



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ

Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Επιβλέπων Καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Μοντελοποίηση Έξυπνων Κατασκευών

ΜΑΝΤΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Γεώργιο Σταυρουλάκη, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την βοήθεια του και την καθοδήγηση του για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου, όπως και τον κύριο Γεώργιο Ταϊρίδη, διδάκτορα στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, που δίχως την πολύτιμη βοήθεια του δεν θα είχε ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	4
2. Ασαφής Λογική.....	5
2.1 Εφαρμογές ασαφούς λογικής.....	5
2.2 Μειονεκτήματα ασαφούς λογικής.....	6
2.3 Συναρτήσεις συμμετοχής.....	6
2.4 Ασαφοποίηση.....	8
2.5 Αποσαφοποίηση.....	8
2.6 Ασαφής ελεγκτής.....	8
3. Έξυπνες κατασκευές.....	10
3.1 Ευφυή Υλικά.....	10
3.2 Πιεζοηλεκτρισμός.....	11
3.3 Collocated VS Non-Collocated.....	12
4. Αριθμητικά αποτελέσματα .....	13
4.1 1 <sup>η</sup> Περίπτωση.....	15
4.2 2 <sup>η</sup> Περίπτωση.....	21
4.3 3 <sup>η</sup> Περίπτωση.....	27
4.4 4 <sup>η</sup> Περίπτωση.....	33
5. Συμπεράσματα.....	38
6. Βιβλιογραφία.....	39

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μεθοδολογίες σχεδίασης των πιεζοηλεκτρικών έξυπνων κατασκευών, βρίσκονται τώρα στην “πρώτη γραμμή”, καθώς η χρήση τους έχει αυξηθεί πάρα πολύ τα τελευταία χρόνια και αναμένεται ακόμα παραπάνω η εκμετάλλευσή τους, όπως και η εξέλιξη τους. Τα ευφυή συστήματα περιλαμβάνουν αισθητήρες και διεγέρτες που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον, μέσω ενός μηχανισμού ελέγχου.

Όπως θα εξηγήσουμε και στη συνέχεια, η ασαφής λογική υπερτερεί έναντι της κλασικής λογικής, καθώς η τελευταία οδηγείται πολλές φορές σε περιπτώσεις ασάφειας, χωρίς να σημαίνει ότι η πρώτη δεν παρουσιάζει κανένα ελάττωμα. Ο ασαφής έλεγχος απαιτεί μικρότερη πληροφορία. Αρκεί να γνωρίζουμε τις τιμές εισόδου του ελεγκτή.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, συναντάμε συστήματα ελέγχου στα οποία ο αισθητήρας τοποθετείται στην ίδια θέση με την δύναμη εισόδου (collocated περιπτώσεις) και συνήθως αυτή είναι η προτιμότερη μέθοδος, λόγω των αρκετών πλεονεκτημάτων και ακριβέστερων μετρήσεων που παρουσιάζει. Παρόλα αυτά στην δικιά μας περίπτωση, ο αισθητήρας δεν θα βρίσκεται στην ίδια θέση με την δύναμη εισόδου (non-collocated περίπτωση).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μειώσουμε το εύρος, είτε αυτό σχετίζεται με την μετατόπιση, είτε με την ταχύτητα και την επιτάχυνση. Προβλέπεται να είναι δύσκολο να πετύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, λόγω των δυσκολιών που συναντάμε στις non-collocated περιπτώσεις, αλλά όπως θα δούμε στη συνέχεια, σε κάποιες περιπτώσεις το πετυχαίνουμε. Το σύστημά μας, αποτελείται από δύο μάζες συνδεδεμένες με τρία ελατήρια. Χρησιμοποιήθηκε ασαφής ελεγκτής τύπου Mamdani από την εργασία του κ. Ταϊρίδη [1], και με την βοήθεια του προγράμματος Matlab εξάγαμε τα αποτελέσματά μας. Στο πρόβλημα μαζών - ελατηρίων που εξετάσαμε, επιλέξαμε τη μέθοδο Houbolt για την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης. Το σύστημα μας, έχει σχεδιαστεί και έχει χρησιμοποιηθεί από τον κύριο Γεώργιο Ταϊρίδη στα πλαίσια της μεταπτυχιακής του διατριβής, “Προσομοίωση σύνθετων ευφυών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά” [2].

## 2. ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ

Η ασαφής λογική είναι ένα υπερσύνολο της κλασικής λογικής, όπου οι λογικές προτάσεις, δεν έχουν απόλυτες τιμές αλήθειας ή ψεύδους. Διαφέρει από την λογική ότι μια πρόταση θα είναι "ΑΛΗΘΕΙΑ ή ΨΕΜΑ" ή "ΝΑΙ ή ΟΧΙ", αλλά παίρνει ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών. Χαρακτηριστικό της, είναι η έλλειψη ακρίβειας. Πλεονεκτήματα που παρουσιάζει αυτή η μέθοδος είναι:

- Παρόμοια με την ανθρώπινη λογική
- Εύκολα κατανοητή
- Μπορεί να μοντελοποιήσει προβλήματα με μεγάλη πολυπλοκότητα
- Συνδυάζεται με άλλες τεχνικές ελέγχου
- Προσαρμόζεται εύκολα [9]

Για παράδειγμα μια περίπτωση που δεν θα μπορούσε να ερμηνευτεί από τα κλασικά σύνολα. Εάν θεωρήσουμε ως πεδίο ορισμού τις ηλικίες  $\{0,1,...,100\}$  και θέλουμε να δημιουργήσουμε το σύνολο των ηλικιών που έχουν την ιδιότητα «νέος άνθρωπος», θεωρούμε ότι μέχρι π.χ. τα 30 έτη, θεωρείται κάποιος νέος. Έτσι οδηγούμαστε στο ακόλουθο παράδοξο:

Οι ηλικίες 0 έως 30 υπάγονται στο σύνολο «νέος άνθρωπος» κατά 100%, δηλαδή δε διαφέρουν μεταξύ τους ως προς αυτήν την ιδιότητα. Αλλά έτσι βγαίνει το λανθασμένο συμπέρασμα ότι ένας άνθρωπος 31 ετών δεν είναι νέος και μάλιστα κατά το ίδιο ποσοστό που δεν είναι νέος και ένας άνθρωπος 75 ετών, δηλαδή η ιδιότητα της νεότητας χάνεται απότομα και με τρόπο παρόμοιο για όλες τις ηλικίες άνω του ορίου των 30 ετών. [3]

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό παράδειγμα που φαίνεται η χρησιμότητα της ασαφούς λογικής είναι ότι αν θεωρήσουμε ότι κάποιος είναι ψηλός από ύψος 1,90εκ. και πάνω τότε σημαίνει ότι κάποιος που έχει ύψος 1,89εκ. δεν είναι ψηλός ;

Στις παραπάνω περιπτώσεις επειδή το πρόβλημα μας παρουσιάζει ασάφεια (fuzziness) δεν είναι δυνατόν να εξεταστεί με τα κλασικά σύνολα, για αυτό είναι απαραίτητη η παρουσία των ασαφή συνόλων.

### 2.1 Εφαρμογές ασαφούς λογικής

Η ασαφής λογική λόγω της ταχύτητας προόδου που έχει σημειώσει τα τελευταία χρόνια, έχει εξελιχτεί σε ένα πολύ χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο για τους χρήστες της. Όπως είναι φυσικό, μαζί με την εξέλιξη της , έχουν παρουσιάσει αλματώδη ανάπτυξη και οι εφαρμογές που την συναντάμε. Για παράδειγμα, οικιακές συσκευές όπως το πλυντήριο πιάτων ή ρούχων είναι μια συσκευή αποτέλεσμα της ασαφούς λογικής, επειδή από μόνη της έχει τη δυνατότητα να καθορίσει την σωστή πίεση και ποσότητα νερού, για να υπάρξει μια αποτελεσματική πλύση.

Άλλα παραδείγματα εφαρμογών της μεθόδου μας είναι τα αντικλεπτικά συστήματα, οι ελεγκτές αυτοκινήτων μηχανών, τα υπόγεια συστήματα τρένων, τα αναπτυσσόμενα συστήματα έγχρωμων φιλμ, τα μετεωρολογικά συστήματα, τα συστήματα απόφασης, οι κάμερες αυτόματης εστίασης, και στον τομέα της ιατρικής, για διαγνώσεις, προβλέψεις κληρονομικών χαρακτηριστικών, ρομπότ νοσοκόμους.

Την συναντάμε συχνά σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου, όπως είναι η ανάκτηση δεδομένων, ανίχνευση σφάλματος, αναγνώριση ήχου και εικόνας. Στις επιχειρήσεις συναντάται σε συστήματα διοίκησης και απόφασης, στον τομέα του marketing και ως σύμβουλος επιχειρήσεων και επένδυσης. Επιπλέον υπάρχει στη δημόσια παιδεία και σε επιστήμες όπως η ψυχολογία, η σεισμολογία και η γεωργική μετεωρολογία.

Ο καθηγητής Bart Kosko του πανεπιστημίου της Νότιας Καλιφόρνιας προέβλεψε μερικές μελλοντικές εφαρμογές της, σχετικά με ρομπότ με ανθρώπινη συμπεριφορά. Στη συνέχεια ακολουθούν τρία παραδείγματα τέτοιας εφαρμογής:

- Υπολογιστές που θα κατανοούν και θα ανταποκρίνονται στην ανθρώπινη γλώσσα
- Μηχανές που θα γράφουν μυθιστορήματα και πλήρη σενάρια ταινιών με προεπιλεγμένο θέμα και ύφος
- Μόρια που θα περιπλανιούνται στο αίμα και θα σκοτώνουν τα καρκινοειδή κύτταρα καθυστερώντας έτσι την θανατηφόρα πορεία τους.

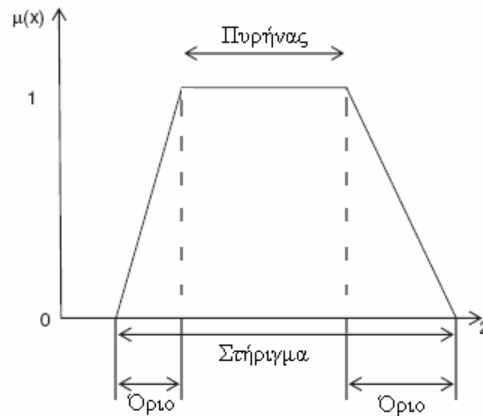
Είναι αναμφισβήτητο ότι έχει παρουσιάσει τρομερή ανάπτυξη και βελτίωση τα τελευταία χρόνια, παρόλ' αυτά δεν πρέπει να καθυστερούμε καθώς υπάρχει περαιτέρω χώρος για εξέλιξη και υπάρχουν σημεία που παρουσιάζουν ακόμα μειονεκτήματα. [6]

## 2.2 Μειονεκτήματα Ασαφούς Λογικής

Όταν τα συστήματα γίνονται πιο δύσκολα, γίνεται αυτομάτως πιο δύσκολη η διαδικασία να βρούμε τους απαραίτητους κανόνες και συναρτήσεις συμμετοχής, ώστε να περιγράψουμε αποτελεσματικά το σύστημα. Γενικά, παρόλο που μπορεί να καταφέρουμε να δημιουργήσουμε και να χρησιμοποιήσουμε μια βάση κανόνων, παραμένει δύσκολη η συσχέτιση μεταξύ τους. Επίσης δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ασαφή λογική σε όλων των ειδών τα προβλήματα. Υπάρχει η λανθασμένη πεποίθηση ότι επειδή χαρακτηρίζεται από μια τυχαιότητα, πιστεύεται ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε είδους προβλήματα. [6]

## 2.3 Συναρτήσεις Συμμετοχής

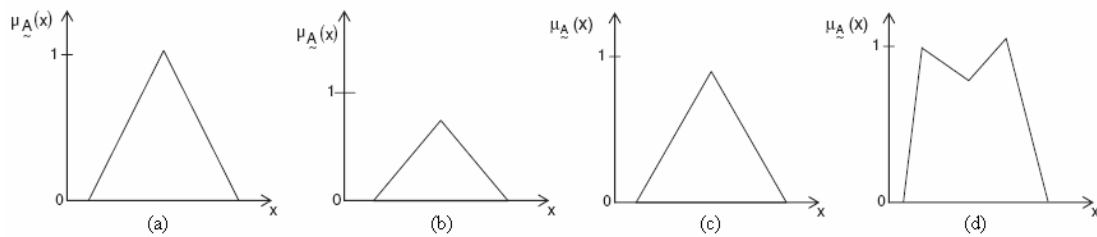
Η συνάρτηση συμμετοχής ορίζεται ως το είδος της ασάφειας ενός ασαφούς συνόλου, είτε το πεδίο ορισμού είναι διακριτό, είτε συνεχές. Η αναπαράσταση των συναρτήσεων συμμετοχής γίνεται γραφικά ή αριθμητικά. Οι γραφικές αναπαραστάσεις περιλαμβάνουν διάφορα σχήματα κάθε ένα με τους δικούς του περιορισμούς. Μπορεί να είναι συμμετρικό ή ασύμμετρο και τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι ο πυρήνας, το στήριγμα και τα όρια όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1: Χαρακτηριστικά συναρτήσεων συμμετοχής

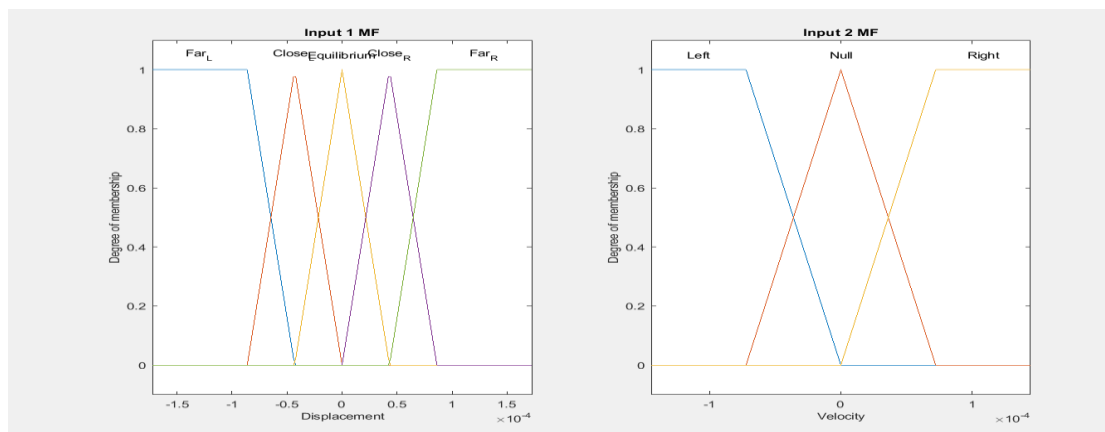
Τα ασαφή σύνολα χαρακτηρίζονται ανάλογα με το είδος της καμπύλης συμμετοχής ως:

- Κανονικά
- Ημικανονικά
- Κυρτά
- Μη κυρτά [2]

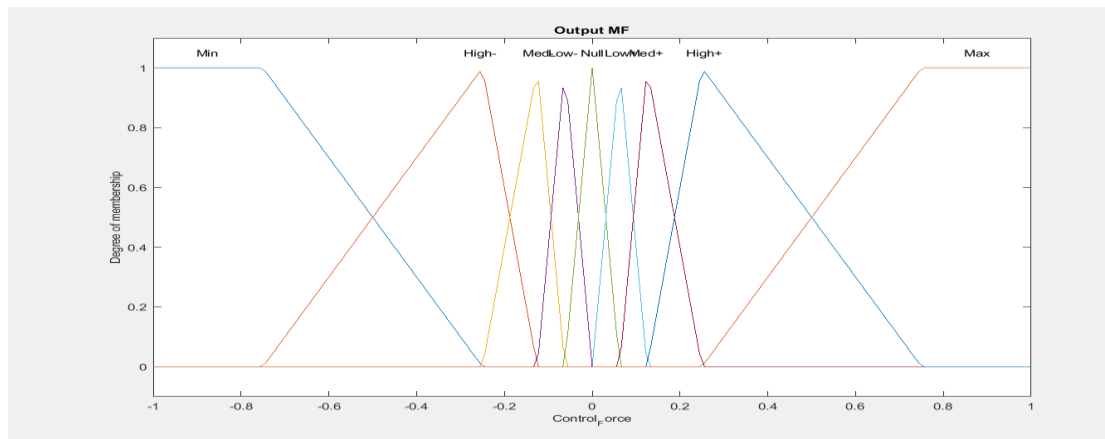


Σχήμα 2: Είδη ασαφών συνόλων

Στο πρόβλημα μας, οι συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των εισόδων και της εξόδου είναι τριγωνικής μορφής, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. (συμβολίζουμε ως input1 και input2 την πρώτη είσοδο και δεύτερη αντίστοιχα και ως output την έξοδο).



Σχήμα 3: Συναρτήσεις συμμετοχής της πρώτης (αριστερά) και δεύτερης (δεξιά) εισόδου.



Σχήμα 4 : Συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου

## 2.4 Ασαφοποίηση

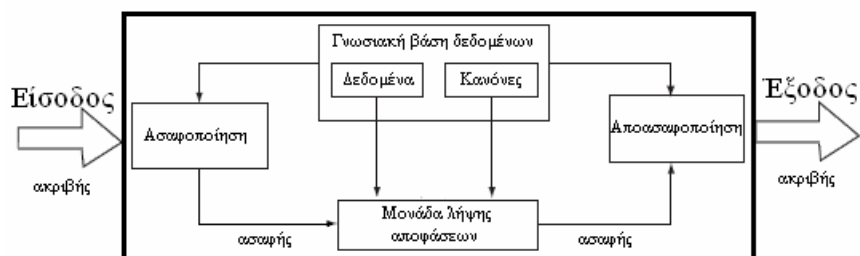
Είναι η διαδικασία κατά την οποία μια αριθμητική ποσότητα μετατρέπεται σε ασαφή, η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί με τις συναρτήσεις συμμετοχής. Σε πρακτικές εφαρμογές είναι πιθανή η ύπαρξη σφαλμάτων με συνακόλουθη μείωση της ακρίβειας των δεδομένων. Αυτή η μείωση της ακρίβειας μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί με τις συναρτήσεις συμμετοχής.

## 2.5 Αποσαφοποίηση

Είναι το αντίστροφο της ασαφοποίησης, δηλαδή είναι η διαδικασία κατά της οποία ασαφή σύνολα μετατρέπονται σε ακριβή αριθμητικά σύνολα. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη δεδομένου ότι οι τιμές των εξόδων πρέπει να είναι ακριβείς, ειδικά όταν το ασαφές σύστημα χρησιμοποιείται σαν ελεγκτής, όπου οι ασαφείς έξοδοι δεν είναι χρήσιμες για περαιτέρω επεξεργασία.

## 2.6 Ασαφής ελεγκτής

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, χρησιμοποιείται ένα ασαφές σύστημα συνεπαγωγής όπως αυτό που φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5: Ασαφές σύστημα συνεπαγωγής



Υπάρχουν δύο μέθοδοι συνεπαγωγής, η μέθοδος Mamdani και η μέθοδος Sugeno. Ο τύπος ελεγκτή στο δικό μας πρόβλημα είναι τύπου Mamdani. Κατασκευάστηκε ελεγκτής MISO (multiple inputs, single output) δύο εισόδων και μιας εξόδου με χρήση του πακέτου Fuzzy Toolbox της Matlab. Ως εισόδους λαμβάνει την μετατόπιση και την ταχύτητα και ως έξοδο μας δίνει την δύναμη ελέγχου.

Η μέθοδος Mamdani:

- Είναι διαισθητική μέθοδος
- Χαίρει ευρείας αποδοχής
- Προσαρμόζεται καλά σε πραγματικά προβλήματα
- Είναι σχετικά απλή μέθοδος
- Αποδίδει ικανοποιητικά σε σύνθετα μοντέλα, χωρίς απώλεια ακρίβειας [2]

### 3. Έξυπνες Κατασκευές

Η έννοια των έξυπνων ή ευφυών κατασκευών ξεκίνησε μια νέα δομική επανάσταση. Μια έξυπνη κατασκευή αποτελείται συνήθως από αισθητήρες και ενεργοποιητές που ενσωματώνονται μέσω μιας διαδικασίας ελέγχου. Το συγκεκριμένο σύστημα ονομάζεται έξυπνο, επειδή έχει τη δυνατότητα να κάνει από μόνο του διάγνωση των συνθηκών και να προσαρμόζεται στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Η τεχνολογία των έξυπνων υλικών και ιδίως οι πιεζοηλεκτρικές έξυπνες κατασκευές, έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία. Μια υποσχόμενη εφαρμογή τους είναι ο έλεγχος και η καταστολή των ανεπιθύμητων κραδασμών. Οι μεθοδολογίες σχεδίασης τους βρίσκονται τώρα στο επίκεντρο, καθώς οι ερευνητές διευρύνουν την χρήση τους σε εφαρμογές της πραγματικής ζωής. [11]

Μια έξυπνη κατασκευή περιλαμβάνει κατανεμημένους ενεργοποιητές και αισθητήρες και έναν ή περισσότερους μικροεπεξεργαστές, οι οποίοι αναλύουν τις αποκρίσεις από τους αισθητήρες και χρησιμοποιούν τη θεωρία ελέγχου ενσωματώσεως για να δώσουν εντολή στους ενεργοποιητές, να εφαρμόσουν εντοπισμένα στελέχη / μετατοπίσεις για να αλλάξουν την απόκριση του συστήματος. Επιπλέον έχει την ικανότητα να ανταποκρίνεται σε ένα εξωτερικό περιβάλλον ανταλλαγής (όπως ζημιά ή αποτυχία) και ενσωματώνει ενεργοποιητές έξυπνου υλικού που επιτρέπουν την ελεγχόμενη τροποποίηση των χαρακτηριστικών του συστήματος (όπως δυσκαμψία ή απόσβεση). [5]

#### 3.1 Ευφυή Υλικά

Ως ευφυή υλικά αναφέρονται τα συστήματα που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο, εξαιτίας μιας διέγερσης. Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν αισθητήρες και ενεργοποιητές, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο βρόχο ελέγχου. Τα υλικά αυτά διακρίνονται για την ικανότητα απόκρισης σε ερεθίσματα διαφορετικής φύσεως. Με τους αισθητήρες αντιλαμβάνονται τις αλλαγές στο εξωτερικό περιβάλλον (π.χ. αλλαγή θερμοκρασίας) ή στη δομή τους (π.χ. ανάπτυξη ατελειών ή μεταβολή της κρυσταλλικής δομής) και αποκρίνονται σε αυτές με τους ενεργοποιητές, αλλάζοντας κάποια ιδιότητά τους προς ορισμένη κατεύθυνση (π.χ. δυσκαμψία, σχήμα, ικανότητα απόσβεσης). [4]



Σχήμα 6: Το σημείο τομής των τριών κύκλων ορίζει την ύπαρξη των ευφυών υλικών.

### 3.2 Πιεζοηλεκτρισμός

Υπάρχουν υλικά (κυρίως κρυσταλλικά αλλά και μερικά κεραμικά) που παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πιεζοηλεκτρισμός και μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Επίσης, ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται, όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση. Ο πιεζοηλεκτρισμός ανακαλύφθηκε από τα αδέρφια Curie (Pierre και Jacques) το 1880.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ανήκουν στα ευφυή υλικά, δηλαδή τα υλικά που έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Η χρήση τους ως ενεργοποιητές και αισθητήρες έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Ευρέως διαδεδομένα υλικά είναι ο χαλαζίας και ο τουρμαλίνης, όπως και το  $\text{BaTiO}_3$  και PZT (πολυκρυσταλλικά κεραμικά), που χρησιμοποιούνται αρκετά λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής και επειδή παρουσιάζουν εξαιρετικές διηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες.

Αν και είναι ευρέως διαδεδομένος ο πιεζοηλεκτρισμός, οι δυνατότητες του δεν έχουν τελειοποιηθεί. Οι επιστήμονες κάνουν έρευνες για την καλύτερη αξιοποίηση του τόσο στις οικίες αλλά και γενικότερα στο αστικό περιβάλλον. Για παράδειγμα γίνονται έρευνες, ώστε η τοποθέτηση πλακών πιεζοηλεκτρισμού κάτω από το οδόστρωμα, να έχει την ικανότητα να μετατρέπει την ενέργεια των διερχόμενων αυτοκινήτων σε ηλεκτρισμό. Επίσης το συναντάμε σε εφαρμογές της ακουστικής (ηλεκτροακουστική, βιοϊατρική, μικροζυγαριές κτλ). [10]

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται σε ελέγχους κατασκευών που υποβάλλονται σε εναλλασσόμενες φορτίσεις. Οι αισθητήρες είτε ενσωματώνονται, είτε συγκολλώνται στις κατασκευές. Αυτοί που συγκολλώνται δεν είναι παρεισφρητικοί, έχουν μικρό μέγεθος και δεν αλλοιώνουν τις ιδιότητες της κατασκευής. Η γρήγορη απόκρισή, το μικρό μέγεθος, η μεγάλη πυκνότητα ισχύος και μεγάλη δύναμη είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά τους. Έχουν τη δυνατότητα να ενεργούν και ως ενεργοποιητές, αλλά και ως αισθητήρες. Η ικανότητά τους να ανιχνεύουν τάσεις κάτω από τη φόρτιση μέσω δυναμικών φορτίων, επιτρέπει την προβολή των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 1: Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές

Όσον αφορά τους πιεζοκεραμικούς ενεργοποιητές κύρια λειτουργία τους είναι η μεταφορά της τάσης μέσω ενός στρώματος κόλλας. Οι αισθητήρες είναι σύνθετα υλικά, που αποτελούνται από ένα μη αγώγιμο υλικό και ένα φίλτρο σύνδεσής του με το υπό εξέταση υλικό. Κάτω από την έκταση του, αυξάνεται το διάκενο ανάμεσα στο υλικό πληρώσεως και αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση του σύνθετου και το αντίστροφο ισχύει στην συμπίεση. Το πρόβλημα είναι η μη γραμμικότητα ανάμεσα στην αλλαγή της αντίστασης και της τάσης. [8]

### 3.3 Collocated VS Non-Collocated

Όταν ένας αισθητήρας τοποθετείται στην ίδια θέση με τη δύναμη εισόδου, το σύστημα ονομάζεται *collocated*. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν ο αισθητήρας και η δύναμη να βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις, τότε το σύστημα ονομάζεται *non-collocated*. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους η *collocated* μέθοδος προτιμάται στην τοποθέτηση των αισθητήρων και των ενεργοποιητών. Ωστόσο, σε κάποια μηχανικά συστήματα αυτή η μέθοδος δεν είναι δυνατή και αυτό παρουσιάζει μερικά μοναδικά προβλήματα στον έλεγχο του συστήματος. Τέτοια περίπτωση συναντάμε π.χ. σε άξονες μηχανικής κατεργασίας υψηλής ταχύτητας, που υποστηρίζονται από ενεργά μαγνητικά έδρανα ή εφαρμογές ρομποτικής. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, η δύναμη εισόδου ενεργεί στο σύστημα στο ένα σημείο και ο αισθητήρας μετρά την απόκριση σε άλλο. [5]

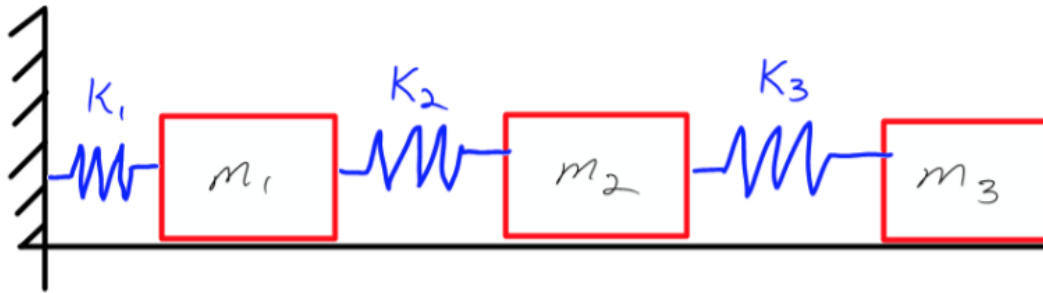
Ως σχεδιαστές ενός συστήματος ελέγχου, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τα οφέλη και τα μειονεκτήματα τόσο των *collocated* και τα όσο και των *non-collocated* συστημάτων, έτσι ώστε να μπορούμε να επιλέξουμε το κατάλληλο. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις, ο σχεδιαστής δεν έχει επιλογή και πρέπει να χρησιμοποιεί ένα *non-collocated* σύστημα. Όταν αυτό συμβαίνει, είναι επιτακτική ανάγκη να είναι πλήρως κατανοητές οι συνέπειες του. Με την καλύτερη κατανόηση, μπορούν να σχεδιαστούν και να εφαρμοστούν καλύτερα και περισσότερο ακριβή συστήματα ελέγχου.

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά κάθε συστήματος ελέγχου είναι η σταθερότητα του. Ένα *collocated* σύστημα είναι πιο σταθερό σε μεγάλες διαταραχές των παραμέτρων του. Αυτό συμβαίνει λόγω των εναλλασσόμενων πόλων και μηδενικών σημείων που υπάρχουν σε αυτά. Συστήματα με εναλλασσόμενους πόλους και μηδενικά, επίσης γνωστά ως *role-zero interlacing*, είναι σταθερά. Τα *non-collocated* συστήματα μπορεί να μην έχουν την ιδιότητα της *role-zero interlacing* λόγω της μετατόπισης του πόλου-μηδέν. Η μετακίνηση με μηδενικό πόλο συχνά οδηγεί σε ασταθή συστήματα. [7]

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με τον *non-collocated* έλεγχο, παρά τις δυσκολίες που συναντάμε σε αυτήν την μέθοδο, προσπαθώντας να πετύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για το σύστημα μας.

#### 4. Αριθμητικά αποτελέσματα

Το πρόβλημα που μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αφορούσε σύστημα τριών μαζών με τρία ελατήρια, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το σύστημα μοντελοποιήθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε περιβάλλον Matlab.



Εικόνα 2: Σύστημα τριών μαζών – τριών ελατηρίων

Οι εξισώσεις του συστήματος δίδονται ως:

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

Όπου:

$\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$  είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας,

$\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}$  είναι τα πεδία μετακινήσεων, ταχυτήτων και επιταχύνσεων

$\mathbf{P}$  και  $\mathbf{Z}$  είναι οι εξωτερικές δυνάμεις και οι δυνάμεις ελέγχου αντίστοιχα.

Ως μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Houbolt. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί δυο σταθερές  $\beta$  και  $\gamma$  (σταθερές Houbolt). Για το πρόβλημα μας αυτές οι δυο σταθερές λαμβάνουν αντίστοιχα τις τιμές 0,25 και 0,50.

Ο συνολικός χρόνος της διαδικασίας είναι 3 δευτερόλεπτα με βήμα που επιλέχθηκε μετά από δοκιμές, να είναι 0,001 δευτερόλεπτα, δημιουργώντας έτσι 3000 επαναλήψεις.

Οι σταθερές ολοκλήρωσης ( $c_i$ ) δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$c_1 = \frac{1}{\beta \cdot (\Delta t)^2}, c_2 = \frac{1}{\beta \cdot \Delta t}, c_3 = \frac{1}{2\beta}, c_4 = \frac{\gamma}{\beta \cdot \Delta t}, c_5 = \frac{\gamma}{\beta}, c_6 = \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right)$$

Ο αλγόριθμος, όπως υλοποιήθηκε με τον ασαφή έλεγχο, συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα.

### **Βήμα 1: Αρχικοποίηση μεταβλητών**

$X, \dot{X}, \ddot{X}, F_m, M, \Lambda, K, \beta, \gamma, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$

### **Βήμα 2: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας $F^*$**

$$K^* = K + c_1 M + c_4 \Lambda$$

Αντιστροφή του  $K^* : F^* = (K^*)^{-1}$

Έναρξη βρόχου **for** από έως  $t_0$  έως  $t_f$

### **Βήμα 3: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας $P^*$**

Υπολογισμός μεταβολής φορτίσεων:  $dF_m = F_m(t+1) - F_m(t)$

Υπολογισμός μεταβολής δύναμης ελέγχου  $u$

Προσθήκη στην ποσότητα :  $dF_m : dF_m = dF_m + u$

Υπολογισμός της ποσότητας  $P^*$  με χρήση των μητρώων μάζας ( $M$ ) και απόσβεσης ( $\Lambda$ ) του συστήματος

$$P^* = dF_m + M(c_2 \dot{X}(t) + c_3 \ddot{X}(t)) + \Lambda(c_5 \dot{X}(t) + c_6 \ddot{X}(t))$$

### **Βήμα 4: Υπολογισμός του βήματος απόκρισης $dX$**

$$dX = F^* P^*$$

### **Βήμα 5: Επίλυση του επόμενου χρονικού βήματος ( $t + \Delta t$ )**

Calculate acceleration:  $X(t+1) = \ddot{X}(t) + c_1 dX - c_2 \dot{X}(t) - c_3 \ddot{X}(t)$

Calculate velocity:  $\dot{X}(t+1) = \dot{X}(t) + c_4 dX - c_5 \dot{X}(t) - c_6 \ddot{X}(t)$

Calculate displacement:  $X(t+1) = X(t) + dX$

Τερματισμός του βρόχου **for**

**ΤΕΛΟΣ**

Στο παρόν πρόβλημα ο ελεγκτής παίρνει ως είσοδο ταχύτητα και μετατόπιση και δίνει σαν έξοδο δύναμη ελέγχου. Για την περιγραφή του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε κανόνες οι οποίοι επιλέχθηκαν έπειτα από δοκιμές. Στη συνέχεια βρήκαμε το εύρος μεταβολής για τέσσερις περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση έχουμε αλλάξει μόνο την δύναμη που εφαρμόζεται, για κάθε συνδυασμό μετατόπισης και ταχύτητας. Παρακάτω υπάρχουν οι δεκαπέντε κανόνες για την εκάστοτε περίπτωση, καθώς και οι πίνακες, στους οποίους αναπαρίσται το εύρος μεταβολής για ταχύτητα, μετατόπιση και επιτάχυνση.

#### 4.1 1η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

Στην πρώτη περίπτωση μελετήσαμε ένα σύστημα του οποίου οι κανόνες ορίζονται ως εξής :

1. Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .
2. Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low- .
3. Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Null .
4. Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .
5. Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι High- .
6. Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Right(ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .
7. Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Null .
8. Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null(ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low- .
9. Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right(ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Null .
10. Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
11. Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Med+ .
12. Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
13. Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
14. Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι High- .
15. Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .

Από το σύστημα αυτό, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα 1<sup>ης</sup> περίπτωσης

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,00060305	0,000590094	2,20*
3	2	2-2	0,00233421	0,000471147	395,43
2	1	1-1	0,00031333	0,000590094	-46,90*
2	3	3-3	0,0024	0,00227833	5,34
1	2	2-2	0,0015	0,000471147	218,37
1	3	3-3	0,0039	0,00227833	71,18

ΤΑΧΥΤΗΤΑ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,00141142	0,00191359	-26,24
3	2	2-2	0,00216126	0,00131804	63,98
2	1	1-1	0,00109668	0,00191359	-42,69
2	3	3-3	0,00131804	0,00177417	-25,71
1	2	2-2	0,0011	0,00131804	-16,54
1	3	3-3	0,0021	0,00177417	18,37

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,0055	0,0087	-36,78
3	2	2-2	0,0048	0,0035	37,14
2	1	1-1	0,0039	0,0087	-55,17
2	3	3-3	0,0042	0,0054	-22,22
1	2	2-2	0,0035	0,0035	0,00
1	3	3-3	0,0045	0,0054	-16,67

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

\*Κατά 2,20% το εύρος του non-collocated είναι χειρότερο από το εύρος του collocated

\*Κατά 46,9% το εύρος του non-collocated είναι καλύτερο από το εύρος του collocated



Στην πρώτη στήλη έχουμε τον κόμβο ελέγχου (dofcontrol) και στην δεύτερη τον κόμβο εφαρμογής της δύναμης (dofapplication), οι οποίοι παίρνουν τιμές 1,2,3 ,καθώς έχουμε στο σύνολο τρεις μάζες. Αυτές οι δύο στήλες μαζί συνθέτουν τον non-allocated συνδυασμό, δηλαδή αν για την πρώτη σειρά ο κόμβος ελέγχου είναι 3 και ο κόμβος εφαρμογής 1 , τότε η περίπτωση μας είναι η 3-1. Στην επόμενη στήλη απεικονίζονται οι collocated περιπτώσεις (σε αυτήν την περίπτωση ταυτίζονται ο κόμβος ελέγχου με τον κόμβο εφαρμογής της δύναμης), και στις επόμενες δύο, υπάρχουν τα εύρη που πήραμε από τις μετρήσεις για τις non-allocated και collocated περιπτώσεις αντίστοιχα και συγκρίνοντας αυτές τις δύο στήλες μεταξύ τους, βρίσκουμε το ποσοστό μεταβολής του εύρους, όπως βλέπουμε στην τελευταία στήλη.

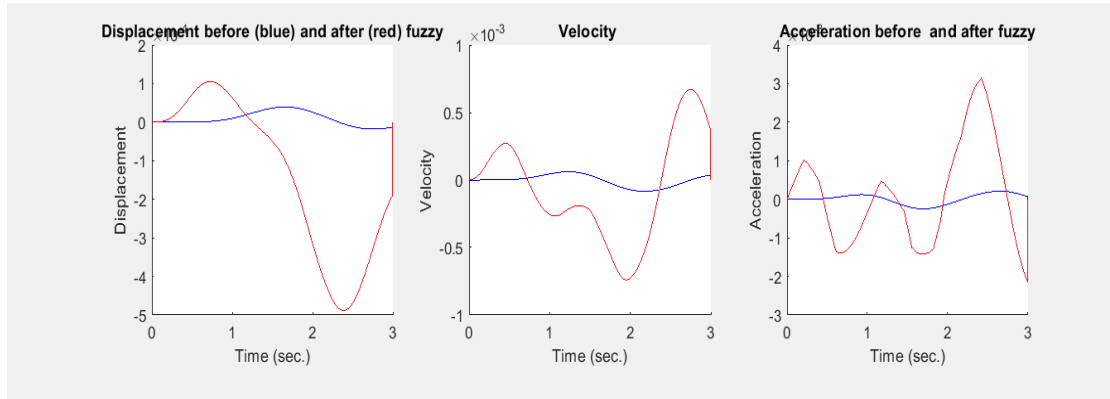
Πιο αναλυτικά, στον πρώτο πίνακα της μετατόπισης, στην πρώτη σειρά συγκρίνουμε την non-allocated περίπτωση 3-1, με την collocated 1-1. Βρήκαμε ότι το εύρος της πρώτης είναι 0,00060305, της δεύτερης είναι 0,000590094 και συγκρίνοντας αυτά μεταξύ τους προκύπτει ότι το ποσοστό μεταβολής του εύρους είναι κατά 2,20% χειρότερο για την non-allocated περίπτωση. Στη συνέχεια συγκρίνουμε την περίπτωση 3-2 με την collocated περίπτωση 2-2 και καταλήγουμε ότι το εύρος είναι κατά 395,43% χειρότερο για την non-allocated περίπτωση. Έπειτα έχουμε το συνδυασμό 2-1, που συγκρίνεται με τον 1-1 και βρίσκουμε ότι το εύρος για τον πρώτο είναι κατά 46,9% καλύτερο, από το εύρος του collocated και είναι η μόνη περίπτωση για τον πίνακα της μετατόπισης, που βρήκαμε καλύτερο εύρος για τον non-allocated συνδυασμό.

Όσον αφορά τον πίνακα την ταχύτητας παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις βρήκαμε καλά αποτελέσματα, (δηλαδή τα εύρη για τις non-allocated περιπτώσεις είναι μικρότερα από αυτά των collocated), με καλύτερο αυτό της τρίτης σειράς του πίνακα και της σύγκρισης του 2-1 σε σχέση με το 1-1, με το εύρος να βγαίνει καλύτερο κατά 42,69%. Επίσης για τον πίνακα της επιτάχυνσης έχουμε εξίσου καλά αποτελέσματα, με καλύτερο πάλι της ίδιας σύγκρισης στην τρίτη σειρά, όπου βρήκαμε ότι το εύρος του non-allocated είναι καλύτερο κατά 55,17% από το εύρος του 1-1.

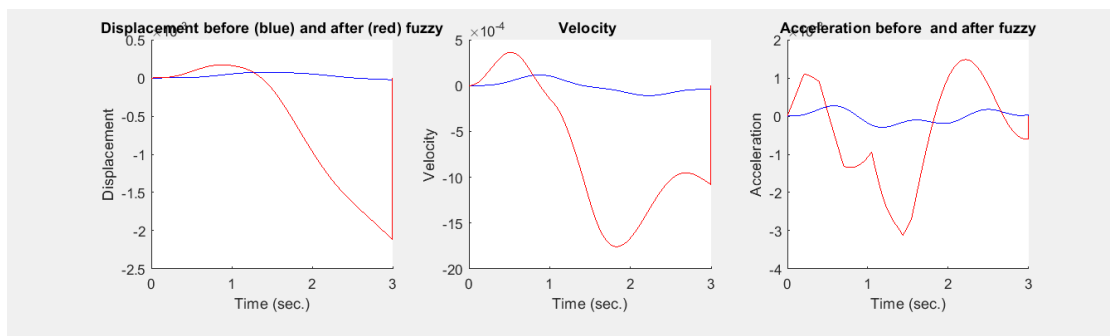
Στη συνέχεια βρίσκονται τα διαγράμματα για όλες τις περιπτώσεις, που φαίνεται πως μεταβλήθηκε κάθε μια εκ των παραμέτρων μας(μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση) και βρήκαμε από εκεί το εύρος μεταβολής τους. Σε όλα τα διαγράμματα παρατηρείται μια ασταθής μεταβολής της τιμής, όσον αφορά το fuzzy έλεγχο (η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει το fuzzy έλεγχο) . Όπως παρατηρήσαμε και στις τιμές παραπάνω, στο διάγραμμα της μετατόπισης παρατηρείται η πιο απότομη αλλαγή, σε αντίθεση με τα διαγράμματα της ταχύτητας και της επιτάχυνσης.

### Non-allocated περιπτώσεις

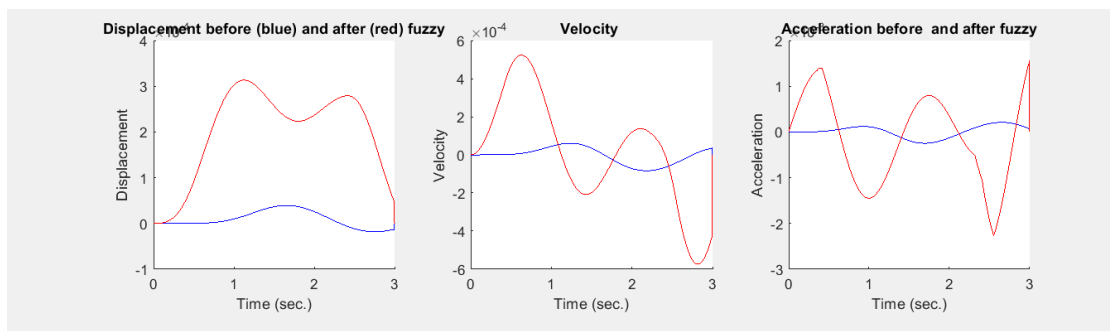
Τα διαγράμματα για τις non-allocated περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:



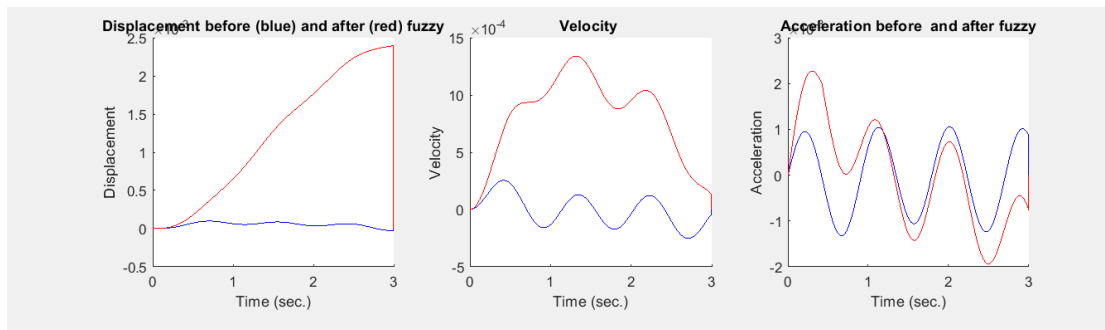
Σχήμα 7: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 1.



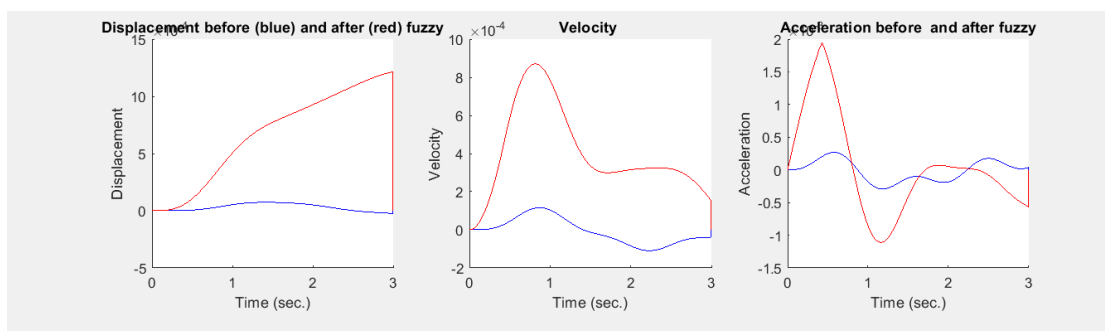
Σχήμα 8: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 2.



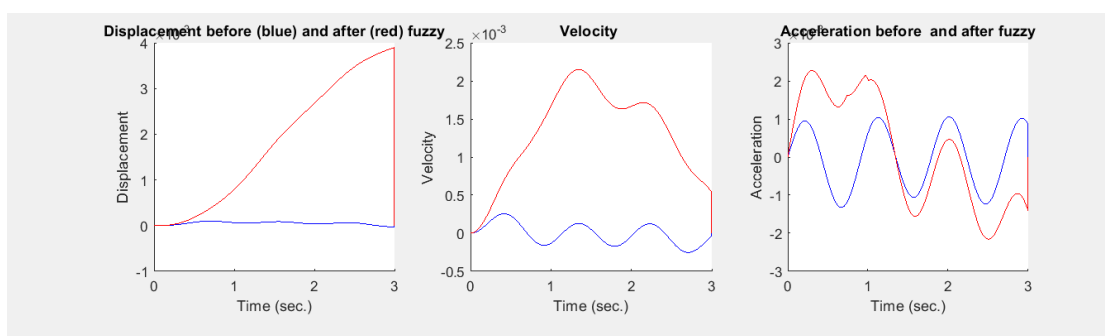
Σχήμα 9: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 1.



Σχήμα 10: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 3.



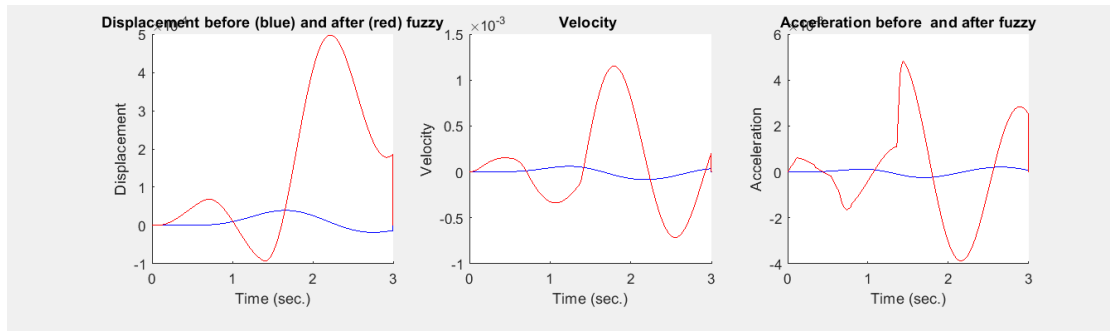
Σχήμα 11: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 2.



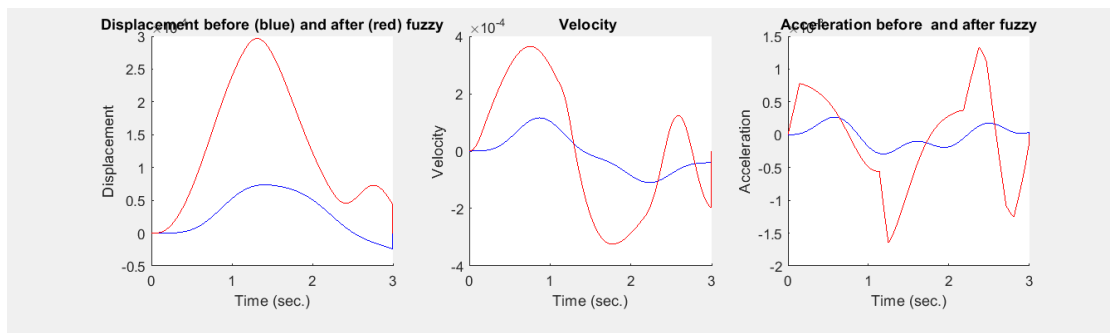
Σχήμα 12: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 3.

### Collocated περιπτώσεις

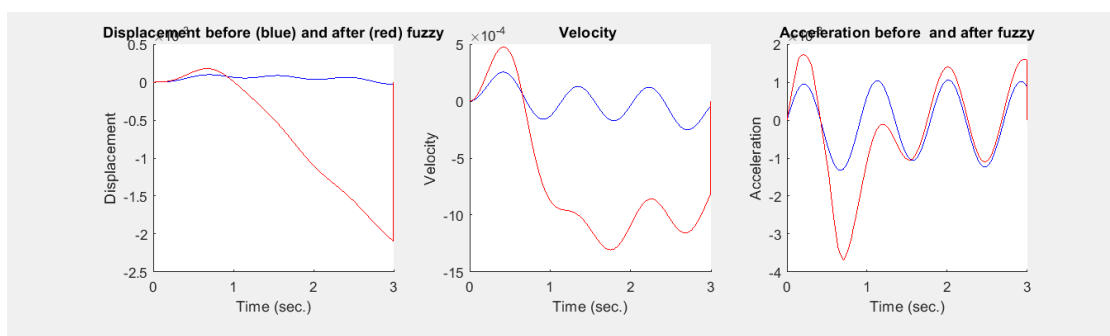
Τα διαγράμματα για τις collocated περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 13: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 1.



Σχήμα 14: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 2.



Σχήμα 15: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 3.

## 2<sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

Στην δεύτερη περίπτωση μελετήσαμε ένα σύστημα του οποίου οι κανόνες ορίζονται ως εξής :

- 1.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι High- .
- 2.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 3.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 4.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 5.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 6.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Right(ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Null .
- 7.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 8.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null(ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Null .
- 9.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right(ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 10.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .
- 11.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 12.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 13.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 14.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 15.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Med+ .

Από το σύστημα αυτό, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα 2<sup>ης</sup> περίπτωσης

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,00036981	0,00022154	66,93*
3	2	2-2	0,0023	0,00071329	222,45
2	1	1-1	0,0008459	0,00022154	281,83
2	3	3-3	0,0022	0,0018	22,22
1	2	2-2	0,0016	0,00071329	124,31
1	3	3-3	0,0014	0,0018	-22,22*

ΤΑΧΥΤΗΤΑ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,0017211	0,00057303	200,35
3	2	2-2	0,0016	0,00239933	-33,31
2	1	1-1	0,00169456	0,00057303	195,72
2	3	3-3	0,0032	0,00142434	124,67
1	2	2-2	0,00192273	0,00239933	-19,86
1	3	3-3	0,00145934	0,00142434	2,46

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,0062	0,0027	129,63
3	2	2-2	0,0038	0,0032	18,75
2	1	1-1	0,0065	0,0027	140,74
2	3	3-3	0,0056	0,0245	-77,14
1	2	2-2	0,0056	0,0032	75,00
1	3	3-3	0,0045	0,0027	66,67

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

\*Κατά 66,93% το εύρος του non-collocated είναι χειρότερο από το εύρος του collocated

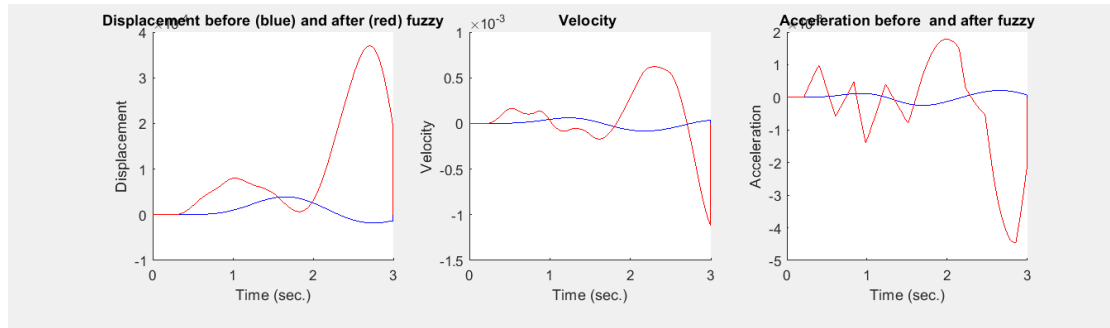
\*Κατά 22,22% το εύρος του non-collocated είναι καλύτερο από το εύρος του collocated

Στη δεύτερη περίπτωση που έχουμε διαφορετικό σύστημα, παρατηρούμε ότι υπάρχουν λιγότερες περιπτώσεις που το εύρος του non-located είναι καλύτερο από το εύρος του located και για τις τρεις παραμέτρους μας. Για τον πίνακα της μετατόπισης η μόνη περίπτωση που το συναντάμε αυτό, είναι η σύγκριση του 1-3 με το 3-3 και προκύπτει ότι το εύρος του non-located είναι κατά 22,22% καλύτερο από αυτό του located.

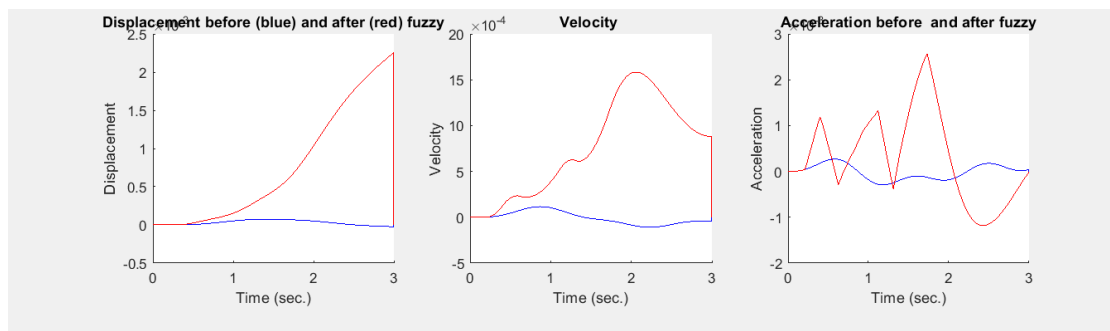
Στον πίνακα της ταχύτητας το καλύτερο εύρος είναι στη σύγκριση του 3-2 με το 2-2 και είναι κατά 33,31% καλύτερο το εύρος του non-located, ενώ στον πίνακα της επιτάχυνσης η καλύτερη μας περίπτωση είναι όταν συγκρίνουμε το 2-3 με το 3-3 και βρίσκουμε ότι είναι κατά 77,14% καλύτερο. Στη συνέχεια βρίσκονται και τα διαγράμματα που επίσης παρουσιάζουν μια ασταθής και απότομη μεταβολή σε σχέση με το χρόνο, γεγονός που ισχύει και για όλες τις περιπτώσεις δυνάμεων.

### Non-collocated περιπτώσεις

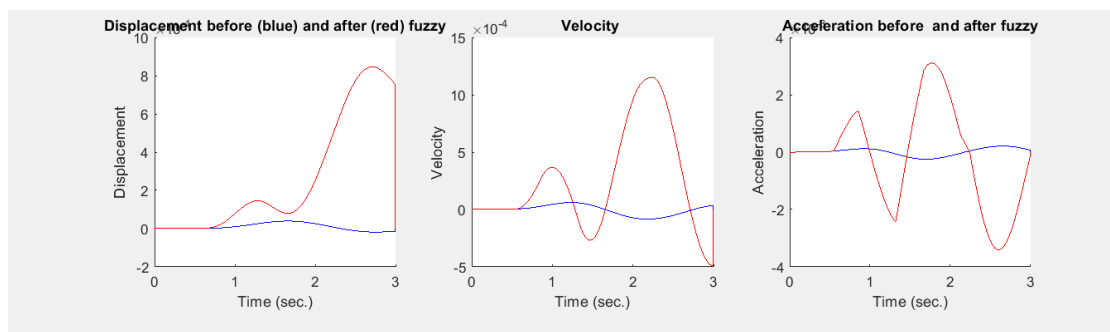
Τα διαγράμματα για τις non-collocated περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 16: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 1.

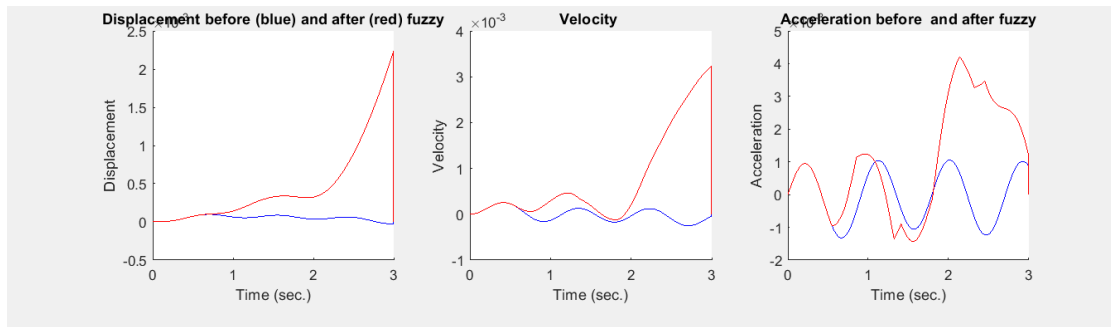


Σχήμα 17: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 2.

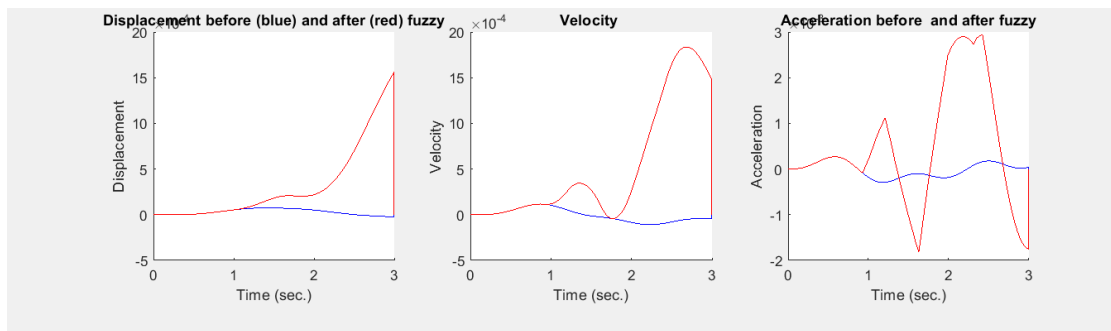


Σχήμα 18: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 1.

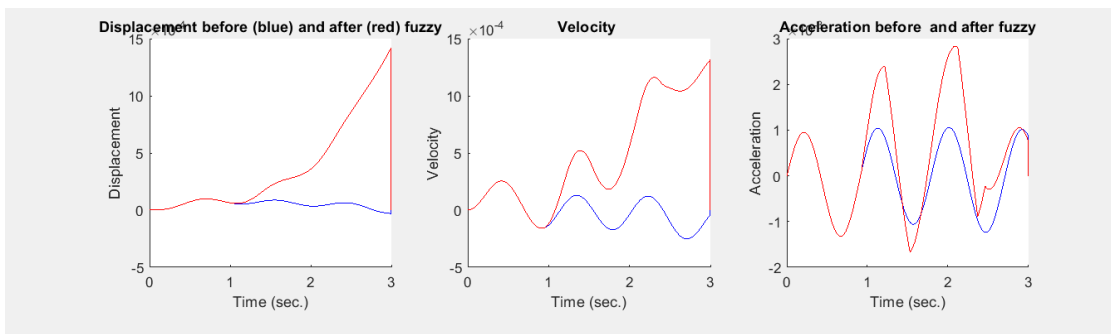




Σχήμα 19: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 3.



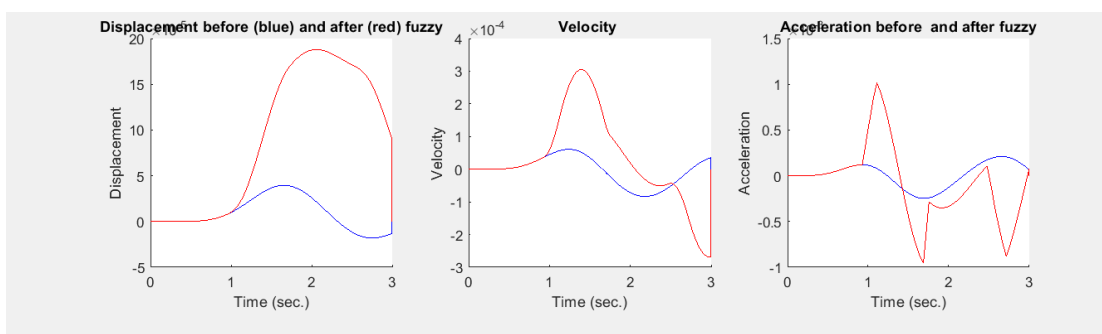
Σχήμα 20: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 2.



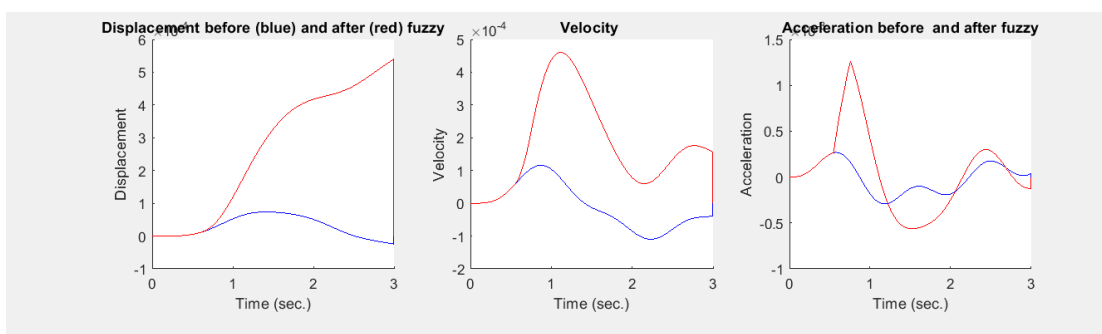
Σχήμα 21: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 3.

## Collocated περιπτώσεις

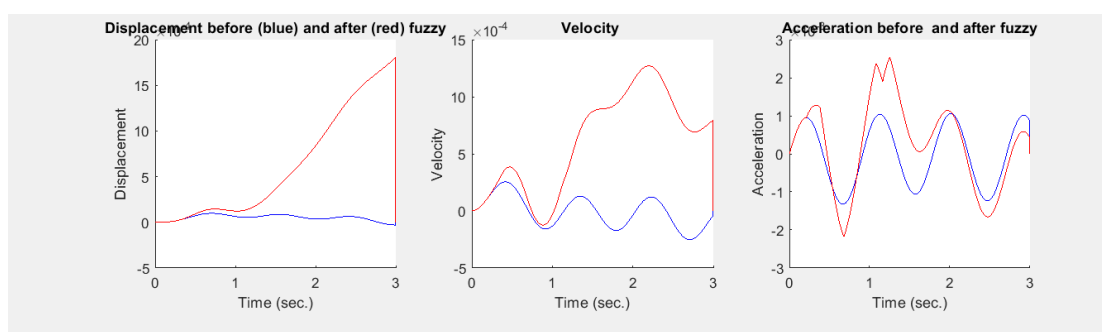
Τα διαγράμματα για τις collocated περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 22: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 1.



Σχήμα 23: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 2.



Σχήμα 24: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 3.

### 3<sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

Στην τρίτη περίπτωση μελετήσαμε ένα σύστημα του οποίου οι κανόνες ορίζονται ως εξής :

- 1.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Max .
- 2.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Med+ .
- 3.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 4.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Med+ .
- 5.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 6.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Right(ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Null .
- 7.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low+ .
- 8.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null(ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Null .
- 9.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right(ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 10.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Null.
- 11.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 12.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .
- 13.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 14.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Med- .
- 15.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Min .

Από το σύστημα αυτό, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα 3<sup>ης</sup> περίπτωσης

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,00156968	0,000177761	783,03
3	2	2-2	0,0019	0,000161916	1073,45
2	1	1-1	0,00052707	0,000177761	196,50
2	3	3-3	0,003996022	0,00489408	-18,35
1	2	2-2	0,001698516	0,000161916	949,01
1	3	3-3	0,003295816	0,00489408	-32,66

ΤΑΧΥΤΗΤΑ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,00181467	0,000177761	920,85
3	2	2-2	0,001219965	0,00053655	127,37
2	1	1-1	0,00147291	0,000177761	728,59
2	3	3-3	0,00275458	0,0105	-73,77
1	2	2-2	0,00121596	0,00053655	126,63
1	3	3-3	0,00345458	0,0105	-67,10

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,0057	0,0024	137,50
3	2	2-2	0,004	0,0025	60,00
2	1	1-1	0,005	0,0024	108,33
2	3	3-3	0,0046	0,0105	-56,19
1	2	2-2	0,0036	0,0025	44,00
1	3	3-3	0,0072	0,0105	-31,43

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

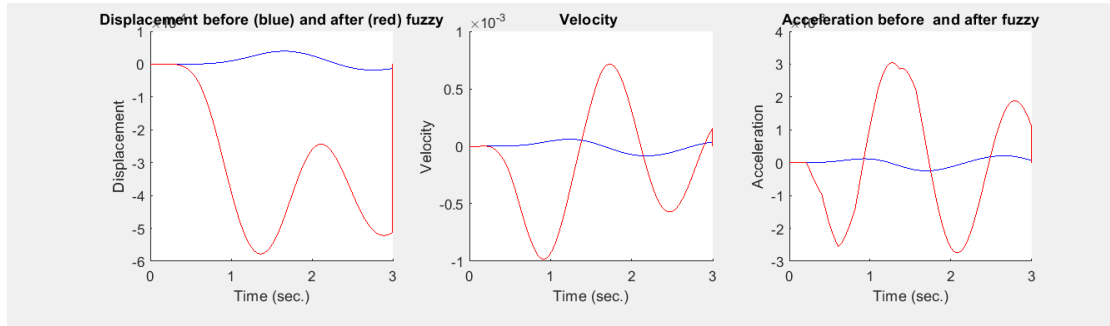
\*Κατά 783,03% το εύρος του non-collocated είναι χειρότερο από το εύρος του collocated

\*Κατά 18,35% το εύρος του non-collocated είναι καλύτερο από το εύρος του collocated

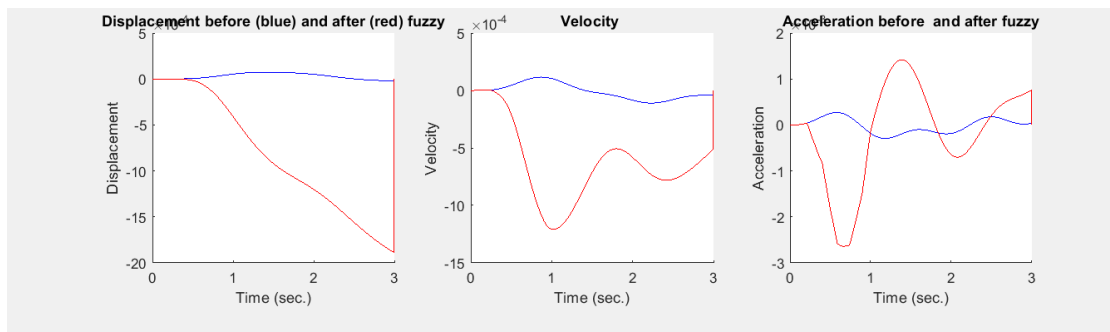
Στο τρίτο μας σύστημα, συναντάμε επίσης περιπτώσεις που τα εύρη των non-located περιπτώσεων υπερτερούν από αυτά των located , με το να περιορίζονται σε δύο μετρήσεις για την κάθε περίπτωση. Όσον αφορά τον πίνακα της μετατόπισης η σύγκριση της non-located περίπτωσης 1-3 με την located περίπτωση 3-3 είναι η καλύτερη, αφού το εύρος της πρώτης είναι κατά 32,66% καλύτερο. Για την ταχύτητα η σύγκριση του 2-3 με το 3-3 είναι η καλύτερη, με το εύρος να είναι καλύτερο κατά 73,77% και για την επιτάχυνση είναι καλύτερη η ίδια σύγκριση με ποσοστό 56,19%. Στη συνέχεια έχουμε και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

### Non-collocated περιπτώσεις

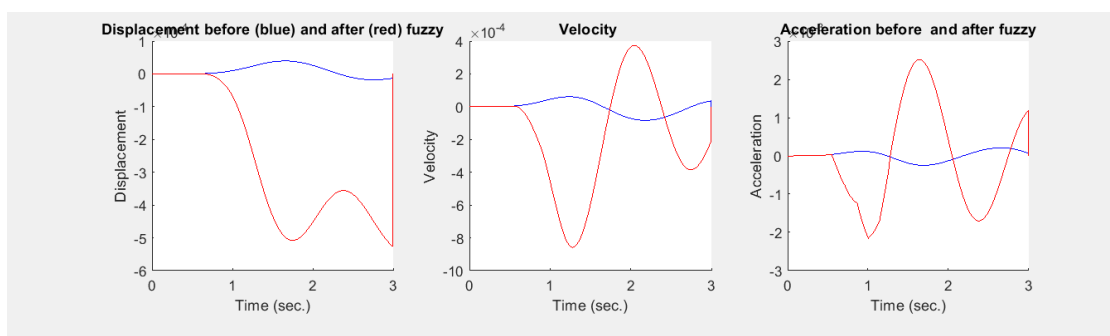
Τα διαγράμματα για τις non-located περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:



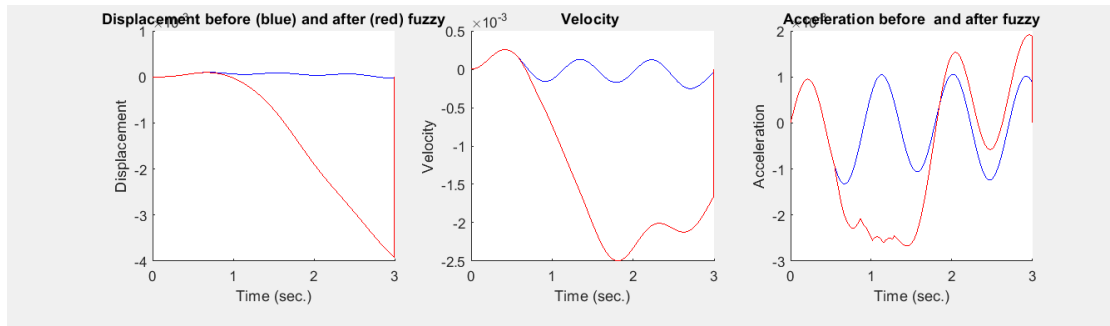
Σχήμα 25: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 1.



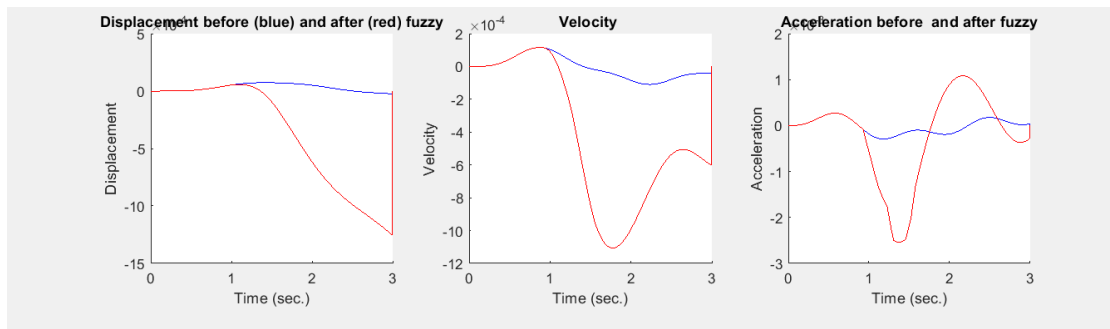
Σχήμα 26: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 2.



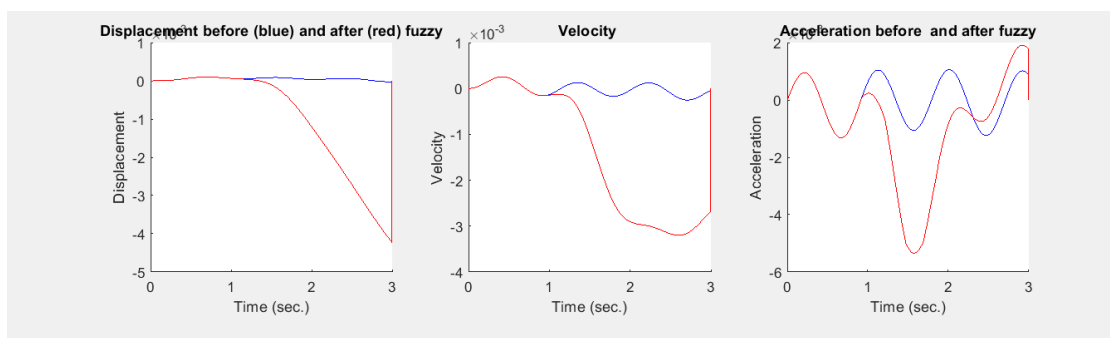
Σχήμα 27: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 1.



Σχήμα 28: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 3.



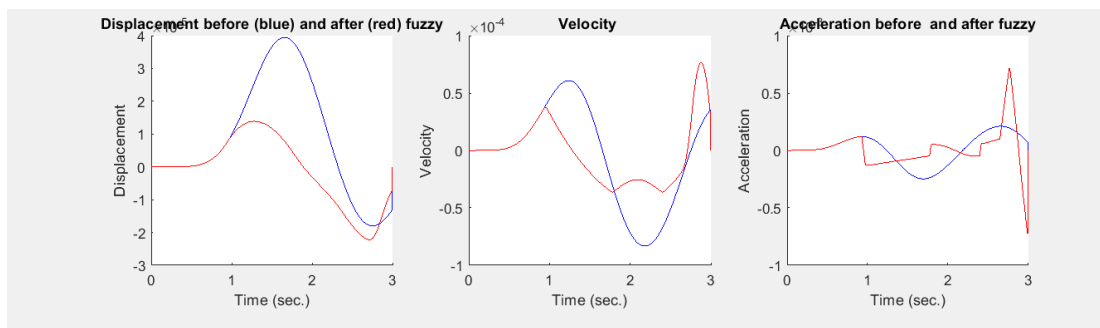
Σχήμα 29: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 2.



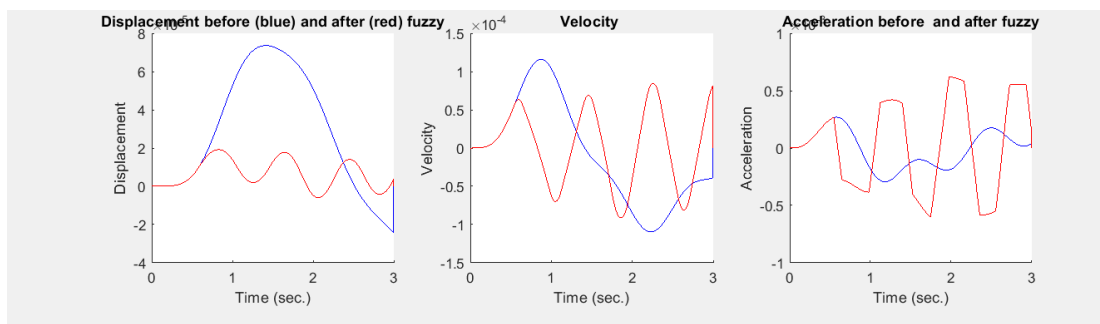
Σχήμα 30: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 3.

### Collocated περιπτώσεις

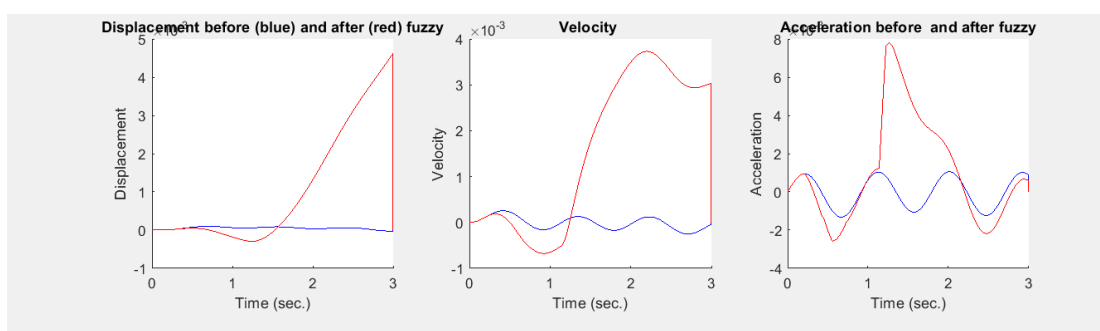
Τα διαγράμματα για τις collocated περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 31: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 1.



Σχήμα 32: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 2.



Σχήμα 33: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 3.



#### 4<sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

Στην τέταρτη και τελευταία περίπτωση μελετήσαμε ένα σύστημα του οποίου οι κανόνες ορίζονται ως εξής :

- 1.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .
- 2.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 3.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_L (ΜΑΚΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Null .
- 4.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .
- 5.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι High- .
- 6.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_L (ΚΟΝΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) και η Ταχύτητα είναι Right(ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .
- 7.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Null .
- 8.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null(ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 9.Αν η Μετατόπιση είναι Equilibrium (ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right(ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Null .
- 10.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low+.
- 11.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι Med+ .
- 12.Αν η Μετατόπιση είναι Close\_R (ΚΟΝΤΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 13.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Left (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) τότε η δύναμη είναι Low- .
- 14.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Null (ΜΗΔΕΝ) τότε η δύναμη είναι High- .
- 15.Αν η Μετατόπιση είναι Far\_R (ΜΑΚΡΙΑ ΔΕΞΙΑ) και η Ταχύτητα είναι Right (ΔΕΞΙΑ) τότε η δύναμη είναι Med- .

Από το σύστημα αυτό, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα 4<sup>ης</sup> περίπτωσης

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,00150306	0,000684773	119,50
3	2	2-2	0,002680253	0,001050261	155,20
2	1	1-1	0,000693546	0,000684773	1,28
2	3	3-3	0,003701529	0,002901529	27,57
1	2	2-2	0,001378389	0,001050261	31,24
1	3	3-3	0,005201529	0,002901529	79,27

ΤΑΧΥΤΗΤΑ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,00286287	0,00083647	242,26
3	2	2-2	0,00368756	0,001050261	251,11
2	1	1-1	0,00101541	0,00083647	21,39
2	3	3-3	0,00219379	0,00153894	42,55
1	2	2-2	0,0008428	0,001050261	-19,75
1	3	3-3	0,00295521	0,00153894	92,03

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ					
dofcontrol	dofapplication	collocated	εύρος non-collocated	εύρος collocated	Ποσοστό %
3	1	1-1	0,0087	0,003	190,00
3	2	2-2	0,0094	0,0035	168,57
2	1	1-1	0,0041	0,003	36,67
2	3	3-3	0,007	0,0054	29,63
1	2	2-2	0,0033	0,0035	-5,71
1	3	3-3	0,0074	0,0054	37,04

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

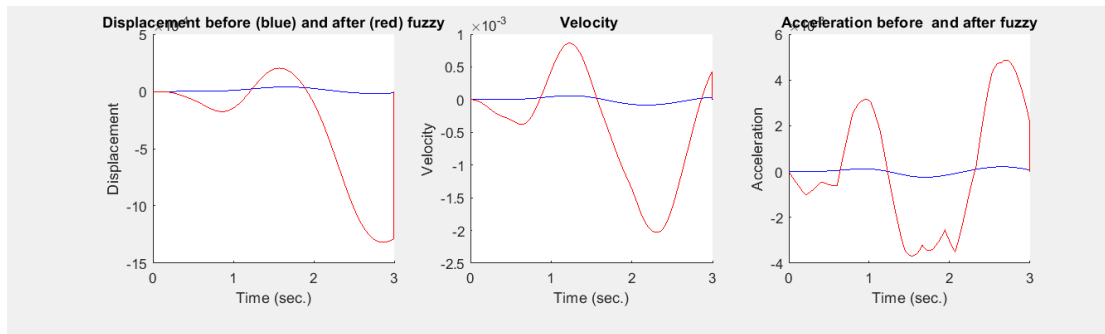
\*Κατά 42,55% το εύρος του non-collocated είναι χειρότερο από το εύρος του collocated

\*Κατά 19,75% το εύρος του non-collocated είναι καλύτερο από το εύρος του collocated

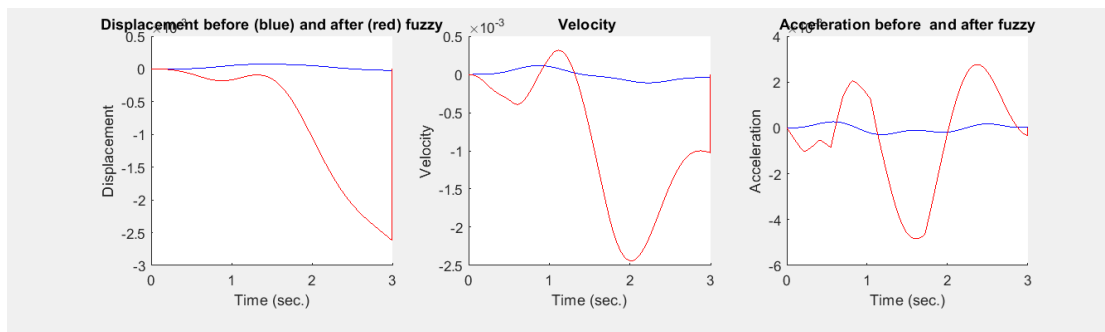
Στην τελευταία μας περίπτωση συναντάμε δύο περιπτώσεις , όπου το εύρος του non-collocated είναι καλύτερο από το εύρος των collocated περιπτώσεων, ένα για την ταχύτητα και ένα για την επιτάχυνση. Στη συνέχεια έχουμε και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

## Non-located περιπτώσεις

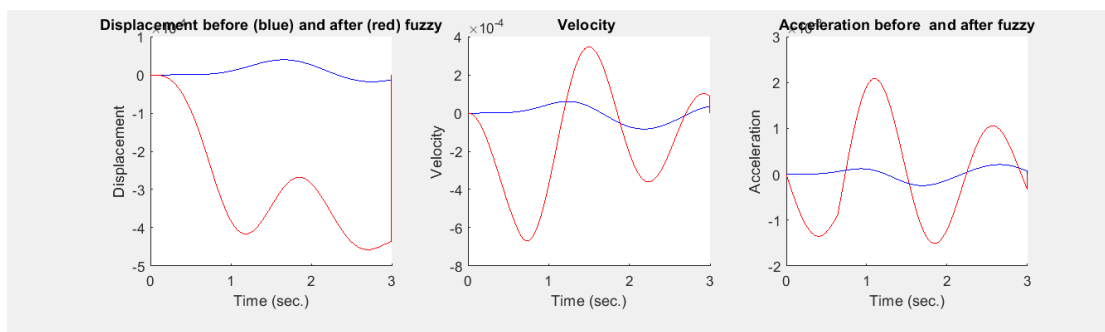
Τα διαγράμματα για τις non-located περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:



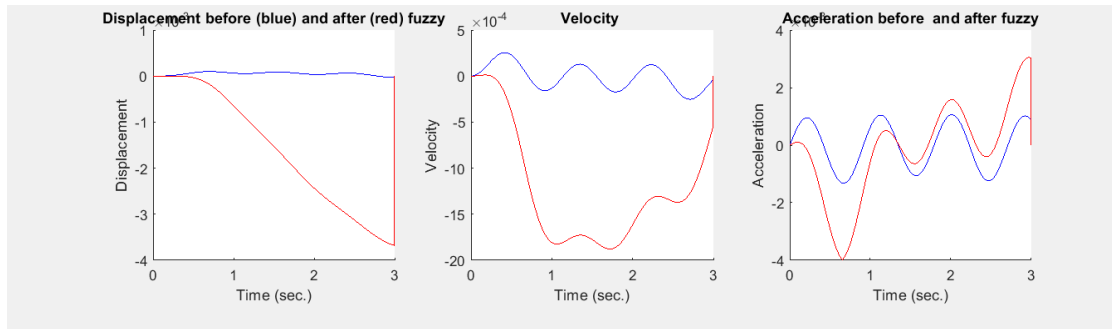
Σχήμα 34: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 1.



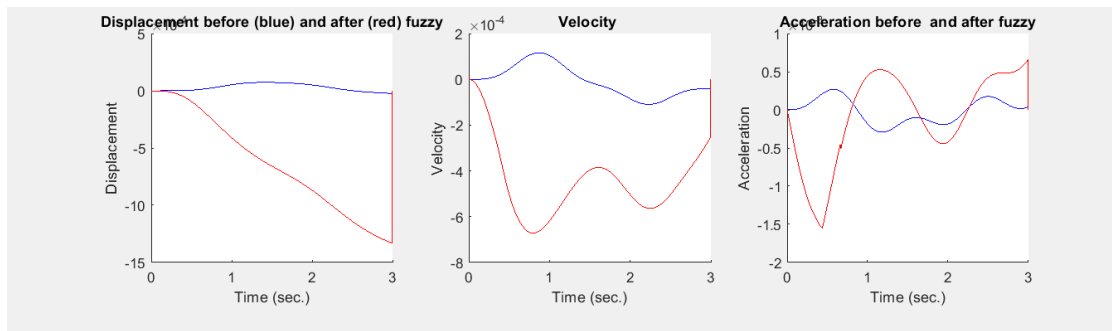
Σχήμα 35: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 2.



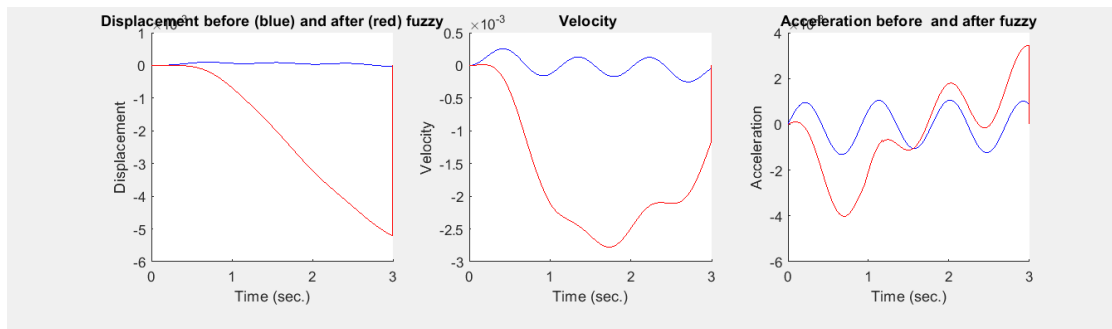
Σχήμα 36: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 1.



Σχήμα 37: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 3.



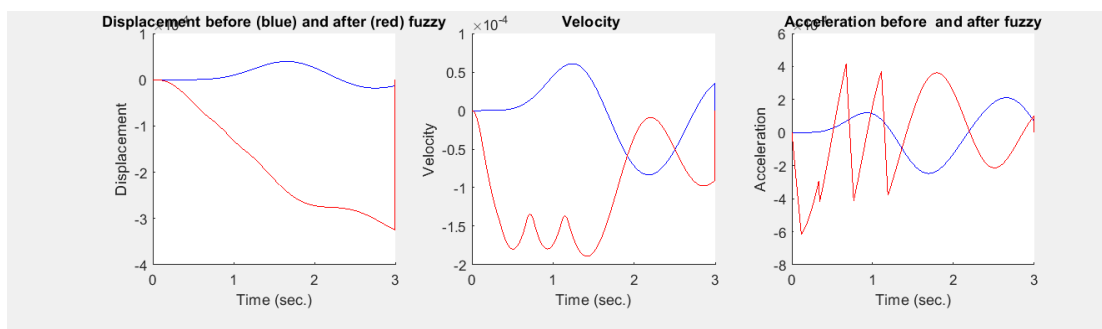
Σχήμα 38: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 2.



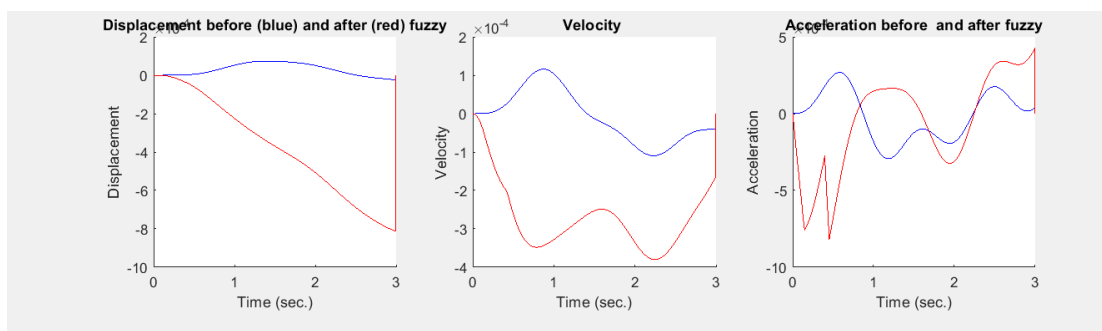
Σχήμα 39: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 3.

### Collocated περιπτώσεις

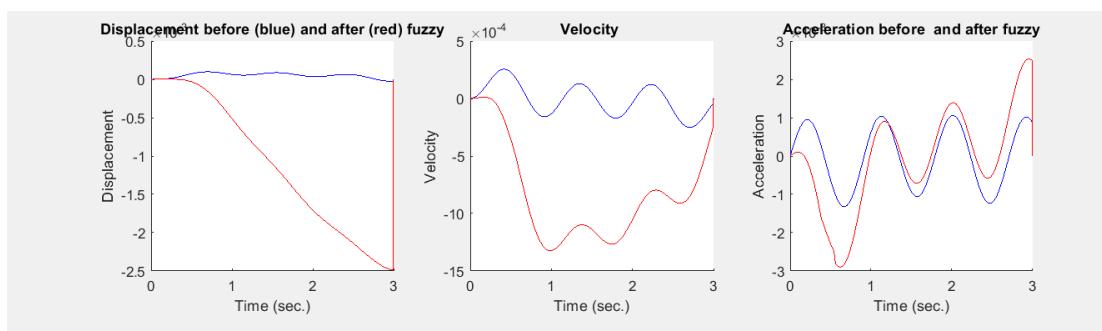
Τα διαγράμματα για τις collocated περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 40: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 1 και κόμβο εφαρμογής 1.



Σχήμα 41: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 2 και κόμβο εφαρμογής 2.



Σχήμα 42: Αποτελέσματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης για κόμβο ελέγχου 3 και κόμβο εφαρμογής 3.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σαν γενικό συμπέρασμα, μπορούμε να πούμε πως παρατηρούμε ότι στα συστήματα που διερευνάμε, η σωστή θέση του αισθητήρα παίζει βασικό ρόλο. Επίσης σημαντικές είναι οι δυνατότητες της ασαφούς λογικής σε συνδυασμό με τη χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διερευνήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρατηρούμε ότι παρά τις δυσκολίες και τα προβλήματα που συναντάμε στις non-located περιπτώσεις έναντι των located, σε κάποιες περιπτώσεις καταφέραμε να λάβουμε καλύτερα αποτελέσματα από τον έλεγχο, το οποίο είναι ένα σημαντικό επίτευγμα.

Το καλύτερο αποτέλεσμα επετεύχθη στην πρώτη περίπτωση που παρουσιάστηκε, στην οποία βρέθηκαν περισσότερες περιπτώσεις όπου το εύρος της ταλάντωσης για τον non-located έλεγχο ήταν μικρότερο από το αντίστοιχο για τον located.

Για να γίνει ακόμα πιο κατανοητό, αυτό που πετύχαμε στην παρούσα εργασία, είναι ότι καταφέραμε να ελέγξουμε αποτελεσματικά ένα σύστημα στο οποίο η μέτρηση λαμβάνεται σε μια θέση και ο έλεγχος εφαρμόζεται σε κάποια άλλη διαφορετική θέση.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Tairidis G.K., Stavroulakis G., Marinova D., Zacharenakis E. Classical and soft robust active control of smart beams, in: Computational Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Eds. M. Papadrakaikis, D.C. Charmpis, Y. Tsompanakis, Nikos D. Lagaros, CRC Press - Taylor & Francis Group, London, UK, Chapter 11, pp 165-178, 2009.
- [2] Γεώργιος Κ. Ταϊρίδης "Προσομοίωση σύνθετων ευφυών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου". Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2009.
- [3] Mastorokostas, P. 2015. Εισαγωγή στην ασαφή λογική – ασαφή σύνολα – συναρτήσεις συμμετοχής. [Book Chapter]. Available Online at: <http://hdl.handle.net/11419/5958>.
- [4] Θεόδωρος Αθ. Καλογερόπουλος, "Εφαρμογές Έξυπνων Υλικών", ΕΜΠ 2010
- [5] Interjit Chopra, Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems, AIAA Journal, Vol. 40, No. 11 (2002), pp. 2145-2187.
- [6] Σαρρή Μαρία-Ελένη, 'Αξιοποίηση Ασαφούς Λογικής Στη Διαμόρφωση Πλάνου Παραγωγής, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006
- [7] Timothy M. Obrzut, "Non-Collocation Problems in Dynamics and Control of Mechanical Systems", Cleveland State University, 2009
- [8] Ζαχαράκης Ανδρ. Ιωάννης, "Ανάπτυξη προτύπου συστήματος μη καταστροφικού ελέγχου υλικών με τη χρήση της ηλεκτρομηχανικής εμπέδησης", Πολυτεχνείο Κρήτης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Χανιά 2006
- [9] 'Θεοδώρου Γ., Εισαγωγή στην ασαφή λογική, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010
- [10] Μ. Γρυσμπολάκη και Α.Μ. Ζαγουράκη, Πιεζοηλεκτρισμός. Θέματα Περιβάλλοντος - Εφαρμογές του βιοκλιματικού σχεδιασμού στην πόλη: Η συμβολή της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής στην προστασία του περιβάλλοντος. Οι δυνατότητες βιοκλιματικού ανασχεδιασμού στον αστικό χώρο. Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων εναλλακτικών μορφών ενέργειας στις αστικές αναπλάσεις, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ,
- [11] S.X. Xu, T.S. Koko, Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 40 (2004), p.p. 241 – 262