

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ Παραμετρική Διερεύνηση Συστήματος Ενεργών
Αναρτήσεων με Συστήματα Ασαφούς Λογικής”**

Χρήστος Καραφείζης

ΧΑΝΙΑ 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατά αρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, Δρ Γεώργιο Σταυρουλάκη για την συνολική επιστημονική, ακαδημαϊκή και ηθική βοήθεια του. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κύριο Κώστα Μαρακάκη, η μεταπτυχιάκη εργασία του οποίου αποτέλεσε τη βάση της δικής μου διπλωματικής.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές του τμήματος μου, Γωγώ Παναγιωτοπούλου, Σήφη Μπροκαλάκη και Μάνο Πριμηκύριο για την αδιάλειπτη υποστήριξη τους στις υποχρεώσεις της Σχολής και τις ωραίες αναμνήσεις των φοιτητικών μου χρόνων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, που με στηρίζουνε όλα αυτά τα χρόνια και μου συμπαραστέκονται με όλη τους τη δύναμη στις επιλογές μου.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	3
1.1 Δομή Αναρτήσεων	3
1.2 Είδη Ενεργών Αναρτήσεων	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	14
2.1 Ασαφής Λογική	14
Ασαφή σύνολα - Βασικοί ορισμοί	15
2.2 Ασαφείς Ελεγκτές	15
2.3 Γνωστοί μηχανισμοί ασαφών ελεγκτών	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	24
3.1 Περιγραφή του μοντέλου	24
3.2 Απαιτήσεις προβλήματος	25
3.3 Εισαγωγή Ασαφούς Ελεγκτή σε περιβάλλον Simulink και ενοποίηση των επιμέρους τμημάτων	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	32
1 ^η Διερεύνηση	32
2 ^η Διερεύνηση	50
3 ^η Διερεύνηση	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	64
5.1 Συμπεράσματα.....	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66
ΕΛΛΗΝΙΚΗ	66
ΞΕΝΗ	66

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η παραμετρική διερεύνηση για την μελέτη της επιρροής διαφόρων παραμέτρων σε σύστημα ενεργών το οποίο έχει αναπτυχθεί σε ένα μοντέλο $\frac{1}{4}$ του οχήματος (σε ένα από τους τέσσερις τροχούς) και η εξαγωγή συμπερασμάτων και συγκρίσεων με τις αρχικές ρυθμίσεις. Η διερεύνηση αυτή γίνεται σε περιβάλλον Simulink με την χρήση ελεγκτών ασαφούς λογικής. Το σύστημα ενεργών αναρτήσεων αναπτύχθηκε από τον κων Κωνσταντίνο Μαρακάκη στα πλαίσια της μεταπτυχιακής του διατριβής.

Περιλαμβάνει αρχικά, γενικά εισαγωγικά στοιχεία για τις ενεργές αναρτήσεις και τα στοιχεία που τις συνθέτουν (κεφάλαιο 1). Στην συνέχεια παρατίθενται στοιχεία που αφορούν την ασαφή λογική και τους ασαφείς ελεγκτές (κεφάλαιο 2). Έπειτα παρουσιάζεται η φυσική περιγραφή του προβλήματος και η ανάλυση δεδομένων (κεφάλαιο 3) . Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται οι διερευνήσεις που πραγματοποιήσαμε (κεφάλαιο 4). Τέλος παρατίθενται τα εξαγόμενα συμπεράσματα (κεφάλαιο 5).

Κεφάλαιο 1

1.1 Δομή Αναρτήσεων

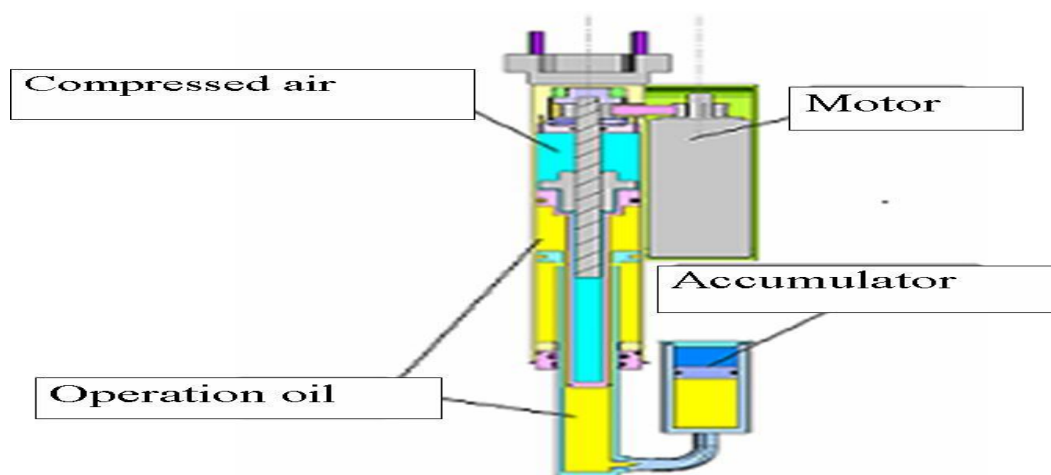
Το σύστημα ανάρτησης είναι η διάταξη που συνδέει το πλαίσιο του αυτοκινήτου με τους τροχούς. Η ανάρτηση είναι ο μηχανισμός που διατηρεί την επαφή των τροχών με το δρόμο, όταν το αυτοκίνητο στρίβει, επιταχύνει ή φρενάρει. Αποτελείται από τα αμορτισέρ και τα ελατήρια (όσα και οι τροχοί) και τις μεταλλικές ράβδους, που μέσω μηχανικών αρθρώσεων ελέγχουν την κίνηση των τροχών. Αυτή καθορίζει τη γενικότερη οδική συμπεριφορά και το βαθμό άνεσης των αυτοκινήτων.

Υπάρχουν πολλών ειδών αναρτήσεις, όλες όμως έχουν τρεις βασικές λειτουργίες⁽³⁾:

- α)** Τη διατήρηση των τροχών όσο πιο κατακόρυφα γίνεται, ανεξάρτητα από την κίνηση του αυτοκινήτου.
- β)** Την απορρόφηση των ανωμαλιών του δρόμου.
- γ)** Την εξασφάλιση του κρατήματος στο δρόμο, αυτό, δηλαδή, που λέμε σταθερότητα και οδική συμπεριφορά.

Ένα σύστημα ανάρτησης σε καλή κατάσταση έχει σημαντικά οφέλη για τον οδηγό, τους επιβάτες, αλλά και για το ίδιο το αυτοκίνητο. Προσφέρει ασφάλεια και ευστάθεια κατά την πορεία μεταδίδοντας όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες του οδοστρώματος στον οδηγό και επιτρέποντας την εύκολη και ασφαλή αλλαγή κατεύθυνσης στις στροφές. Απορροφά σε μεγάλο βαθμό τις ανωμαλίες του δρόμου με αποτέλεσμα την άνετη μετακίνηση των επιβατών, την ασφαλή μεταφορά του επιθυμητού φορτίου, αλλά και την προστασία του αμαξώματος από τις έντονες καταπονήσεις. Για τους λόγους αυτούς, η ασφάλεια και η άνεση κατά την οδήγηση οποιουδήποτε αυτοκινήτου απαιτεί τον περιοδικό έλεγχο της κατάστασης του συστήματος ανάρτησης κάθε τροχού.

Τα βασικότερα στοιχεία της ανάρτησης είναι τα ελατήρια και ο αποσβεστήρας ταλαντώσεων (αμορτισέρ).



Εικόνα 1.1 Τύπος αναρτήσεων

Ελατήρια

Τα ελατήρια είναι ο ελαστικός σύνδεσμος μεταξύ αμαξώματος και τροχών και ταλαντώνονται σε κάθε ανωμαλία του εδάφους. Τα ελατήρια κατασκευάζονται από ειδικά κράματα ατσαλιού και με ειδικές θερμικές και επιφανειακές κατεργασίες αυξάνονται τα όρια κόπωσής τους. Οι κατασκευαστές σε όλο τον κόσμο είναι στην κυριολεξία χιλιάδες, όμως η μέθοδος κατασκευής είναι περίπου η ίδια: το αρχικό υλικό σε μορφή ράβδου (κυκλική διατομή) θερμαίνεται και περιστρέφεται γύρω από μια μήτρα/καλούπι που θα του δώσει την απαιτούμενη μορφή. Κάθε ελατήριο που φορτίζεται παραμορφώνεται ελαστικά, ασκώντας μια δύναμη αντίστασης που είναι ανάλογη της συμπίεσής του. Αυτή η σταθερά αναλογίας είναι η λεγόμενη σταθερά του ελατηρίου. Στο διεθνές σύστημα μονάδων μετρήσεων, μετράται σε N/mm. Ένα ελατήριο με σταθερά 70 N/mm, για παράδειγμα, θα συμπιεστεί κατά 1 χιλιοστό όταν ασκηθεί σε αυτό μια δύναμη 70 Newton (περίπου 7 κιλά). Η δύναμη που θα ασκήσει το ελατήριο είναι, επομένως, συνάρτηση της μετατόπισης (αυτό πρέπει να θυμόμαστε κάθε φορά που συζητάμε για ελατήρια και αμορτισέρ). Η βασική και ουσιαστική διαφορά είναι ότι τα αμορτισέρ ασκούν δυνάμεις που είναι ανάλογες της ταχύτητας μετατόπισης. Η

κατανόηση των διαφορών αυτών θα φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη, όταν θα αρχίσουμε να αναφερόμαστε στο στήσιμο του αυτοκινήτου.

Η σταθερά του ελατηρίου (η σκληρότητά του στην καθομιλουμένη) εξαρτάται αναλογικά από το υλικό κατασκευής και τη διατομή της αρχικής ράβδου, ενώ υπάρχει αντιστρόφως ανάλογη μεταβολή του αριθμού των σπειρών και της συνολικής εξωτερικής διάμετρο του ελατηρίου. Ένα ελατήριο με μικρότερο αριθμό σπειρών ή εξωτερική διάμετρο θα είναι σκληρότερο. Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν τη βάση των κατασκευαστών που σχεδιάζουν ελατήρια με μεταβαλλόμενες σταθερές, τα λεγόμενα προοδευτικά ελατήρια. Οι μέθοδοι κατασκευής είναι ουσιαστικά δύο⁽¹¹⁾ :

1. Ο αριθμός των ενεργών σπειρών μεταβάλλεται με διαφορετική πυκνότητα περιέλιξης. Οι αποστάσεις μεταξύ των σπειρών είναι διαφορετικές έτσι ώστε, καθώς το ελατήριο συμπιέζεται και ο αριθμός των ενεργών σπειρών μειώνεται, η σταθερά του ελατηρίου αυξάνεται. Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος, έχει, όμως, το μειονέκτημα ότι η σκληρότητα μεταβάλλεται όχι προοδευτικά, αλλά με διαβαθμίσεις.
2. Η μήτρα που χρησιμοποιείται για την περιέλιξη έχει διαφορετικές διαβαθμίσεις προσδίδοντας έτσι διαφορετικές εσωτερικές/εξωτερικές διαμέτρους στο ελατήριο. Η εφαρμογή και τοποθέτηση τέτοιων ελατηρίων, όμως, είναι δύσκολη, καθώς ο χώρος που απαιτείται στην ανάρτηση είναι μεγάλος.

Παρόλο την πληθώρα ελατηρίων που υπάρχουνε στην αγορά, η επιλογή των κατάλληλων για το κάθε αμάξι είναι σύνθετη διαδικασία. Επιλέγονται με βάση τη σκληρότητά τους και ανάλογα με τη δομή της ανάρτησης του αυτοκινήτου μπορεί να είναι ομόκεντρα με τα αμορτισέρ ή και ετερόκεντρα (σε άλλο σημείο της ανάρτησης). Η επιλογή των ελατηρίων πρέπει να συμβαδίζει με τις ανάγκες του οδηγού. Η χρυσή τομή είναι να επιλεγεί ένα αρκετά μαλακό ελατήριο, ώστε να μην προκαλείται αναπήδηση του τροχού στις ανωμαλίες, αλλά και να διαθέτει μεγάλη διαδρομή ταλάντωσης. Ένα σκληρό ελατήριο έχει μικρότερη διαδρομή ταλάντωσης και αν είναι και σκληρό επιφέρει αναπηδήσεις του τροχού και μείωση της πρόσφυσης σε τέτοια περίπτωση .Στους υπολογισμούς που θα κάνει ο

σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη του τη χρήση του αυτοκινήτου, τα μέγιστα φορτία που το όχημα θα μεταφέρει, την ελάχιστη απόσταση των μηχανικών μερών από το έδαφος, την άνεση των επιβατών, την αντίσταση στην περιστροφή (roll stiffness) και τις απαιτήσεις ως προς την οδική συμπεριφορά.

Αμορτισέρ

Είναι τα κυλινδρικά στοιχεία της ανάρτησης τα οποία έχουν στο εσωτερικό τους ένα πιστόνι και μέσω του αερίου-λαδιού που περιέχουν εξασφαλίζουν απορροφητικότητα. Βασικός ρόλος των αμορτισέρ είναι να αποσβένουν τις ταλαντώσεις του ελατηρίου και να απορροφούν τους κραδασμούς από τις ανωμαλίες ή τις κακοτεχνίες του οδοστρώματος (που υπάρχουν εν αφθονία στη χώρα μας), ώστε να μην τους μεταφέρουν στην καμπίνα του οχήματος, με αποτέλεσμα να μειώνεται η άνεση των επιβατών. Για να επιλέξουμε σωστά ένα αμορτισέρ, πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας ότι το ιδανικό, όσον αφορά στο βέλτιστο κράτημα, θα είναι αυτό που θα μπορεί να προσφέρει άριστη απόσβεση των ανωμαλιών του δρόμου από την πρώτη κιάλας ταλάντωση. Η σκληρότητά τους παίζει μεγάλο ρόλο, διότι μία σκληρή επιλογή θα κάνει το αυτοκίνητο πιο σπορτιφ, αλλά παράλληλα δύσκολο ως προς την οδήγηση στους ελληνικούς δρόμους, ενώ μία πιο μαλακή θα βελτιώσει την οδηγική του συμπεριφορά και θα του προσδώσει άνεση.

Όλα τα αμορτισέρ χρησιμοποιούν λάδι για τη λειτουργία της απόσβεσης. Τα αμορτισέρ χωρίζονται σε αερίου και αερίου - λαδιού και σε μονού ή διπλού κυλίνδρου. Τα αερίου - λαδιού είναι εκείνα που προορίζονται για βελτιωμένα αυτοκίνητα, αφού προσφέρουν σταθερή απόδοση σε σκληρή χρήση. Αντίθετα, τα αμορτισέρ λαδιού έχουν το μειονέκτημα ότι σε συνεχή λειτουργία θερμαίνονται, με αποτέλεσμα το λάδι να χάνει την παχύρρευστη σύνθεσή του και άρα και τα χαρακτηριστικά απόσβεσής του αλλοιώνονται. Στα αμορτισέρ αερίου - λαδιού, ο κύλινδρος χωρίζεται σε δύο στεγανά τμήματα, όπου στο ένα υπάρχει μόνο λάδι και στο άλλο μόνο αέριο.

Για τους πιο απαιτητικούς οδηγούς, που ζητούν την απόλυτη ρύθμιση για χαλαρές ή γρήγορες βόλτες, υπάρχουν τα αμορτισέρ με δυνατότητα

ρύθμισης. Στο εμπόριο, συναντώνται διάφοροι τύποι όπως: ρυθμιζόμενα αμορτισέρ πριν την τοποθέτηση τους, ή, με κάποιο ειδικό κλειδί από το πάνω μέρος⁽¹¹⁾.

Όταν αναφερόμαστε σε ένα παραδοσιακό ή συμβατικό σύστημα αναρτήσεων, αναφερόμαστε σε ένα σύστημα που έρχεται έτσι όπως είναι. Με άλλα λόγια, ένα συμβατικό σύστημα αναρτήσεων είναι ένα παθητικό σύστημα. Όταν εγκαθίσταται σε ένα σύστημα, τα χαρακτηριστικά του γνωρίσματα διαφοροποιούνται ελάχιστα. Αυτό έχει κάποια κύρια πλεονέκτημα και μειονεκτήματα. Από τη θετική πλευρά, το σύστημα είναι πολύ προβλέψιμο. Έτσι σταδιακά ο οδηγός αποκτά μια οικειότητα με το σύστημα αναρτήσεων του αυτοκινήτου του. Κατανοεί τις ικανότητες και τους περιορισμούς αυτών. Από την αρνητική πλευρά, όταν το σύστημα αναρτήσεων φθάσει τα όρια του, δεν υπάρχει περίπτωση να ανταποκριθεί σε καταστάσεις πέρα από τις σχεδιαστικές παραμέτρους του.



Εικόνα 1.2 Πλήρως ρυθμιζόμενα αμορτισέρ

1.2 Είδη Ενεργών Αναρτήσεων

Ορισμός ενεργών αναρτήσεων

Οι ενεργές αναρτήσεις αποτελούνε τη συνέχεια των παθητικών αναρτήσεων. Είναι είδος τεχνολογίας που ελέγχει την κατακόρυφη κίνηση των τροχών μέσου ηλεκτρονικού συστήματος, ελαχιστοποιώντας σταδιακά τους κλυδωνισμούς και τα σκαμπανεβάσματα του αμαξώματος σε πολλές καταστάσεις. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στους σχεδιαστές να πετύχουν μεγαλύτερη ποιότητα οδήγησης αυτοκινήτων, κρατώντας τα ελαστικά κάθετα στο δρόμο, επιτρέποντας παράλληλα υψηλότερα επίπεδα κρατήματος και ελέγχου των ελαστικών στο δρόμο. Αυτά επιτυγχάνονται με αισθητήρες και μικροεπεξεργαστές που τροφοδοτούνε τον υπολογιστή με πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες του οδοστρώματος, προσαρμόζοντας έτσι, το σύστημα ενεργών αναρτήσεων σε συνεχή βάση.

Οι ενεργές αναρτήσεις γενικά χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- α) τις καθαρά ενεργές αναρτήσεις.
- β) τις ημι-ενεργές αναρτήσεις.

Οι πρώτες ενεργές αναρτήσεις που εισήχθησαν χρησιμοποιούνε χωριστούς ενεργοποιητές οι οποίοι μπορούνε να ασκήσουνε μία ανεξάρτητη δύναμη στην ανάρτηση ώστε να βελτιώσουνε τα χαρακτηριστικά οδήγησης. Τα μειονεκτήματα των ενεργών αναρτήσεων, μέχρι σήμερα, περιλαμβάνουνε το υψηλό κόστος του συστήματος, την πρόσθετη πολυπλοκότητα της διάταξης που απαιτείται για την λειτουργία της και η ανάγκη για συχνές επισκευές συντήρησης σε μερικές εφαρμογές του συστήματος. Επιπλέον, η συντήρηση μπορεί να είναι προβληματική από τη στιγμή που μόνο, λίγα, εξουσιοδοτημένα συνεργεία θα έχουν τα απαραίτητα εργαλεία, μηχανήματα και τεχνογνωσία.

Καθαρά ενεργές αναρτήσεις

Υδραυλικά κινούμενες

Οι υδραυλικά κινούμενες ενεργές αναρτήσεις ελέγχονται από την χρήση των υδραυλικών αναδραστικών μηχανισμών. Η υδραυλική πίεση στους αναδράστες, εφοδιάζεται, από υψηλής πίεσης, ακτινικό πιστόνι υδραυλικής αντλίας. Οι αισθητήρες συνεχώς παρακολουθούν την κίνηση του αυτοκινήτου, εφοδιάζοντας διαρκώς τον υπολογιστή με νέα δεδομένα.

Καθώς ο υπολογιστής λαμβάνει και επεξεργάζεται τα δεδομένα, χειρίζεται τους υδραυλικούς αναδράστες, παράγοντας δυνάμεις επαναφοράς ώστε να στηρίζεται το αμάξωμα, να εμπίπτει και να κάθεται κατά τη διάρκεια ποικίλων ελιγμών οδήγησης.

Στην πράξη, το σύστημα πάντα ενσωματώνει την επιθυμητή αυτοκατάργηση και με το ύψος ρυθμιζόμενο από τα χαρακτηριστικά της ανάρτησης, με το τελευταίο δεμένο στη ταχύτητα οχήματος για βελτιωμένη αεροδυναμική επίδοση καθώς το όχημα χαμηλώνει σε υψηλή ταχύτητα.

Ο Colin Chapman, εφευρέτης και μηχανικός αυτοκινήτων, ο οποίος ίδρυσε την Lotus Cars και την αγωνιστική της ομάδα στη Φόρμουλα 1, ανέπτυξε την έννοια των ηλεκτρονικά ελεγχόμενων υδραυλικών αναρτήσεων, στη δεκαετία του '80. Τις εισήγαγε ως μέσο βελτίωσης των αγωνιστικών αυτοκινήτων της εταιρείας του.



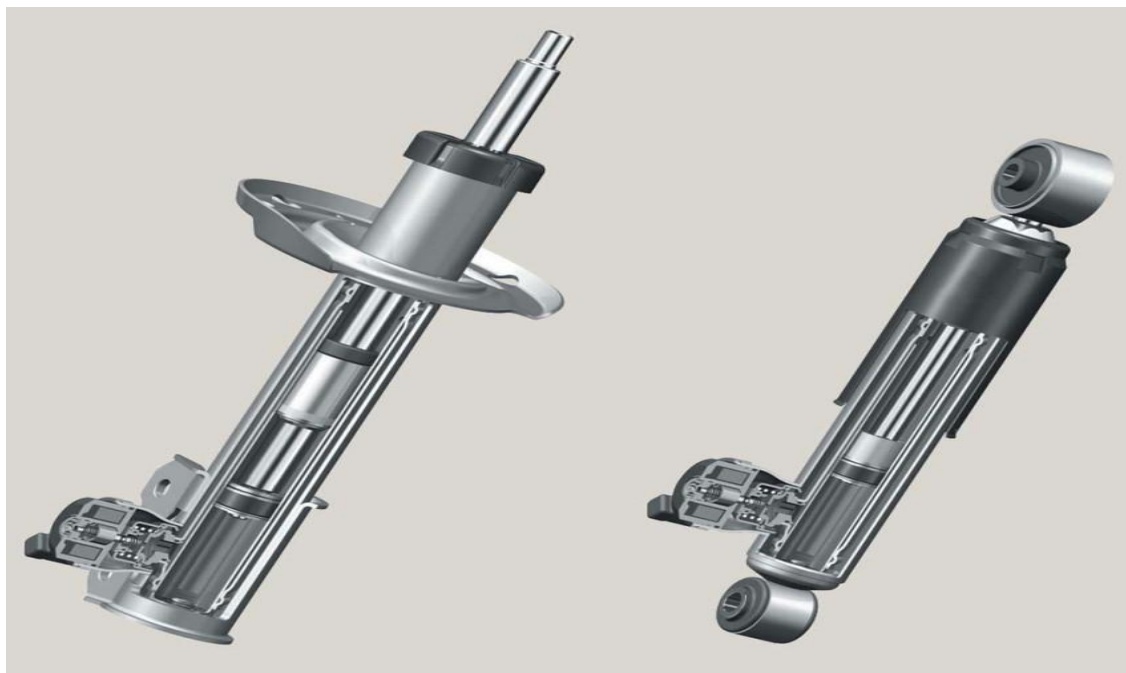
Σχήμα 1.3 Τύπος ενεργών αναρτήσεων

Ηλεκτρομαγνητικά ανακτώμενες

Αυτός ο τύπος ενεργών αναρτήσεων χρησιμοποιεί γραμμικούς ηλεκτρομαγνητικούς κινητήρες, ανεξάρτητα προσκολλημένους σε κάθε ελαστικό, που επιτρέπουν υπερβολικά γρήγορη αντίδραση και αναπαραγωγή δύναμης μέσου της χρησιμοποίησης τους ως παραγωγούς. Έρχεται κοντά στο να υπερπηδήσει προβλήματα των υδραυλικών αναρτήσεων, όπως οι αργοί χρόνοι αντιδράσεως. Είναι αποτέλεσμα πρόσφατων ερευνητικών ομάδων και εισήχθησαν στην αγορά από την εταιρεία Bose.

Ημιενεργές αναρτήσεις

Οι ημιενεργές αναρτήσεις⁽⁷⁾ μπορούν μόνο να αλλάξουν τους συντελεστές των αμορτισέρ και δεν προσθέτουν ενέργεια στο σύστημα αναρτήσεων. Αν και έχουν περιορισμένη παρεμβατικότητα (για παράδειγμα, η δύναμη ελέγχου δεν μπορεί ποτέ να έχει διαφορετική κατεύθυνση από την τρέχουσα ταχύτητα της ανάρτησης), οι ημιενεργές αναρτήσεις είναι λιγότερο ακριβές να τις σχεδιάσεις και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Σήμερα, η έρευνα στις ημιενεργές αναρτήσεις, σεβόμενη τις ιδιαιτερότητες αυτών συνεχίζεται με σκοπό να γεφυρωθεί το κενό ανάμεσα στις ημιενεργά συστήματα αναρτήσεων και τα πλήρως ενεργά συστήματα αναρτήσεων. Οι κυριότεροι τύποι ημιενεργών αναρτήσεων που συναντώνται σήμερα στην αγορά είναι οι ακόλουθοι.



Εικόνα 1.4 Τύπος ημιενεργών αναρτήσεων

Σωληνοειδείς

Αυτός ο τύπος είναι ο οικονομικότερος και βασικότερος τύπος ημιενεργών αναρτήσεων. Αποτελούνται από μια βαλβίδα σωληνοειδών που αλλάζει τη ροή του υδραυλικού μέσου μέσα στο αμορτισέρ, μεταβάλλοντας έτσι τα χαρακτηριστικά ύψρανσης του συστήματος αναρτήσεων. Τα σωληνοειδή συνδέονται με καλώδιο στον υπολογιστή ελέγχου, ο οποίος τους στέλνει τις εντολές ανάλογα με τον αλγόριθμο ελέγχου (συνήθως η αποκαλούμενη τεχνική «ουρανός-γάντζων»).

Αναρτήσεις μαγνητορεολογικών διατάξεων απόσβεσης γεννητριών⁽¹²⁾

Μια άλλη αρκετά πρόσφατα ανεπτυγμένη μέθοδος αναρτήσεων ενσωματώνει τις μαγνητορεολογικές διατάξεις απόσβεσης γεννητριών. Αναπτύχθηκε αρχικά από την εταιρεία Delphi για τη GM και ήταν τυποποιημένη, όπως και άλλες νέες τεχνολογίες, για Cadillac Seville STS (για το μοντέλο του 2002), και σε μερικά άλλα μοντέλα της GM του 2003. Ήταν μια βελτίωση για τα ημιενεργά συστήματα αναρτήσεων ή αλλιώς αποκαλούμενα («αυτόματες ευαίσθητες στο δρόμο αναρτήσεις») που χρησιμοποιήθηκαν στα οχήματα της GM για δεκαετίες, και επιτρέπει, μαζί με τους γρηγορότερους

σύγχρονους υπολογιστές, να αλλάζει η ακαμψία όλων των αναρτήσεων των ελαστικών, ανεξάρτητα, σε κάθε οδική ίντσα στην ταχύτητα εθνικών οδών. Αυτές οι διατάξεις απόσβεσης βρίσκουν αυξανόμενη χρήση στις ΗΠΑ και ήδη χρησιμοποιούνται σε μοντέλα ακριβών οχημάτων. Σε αυτό το σύστημα, που αναπτύσσεται τα τελευταία 25 χρόνια, το υγρό ρευστό περιέχει μεταλλικά μόρια. Μέσω ενσωματωμένου υπολογιστή, τα χαρακτηριστικά συμμόρφωσης των διατάξεων απόσβεσης ελέγχονται από έναν ηλεκτρομαγνήτη. Ουσιαστικά, η αύξηση της τρέχουσας ροής στη διάταξη απόσβεσης αυξάνει τα ποσοστά συμπίεσης και αναπήδησης, ενώ μια μείωση μαλακώνει την επίδραση των διατάξεων απόσβεσης. Πληροφορίες από τους αισθητήρες στα ελαστικά (τοποθετημένοι περίπου στην επέκταση των αναρτήσεων), των πηδάλιων, τους αισθητήρες επιτάχυνσης και μερικούς άλλους χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η βελτιστοποιημένη ακαμψία. Η πολύ γρήγορη αντίδραση του συνολικού συστήματος επιτρέπει, για παράδειγμα, να γίνεται αισθητά μαλακότερα η διάβαση των ελαστικών επάνω από μια λακκούβα ή πέτρα που βρίσκονται στο δρόμο.

Άξονας de Dion⁽¹¹⁾

Πρόκειται για ημιανεξάρτητη πίσω ανάρτηση. Ο άξονας που επινόησε ο κ. De Dion είναι, ουσιαστικά, μια τηλεσκοπική εγκάρσια ράβδος που επιτρέπει τη μικρή αυξομείωση του μετατροχίου κατά τη συμπίεση ή την έκταση της ανάρτησης. Τέτοια ανάρτηση φοράει και η Lotus 7.

Πολλαπλών συνδέσμων

Ότι πιο σύγχρονο. Έχει πολλές παραλλαγές (με ψαλίδια ή/και 3,4 ή 5 συνδέσμους). Προσφέρει ανεξάρτητη κίνηση των πίσω τροχών και την καλύτερη δυνατή άνεση χωρίς να θυσιάζονται τα δυναμικά στοιχεία του αυτοκινήτου και η σπορ συμπεριφορά. Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα για πολλές και λεπτές ρυθμίσεις της γεωμετρίας.

Είναι αλήθεια, ότι αυτός ο τύπος τεχνολογίας εμφανίζεται χαρακτηριστικά στα πολύ ακριβά αυτοκίνητα. Αλλά, όπως και με οποιαδήποτε νέα τεχνολογία, μία

«trickle-down» επίδραση πραγματοποιείται δηλαδή αρχικά είναι προσιτό μόνο από τους οικονομικά εύπορους . Οι ταχείες πρόοδοι στην επιστήμη μικροεπεξεργαστών θα φέρουν σύντομα αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα σε μια νέα σειρά των οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των οικογενειακών, των φορτηγών, των SUVs, ακόμη και των συμπαγών αυτοκινήτων. Θεωρήστε λοιπόν αυτό, ένα προοίμιο των όσων πρόκειται να ακολουθήσουν.

Τα ενεργά συστήματα αναρτήσεων (επίσης γνωστά ως Computerized Ride Control) αποτελούνται από τα ακόλουθα εξαρτήματα: έναν ή δύο υπολογιστές (μερικές φορές αποκαλούμενο ως ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου, ή ECU εν συντομία), διευθετήσιμα αμορτισέρ και ελατήρια, μια σειρά αισθητήρων σε κάθε ρόδα και σε όλο το αυτοκίνητο, και έναν ενεργοποιητή ή servo επάνω σε κάθε αμορτισέρ και ελατήριο. Τα εξαρτήματα αυτά μπορούν να ποικίλουν ελαφρώς από κατασκευαστή σε κατασκευαστή.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ενεργός ανάρτηση εργάζεται με αισθητήρες που εντοπίζουν τις αλλαγές στην οδική επιφάνεια και εισαγωγή εκείνων των συλλεγόμενων πληροφοριών, μέσω του ECU, στα απομακρυσμένα εξαρτήματα. Αυτά τα εξαρτήματα ενεργούν έπειτα επάνω στο σύστημα για να τροποποιήσουν τη μορφή του, την ακαμψία του, το ποσοστό διάνοιξης. Οι αλλαγές αυτές βελτιώνουν χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου όπως την απόδοση, την ικανότητα οδήγησης του, την ανταπόκριση, κ.λπ.

Ορισμένοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι, η ενεργός ανάρτηση μιμείται τις λειτουργίες του ανθρώπινου σώματος. Μερικές από αυτές τις παρομοιάζουν ως εξής⁽¹¹⁾ :

- Οι αισθητήρες είναι άκρες νεύρων διότι βλέπουνε, αισθάνονται, ακούνε, δοκιμάζονται ακόμη και στην οδική επιφάνεια, παραδίδοντας τα συλλεγόμενα δεδομένα πίσω στο ECU.

- Τα καλώδια που συνδέουν την όλη τη διάταξη είναι το κεντρικό νευρικό σύστημα, απελευθερώνοντας εντολές και οδηγίες σε όλο το σύστημα.

Κεφάλαιο 2

2.1 Ασαφής Λογική

Η θεωρία της Ασαφούς Λογικής⁽¹⁾ (fuzzy logic) είναι κατάλληλη τόσο για την αναπαράσταση της γνώσης και εμπειρίας, όσο και για τη δημιουργία μηχανισμού συμπερασμού ή συμπερασμάτων που χρησιμοποιούν τη διαθέσιμη κωδικοποιημένη γνώση και τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών της διεργασίας υπό έλεγχο για να συμπεράνουν την πράξη ελέγχου που απαιτείται. Κατέχει παράλληλη θέση με τη θεωρία πιθανοτήτων, χωρίς να την αντικαθιστά. Βασίζεται στην προϋπόθεση ότι το περιβάλλον αποτελείται από στοιχεία που είναι μέρη διαφόρων συνόλων με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Εισήχθη από τον Lofti A. Zadeh του πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στο Berkeley των ΗΠΑ στα μέσα του '60 όταν θεμελίωσε πλήρως την θεωρία των ασαφών συνόλων. Η ασαφής λογική αποτελεί ένα πεδίο επιστημονικής δραστηριότητας που συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Από τους πιο ένθερμους υποστηρικτές της θεωρίας αυτής είναι η Ιαπωνία η οποία την έχει εφαρμόσει απόλυτα και αποδίδει στο κράτος και την κοινωνία της στο σύνολο, ανεξάντλητα οικονομικά οφέλη.

Σε αντίθεση με την κλασική λογική η οποία απαιτεί μια βαθιά κατανόηση του συστήματος, με ακριβείς εξισώσεις και ακριβείς αριθμητικές τιμές, η Ασαφής λογική ενσωματώνει έναν εναλλακτικό τρόπο σκέψης, που επιτρέπει την μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων χρησιμοποιώντας ένα υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης που προέρχεται από τη γνώση και την εμπειρία μας. Είναι ένα ιδανικό όχημα για την περιγραφή και ανάλυση προσεγγιστικών λεκτικών μορφών, όπου το αληθές είναι σχετικό.

Υπάρχουν πάνω από δύο χιλιάδες διατιθέμενα προϊόντα στο εμπόριο που χρησιμοποιούν την Ασαφή Λογική, σε ευρεία γκάμα από μηχανές πλυντηρίων έως τρένα μεγάλων ταχυτήτων. Κύρια πλεονεκτήματα εφαρμογής της μεθόδου, είναι οι επιδόσεις, η απλότητα, το μικρότερο κόστος και η παραγωγικότητα.

Ασαφή σύνολα - Βασικοί ορισμοί

Η θεωρία συνόλων αρχικά αναπτύχθηκε από τον Cantor (1845-1918). Η θεωρία του δέχθηκε μεγάλη αμφισβήτηση και τελικά πέθανε το 1918 σε ψυχιατρική κλινική.

Σύνολο είναι οποιαδήποτε συλλογή - ομάδα ομοειδών πραγμάτων (πραγμάτων που έχουν ή ικανοποιούν μία συγκεκριμένη ιδιότητα). Τα μέλη της ομάδας αυτής καλούνται στοιχεία του συνόλου. Το πλήθος των στοιχείων ενός συνόλου καλείται πληθικός αριθμός του συνόλου (συμβολίζεται συνήθως με N). Υπάρχουν πεπερασμένα και άπειρα σύνολα, ανάλογα με το αν ο πληθικός τους αριθμός είναι πεπερασμένος ή άπειρος.

Ορισμός 2.1

Έστω X ένα μη μηδενικό σύνολο. Ένα ασαφές σύνολο A του X χαρακτηρίζεται από την συνάρτηση συμμετοχής του $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$ όπου $\mu_A(x)$ είναι ο βαθμός συμμετοχής του στοιχείου $x \in X$ στο ασαφές σύνολο A . Το ασαφές σύνολο A χαρακτηρίζεται πλήρως από το σύνολο των ζευγαριών $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$. Αν $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ένα πεπερασμένο σύνολο και A ένα ασαφές σύνολο του X τότε χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό

$$A = \mu_1/x_1 + \dots + \mu_n/x_n$$

όπου μ_i/x_i συμβολίζει ότι μ_i είναι ο βαθμός συμμετοχής του x_i στο A και το $+$ συμβολίζει την ένωση. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής έχει ένα στοιχείο τόσο περισσότερο "ανήκει" στο σύνολο.

2.2 Ασαφείς Ελεγκτές

Η στρατηγική ελέγχου μιας διαδικασίας περιγράφεται μέσω γλωσσικών κανόνων που συνδέουν, χωρίς ακρίβεια, διάφορες συνθήκες της διαδικασίας

με τις απαιτούμενες δράσεις ή ενέργειες που πρέπει να ακολουθήσει ο ελεγκτής. Οι δράσεις αυτές πρέπει να ακολουθούν πιστά αυτές ενός χειριστή όταν ελέγχει τη διαδικασία χειροκίνητα. Οι κανόνες ελέγχου συνήθως εκφράζονται από ένα σύνολο εξαρτημένων σχέσεων της μορφής:

EAN (κατάσταση διαδικασίας) TOTE (δράση ελέγχου)

και μπορούν να υλοποιηθούν ως λογικές συνεπαγωγές χρησιμοποιώντας τη θεωρία των ασαφών συνόλων.

Τα απαραίτητα δομικά στοιχεία ενός ασαφούς ελεγκτή είναι⁽¹⁾:

- η βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου (real-time data base) όπου μετά από εξομάλυνση καταχωρούνται οι τιμές των μεταβλητών που συλλέγονται από τη φυσική διαδικασία από τις διάφορες τοπικές μονάδες ελέγχου (TME) καθώς και οι έξοδοι του ελεγκτή (δηλαδή οι δράσεις ελέγχου) που κατά τακτά χρονικά διαστήματα μεταφέρονται και πάλι στις TME της διαδικασίας μέσω τοπικού βιομηχανικού δικτύου. Η βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ως ο κρίκος μεταξύ της φυσικής διαδικασίας και του ελεγκτή,
- η βάση γνώσης (knowledge base) η οποία έχει καταχωρημένη την κωδικοποιημένη γνώση για τον έλεγχο της διαδικασίας,
- τα ασαφή σύνολα (fuzzy sets) που είναι καταχωρημένα είτε σε αναλυτική ή διακριτή μορφή σε ειδικό αρχείο. Ο μηχανισμός συμπερασμού χρησιμοποιεί τα σύνολα αυτά για να αποδώσει τις πράξεις ελέγχου στη διαδικασία,
- το σύστημα ανάπτυξης (development system) με το οποίο ο μηχανικός γνώσης επικοινωνεί με το περιβάλλον του ασαφούς ελεγκτή,
- τον ασαφοποιητή (fuzzifier) όπου οι φυσικές μεταβλητές της διαδικασίας μετατρέπονται στη γλώσσα των ασαφών συνόλων,
- το μηχανισμό συμπερασμού (inference engine) όπου συμπεραίνονται οι αποφάσεις ελέγχου βάσει των διαθέσιμων κανόνων σε μορφή ασαφών συνόλων,

- τον απο-ασαφοποιητή (defuzzifier) όπου τα ασαφή σύνολα των εξόδων του ελεγκτή μετατρέπονται σε σαφείς δράσεις ελέγχου προς μετάδοση στους ενεργοποιητές της διαδικασίας μέσω των ΤΜΕ.

Ασαφοποίηση μεταβλητών εισόδων

Οι είσοδοι σε έναν ασαφή ελεγκτή είναι σήματα άρα σαφείς κλασσικές μεταβλητές, γι αυτό και απαιτείται σαν πρώτο βήμα η ασαφοποίησή των. Έστω ένας ελεγκτής με δύο εισόδους $x_1(t)$, ..., $x_n(t)$ και μία έξοδο $y(t)$. Θεωρούμε ότι στην χρονική στιγμή t_0 έρχονται σαν είσοδος πραγματικές τιμές x_1 , ..., x_n . Ο στόχος είναι να παράγουμε με βάση αυτούς τους αριθμούς ασαφή σύνολα A^1_1 , ..., A^1_n . Ένας τρόπος να παραχθούν οι ασαφοποιημένες είσοδοι είναι να ορίσουμε τα A^i_1 σαν ασαφή σημεία (2.1) με την ακόλουθη συνάρτηση συμμετοχής

$$\mu_{A^i_1}(x_i(t)) = \begin{cases} 1 & , x_i(t) = x_i \\ 0 & , x_i(t) \neq x_i \end{cases}$$

Ένας δεύτερος τρόπος ασαφοποίησης είναι το να λάβουμε υπόψη μας την αβεβαιότητα στα σήματα εισόδου θεωρώντας ότι έχουμε σαν είσοδο έναν ασαφή αριθμό.

Μηχανισμός συμπερασμού

Έστω n το πλήθος κανόνων που αντιστοιχούν στον ελεγκτή της μορφής "ΑΝ x_1 ΕΙΝΑΙ A^1_1 ΚΑΙ x_2 ΕΙΝΑΙ A^1_2 ΤΟΤΕ y ΕΙΝΑΙ B^1 ". Μεταξύ των κανόνων υπονοείται το συνδετικό "είτε" που ερμηνεύεται σαν διάζευξη (OR). Οι κανόνες αυτοί αντιστοιχούν σε ασαφείς συνεπαγωγές R_i .

Ο μηχανισμός συμπερασμού για να οριστεί πλήρως χρειάζεται να οριστεί ο τελεστής συνεπαγωγής, ο τελεστής σύνθεσης που χρησιμοποιείται, το συνδετικό μεταξύ των n κανόνων, και ο τελεστής "ΚΑΙ" που ενώνει τις προϋποθέσεις των κανόνων.

Τελεστής "ΚΑΙ"	Τελεστής "OR"	Τελεστής συνεπαγωγής	Τελεστής σύνθεσης
Mamdani (max)	Mamdani (min)	Αυστηρή	Mamdani (max – min)
probor	Larsen (prod)	Gödel	Larsen (max – prod)
		Larsen (prod)	max – average
		Mamdani (min)	

Από-ασαφопоίηση της εξόδου

Για να προκύψει τελικά μια σαφής ενέργεια ελέγχου πρέπει στο ασαφές σύνολο C να εφαρμοστεί μια από τις παρακάτω τεχνικές αποασαφопоίησης.

- Κέντρου βάρους (Center of area - Centroid). Η έξοδος υπολογίζεται από τον τύπο

$$z = \frac{\sum y_i \mu_c(y_i)}{\sum \mu_c(y_i)}$$

στην διακριτή και

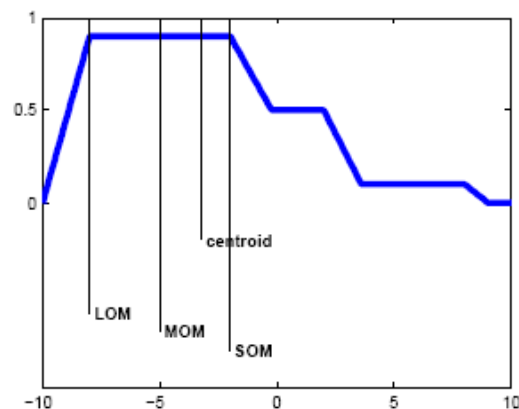
$$z = \frac{\int y \mu_c(y)}{\int \mu_c(y)}$$

στην συνεχή περίπτωση.

- Αποασαφопоίηση μικρότερου των μεγίστων (Smallest of maxima - SOM). Είναι το μικρότερο σε απόλυτη τιμή από τα y_i που έχουν την μέγιστη τιμή συμμετοχής στο C .
- Αποασαφопоίηση μεγαλύτερου των μεγίστων (Largest of maxima - LOM).

Είναι το μεγαλύτερο σε απόλυτη τιμή από τα y_i που έχουν την μέγιστη τιμή συμμετοχής στο C.

- Αποασαφοποίηση μέσου των μεγίστων (Middle of maxima - MOM). Είναι ο μέσος όρος όλων των στοιχείων $y_i = 1, \dots, N$ που παίρνουν την μέγιστη τιμή στο C.



Σχήμα 2.1.Αποασαφοποίηση

2.3 Γνωστοί μηχανισμοί ασαφών ελεγκτών

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν μερικοί γνωστοί μηχανισμοί ασαφών ελεγκτών. Για απλότητα υποθέτουμε ότι έχουμε δύο κανόνες της μορφής₍₂₎:

- R1 : AN x είναι A1 KAI y είναι B1 TOTE z είναι C1
- R2 : AN x είναι A2 KAI y είναι B2 TOTE z είναι C2

Επίσης θεωρούμε ότι έχουμε σαν εισόδους στον ελεγκτή $x = x_0$ και $y = y_0$. Ο στόχος είναι να βρεθεί η αριθμητική έξοδος z.

Mamdani

Ασαφοποίηση	ασαφές σημείο
Τελεστής "ΚΑΙ"	min
Τελεστής "ΟΡ"	max
Τελεστής συνεπαγωγής	Mamdani (min)
Τελεστής σύνθεσης	max –min
Αποασαφοποίηση	Οτιδήποτε

Μια και έχω σαν είσοδο αριθμητικές τιμές οι οποίες μετά την ασαφοποίηση γίνονται ασαφή σημεία μπορώ να χρησιμοποιήσω τον τρόπο υπολογισμού της εξόδου με τα επίπεδα ενεργοποίησης. Μια και έχουμε τελεστή "ΚΑΙ" το min, τα επίπεδα ενεργοποίησης των κανόνων υπολογίζονται ως εξής:

$$\alpha_1 = \mu_{A1}(x_0) \wedge \mu_{B1}(y_0)$$

$$\alpha_2 = \mu_{A2}(x_0) \wedge \mu_{B2}(y_0).$$

Οι έξοδος του κάθε κανόνα είναι

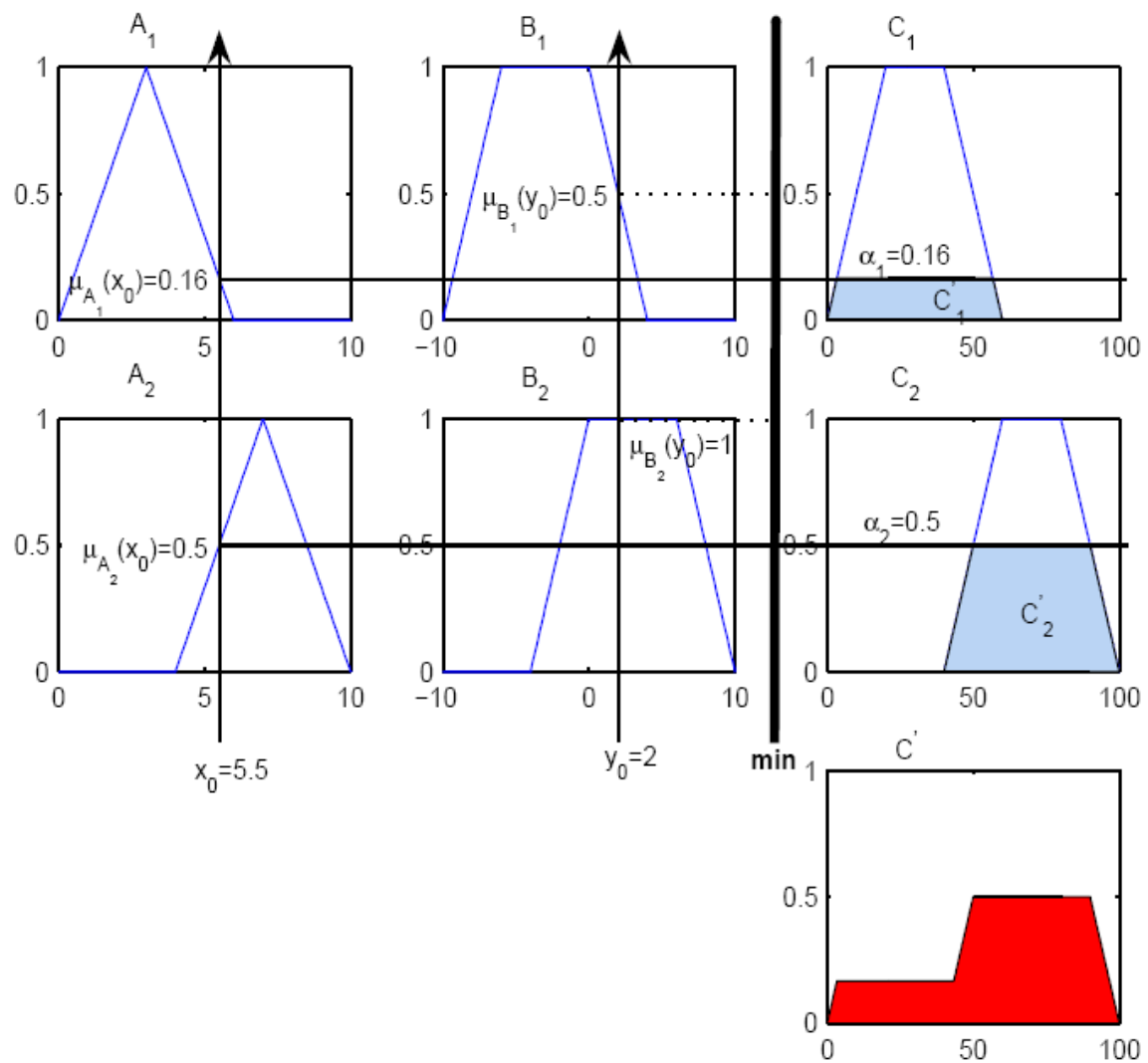
$$\mu_{c'1}(z) = \alpha_1 \wedge \mu_{c1}(z)$$

$$\mu_{c'2}(z) = \alpha_2 \wedge \mu_{c2}(z)$$

Τότε η συνολική έξοδος του ελεγκτή θα είναι

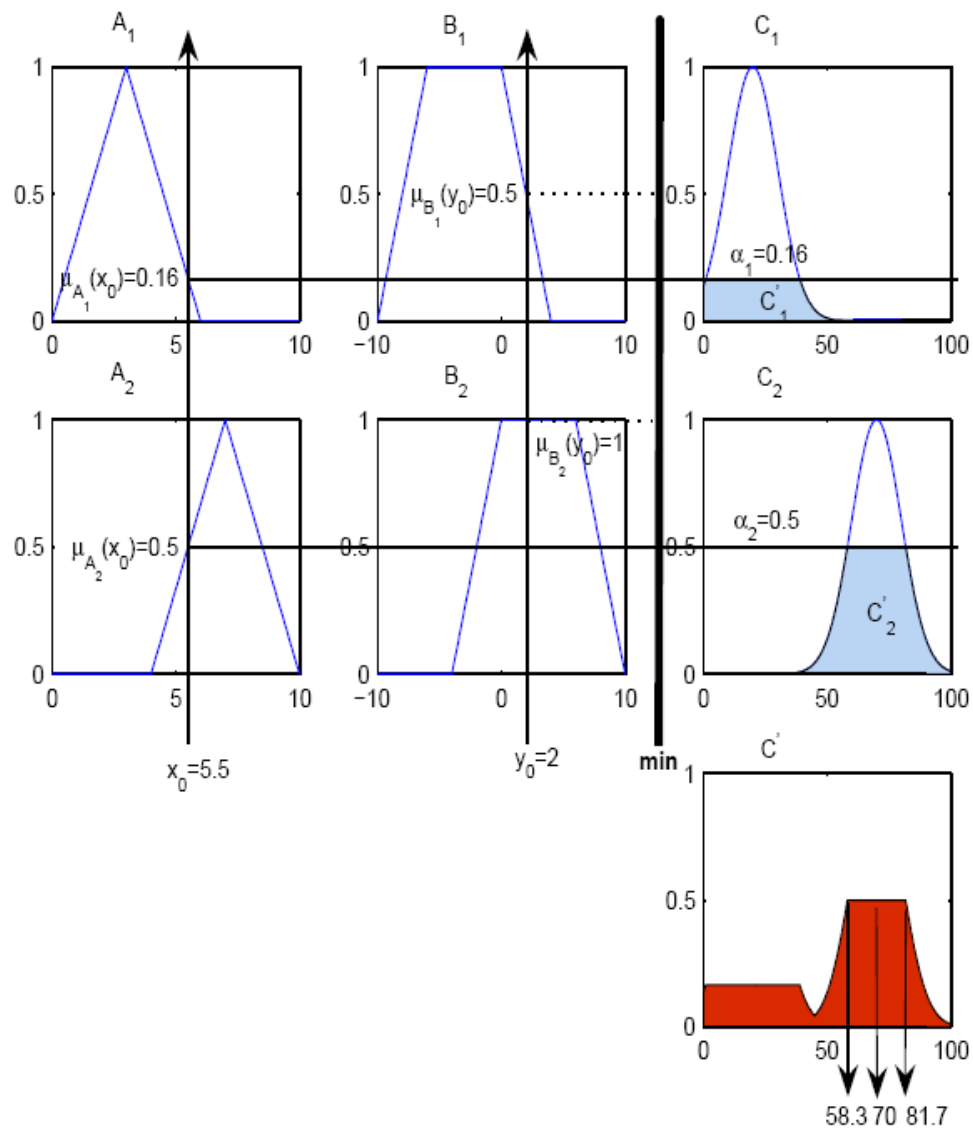
$$\mu_{c'}(z) = \mu_{c'1}(z) \vee \mu_{c'2}(z)$$

Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο επόμενο γράφημα₍₂₎



Σχήμα 2.2.Ελεγκτής Mamdani

Αν τώρα αλλάξουμε τα δύο ασαφή σύνολα C_1 και C_2 από τραπέζια σε Gauss έχουμε το ακόλουθο γράφημα:



Σχήμα 2.3.Ελεγκτής Mamdani

Έτσι σαν τελική έξοδο έχουμε:

Αποασαφοποίηση	MATLAB type	Έξοδος
----------------	----------------	--------

Κέντρου βάρους	centroid	$z_0 = 56.18$
Μικρότερου των μεγίστων	som	$z_0 = 58.3$
Μεγαλύτερου των μεγίστων	lom	$z_0 = 81.7$
Μέσου των μεγίστων	mom	$z_0 = 70$

Ανάλυση κανόνων

Η σχεδίαση ενός ασαφούς ελεγκτή εντοπίζεται κυρίως στην εύρεση κατάλληλων κανόνων, έτσι ώστε το κλειστό σύστημα να ικανοποιεί κάποιες δεδομένες προϋποθέσεις. Δυστυχώς στην θεωρία των ασαφών ελεγκτών δεν υπάρχουν συγκεκριμένες διαδικασίες έτσι ώστε να σχεδιαστεί ένας τέτοιος ελεγκτής, σε αντίθεση με την γραμμική θεωρία αυτόματου ελέγχου όπου υπάρχουν τεχνικές όπως ο γεωμετρικός τόπος ριζών, τα διαγράμματα Nyquist κλπ. Το πρόβλημα είναι ότι η σχέση εισόδου εξόδου του ελεγκτή είναι μη γραμμική και πολύ δύσκολη να περιγραφθεί μαθηματικά.

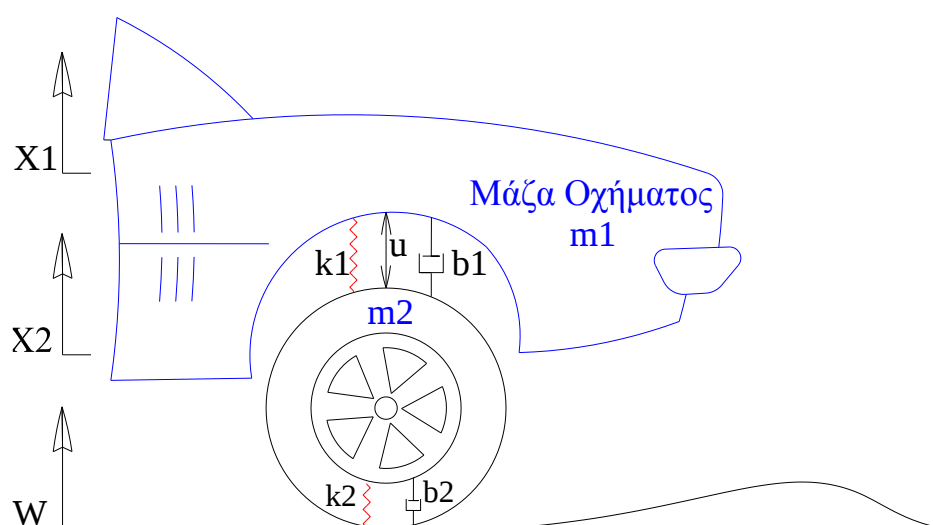
Παρόλα αυτά δημιουργήθηκαν κάποια test με σκοπό να δείχνουν αν μια βάση κανόνων πληροί κάποια βασικά κριτήρια, όπως αν είναι πλήρης κλπ. Τα βασικά κριτήρια για την ανάλυση των κανόνων είναι τα ακόλουθα⁽⁶⁾.

- Πληρότητα - Είναι αρκετοί οι κανόνες που δημιουργήθηκαν;
- Συνέπεια - Μήπως οι κανόνες αλληλοσυγκρούονται;
- Πλεονασμός - Μήπως υπάρχουν στη βάση κανόνων κάποιοι περιττοί κανόνες;
- Αλληλεπίδραση - Υπάρχουν κάποιοι κανόνες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους;

Κεφάλαιο 3

3.1 Περιγραφή του μοντέλου

Ο σχεδιασμός⁽³⁾ του συστήματος αυτομάτων αναρτήσεων σε ένα όχημα αποτελεί ένα ενδιαφέρον πρόβλημα έλεγχου. Η μελέτη του προβλήματος έγινε σε ένα μοντέλο $\frac{1}{4}$ του οχήματος (σε ένα από τους τέσσερις τροχούς) απλοποιώντας το πρόβλημα σε μια σειρά ελατήριου-αμορτισέρ και τροχού ελαστικού. Ένα διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται παρακάτω:



Όπου:

- * Μάζα Οχήματος (m_1) = 2500 kg,
- * Μάζα Ελατηρίου (m_2) = 320 kg,
- * Σταθερά ελατηρίου συστήματος ανάρτησης (k_1) = 80,000 N/m,
- * Σταθερά ελατηρίου συστήματος τροχού & ελαστικού (k_2) = 500,000 N/m,
- * Σταθερά απόσβεσης συστήματος ανάρτησης (b_1) = 350 Ns/m.
- * Σταθερά απόσβεσης συστήματος τροχού & ελαστικού (b_2) = 15,020 Ns/m.
- * Δύναμη έλεγχου (u) = δύναμη από τον ελεγκτή που πρόκειται να μελετήσουμε.
- * Μετατόπιση Οχήματος (X_1)
- * Μετατόπιση Ελατηρίου (X_2)
- * Διαταραχή από το οδόστρωμα (W)

Από το παραπάνω σχήμα και συμφωνά με το νόμο του Νεύτωνα μπορούμε να εκφράσουμε τις δυναμικές εξισώσεις κίνησης ως εξής:

$$M_1 \ddot{X}_1 = -b_1 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_1 (X_1 - X_2) + U$$

$$M_2 \ddot{X}_2 = b_1 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_1 (X_1 - X_2) + b_2 (\dot{W} - \dot{X}_2) + K_2 (W - X_2) - U$$

3.2 Απαιτήσεις προβλήματος

Ένα καλό σύστημα ανάρτησης θα πρέπει να έχει ένα ικανοποιητικό κράτημα στο οδόστρωμα και να διατηρεί την άνεση των επιβατών ενώ περνά πάνω από σαμαράκια ή λακκούβες. Όταν το όχημα έρχεται αντιμέτωπο με ανωμαλίες του οδοστρώματος (λακκούβες, σαμαράκια κτλ) θα πρέπει το αμάξι να έχει μικρές ταλαντώσεις και να αποσβένουν σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επειδή η απόσταση X_1-W είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί και η παραμόρφωση του ελαστικού είναι αμελητέα, θα χρησιμοποιήσουμε την απόσταση X_1-X_2 αντί για X_1-W σαν έξοδο του προβλήματος μας. Η διαταραχή του δρόμου (W) προσομοιώνεται αρχικά από μια βηματική συνάρτηση. Αυτό μπορεί να αντιπροσωπεύει την έξοδο του οχήματος από μια λακκούβα. Πρέπει ο σχεδιαζόμενος ελεγκτής να έχει έξοδο η οποία να μην ξεπερνά τον στόχο κατά 5% και να σταθεροποιείται σε χρόνο λιγότερο των 5 δευτερόλεπτων. Έτσι για παράδειγμα για ένα σκαλοπάτι ύψους δέκα εκατοστών το όχημα θα πρέπει να μετακινηθεί σε ένα εύρος ± 5 χιλιοστών και να επιστρέψει σε κατάσταση ηρεμίας σε λιγότερο από πέντε δευτερόλεπτα.

Ελέγχθηκε η λειτουργία του συστήματος τόσο στην περίπτωση του ανοικτού βρόγχου όσο και στην περίπτωση του κλειστού βρόγχου με την πρόσθεση του ελεγκτή PID. Για την περίπτωση ανοικτού βρόγχου οι δυναμικές εξισώσεις σε μορφή πίνακα του οχήματος- ανάρτηση δίνονται ⁽³⁾:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \ddot{X}_1 \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-b_1 b_2}{M_1 M_2} & 0 & (\frac{b_1}{M_1}(\frac{b_1}{M_1} + \frac{b_1}{M_2} + \frac{b_2}{M_2}) - (\frac{K_1}{M_1})) & (\frac{b_1}{M_1}) \\ \frac{b_2}{M_2} & 0 & -(\frac{b_1}{M_1} + \frac{b_1}{M_2} + \frac{b_2}{M_2}) & 1 \\ \frac{K_2}{M_2} & 0 & -(\frac{K_1}{M_1} + \frac{K_1}{M_2} + \frac{K_2}{M_2}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ \dot{X}_1 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M_1} & \frac{b_1 b_2}{M_1 M_2} \\ 0 & \frac{-b_2}{M_2} \\ \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} & -\frac{K_2}{M_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ W \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ \dot{X}_1 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ W \end{bmatrix}$$

Ενώ αντίστοιχα για τη περίπτωση του κλειστού βρόγχου έχουμε:

- Τον ορισμό των μήτρων A, B και C.
- Την εισαγωγή του ελεγκτή PID που έχει συνάρτηση μεταφοράς:

$$K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s = \frac{K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I}{s}$$

- Με τις εξισώσεις στο χώρο-κατάσταση να γίνονται:

$$\dot{X} = \left(A - B \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} K \right) X + B \begin{bmatrix} u \\ W \end{bmatrix}$$

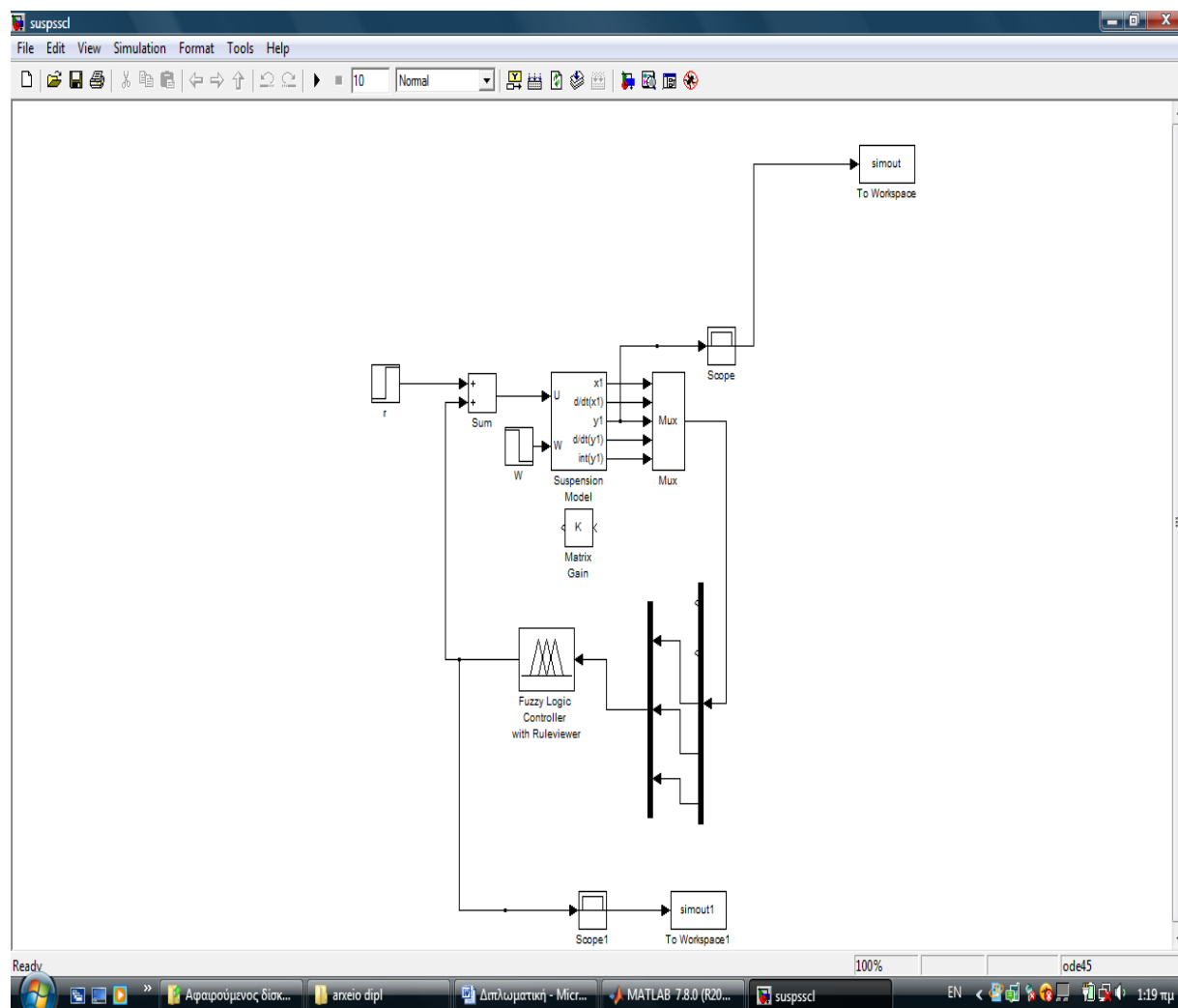
$$Y = CX$$

Παρατηρήθηκε ότι την καλύτερη απόκριση υφίσταται η διάταξη στην περίπτωση του κλειστού βρόγχου με ελεγκτή PID. Ο κώδικας σε m-file που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση του κλειστού βρόγχου με εισαγωγή ελεγκτή PID είναι ο παρακάτω:

```
m1 = 2500;  
m2 = 320;  
k1 = 80000;  
k2 = 500000;  
b1 = 350;  
b2 = 15020;  
  
A=[0          1          0          0  
   -(b1*b2)/(m1*m2)  0  ((b1/m1)*((b1/m1)+(b1/m2)+(b2/m2)))-(k1/m1) -  
   (b1/m1)  
   b2/m2          0  -((b1/m1)+(b1/m2)+(b2/m2))          1  
   k2/m2          0  -((k1/m1)+(k1/m2)+(k2/m2))          0];  
B=[0          0  
   1/m1        (b1*b2)/(m1*m2)  
   0          -(b2/m2)  
   (1/m1)+(1/m2)  -(k2/m2)];  
C=[0 0 1 0];  
D=[0 0];  
sys=ss(A,B,C,D);  
K =[0 2.3e6 5e8 0 8e6  ];
```

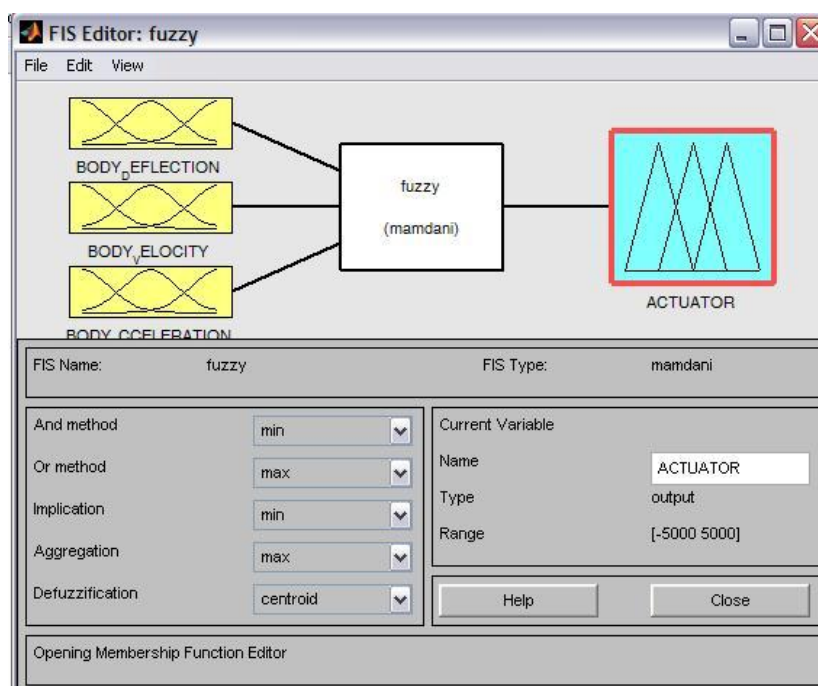
3.3 Εισαγωγή Ασαφούς Ελεγκτή σε περιβάλλον Simulink και ενοποίηση των επιμέρους τμημάτων

Το παραπάνω αρχείο Matlab που δημιουργήσαμε το αναπτύξαμε στις εργαλειοθήκες Simulink και Fuzzy με σκοπό να σχεδιάσουμε, να αναλύσουμε και να ελέγξουμε την λειτουργία του συστήματος που έχουμε αναπτύξει. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων στο Simulink έχουμε ορίσει το Scope για το έλεγχο της μετατόπισης των επιβατών του οχήματος και το Scope1 για τη αναπαράσταση της δύναμης που παράγεται από τον ελεγκτή.



Εικόνα 3.1

Ο ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε έχει τρεις εισόδους οι οποίες θα είναι το body deflection ,το body velocity και το body acceleration και μια έξοδο την απαιτούμενη δύναμη δράσης (actuator). Η μέθοδος συμπερασμού που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή του Mamdani που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2. Οι κανόνες που διέπουν την λειτουργία του ελεγκτή παρατίθεται στον πίνακα 1.



Εικόνα 3.2 Ελεγκτής τριών εισόδου και μίας εξόδου

Πίνακας 1.: Rule base₍₅₎

Rule	$\dot{z}_b - \dot{z}_w$	$\dot{z}_b$	$\ddot{z}_b$	f_a	Rule	$z_b - \dot{z}_w$	$\dot{z}_b$	$\ddot{z}_b$	f_a
R ₁	PM	PM	ZE	ZE	R ₂₆ R ₅₁	PM	PM	P or N	NS
R ₂	PS	PM	ZE	NS	R ₂₇ R ₅₂	PS	PM	P or N	NM
R ₃	ZE	PM	ZE	NM	R ₂₈ R ₅₃	ZE	PM	P or N	NB
R ₄	NS	PM	ZE	NM	R ₂₉ R ₅₄	NS	PM	P or N	NB
R ₅	NM	PM	ZE	NB	R ₃₀ R ₅₅	NM	PM	P or N	NV
R ₆	PM	PS	ZE	ZE	R ₃₁ R ₅₆	PM	PS	P or N	NS
R ₇	PS	PS	ZE	NS	R ₃₂ R ₅₇	PS	PS	P or N	NM
R ₈	ZE	PS	ZE	NS	R ₃₃ R ₅₈	ZE	PS	P or N	NM
R ₉	NS	PS	ZE	NM	R ₃₄ R ₅₉	NS	PS	P or N	NB
R ₁₀	NM	PS	ZE	NM	R ₃₅ R ₆₀	NM	PS	P or N	NB
R ₁₁	PM	ZE	ZE	PS	R ₃₆ R ₆₁	PM	ZE	P or N	PM

Παραμετρική διερεύνηση συστήματος ενεργών αναρτήσεων με ασαφή λογική

R ₁₂	PS	ZE	ZE	ZE	R ₃₇	R ₆₂	PS	ZE	P or N	PS
R ₁₃	ZE	ZE	ZE	ZE	R ₃₈	R ₆₃	ZE	ZE	P or A	ZE
R ₁₄	NS	ZE	ZE	ZE	R ₃₉	R ₆₄	NS	ZE	P or N	NS
R ₁₅	NM	ZE	ZE	NS	R ₄₀	R ₆₅	NM	ZE	P or N	NM
R ₁₆	PM	NS	ZE	PM	R ₄₁	R ₆₆	PM	NS	P or N	PB
R ₁₇	PS	NS	ZE	PM	R ₄₂	R ₆₇	PS	NS	P or N	PB
R ₁₈	ZE	NS	ZE	PS	R ₄₃	R ₆₈	ZE	NS	P or N	PM
R ₁₉	NS	NS	ZE	PS	R ₄₄	R ₆₉	NS	NS	P or N	PM
R ₂₀	NM	NS	ZE	ZE	R ₄₅	R ₇₀	NM	NS	P or N	PS
R ₂₁	PM	NM	ZE	PB	R ₄₆	R ₇₁	PM	NM	P or N	PV
R ₂₂	PS	NM	ZE	PM	R ₄₇	R ₇₂	PS	NM	P or N	PB
R ₂₃	ZE	NM	ZE	PM	R ₄₈	R ₇₃	ZE	NM	P or N	PB
R ₂₄	NS	NM	ZE	PS	R ₄₉	R ₇₄	NS	NM	P or N	PM
R ₂₅	NM	NM	ZE	ZE	R ₅₀	R ₇₅	NM	NM	P or N	PS

Οι γλωσσικοί κανόνες ελέγχου του ελεγκτή ασαφούς λογικής παρτήθηκαν από τον παραπάνω πίνακα και χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση είναι οι ακόλουθοι:

$$R_1: \text{ IF } (\dot{z}_b - \dot{z}_w = \text{PM}) \text{ AND } (\dot{z}_b = \text{PM}) \text{ AND } (\ddot{z}_b = \text{ZE}) \text{ THEN } (f_a = \text{ZE})$$

$$R_2: \text{ IF } (\dot{z}_b - \dot{z}_w = \text{PS}) \text{ AND } (\dot{z}_b = \text{PM}) \text{ AND } (\ddot{z}_b = \text{ZE}) \text{ THEN } (f_a = \text{NS})$$

..

$$R_{75}: \text{ IF } (\dot{z}_b - \dot{z}_w = \text{NM}) \text{ AND } (\dot{z}_b = \text{NM}) \text{ AND } (\ddot{z}_b = \text{P}) \text{ THEN } (f_a = \text{PS})$$

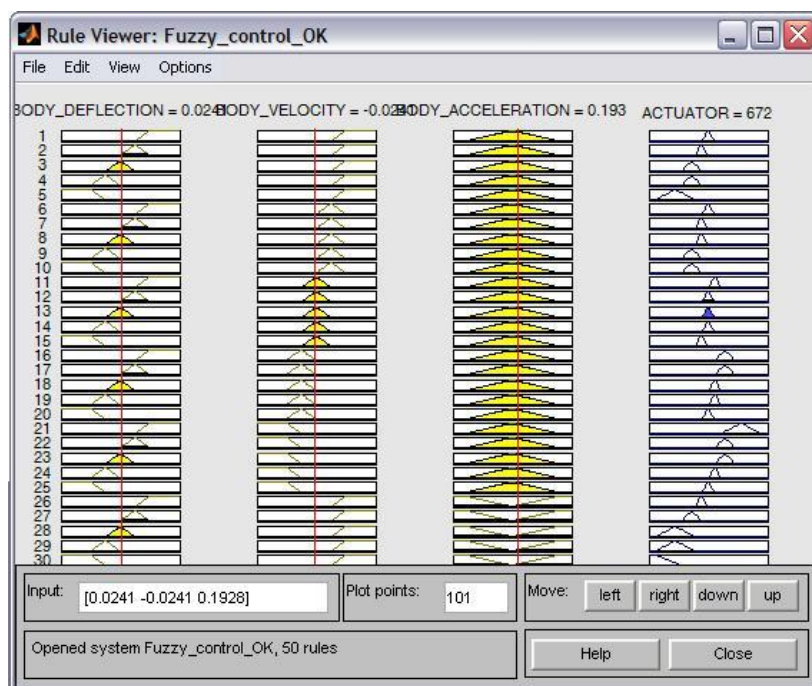
Κατά συνέπεια οι κανόνες του ελεγκτή έχουν τη γενική μορφή:

$$R_i: \text{ IF } (\dot{z}_b - \dot{z}_w = A_i) \text{ AND } (\dot{z}_b = B_i) \text{ AND } (\ddot{z}_b = C_i) \text{ THEN } (f_a = D_i)$$

Όπου A_i , B_i , C_i and D_i είναι τιμές ασαφών συνόλων που αντιπροσωπεύουν τις γλωσσικές τιμές των $\dot{z}_b - \dot{z}_w$, $\dot{z}_b$, $\ddot{z}_b$ και f_a αντίστοιχα, οι οποίες ορίζονται από τις συναρτήσεις συμμετοχής.

Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

- Εισάγουμε τα κατάλληλα διαστήματα για τις τρεις εισόδους και την έξοδο του ελεγκτή τα αποθηκεύουμε με το όνομα nik1.
- Κάνουμε export στο Workspace με την ονομασία nik1.
- Περνάμε τα αποθηκευμένα μας δεδομένα στο block του Simulink του Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer ως nik1.
- Τρέχουμε τα δεδομένα για χρόνο $t=10\text{sec}$.
- Με τις εντολές `plot (tout, simout)` και `plot (tout, simout1)` λαμβάνουμε τις καμπύλες Body_deflection και Force συναρτήσει του χρόνου $t=10\text{sec}$.



Εικόνα 3.3 Απεικόνιση του Rule Viewer

Η προαναφερθείσα διαδικασία αποτελεί την βάση της διερεύνησης που κάναμε. Η ανάλυση, επεξεργασία και τα αποτελέσματα αυτής δίνονται αναλυτικά στο παρακάτω κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4

1^η Διερεύνηση

Διερεύνηση στοιχείου ασαφούς ελεγκτή

Πραγματοποιήθηκαν 72 μετρήσεις του ασαφούς ελεγκτή, για το μοντέλο που δημιουργήσαμε στην εργαλειοθήκη Simulink του Matlab. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων στο Simulink έχουμε ορίσει το simout (to Workspace) για τον έλεγχο της μετατόπισης των επιβατών του οχήματος μέσω του Scope και το simout1 (to Workspace) για τη αναπαράσταση της δύναμης που παράγεται από τον ελεγκτή μέσω του Scope1. Το στοιχείο εκείνο του ασαφούς ελεγκτή που θέλουμε να διερευνήσουμε είναι το body_deflection. Διερευνώντας την εκάστοτε φόρτιση του ελεγκτή διαπιστώνουμε την μεταβολή της απόκρισης όλου του συστήματος. Πολλά από τα διαστήματα που ελέγξαμε ταυτίζονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την μη διαφοροποίηση της διάταξης. Τα διαστήματα εκείνα με τα πιο ενδιαφέροντα στοιχεία είναι τα παρακάτω:

- 1) [-0.1 0.4]
- 2) [0 0.25]
- 3) [0 0.35]
- 4) [0 0.4]
- 5) [0 0.1]
- 6) [0.1, 0.4]
- 7) [0.05 0.4]
- 8) [0 0.025]
- 9) [0 0.01]
- 10) [-0.3 0.3]

Διατηρούμε σταθερές τις άλλες τρεις μεταβλητές του fuzzy logic δηλαδή τις body_velocity [-1 1], body_acceleration [-0.1 0.1] και actuator [-5000 5000].

Προσομοιώσαμε τις μετρήσεις μοντέλο του Simulink για χρόνο $t=10s$, και έπειτα στο περιβάλλον της Matlab πληκτρολογώντας τις εντολές `plot (tout, simout)` και `plot (tout, simout1)` παρατηρήσαμε τις καμπύλες μετατόπισης επιβατών και δύναμης

Στην συνέχεια, για τα παραπάνω διαστήματα του `body_deflection` κάναμε άλλες 5 πρόσθετες διερευνήσεις αλλάζοντας κάθε φορά τις μεταβλητές `actuator` και `body_velocity` του ασαφούς μας ελεγκτή, για να διαπιστώσουμε την διαφοροποίηση των καμπυλών μας για τα διαστήματα `body_deflection`. Έτσι τα διαστήματα των υπόλοιπων μεταβλητών σε κάθε διερεύνηση είναι:

- i) `body_velocity` [-1 1] `actuator` [-5000, 5000], `body_acceleration` [-0.1 0.1]
- ii) `body_velocity` [-0.7 0.7] `actuator` [-5000, 5000], `body_acceleration` [-0.1 0.1]
- iii) `body_velocity` [-1.3 1.3] `actuator` [-2500, 2500], `body_acceleration` [-0.1 0.1]
- iv) `body_velocity` [-1.3 1.3] `actuator` [-5000 5000], `body_acceleration` [-0.1 0.1]
- v) `body_velocity` [-0.7 0.7] `actuator` [-2500, 2500], `body_acceleration` [-0.1 0.1]

Ύστερα τις μετρήσεις αυτές τις ομαδοποιήσαμε. Πραγματοποιήσαμε δύο διαφορετικές ομαδοποιήσεις που θα εξηγήσουμε παρακάτω.

1^η Ομαδοποίηση

Κατά την ομαδοποίηση αυτή, ενεργήσαμε ως εξής: για το κάθε ένα από τα παραπάνω 10 διαστήματα `body_deflection` που ορίσαμε, απεικονίσαμε στο ίδιο σύστημα αξόνων τις 5 διαφορετικές διερευνήσεις που κάναμε τόσο για την μετατόπιση των επιβατών όσο και για την ασκούμενη δύναμη. Για κάθε διερεύνηση έχουμε ορίσει και το αντίστοιχο χρώμα «καμπύλης»:

‘red line’ για την αρχική μας κατάσταση.

‘black line’ για την i).

‘blue line’ για την ii).

‘green line’ για την iii).

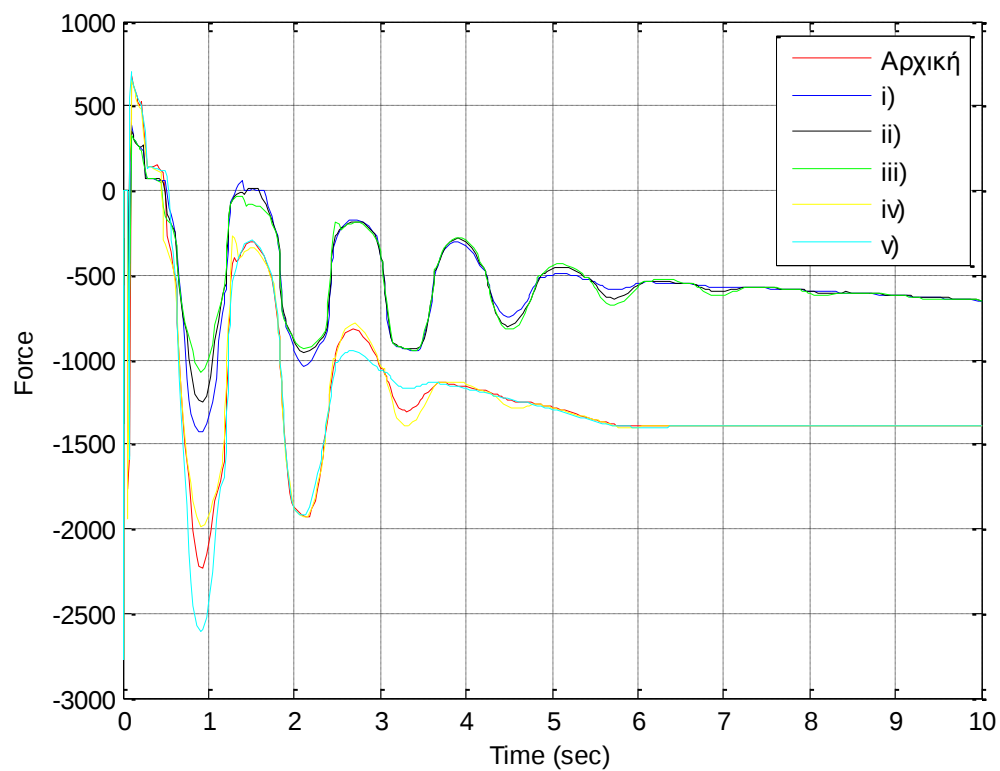
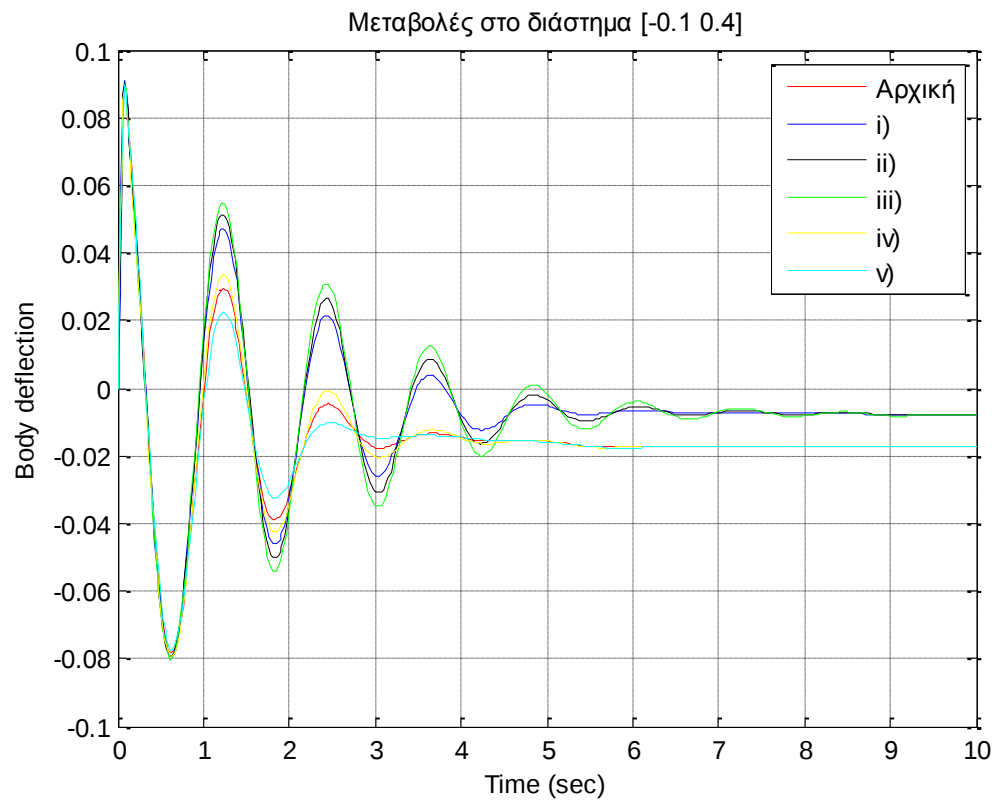
‘yellow line’ για την iv).

‘cyan line’ για την v).

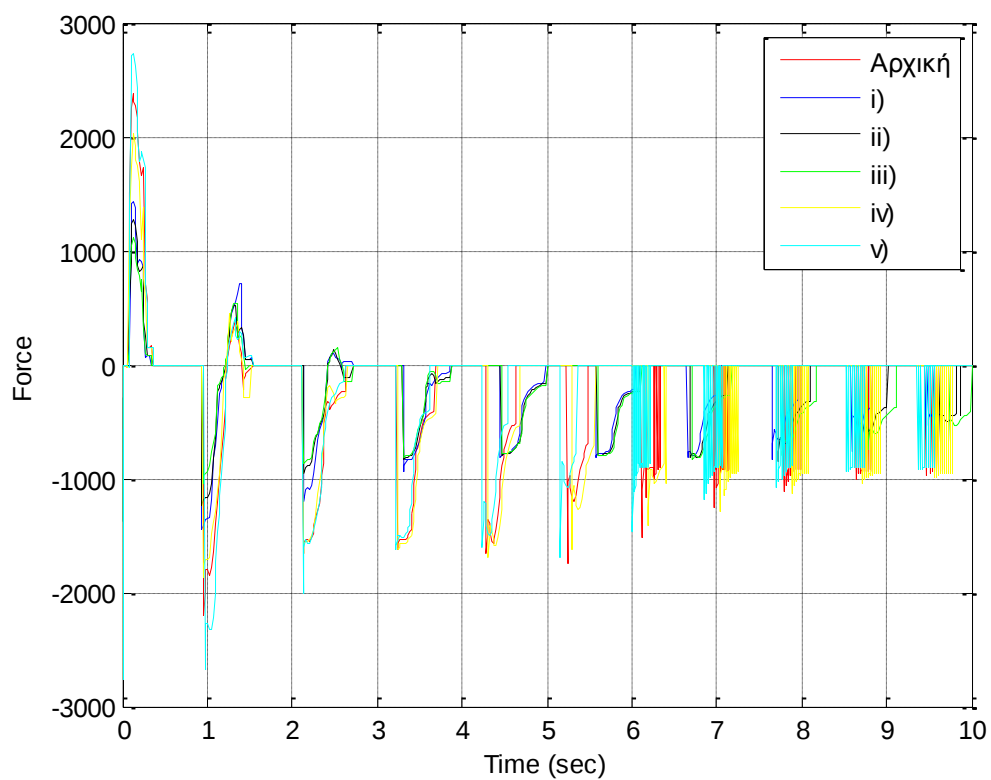
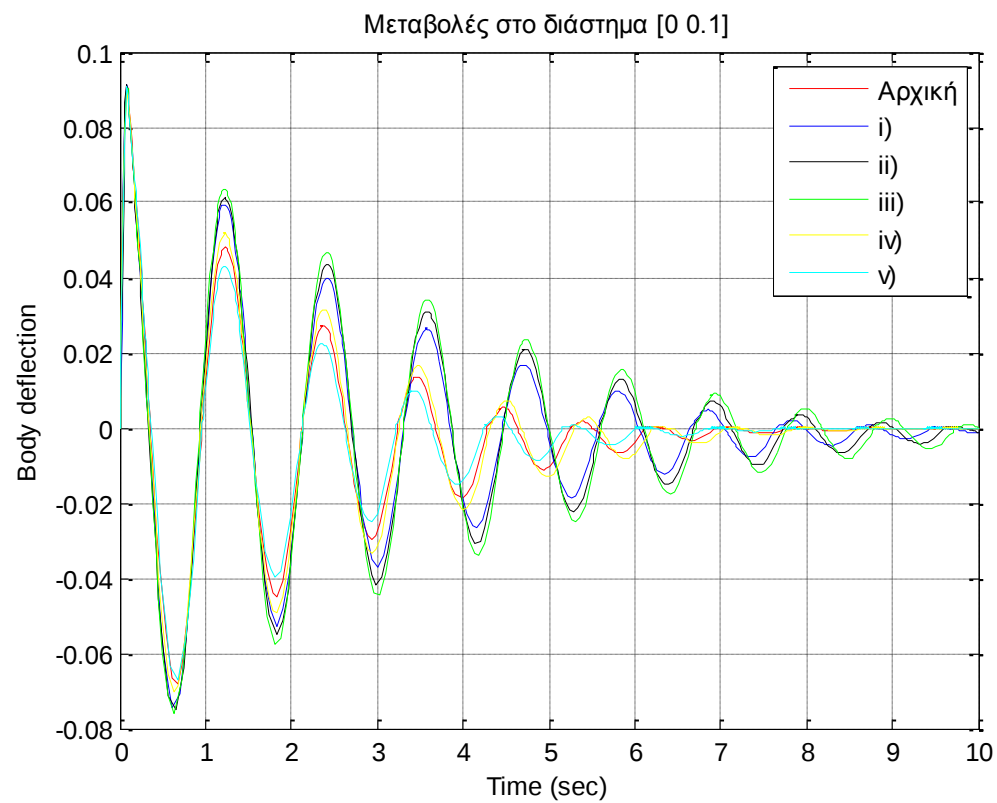
ώστε να επιτυγχάνεται ορθά η διακριτοποίηση και η σύγκριση των καμπυλών τόσο στα ομοειδή διαστήματα `body_deflection` όσο και στα ανόμοια. “Αρχική κατάσταση” είναι η βέλτιστη λύση που πρόέκυψε συγκρίνοντας το σύστημα κλειστού βρόγχου με ελεγκτή PID και τα υπερσύνολα αναφοράς τους ασαφούς ελεγκτή.

Στην συνέχεια και μέσα από τη διαδικασία που περιγράψαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, εξάγαμε μέσω του Matlab τα γραφήματα (`Body_deflection` vs `time`) και (`Force` vs `time`), τα οποία και παρατίθενται παρακάτω αναλυτικά.

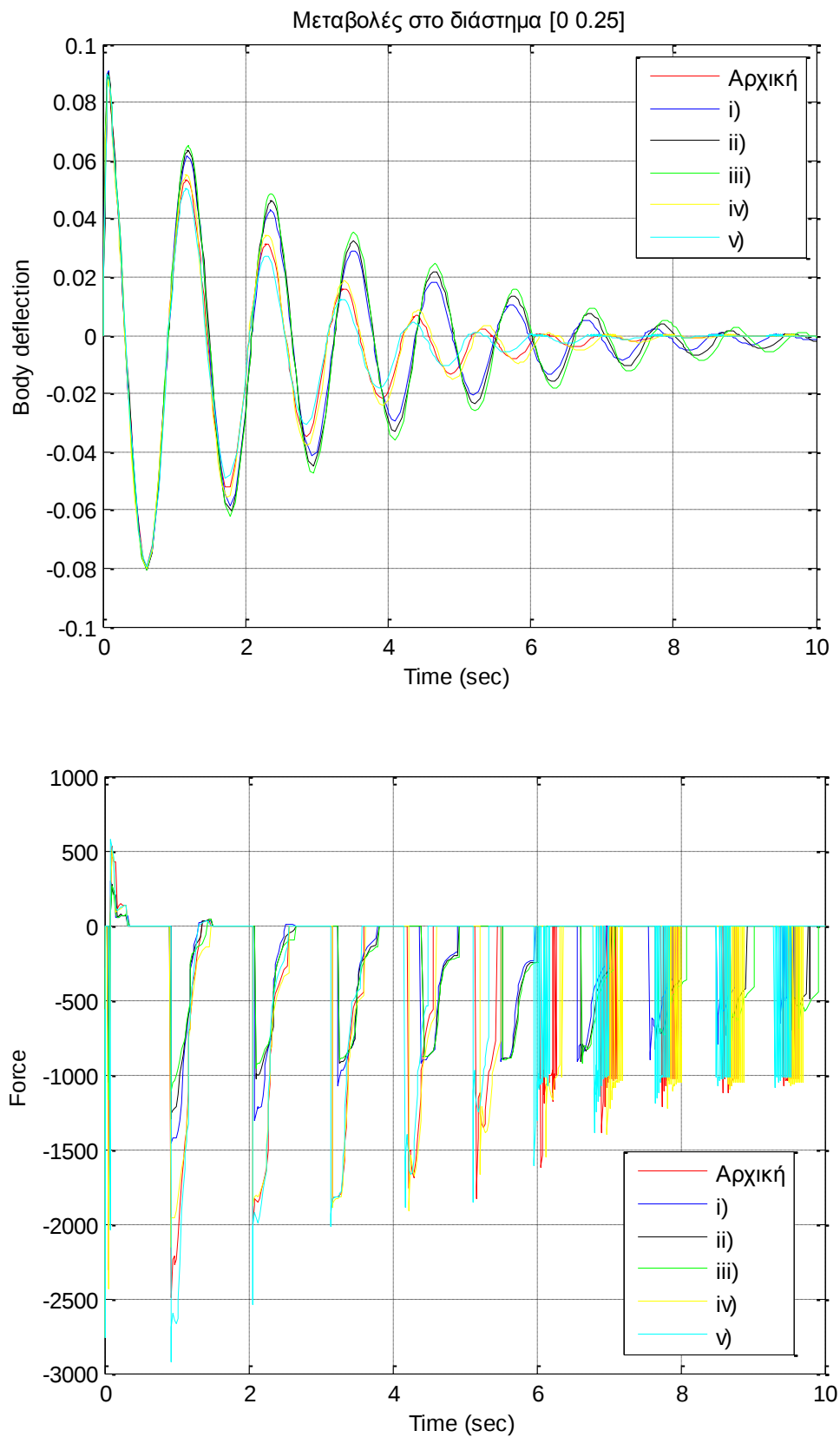
1.1.1)



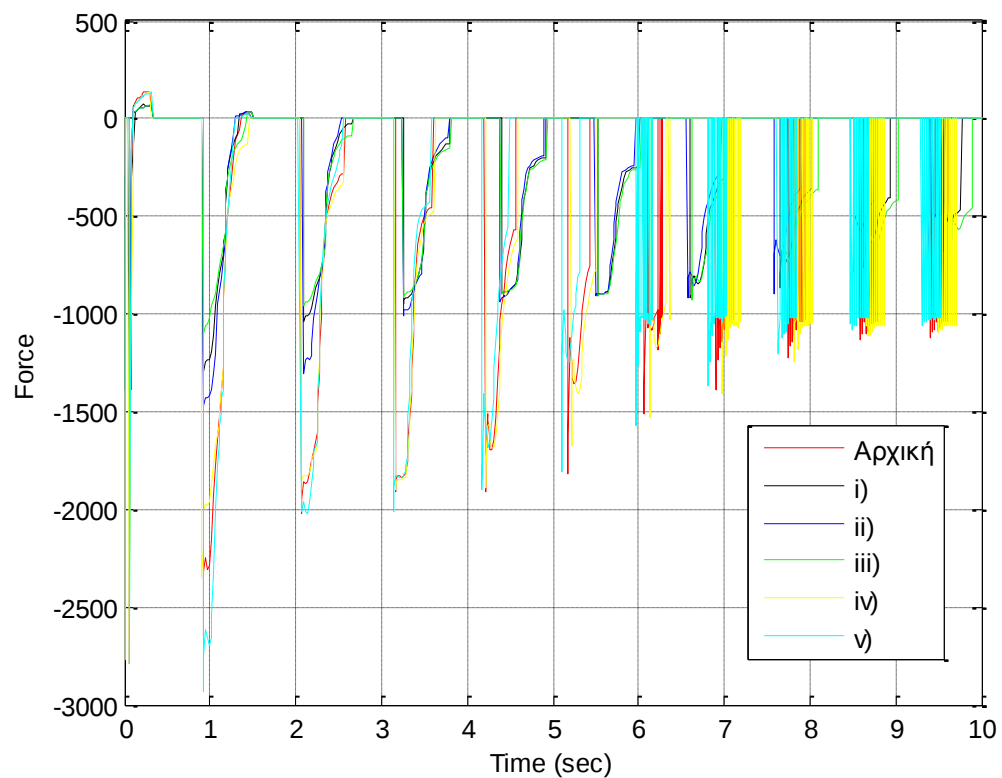
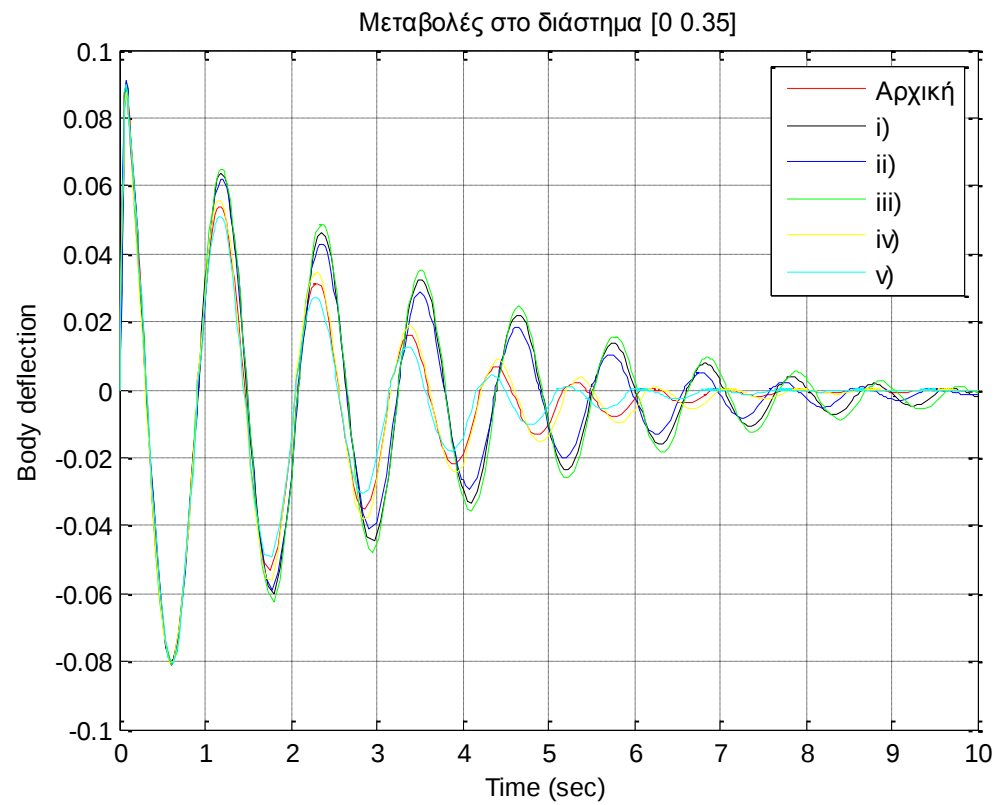
1.1.2)



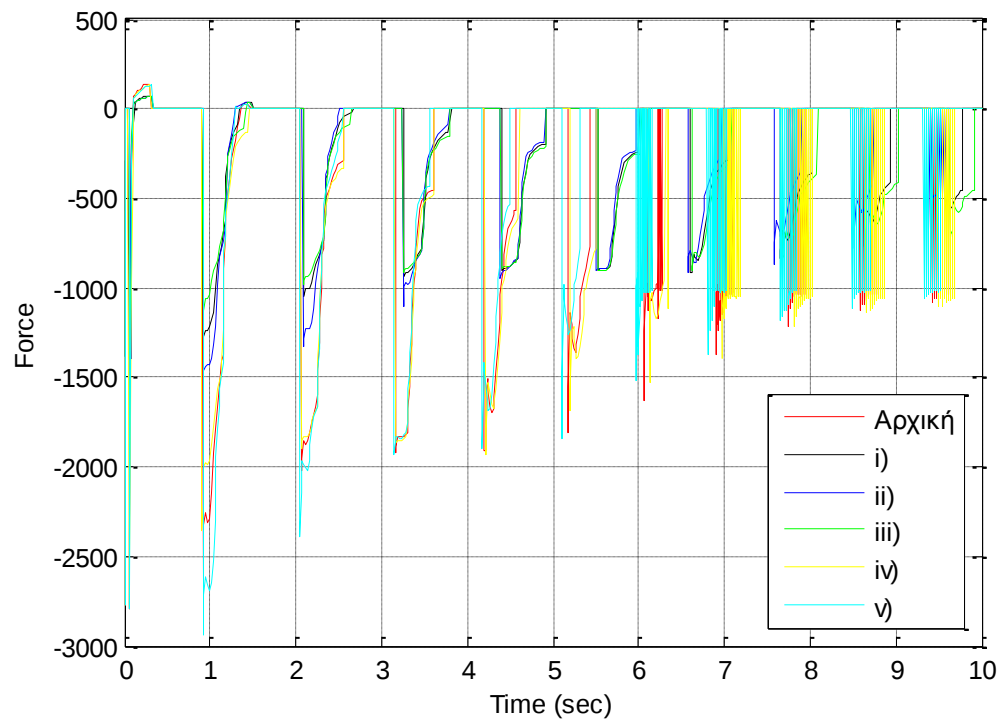
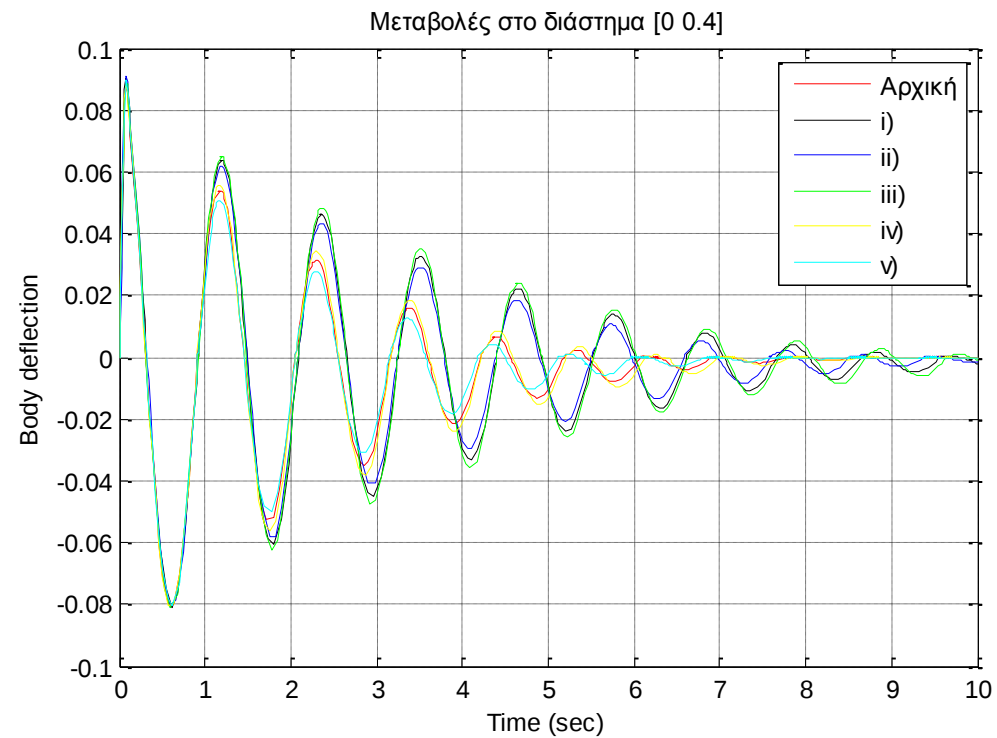
1.1.3)



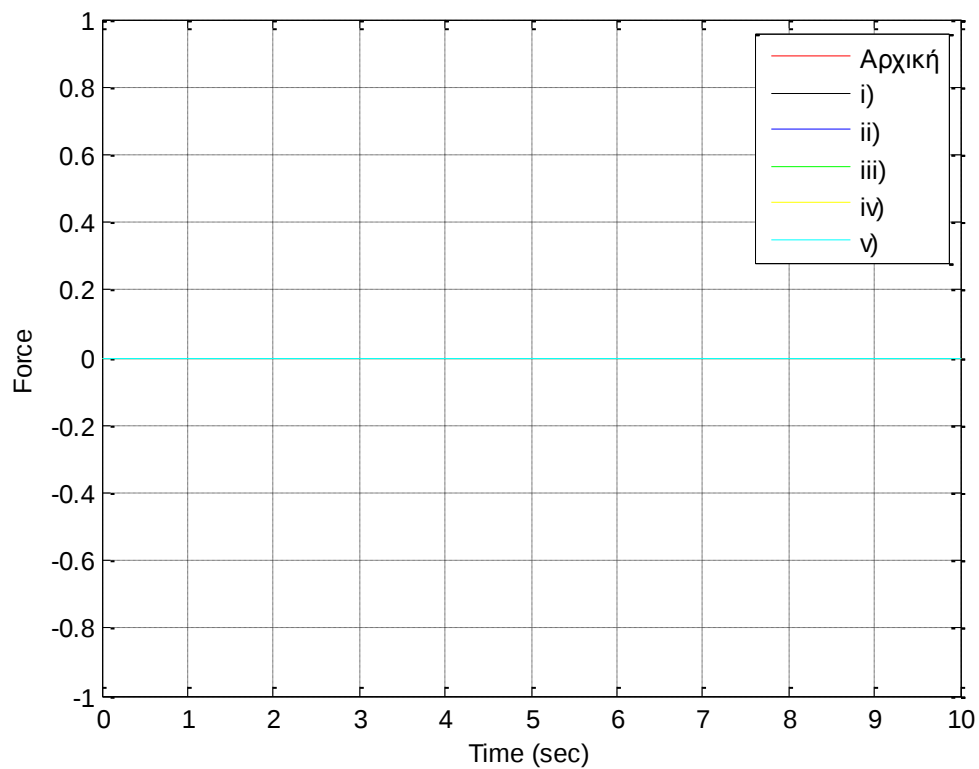
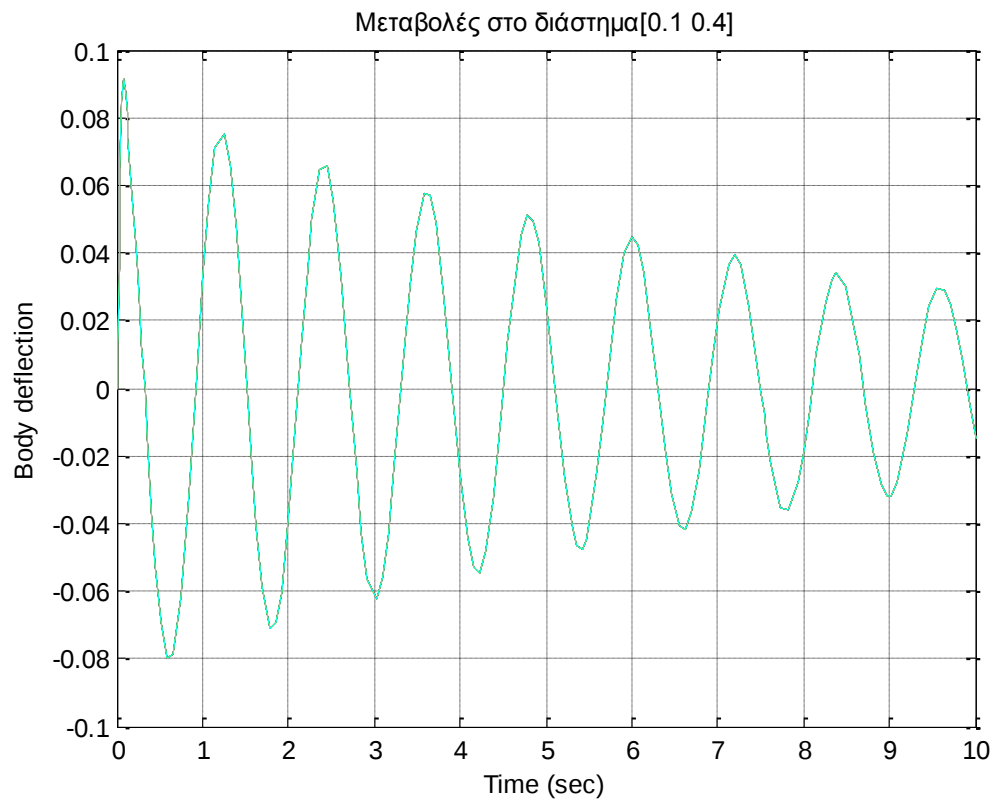
1.1.4)



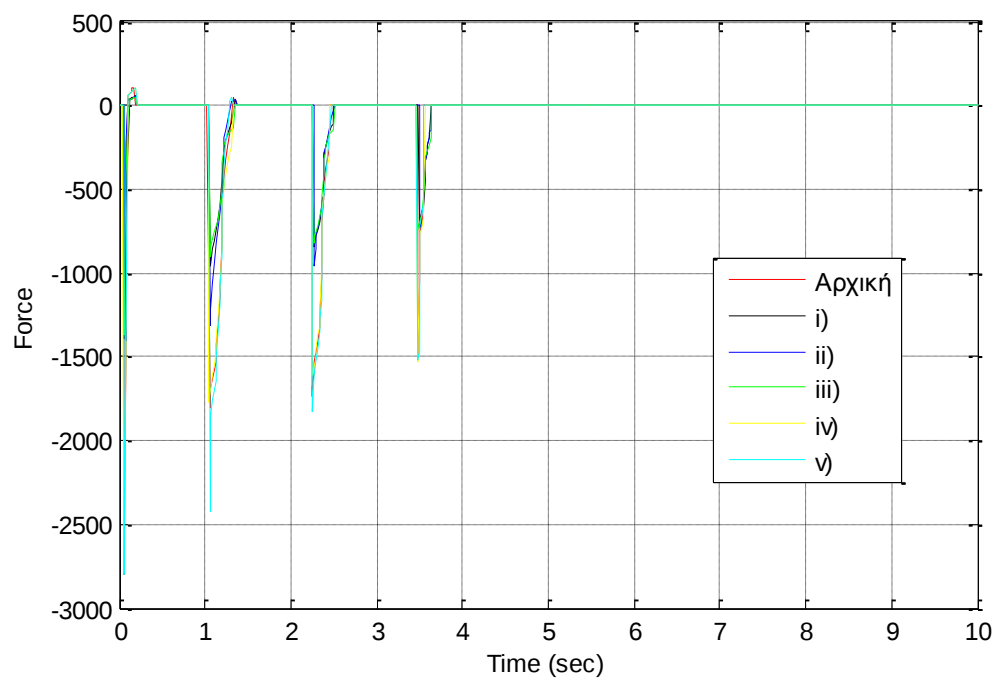
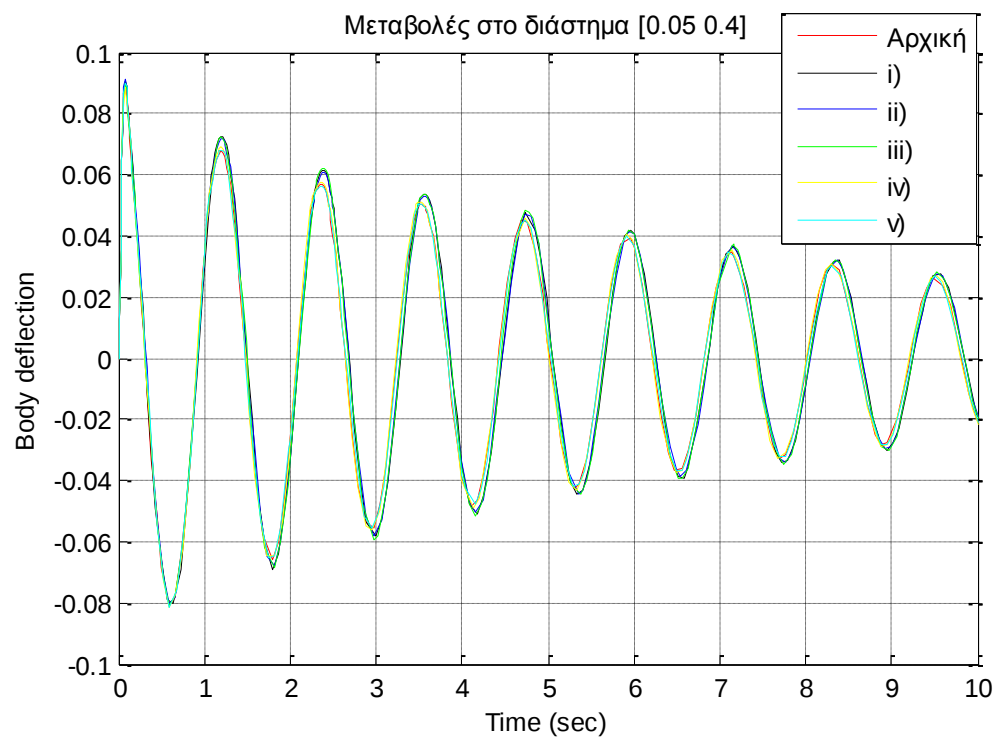
1.1.5)



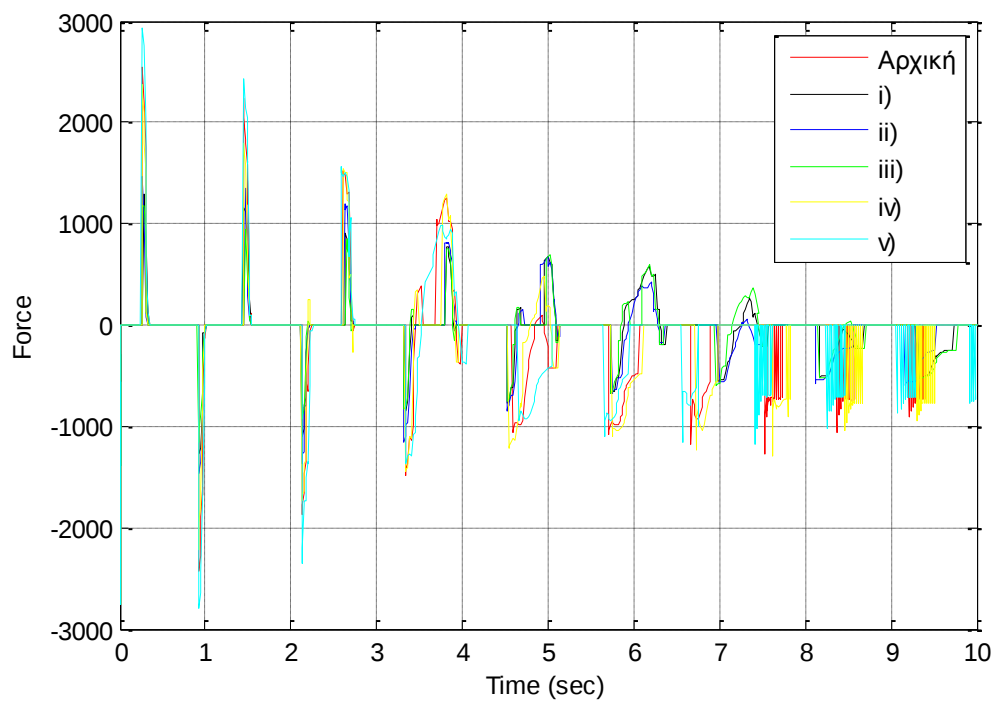
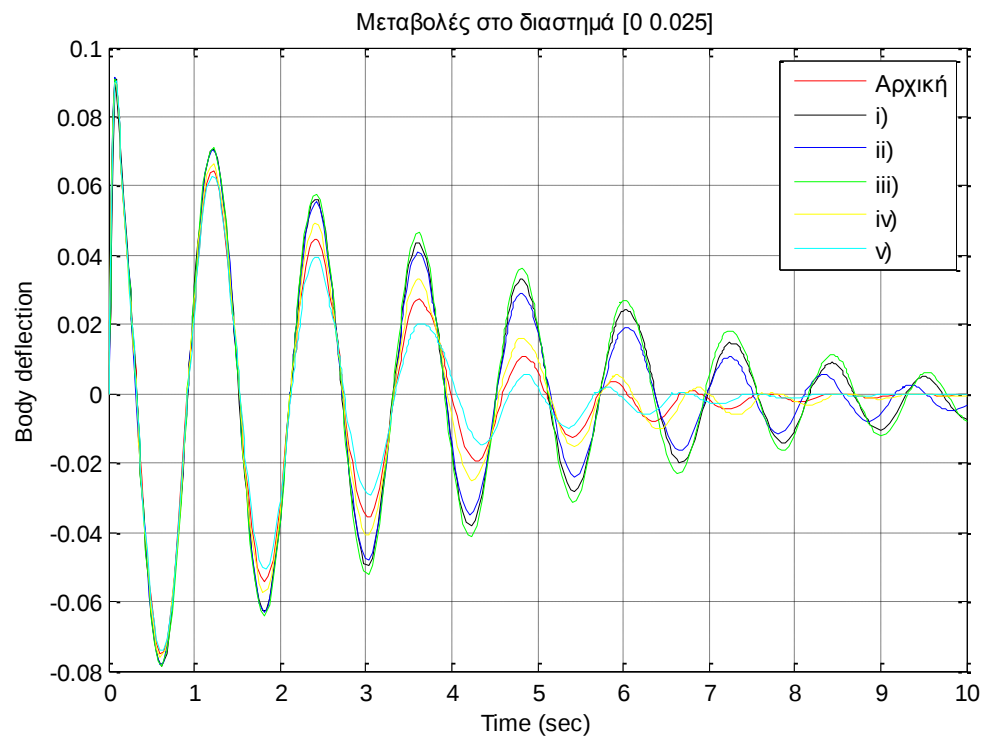
1.1.6)



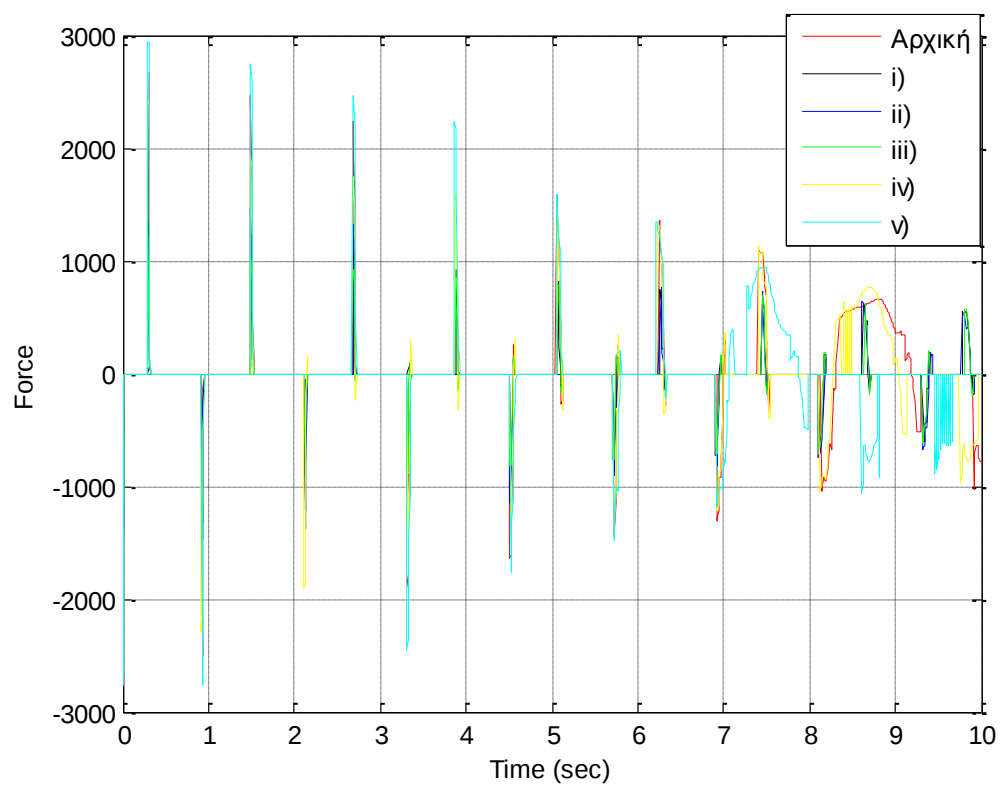
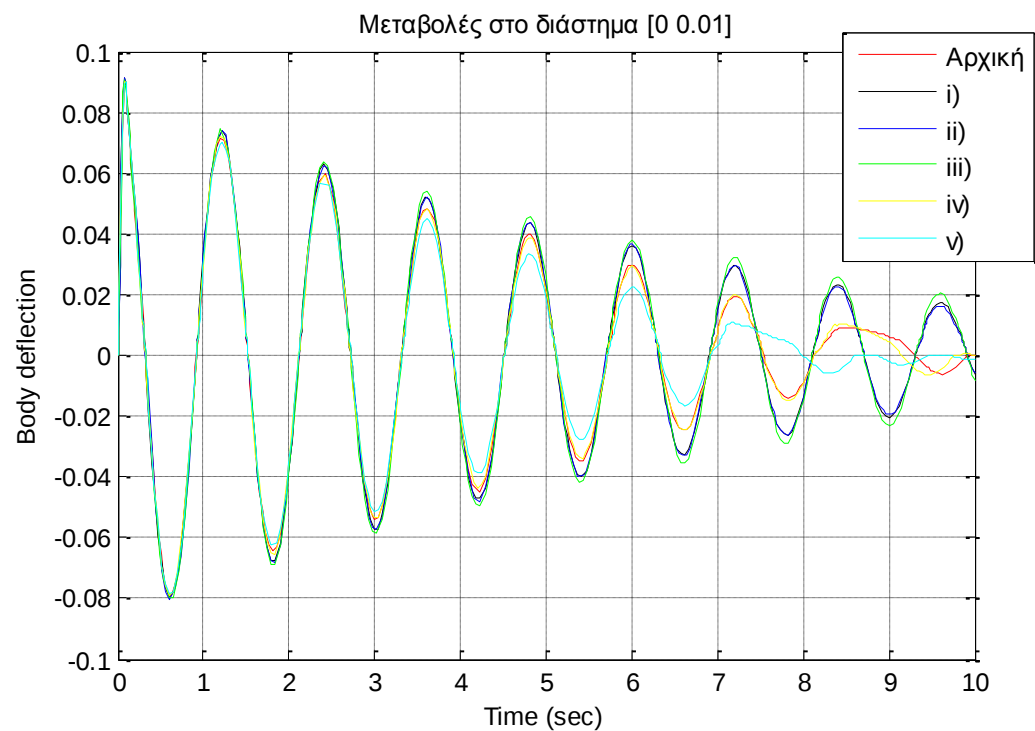
1.1.7)



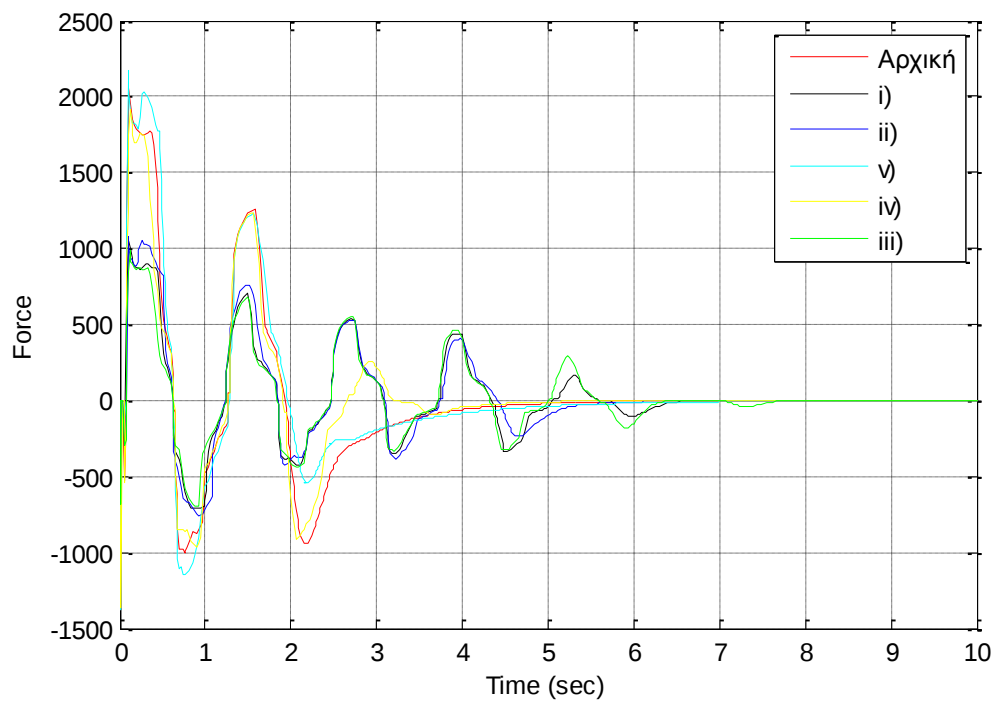
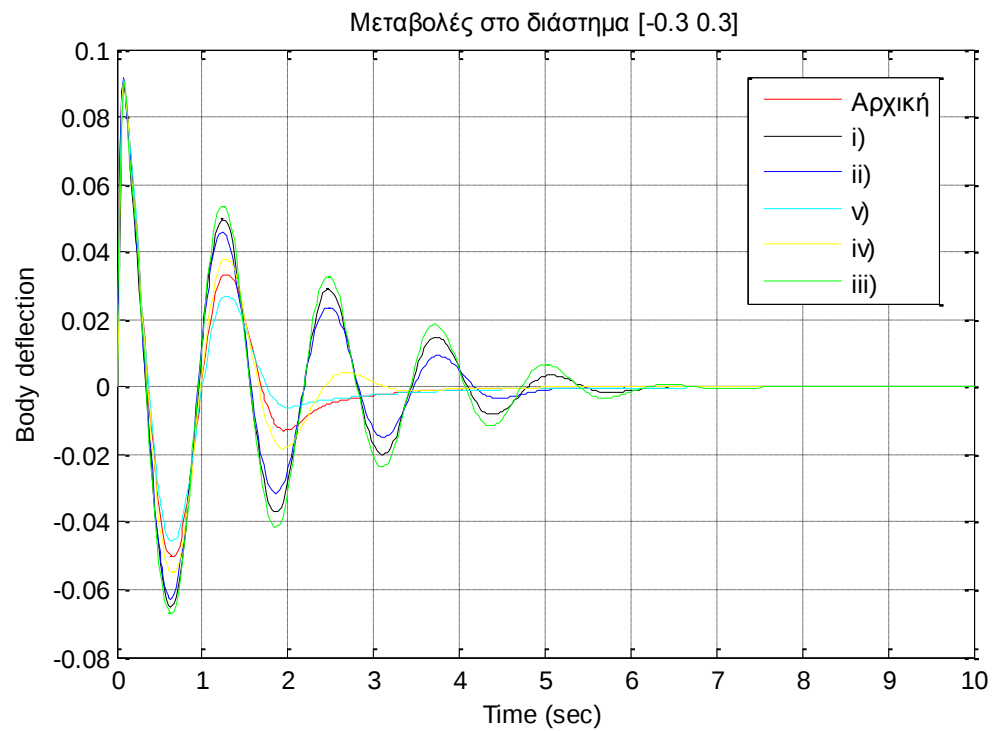
1.1.8)



1.1.9)



1.1.10)



- Γενικά σε όλα τα γραφήματα παρατηρούμε ότι πιο γρήγορα σταθεροποιείται η 'cyan line' δηλαδή η ν) διερεύνηση, ανεξαρτήτως του διαστήματος body_deflection που μελετάμε, όπου στη ν) διερεύνηση έχουμε το μικρότερο εύρος διαστημάτων και τις χαμηλότερες ακραίες τιμές αυτών.
- Επίσης το αρχικό εύρος της ταλάντωσης και για τις 6 διερευνήσεις είναι περίπου στα 0.18mm.
- Η αρχική διερεύνηση μαζί με τις iv) και ν) από κάποιο χρονικό διάστημα και έπειτα ομογενοποιούνται. Το ίδιο ισχύει και για τις i), ii) και iii).
- Μόνο για τα διαστήματα [-0.1 0.4] και [-0.3 0.3] body_deflection του ασαφούς ελεγκτή που μελετάμε, έχουμε σταθεροποίηση για τις διερευνήσεις i), ii) και iii) δηλαδή πρέπει στην είσοδο του ελεγκτή να εισάγουμε και αρνητική φόρτιση. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις οι διερευνήσεις αυτές, κρίνονται ως μη ικανοποιητικές.
- Η καμπύλη του διαστήματος [0.1 0.4] ισχύει και στις περιπτώσεις των διαστημάτων [0.2 0.5] και [0.2 0.4]. Κατά την παραμετροποίηση σε body deflection, μεταβάλλοντας ταυτόχρονα τόσο την velocity όσο και τον actuator, έχουμε ταύτιση των αντίστοιχων καμπυλών $(x, y) = (time=10s, body deflection)$. Ελάχιστη μεταβολή παρατηρείται μόνο στην περίπτωση του διαστήματος [0.05 0.4]. Προφανώς για τιμές < 0.05 η αναφερόμενη μεταβολή θα αυξάνεται.
- Στα γραφήματα ασκούμενων δυνάμεων (Force vs Time) παρατηρείται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις έχουμε μεγαλύτερο αρχικό εύρος ταλάντωσης από την 'cyan line'.
- Η ασκούμενη δύναμη, κινείται κυρίως σε διαστήματα αρνητικών τιμών.

- Μόνο για τα γραφήματα των περιπτώσεων 1) και 10) έχουμε μέσα στο χρονικό διάστημα προσομοίωσης $t=10\text{sec}$ σταθεροποίηση του γραφήματος ασκούμενων δυνάμεων.

2^η Ομαδοποίηση

Για τα διαστήματα $[-0.3 \ 0.3]$, $[-0.1 \ 0.4]$, $[0 \ 0.4]$, $[0 \ 0.1]$, $[0 \ 0.025]$, $[0 \ 0.01]$ `body_deflection` τα ομαδοποιούμε για κάθε μία από τις 6 διερευνήσεις. Επιλέξαμε αυτά τα 6 διαστήματα διότι τα υπόλοιπα είτε ταυτίζονται είτε σταθεροποιούνται σε ελάχιστες περιπτώσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στο μοντέλο του Simulink. Τα διαστήματα αυτά παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από πλευράς αποτελεσμάτων όπως αποδείχθηκε κατά την 1^η Ομαδοποίηση.

Κάθε χρώμα καμπύλης στα παρακάτω γραφήματα συμβολίζει διάστημα και η αντιστοιχία έχει ως εξής:

‘red line’ για το $[-0.3 \ 0.3]$

‘black line’ για το $[-0.1 \ 0.4]$

‘blue line’ για το $[0 \ 0.4]$

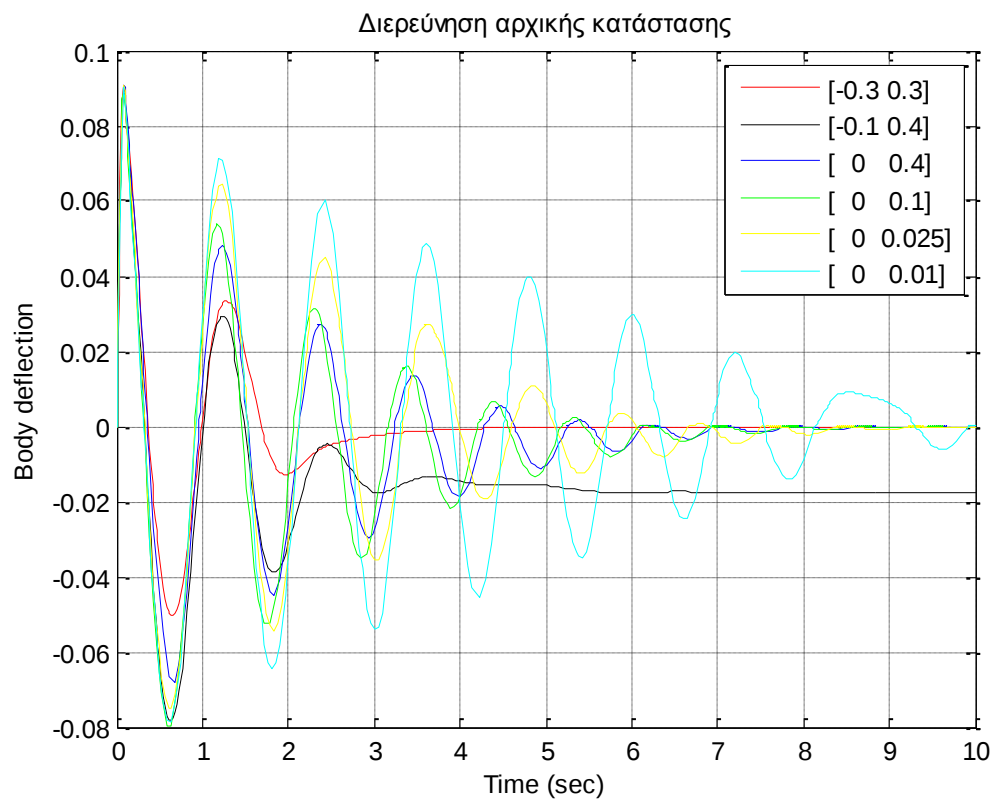
‘green line’ για το $[0 \ 0.1]$

‘yellow line’ για το $[0 \ 0.025]$

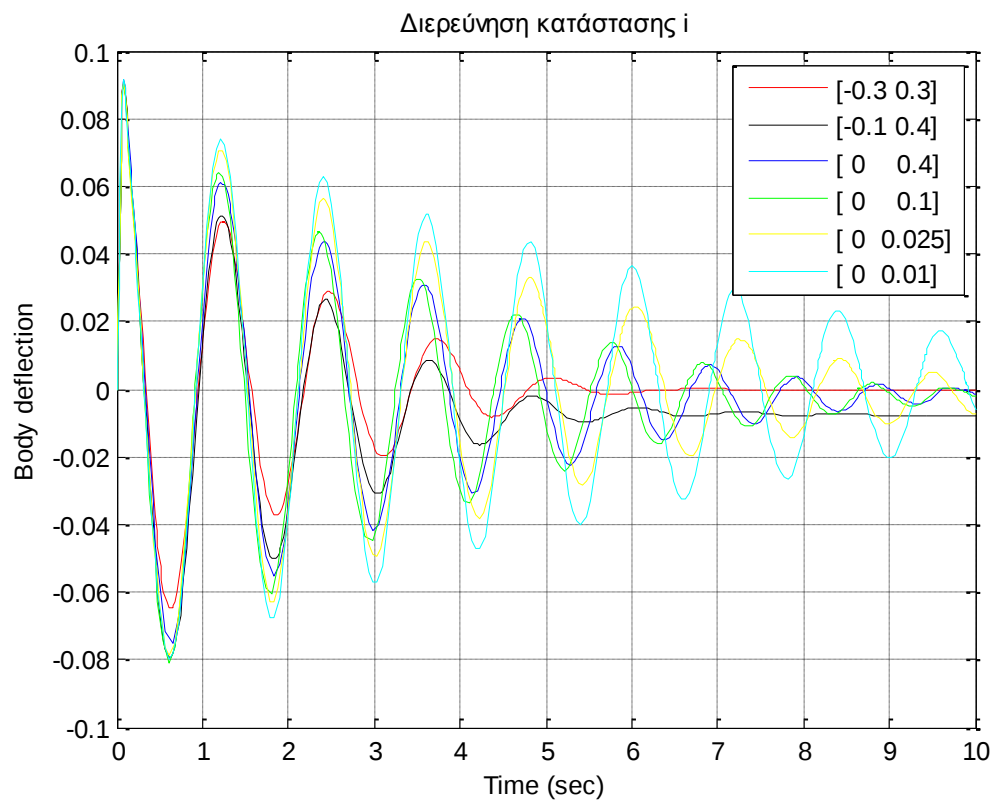
‘cyan line’ για το $[0 \ 0.01]$

Ακολουθώντας την παρόμοια διαδικασία παίρνω για τις διερευνήσεις τα παρακάτω γραφήματα:

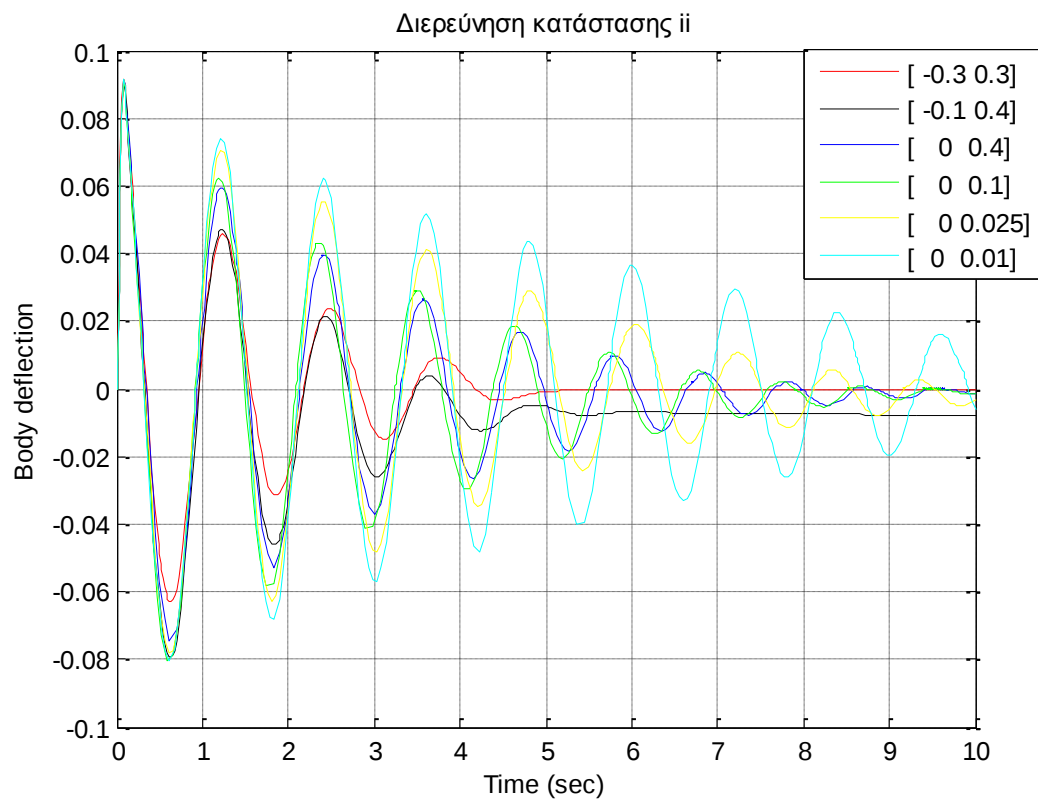
1.2.1)



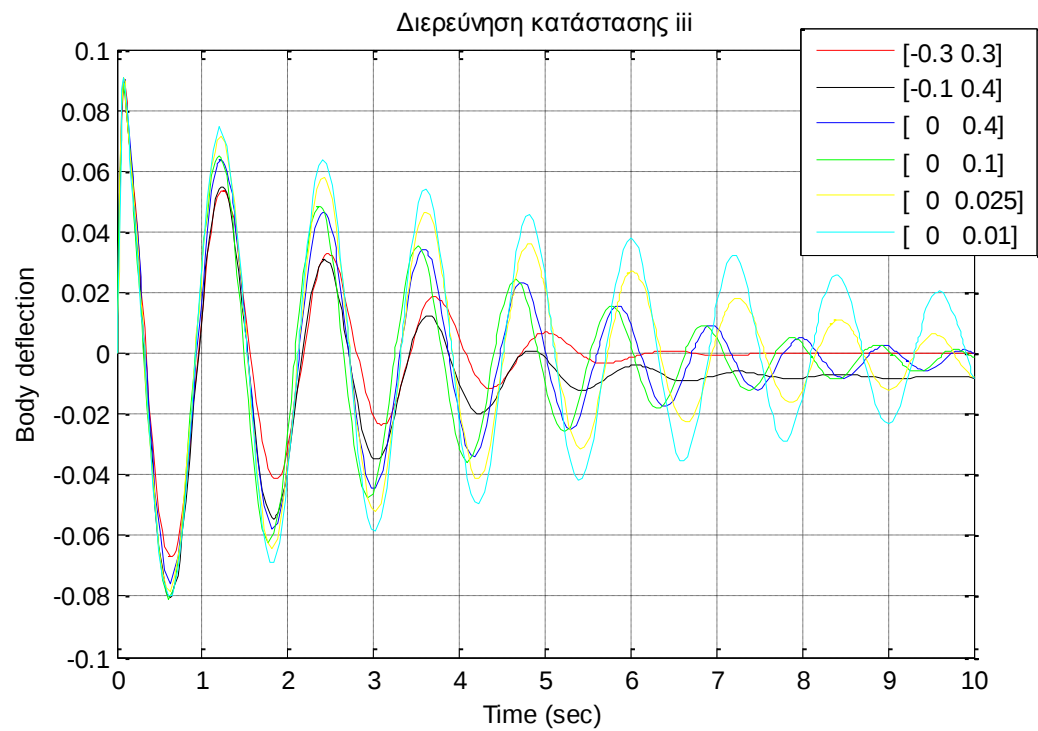
1.2.2)



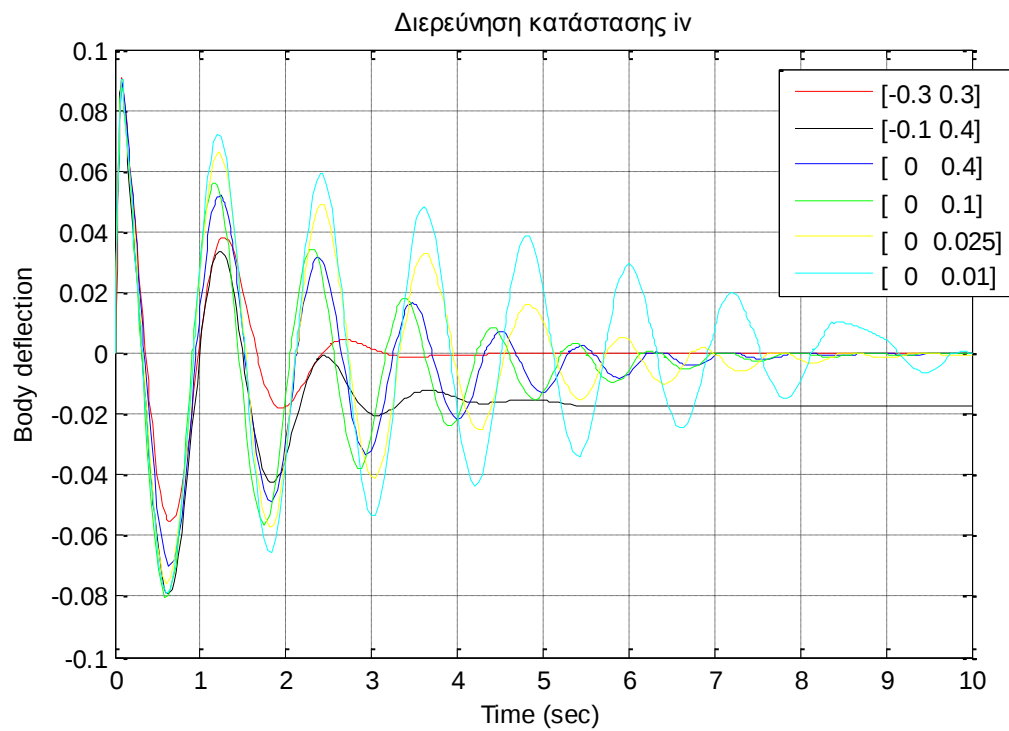
1.2.3)



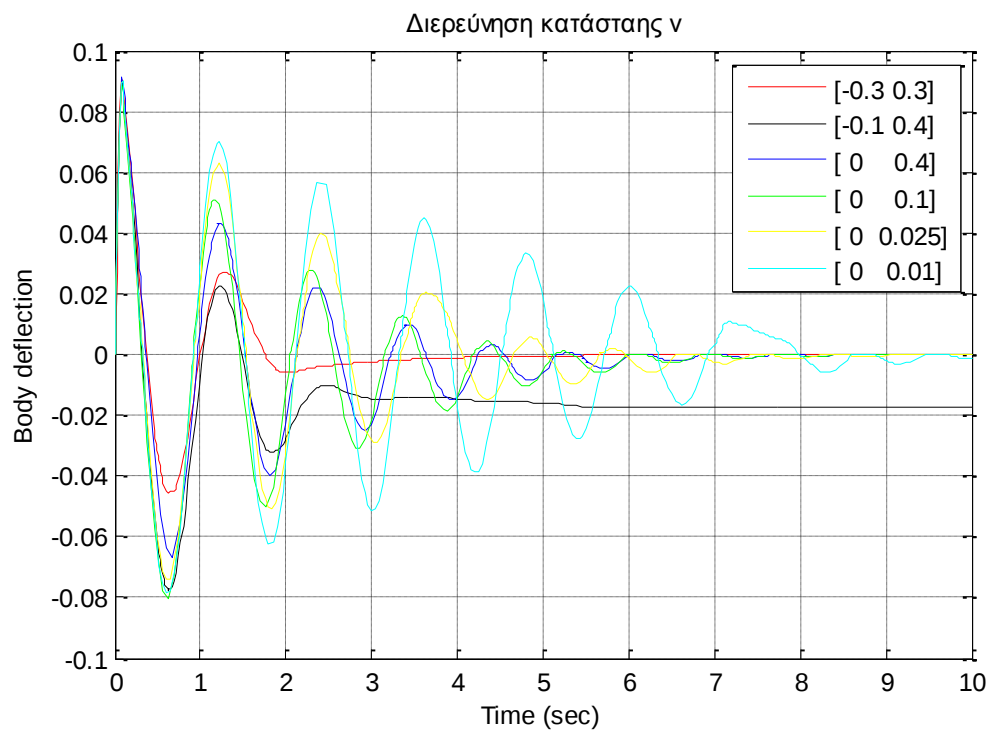
1.2.4)



1.2.5)



1.2.6)



Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση σταθεροποιείται πρώτα η 'red line' δηλαδή το διάστημα [-0.3 0.3]. Επίσης η σταθεροποίηση του διαστήματος [-0.1 0.4] γίνεται και αυτή γρήγορα αλλά βλέπουμε ότι και μετά το πέρας των 10s ο επιβάτης εκτρέπεται από την θέση του περίπου κατά -0,02 για τις περιπτώσεις 1.2.1), 1.2.5) και 1.2.6). Το αν αυτή η σταθεροποίηση κρίνεται ικανοποιητική εξαρτάται από το ποσοστό επί της % απόκριση του body_deflection ελεγκτή με τη διαταραχή που βρίσκει για το υπό επεξεργασία μοντέλο. Τέλος γρηγορότερη σταθεροποίηση για όλα τα διαστήματα έχουμε όταν αυτά βρίσκονται στην κατάσταση <<dierevnisi n>> όπου όπως αναφέραμε έχουμε τα μικρότερα εύρη διαστημάτων και τις μικρότερες ακραίες τιμές.

2^η Διερεύνηση

Θέλουμε να ελέγξουμε την απόκριση του συστήματος ενεργών αναρτήσεων σε περίπτωση μεταβολής των Σταθερών ελατηρίου, k_1 και k_2 , διατηρώντας τους υπόλοιπους όρους του συστήματος σταθερούς. Ο k_1 είναι η Σταθερά ελατηρίου συστήματος ανάρτησης και η τιμή του είναι $(k_1)=80000$ N/m, ενώ ο k_2 είναι η Σταθερά ελατηρίου συστήματος τροχού & ελαστικού και η τιμή του είναι $(k_2) = 500,000$ N/m. Τον έλεγχο τον κάνουμε, στη βάση του ασαφούς ελεγκτή, που μας δίνει τη βέλτιστη μέτρηση χρόνου σταθεροποίησης του συστήματος ενεργών αναρτήσεων. Τα διαστήματα που μας δίνουν την μέτρηση αυτή είναι:

$$\text{body_deflection} = [-0.3 \ 0.3]$$

$$\text{body_velocity} = [-0.8 \ 0.8]$$

$$\text{body_acceleration} = [-0.12 \ 0.12]$$

$$\text{Actuator} = [-7500 \ 7500]$$

Διατηρώντας λοιπόν, σταθερούς τους υπόλοιπους όρους του συστήματος ενεργών αναρτήσεων και εισάγοντας τα παραπάνω διαστήματα στον ασαφή

μας ελεγκτή, τρέχουμε το σύστημα ενεργών αναρτήσεων στο περιβάλλον της Matlab μεταβάλλοντας τους όρους (κ_1) και (κ_2). Οι μεταβολές που πραγματοποιήσαμε παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

	κ_1	κ_2
1)	80.000	160.000
2)	80.000	840.000
3)	16.000	160.000
4)	16.000	500.000
5)	144.000	500.000
6)	0	500.000
7)	80.000	0
8)	80.000	80.000
9)	80.000	330.000
10)	80.000	670.000
11)	112.000	500.000
12)	48.000	500.000
13)	64.000	600.000
14)	96.000	400.000
15)	56.000	650.000
16)	104.000	350.000
17)	112.000	300.000
18)	48.000	700.000
19)	120.000	250.000
20)	80.000	50.000
21)	80.000	30.000

Στις παραπάνω μεταβολές, κινηθήκαμε με την εξής λογική: Πραγματοποιήσαμε μεταβολές σε έναν εκ των (κ_1) και (κ_2) διατηρώντας σταθερό τον ένα και μεταβάλλοντας τον άλλον, σε τιμές μεγαλύτερες και μικρότερες των αρχικών τους.

A) Περίπτώσεις: 1, 2, 8, 9, 10, 20, 21 με το (κ_1) σταθερό.

B) Περίπτώσεις: 4, 5, 11, 12 με το (κ_2) σταθερό.

Επίσης είδαμε την λειτουργία του συστήματος στην ακραία περίπτωση μηδενισμού ενός εκ των δύο σταθερών

Γ) Περίπτώσεις: 6 και 7.

Επιπλέον είδαμε την λειτουργία του συστήματος για ισόποση ποσοστιαία (αύξηση ή μείωση) των (κ_1) και (κ_2)

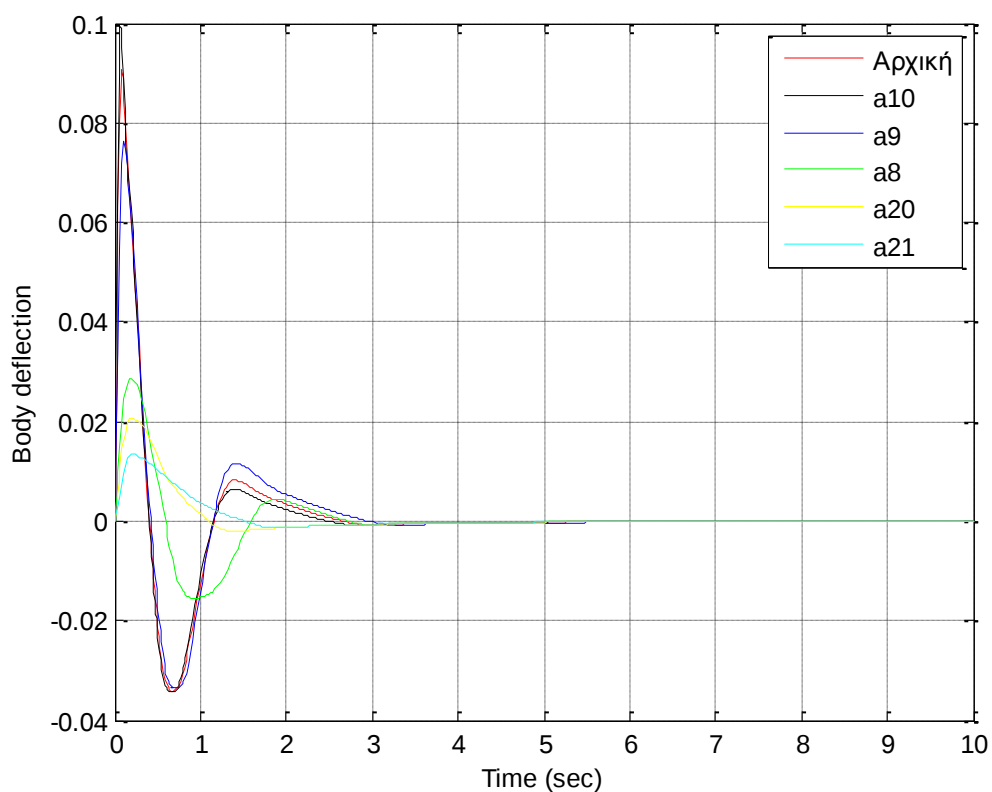
Δ) Περιπτώσεις: 13 έως 19.

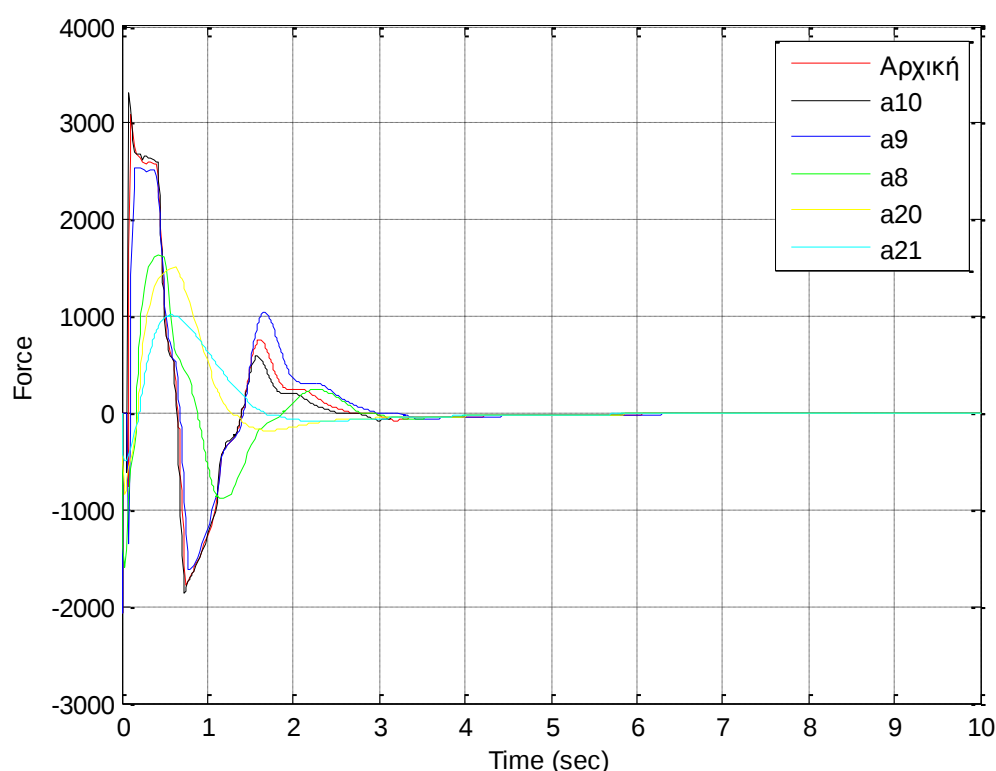
Σε όλες τις παραπάνω μεταβολές ο χρόνος προσομοίωσης είναι $t=10\text{sec}$ και οι καμπύλες που ελέγχουμε είναι οι εξής:

- i) $(x, y) = (\text{time}, \text{body_deflection})$ δηλ. το simout στο Simulink model,
- ii) $(x, y) = (\text{time}, \text{force})$ δηλ. το simout1 στο Simulink model.

Οι ομαδοποιήσεις των καμπυλών που πραγματοποιήσαμε είναι, είναι αποτέλεσμα της παραπάνω λογικής. Η βάση σύγκρισης σε κάθε ομαδοποίηση είναι η βέλτιστη αρχική καμπύλη του συστήματος αναρτήσεων. Έχουμε τις παρακάτω ομαδοποιήσεις:

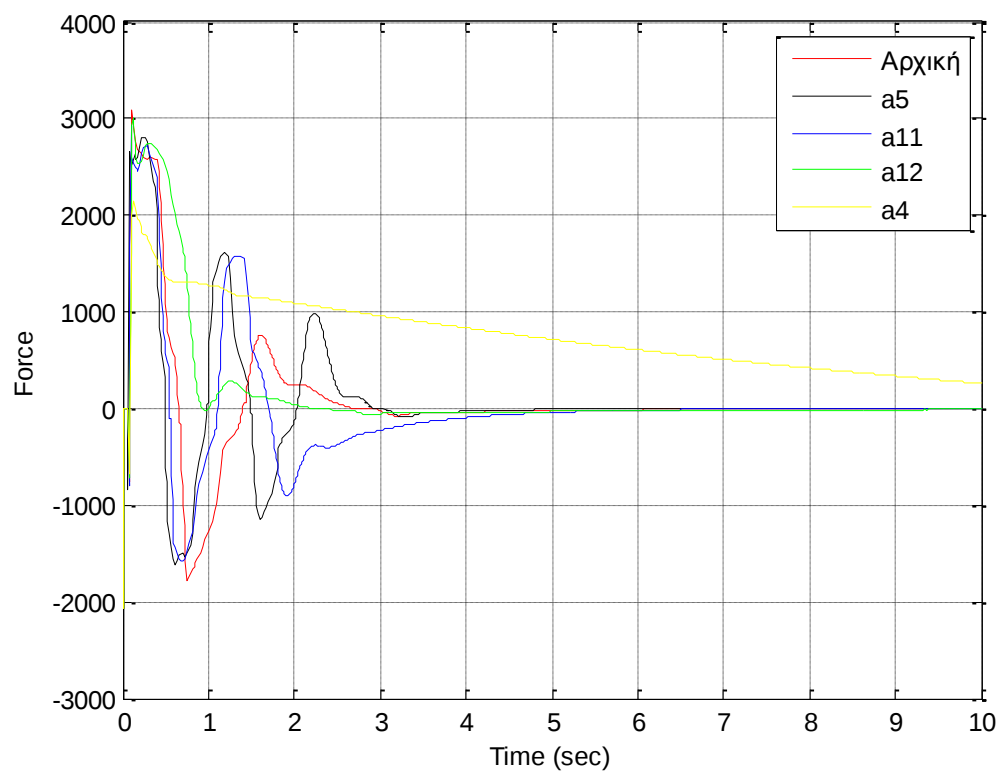
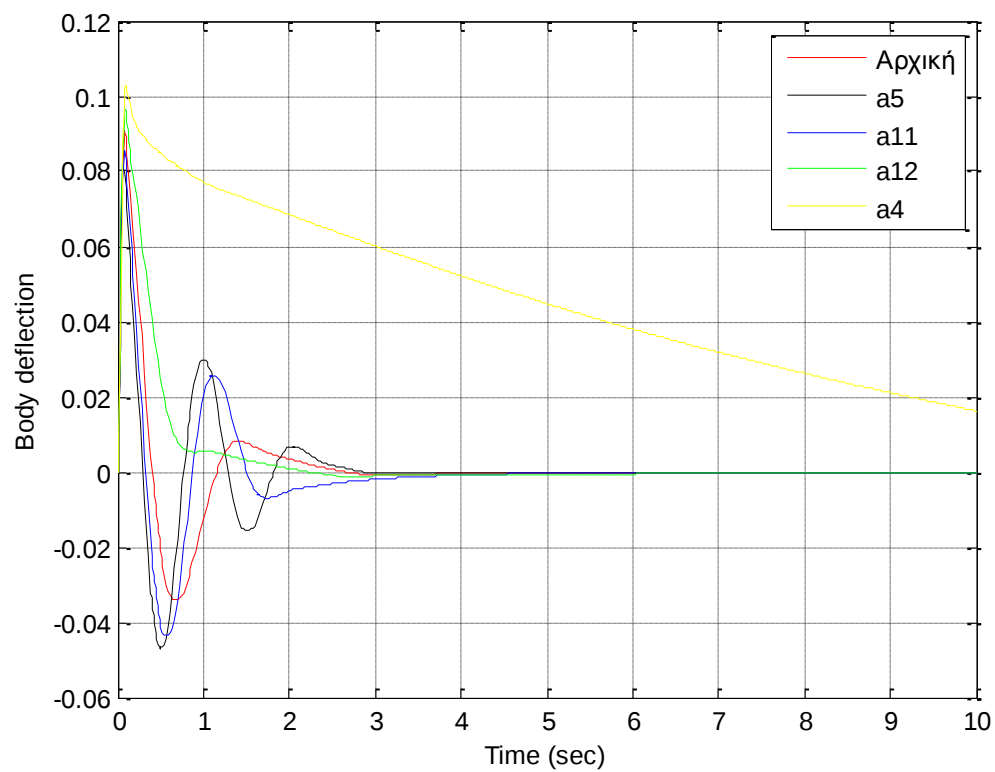
1^η Ομαδοποίηση 2.1





Έχει να κάνει με την λογική της περίπτωσης Α). Συγκεκριμένα εδώ έχουμε κρατήσει σταθερό το $(\kappa_1) = 80.000$ και μεταβάλλουμε το (κ_2) . Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση (a10) όπου $(\kappa_2) > 500.000$ (δηλαδή της αρχικής του τιμής), έχουμε το μέγιστο αρχικό εύρος ταλάντωσης και χρόνο σταθεροποίησης ελάχιστα μικρότερο της “Αρχική” καμπύλης. Για τιμές μικρότερες του αρχικού (κ_2) βλέπουμε ότι όσο το (κ_2) ελαττώνεται το αρχικό εύρος ταλάντωσης μας μειώνεται. Δεν ισχύει όμως και το ίδιο για τον χρόνο σταθεροποίησης του συστήματος μας. Έχουμε ουσιαστική διαφοροποίηση του χρόνου σταθεροποίησης συγκριτικά με την Αρχική καμπύλη μόνο όταν $(\kappa_2) \leq 50.000$ δηλαδή για τις a20 και a21. Συγκρίνοντας τις δύο αυτές καμπύλες βλέπουμε ότι η a20 έχει μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης αλλά χρονικά σταθεροποιείται πιο γρήγορα σε σχέση με την a21 κάτι που μας δείχνει ότι από ένα σημείο και μετά ($\kappa_1 < 50.000$) με την μείωση του κ_1 δεν συνεπάγεται και καλύτερος χρόνος σταθεροποίησης του συστήματος. Οι καμπύλες των περιπτώσεων a1 και a2 δεν διαφοροποιούνται με κάποιες από τις ήδη συμπεριλαμβανόμενες. Πανομοιότυπη κατάσταση παρατηρείται και στις καμπύλες (time Vs force).

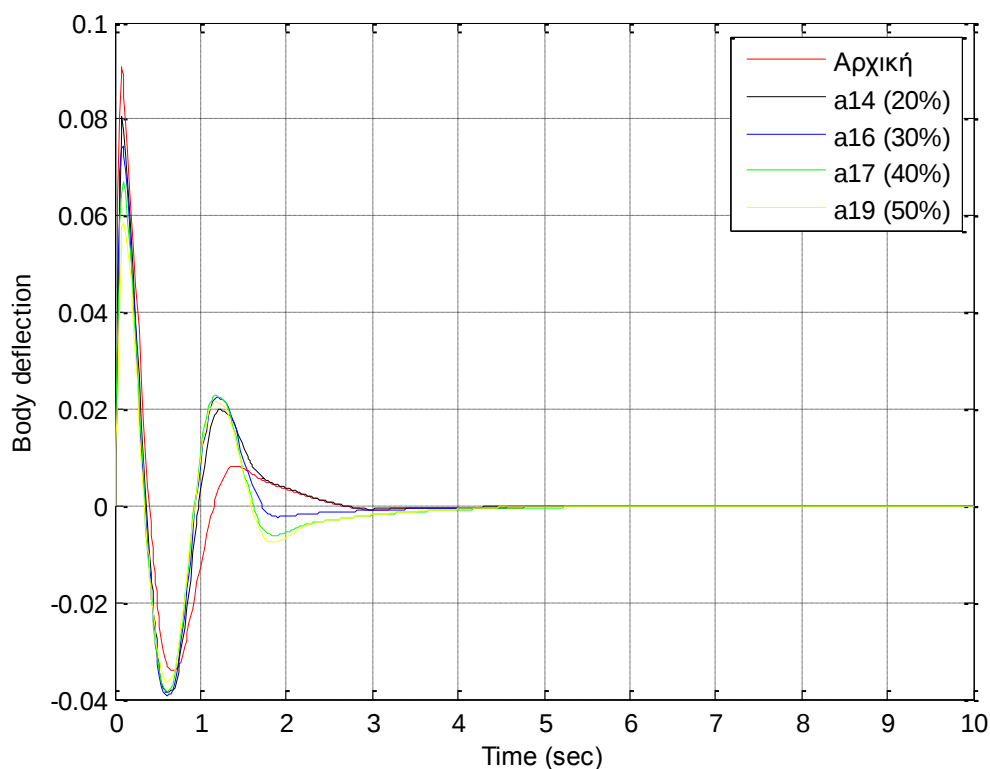
2^η Ομαδοποίηση 2.2

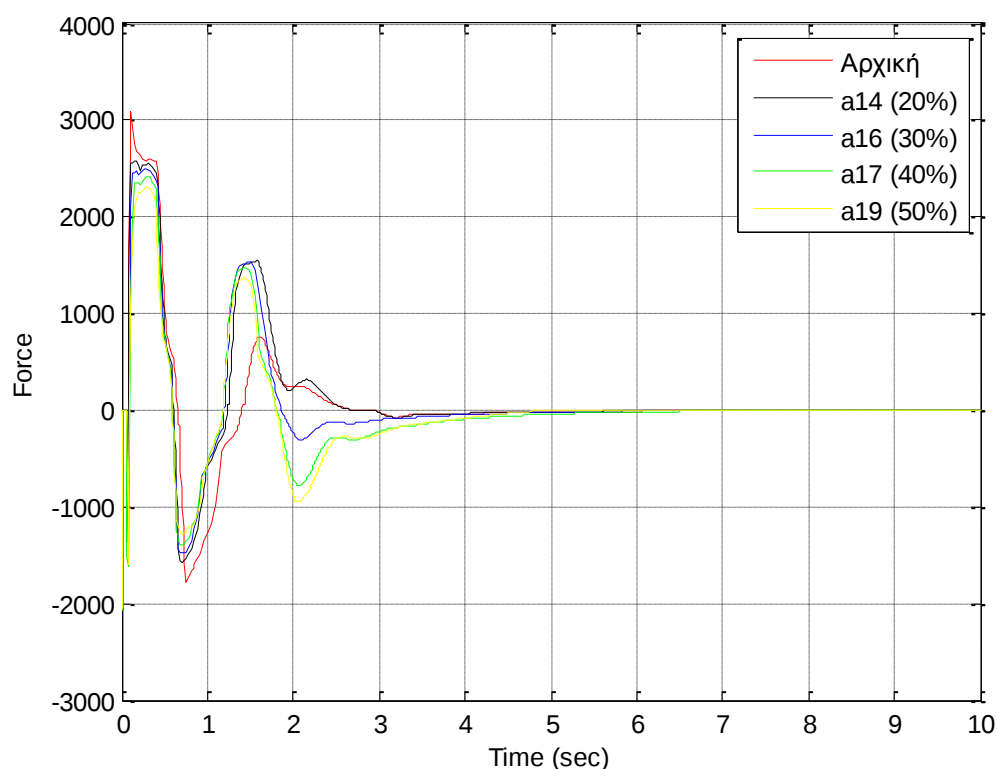


Η ομαδοποίηση αυτή, έχει να κάνει με την Περίπτωση Β). Διατηρούμε σταθερό το ($\kappa_2=500.000$) και μεταβάλλουμε το (κ_1). Για τιμές του (κ_1) ≥ 80000 , βλέπουμε ότι μεγαλώνει το εύρος της ταλάντωσης όπως και ο χρόνος σταθεροποίησης. Στην περίπτωση όπου (κ_1) < 80.000 και συγκεκριμένα στην a_{12} με (κ_2) = 48.000, έχουμε ότι το ελάχιστο εύρο ταλάντωσης και μάλιστα χωρίς να λαμβάνει αρνητικές τιμές όσο και τον ελάχιστο χρόνο σταθεροποίησης του συστήματος. Όμως για (κ_2) = 16.000 βλέπουμε ότι το σύστημα όχι μόνο δεν σταθεροποιείται μέσα στα χρονικά όρια ($t=10$ sec) αλλά εκτρέπεται σε μεγάλο βαθμό επαληθεύοντας τις διαπιστώσεις της ομαδοποίησης 2.1, για το χρόνο σταθεροποίησης του συστήματος. Όμως υπάρχει διαφοροποίηση στο εύρος ταλάντωσης στο γράφημα (body deflection vs time) όπου η καμπύλη a_{12} αν και έχει μεγαλύτερη τιμή συντελεστή (κ_2) από την a_4 , έχει μικρότερο εύρος ταλάντωσης.

Γενικά βλέπουμε διαφοροποίηση στην λειτουργία του συστήματος για μείωση ενός εκ των δύο (κ_1 και κ_2) δηλαδή στις Ομαδοποιήσεις (2.1) και (2.2).

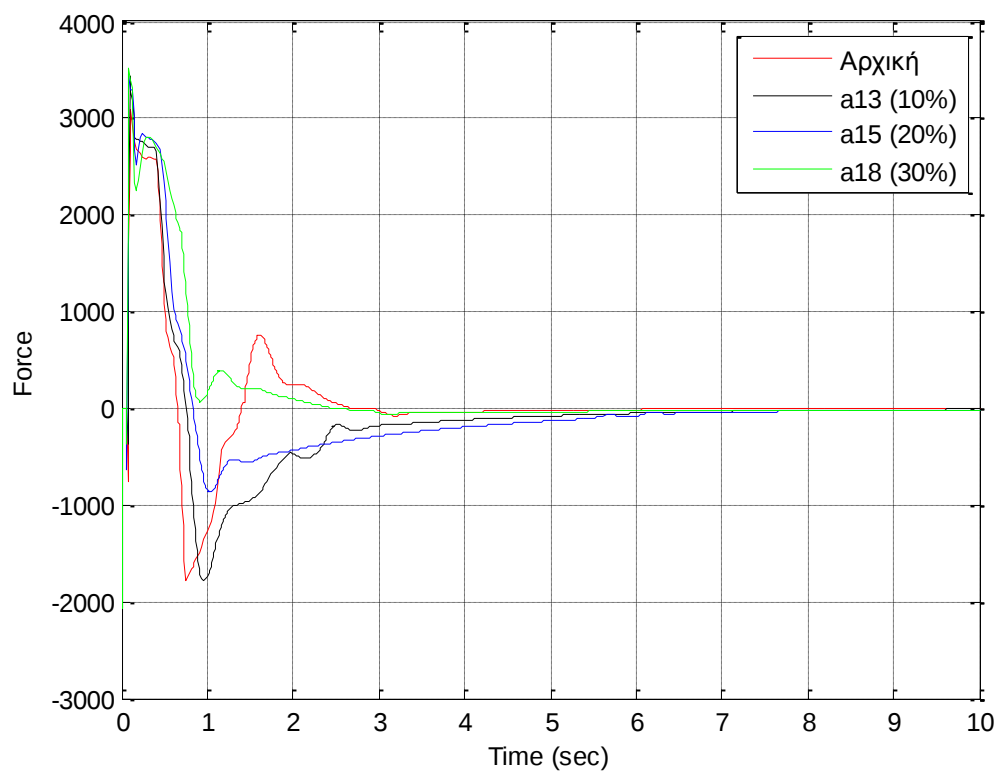
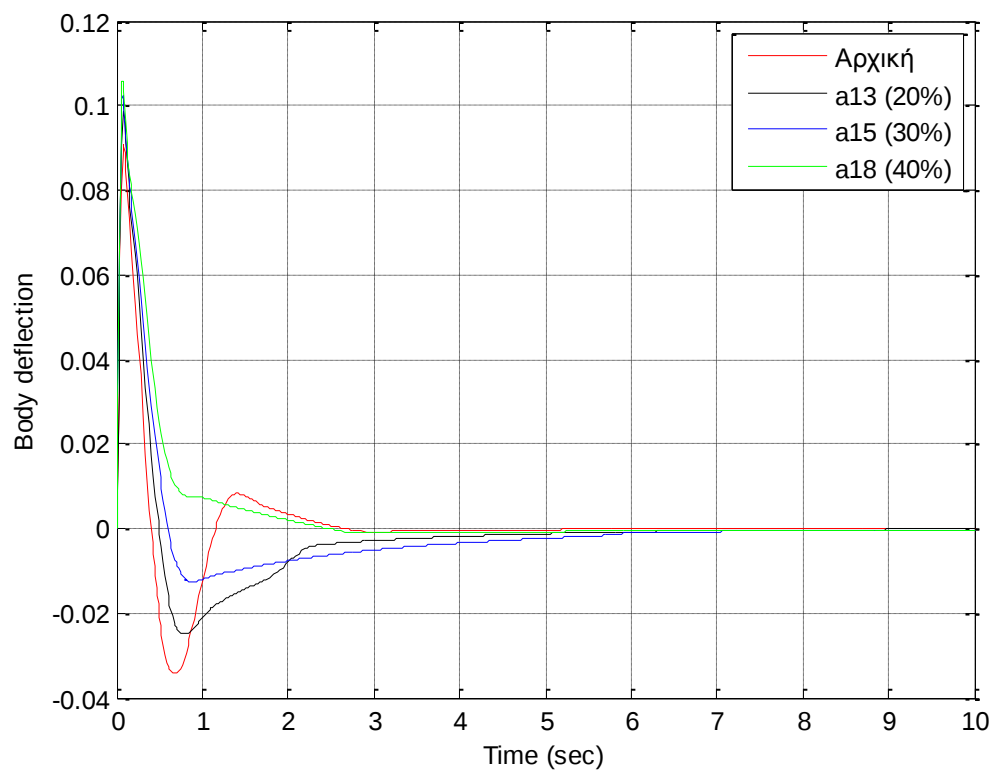
3^η Ομαδοποίηση 2.3





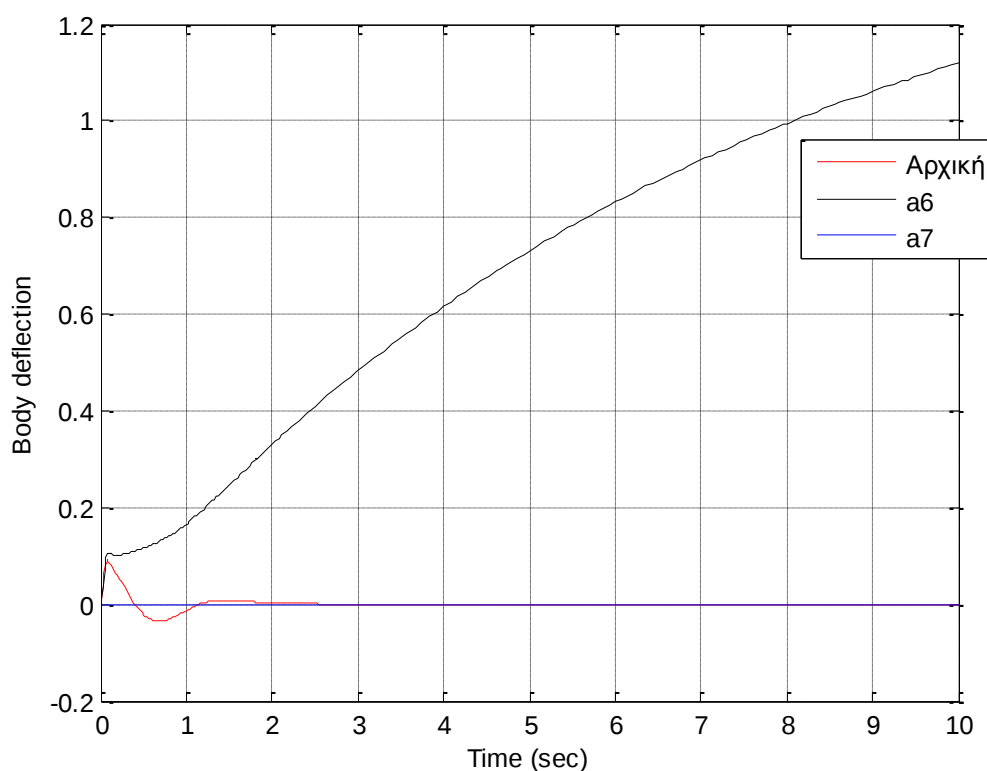
Η Ομαδοποίηση αυτή, κινείται στην λογική της περίπτωσης Δ). Συγκεκριμένα εδώ, αυξάνουμε το (κ_1) και μειώνουμε το (κ_2), ισόποσα ποσοστιαία. Έχουμε πάλι βέλτιστη λύση από την “Αρχική” καμπύλη, όταν μεταβάλλονται ποσοστιαία τα (κ_1) και (κ_2) κατά 30% τόσο στο (body_deflection vs time) όσο και στο (Force vs time) για την περίπτωση a16. Οι περεταίρω ποσοστιαίες μεταβολές των σταθερών (κ_1) και (κ_2) δίνουν μεν, μικρότερο εύρος ταλάντωσης αλλά το σύστημα μας χρονικά αρχίζει να σταθεροποιείται χρονικά σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

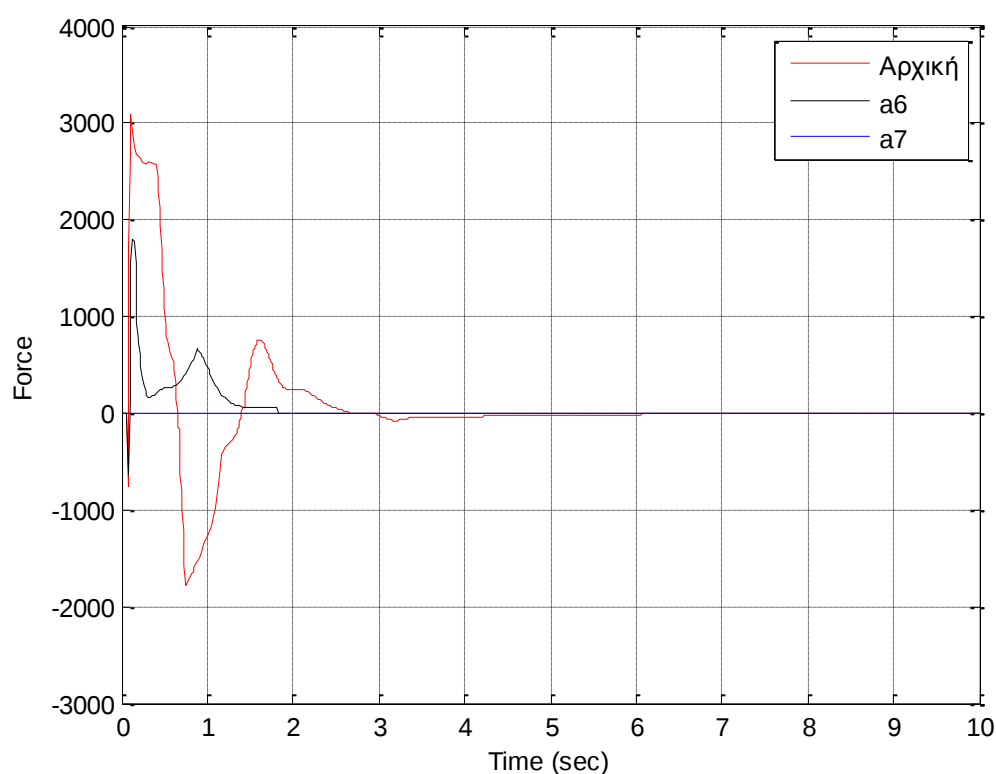
4^η Ομαδοποίηση 2.4



Πάλι κινούμαστε στην λογική της περίπτωσης Δ), μόνο που τώρα μειώνουμε το (κ_1) και αυξάνουμε το (κ_2) πάντα στο πλαίσιο της ισόποσης ποσοστιαίας μεταβολής. Εδώ έχουμε ότι όσο αυξάνεται ποσοστιαία η μεταβολή, έχουμε μείωση του αρχικού εύρους ταλάντωσης. Για μεταβολή των σταθερών κατά 40% η αρχική μας ταλάντωση μεταβάλλεται μόνο θετικά, ενώ το σύστημα μας σταθεροποιείται χρονικά όσο και προς την ασκούμενη δύναμη, ελάχιστα ως προς την “Αρχική” καμπύλη. Δεν έχουμε δηλαδή τόσο ουσιώδη συμπεράσματα όσο στην 2.3 Ομαδοποίηση που κινείται στο πλαίσιο της περίπτωσης Δ).

5^η Ομαδοποίηση 2.5





Εδώ βλέπουμε πως αντιδρά το σύστημα στις ακραίες περιπτώσεις. Είναι σαφές ότι και στις 2 περιπτώσεις έχουμε μη ανωμαλία του συστήματος ενεργών αναρτήσεων και σε καμία περίπτωση δεν είναι εφικτή η λειτουργία του μοντέλου που εξετάζουμε.

Γενικά διαπιστώνουμε ότι διερευνώντας τις τιμές των σταθερών (κ_1) και (κ_2) παίρνουμε καμπύλες (time Vs bd) και (time Vs force) βέλτιστες από την Αρχική καμπύλη. Όμως δεν μπορούμε να κινούμαστε στο πλαίσιο της ακραίας μείωσης ενός εκ των δύο σταθερών, διότι υπεισέρχονται θέματα κόστους και αντοχής της κατασκευής των αναρτήσεων. Η συνδυαστική μεταβολή των σταθερών επιφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Στην διερεύνηση που πραγματοποιήσαμε βέλτιστη λύση είναι η **a16**, όπου είναι η μόνη περίπτωση όπου ο χρόνος σταθεροποίησης του συστήματος < 2 sec για την καμπύλη (body_deflection vs time).

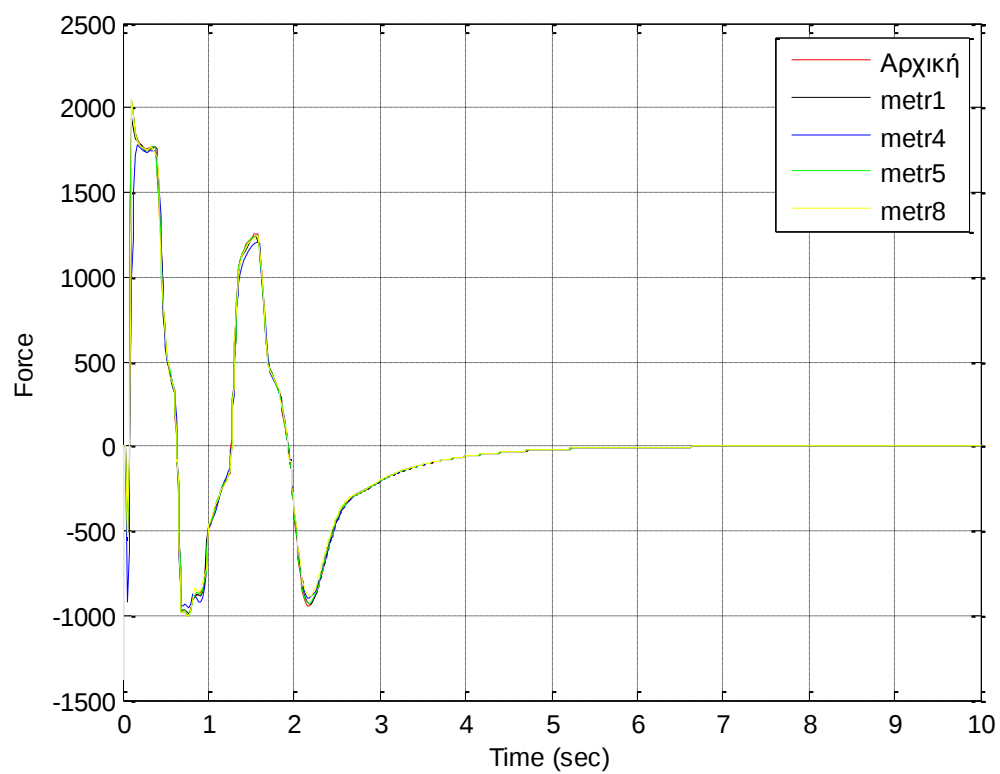
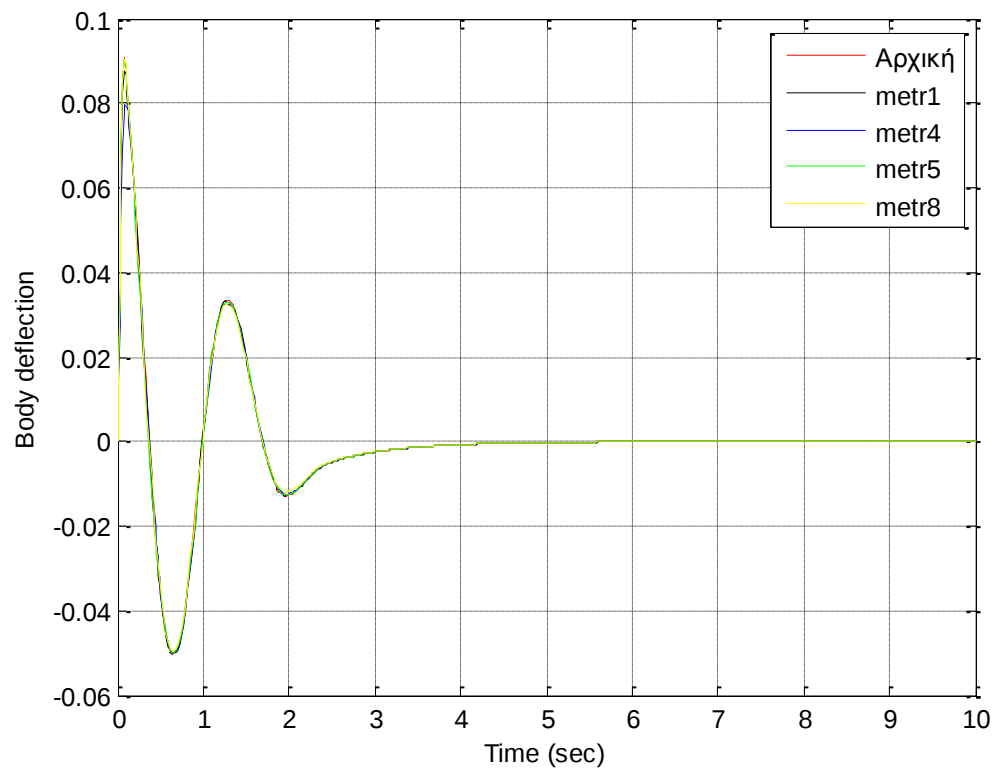
3^η Διερεύνηση

Θέλουμε να ελέγξουμε την απόκριση του συστήματος ενεργών αναρτήσεων για μεταβολή των συντελεστών b_1 και b_2 , διατηρώντας παράλληλα τους υπόλοιπους όρους του συστήματος σταθερούς. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

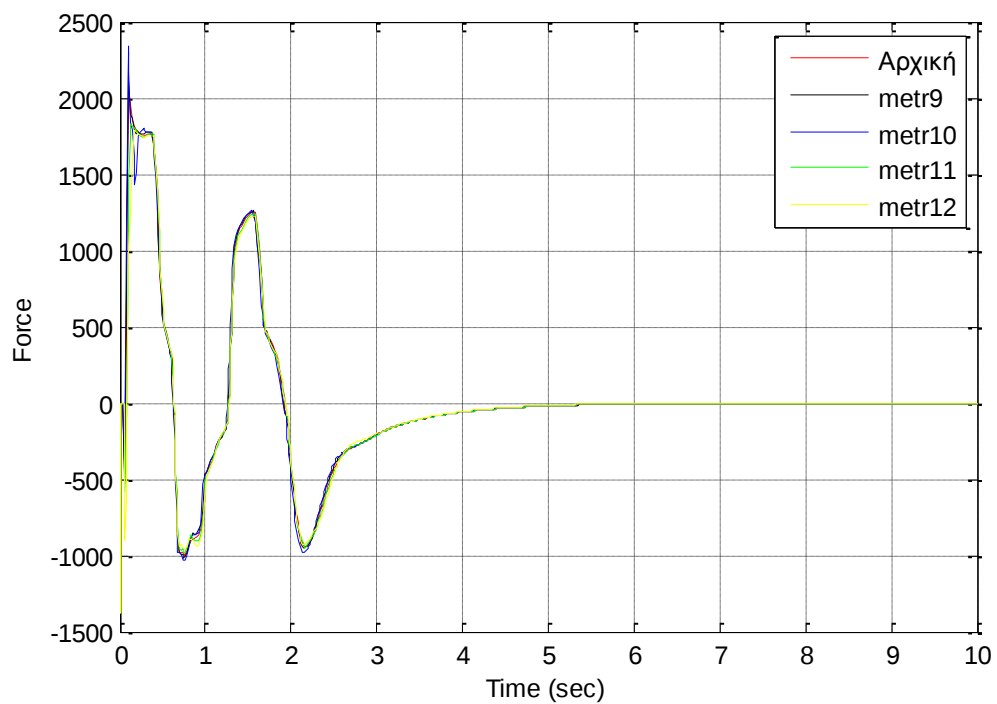
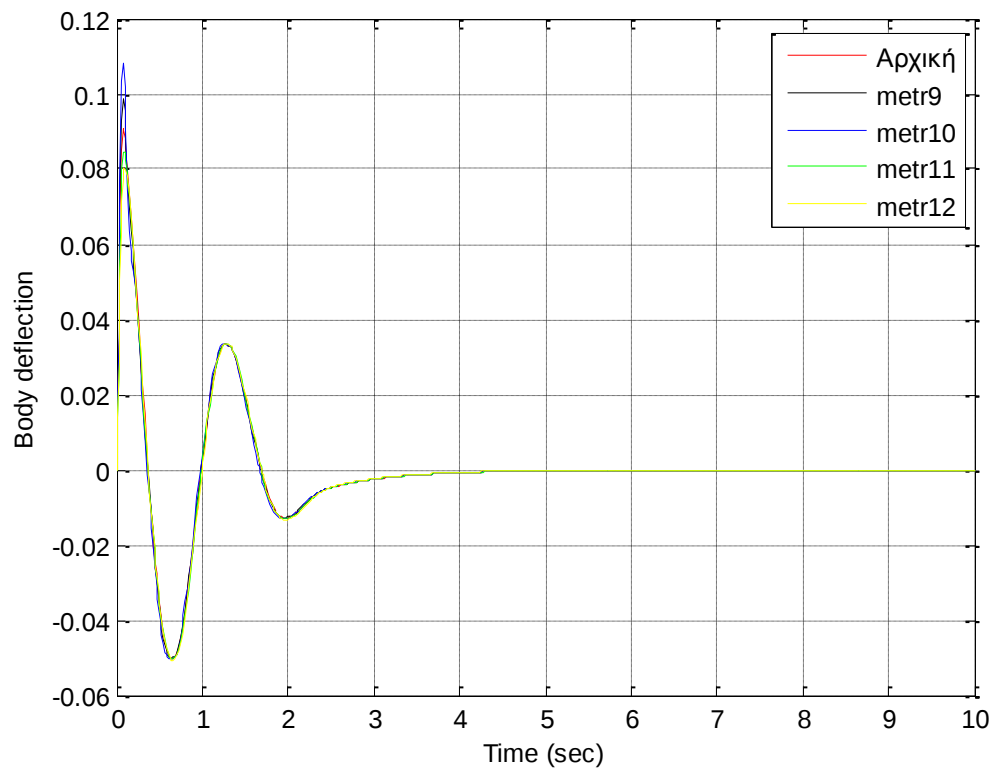
	b1	b2
	arxiki=350	arxiki=15020
1	350	16522
2	350	18024
3	350	19526
4	350	21028
5	385	15020
6	420	15020
7	455	15020
8	490	15020
9	420	12016
10	490	9012
11	280	18024
12	210	21028

Έχουμε τις αρχικές τιμές $b_1=350$ και $b_2=15020$. Αρχικά μεταβάλλουμε για τις περιπτώσεις 1-4 την τιμή του b_2 αυξάνοντας κάθε φορά 10% την αρχική τιμή του b_2 . (η αύξηση μας φτάνει μέχρι και το 40%). Στην συνέχεια επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για τον συντελεστή b_1 , περιπτώσεις 5-8 και παίρνουμε τις αντίστοιχες καμπύλες $\text{time vs body_deflection}$ και time vs force . Έπειτα διαλέγουμε τις $\max$ και $\min$ ποσοστιαίες μεταβολές των συντελεστών b_1 και b_2 (περιπτώσεις 1, 4, 5, 8) και τις ομαδοποιούμε συγκρίνοντας τες με την αρχική μας περίπτωση.

3.1



3.2



Παρατηρούμε ότι και στα δύο μας γραφήματα έχουμε σχεδόν ταύτιση των καμπυλών μας και όποιες μεταβολές παρατηρούνται ελάχιστα μεταβάλλουν τη λειτουργία του αρχικού μας συστήματος. Η ομοιότητα σχετίζεται και με τις καμπύλες (body deflection vs Time) των περιπτώσεων 3.1 και 3.2. Η ίδια ομοιότητα σημειώνεται και για τις καμπύλες (force vs time).

-Στις περιπτώσεις 9 και 10 αυξήσαμε τον b1 κατά 20% και 40% αντίστοιχα επί της αρχικής του τιμής, με ταυτόχρονη και ισόποση μείωση του b2 επί της αρχικής του τιμής.

-Στις περιπτώσεις 11 και 12 μειώσαμε τον b1 κατά 20% και 40% αντίστοιχα επί της αρχικής του τιμής, με ταυτόχρονη και ισόποση αύξηση του b1 επί της αρχικής του τιμής.

Τις καμπύλες (time vs body deflection) και (time vs force) που προκύψανε σε κάθε περίπτωση τις ομαδοποιήσαμε και τις συγκρίναμε με τις καμπύλες της αρχικής περίπτωσης, όπου και πάλι παρατηρούμε σχεδόν ταύτιση και ελάχιστη μεταβολή των καμπυλών.

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα

Η τεχνολογική εξέλιξη των ενεργών αναρτήσεων βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, με αποτέλεσμα να κοστίζουν πολύ περισσότερο από τα συστήματα παθητικών αναρτήσεων. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι ενεργές αναρτήσεις εγκαθίστανται σε πολυτελή αυτοκίνητα και σε επαγγελματικά φορτηγά ή λεωφορεία.

Η διερεύνηση μας βοήθησε να κατανοήσουμε καλύτερα την λειτουργία του συστήματος ενεργών αναρτήσεων με την εισαγωγή του ασαφούς μας ελεγκτή. Τα κυριότερα συμπεράσματα που διαπιστώσαμε είναι τα παρακάτω:

- Σημαντική επιρροή στην λειτουργία της διάταξης έχει ο κατάλληλος ορισμός του παραθύρου του `body_deflection`. Με τον όρο παράθυρο εννοούμε, εκείνο το διάστημα αναφοράς του `body_deflection` που πρέπει να εισάγουμε ώστε η έξοδος του συστήματος να αποτελεσματική.
- Το ελάχιστο διάστημα, για το οποίο η εφαρμογή του Fuzzy Logic επιδρά θετικά στην εξομάλυνση της διάταξης. Παρατηρήσαμε τον ελεγκτή μας, να μην επιδρά καθόλου στο σύστημα εξαιτίας των διαστημάτων που του εισάγαμε.
- Η πρώτη αιχμή **k1** (Σταθερά ελατηρίου συστήματος ανάρτησης) σε διαφορετικές τιμές, δίνει γρηγορότερο χρόνο σταθεροποίησης. Επίσης η σταθερά **k1** είναι που ενδιαφέρει περισσότερο διότι η δοκιμαστική φόρτιση είναι τυπική και σε μια πραγματική κατασκευή δεν έχει μεγάλο νόημα (μπορεί να τρέξει σε σειρά λακκουβών κλπ).
- Η σωστή συνδυαστική μεταβολή των **k1** και **k2** δύναται να καταστήσει το μοντέλο μας, με μεγαλύτερες αντοχές κατασκευής και καλύτερους χρόνους ισορροπίας.

- Οι μεταβολές των σταθερών c_1 και c_2 δεν διαφοροποιούνε την λειτουργία του συστήματος ενεργών αναρτήσεων τόσο στην περίπτωση μεταβολών ενός εκ των δύο όσο και στην ταυτόχρονη μεταβολή και των δύο σταθερών.

Μέσα από την παραμετρική διερεύνηση που πραγματοποιήσαμε, έγινε βέλτιστη η διάταξη που μελετήσαμε τόσο ως προς την λειτουργία όσο και προς το συνολικό της κόστος. Ο τρόπος και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε πειραματική διάταξη ενεργών αναρτήσεων και να επιφέρει τα ίδια θετικά αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- (1) Κινγκ, Ροβέρτος-Ε, Ευφυής Έλεγχος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004
- (2) Βολογιαννίδης Σταύρος “Ευφυής Έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές “
- (3) Κ. Μαρακάκης “Μελέτη ενεργών αναρτήσεων με συστήματα ασαφούς λογικής” Διατριβή για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009
- (4) Αρναουτάκης Ν. “συνοπτικός οδηγός matlab-simulink για το μάθημα ΣΑΕ Ι”, 2002

ΞΕΝΗ

- (5) HYNIOVÁ, K., STŘÍBRSKÝ, A. and HONCŮ, J.: Fuzzy Control of Mechanical Vibrating Systems, International Carpatian Control Conference ICCC 2001, pp. 393-398, Krytica, Poland, 2001
- (6) GÜRSEL, ALTAŞ , and GÜMÜŞEL “FUZZY CONTROL OF A BUS SUSPENSION SYSTEM” Proceedings of 5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, May 29-31, 2006: 1170-1177
- (7) Fischer D and Isermann R “Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions” , Control Engineering Practice Volume 12, Issue 11, Pages 1353-1367, November 2004.

(8) LIU H.,NOMANI K. and HAGIWARA T., “Active Following Fuzzy Output Feedback Sliding Mode Control of Real-Vehicle Semiactive Suspensions” , Elsevier, Journal of sound and Vibration , 39-52, (2008)

(9) NICOLAST, LANDALUZE, CASTRILLO, GASTON and REYERO ,”APPLICATION OF FUZZY LOGIC CONTROL TO THE DESIGN OF SEMI-ACTIVE SUSPENSION SYSTEM” , IEEE (1997)

ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

(10) www.wiki.com

(11) www.carbibles.com/suspension_bible.html

(12) www.4troxoi.gr