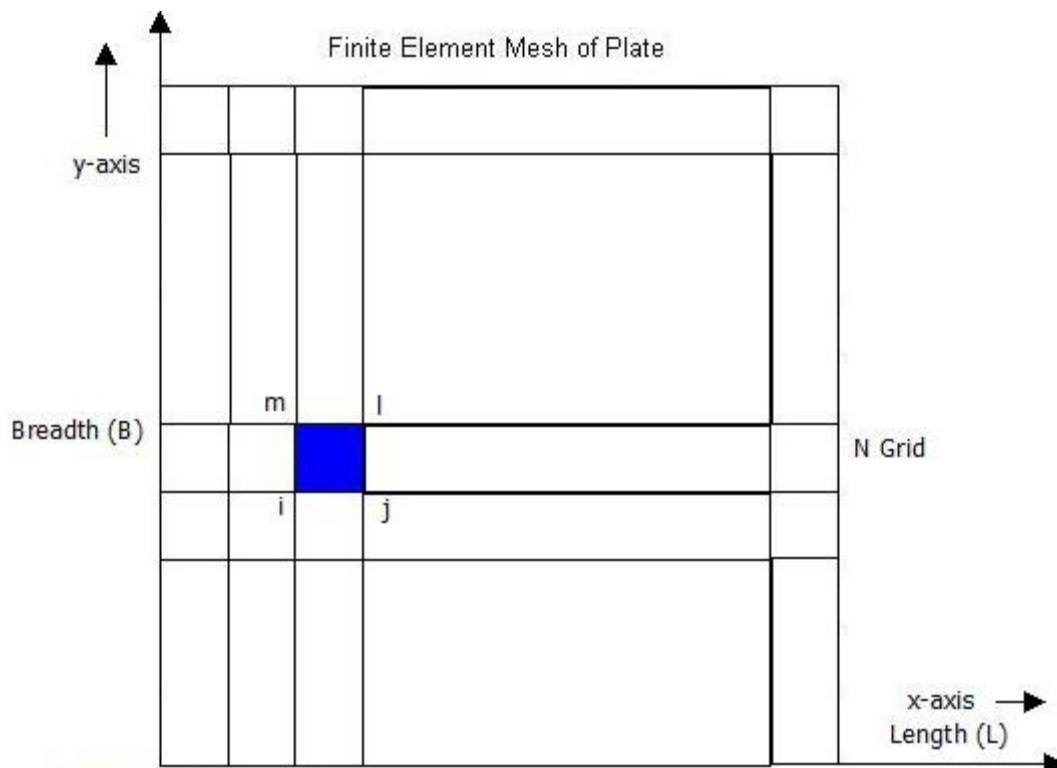
Στη συνέχεια διερευνήθηκε ο ενεργός έλεγχος δονήσεων μιας απλά υποστηριζόμενης ορθογώνιας πλάκας από λειτουργικά υλικά με έλεγχο ασαφούς λογικής και συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εφαρμογή του ελέγχου PID. Έπειτα παρουσιάστηκε ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής ασαφούς λογικής με on-line ρύθμιση των κλιμάκωτων παραγόντων για τον έλεγχο της δόνησης σύνθετων δοκών λεπτών τοιχωμάτων.

Λαμβάνουμε υπόψη ότι το  $M$  είναι ο αριθμός των στοιχείων κατά μήκος της πλάκας και  $N$  είναι ο αριθμός των στοιχείων κατά μήκος του πλάτους. Κάθε στοιχείο θεωρείται ότι είναι ορθογώνιου σχήματος με κόμβους  $i, j, l$  και  $m$ , με διαστάσεις μήκους  $2a$  και πλάτους  $2b$  και πάχους  $h$ .



### 5.2.2 Μεθοδολογία

Θεωρείται μία ισοτροπική ελαστική ορθογώνια πλάκα από ομοιογενές υλικό με διαστάσεις μήκος  $L$ , Πλάτος  $B$ , και πάχους  $H$ . Η πλάκα είναι πρόβολος σε δύο απέναντι πλευρές και υποβάλλεται σε δονήσεις. Η δόνηση θα είναι ομοιόμορφη και συγχρονισμένη. Οι υπόλοιποι βαθμοί ελευθερίας κατά μήκος των πλευρών της δομής θα είναι κλειδωμένοι. Η πλάκα διακριτοποιείται σε κάποιο πεπερασμένο αριθμό μικρότερων στοιχείων των ταυτόσημων σχημάτων και μεγεθών. Η δομή θα διαμορφωθεί με τη βοήθεια του FEM. Υποτίθεται ότι το ζεύγος των πιεζοηλεκτρικών έπιθεμάτων μπορεί να προστεθεί στη δομή ως αισθητήρας και ενεργοποιητής σε κομμάτι που συμπίπτει με την επιφάνεια του κάθε στοιχείου.



Εικόνα 17 : Διατύπωση προβλήματος

Λαμβάνουμε υπόψη ότι το  $M$  είναι ο αριθμός των στοιχείων κατά μήκος της πλάκας και  $N$  είναι ο αριθμός των στοιχείων κατά μήκος του πλάτους. Κάθε στοιχείο θεωρείται ότι είναι ορθογώνιου σχήματος με κόμβους  $i$ ,  $j$ ,  $l$  και  $m$ , με διαστάσεις μήκους  $2a$  και πλάτους  $2b$  και πάχους  $h$ .

### 5.2.3 Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Υποθέτοντας μια ελαστική πλάκα η οποία είναι εξοπλισμένη με ένα ζεύγος πιεζοηλεκτρικού επιθέματος αισθητήρα και ενεργοποιητή πολωμένο στην κατεύθυνση του πάχους. Υπάρχουν ηλεκτρόδια στην άνω και κάτω επιφάνεια του κάθε πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Η πλάκα διαιρείται σε διακριτά πεπερασμένα στοιχεία όπου " και " είναι οι φυσικές συντεταγμένες του πεπερασμένου στοιχείου και σχετίζονται με τις παγκόσμιες συντεταγμένες (x, y) ως:

$$\zeta = \frac{x}{a} \quad \text{και} \quad \eta = \frac{y}{b}$$

Κάθε πεπερασμένο στοιχείο έχει τέσσερις κόμβους και κάθε κόμβος έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας: ένα μεταφραστικό w και δύο περιστροφής  $\theta_x$  και  $\theta_y$ .

Εάν  $\{u_e\}$  είναι το διάνυσμα μετατόπισης ενός στοιχείου τότε η μετατόπιση κατά την Z-διεύθυνση μπορεί να οριστεί ως:

$$W = [N]_{1 \times 12} \{u_e\}_{12 \times 1}$$

Όπου  $[N]_{1 \times 12}$  είναι η συνάρτηση παρεμβολής Hermite.

Αγνοώντας τις διατμητικές παραμορφώσεις στην πλάκα και χρησιμοποιώντας την κλασσική θεωρία του Kirchhoff στις πλάκες, τα στελέχη που παράγονται στην πλάκα μπορεί να γραφτούν ως :

$$\{\epsilon\} = \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial v'}{\partial y} \quad \frac{\partial v'}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right\}^T$$

Όπου

$$u = -z \frac{\partial \omega}{\partial x}, \quad v' = -z \frac{\partial \omega}{\partial y}$$

αντικαθιστώντας τιμές των 'u' και 'v'' στην παραπάνω εξίσωση, παίρνουμε:

$$\{\epsilon\}_{3 \times 1} = z [B_u]_{3 \times 12} \{u_e\}_{12 \times 1}$$

$$\text{Όπου } [B_u]_{3 \times 12} = \left[ -\frac{z \partial^2}{\partial x^2} - \frac{z \partial^2}{\partial y^2} - \frac{2z \partial^2}{\partial x \partial y} \right]_{3 \times 1}^T [N]_{1 \times 12}$$

Η κινητική ενέργεια ενός πεπερασμένου στοιχείου :

$$T_e = \frac{1}{2} \int_s \rho_s \dot{w}^2 d\tau + \frac{1}{2} \int_p \rho_p \dot{w}^2 d\tau$$

Η δυναμική ενέργεια ενός πεπερασμένου στοιχείου:

$$V_e = \frac{1}{2} \int_s \{\epsilon\}^T \{\sigma\} d\tau + \frac{1}{2} \int_p \{\epsilon\}^T \{\sigma\} d\tau$$

Η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια σε ένα πεπερασμένο στοιχείο:

$$W_{elect} = \frac{1}{2} \int_p \{E\}^T \{D\} d\tau$$

Μία εξωτερική επιφάνεια έλξης ή μια δύναμη σημείου μπορεί να δράσει σε μια έξυπνη δομή. Αυτές οι δυνάμεις θα δράσουν επάνω στην έξυπνη δομή και, ως αποτέλεσμα, η ενέργεια που αποθηκεύεται ανά στοιχείο είναι:

$$W_{ext(1)} = \int_{A_s} \{w\}^T \{f_s^e\} dA_s$$

Οι εργασίες που απαιτούνται για την εφαρμογή των εξωτερικών φορτίων επί της επιφάνειας ενός πιεζοηλεκτρικού είναι:

$$W_{ext(11)} = - \int_{A_p} q v dA_p$$

Τώρα, η Λαγκρανσιανή για ένα πεπερασμένο στοιχείο της έξυπνης δομής μπορεί να ληφθεί ως :

$$L - T_e - V_e + (W_{elect} + W_{ext(1)} + W_{ext(11)})$$

Η Λαγκρανσιανή μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση σχέσεων πεπερασμένων στοιχείων και επαυξημένες καταστατικές εξισώσεις. Η εξίσωση κίνησης ενός πεπερασμένου στοιχείου προέρχεται από τη χρήση της αρχής του Hamilton:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt = 0$$

Η προκύπτουσα μεταβολική περιέχει δύο μεταβλητές 'υ' και 'ν'. Λαμβάνοντας μεταβολή ως προς  $\{u_e\}$ , έχουμε:

$$([m_s^e] + [m_p^e])\{\ddot{u}_e\} + ([k_s^e] + [k_p^e])\{u_e\} + ([k_{uv}^e] + [\overline{k_{uv}}])v = \{F_s^e\} + \{F_{T,S}^e\} + \{F_{T,P}^e\}$$

Και λαμβάνοντας μεταβολή ως προς 'ν' έχουμε :

$$v = ([k_{vv}^e] + [\overline{k_{vv}^e}])^{-1} (Q_{ext}^e + Q_{pyro}^e + ([k_{vu}^e] + [\overline{k_{vu}^e}])\{u_e\})$$

Όπου

$$[m_s^e] = \int_s \rho_s [N]^T [N] d\tau \quad \text{είναι το στοιχείο την μάζας της μήτρας στο υπόστρωμα,}$$

$$[m_p^e] = \int_p \rho_p [N]^T [N] d\tau \quad \text{είναι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο της μάζας της μήτρας}$$

$$[k_s^e] = \int_s z^2 [B_u]^T [c_s] [B_u] d\tau \quad \text{είναι το στοιχείο δυσκαμψίας της μήτρας στο υπόστρωμα}$$

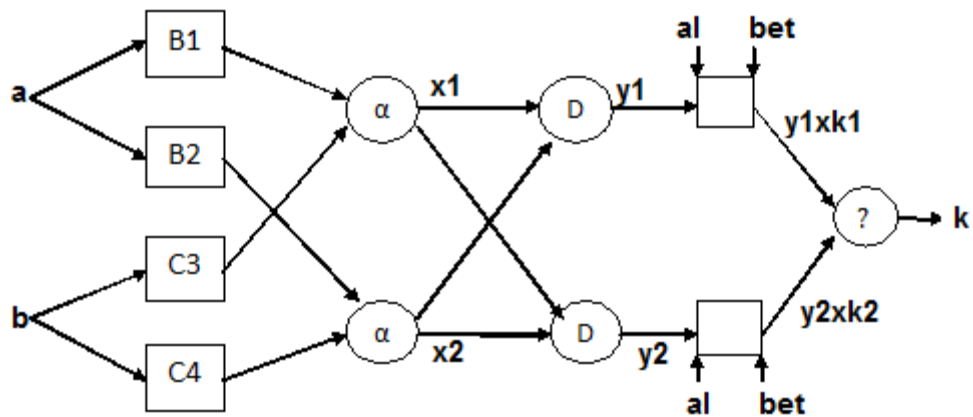
$$[k_p^e] = \int_p z^2 [B_u]^T [c_s] [B_u] d\tau \quad \text{είναι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο δυσκαμψίας της μήτρας,}$$

$$[k_{uv}^e] = [k_{uv}^e]^T = \int_p z \{B_u\}^T [e^t] [B_v] d\tau \quad \text{είναι η ηλεκτρομηχανική μήτρα}$$

Αλληλεπίδρασης.

#### 5.2.4 Σχεδιασμός του Νευρο Ασαφούς Συστήματος Συμπερασμού (ANFIS)

Ο σχεδιασμός του ελεγκτή ANFIS αποτελείται από δύο ελεγκτές. Έναν νευρωνικού δικτύου και έναν ασαφούς λογικής. Ο ελεγκτής ANFIS φαίνεται στην εικόνα 18. Ο ANFIS είναι ένα νευρωνικό δίκτυο 5 επιπέδων όπου τροφοδοτείται προς τα δεξιά (εμπρός). Η ξεχωριστή αρχιτεκτονική του ελεγκτή που βασίζεται στον τύπο συστήματος συμπερασμού Sugeno επιτρέπει τη χρήση υβριδικών αλγορίθμων μάθησης. Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την ενημέρωση των παραμέτρων του δικτύου ANFIS είναι ένας υβριδικός αλγόριθμος μάθησης ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος μάθησης δύο επιπέδων. Στην προσέγγιση αυτή, οι παράμετροι του δικτύου ANFIS αξιολογήθηκαν σε δύο μέρη ως παράμετροι εισόδου και εξόδου.

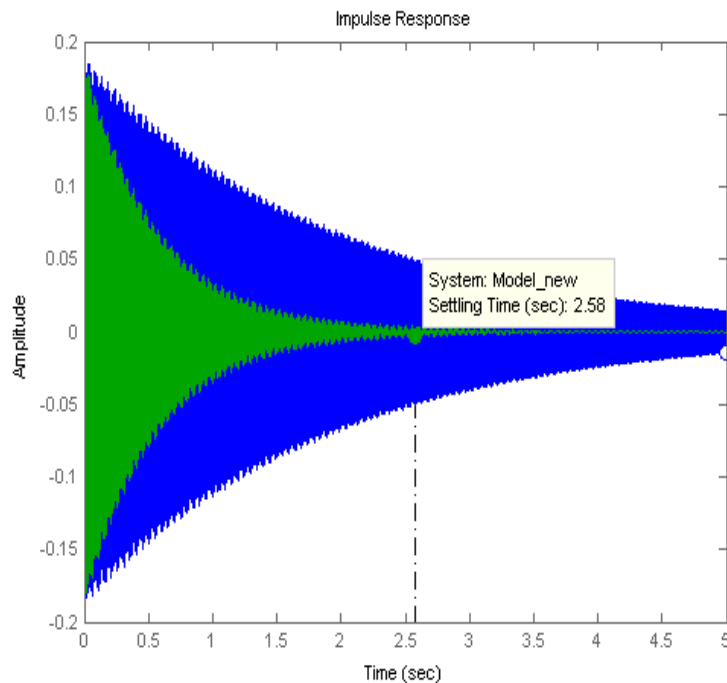


Εικόνα 18: Ελεγκτής ANFIS

Al	Bet	Piezolocation	Settling Time
10	20	35	2.14
10	20	25	2.58
20	30	35	1.79
30	40	35	1.60
40	50	35	1.41
50	60	35	1.34
60	70	35	1.34
70	80	35	1.15
80	90	35	1.12
90	100	35	1.12
100	110	35	1.12
110	120	35	1.09
120	130	35	1.09
130	140	35	0.94
140	150	35	0.94
150	160	35	0.94
150	160	35	1.27
160	170	35	0.94
170	180	35	0.894
180	190	35	0.94
190	200	35	0.94

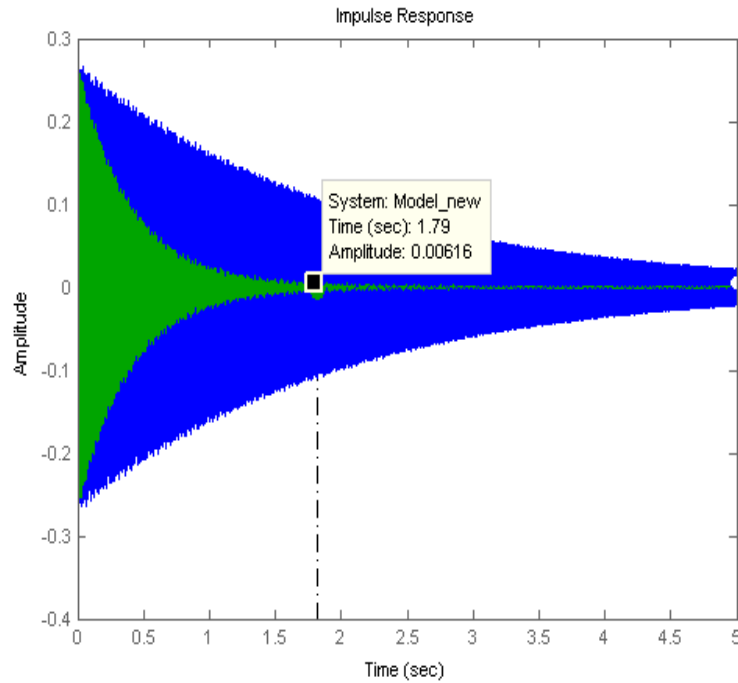
Πίνακας 1: Διευθέτηση του χρόνου σε διάφορες θέσεις του πιεζοηλεκτρικού Ενεργοποιητή σε διαφορετική ταχύτητα και μετατόπιση

### 5.2.5 Αποτελέσματα

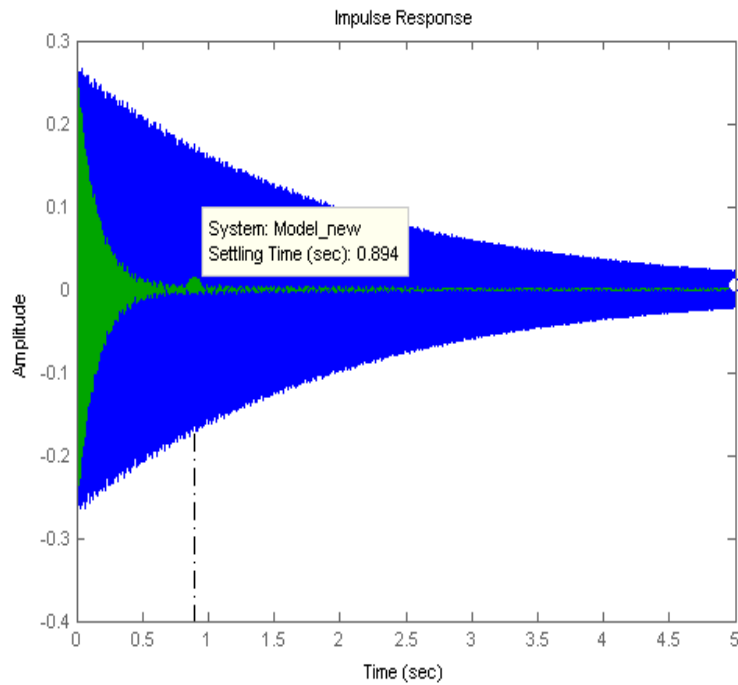


Εικόνα 19 : Ελεγχόμενη και μη ελεγχόμενη μετατόπιση όταν ο πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής είναι τοποθετημένος στην 25η θέση ( $\alpha_1 = 10$ ,  $\beta_2 = 20$ ).

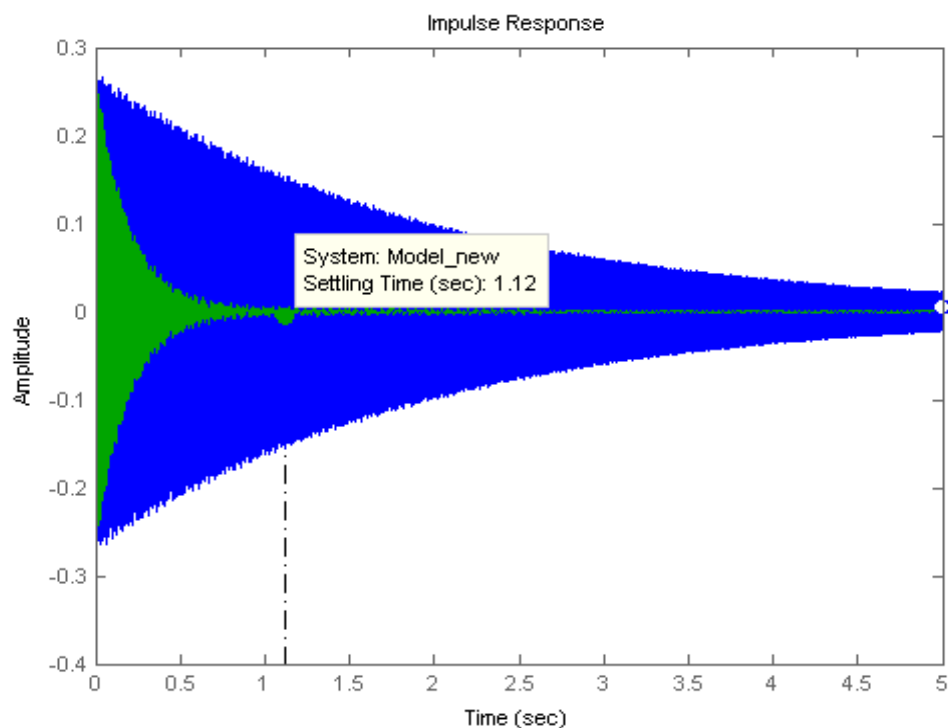
Με τη χρήση του ελεγκτή ANFIS, η διευθέτηση του χρόνου για κάθε επίθεμα εισάγεται σε ένα πίνακα 8x4 όπως φαίνεται στον πίνακα 1. Η τιμή της μετατόπισης και της ταχύτητας κύμαινεται από 0-200. Η θέση του αισθητήρα/ενεργοποιητή ήταν μεταξύ των θέσεων 1-64 οι οποίες ήταν διαθέσιμες στην πλάκα πεπερασμένων στοιχείων. Μεταβάλλοντας τη θέση του ενεργοποιητή και την τιμή της μετατόπισης και την ταχύτητας, παρατηρήσαμε την ελάχιστη διευθέτηση του χρόνου χρησιμοποιώντας ANFIS ελεγκτή. Η διευθέτηση του χρόνου υπολογίζεται με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB. Οι Εικ. 19-22 δείχνουν τις διάφορες ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες μετατοπίσεις, όταν ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας / ενεργοποιητής τοποθετείται σε διαφορετικές θέσεις.



Εικόνα 20 : Ελεγχόμενη και μη ελεγχόμενη μετατόπιση όταν ο πιεζοηλεκτρικός Ενεργοποιητής είναι τοποθετημένος στην 35η θέση ( $\alpha_1 = 20$ ,  $\beta_1 = 30$ ).



Εικόνα 21 : Ελεγχόμενη και μη ελεγχόμενη μετατόπιση όταν ο πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής είναι τοποθετημένος στην 35η θέση ( $\alpha_1 = 100$ ,  $\beta_1 = 110$ ).



Εικόνα 22 : Ελεγχόμενη και μη ελεγχόμενη μετατόπιση όταν ο πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής είναι τοποθετημένος στην 35η θέση ( $\alpha_1=170$ ,  $\beta_2=180$ ).

### 5.2.6 Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή περιγράφει τις βασικές τεχνικές για την ανάλυση του ενεργού ελέγχου δονήσεων με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών. Βρέθηκε η βέλτιστη θέση του ζεύγους αισθητήρων για μια πρόβολο πλακά ώστε να καταστείλει τους τρεις πρώτους τρόπους δονήσεις και τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του ελεγκτή ANFIS. Οι τιμές των δύο εισόδων του ελεγκτή ANFIS λαμβάνονται ως μετατόπιση και ταχύτητα και παίρνουν τιμές μεταξύ 0 και 200. Η καλύτερη θέση του ζεύγους αισθητήρων/ενεργοποιητών είναι η 35η. Η βέλτιστη τιμή της μετατόπισης και της ταχύτητας για τον ελάχιστο διευθετημένο χρόνο είναι 170 και 180 αντίστοιχα. Ο ελάχιστος διευθετημένος χρόνος που λαμβάνεται είναι 0.894sec.



## 5.3 Νευροασαφές μοντέλο για την πρόβλεψη των δυναμικών χαρακτηριστικών των δοκών[12]

### 5.3.1 Εισαγωγή

Ένα προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμού (ANFIS) εισάγεται για να προβλέψει τη δυναμική συμπεριφορά των δοκών. Τα αποτελέσματα των αξονικών δυνάμεων και των μεγάλων μετατοπίσεων εξετάζονται στην ανάλυση. Μια βάση δεδομένων των δοκιμών για τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δοκών έχει αναπτυχθεί από τις πειραματικές δοκιμές. Η ανταπόκριση των μη γραμμικών δυνάμεων δόνησης για την ενιαία και πολλαπλών βαθμίδων δοκο υπολογίζεται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), τις πειραματικές δοκιμές και το νευρο-ασαφή μοντελο όπου και συγκρίνονται. Το νευρο-ασαφές μοντέλο παρέχει ένα γενικό πλαίσιο για το συνδυασμό των νευρωνικών δικτύων και της ασαφούς λογικής. Είναι πιο ευέλικτο και με περισσότερες επιλογές από την ενσωμάτωση της ασαφούς φύση του πραγματικού κόσμου και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο εκτίμησης των δυναμικών χαρακτηριστικών του δοκών. Ως εκ τούτου, ο ANFIS είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη δυναμική ανάλυση της συμπεριφοράς των δοκών πολλαπλών βαθμίδων που υποβάλλονται σε αξονικά φορτία και μεγάλη μετατόπιση.

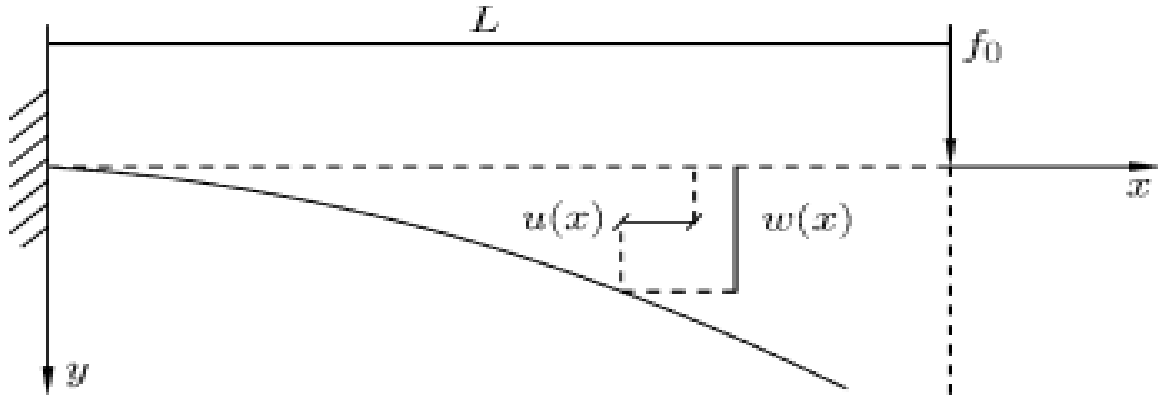
Η δοκός είναι ένα από τα θεμελιώδη στοιχεία σε μια μηχανική κατασκευή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες δομικές εφαρμογές. Επίσης, δομές όπως πτερύγια ρότορα ελικοπτέρου, κεραίες διαστημόπλοιων, ευέλικτοι δορυφόροι, τα φτερά του αεροπλάνου, οι κάνες των όπλων, οι βραχίονες του ρομπότ, πολυώροφα κτίρια, γέφυρες, και υποσυστήματα σύνθετων κατασκευών μπορούν να μοντελοποιηθούν ως ένα σύνολο δοκών. Ως εκ τούτου, μια μελέτη της στατικής και δυναμικής αντίδρασης, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό στάδιο, για αυτό το απλό δομικό μέρος σύμφωνα με διάφορες συνθήκες φόρτωσης θα είναι χρήσιμη για την κατανόηση και επεξήγηση της συμπεριφοράς των πιο σύνθετων και πραγματικών δομών υπό παρόμοια φόρτωση. Εξαιρετικά ευέλικτες κατασκευές μπορούν να υποβληθούν σε μεγάλη μετατόπιση και να περιστροφούν χωρίς να υπερβούν τα ελαστικά όρια τους. Ωστόσο, όταν μία δομή υφίσταται μεγάλη μετατόπιση, διάφορα δευτερεύοντα αποτελέσματα

όπως ηροπήαδράνειας, η στρέβλωση της διατομής και η βαρύτητα μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο. Ως εκ τούτου, οι μεγάλες μετατοπίσεις και οι τρόποι περιστροφής απαιτούνται στις μη γραμμικές δομικές θεωρίες. Επιπλέον, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις μη γραμμικές στατικές και δυναμικές συμπεριφορές των ευέλικτων δομών για το σχεδιασμό τέτοιων δομών. Πολλές μελέτες έχουν εστιάσει σε τέτοια σχετικά προβλήματα. Η επίδραση των δυναμικών μεγάλων μετατοπίσεων στη συμπεριφορά των κραδασμών των δοκών έχουν ληφθεί υπόψη. Οι εξισώσεις για τα διάφορα είδη των μικρών και μεγάλων παραμορφώσεων έχουν αναπτύχθει από τις δοκούς. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επιτεύχθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ανάλογα με την αρχική τιμή του μήκους βήματος αναζήτησης. Το μικρότερο μήκος βήματος παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται η διαδικασία υπολογισμού. Επίσης, σε αυτές τις μεθόδους δεν μπορούν να επεκταθούν άμεσα σε ασαφείς εξισώσεις όλοι οι αριθμητικοί χειρισμοί. Αυτό συμβαίνει επειδή ορισμένες μαθηματικές πράξεις για πραγματικούς αριθμούς δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε αριθμούς.

Σε αυτή τη μελέτη, μια νέα εφαρμογή του μοντέλου ANFIS χρησιμοποιείται για να αναλύσει τη μεγάλη μετατόπιση και τις δονήσεις μίας ενιαίας και πολλαπλών βαθμίδων πρόβολου δοκού. Μελετώνται τα μεμονωμένα αποτελέσματα για κάθε ένα από το μήκος, πάχος και το πλάτος των δυναμικών χαρακτηριστικών των δοκών. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από αυτό το μοντέλο συγκρίνονται με εκείνα των πειραματικών δοκιμών και ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα δείχνουν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης για καλύτερη ανάλυση.

### **5.3.2 Αναλυτικό Μοντέλο**

Θεωρούμε μια ευθεία δοκό Euler-Bernoulli μήκους  $L$ , μια εγκάρσια τομή της περιοχής  $A$ , μια αδράνεια  $I$ , και ένα μέτρο ελαστικότητας  $E$ . Υποβάλλεται σε μία αξονική δύναμη μεγέθους  $f_0$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Πρόβολος δοκός μεγάλης μετατόπισης

Η εξίσωση κίνησης δίνεται από :

$$\overbrace{\frac{d^2}{dx^2} \left( EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right)}^{\text{Linear}} - \overbrace{\frac{d}{dx} \left\{ EA \frac{dw}{dx} \left[ \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 \right] \right\}}^{\text{Non-linear}} = q(x, t) \quad (1)$$

Ένα σημειακό φορτίο εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της δοκού. Η αριθμητική ανάλυση του μοντέλου γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας επτά διπλούς κόμβους στοιχείων της δοκού. Η μη γραμμική διαφορική εξίσωση (1) μπορεί να ξαναγραφεί με ένα σύστημα αλγεβρικών μη γραμμικών εξισώσεων.

$$\overbrace{[M] \{\ddot{u}\}}^{\text{Inertia forces}} + \overbrace{[C] \{\dot{u}\}}^{\text{Damping forces}} + \overbrace{[K] \{u\}}^{\text{Deformation forces}} = \overbrace{\{R(\{u\}, t)\}}^{\text{External forces}} \quad (2)$$

όπου  $[M]$  είναι η μήτρα μάζας,  $[C]$  είναι η μήτρα απόσβεσης,  $[K]$  είναι η μήτρα δυσκαμψίας,  $\{u\}$  είναι το κομβικό διάνυσμα μετατόπισης,  $\{R(\{u\}, t)\}$  είναι τα εξωτερικά κομβικά διανύσματα δυνάμεων,  $\{\dot{u}\}$  και  $\{\ddot{u}\}$  είναι τα δεύτερα και τα πρώτα παράγωγα των κομβικών διανυσμάτων μετατόπισης αντίστοιχα, (το κομβικό διάνυσμα επιταχύνσεως και το κομβικό διάνυσμα της ταχύτητας). Για τον καθορισμό της

δυναμικής ισοροπίας το χρόνο  $(t + \Delta t)$  χρησιμοποιείται η μέθοδος Newmark με το σύστημα ολοκλήρωσης απεριόριστου χρόνου και η τροποποιημένη επανάληψη Newton. Οι εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων (2) γίνονται

$$[M]^{t+\Delta t} \{\ddot{u}\}^i + [C]^{t+\Delta t} \{\dot{u}\}^i + {}^t[K_L + K_{NL}] \{\Delta u\}^i = {}^{t+\Delta t}\{R\} - {}^{t+\Delta t}\{f\}^{i-1} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

Όπου

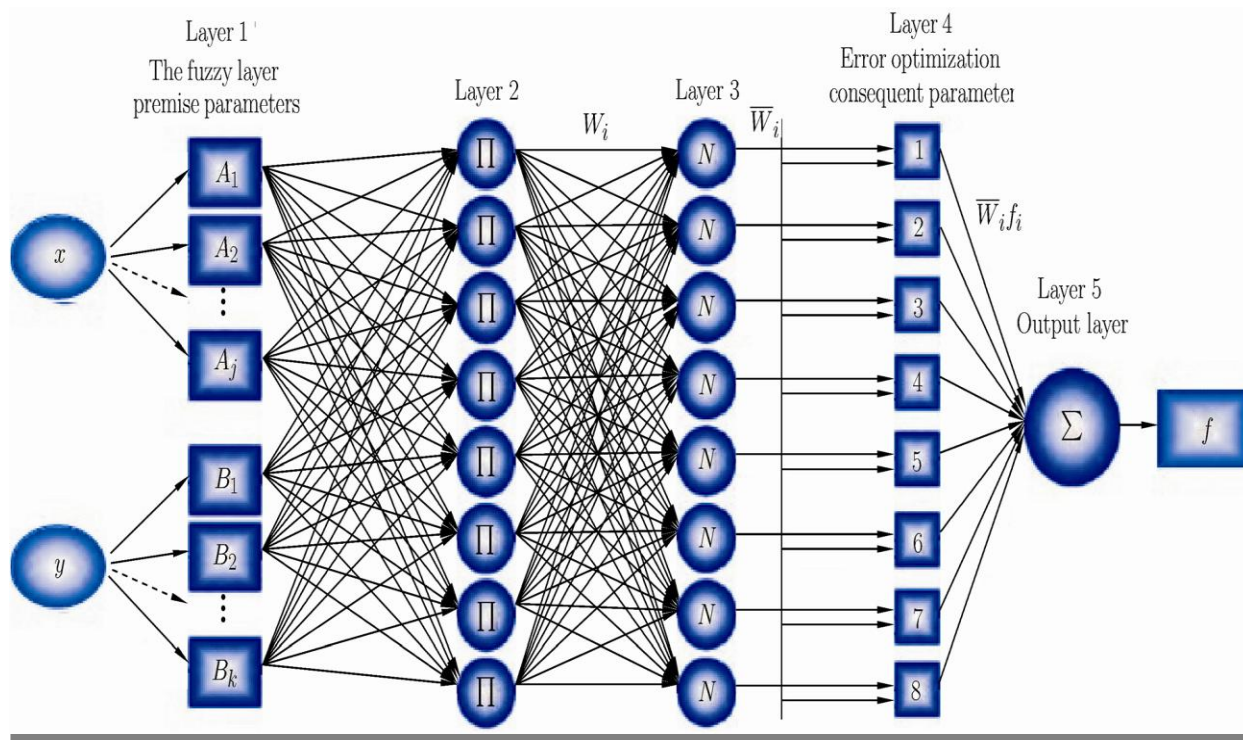
$${}^{t+\Delta t}u^i = {}^{t+\Delta t}u^{i-1} + \Delta u^i \quad (4)$$

### 5.3.3 Νευρο-ασαφές Μοντέλο

Στον ανεπτυγμένο ANFIS, τέσσερις μεταβλητές που περιλαμβάνουν τη θέση (P), το πλάτος (B) και το πάχος (D) των δειγμάτων, και η εφαρμοζόμενη δύναμη (F) επιλέγονται ως μεταβλητές εισόδου για την πρόβλεψη της δυναμικών χαρακτηριστικών των δοκών όπως η συχνότητα και το σχήμα λειτουργίας, τα οποία είναι οι μεταβλητές στόχου.

Σε αυτή την έρευνα, χρησιμοποιούνται η κατάρα της διάστασης με τη λειτουργία (GENFIS1) και διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής (Gaussian και γενικευμένη Bell). Στο ασαφές σύστημα συμπερασμού, ο χώρος χωρίζεται σε τρεις τύπους εισόδων, πλέγμα, δέντρο, και σκέδαση. Η GENFIS1 χρησιμοποιεί την κατάτμηση του δικτύου και δημιουργεί κανόνες με την απαρίθμηση όλων των δυνατών συνδυασμών των συναρτήσεων συμμετοχής όλων των εισόδων, η οποία οδηγεί σε μια εκθετική έκρηξη, ακόμη και όταν ο αριθμός των εισόδων είναι μέτριος-μεγάλος. Για παράδειγμα, για ένα ασαφές σύστημα συμπερασμού με 4 εισόδους, κάθε μία με τρεις συναρτήσεις συμμετοχής, ο διαχωρισμός του πλέγματος οδηγεί σε 81 κανόνες, οι οποίοι είναι πολλοί για οποιεσδήποτε πρακτικές μεθόδους μάθησης. Η «κατάρα του διάστασης» αναφέρεται σε τέτοια κατάσταση, όπου ο αριθμός των ασαφών κανόνων, όταν χρησιμοποιείται ο διαχωρισμός του πλέγματος, αυξάνει εκθετικά με τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου. Οι συναρτήσεις συμμετοχής και οι αριθμοί σε κάθε μεταβλητή εισόδου προσδιορίζονται καταλλήλως, όταν το σύνολο δεδομένων δοκιμής έχει την υψηλότερη συσχέτιση R. Η πρόβλεψη των σχημάτων λειτουργίας έγιναν με τη μέθοδο ANFIS και τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι ο ANFIS παρέχει μια καλύτερη πρόβλεψη, και μπορεί να χρησιμεύσει ως

ένα αξιόπιστο και απλό εργαλείο για την πρόβλεψη της αξονικής φόρτωσης και τη δυναμική ανάλυση μεγάλης μετατόπισης για δοκούς.



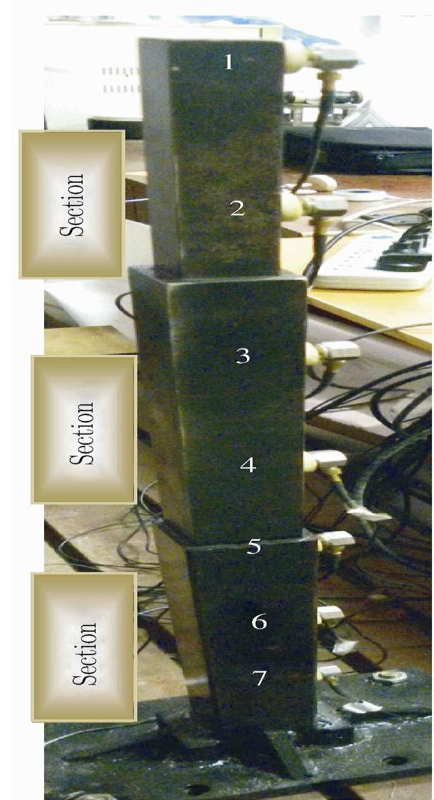
Εικόνα 24 : Η δομή του ANFIS

### 5.3.4 Το στήσιμο και η δομή του πειράματος

Στη διαδικασία αυτή, χρησιμοποιούνται ένα σφυρί, επιταχυνσιόμετρα υψηλής συχνότητας, ένας ενισχυτής φορτίου, μια κάρτα συλλογής δεδομένων, ένας προσωπικός υπολογιστής και λογισμικό ανάλυσης (UTeKLUT4101) του τρόπου εκτέλεσης. Το σφυρί εφαρμόζει δύναμη κρούσης στη δοκό. Εφαρμόζοντας μια δύναμη κρούσης σε μια δοκό, το σφυρί παράγει αντίστοιχη τάση. Το επιταχυνσιόμετρο αποτελείται από πλαίσιο, μάζας και πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Η μάζα η οποία δονείται στο επιταχυνσιόμετρο παράγει ηλεκτρικό ρεύμα στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Η αντίστοιχη τάση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι βαθμονομημένη σε επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση. Τα σήματα από το επιταχυνσιόμετρο και το σφυρί μετατρέπονται σε έναν ενισχυτή φόρτισης. Ο ενισχυτής φόρτισης είναι συνδεδεμένος με την κάρτα συλλογής δεδομένων και τον υπολογιστή. Ένας αναλυτής συνάρτησης απόκρισης συχνότητας είναι εγκατεστημένος

στον υπολογιστή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τυπική ανάλυση. Η πειραματική τυπική ανάλυση χρησιμοποιείται για την ενημέρωση των συναρτήσεων συμμετοχής και ο στόχος της ενημέρωσης είναι να βρεθεί μια παρεμβαλλόμενη καμπύληστα πειραματικάδεδομένα, η οποία περιγράφεται μόνο με μερικά σημεία, και η ασαφής αναπαράστασής του σχήματος λειτουργίας, το οποίο περιγράφεται από ένα μεγάλο αριθμό σημείων. Αυτοί οι ενημερώσεις οδηγούν σε μια αρχική πρόβλεψη του ασαφους τρόπου λειτουργίας ή των ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής.

Το αποτέλεσμα της τυπικής ανάλυσης είναι διακριτό μοντέλο. Σε αυτή την πρακτική, οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου εξαρτώνται από τον αριθμό των σημείων στα οποίαμετράται δόνηση. Η πειραματική διαδικασία περιγράφεται για πολλαπλές βαθμίδες δοκού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Οι διαστάσεις και οι μηχανικές ιδιότητες της δέσμης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2.



Εικόνα 25: Δοκός πολλαπλών βαθμίδων

Section	Length (mm)	width (mm)	Thickness (mm)	Material
1	350	44	44	Steel*
2	254	36	36	Steel
3	156	25	25	Steel

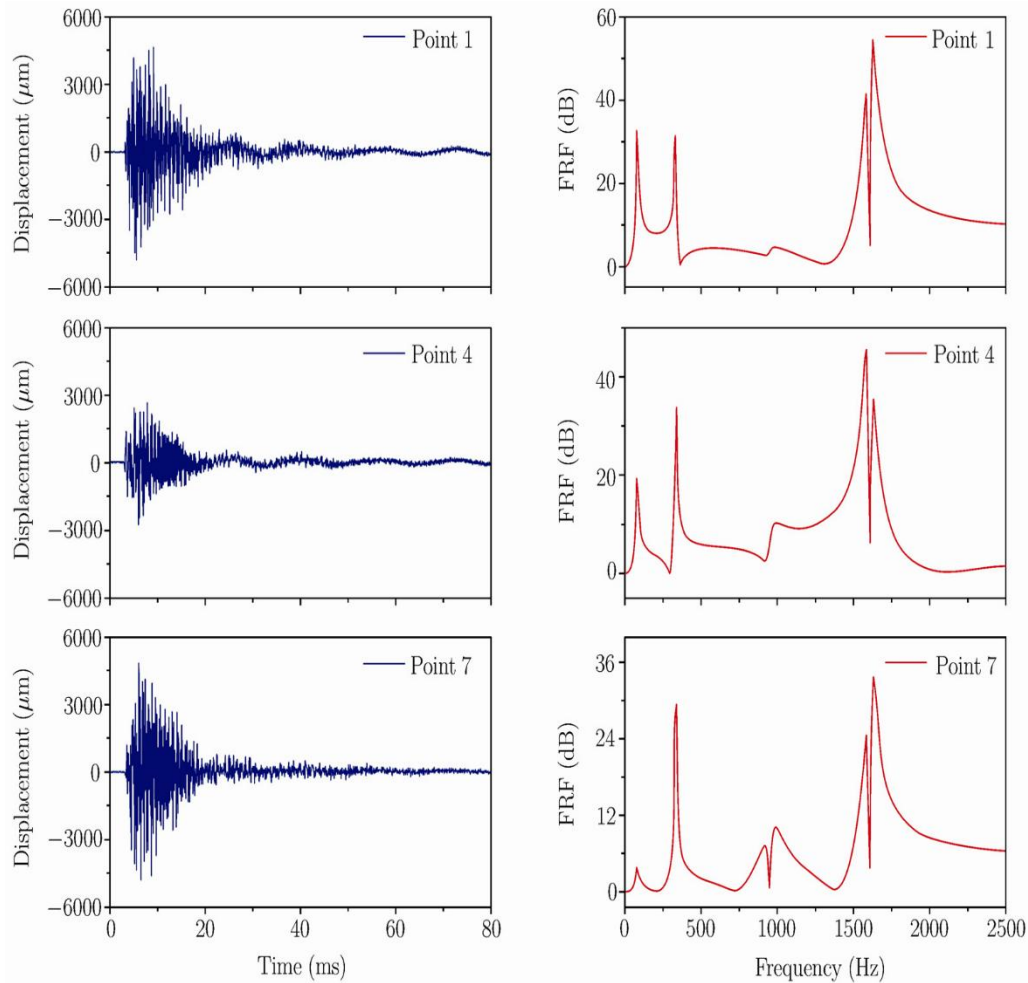
\*Steel:  $E = 205 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$

Πίνακας 2 : Διαστάσεις και μηχανικές ιδιότητες της δοκού

Η δοκός διαιρείται σε 7 ίσα τμήματα (Εικόνα 25). Ένα σύνολο από επτά επιταχυνσιόμετρα συνδέονται με τα επτά σημεία της δοκού για να λάβει σήμα από την ταλάντωση. Το σφυρί χρησιμοποιείται για να διεγείρει τη δοκό σε κάθε ένα από τα επτά επιλεγμένα σημεία. Γρήγορη μετασχηματισμοί Fourier των σφυρί διέγερσης και λαμβάνονται τα σήματα απο το επιταχυνσιόμετρο. Οι τιμές της συνάρτησης απόκρισης



συχνότητας προκύπτει από τη διαίρεση των σημάτων του επιταχυνσιόμετρου από τα αντίστοιχα σήματα από το σφυρί. Μία μήτρα συνάρτησης απόκρισης συχνότητας  $7 \times 7$  αποκτάται από 49 δεδομένα συναρτήσεων απόκρισης συχνότητας. Οι καμπύλες μετατόπισης και συνάρτησης απόκρισης συχνότητας από 3 διαφορετικά σημεία (σημείο 1, σημείο 4, σημείο 7) παρουσιάζονται στο σχήμα 26.



Εικόνα 26 : Οι συναρτήσεις μετατόπισης και συχνότητας απόκρισης για τα σημεία 1,4,7.

Η FRF είναι μια θεμελιώδης μέτρηση που απομονώνει τις εγγενείς δυναμικές ιδιότητες μίας μηχανικής κατασκευής. Οι τυπικές Πειραματικές παράμετροι (συχνότητα, απόσβεση, και το σχήμα λειτουργίας) λαμβάνονται επίσης από μία σειρά μετρήσεων της FRF. Η FRF περιγράφει τη σχέση εισόδου-εξόδου μεταξύ δύο σημείων σε μια δομή ως συνάρτηση της συχνότητας. Δεδομένου ότι τόσο δύναμη και η κίνηση είναι διανυσματικές ποσότητες, έχουν διευθύνσεις που συνδέονται με αυτά. Ως εκ τούτου, μια

FRF στην πραγματικότητα ορίζεται μεταξύ ενός ενιαίου DOF εισόδου (σημείο και κατεύθυνση) και ενός ενιαίου DOF εξόδου.

Ένα κρίσιμο ζήτημα για αυτό το set-up είναι ο υπολογισμός της μετατόπισης από την επιτάχυνση. Πράγματι, δεδομένου ότι το σύστημα δεν είναι πλέον συμμετρικό, η μετατόπιση δεν έχει καμία σημασία και το φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων αφαιρεί αυτό το στοιχείο.

### 5.3.5 Μοντελοποίηση και αποτελέσματα

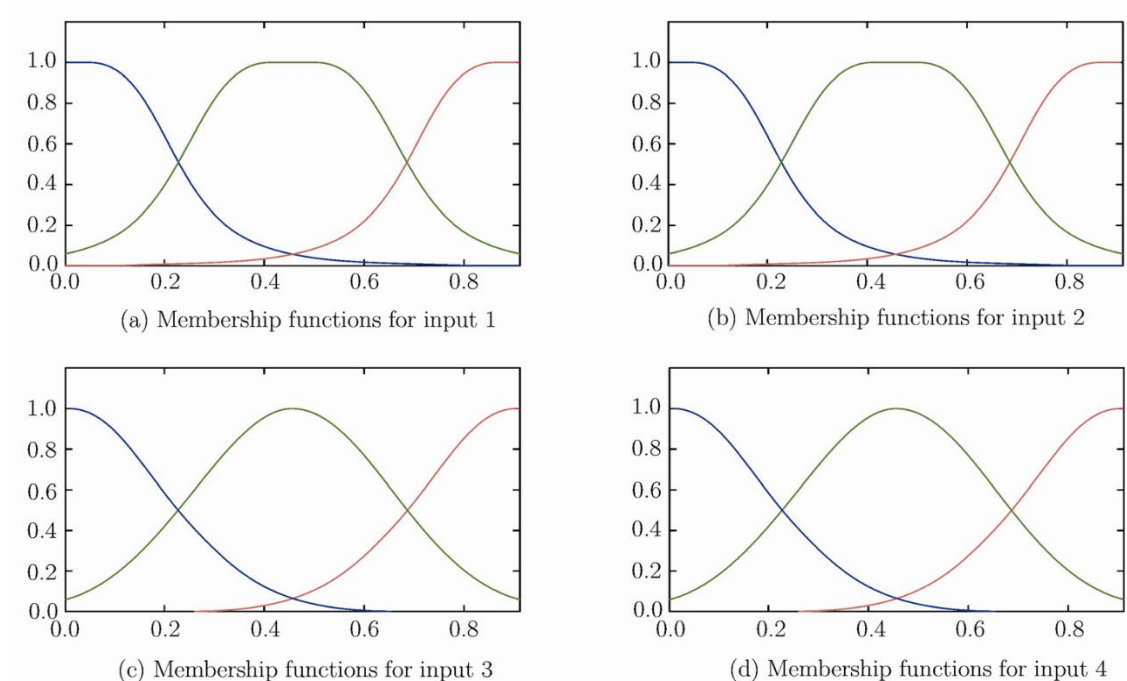
Για την ανάλυση του ANFIS, τα είδη και ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής που έχουν εκχωρηθεί σε κάθε μεταβλητή εισόδου καθορίζεται από τη μέθοδο της δοκιμής και λάθους. Το σχήμα 27 δείχνει τις τελικές συναρτήσεις συμμετοχής για όλες τις μεταβλητές εισόδου :

(i) θέση -3 Γενικευμένη bell συνάρτηση συμμετοχής,

(ii) πλάτος -3 γενικευμένη bell συνάρτηση συμμετοχής,

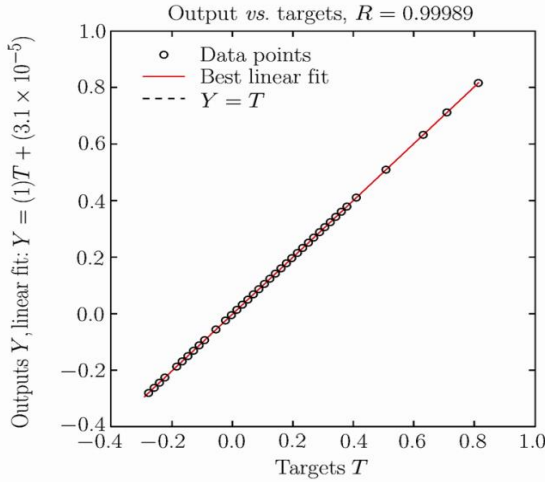
(iii) πάχους -3 Gaussian συνάρτηση συμμετοχής,

(iv) δύναμη -3 Gaussian συνάρτηση συμμετοχής τριών σχημάτων λειτουργίας

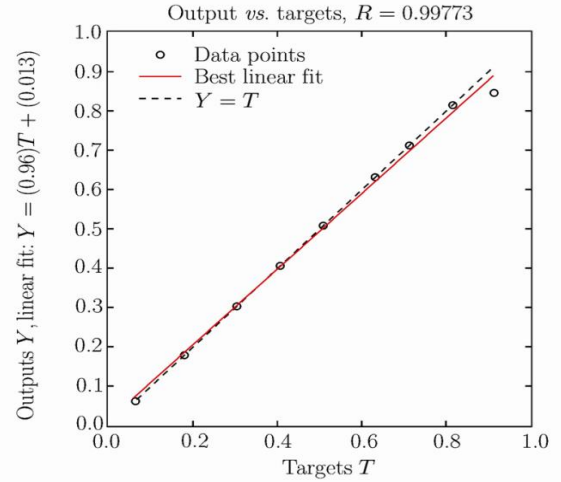


Εικόνα 27 : Συναρτήσεις συμμετοχής για 4 εισόδους τριών σχημάτων λειτουργίας

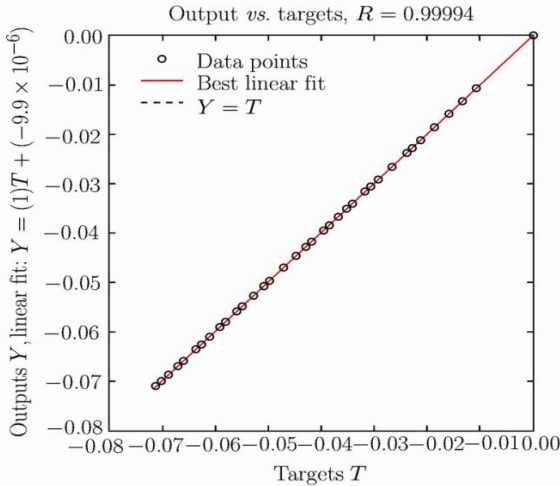




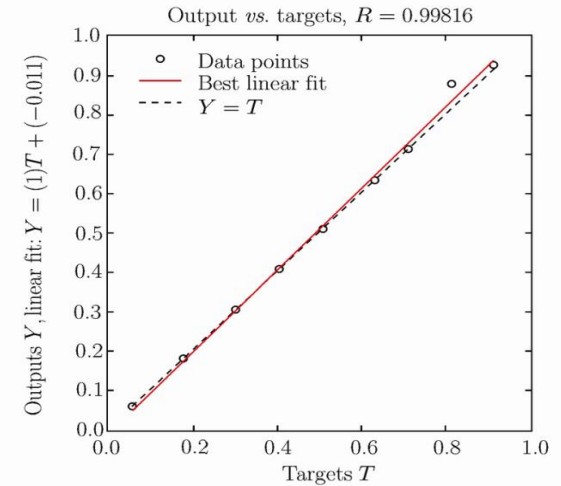
(a) Training (Model 1)



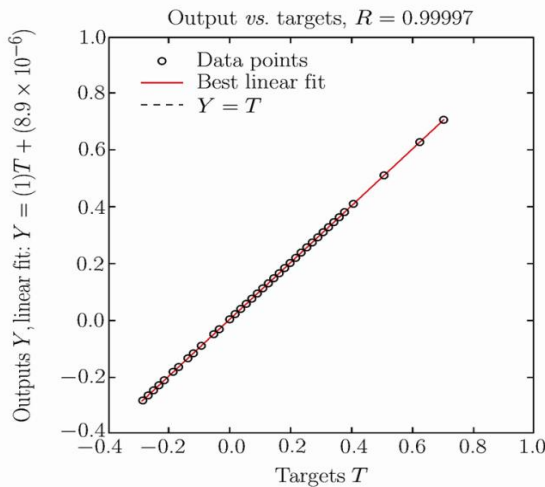
(b) Testing (Model 1)



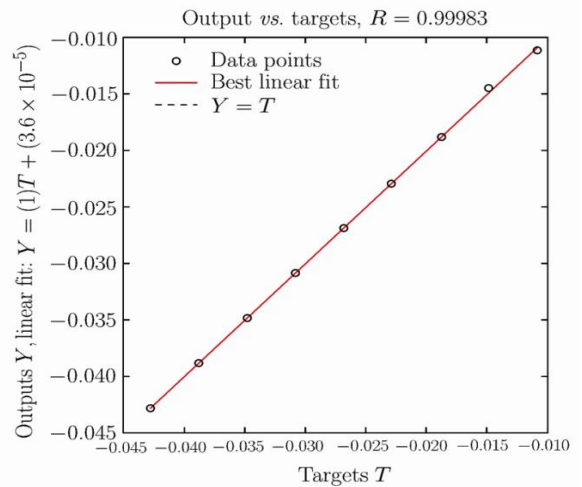
(c) Training (Model 2)



(d) Testing (Model 2)



(e) Training (Model 3)



(f) Testing (Model 3)

Εικόνα28 : Σύγκριση μεταξύ πειραματικών (στόχος) και προβλεπόμενων τιμές για την εκπαίδευση και τη δοκιμή δεδομένων των σχημάτων τριών λειτουργιών.

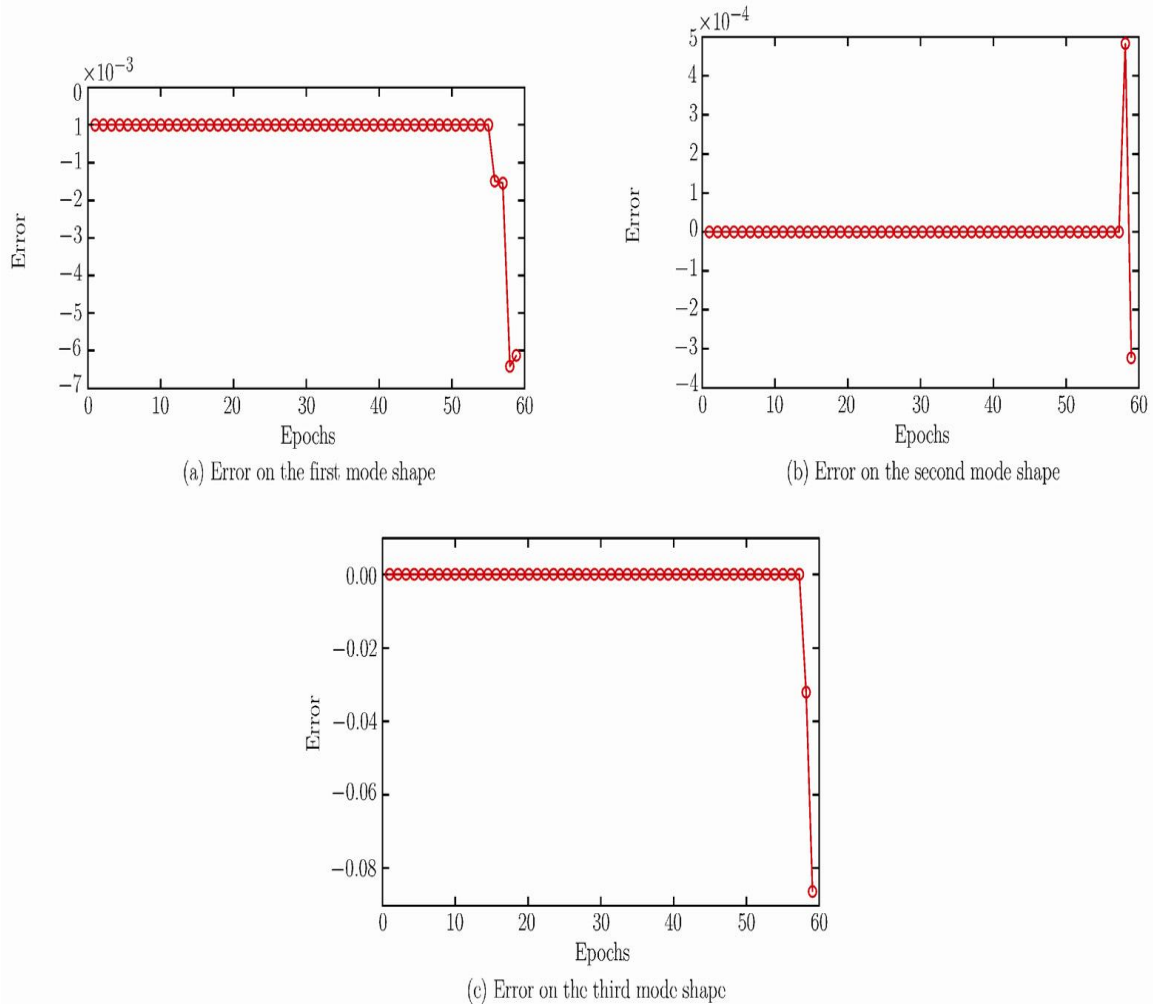
### **5.3.6 Εκπαίδευση και Έλεγχος αποτελεσμάτων**

Μία σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων από τον ANFIS και των μετρήσεων από τις πειραματικές δοκιμές φαίνεται στα δεδομένα εκπαίδευσης και στα δεδομένα των δοκιμών των τριών σχημάτων λειτουργίας στην εικόνα 28. Τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι αρκετά καλά για να έχουν περισσότερη από 0,99 συσχέτιση R, ακόμη και αν υπάρχει μια μικρή σκέδαση στα δεδομένα των σημείων που δοκιμάζονται. Η συγκριτική ανάλυση των επιδόσεων της περιόδου δοκιμής από την τεχνική με τη χρήση της νευρο-ασαφούς τεχνικής με ρίζα μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMSE) έχει πραγματοποιηθεί, όπως φαίνεται στην εικόνα 29. Σύμφωνα με το μοντέλο ANFIS οι τιμές RMSE ήταν  $6 \times 10^{-3}$ ,  $3 \times 10^{-4}$  και 0.085 στο πρώτο, δεύτερο και τρίτο σχήμα λειτουργίας, αντίστοιχα. Σε αυτό το πείραμα, το νευρο-ασαφές μοντέλο παρέχει τη βέλτιστη απόδοση, δηλαδή, το χαμηλότερο RMSE και την υψηλότερη R για τις περιόδους δοκιμών. Επίσης, φέρεται ότι τα αποτελέσματα μοντελοποίησης συμφωνούν με τα αποτελέσματα για όλα τα σύνολα δεδομένων. Έτσι, δείχνει την ικανότητα πρόβλεψης των ANFIS η οποία είναι εξαιρετική. Στην εικόνα 30 φαίνεται μια τρισδιάστατη επιφάνειά των σχημάτων λειτουργίας.

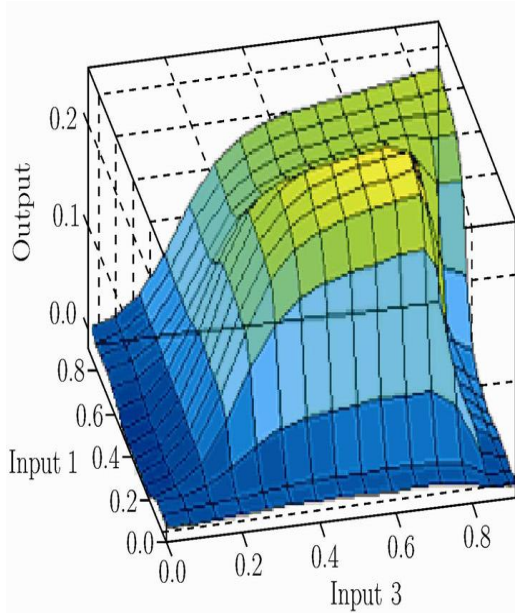
### **5.3.7 Σύγκριση μεταξύ των Πειραματικών και Θεωρητικών Αποτελεσμάτων**

Χρησιμοποιώντας τη Matlab και τη μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για τέσσερις τύπους δοκών για να απεικονίσουν τις επιδράσεις των διαστάσεων (πλάτος, πάχος και μήκος) επί των δυναμικών χαρακτηριστικών των δοκών. Οι γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες των δοκών παρατίθενται στον Πίνακα 2. Οι καμπύλη του πειραματικού μοντέλου (δοκός 5) και οι καμπύλες του αριθμητικού μοντέλου (δοκός 1-4) απεικονίζονται στην εικόνα 31. Σε αυτή την εικόνα παρουσιάζεται η επίδραση της αλλαγής στην περιοχή διατομής της δοκού σχετικά με την τιμή των συχνοτήτων στα τρία σχήματα λειτουργίας. Η διακύμανση της περιοχής (δοκός 4 και 5) επηρεάζει τις τιμές των συχνοτήτων και δίνει διαφορετικές συχνότητες για ομοιόμορφες δοκούς τριών βαθμίδων. Από την εικόνα 32 και τον Πίνακα 3 μπορεί να σημειωθεί ότι το μήκος της δοκού έχει μεγαλύτερη επίδραση από ό,τι οι άλλες διαστάσεις (πάχος και πλάτος) στα δυναμικά χαρακτηριστικά της δοκού. Η μείωση του μήκους της δοκού οδηγεί σε

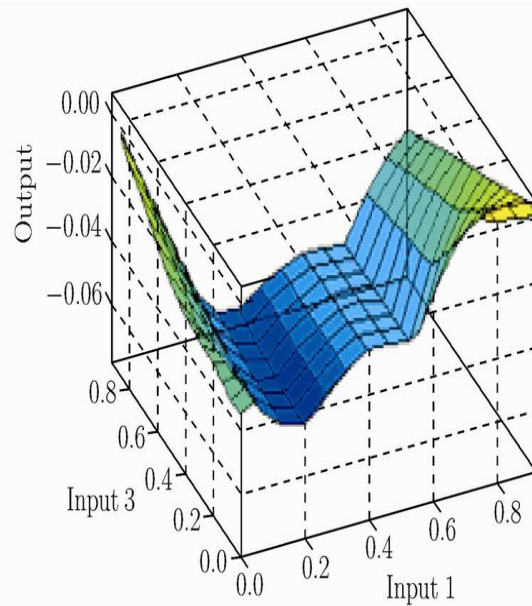
αύξηση της συχνότητας. Σε αντίθεση, η αύξηση του πάχους αυξάνει τη συχνότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή η αύξηση της ακαμψίας της δοκού καθώς το μήκος μειώνεται και το πάχος αυξάνεται η επίδραση του πλάτους στη συχνότητα δεν είναι σημαντική. Επίσης, η ίδια διαπίστωση είναι γνωστή για τα τρία σχήματα λειτουργίας.



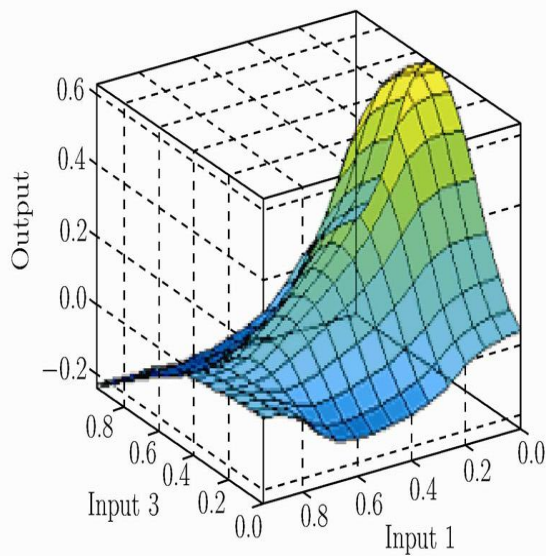
Εικόνα 29 : Καμπυλες ριζών μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMSE) για πειραματα και πρόβλεψη ANFIS των σχημάτων τριών λειτουργιών



(a) First mode shape



(b) Second mode shape



(c) Third mode shape

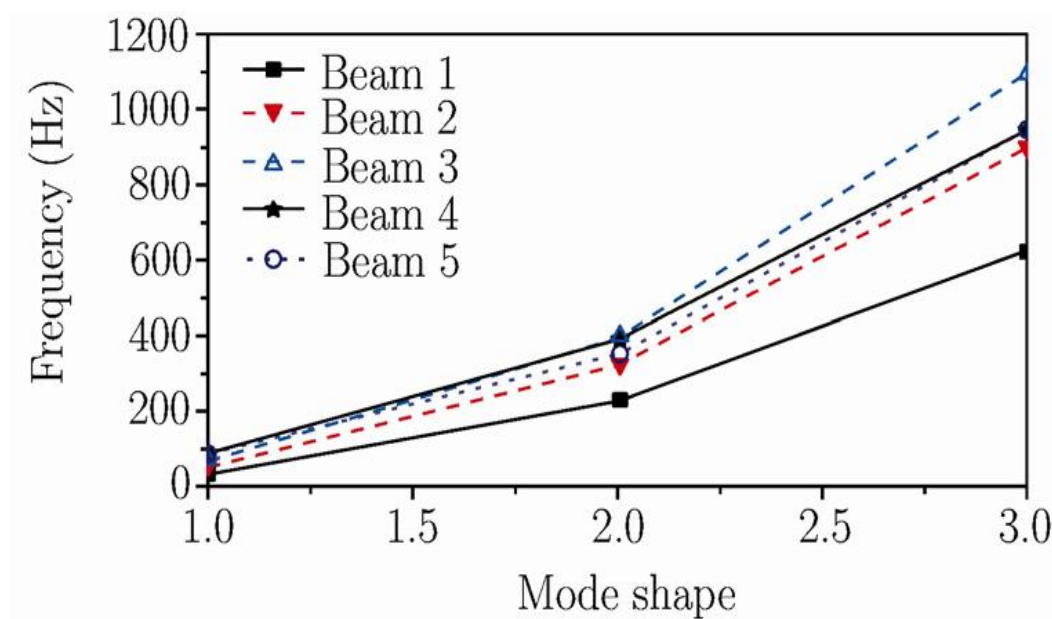
Εικόνα 30: Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας

Η σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών με τον ANFIS και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται στην εικόνα 28. Οι τιμές πρόβλεψης των ιδιοσυχνοτήτων του ANFIS και των άλλων μεθόδων φαίνονται στον πίνακα 4. Μπορεί να φανεί από αυτό το σχήμα

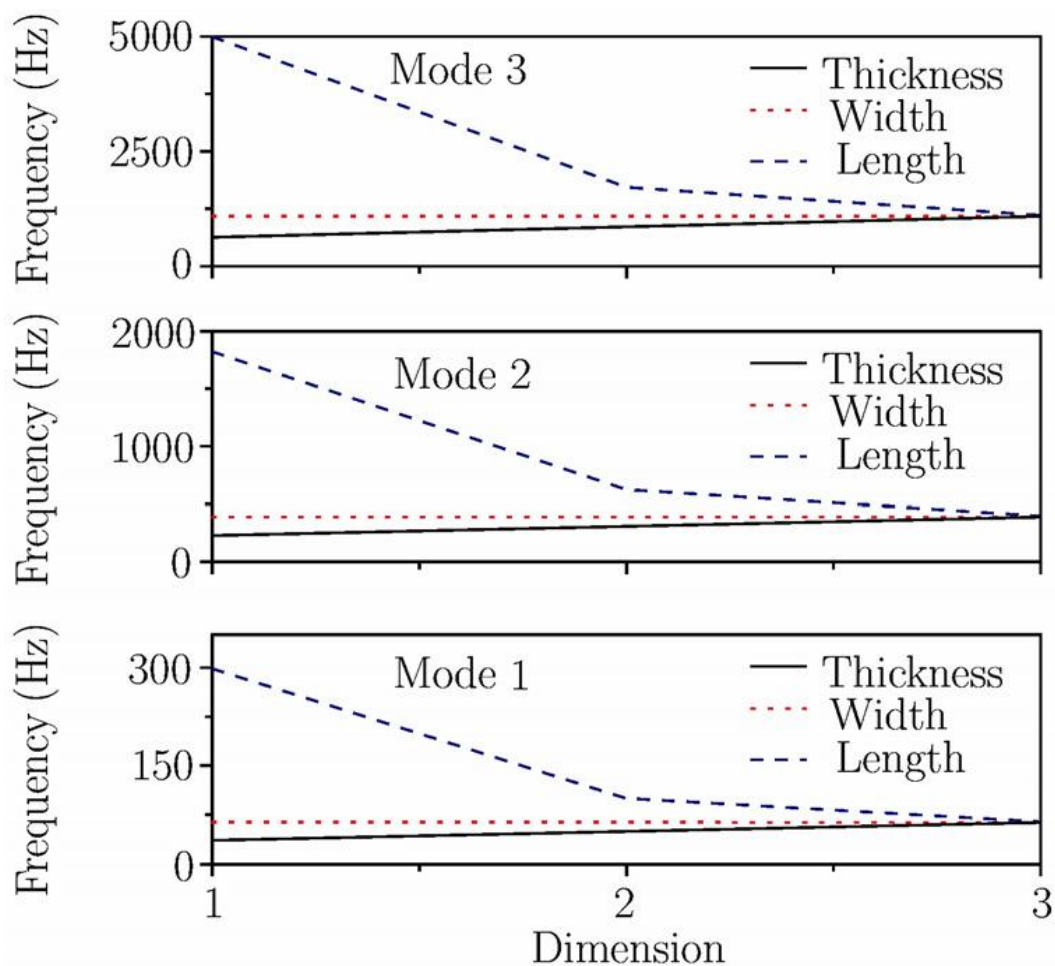
και το πίνακα ότι οι νευρο-ασαφείς προβλέψεις βρίσκονται πολύ κοντά στις πειραματικές τιμές. Όταν τα αποτελέσματα αναλύθηκαν περαιτέρω, φάνηκε ότι τα αποτελέσματα μοντελοποίησης είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα για όλα τα σύνολα δεδομένων και αυτό δείχνει την εξαιρετική ικανότητα πρόβλεψης του ANFIS.

Beam	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Material
1	760	25	25	Steel
2	760	36	36	Steel
3	760	44	44	Steel
4	Multiple-stepped beam shown in Fig.6 and Table 1 (numerical analysis (FEA))			Steel
5	Multiple-stepped beam shown in Fig.6 and Table 1 ( experimental test )			Steel

Πίνακας 3 : Γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες των δοκών



Εικόνα 31 : Η επίδραση των διαστάσεων στη συχνότητα των σχημάτων τριών λειτουργιών



Εικόνα 32 : Η συμπεριφορά της επίδρασης των διαστάσεων στα σχήματα τριών λειτουργιών

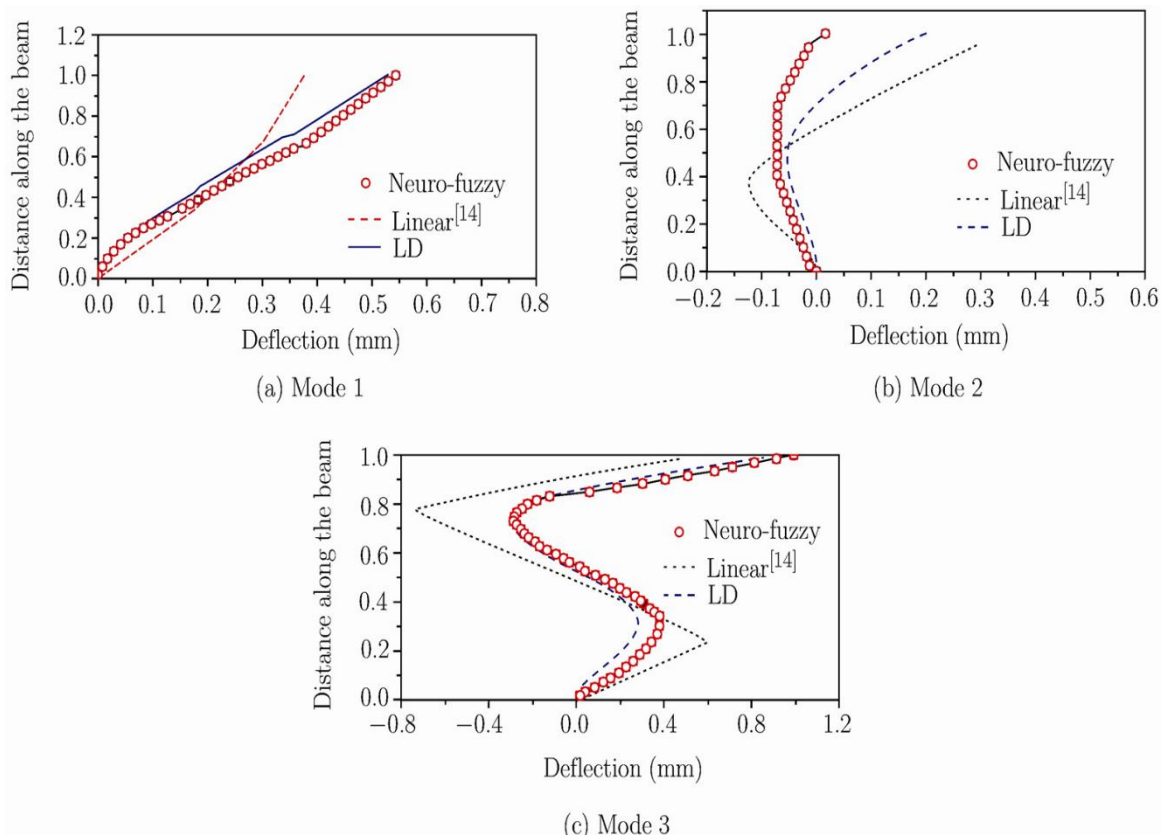
Dimension	Change length			Change width			Change thickness		
	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
1	350	44	44	760	25	44	760	44	25
2	604	44	44	760	36	44	760	44	36
3	760	44	44	760	44	44	760	44	44

Πίνακας 4: Διαστάσεις των δοκών



Mode shape	Frequency (Hz)	Frequency (Hz)	Frequency (Hz)	Frequency (Hz)
	Experimental	ANFIS	LD	Linear <sup>[14]</sup>
1	92.331	92.329	88.98	112.54
2	335.466	335.445	350.23	329.63
3	933.196	933.212	946.3	860.23

Πίνακας 5 : Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προβλεπόμενης (ANFIS) με πειραματικές και αριθμητικές τιμές.



Εικόνα 33 : Σχήματα τριών λειτουργιών δοκού πολλαπλών βαθμίδων

### 5.3.8 Συμπεράσματα

Ο ANFIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς των δοκών. Το νευρο-ασαφές μοντέλο είναι πιο ευέλικτο με περισσότερες επιλογές από την ενσωμάτωση του ασαφούς χαρακτήρα του πραγματικού κόσμου. Παρέχει ένα γενικό πλαίσιο για το συνδυασμό των ικανοτήτων των

νευρωνικών Δικτύων και των ασαφών συστημάτων. Ο ANFIS δίνει χρήσιμες εκτιμήσεις των δυναμικών χαρακτηριστικών των δοκών. Το συμπέρασμα αυτό υποστηρίζεται από τις τιμές των RMSE και R. Το προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμού χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία για τη μοντελοποίηση της δυναμικής ανάλυσης της συμπεριφοράς δοκού με πολλαπλές βαθμίδες που υπόκειται σε μεγάλες μετατοπίσεις και αξονικά φορτία. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να κάνει οποιαδήποτε πρόβλεψη χωρίς τη βάση δεδομένων.

## **5.4 Εφαρμογή του ANFIS για τον έλεγχο του ρυθμού ροής του νερού σε ένα μύλο επεξεργασίας ακατέργαστου μίγματος κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου.[13]**

### **5.4.1 Εισαγωγή**

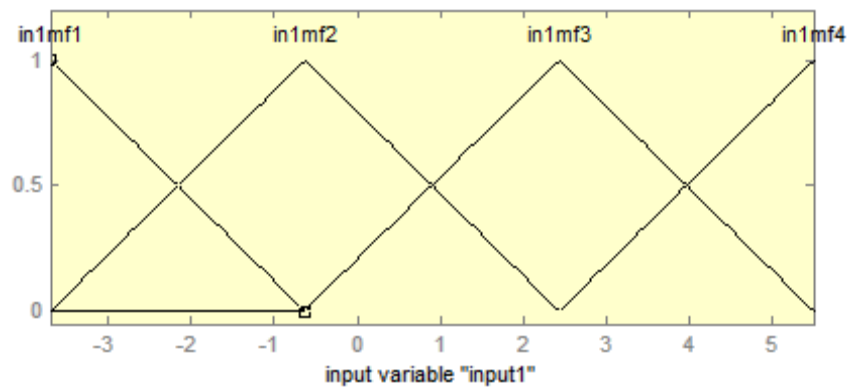
Η παραγωγή τσιμέντου είναι μία από τις πλέον θεμελιώδεις βιομηχανίες. Το τσιμέντο μπορεί να βρεθεί σχεδόν παντού στην καθημερινή ζωή. Λόγω αύξηση του πληθυσμού, οι διάφορες κατασκευαστικές δραστηριότητες αυξάνονται μέρα με τη μέρα. Ως αποτέλεσμα, η ζήτηση στην αγορά του τσιμέντου αυξάνεται συνεχώς. Η ινδική βιομηχανία τσιμέντου είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός τσιμέντου στον κόσμο, ακριβώς πίσω από την Κίνα, μπροστά από τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία. Το τσιμέντο είναι συνήθως κατασκευασμένο από ασβεστόλιθο και άργιλο ή σχιστόλιθο. Η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από την εξόρυξη, άλεση σε rawmill(μύλος επεξεργασίας ακατέργαστου μίγματος), θέρμανση σε κλίβανο, ψύξη σε κλίνκερ, άλεση και τέλος συσκευασία και φόρτωση . Η ποιότητα του παραγόμενου τσιμέντου εξαρτάται από τις πρώτες ύλες αλλά και από την επεξεργασία. Το σύστημα ελέγχου της παραγωγής τσιμέντου ελέγχει τη διαδικασία αυτή ώστε να παράγεται η μέγιστη ποσότητα του τσιμέντου με προκαθορισμένη ποιότητα και ελάχιστο κόστος. Το ενδιαφέρον μας είναι να ελέγχεται ο ρυθμός ροής του νερού σε rawmills.

### **5.4.2 Ανάπτυξη του ελεγκτή ANFIS**

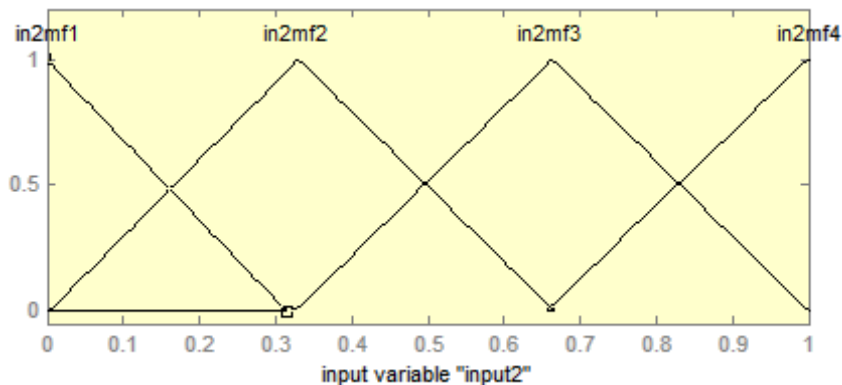
Ο ελεγκτής για το σύστημα ελέγχου του ρυθμού ροής έχει αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας ANFISeditGUI με δύο εισόδους και μία έξοδο. Οι δύο εισοδοί που αντιστοιχούν στις



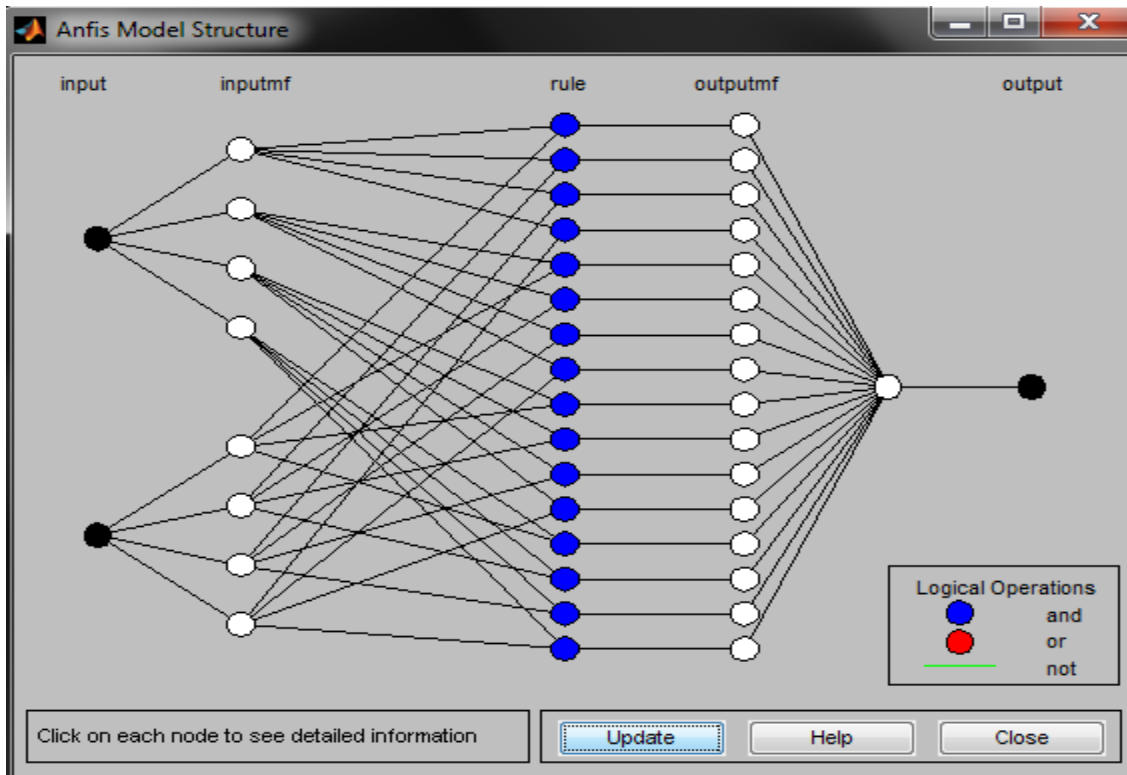
αλλαγές της επιθυμητής τιμής και της διαφοράς μεταξύ της αξίας της διαδικασίας και του σημείου ρύθμισης παίρνουν το όνομα «Εισόδος1» και «Είσοδος2» αντίστοιχα. Η έξοδος αντιστοιχεί στο ρυθμό ροής του νερού και παίρνει το όνομα "έξοδος". Καθεμία από τις δύο εισόδους έχουν τέσσερις τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής. Η έξοδος έχει δεκαέξι συναρτήσεις συμμετοχής. Στη συνέχεια το παραγόμενο FIS εκπαιδεύεται για ένα σύνολο δεδομένων εισόδου-εξόδου. Οι συναρτήσεις συμμετοχής της «Εισόδου1» και «Εισόδου2» λαμβάνουν μια κλίμακα από  $-4^{\circ}\text{C}$  -  $6^{\circ}\text{C}$  και  $0^{\circ}\text{C}$  -  $1^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα. Η αρχιτεκτονική του ANFIS για το σύστημα ελέγχου ρυθμού ροής φαίνεται στην εικόνα 36. Οι κανόνες του νευρο-ασαφούς ελεγκτή δίνονται στον Πίνακα 5.



Εικόνα 34 : Οι συναρτήσεις συμμετοχής της «Εισόδου1»



Εικόνα 35 : Οι συναρτήσεις συμμετοχής της «Εισόδου2»



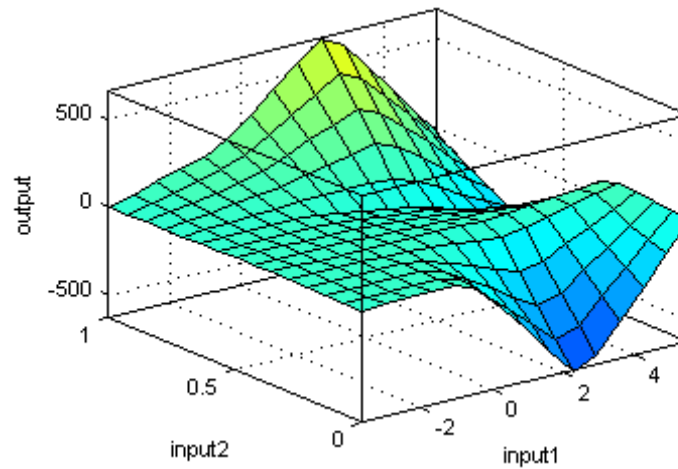
Εικόνα 36 : Αρχιτεκτονική του νευρο-ασαφούς συστήματος

S. No.	Input1	Input2	Output
1.	In1mf1	In2mf1	Out1mf1
2.	In1mf1	In2mf2	Out1mf
3.	In1mf1	In2mf3	Out1mf
4.	In1mf1	In2mf4	Out1mf
5.	In1mf2	In2mf1	Out1mf
6.	In1mf2	In2mf2	Out1mf
7.	In1mf2	In2mf3	Out1mf
8.	In1mf2	In2mf4	Out1mf
9.	In1mf3	In2mf1	Out1mf
10.	In1mf3	In2mf2	Out1mf
11.	In1mf3	In2mf3	Out1mf
12.	In1mf3	In2mf4	Out1mf
13.	In1mf4	In2mf1	Out1mf
14.	In1mf4	In2mf2	Out1mf
15.	In1mf4	In2mf3	Out1mf
16.	In1mf4	In2mf4	Out1mf

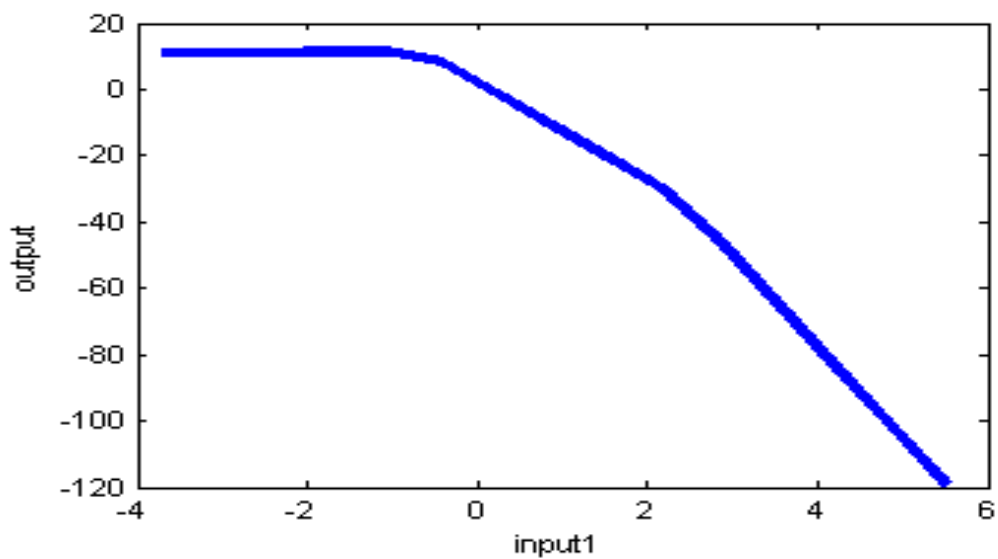
Πίνακας 5 : Κανόνες

### 5.4.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

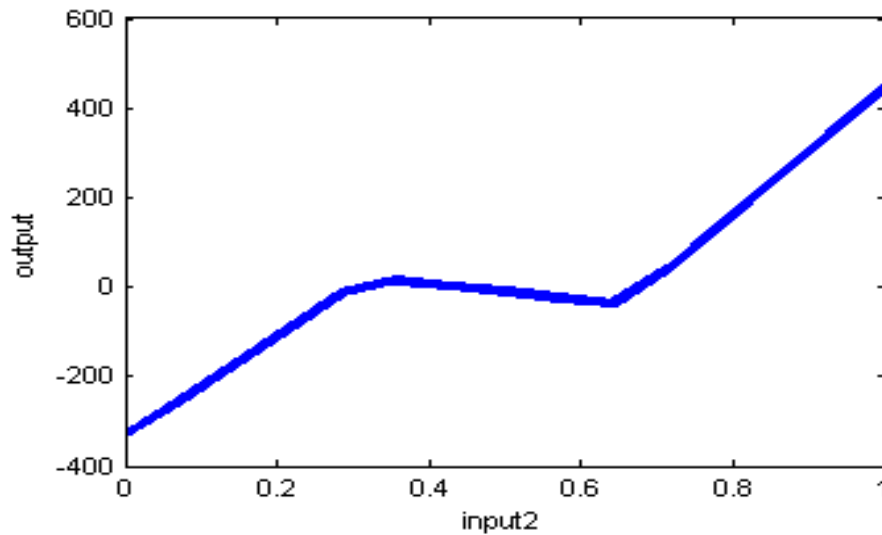
Η προβολή της επιφάνειας φαίνεται στην εικόνα 37. Χρησιμοποιείται για να εξετάσει σε τι βαθμό εξαρτάται η έξοδος από τις δύο εισόδους. Η εικόνα 38 και 39 δείχνουν την εξάρτηση της εξόδου από την «Είσοδο1» και «Είσοδο2» ξεχωριστά.



Εικόνα 37: Η προβολή της επιφάνειας του ελεγκτή



Εικόνα 38 : Η γραφική παράσταση της «Εισόδου1» και της εξόδου



Εικόνα 39 : Η γραφική παράσταση της «Εισόδου2» και της εξόδου

Από αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο ελεγκτής ANFIS παρέχει ένα πολύ ομαλό έλεγχο για τον έλεγχο του ρυθμού ροής του νερού. Από την καμπύλη στην εικόνα 38 είναι προφανές ότι ο ρυθμός ροής του νερού μειώνεται με την αύξηση της διαφοράς μεταξύ του παρόντος και του προηγούμενου σημείου ρύθμισης θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει επειδή όσο η ονομαστική τιμή αυξάνεται τόσο μειώνεται ο ρυθμός της ροής. Από την καμπύλη στην εικόνα 39 είναι προφανές ότι ο ρυθμός ροής του νερού αυξάνεται με την αύξηση της διαφοράς μεταξύ πραγματικής θερμοκρασίας και τις απαιτούμενης θερμοκρασίας δηλαδή αν η πραγματική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη θερμοκρασία τότε η ταχύτητα ροής θα πρέπει επίσης να αυξηθεί ώστε να διατηρηθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία.

Ως εκ τούτου, το σύστημα μπορεί εύκολα και αποτελεσματικά να ελεγχθεί με τη χρήση του ANFIS.

#### **5.4.4 Συμπεράσματα**

Το μοντέλο ANFIS παρέχει ένα αποτελεσματικό έλεγχο για το σύστημα ελέγχου ροής σε ένα rawmill. Ο νευρο-ασαφής αλγόριθμος είναι ανώτερο από τον αλγόριθμο ασαφούς λογικής λόγω της προσαρμοστικότητας και τη μάθησης.

## **5.5 Παρακολούθηση της κατάστασης εύρωστης βλάβης πρόβολου άξονα με τη χρήση Πειραματικού και νευρο-ασαφούς συστήματος συμπερασμού (ANFIS) [14]**

### **5.5.1 Εισαγωγή**

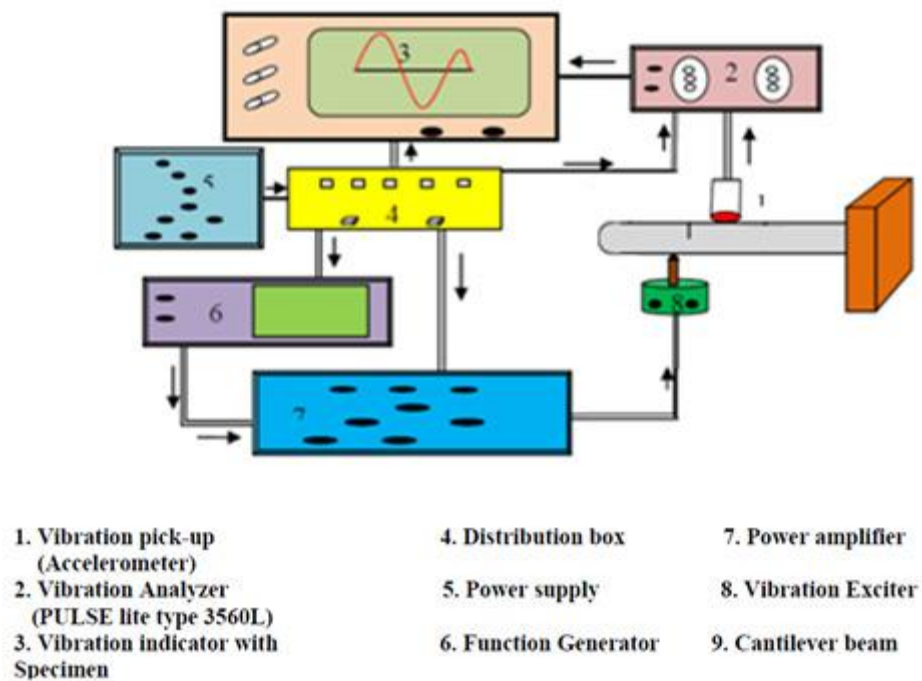
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή εξετάζεται ένας πρόβολου άξονας με το τμήμα εγκάρσια, ο οποίος ενεργεί ως ένα δομικό μέλος σε διάφορες μηχανολογικές κατασκευές. Οι δυναμικές αποκρίσεις του προβολου άξονα έχουν μετρηθεί πριν υποστεί ζημιά, η οποίες ενεργούν ως αναφορές. Στη συνέχεια, προκλήθηκαν πολλαπλές ζημιές και γίνεται ανάλυση κάθε σταδίου που έχουν προκληθεί ζημιές με στόχο την εξεύρεση επαρκούς ανταπόκρισης μεταξύ της δυναμικής συμπεριφοράς και της παρουσίας των ρωγμών στη δομή. Το μοντέλο υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας λογισμικό ανάλυσης ANSYS. Ένα νέο μοντέλο πρόβλεψης της ζωής αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τον ANFIS. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίθηκαν με το αποτελέσματα του πειράματος και της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

### **5.5.2 Πειραματική Ανάλυση**

Η πειραματική ανάλυση έχει διεξαχθεί για τη μέτρηση των φυσικών συχνотήτων και τα σχήματα λειτουργία της ραγισμένης δομής του άξονα. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 40 (α). Τα πειράματα έχουν εκτελεστεί χρησιμοποιώντας την ανεπτυγμένη πειραματική διάταξη (εικόνα 40) για τη μέτρηση της δυναμικής απόκρισης (φυσικές συχνότητες και πλάτος της δόνησης) του προβολου άξονα. Ο ραγισμένος και μη ραγισμένος άξονας δονείται στην 1η, 2η και 3η λειτουργία της δόνησης με τη χρήση ενός διεγέρτη και μιας γεννήτριας λειτουργίας. Τα χαρακτηριστικά των δονήσεων αξόνων που αντιστοιχούν στην 1η, 2η και 3η λειτουργία της δόνησης έχουν καταγραφεί με την τοποθέτηση ενός επιταχυνσιόμετρου κατά μήκος των αξόνων.



Εικόνα 40(α) : Πειραματική διάταξη



Εικόνα 40(β) : Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής εγκατάστασης

### 5.5.3 Πειραματικές Διαδικασίες και η αρχιτεκτονική τους

Η πειραματική ανάλυση γίνεται με τη μέτρηση της δυναμικής απόκρισης του μη ραγισμένου και ραγισμένου δείγματος άξονα χάλυβα. Οι ρωγμές σε διάφορες τοποθεσίες με διαφορετικά βάθη στους άξονες εισήχθησαν από το μηχάνημα ηλεκτρικής εκκένωσης κάθετα προς το διαμήκη άξονα του πρόβολου άξονα. Το δείγμα της δοκιμής είναι κατασκευασμένο από μαλακό χάλυβα 1000 mm μήκους και διαμέτρου 10 mm. Ο πρόβολου άξονας διεγέρθηκε στους τρεις τρόπους δόνησης και η αντίστοιχες φυσικές συχνότητες και σχήματα λειτουργίας καταγράφηκαν από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τέλος, η ανάλυση των παραμέτρων δόνησης από τον άθικτο και ραγισμένο άξονα έγιναν από το λογισμικό NV. Οι ραγισμένοι άξονες με διαφορετικά βάθη και τοποθεσίες ρωγμών δοκιμάστηκαν για να ληφθεί το σχήμα λειτουργίας και η ιδιοσυχνότητα. Ο πίνακας 6 δείχνει το αποτέλεσμα που προέκυψαν από την πειραματική ανάλυση των διαφόρων πρόβολου αξόνων σε διαφορετικές τοποθεσίες και βάθη.

Location of crack in mm (L <sub>i</sub> )	Depth in mm (d <sub>i</sub> )	Modal frequency of un-cracked shaft (Hz)			Frequency of cracked shaft (Hz)		
		f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>
50	1	24.78	155.25	434.51	24.77	155.20	434.34
150	1	24.78	155.25	434.51	24.77	155.21	434.39
250	1	24.78	155.25	434.51	24.78	155.22	434.35
350	1	24.78	155.25	434.51	24.77	155.19	434.29
450	1	24.78	155.25	434.51	24.78	155.17	434.39
550	1	24.78	155.25	434.51	24.78	155.17	434.37
650	1	24.78	155.25	434.51	24.78	155.17	434.26
750	1	24.78	155.25	434.51	24.78	155.21	434.30
850	1	24.78	155.25	434.51	24.78	155.23	434.39
950	1	24.78	155.25	434.51	24.78	155.23	434.42

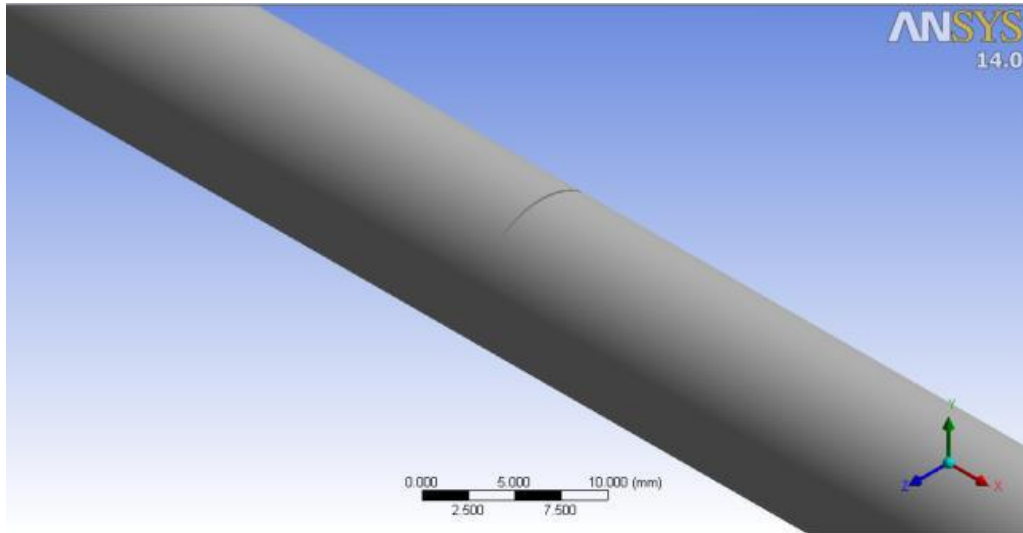
Πίνακας 6 : Κατανομή συχνοτήτων του μη ραγισμένου και ραγισμένου άξονα

### 5.5.4 Ανάλυση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

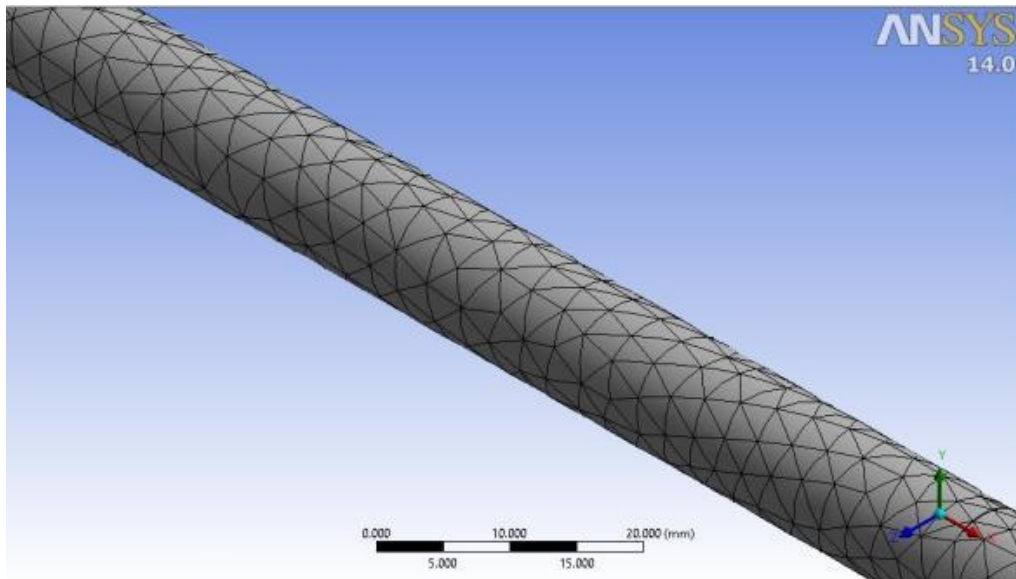
Για τον ορισμό και την πρόσβαση σε πρότυπα υλικού σε ένα σύστημα ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε engineering datacell. Οι ιδιότητες του υλικού φαίνονται στον Πίνακα 2. Κατά το σχεδιασμό του πρόβολου άξονα διαμέτρου 10 mm και μήκους 1000 mm έλκεται και μια εγκάρσια ρωγή πλάτους 0,5 mm και βάθους 1 mm δημιουργείται σε διαφορετική θέση. Το σχήμα 41 (α) δείχνει το μοντέλο του πρόβολου άξονα. Για το πλέγμα χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά στοιχεία πανομοιότυπου μεγέθους και



σχήματος. Το σχήμα 41(b) δείχνει την σύμπλεξη του πρόβολου άξονα. Στην ανάλυση λαμβάνονται οι παράμετροι του τρόπου εκτέλεσης, όπως οι φυσικές συχνότητες και τα σχήματα λειτουργίας. Οι φυσικές συχνότητες που λαμβάνονται από τον πρόβολο άξονα στην άθικτη και ζημιωμένη κατάσταση απεικονίζονται στον πίνακα 6. Η διαφορά στα σχήματα λειτουργίας μεταξύ της πειραματικής και της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων δίνονται στην εικόνα 42 και 43.



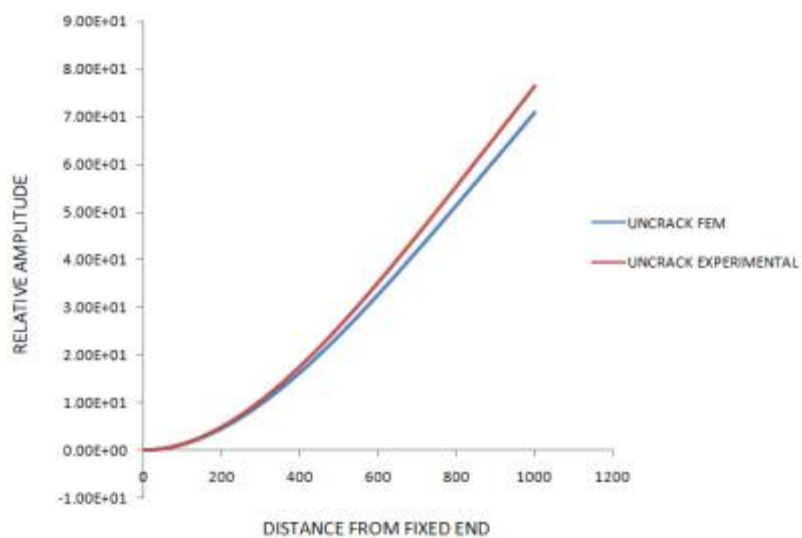
Εικόνα 41(α) : Μοντελοποίηση του άξονα στο ANSYS



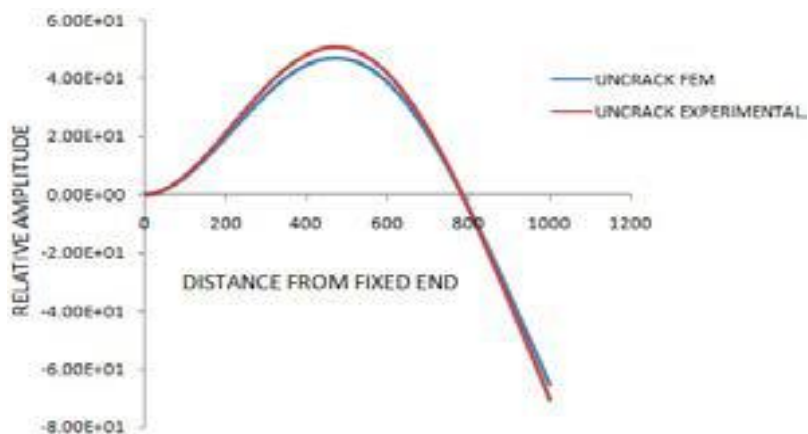
Εικόνα 41(β) : Το πλέγμα του πρόβολου άξονα



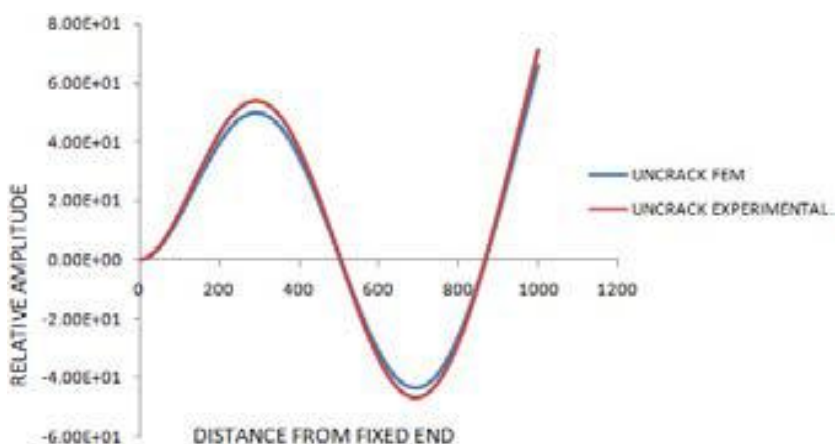
α)



β)

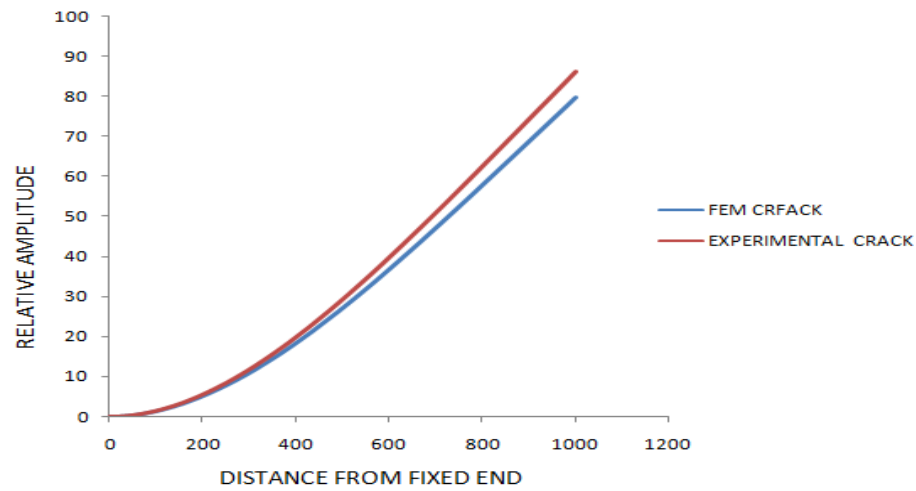


γ)

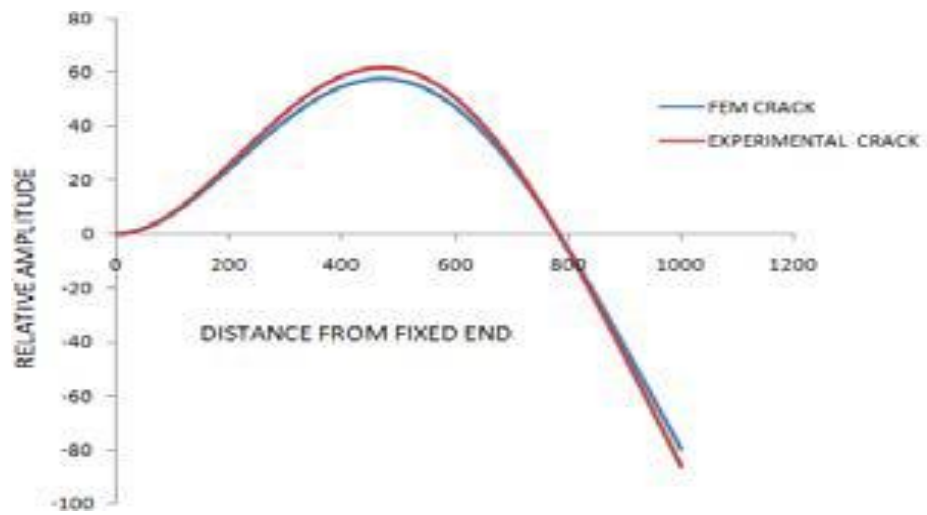


Εικόνα 42 : Σύγκριση των σχημάτων λειτουργίας των μη ραγισμένων πρόβολων αξόνων  
(α) Πρώτη λειτουργία, (β) Δεύτερη λειτουργία και (γ) Τρίτη λειτουργία

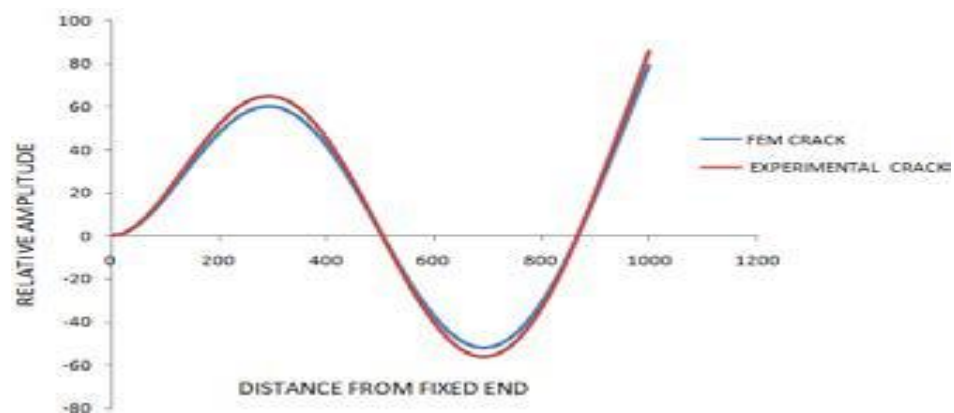
α)



β)



γ)



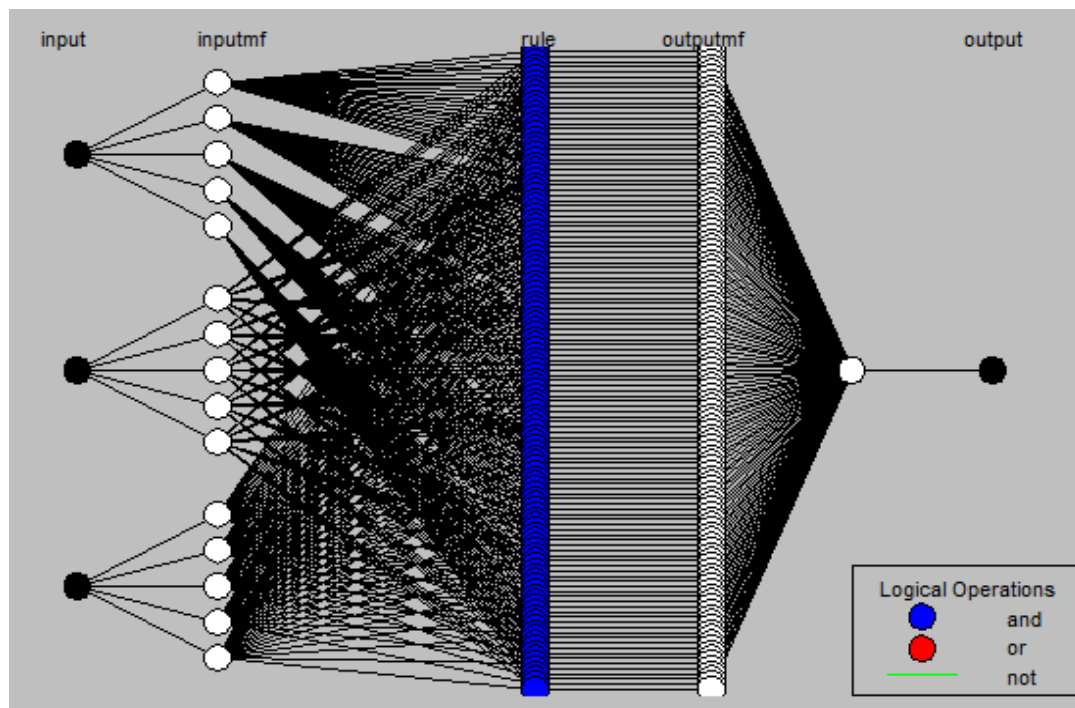
Εικόνα 43 : Σύγκριση των σχημάτων λειτουργίας των ραγισμένων πρόβολων αξόνων :  
(α) Πρώτη λειτουργία, (β) Δεύτερη λειτουργία και (γ) Τρίτη λειτουργία

Location in mm ( $L_i$ )	Depth in mm ( $d_i$ )	Frequency of un-cracked shaft (Hz)			Frequency of cracked shaft (Hz)		
		$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
50	1	22.947	143.75	402.32	22.938	143.7	402.17
150	1	22.947	143.75	402.32	22.934	143.71	402.21
250	1	22.947	143.75	402.32	22.94	143.72	402.18
350	1	22.947	143.75	402.32	22.939	143.69	402.12
450	1	22.947	143.75	402.32	22.941	143.68	402.21
550	1	22.947	143.75	402.32	22.942	143.68	402.19
650	1	22.947	143.75	402.32	22.942	143.68	402.09
750	1	22.947	143.75	402.32	22.942	143.71	402.13
850	1	22.947	143.75	402.32	22.943	143.73	402.21
950	1	22.947	143.75	402.32	22.941	143.73	402.24

Πίνακας 7 : Κατανομή συχνοτήτων του μη ραγισμένου και ραγισμένου άξονα που

### **5.5.5 Η δομή του ANFIS**

Στην παρούσα εργασία η απεικόνιση της δομής του ANFIS το οποίο είναι ένα πρώτης τάξης τύπου Takagi-Sugeno που χρησιμοποιείται δίνεται στην εικόνα 44. Το δίκτυο υπολογίζει την έξοδο του συστήματος για τα δεδομένα στοιχεία εισόδου μέσα από ασαφή κανόνες τύπου εαν-τότε (if-then). Οι βέλτιστες παράμετροι του μοντέλου καθορίζονται από τη μέθοδο της οπισθοδιάδοσης και από αλγορίθμους υβριδικής μάθησης.



Εικόνα 44 : Η δομή του ANFIS

### 5.5.6 Σχεδιασμός του Μοντέλου ANFIS για την Πρόβλεψη των ρωγμών

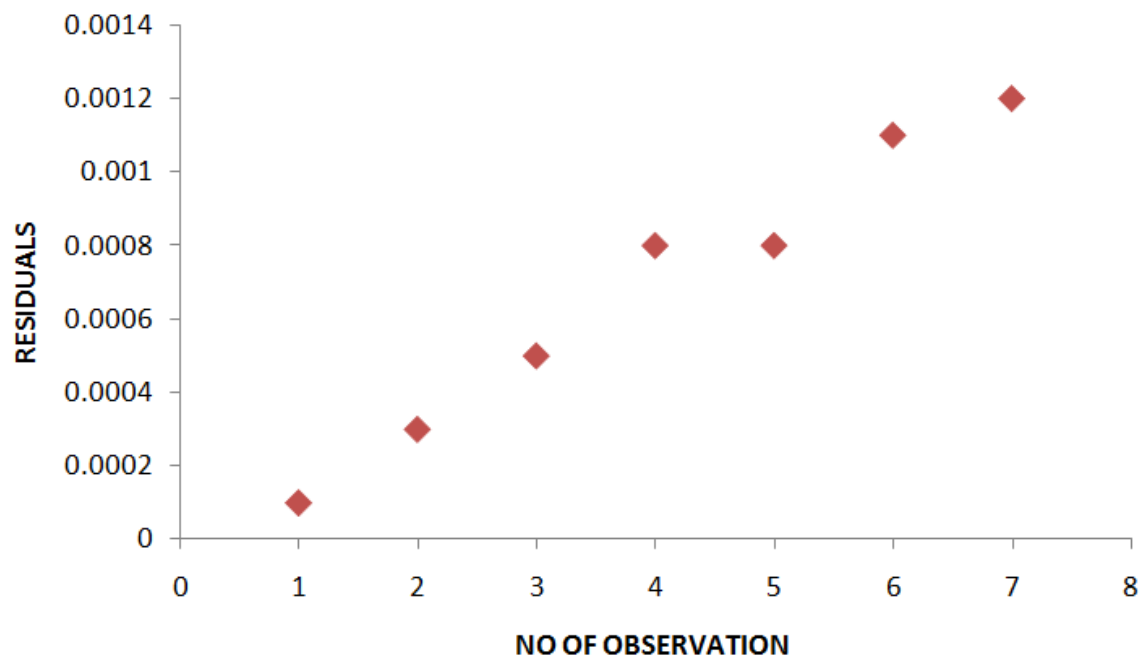
Η πιο θεμελιώδης αρχή της ANFIS είναι ότι τα δεδομένα εισόδου / εξόδου πρέπει να ομαλοποιηθούν (προ-επεξεργασίας) πριν την εφαρμογή του μοντέλου για να προσκομηθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Εδώ οι φυσικές συχνότητες που λήφθηκαν σε τρεις λειτουργίες θεωρήθηκαν ως μεταβλητές εισόδου, όπου η θέση ρωγμών ελήφθη ως μεταβλητή εξόδου. Από τα δέκα σύνολα δεδομένων τρία σύνολα κρίθηκαν ως δεδομένα δοκιμών και τα άλλα σύνολα δεδομένων θεωρήθηκαν ως δεδομένα εκπαίδευσης.

### 5.5.7 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Για να εφαρμοστεί το μοντέλο ANFIS στην παρούσα εργασία, ένα πρόγραμμα υπολογιστή διεξήχθη υπό το Περιβάλλον της MATLAB με χρήση του Fuzzy Toolbox Logic. Οι αριθμοί των συναρτήσεων συμμετοχής επιλέχθηκαν να είναι  $5 \times 5 \times 5 = 125$ . Η προσαρμογή της παραδοχής και οι συνακόλουθοι παραμέτροι έγιναν σε batch mode που βασίζονται στον αλγόριθμο υβριδικής μάθησης. Το μοντέλο έχει εκπαιδευτεί για 4000 εποχές μέχρι να επιτευχθεί η δεδομένη ανοχή. Με βάση τα στοιχεία του τρόπου εκτέλεσης των συχνοτήτων, το εκπαιδευμένο μοντέλο ANFIS δοκιμάζεται για τα σύνολα επικύρωσης και η προβλεπόμενη θέση ρωγμής και το βάθος ρωγμής συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν πειραματικά και από το μοντέλο ANFIS είναι πολύ κοντά. Η εικόνα 45 δείχνει την υπολειπόμενη πλοκή για τη θέση ρωγμής. Τα υπολείμματα είναι η διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης εξόδου από το μοντέλο ANFIS και τις πραγματικές τιμές της τοποθεσίας της ρωγμής. Αν τα σημεία στην υπολειπόμενη πλοκή είναι τυχαία διασκορπισμένα γύρω από τον οριζόντιο άξονα, το μοντέλο πρόβλεψης θεωρείται κατάλληλο για τα δεδομένα, δηλαδή δεν υπάρχει μετατόπιση στα δεδομένα. Στην ενότητα αυτή η εναπομείναντα πλοκή λαμβάνεται για τα δεδομένα εκπαίδευσης και τον έλεγχο της θέσης της ρωγμής. Δείχνει ότι η κατανομή των υπολειμμάτων των τοποθεσιών των ρωγμών είναι στο θετικό άξονα της πλοκής. Τα κατάλοιπα βρίσκονται μεταξύ 0,0001 - 0,0012 και διανέμονται πάνω από τη θετική πλευρά της γραμμής. Αυτό δείχνει ότι το μοντέλο πρόβλεψης είναι κατάλληλο για τη μελέτη.

Modal frequency (Hz)			Crack location obtained from ANFIS (mm)	Crack depth obtained from ANFIS (mm)
Mode I	Mode II	Mode III		
22.938	143.7	402.17	49.9999	1
22.934	143.71	402.21	149.9997	1
22.94	143.72	402.18	249.9995	1
22.939	143.69	402.12	349.9992	1
22.941	143.68	402.21	449.9992	1
22.942	143.68	402.19	549.9989	1
22.942	143.68	402.09	649.9988	1

Πίνακας 8 : Κατανομή συχνοτήτων, τοποθεσία ρωγμών και βάθος ρωγμών που λαμβάνονται από το μοντέλο ANFIS



Εικόνα 45: Η υπολειπόμενη πλοκή για τη θέση των ρωγμών

### 5.5.8 Συμπεράσματα

Κατά την τρέχουσα έρευνα, αντιμετωπίστηκε ο εντοπισμός και η ποσοτικοποίηση των ρωγμών που υπάρχουν στο δομικό μέλος από τη μετρούμενη δυναμική απόκριση. Κατά την ανάλυση, η αναλυτική μέθοδος, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και η πειραματική μέθοδος έχουν υιοθετηθεί για να προσομοιώσουν την πραγματική

κατάσταση λειτουργίας. Οι φυσικές συχνότητες και τα σχήματα λειτουργίας σε διαφορετικούς τρόπους δόνησης, τα οποία είναι γνωστά ως ευαίσθητοι δείκτες δομικής ακεραιότητας, έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη του ANFIS για την πρόβλεψη των θέσεων των ρωγμών και το βάθος τους. Οι πειραματικές και οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων έχουν παρουσιαστεί για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών (τροπική συχνότητες, σχήματα λειτουργίας) της απόκρισης του συστήματος που συνδέονται άμεσα με την παρουσία των εγκάρσιων ρωγμών. Τα βάθη των ρωγμών έχουν ουσιώδη επίδραση στα σχήματα λειτουργίας των δομών δόνησης ακόμη και με την παρουσία μικρών βάθων. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, βρέθηκε ότι η προτεινόμενη τεχνική ANFIS προβλέπει τις σχετικές θέσεις ρωγμών ταχύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια από την ανάλυση των θεωρητικών και των πεπερασμένων στοιχείων.

## 6. Συμπεράσματα

Ο ANFIS είναι ένας από τους καλύτερους συνδυασμούς των νευρωνικών και των ασαφών συστημάτων αφού παρέχει ομαλότητα όπως ένα ασαφές σύστημα και ικανότητα προσαρμογής μέσω της διαδικασίας μάθησης που παρέχουν τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. Παρόλα αυτά, συναντά κάποιους περιορισμούς, όπως είναι για παράδειγμα η αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, αλλά και η μία μόνο έξοδος. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των εφαρμογών που παρατέθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, προκύπτει ότι οι προβλέψεις των νευροασαφών ελεγκτών είναι ταχύτερες και πιο ακριβείς από άλλες μεθόδους. Επίσης, αυτό το είδος ελέγχου είναι απλό στην εφαρμογή του, καθώς εξαλείφει την περίπλοκη μαθηματική διαδικασία μοντελοποίησης και χρησιμοποιώντας αντί αυτού ένα σύνολο κανόνων ελέγχου, με μόνη απαραίτητη προϋπόθεση τη δημιουργία μιας κατάλληλα ορισμένης βάσης δεδομένων ώστε να γίνει η οποιαδήποτε πρόβλεψη. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα όμως του ANFIS στις συγκεκριμένες εφαρμογές σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι η ικανότητα να χειρίζεται τη μη γραμμική συμπεριφορά των συστημάτων. Σε γενικές γραμμές, αυτό το είδος της μοντελοποίησης λειτουργεί αποτελεσματικά εάν τα δεδομένα εκπαίδευσης που παρουσιάζονται στο σύστημα για την εκπαίδευση (εκτίμηση) των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής είναι πλήρως αντιπροσωπευτικά των χαρακτηριστικών των δεδομένων που το εκπαιδευμένο ασαφές σύστημα συνεπαγωγής (FIS) προορίζεται να μοντελοποιήσει.

## 7. Βιβλιογραφία

- [1] Ανθούλα Χ. Βασιλείου. “Ανάπτυξη αλγορίθμου βασισμένου στην ασαφή λογική για τον καθορισμό των εκμεταλλεύσιμων λιγνιτικών στρωμάτων”. Πτυχιακή εργασία(2004).
- [2] Φαίδων-Ιωσήφ Ε. Νενεδάκης. “Αρχιτεκτονική Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή σε VHDLκαιΥλοποίηση σε FPGA”. Πτυχιακή εργασία(2005).
- [3]Οικονόμου Παναγιώτης Δρ. Ε. Παπαγεωργίου. “ΑσαφήςΛογική”.  
Σημειώσειςμαθήματος.
- [4]YigangShi, PCSen.Queen University. “A new defuzzification method for fuzzy control of Power Converters(2000)..
- [5]Dave Anderson, George McNeill“Artificial Neural Networks Technology”, (1992)
- [6]Rudolf Kruse, Jorg Gebhardt, Frank Klawonn, “Foundations of Fuzzy Systems” (1994)
- [7]Shahriar Jahan Hossain, Nafis Ahmad. “Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) basedsurface roughness prediction model for ball end millingoperation”(2012).
- [8]Jang, J.-S. R.,“ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems” (1993).
- [9]Raul Rojas,“Neural Networks - A Systematic Introduction” (1996).
- [10] Praveen Battula,Vijay Kumar,Ravi Chandra Tatikond “Control of inverted pendulum using ANFIS”,conference paper(2010),
- [11]Varun Kumar, Amit Kumar, International Journal of R&D in Engineering Science and Management vol. 1,issue I (2014)
- [12]Imad O. Bachi, Nabeel Abdulrazzaq Zeng He, “Acta Mechanica Solida Sinica”, Vol. 27, No. 1, (2014)
- [13]Vandna Kansal, Amrit Kaur, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Volume 3, Issue 8, (2013)
- [14]Sandeep Dasa, Biswajit Nayakb, Saroj Kumar Sarangic, Dillip Kumar Biswald, 12th International Conference on Vibration Problems, ICOVP (2015)