

# Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

Ανάπτυξη νέυρο - ασαφούς συστήματος ελέγχου για την μείωση των  
ταλαντώσεων σε ραδιοτηλεσκόπιο

Διπλωματική εργασία

Του Μαρκουλάκη Ιωάννη

*Επιβλέπων: καθ. Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης*

Χανιά , Οκτώβριος 2018

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	1
Περίληψη .....	2
Εισαγωγή.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ραδιοτηλεσκόπιο.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δικτυώματα .....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφέλκυσμός και Θλίψη .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ασαφή σύνολα .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Δημιουργία ελεγκτών και διαδικασία προσομοίωσης .....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αριθμητικά Παραδείγματα .....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Σύγκριση με ασαφή έλεγχο .....	41
Συμπεράσματα.....	44
Βιβλιογραφία .....	46

## Ευχαριστίες

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, καθηγητή της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την συγκεκριμένη εργασία και για την πολύτιμη βοήθειά του.

Επίσης η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να είχε ολοκληρωθεί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του Δρ Γεωργίου Ταϊρίδη, διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ήταν πάντα διαθέσιμος να με βοηθήσει υπομονετικά να ξεπεράσω οποιαδήποτε δυσκολία βρισκόταν μπροστά μου.

Τον ευχαριστώ πολύ θερμά.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου η οποία ήταν πάντα δίπλα μου σε κάθε στάδιο της ζωής μου , βοηθώντας με να ξεπεράσω κάθε εμπόδιο .

## Περίληψη

Στη παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με ένα προκατασκευασμένο σύστημα ασαφούς ελεγκτή, το οποίο αφού παραμετροποιήσαμε, ελέγξαμε πως αντιδρά για διαφορετικές δυνάμεις που ασκούνται στο ραδιοτηλεσκόπιο, το οποίο υλοποιείται με την μορφή δικτυωμάτων δύο διαστάσεων. Επίσης ελέγξαμε τις ταλαντώσεις των δικτυωτών φορέων με χρήση ενός νευροασαφούς ελεγκτή .

Για την εργασία ήταν απαραίτητη η προσομοίωση της κατασκευής μας με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων, όπως επίσης έγινε χρήση του Simulink και του νευροασαφούς συστήματος συνεπαγωγής της Matlab, ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) .

Σκοπός της εργασίας ήταν η ρύθμιση ενός ελεγκτή ο οποίος ελαχιστοποιεί την ταλάντωση της κατασκευής μας από την εξωτερική δύναμη που της ασκούμε κάθε φορά έτσι ώστε να πετύχουμε την μικρότερη δυνατή παραμόρφωση και να αποτρέψουμε την θραύση ή την παραμόρφωση της.

## Εισαγωγή

Η ασφάλεια των κατασκευών είναι ίσως και η πρώτη προτεραιότητα των μηχανικών ανά τον κόσμο. Η ασφάλεια μια κατασκευής επηρεάζεται από διάφορους κινδύνους όπως σεισμοί, άνεμοι κλπ. από τους οποίους προκαλούνται εξωτερικές δυνάμεις οι οποίες δημιουργούν ταλαντώσεις στις κατασκευές με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα αστοχίας σε αυτές. Σκοπός του μηχανικού είναι να κατασκευάσει ένα σύστημα (κατασκευής - ελεγκτή) το οποίο να ελαχιστοποιεί την πιθανότητα αστοχίας, αντέχοντας όλες τις πιθανές διεγέρσεις που ίσως δεχτεί.

Η τεχνολογία πλέον έχει προχωρήσει και μπορούμε να προβλέψουμε την μηχανική συμπεριφορά μίας κατασκευής με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι μπορούμε να προβλέψουμε τυχόν σφάλματα της κατασκευής και να πάρουμε αποφάσεις ώστε να αποτρέψουμε αυτά τα σφάλματα.

Πέρα από τη χρησιμοποίηση μαθηματικών μεθόδων ελέγχου, οι οποίες συνήθως παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση γραμμικών νόμων υπό ορισμένες συνθήκες, είναι δυνατή η εφαρμογή μη γραμμικών ελεγκτών βασισμένων σε τεχνικές ασαφούς και νευροασαφούς λογικής.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του νευροασαφούς ελέγχου για την μείωση της ταλάντωσης του δικτυώματός μας . Το δικτύωμα που δουλέψαμε είναι ένα ραδιοτηλεσκόπιο με γνωστά τεχνικά χαρακτηριστικά. Ένας νευροασαφής ελεγκτής τύπου Sugeno υλοποιήθηκε και δοκιμάστηκε με σκοπό τον περιορισμό των ταλαντώσεων λόγω εξωτερικών φορτίων. Η αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης έγινε με την μέθοδο Newmark.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ραδιοτηλεσκόπιο

Το ραδιοτηλεσκόπιο είναι ένα όργανο το οποίο δέχεται ραδιοκύματα. Χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στην ραδιοαστρονομία, στην παρακολούθηση τεχνητών δορυφόρων ή διαστημικών σκαφών καθώς και στην συλλογή δεδομένων που αυτά μεταδίδουν στην Γη. Επειδή τα ραδιοφωνικά μήκη κύματος είναι πολύ μεγαλύτερα από εκείνα του φωτός τα ραδιοτηλεσκόπια είναι συνήθως μεγάλες κεραίες με παραβολικό σχήμα. (1)



Εικόνα 1. Διάταξη 28 ραδιοτηλεσκοπίων στο SanAgustin στο Νέο Μεξικό

### Ιστορική αναδρομή και η πρώτη ραδιοαστρονομική παρατήρηση

Η πρώτη ραδιοφωνική κεραία κατασκευάστηκε το 1931 από τον Καρλ Γιανσκι, ο οποίος ήταν φυσικός – ηλεκτρολόγος μηχανικός, για την ανίχνευση μια αστρονομικής πηγής ραδιοκυμάτων. Σκοπός του ήταν να βρει πηγές ραδιοθορύβου οι οποίες θα ήταν δυνατόν να επηρεάζουν την ασύρματη επικοινωνία. Η κεραία αυτή σχεδιάστηκε να δέχεται βραχεία κύματα με συχνότητα 20,5 MHz. Η κεραία αυτή είχε εγκατασταθεί πάνω σε μια ξύλινη περιστρεφόμενη βάση της οποίας η διάταξη είχε μήκος 29 μέτρα και ύψος 6 μέτρα. Με την βοήθεια ενός αναλογικού καταγραφικού σήματος ο Γιάνσκι κατάφερε να εντοπίσει τρία είδη σήματος. Τα δυο αφορούσαν μακρινές και τοπικές καταιγίδες και η τελευταία αφορούσε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ακτινοβολούσε ο αστερισμός του Τοξότη.

Ο Γκροτε Ρεμπερ ήταν ένας άλλος πρωτοπόρος της Ραδιοαστρονομίας, αφού κατασκεύασε το πρώτο ραδιοτηλεσκόπιο – πιάτο με διάμετρο 9 μέτρα το 1937 και επανέλαβε την έρευνα του Γιάνσκι. (1)

### **Το μεγαλύτερο ραδιοτηλεσκόπιο του κόσμου (FAST)**

Το 2011 ξεκίνησαν οι εργασίες του μεγαλύτερου ραδιοτηλεσκοπίου του κόσμου στην Κίνα (FAST), για το οποίο είχε γίνει πρόταση να κατασκευαστεί ήδη 17 χρόνια πριν. Η κατασκευή του διήρκεσε 5.5 χρόνια και κόστισε 180 εκ. δολάρια. Η διάμετρος των 500 μέτρων το κατέστησε το μεγαλύτερο ραδιοτηλεσκόπιο στον κόσμο, τον οποίο τίτλο προηγουμένως τον κατείχε από το 1964 του Αρεσίμπο στο Πουέρτο Ρίκο με διάμετρο 305 μέτρα.

Το ραδιοτηλεσκόπιο FAST βασίζεται στο ίδιο βασικό σχέδιο με αυτό του Αρεσίμπο στο Πουέρτο Ρίκο αλλά το FAST χρησιμοποιεί κινούμενα πάνελ τα οποία μεταβάλλουν το σχήμα της κεραίας και δημιουργούν ένα παραβολοειδές ευθυγραμμισμένο σήμα το οποίο κατευθύνεται σε όποια κατεύθυνση χρειάζεται στον ουρανό. Η διοίκηση της Κίνας σχεδιάζει μέχρι το 2022 να δημιουργήσει έναν διαστημικό σταθμό στην τροχιά της Γης. Αν αυτό ολοκληρωθεί η Κίνα θα είναι η τρίτη χώρα ανά το κόσμο μετά τις ΗΠΑ και Ρωσία που θα έχει θέσει σε τροχιά μόνιμο διαστημικό σταθμό. (2)



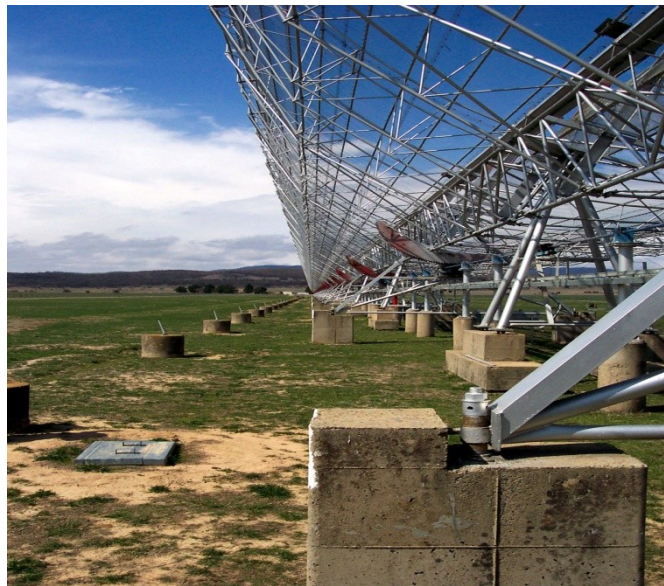
Εικόνα 2. Το μεγαλύτερο ραδιοτηλεσκόπιο του κόσμου (FAST) στην Κίνα



### Τύποι Ραδιοτηλεσκοπίων

Η ποικιλία και οι τύποι των κεραιών που χρησιμοποιούνται είναι μεγάλη, καθώς η περιοχή των ραδιοφωνικών συχνοτήτων είναι ευρεία στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Για συχνότητες 10 MHz ως 100 MHz χρησιμοποιούνται διατάξεις από κατευθυντήριες κεραίες παρόμοιες με τηλεοπτικές ή μεγάλοι σταθεροί ανακλαστήρες με κινητές εστίες. Οι επιφάνειες αυτών των ανακλαστήρων μπορούν να κατασκευαστούν με συρμάτινα πλέγματα λόγω του μεγάλου μήκους κυμάτων των σημάτων αυτών.



Εικόνα 3. Ανακλαστήρες σήματος από συρμάτινα πλέγματα

Για μικρότερα μήκη κύματος κυριαρχούν ραδιοτηλεσκοπία σε μορφή πιάτου. Η γωνιακή διακριτική ικανότητα μια κεραίας είναι η συνάρτηση του λόγου της διαμέτρου της προς το μήκος κύματος της παρατηρούμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Τα ραδιοτηλεσκοπία που ανιχνεύουν συχνότητες 100 MHz ως 1 GHz έχουν συνήθως διάμετρο μεγαλύτερη από 100 μέτρα ενώ όσα έχουν συχνότητα πάνω από 1 GHz έχουν διάμετρο από 3 ως 90 m. (1)



## Το πρώτο ραδιοτηλεσκόπιο στην Ελλάδα

Η εταιρία ΟΤΕ παραχώρησε τα αναγκαία εφόδια, μεταξύ άλλων και μια κεραία τηλεπικοινωνιών διαμέτρου 30 μέτρων έτσι ώστε μετά τον μετασχηματισμό της να δέχεται ραδιοκύματα από το σύμπαν. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε το πρώτο Κέντρο Ραδιοαστρονομίας στην Ελλάδα στην περιοχή Σκαρφεια Λοκρίδας, με διεθνείς προδιαγραφές των αντίστοιχων κέντρων του εξωτερικού.

Το σχέδιο είναι παράγωγο της ερευνητικής συνεργασίας των επιστημονικών υπευθύνων, Επίκουρης Καθηγήτριας Δρ Νεκταρίας Α.Β. Γκιζάνη, Ραδιοαστρονόμου από τη Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας (ΣΘΕΤ) του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, και του Επίκουρου Καθηγητή Δρ Γιώργου Π. Βελντέ, Φυσικού-Ραδιοηλεκτρολόγου, από το Ερευνητικό Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Εφαρμογών του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε. του ΤΕΙ Στερεάς Ελλάδας (ΕΕΤΣΕ) . (3)



Εικόνα 4. 3D Απεικόνιση του Ραδιοτηλεσκοπίου

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δικτυώματα

Τα δικτυώματα χρησιμοποιούνται συχνά σε προβλήματα της μηχανικής καθώς προσφέρουν αποτελεσματικές λύσεις, οι οποίες είναι ταυτόχρονα οικονομικές. Τα δικτυώματα είναι κατασκευασμένα από πολλαπλά μέρη τα οποία συνδέονται μεταξύ τους. Χρησιμοποιούνται συχνά για να κατασκευάσουμε σκεπές κτιρίων, βιομηχανικά υπόστεγα μεγάλων διαστάσεων και γέφυρες. (4)

Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι μέσω των δικτυωμάτων μπορεί να δημιουργηθεί μια κατασκευή μεγάλων διαστάσεων με μικρό βάρος. Αποτελείται από ένα σύνολο ράβδων, οι οποίες στα άκρα τους συνδέονται με αρθρώσεις τις οποίες ονομάζουμε κόμβους. (5)



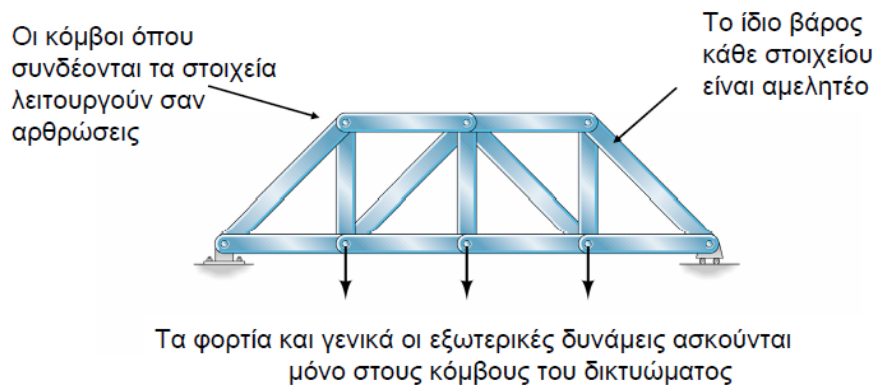
Εικόνα 5. Γέφυρα ως κατασκευή δικτυώματος

### Ορισμός

Δικτύωμα ονομάζουμε τον δομικό φορέα ο οποίος αποτελείται από έναν πεπερασμένο πλήθος υλικών σημείων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ράβδους. (5) Τα υλικά σημεία λέγονται κομβοί. Ένας κόμβος περιλαμβάνει τη σύνδεση δύο ή περισσοτέρων ράβδων του δικτυώματος. Αν όλοι οι κομβοί βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο τότε το δικτύωμα καλείται επίπεδο, ενώ σε διαφορετική περίπτωση καλείται χωρικό.

Η επίλυση των δικτυωμάτων βασίζεται στις εξής παραδοχές :

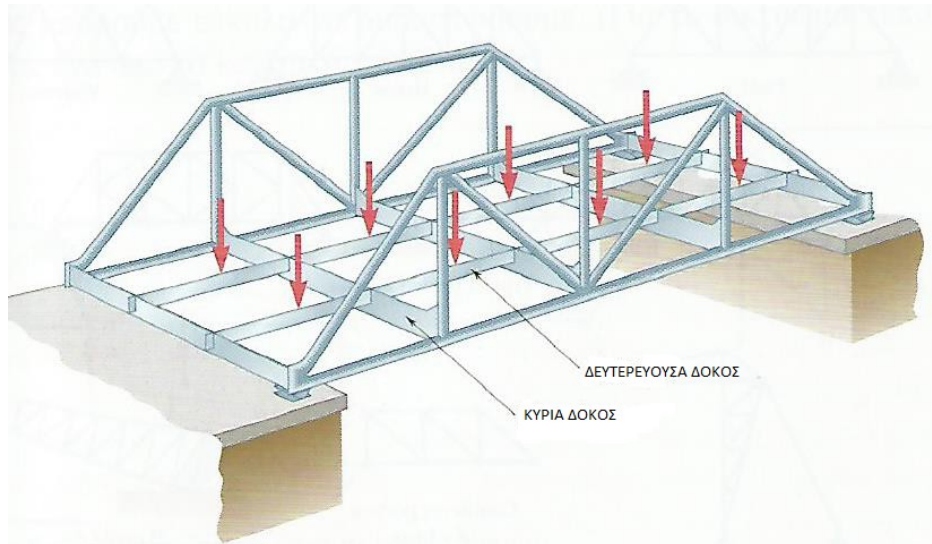
- Οι συνδέσεις στους κόμβους δεν έχουν τριβές
- Οι άξονες των ράβδων είναι ευθύγραμμοι
- Οι άξονες όλων των ράβδων τέμνονται στο ίδιο σημείο
- Όλα τα φορτία ασκούνται πάνω στους κόμβους (6)



Εικόνα 6. Επίπεδο δικτύωμα

Ένα δικτύωμα αποτελείται από ευθύγραμμα μέλη συνδεδεμένα μεταξύ τους με αρθρώσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Οι ράβδοι του δικτυώματος συνδέονται μόνο στα άκρα τους και κανένα μέλος δεν συνεχίζει μέσα από τον κόμβο. Οι περισσότερες κατασκευές κατά ουσία είναι διαφορετικά δικτυώματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν την κατασκευή που θέλουμε. (7)

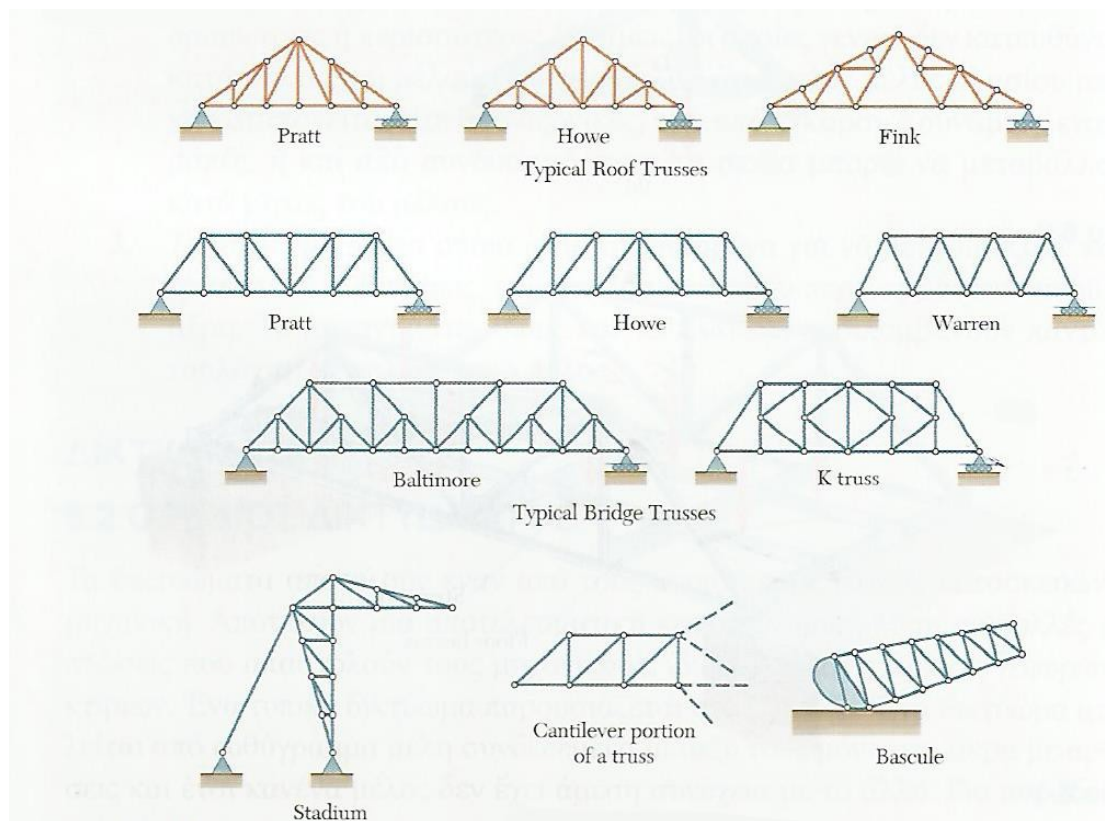
Συνήθως οι ράβδοι ενός δικτυώματος έχουν μικρή διατομή και μεγάλο μήκος, έτσι ώστε να μπορούν να αντέξουν μεγάλα μη αξονικά φορτία (πλευρικά). Συνεπώς, όπως αναφέραμε και παραπάνω, όλα τα φορτία πρέπει να ασκούνται στους κόμβους και όχι στις ράβδους. Όταν ένα φορτίο ασκείται σε έναν κόμβο ή όταν ένα δικτύωμα πρέπει να αναλάβει ένα κατανεμημένο φορτίο, όπως μια γέφυρα όταν περνούν αυτοκίνητα από πάνω της, πρέπει να εξασφαλίσει ένα σύστημα δαπέδου. Το δάπεδο θα μεταβιβάσει το φορτίο στις αρθρώσεις με την βοήθεια κύριων και δευτερευόντων δοκών. Οι δοκοί αυτές συνήθως παίζουν κάθετα μεταξύ τους για την καλύτερη αντοχή του δαπέδου. (7)



Εικόνα 7. Σύστημα δαπέδου με κύριες και δευτερεύουσες δοκούς

## Τύποι δικτυωμάτων

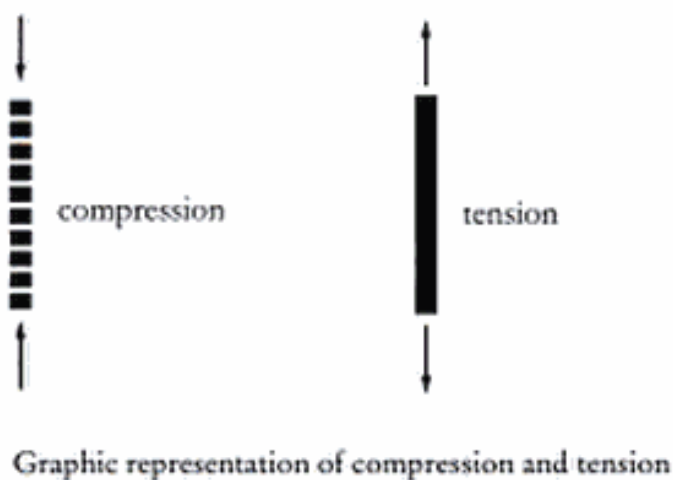
Παρακάτω παρουσιάζονται διάφοροι τύποι δικτυωμάτων.



Εικόνα 8. Διάφοροι τύποι δικτυωμάτων

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφελκυσμός και Θλίψη

Για να μπορεί να χαρακτηριστεί μια κατασκευή δικτύωμα, θα πρέπει να δέχεται δυνάμεις μόνο στους κόμβους της. Έτσι τα μελές της κατασκευής, οι ράβδοι θα δέχονται εφελκυσμό ή θλίψη.

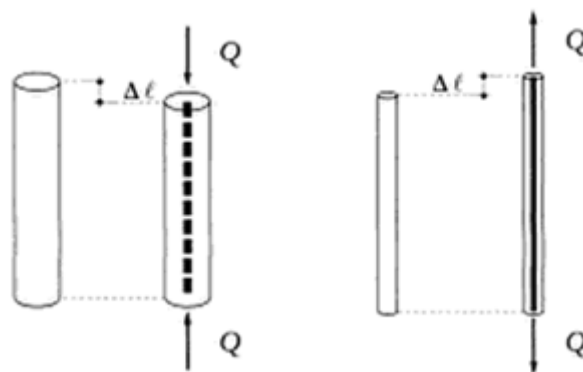


Εικόνα 9. Θλίψη και Εφελκυσμός

Ένα υλικό με μέτρο ελαστικότητας  $E$  που δέχεται μια δύναμη  $F$  συμπεριφέρεται πολύ διαφορετικά στις δυνάμεις εφελκυσμού και συμπίεσης καθώς η κάθε δύναμη μεταφέρεται με τελείως διαφορετικό τρόπο μέσα στο υλικό. Ένα κομμάτι χάλυβα ή αλλού υλικού είναι ικανό να αντισταθεί στην συμπίεση ακόμα και αν συμπιεστεί τόσο ώστε να μεταφέρεται η εσωτερική δύναμη κατά μήκος όλου του δοκιμίου. (8)

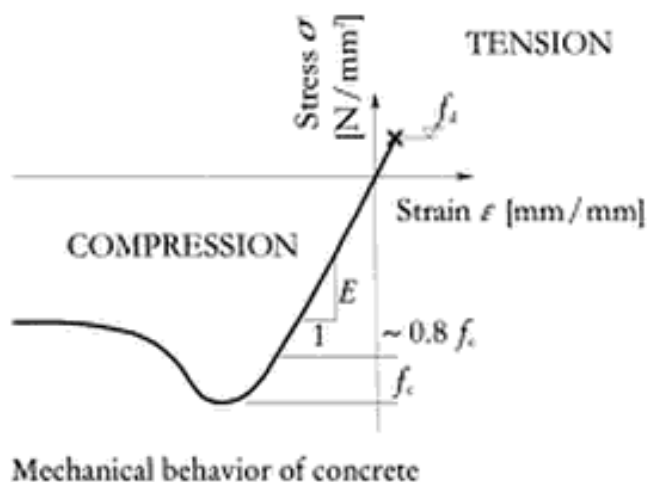
Στην περίπτωση που ασκείται εφελκυστική δύναμη στο υλικό μας τότε αυτό θα πρέπει να είναι συνεχές ή τουλάχιστον να συνδέεται με ένα άλλο υλικό το οποίο να είναι ανθεκτικό στις δυνάμεις εφελκυσμού. Για παράδειγμα η χρήση κόλλας βοηθάει στην συγκράτηση του υλικού. Μια ακόμα λύση είναι η συγκόλληση του υλικού όταν βεβαία αυτή είναι εφικτή.

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα το αποτέλεσμα του εφελκυσμού είναι η επιμήκυνση του υλικού και της θλίψης ή σύμπτυξη αντίστοιχα. Βεβαία υπάρχει ένα όριο από το οποίο ξεκινά η επιμήκυνση και η σύμπτυξη. Επίσης πάνω από ένα όριο τάσης το υλικό θα ξεκινήσει να εμφανίζει ρωγμές με αποτέλεσμα να καταλήξει στην θραύση του.



Εικόνα 10. Σύμπτυξη και Επιμήκυνση

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του τσιμέντου για δυνάμεις εφελκυσμού και θλίψης .



Εικόνα 11. Διάγραμμα τάσης και παραμόρφωσης για το τσιμέντο.

Παρατηρούμε ότι το τσιμέντο σε τάσεις εφελκυσμού έχει παρόμοια συμπεριφορά με εκείνη του γυαλιού, καθώς μετά από μια σχετικά μικρή τάση σπάει .

Αντίθετα, σε τάσεις θλίψης το τσιμέντο έχει μεγάλη ανθεκτικότητα. Συγκεκριμένα μέχρι το 80% της τάσεως  $f_c$  το τσιμέντο έχει μόνο κάποιες ρωγμές κατά μήκος της τάσης που του εφαρμόζουμε. Έπειτα αυξάνοντας και άλλο την τάση μέχρι  $f_c$  το δοκίμιο γεμίζει με ρωγμές και παρατηρείται η σύμπτυξη του. (8)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικού(10). Οι εφαρμογές του ξεκινούν από την ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα και κτίρια μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής κλπ . Η ανάπτυξη των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει συμβάλει στην ανάπτυξη τριών βασικών επιστημονικών πεδίων :

- Ενεργειακών μεθόδων
- Θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών
- Πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα ενιαίο και χρήσιμο εργαλείο για την στατική, αλλά και τη δυναμική γραμμική και μη γραμμική ανάλυση κατασκευών από ραβδωτούς επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμούς αυτών, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες . (9)

Μάλιστα με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε σύνθετα προβλήματα και περίπλοκες γεωμετρίες με σχετικά μικρή δυσκολία. (10)

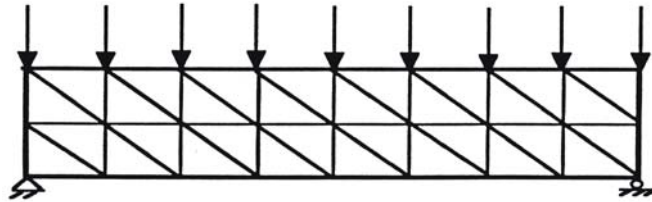
Στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μια περίπλοκη περιοχή η οποία ορίζει ένα συνεχές, διαφοροποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία.

Αρχικά σχεδιάζουμε την κατασκευή και την χωρίζουμε σε μικρά γεωμετρικά σχήματα (πεπερασμένα στοιχεία). Οι ιδιότητες του υλικού και οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το υλικό εξετάζονται στα πεπερασμένα στοιχεία σαν συνάρτηση των αγνώστων μετατοπίσεων στις κορυφές του πεπερασμένου στοιχείου. Λαμβάνουμε υπόψιν τις οριακές συνθήκες καθώς και τα φορτία και καταλήγουμε στις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής . Η λύση του συστήματος των εξισώσεων ως προς τους αγνώστους, οι οποίοι είναι οι κομβικές μετατοπίσεις είναι η ζητούμενη προσεγγιστική λύση. Αφού είναι γνωστές οι κομβικές



μετατοπίσεις υπολογίζουμε στα διάφορα σημεία της κατασκευής τις τάσεις ( $\sigma$ ), τις παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) και τις αντιδράσεις ( $R$ ) των στηρίξεων .(17)

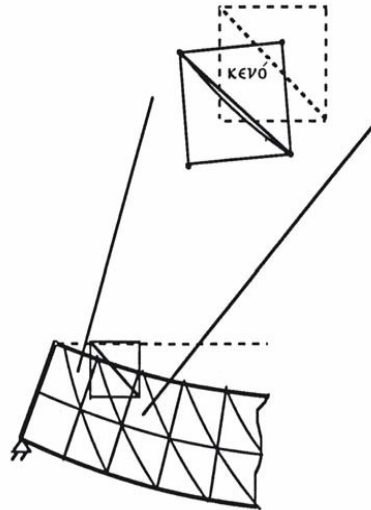
Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την διακριτοποίηση μια δοκού σε πεπερασμένα στοιχεία (τρίγωνα).



Εικόνα 12. Χρήση τριγωνικών στοιχείων για την διακριτοποίηση δοκού υπό φόρτιση

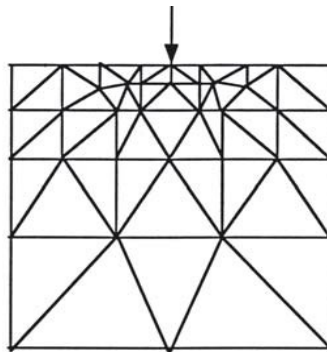
Η σύνδεση της παραπάνω δοκού γίνεται με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί ουσιαστικά προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Για να γίνει η χρήση μητρωικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Όπως αναφέραμε οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και έτσι το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρόλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων, ωστόσο ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρωικές) μεθόδους. (10)

Μια σημαντική παρατήρηση κατά την χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβατότητας στο εσωτερικό των στοιχείων και στα σύνορα τους, έτσι ώστε να έχουμε μια ακριβή λύση στην διακριτοποιημένη του μορφή. Για παράδειγμα στην εικόνα 13 ισχύει η συνέχεια των μετατοπίσεων στα κοινά όρια των στοιχείων που όμως αυτό κάνει το θεωρητικό μοντέλο της κατασκευής μας πιο εύκαμπτο επειδή θα δημιουργηθούν κενά. Όσο μεγαλύτερα τα κενά που δημιουργούνται τόσο πιο μεγάλα και τα αριθμητικά σφάλματα.



Εικόνα 13. Παραμόρφωση κόμβων

Μια λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι η χρησιμοποίηση περισσότερων και μικρότερων στοιχείων (πυκνότερη διακριτοποίηση και πυκνότερο πλέγμα) με αποτέλεσμα να έχουμε περισσότερους κόμβους άρα και περισσότερα σημεία που θα ικανοποιείται η συμβατότητα. Μια άλλη λύση είναι η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων, η οποία παρέχει ακριβέστερη εικόνα για το τι συμβαίνει σε τοπικά σημεία (πχ συγκεντρώσεις τάσεων, σημείο εφαρμογής εξωτερικού φορτίου κλπ). (10)



Εικόνα 14. Βαθμιαία ελάττωση του μεγέθους των στοιχείων

## Μέθοδος Newmark

Για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων θα εφαρμοστεί η μέθοδος άμεσης αριθμητικής ολοκλήρωσης δεύτερης τάξης Newmark-β. Η μέθοδος Newmark θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ευέλικτη, επειδή δεν απαιτεί την ομαλότητα της δεύτερης παραγώγου. Σύμφωνα με τη μέθοδο, θα δούμε παρακάτω τους τύπους για την κομβική μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση.

$$u_k = g_{k,0} + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_{k+1},$$

$$\dot{u}_k = g_{k,1} + \gamma \Delta t \ddot{u}_{k+1},$$

Όπου:

$$g_{k,0} = u_k + \Delta t \dot{u}_k + \Delta t^2 (0.5 - \beta) \ddot{u}_{k+1},$$

$$g_{k,1} = \dot{u}_k + \Delta t (1 - \gamma) \ddot{u}_{k+1},$$

$$u_k = u(tk), \quad tk = k\Delta t, \quad k=0,1,\dots,KT, \Delta t = T/KT$$

$$u = (u_{1x}, u_{1y}, u_{2x}, u_{2y}, \dots, u_{Nx}, u_{Ny})^T$$

όπου N είναι ο αριθμός των κόμβων. Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των  $u_k$  και  $\dot{u}_k$  (10) και προσθέτοντας τη λειτουργία ελέγχου στη δεξιά πλευρά

$$\ddot{u}_{k+1} = \bar{M}^{-1} (F_{k+1} + Z_{k+1} - C g_{k,1} - K g_{k,0}),$$

Όπου:

$$\bar{M} = M + \Delta t \gamma C + \Delta t^2 \beta K.$$

Για τις αρχικές τιμές των κομβικών μετατοπίσεων, έχουμε την ταχύτητα και την επιτάχυνση:

$$u_0 = u(t_0) = u(0) \quad \dot{u}_0 = \dot{u}(t_0) = \dot{u}(0), \quad \ddot{u}_{k+1} = \bar{M}^{-1} (F_0(t) - C \dot{u}_0 - K u_0).$$

Για τις σταθερές ενσωμάτωσης παίρνουμε  $\beta = 0,25$ ,  $\gamma = 0,5$  που αντιστοιχεί στην περίπτωση της μεθόδου σταθερής μέσης επιτάχυνσης.

Έχουμε  $Kt = 1000$ ,  $T_f = 50$ , Άρα  $\Delta t = 0.05$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ασαφή σύνολα

### Σύντομη περιγραφή και ιστορική ανάδρομη

Η εισαγωγή της Ασαφούς λογικής έγινε από τον Περσικής καταγωγής Αμερικάνο καθηγητή Lotfi Zadeh το 1965 στην διατριβή του Fuzzy Sets, Information and Control Vol. 8. Αρχικά η επιστημονική κοινότητα κράτησε μια αρνητική στάση απέναντι στην θεωρία αυτή, καθώς υποστήριξαν ότι η ασάφεια ήταν είτε αντίθετη στις επιστημονικές αρχές, είτε περιττή. Παρόλα αυτά έγινε προσπάθεια από πλήθος επιστημόνων να εξελίσουν την ασαφή λογική.

Το 1975 στην Αγγλία οι Mandami και Assilian παρουσίασαν έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής για τον έλεγχο ατμομηχανής. Τα επόμενα χρόνια ξεκίνησε να χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο οι ασαφείς ελεγκτές για πλήθος διαδικασιών (έλεγχος σε κάμινο τσιμέντου, παράγωγης χάλυβα κλπ).

Το 1980 ο Ιάπωνας Sugeno πρωτοπόρησε φτιάχνοντας έναν ασαφή ελεγκτή για το καθαρισμό των υδάτων. Το 1983 - 1985 ξεκίνησε να εφαρμόζει την ασαφή λογική στον κλάδο της ρομποτικής.

Τα ασαφή μοντέλα Sugeno και Mamdani αποτελούν μέχρι και σήμερα την βάση των ασαφών συστημάτων, τα οποία βέβαια εξελιχτήκαν με την πάροδο του χρόνου. (11)

### Ορισμός ασάφειας :

Έννοια που σχετίζεται με την ποσοτικοποίηση της πληροφορίας και οφείλεται κυρίως σε μη ακριβή δεδομένα.

### Ασαφής λογική :

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) είναι μια επέκταση της κλασσικής αριστοτέλειας δίτιμης λογικής (αληθής ή ψευδής). Μια έκφραση μπορεί να είναι αληθής "με κάποιο βαθμό" αλήθειας, και όχι απλά αληθής ή ψευδής. (12)

Η ασαφής λογική είναι η προσπάθεια της επιστήμης να κατανοήσει την φυσική γλώσσα του ανθρώπου. Εστιάζεται στην μοντελοποίηση του τρόπου σκέψης και λήψης αποφάσεων του ανθρώπου, ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά αυτής, στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό σε μία ευφυή μηχανή (H/Y). (11)

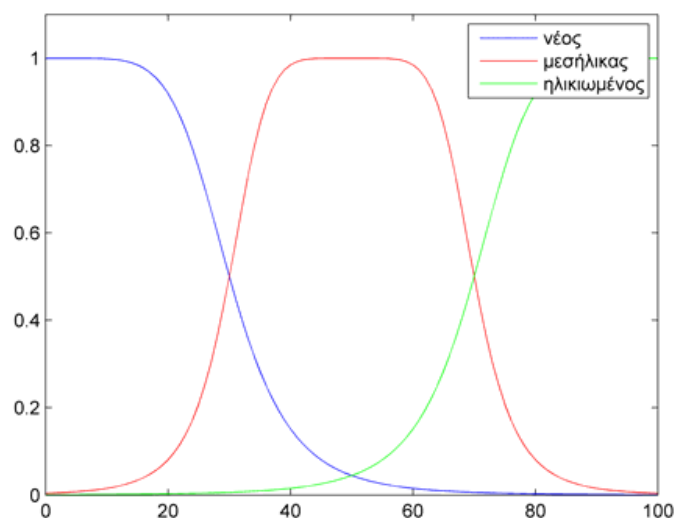
Για παράδειγμα η έκφραση "Ο Σταύρος είναι ψηλός" δεν μας δίνει μια ακριβή τιμή για το ύψος του Σταύρου αλλά μας δίνουν μια "εικόνα" έτσι ώστε να πάρουμε ανάλογες αποφάσεις σε θέματα τα οποία επηρεάζουν το ύψος του Σταύρου , όπως για παράδειγμα η αγορά μίας μπλούζας. (12)

Το πρόβλημα με την παραπάνω έκφραση είναι ότι καθένας από εμάς έχει διαφορετική αντίληψη στον χαρακτηρισμό "ψηλός". Εκεί ακριβώς έγκειται η ασάφεια.

### Ασαφή σύνολα

Ένα αντικείμενο μπορεί να ανήκει μερικώς σε ένα σύνολο. Ορίζουμε μια συνάρτηση συμμετοχής,  $f(x)$ , η οποία παίρνει συνεχείς τιμές από 0 έως 1 οι οποίες δείχνουν τον βαθμό συμμετοχής της τιμής  $x$  στο σύνολο.

Στην εικόνα 13 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής για να ορίσουμε ανάλογα με την ηλικία ενός ανθρώπου εάν είναι νέος, μεσήλικας ή ηλικιωμένος

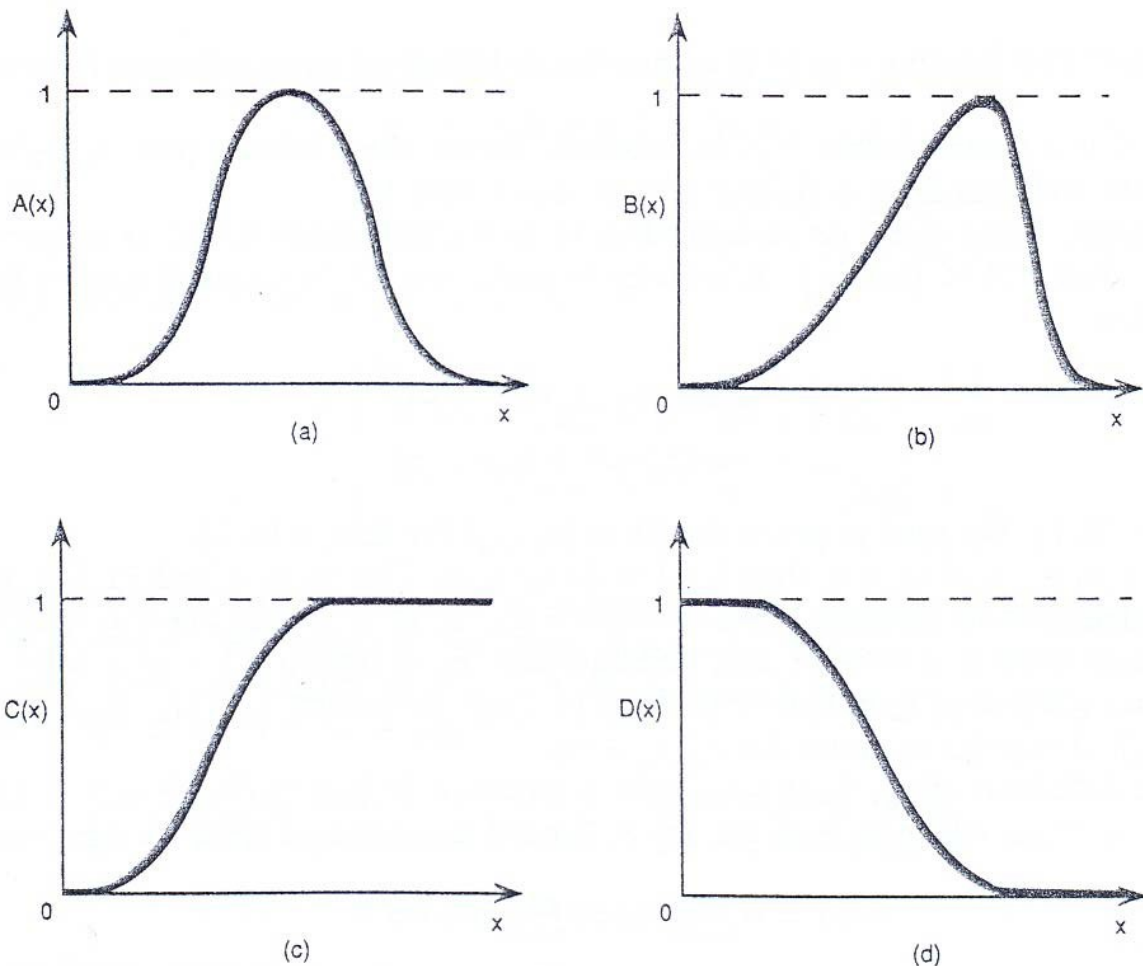


Εικόνα 15. Συναρτήσεις συμμετοχής

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι η μετάβαση από το ένα ασαφές σύνολο στο άλλο είναι βαθμιαία. Το κάθε σύνολο έχει μια περιοχή η οποία έχει υψηλό βαθμό συμμετοχής. Όσο πλησιάζουμε στα όρια του συνόλου, οι βαθμοί συμμετοχής μειώνονται.

Για παράδειγμα για την ηλικία από 40-60 έχουμε και την μεγαλύτερη τιμή για το σύνολο μεσήλικας , έτσι αυτή η ηλικία περιγράφεται - χαρακτηρίζεται ξεκάθαρα από αυτό το

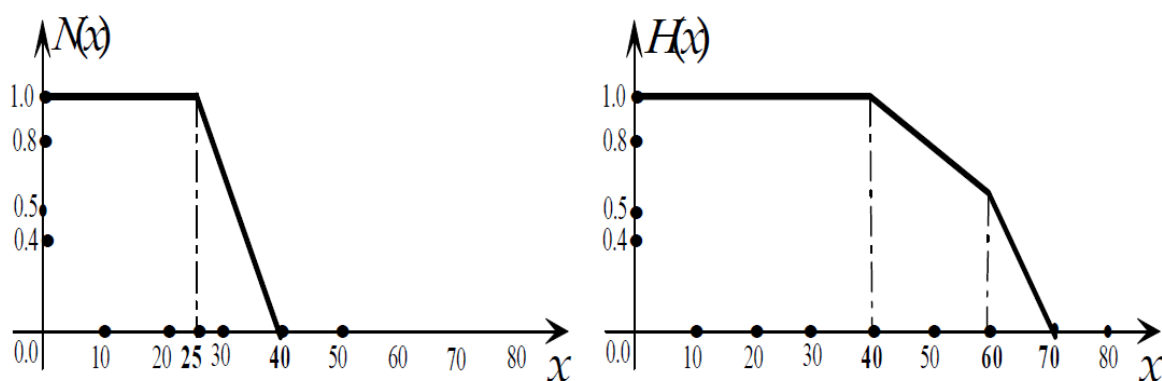
σύνολο. Όσο μεγαλώνει η τιμή της ηλικίας, ας πούμε στα 80 έτη παρατηρούμε ότι η συνάρτηση συμμετοχής του συνόλου νέος είναι μηδέν, του συνόλου μεσήλικας είναι γύρω στο 0.1, ενώ παρατηρούμε ότι το σύνολο ηλικιωμένος έχει το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής, γύρω στο 0.8. Έτσι καταλήγουμε ότι η έκφραση που χαρακτηρίζει καλύτερα την ηλικία των 80 είναι ηλικιωμένος.



Εικόνα 16. Διάφοροι τύποι ασαφών συνόλων

## Ερμηνεία Ασαφών Συνόλων

Η συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου μπορεί να εκφράσει υποκειμενικές απόψεις για την ίδια έννοια. Για παράδειγμα η έννοια «Νέος» αλλιώς αξιολογείται από ένα Νεαρό άτομο και αλλιώς από ένα Ηλικιωμένο. Άρα η έννοια αυτή μπορεί να εκφραστεί από δυο διαφορετικά ασαφή σύνολα ανάλογα με το άτομο. (11)



Εικόνα 17. Νέος κατά άποψη

Άρα η ίδια ασαφής έννοια μπορεί να εκφράζεται από πολλά και διαφορετικά ασαφή σύνολα και η επιλογή του κατάλληλου συνόλου είναι υποκειμενική και εξαρτάται καθαρά από την κρίση του παρατηρητή.

## Νευροασαφής έλεγχος και ANFIS

Το ANFIS είναι ένα από τα πιο δημοφιλή προσαρμοστικά ασαφή συστήματα. Η λειτουργία του ANFIS βασίζεται σε ένα ασαφή σύστημα συμπερασμού, το οποίο εφαρμόζεται σε ένα νευρωνικό δίκτυο και το οποίο πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Jyh Shing R Jang στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας.(18)

Το ANFIS απαρτίζεται από ασαφείς κανόνες σε αντίθεση με τα κλασσικά ασαφή σύνολα τα οποία , έχουν τοπικό αντί για καθολικό καθορισμό. Αυτός ο καθορισμός διευκολύνει την αρχή της ελάχιστης διαταραχής (minimal disturbance principle), η οποία ορίζει ότι η προσαρμογή εκτός από την μείωση του σφάλματος του αποτελέσματος, θα πρέπει να ελαχιστοποιεί και την διαταραχή για τα δεδομένα που έχει ήδη δεχτεί.

Η διαδικασία για την δημιουργία ενός ασαφούς συστήματος ονομάζεται ασαφής μοντελοποίηση. Η νευροασαφής μοντελοποίηση αφορά τον τρόπο εφαρμογής διαφόρων



τεχνικών εκμάθησης που δημιουργήθηκαν στην βιβλιογραφία, για την εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων πάνω σε συστήματα ασαφούς λογικής. Συνήθως χρησιμοποιούνται νευρωνικά δίκτυα οπίσθιας διάδοσης του σφάλματος για την αναγνώριση των παραμέτρων ενός συστήματος ασαφούς συστήματος.

Η διαδικασία εκμάθησης θα μπορούσε να είναι υβριδική, δηλαδή το μοντέλο ελέγχου το οποίο θα κατασκευάζει μια χαρτογράφηση εισόδου-εξόδου να βασίζεται τόσο στην ανθρώπινη λογική όσο σε ασαφή συστήματα με την εισαγωγή κατάλληλων ζευγών δεδομένων εισόδου-εξόδου. Ακόμα και αν δεν υπάρχει ανθρώπινη τεχνογνωσία, μπορούμε να ορίσουμε τους αρχικούς κανόνες διαισθητικά και να δημιουργήσουμε τους τελικούς κανόνες χρησιμοποιώντας μία διαδικασία μάθησης για να πετύχουμε την επιθυμητή απόδοση του συστήματος.

Αυτό σημαίνει ότι αντί να παραμετροποιήσουμε αυθαίρετα τον ελεγκτή (συναρτήσεις συμμετοχής, κανόνες κλπ), μια αυτοματοποιημένη διαδικασία μπορεί να δημιουργήσει προσαρμοσμένες συναρτήσεις συμμετοχής για τα δεδομένα εισόδου – εξόδου βασισμένη στα δεδομένα του συστήματος. Επιπλέον ένα σύνολο κανόνων μπορεί να δημιουργηθεί αυτόματα από τα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά το πιο σημαντικό είναι ότι ο ελεγκτής μπορεί να εκπαιδευτεί έτσι ώστε να είναι λειτουργικός κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Λόγω της δυνατότητας προσαρμογής που προσφέρει το ANFIS, ο νευροασαφής ελεγκτής που δημιουργεί είναι τόσο αξιόπιστος σε βαθμό που θα μπορούσε να αντικαταστήσει τα νευρωνικά δίκτυα στα συστήματα ελέγχου.

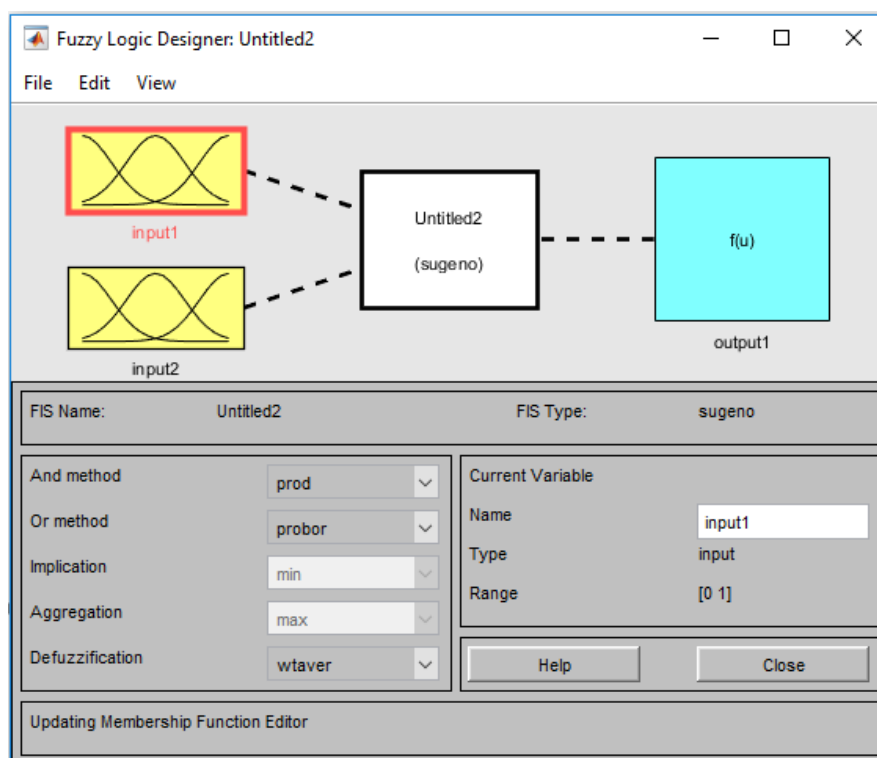
Ο τύπος του ελεγκτή που χρησιμοποιείται συνήθως στον νευροασαφή έλεγχο είναι της μορφής Sugeno, ο οποίος μας δίνει την δυνατότητα να εισάγουμε δεδομένα και να τον εκπαιδεύσουμε, βγάζοντας αυτόματα τους κανόνες και τις συναρτήσεις συμμετοχής (κατηγορίες). Έτσι δεν χρειάζεται εμείς να αποφασίσουμε την μορφή και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του μηχανισμού έλεγχου. (15)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Δημιουργία ελεγκτών και διαδικασία προσομοίωσης

### Sugeno & ANFIS

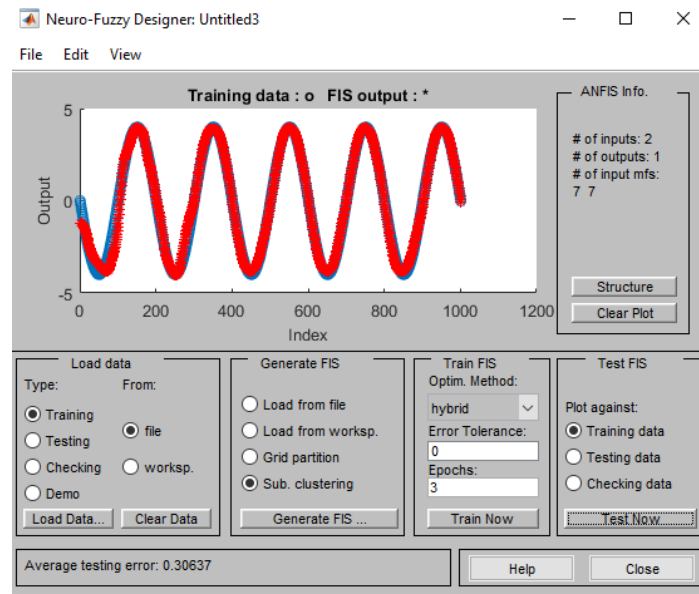
Κατασκευάζουμε έναν μη γραμμικό ασαφή ελεγκτή με την βοήθεια του Fuzzy Toolbox της Matlab. Επειδή επιθυμούμε να ορίσουμε τους κανόνες και τις συναρτήσεις συμμετοχής με αυτόματο τρόπο, επιλέγουμε ελεγκτή του Sugeno ο οποίος μας δίνει την δυνατότητα εκπαίδευσης του ελεγκτή μέσω δεδομένων που θα εισάγουμε. Ο ελεγκτής που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι τύπου M.I.S.O (Multiple Inputs One Output) δηλαδή δέχεται πολλαπλές εισόδους και παράγει μια μόνο έξοδο.

Ως μεταβλητές εισόδου στην περίπτωση μας έχουμε την ταχύτητα και την μετατόπιση του ραδιοτηλεσκοπίου και ως έξοδο μας δίνει ο ελεγκτής την δύναμη ελέγχου που απαιτείται για τον περιορισμό των ταλαντώσεων.



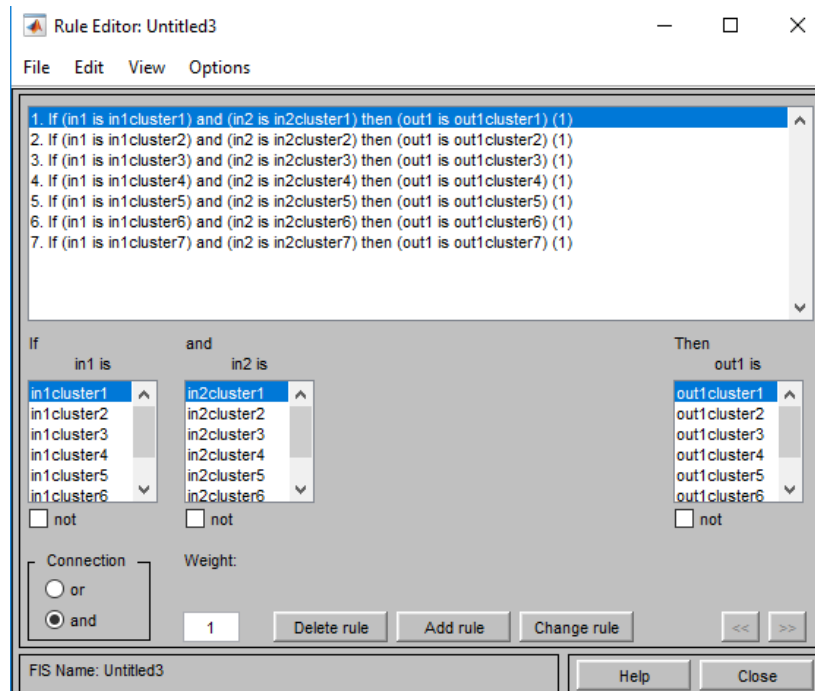
Εικόνα 18. Ελεγκτής τύπου Sugeno με δυο εισόδους και μια έξοδο

Το επόμενο βήμα είναι να εκπαιδεύσουμε τον ελεγκτή μέσω του ANFIS. Σε έναν ελεγκτή τύπου Sugeno, φορτώνουμε τα δεδομένα και ξεκινάμε τη διαδικασία της εκπαίδευσης.



Εικόνα 19. Εκπαίδευση του νευροασαφούς ελεγκτή με την ρουτίνα ANFIS

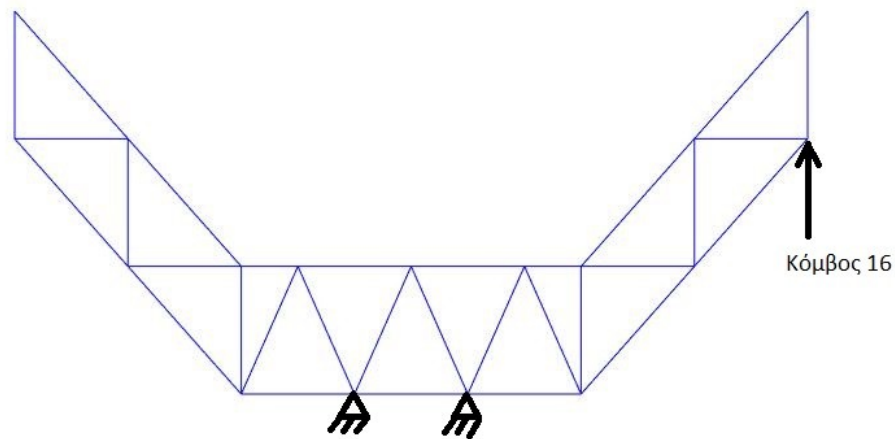
Στην παρακάτω εικόνα θα δούμε τους κανόνες που δημιουργήθηκαν μετά την εκπαίδευση του ελεγκτή μας μέσω των δεδομένων που εισάγαμε.



Εικόνα 20. Κανόνες του συστήματος ελέγχου

### Κατασκευή ραδιοτηλεσκοπίου και εφαρμογή εξωτερικής δύναμης

Το ραδιοτηλεσκόπιο μας θα αποτελείται από 17 κόμβους και 31 ράβδους που θα ενώνουν τους κόμβους. Οι στηρίξεις του ραδιοτηλεσκοπίου θα είναι στους κόμβους 8 και 10 και η δύναμη θα ασκείται στον κόμβο 16. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται σε σχήμα το δικτύωμα που προκύπτει με τις στηρίξεις και τον κόμβο εφαρμογής της εξωτερικής δύναμης.



Εικόνα 21. Ραδιοτηλεσκόπιο σε μορφή δικτύωματος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αριθμητικά Παραδείγματα

Στα παραδείγματα που θα ακολουθήσουν η κατασκευή θα έχει μέτρο ελαστικότητας  $E=100 \text{ KPa}$  και εμβαδόν διατομής  $A=0,1 \text{ m}^2$ .

### Παράδειγμα 1.

Στην πρώτη περίπτωση θα εφαρμόσουμε μια στιγμιαία δύναμη  $F=4\text{N}$ .

### Παράδειγμα 2.

Στη δεύτερη περίπτωση η δύναμη που θα εφαρμόσουμε θα είναι της μορφής  $\sin(\omega t)$  με μέγιστη τιμή  $F=4 \text{ N}$  και περίοδο  $\omega=10\pi \text{ rad/sec}$ . Η δύναμη θα ασκείται στον κόμβο 16.

### Παράδειγμα 3.

Στην τρίτη περίπτωση η δύναμη θα είναι της μορφής  $\cos(\omega t)$  με ίδια δύναμη και περίοδο. Επίσης η δύναμη θα ασκείται πάλι στον κόμβο 16.

Ο λόγος που διαλέξαμε αυτήν την μορφή δυνάμεων (στο παράδειγμα 2 και 3) είναι ότι θέλουμε να δούμε πως ανταποκρίνεται ένα σύστημα ελέγχου σε μορφές δυνάμεων οι οποίες είναι «ανάποδες» (Ημίτονο – Συνημίτονο), έτσι ώστε να ελέγξουμε την περίπτωση κατά την εκπαίδευση του ελεγκτή να έχουμε πετύχει άθελα μας overfit στα δεδομένα εισόδου, με αποτέλεσμα ο ελεγκτής να μην μπορεί να ανταποκριθεί σε άλλα ζεύγη τιμών ταχύτητας και μετατόπισης.

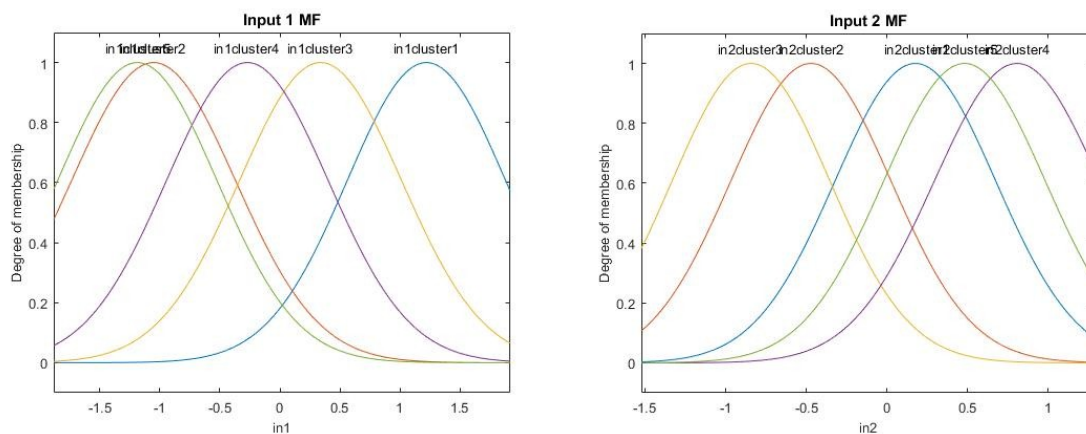
Μετά από διάφορες δοκιμές καταλήξαμε σε τρεις νευροασαφείς ελεγκτές οι οποίοι είχαν την καλύτερη απόκριση στις εξωτερικές δυνάμεις. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρεις αυτοί ελεγκτές και δίδονται οι συναρτήσεις συμμετοχής τους, οι λεκτικοί κανόνες και η επιφάνεια (γραφική αναπαράσταση) των κανόνων αυτών.

Επίσης, για κάθε ελεγκτή παρουσιάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα:

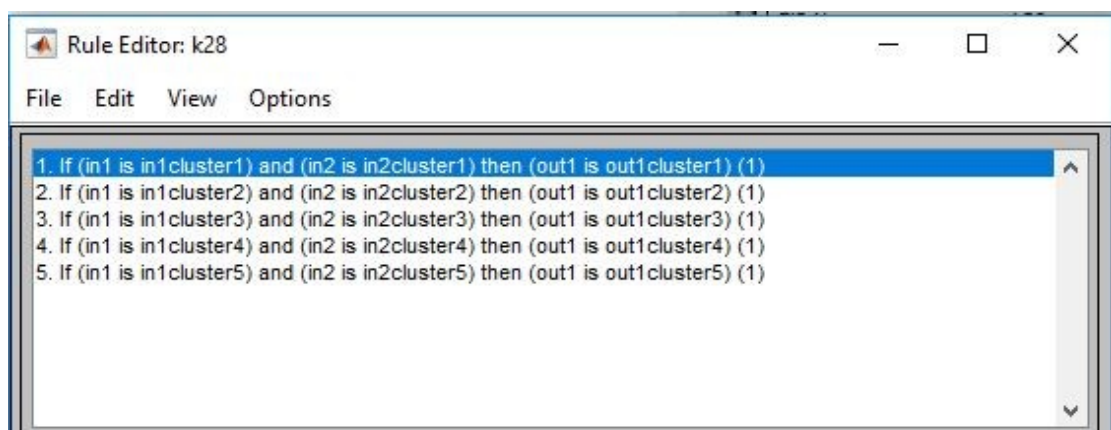
1. Εξωτερικής δύναμης και δύναμης ελέγχου
2. Μετατόπισης σε συνάρτηση με τον χρόνο για έναν κόμβο
3. Ταχύτητας σε συνάρτηση με τον χρόνο για τον ίδιο κόμβο

## Ελεγκτής 1

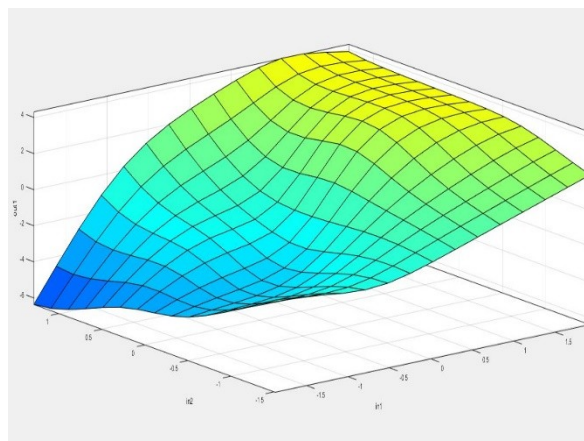
Ο ελεγκτής 1 εκπαιδεύτηκε με δεδομένα εισόδου από τον κόμβο 14 και η εξωτερική δύναμη ήταν συνημιτονοειδής. Οι συναρτήσεις συμμετοχής και οι κανόνες συμμετοχής τόσο σε μορφή επιφάνειας όσο και επιγραμματικά φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Παρατηρούμε ότι το ANFIS δημιούργησε 5 ομάδες για τα δεδομένα εισόδου.



Εικόνα 22. Συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων του νευροασαφούς ελεγκτή 1

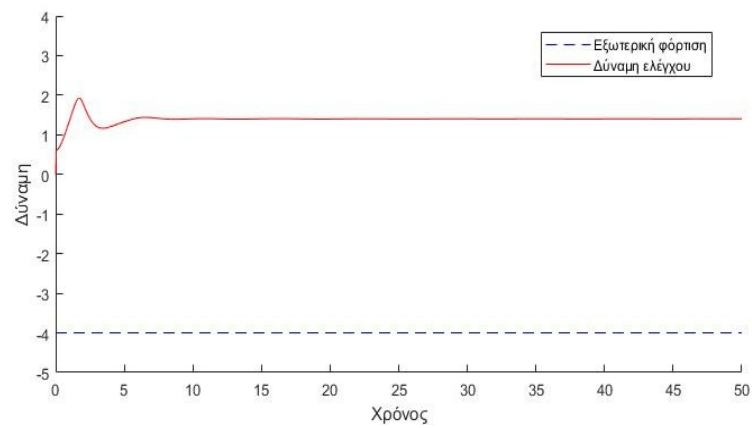


Εικόνα 23. Οι κανόνες του νευροασαφούς ελεγκτή 1

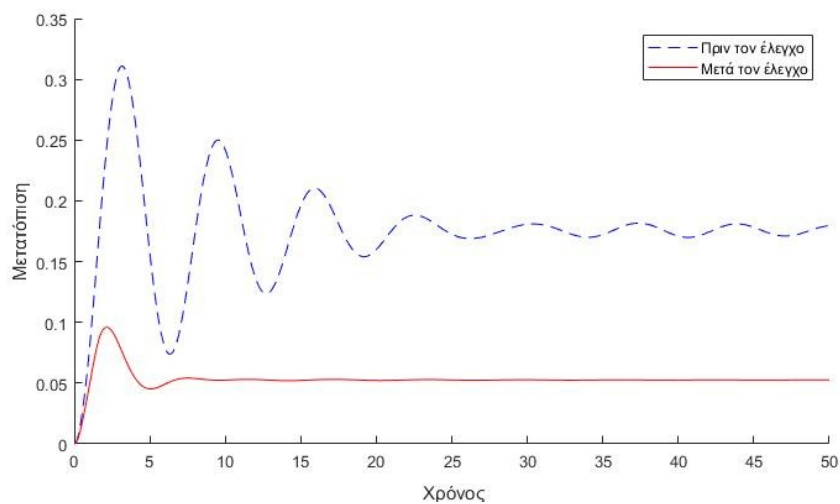


Εικόνα 24. Γραφική αναπαράσταση των κανόνων του νευροασαφούς ελεγκτή 1

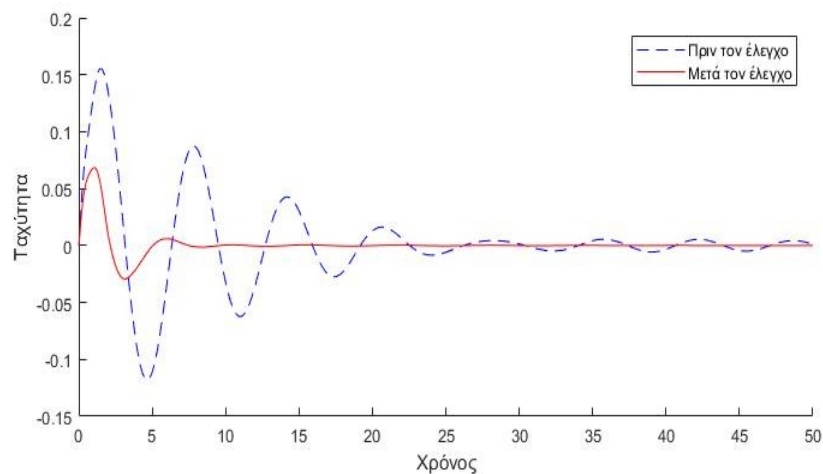
## Αποτελέσματα για σταθερή δύναμη $F=-4N$



Διάγραμμα 1. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου



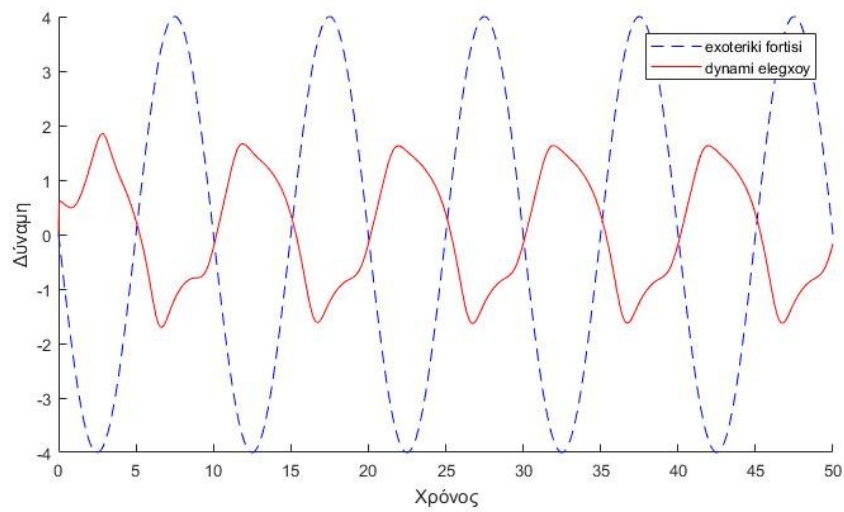
Διάγραμμα 2. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου



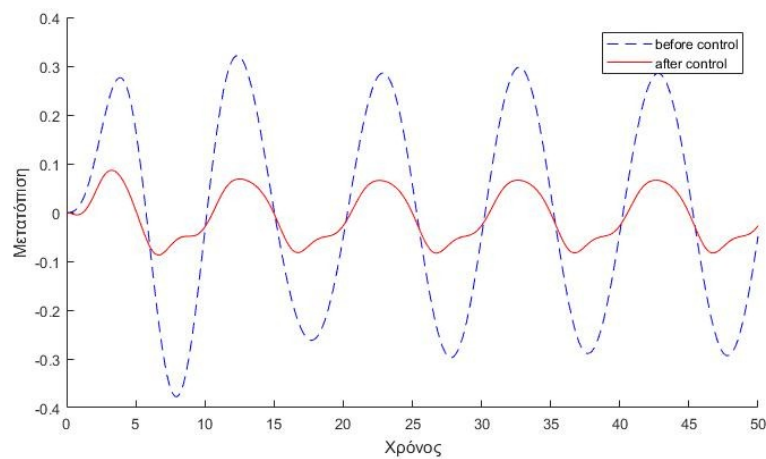
Διάγραμμα 3. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου



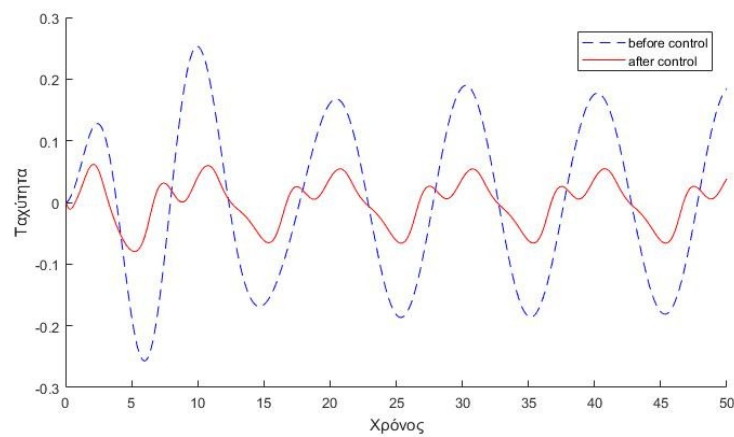
## Αποτελέσματα για ημιτονοειδή δύναμη



Διάγραμμα 4. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου

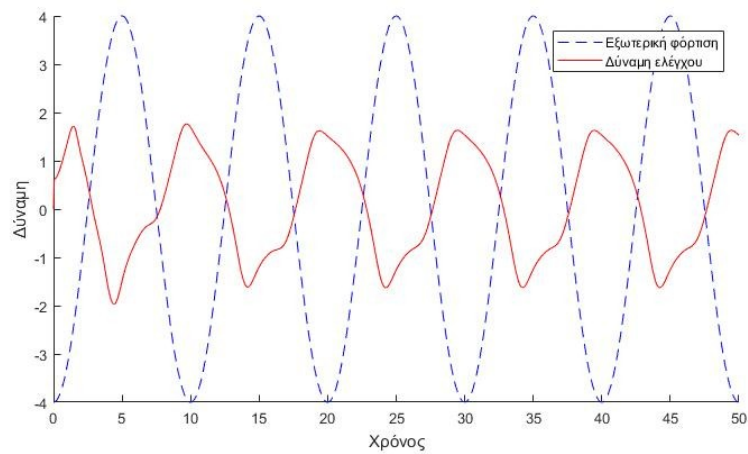


Διάγραμμα 5. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

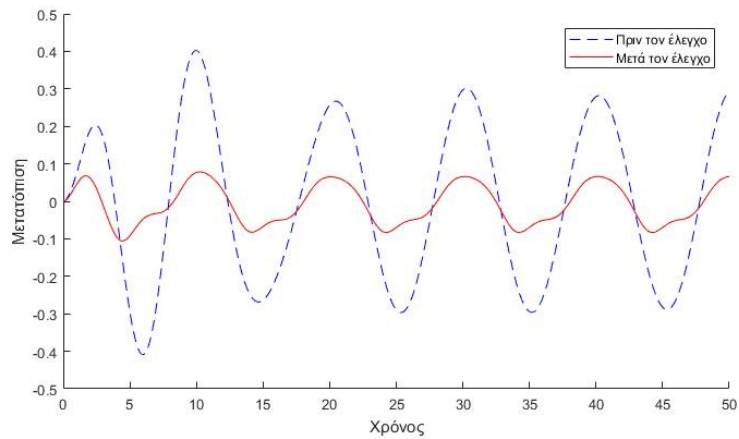


Διάγραμμα 6. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

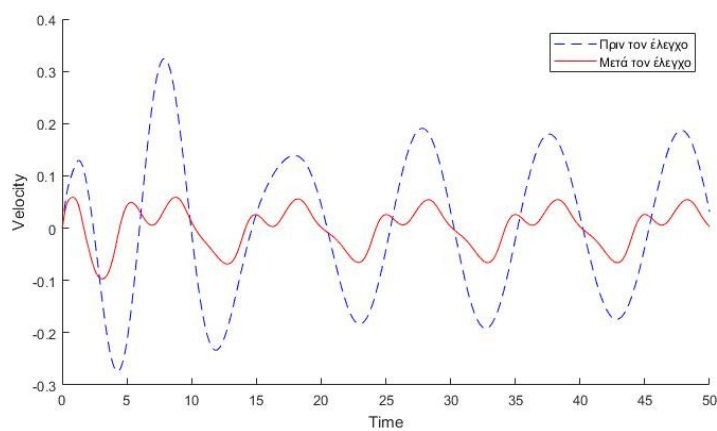
## Αποτελέσματα για συνημιτονοειδή δύναμη



Διάγραμμα 7. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου



Διάγραμμα 8. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

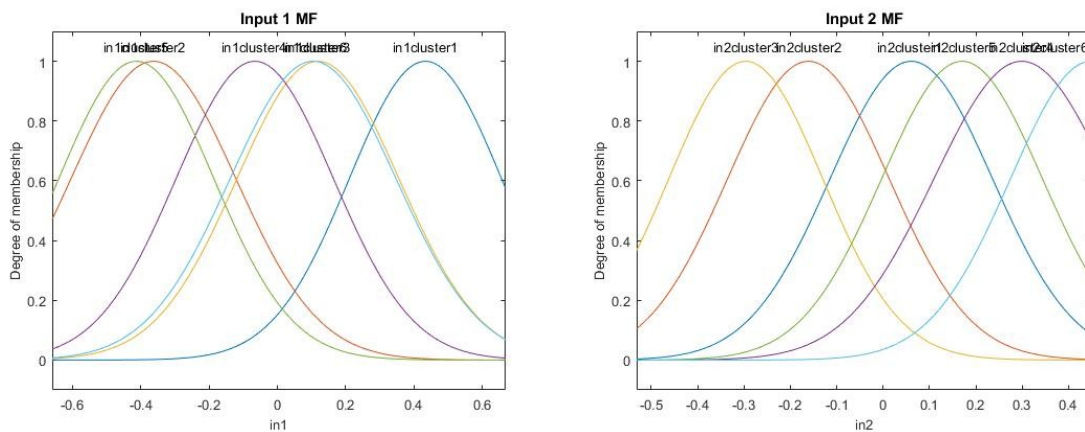


Διάγραμμα 9. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

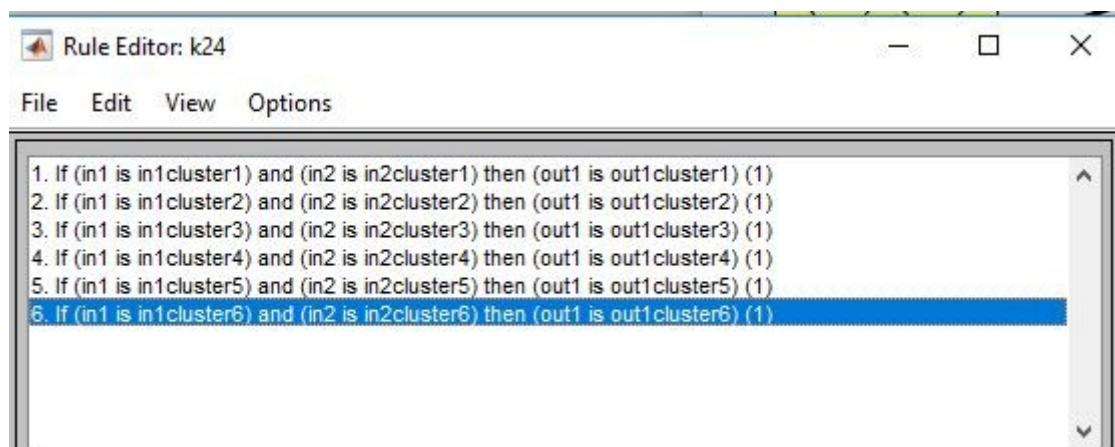
Παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής 1 ανταποκρίνεται αρκετά καλά στα διάφορα είδη εξωτερικών δυνάμεων που ασκούμε σε κάθε περίπτωση. Παρόλα αυτά θα ήταν επιθυμητό στην ημιτονοειδή και στη συνημιτονοειδή περίπτωση φόρτισης, με την πάροδο του χρόνου, να μειώνει ο ελεγκτής ακόμη περισσότερο την ταλάντωση όσον αφορά στη μετατόπιση και στην ταχύτητα.

## Ελεγκτής 2

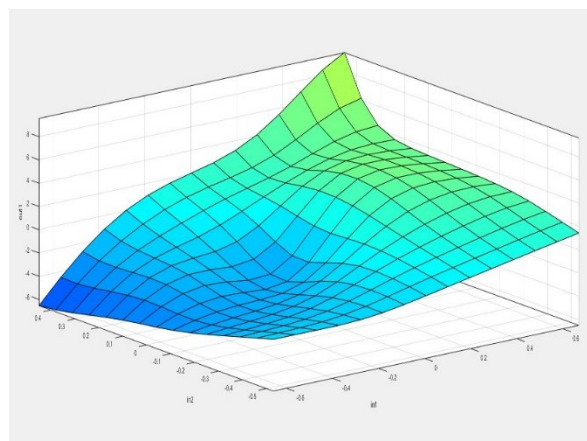
Ο ελεγκτής 2 εκπαιδεύτηκε με δεδομένα εισόδου από τον κόμβο 12 και η μορφή της εξωτερικής δύναμης ήταν συνημιτονοειδής. Οι συναρτήσεις συμμετοχής και οι κανόνες συμμετοχής τόσο σε μορφή επιφάνειας όσο και επιγραμματικά φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Παρατηρούμε ότι το ANFIS δημιούργησε 6 ομάδες για τα δεδομένα εισόδου.



Εικόνα 25. Συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων του νευροασαφούς ελεγκτή 2

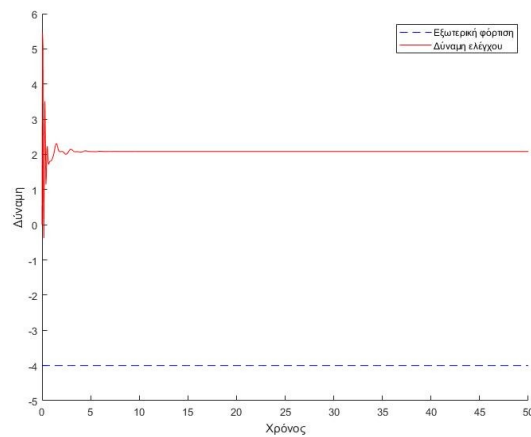


Εικόνα 26. Οι κανόνες του νευροασαφούς ελεγκτή 2

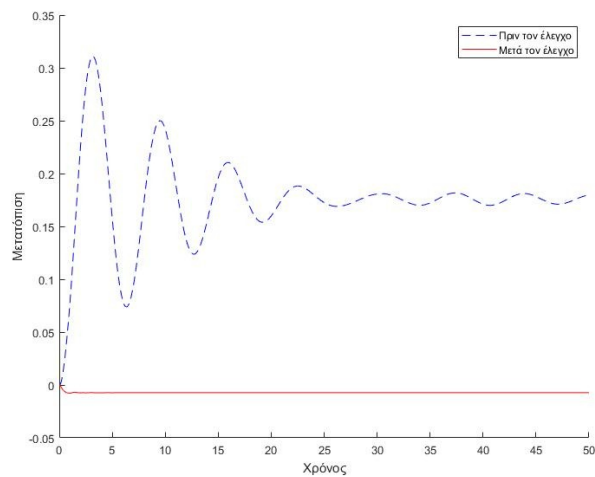


Εικόνα 27. Γραφική αναπαράσταση των κανόνων του νευροασαφούς ελεγκτή 2

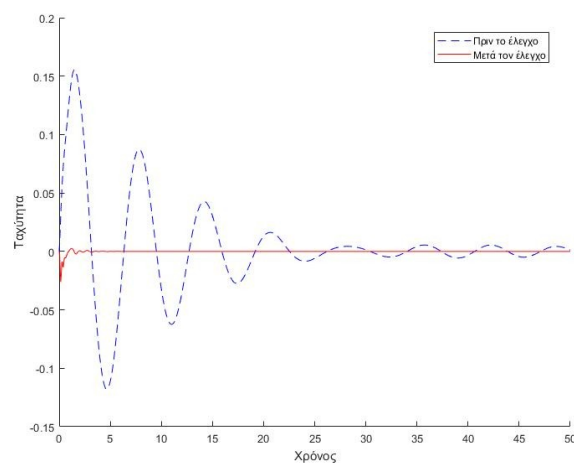
## Αποτελέσματα για σταθερή δύναμη $F=-4\text{N}$



Διάγραμμα 10. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου

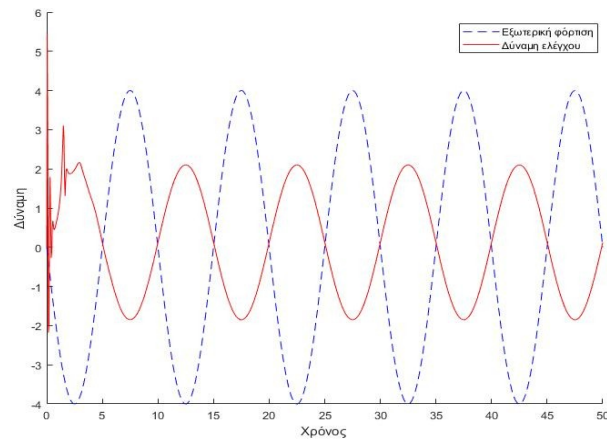


Διάγραμμα 11. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

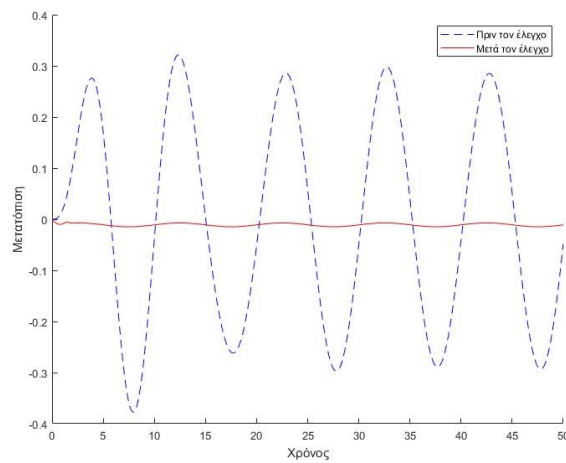


Διάγραμμα 12. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

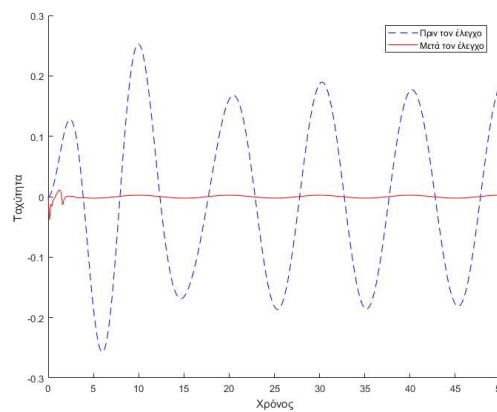
## Αποτελέσματα για ημιτονοειδή δύναμη



Διάγραμμα 13. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου

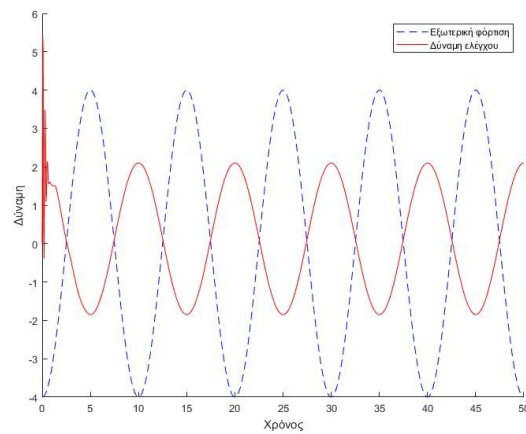


Διάγραμμα 14. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

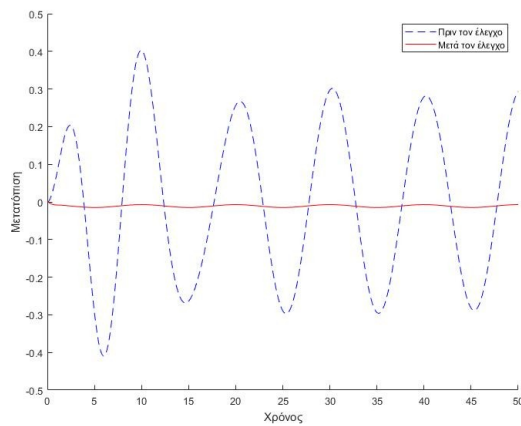


Διάγραμμα 15. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

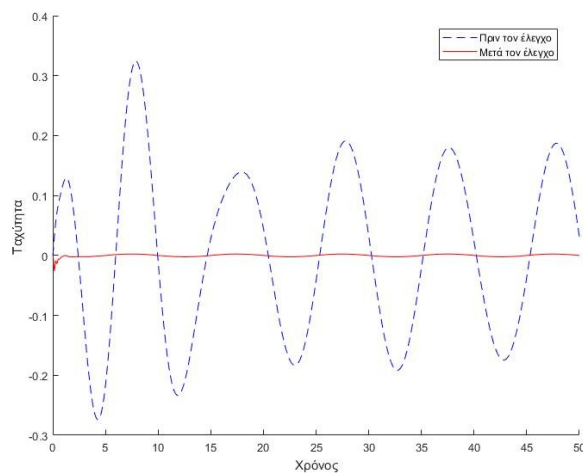
## Αποτελέσματα για συνημιτονοειδή δύναμη



Διάγραμμα 16. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου



Διάγραμμα 17. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης



Διάγραμμα 18. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου



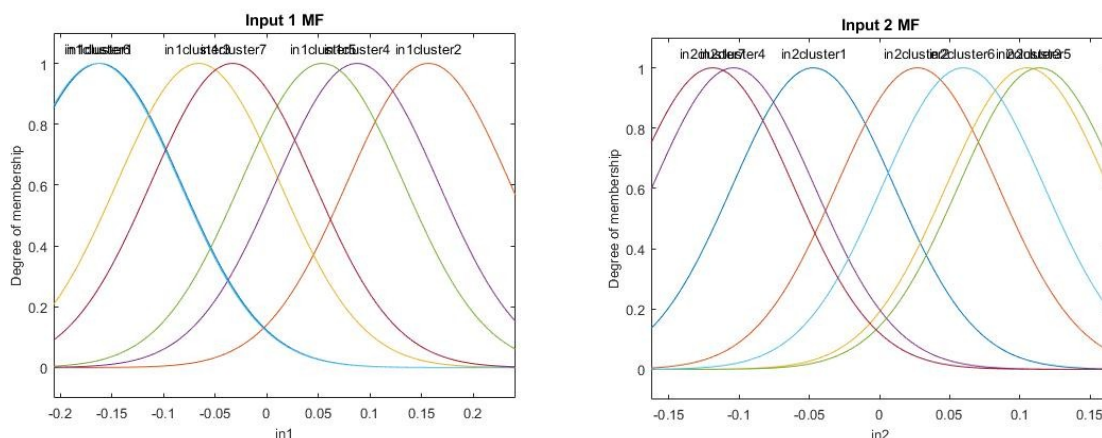
Παρατηρώντας και συγκρίνοντας τα προηγούμενα διαγράμματα, συμπεραίνουμε ότι ο ελεγκτής 2 διαχειρίζεται καλύτερα από ότι ο ελεγκτής 1 τις διαφορετικές δυνάμεις.

Στην περίπτωση της σταθερής δύναμης από το πρώτο κιόλας δευτερόλεπτο υπάρχει μία εξομάλυνση τόσο της μετατόπισης όσο και της ταχύτητας .

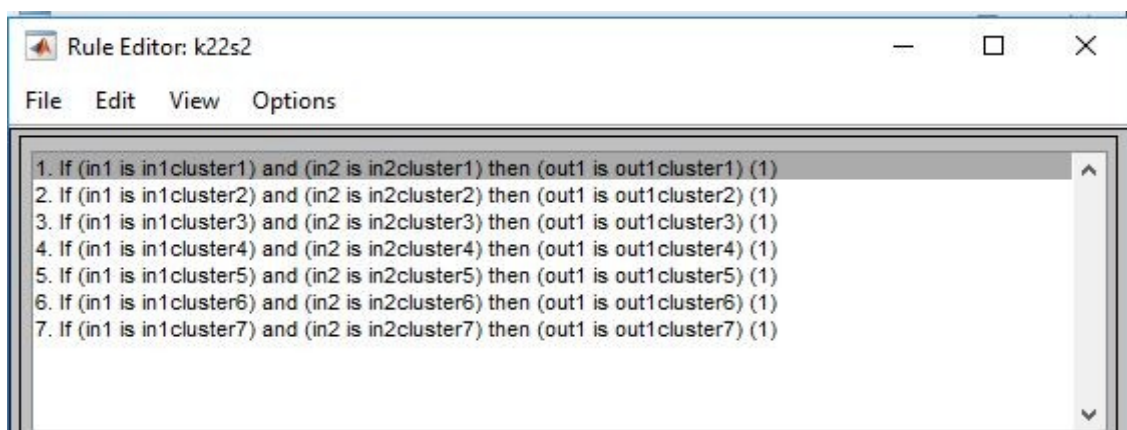
Στην περίπτωση της ημιτονοειδούς και συνημιτονοειδούς δύναμης έχουμε μια μείωση της μετατόπισης και της δύναμης σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (1 sec) το οποίο εξασφαλίζει την ασφάλεια της κατασκευής από την εξωτερική δύναμη.

### Ελεγκτής 3

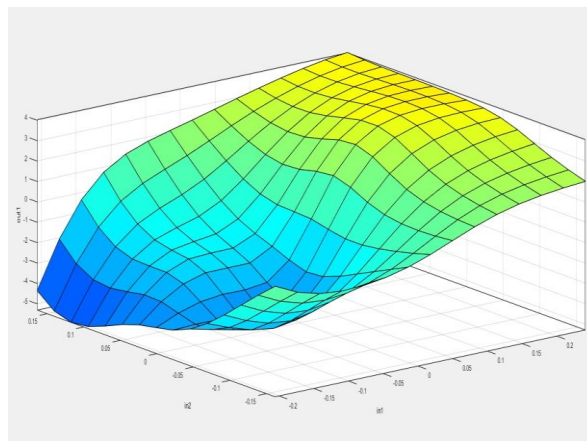
Ο ελεγκτής 3 εκπαιδεύτηκε με δεδομένα εισόδου από τον κόμβο 11 και η εξωτερική δύναμη ήταν ημιτονοειδής. Οι συναρτήσεις συμμετοχής και οι κανόνες συμμετοχής τόσο σε μορφή επιφάνειας όσο και επιγραμματικά φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Παρατηρούμε ότι το ANFIS δημιούργησε 7 ομάδες για τα δεδομένα εισόδου.



Εικόνα 25. Συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων του νευροασαφούς ελεγκτή 3

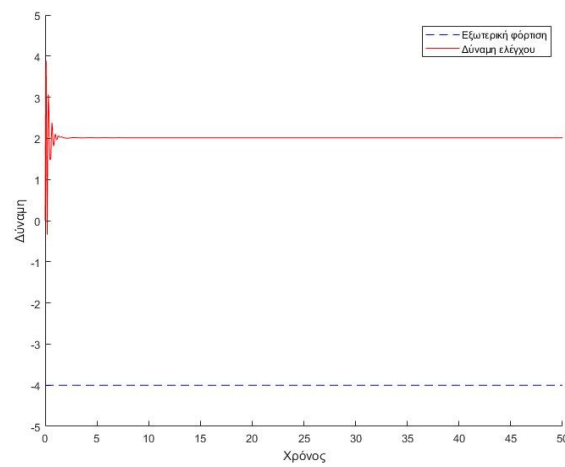


Εικόνα 29. Οι κανόνες του νευροασαφούς ελεγκτή 3

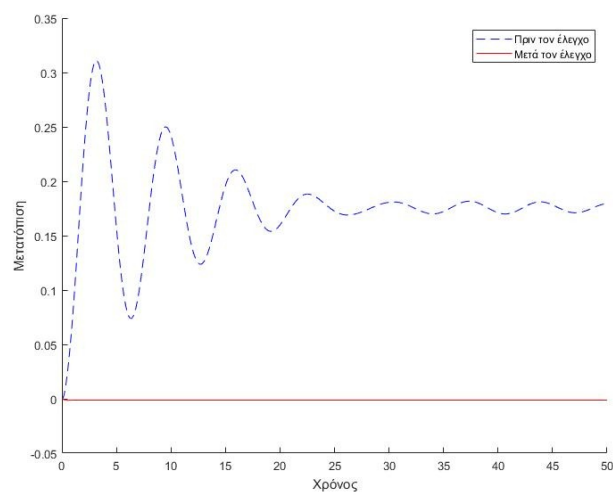


Εικόνα 30. Γραφική αναπαράσταση των κανόνων του νευροασαφούς ελεγκτή 3

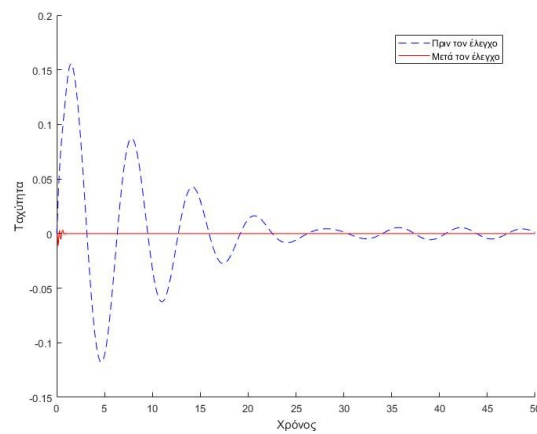
## Αποτελέσματα για σταθερή δύναμη $F=-4\text{N}$



Διάγραμμα 19. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου

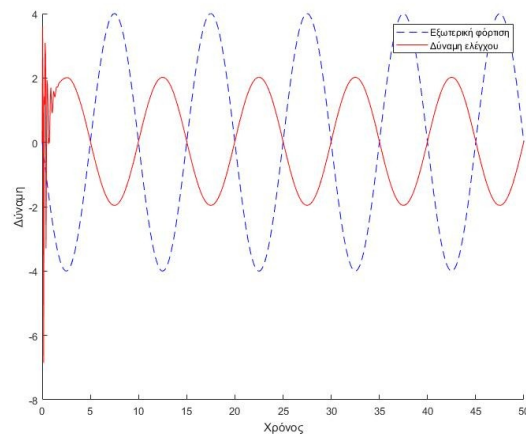


Διάγραμμα 20. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης

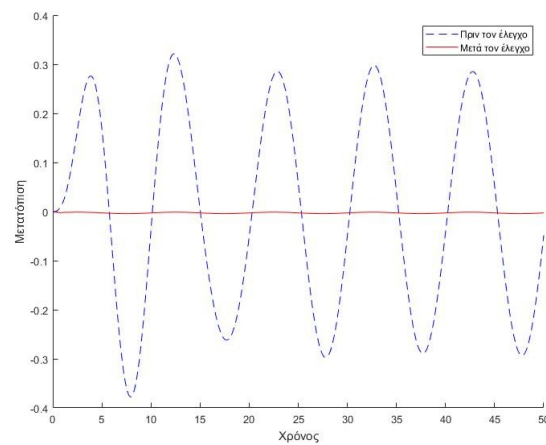


Διάγραμμα 21. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

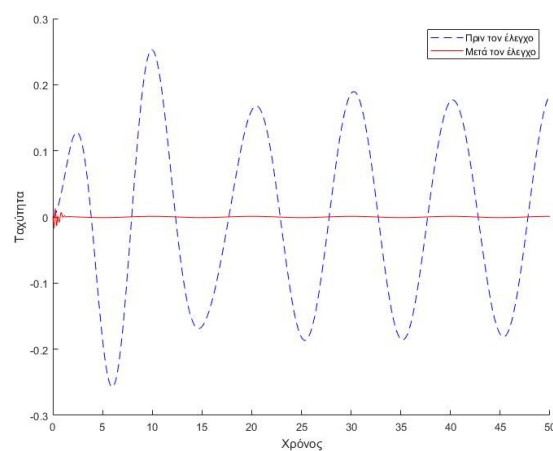
## Αποτελέσματα για ημιτονοειδή δύναμη



Διάγραμμα 22. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου

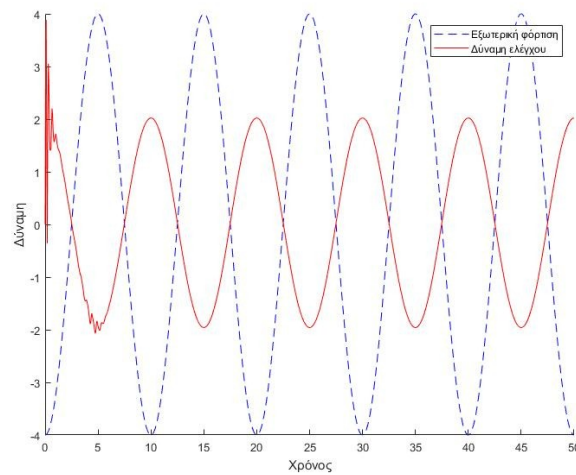


Διάγραμμα 23. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης

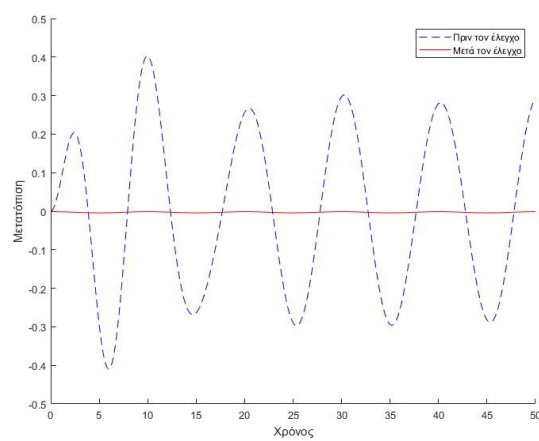


Διάγραμμα 24. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

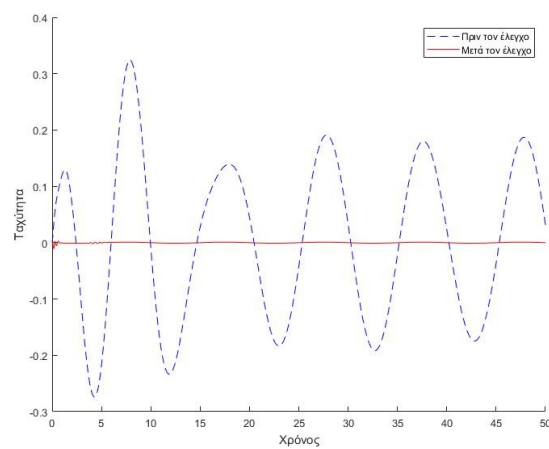
## Αποτελέσματα για συνιμητονοειδή δύναμη



Διάγραμμα 25. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου



Διάγραμμα 26. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης

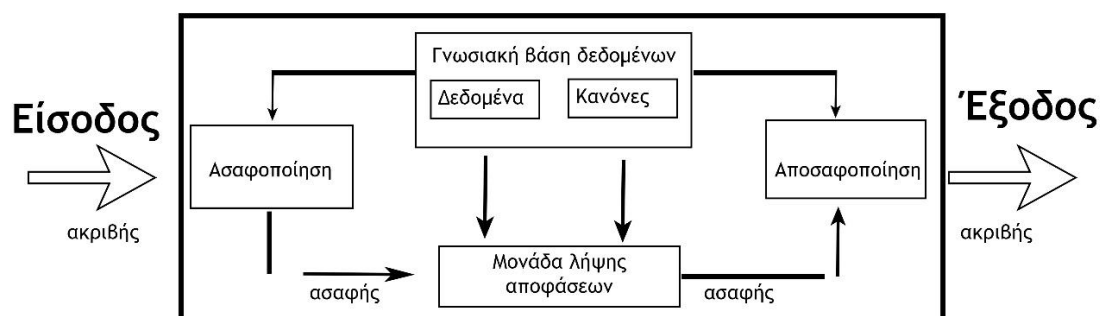


Διάγραμμα 27. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου

Παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής 3 μας δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα καθώς σε κάθε περίπτωση μέσα σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο έχει καταφέρει να σταθεροποιήσει την κατασκευή. Η αποτελεσματικότητα του τρίτου ελεγκτή είναι πιθανόν να οφείλεται στο μεγαλύτερο πλήθος των κατηγοριών (clusters) που δημιουργήθηκαν από το νευροασαφές σύστημα, καθώς έτσι δίνεται η δυνατότητα να υπάρχουν περισσότερες διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλογα την εξωτερική δύναμη που ασκείται κάθε φορά. Επίσης, ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να έπαιξε ρόλο είναι η θέση από την οποία λήφθηκαν τα δεδομένα εισόδου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Σύγκριση με ασαφή έλεγχο

Στην περίπτωση του απλού ασαφούς ελέγχου χρησιμοποιούνται συνήθως ελεγκτές τύπου Mamdani. Οι ελεγκτές αυτοί δεν έχουν την δυνατότητα εκπαίδευσης (πχ από κάποια δεδομένα), αλλά πρέπει ο ίδιος ο χρήστης να εισάγει όλες τις παραμέτρους ελέγχου (πχ συναρτήσεις συμμετοχής, κανόνες, κλπ) με βάση την δική του εμπειρία και κρίση.

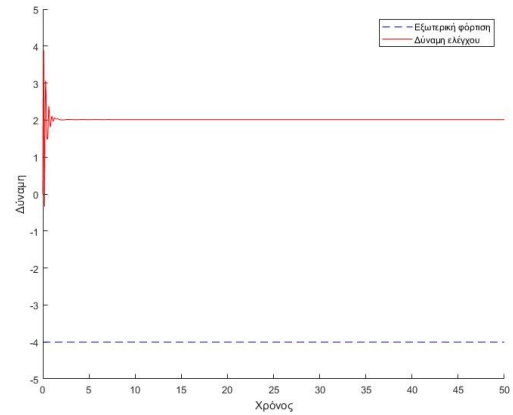
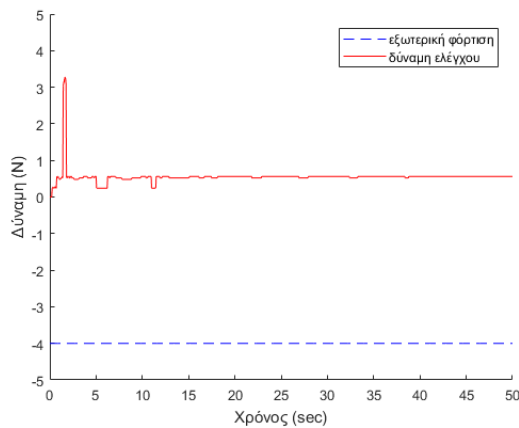


Εικόνα 31. Ασαφές σύστημα συνεπαγωγής F.I.S.

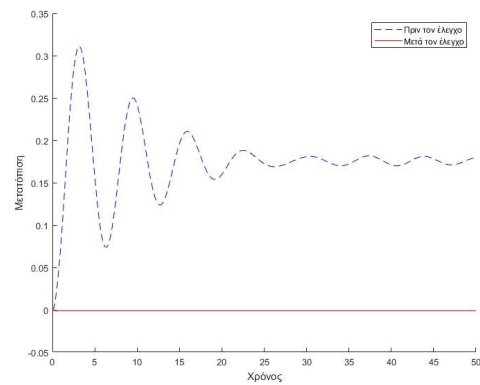
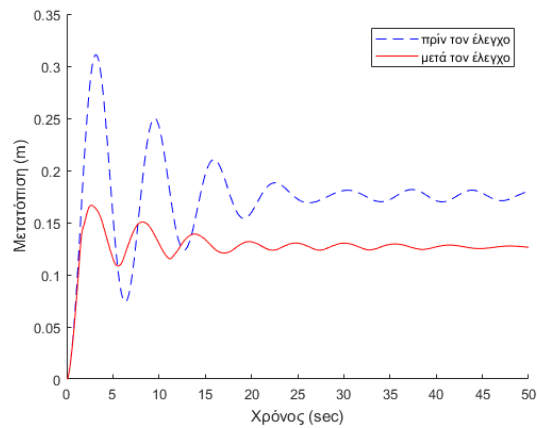
Στα παρακάτω διαγράμματα, στα αριστερά φαίνονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή ενός ασαφούς ελεγκτή στη ίδια κατασκευή ραδιοτηλεσκοπίου από την διπλωματική του κ. Μαραγκουδάκη και δεξιά τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τον νευροασαφή ελεγκτή 3 που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, θα συγκρίνουμε διαγράμματα δυνάμεων (εξωτερικής και ελέγχου), μετατόπισης και ταχύτητας για περιπτώσεις σταθερής και ημιτονοειδούς εξωτερικής δύναμης. (16)

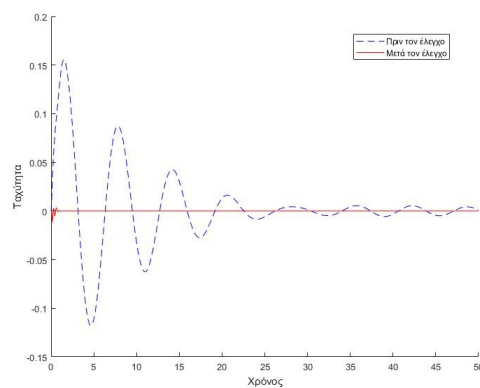
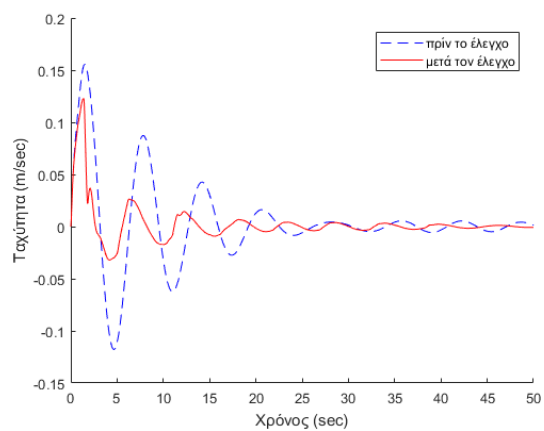
## Αποτελέσματα για σταθερή δύναμη $F=-4\text{ N}$



Διάγραμμα 28. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου ασαφούς και νευροασαφούς ελεγκτή



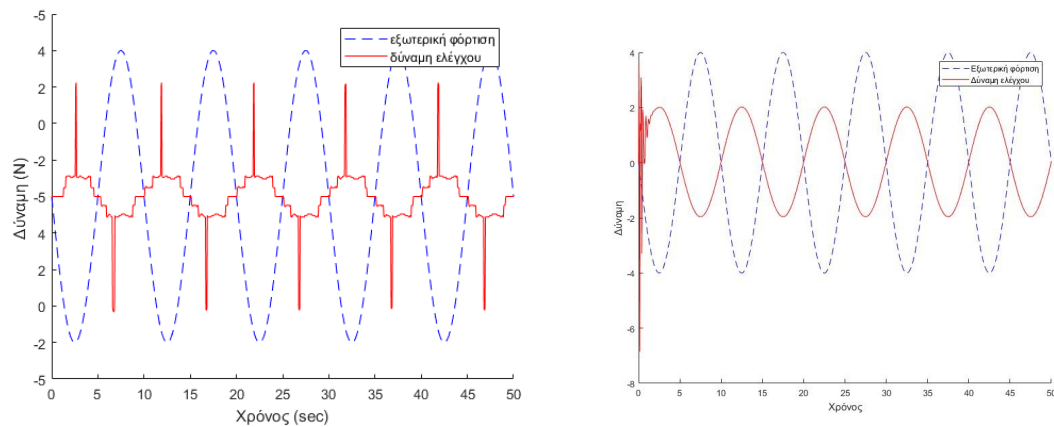
Διάγραμμα 29. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης για τις περιπτώσεις ασαφούς και νευροασαφούς ελεγκτή



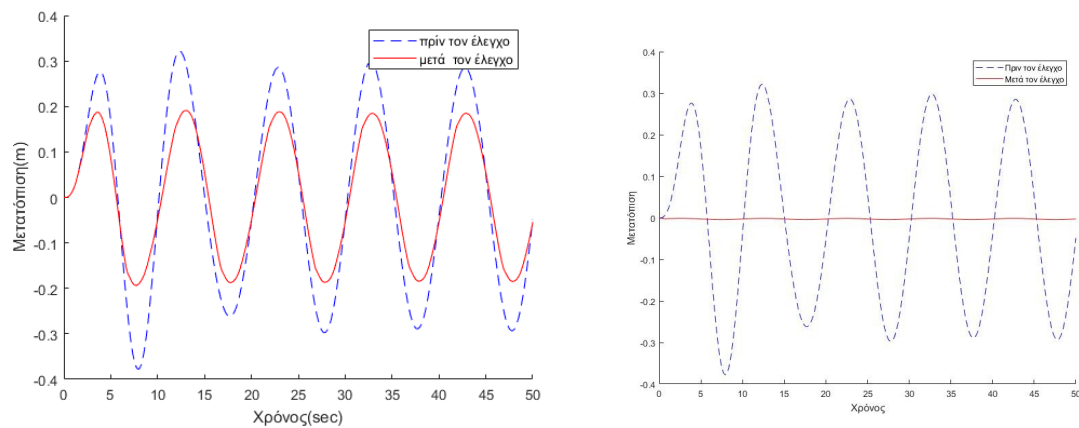
Διάγραμμα 30. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης για τις περιπτώσεις ασαφούς και νευροασαφούς ελεγκτή



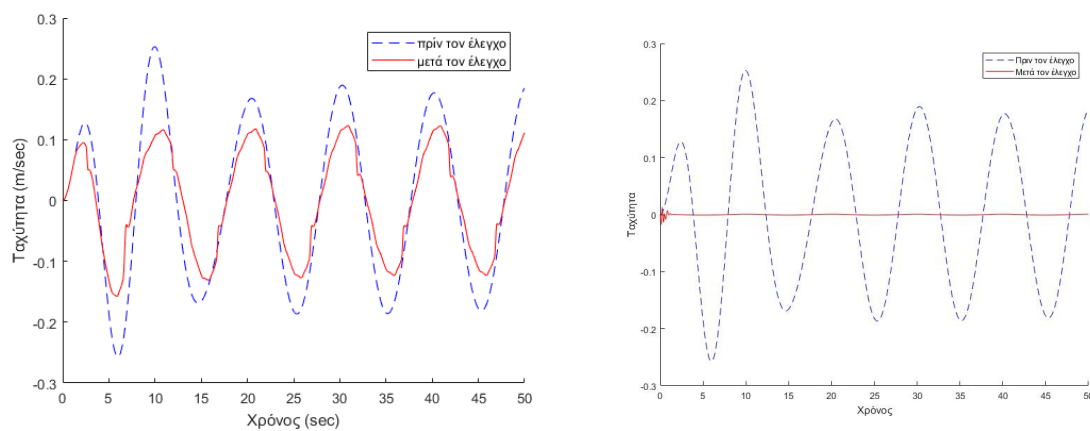
## Αποτελέσματα για ημιτονοειδή δύναμη



Διάγραμμα 31. Εξωτερική φόρτιση και δύναμη ελέγχου ασαφούς και νευροασαφούς ελεγκτή



Διάγραμμα 32. Μετατόπιση του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης για τις περιπτώσεις ασαφούς και νευροασαφούς ελεγκτή



Διάγραμμα 33. Ταχύτητα του κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή της δύναμης για τις περιπτώσεις ασαφούς και νευροασαφούς ελεγκτή

## Συμπεράσματα

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η δημιουργία και η μελέτη ενός συστήματος ελέγχου, με την χρήση ενός ελεγκτή νευροασαφούς λογικής, καθώς και η μελέτη της αντίδρασης της κατασκευής για διαφορετικού τύπου δυνάμεις.

Με βάση τα διαγράμματα μπορούμε με να πούμε με σιγουριά ότι ο νευροασαφής έλεγχος είναι αποδοτικός σε περίπτωση που τον εκπαιδεύσουμε σωστά. Επιλέξαμε να εκπαιδεύσουμε τον ελεγκτή με δεδομένα εισόδου (μετατόπιση και ταχύτητα) από κόμβους οι οποίοι είναι κοντά σε αυτόν τον οποίο εφαρμόζεται η εξωτερική δύναμη.

Επίσης παρατηρήσαμε ότι ακόμα και με περιοδικό φορτίο ο νευροασαφής έλεγχος ήταν αποδοτικότερος και περιορίζει την ταλάντωση σε σημαντικό βαθμό μέσα σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα, το οποίο χρειαζόταν ο ελεγκτής μας για να προσαρμοστεί.

Τέλος, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μας με αντίστοιχα αποτελέσματα που παίρνουμε από έναν απλό ασαφή ελεγκτή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως όταν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ ασαφούς και νευροασαφούς ελέγχου, προτιμότερος είναι ο νευροασαφής καθώς παραμετροποιεί τις συνιστώσες του εκάστοτε μοντέλου μελέτης με τρόπο όπου δεν σφάλει αφού αποποιείται της ανθρώπινης κρίσης η οποία ορισμένες φορές, αδυνατεί να περιλάβει όλες τις δυνατές περιπτώσεις.

## Βιβλιογραφία

1. Wikipedia. Ραδιοτηλεσκόπιο, el.wikipedia.org, Προσπελάστηκε: 29-9-2018 [Ηλεκτρονικό]
2. TRT Το μεγαλύτερο ραδιοτηλεσκόπιο του κόσμου. www.trt.net.tr Προσπελάστηκε: 29-9-2018 [Ηλεκτρονικό].
3. ALFA VITA Για πρώτη φορά στην Ελλάδα θα κατασκευαστεί Ραδιοτηλεσκόπιο διεθνών προδιαγραφών www.alfavita.gr Προσπελάστηκε: 29-9-2018 [Ηλεκτρονικό].
4. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ, ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ . [Ηλεκτρονικό]  
<http://diocles.civil.duth.gr/links/home/veltiomeno/nees/MSS1/Diktiomata.pdf>.
5. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΩΝ, ΤΕΙ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -. [Ηλεκτρονικό] [https://elearning.teicm.gr/file.php/19/kef8\\_diktywmatata.pdf](https://elearning.teicm.gr/file.php/19/kef8_diktywmatata.pdf).
6. ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΜΑΝΟΥΚΑΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ , ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ, ΤΕΙ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΛΑΡΙΣΑ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016 . <https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/EY204/%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CE%A5%CE%A0%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%93%CE%99%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A3%20%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%A9%CE%9D.pdf> [Ηλεκτρονικό].
7. FERDINARD P. BEER , E. RUSSELL JOHNSTON , DAVID R. EISENBERG. ΣΤΑΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ,9<sup>η</sup> ΕΚΔΟΣΗ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ .
8. Muttoni Aurelio. *The art of Structures Introduction to the Fuctioning of Structures in Architecture*, EPFL PRESS.
9. Β. Κουμούσης Καθηγητής ΕΜΠ . Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 1998 . [Ηλεκτρονικό] [http://users.ntua.gr/vkoum/undergraduate/infelem/theory/fem\\_part\\_1.pdf](http://users.ntua.gr/vkoum/undergraduate/infelem/theory/fem_part_1.pdf).
10. Δρ. Δημήτριος Καρύδης . Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων . [Ηλεκτρονικό] <http://users.ntua.gr/caridis/methodoi/keimena/chap%2003/Chapter%2003.pdf>.
11. Θεοδώρου, Γιάννης Α. Εισαγωγή στην ασαφή λογική (Fuzzy Logic) : Βασικές αρχές της ασαφούς λογικής με εφαρμογές στην τεχνολογία: Στοιχεία ασαφούς συνολοθεωρίας-ασαφούς αριθμητικής-ασαφούς γραμμικής άλγεβρας, ασαφή συστήματα ελέγχου-εφαρμογές Matlab / Γιάννης Α. Θεοδώρου. - 1η έκδ. - Θεσσαλονίκη : Τζιόλα, 2010.
12. Ασάφης λογική, ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ . [Ηλεκτρονικό]  
[https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/EE846/fuzzy\\_logic.pdf](https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/EE846/fuzzy_logic.pdf).
14. Ταϊρίδης, Γεώργιος Κ. Διδακτορική διατριβή *Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση κατασκευών με ευφυή έλεγχο*. Χανιά :, Ιούλιος 2016.
15. Ταϊρίδης Γεώργιος, 2009. Μεταπτυχιακή διατριβή : *Προσομοίωση ευφών συστημάτων με αισθητήρες διεγέρτες απο πιεζοηλεκτρικά υλικά. Συνδεσή με ευφυείς μεθόδους ελέγχου*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης. : s.n.

16. Δημήτριος, Μαραγκουδάκης. Διπλωματική εργασία : *Βέλτιστη Μορφή Δικτυωτών Φορέων*. Χανιά, Ιούλιος 2018.
17. Chandrupatla, Tirupathi R. Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία για μηχανικούς / Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu · επιμέλεια Χαράλαμπος Φραγκάκης · μετάφραση Μαρία Φραγκάκη. - 1η έκδ. - Αθήνα : Κλειδάριθμος, 2005.
18. Jyh-Shing R. Jang. *Fuzzy Modeling Using Generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm* 1991.