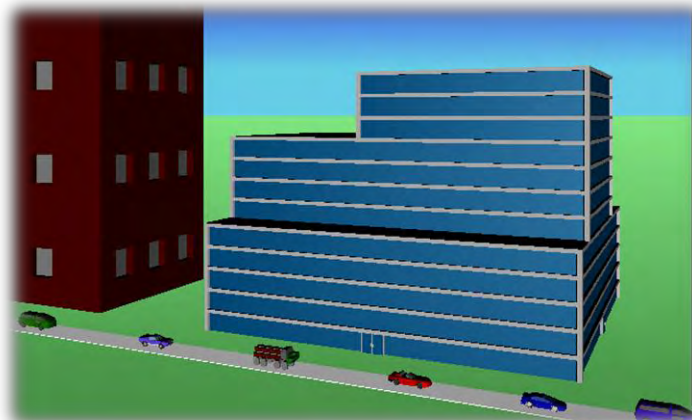




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ- ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΈΡΓΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ  
ΑΝΑΛΥΣΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

---

# **ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**



**ΤΣΑΝΑΚΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**  
Αρ. Μητρώου Π.Μ.Σ.:371308

Επιβλέπουσα: Ευτυχία Ναθαναήλ

Επίκουρος Καθηγήτρια Π.Θ.

---

ΒΟΛΟΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία:

# Βαθμονόμηση και Αξιολόγηση των Μοντέλων της Κυκλοφοριακής Ροής με τη χρήση Εμπειρικών Δεδομένων

ΤΣΑΝΑΚΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ  
Αρ. Μητρώου Π.Μ.Σ.:371308

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ

Π.ΚΟΠΕΛΙΑΣ  
Λέκτορας

Ε.ΝΑΘΑΝΑΗΛ  
Επίκουρος καθηγήτρια

Θ.ΚΑΡΑΚΑΣΙΔΗΣ  
Αναπληρωτής Καθηγητής

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, φέρει τον τίτλο «Βαθμονόμηση και αξιολόγηση των μοντέλων της κυκλοφοριακής ροής χρησιμοποιώντας εμπειρικά δεδομένα» και εκπονήθηκε από τον φοιτητή Τσανάκα Νικόλαο στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Προσομοίωση και Σχεδιασμός Έργων Πολιτικού Μηχανικού», του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η ανάθεση της εργασίας πραγματοποιήθηκε τον Σεπτέμβριο του 2014 και η επιβλέπουσα ήταν η κυρία Ναθαναήλ Ευτυχία, Επίκουρος Καθηγήτρια του τομέα «Ανάλυση, Σχεδιασμός και Προσομοίωση Συστημάτων Μεταφορών».

Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας αποτελεσματικής μεθόδου βαθμονόμησης των μοντέλων της κυκλοφοριακής ροής, ώστε να καταστεί δυνατή μία ακριβέστερη και αποτελεσματικότερη περιγραφή της κυκλοφορίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Ε. Ναθαναήλ, επίκουρο καθηγήτρια του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών για την καθοδήγηση και την συνεργασία της καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την καθολική στήριξη των επιλογών μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	6
Abstract .....	7
Εισαγωγή .....	8
Στόχοι και δομή της εργασίας.....	9
Κεφάλαιο 1 .....	12
1. Η θεωρία της κυκλοφοριακής ροής .....	12
1.1. Η κυκλοφοριακή ροή ως σύστημα .....	12
1.2. Η φυσική βάση της κυκλοφοριακής ροής .....	13
1.2.1. Φαινόμενα μηχανικής .....	13
1.2.2. Φαινόμενα Ηλεκτρομαγνητισμού .....	16
1.2.3. Φαινόμενα κυμάτων.....	17
1.2.4. Φαινόμενα στατιστικής μηχανικής .....	18
1.3. Τροχίες οχημάτων και μεταβλητές μικροσκοπικής ροής .....	20
1.3.1. Χρονικός διαχωρισμός, χωρικός διαχωρισμός και χρονική κατάληψη .....	21
1.4. Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής.....	24
1.4.1. Κυκλοφοριακός φόρτος, Πυκνότητα, Ταχύτητα και Χρονική κατάληψη.....	25
1.4.2. Θεμελιώδες σχέση της κυκλοφοριακής ροής .....	27
1.5. Θεμελιώδες διαγράμματα κυκλοφορίας .....	27
1.5.1. Διάγραμμα Φόρτου-Πυκνότητας .....	27
1.5.2. Θεμελιώδες διάγραμμα Ταχύτητας-Πυκνότητας.....	28
1.5.3. Θεμελιώδες διάγραμμα Φόρτου-Ταχύτητας.....	29
1.6. Μοντέλα της κυκλοφοριακής ροής.....	29
1.6.1. Μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης.....	31

1.6.1.1. Μοντέλα ασφαλής απόστασης (Safe-distance models) .....	32
1.6.1.2. Μοντέλα Ερεθίσματος-Ανταπόκρισης (Stimulus-Response models) .....	35
1.6.1.3. Ψυχολογικά μοντέλα (Psycho-spacing models) .....	38
1.6.1.4. Μοντέλα βέλτιστης ταχύτητας.....	40
1.6.1.5. Άλλοι τύποι μικροσκοπικών μοντέλων ενός κλάδου .....	40
1.6.2. Η γέφυρα μεταξύ μικροσκοπικών-μακροσκοπικών μοντέλων-Τα μοντέλα σταθερής κατάστασης (Steady-state models) .....	41
1.6.2.1. Ανάπτυξη της γέφυρας .....	41
1.7. Μοντέλα μακροσκοπικής προσομοίωσης.....	47
1.8. Μεσοσκοπική προσομοίωση .....	47
1.9. Μέθοδοι συλλογής δεδομένων .....	48
Κεφάλαιο 2 .....	53
2. Μέθοδος της βαθμονόμησης .....	53
2.1. Βαθμονόμηση των μοντέλων σταθερής κατάστασης.....	53
2.1.1. Τα υπό μελέτη μοντέλα .....	53
2.1.2. Δεδομένα.....	54
2.1.3. Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και την αξιολόγηση των μοντέλων.....	54
2.2. Βαθμονόμησης των μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης.....	55
2.2.1. Τα υπό μελέτη μοντέλα .....	55
2.2.2. Προσομοίωση των μοντέλων.....	56
2.2.3. Επεξεργασία των δεδομένων .....	62
2.2.4. Η μέθοδος της βαθμονόμησης και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν .....	64
Κεφάλαιο 3 .....	67

3. Αποτελέσματα.....	67
3.1. Αποτελέσματα της βαθμονόμησης των μακροσκοπικών μοντέλων.....	67
3.2. Αποτελέσματα της βαθμονόμησης των μικροσκοπικών μοντέλων.....	83
3.2.1. Συχνότητα των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων .....	89
3.2.2. Έλεγχος κανονικότητας .....	92
3.2.3. Έλεγχος συσχέτισης.....	94
Κεφάλαιο 4 .....	98
4. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα .....	98
4.1. Βαθμονόμηση των μακροσκοπικών μοντέλων Car-following .....	98
4.2. Βαθμονόμηση των μικροσκοπικών μοντέλων Car-following .....	100
Βιβλιογραφία .....	103
Παράρτημα .....	106
Α. Αναλυτικά σχηματικά αποτελέσματα βαθμονόμησης των μικροσκοπικών μοντέλων.....	106
Α.1. Αποτελέσματα για το μοντέλο του Gipps. ....	106
Α.2. Αποτελέσματα για το μοντέλο του Tampere. ....	160
Β. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων βαθμονόμησης των μικροσκοπικών μοντέλων.....	221
Β.1.Βέλτιστες τιμές για το μοντέλο του Gipps .....	221
Β.2.Βέλτιστες τιμές για το μοντέλο του Tampere.....	225

## Περίληψη

Μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες κατά την προσομοίωση της κυκλοφορίας, είναι η μοντελοποίηση της διαμήκης κίνησης των οχημάτων. Το μοντέλο car-following αποτελεί το βασικότερο μοντέλο που χρησιμοποιούν τα λογισμικά προσομοίωσης για την περιγραφή της διαμήκης κίνησης. Σύμφωνα με το μοντέλο κάθε όχημα κινείται αυτόνομα, ακολουθεί το όχημα που βρίσκεται μπροστά του και προσπαθεί να ανταποκριθεί εγκαίρως στις αλλαγές της κινητικής κατάστασης του μπροστινού του οχήματος. Το μοντέλο μπορεί να έχει πολλές εφαρμογές κατά τη διαχείριση της κυκλοφορίας τόσο σε λειτουργικό όσο και σε στρατηγικό επίπεδο. Η βαθμονόμηση και η επαλήθευση του μοντέλου μέσω της σύγκρισή των αποτελεσμάτων του με εμπειρικά δεδομένα, αποτελεί μία εξαιρετικά σημαντική διαδικασία, κατά την οποία μπορεί να αξιολογηθεί η καταλληλότητα του μοντέλου να περιγράψει την κυκλοφορία. Κατά τα προηγούμενα χρόνια, η βαθμονόμηση γινόταν κυρίως με τη βοήθεια συγκεντρωτικών εμπειρικών δεδομένων, χρησιμοποιώντας παραμέτρους μακροσκοπικής φύσεως. Σήμερα, η τεχνολογική ανάπτυξη έχει βοηθήσει στην εφαρμογή μεθόδων συλλογής αναλυτικότερων δεδομένων όπως είναι οι τροχιές των οχημάτων. Επομένως, κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων υπάρχει ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη διαδικασιών βαθμονόμησης που βασίζονται σε δεδομένα αυτού του τύπου. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου βαθμού αναλυτικότητας οι μετρήσεις συνήθως περιέχουν σημαντικά σφάλματα τα οποία μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στα αποτελέσματα της βαθμονόμησης. Επομένως, καθίσταται αναγκαία η ανάπτυξη μεθόδων φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης, με στόχο την απαλοιφή αυτών των σφαλμάτων. Στην συγκεκριμένη εργασία, αναπτύχθηκε μία μέθοδος βαθμονόμησης των μοντέλων car-following, χρησιμοποιώντας αρχικά συγκεντρωτικά δεδομένα (από επαγωγικούς βρόγχους), και σε ένα δεύτερο στάδιο χρησιμοποιώντας αναλυτικότερα δεδομένα (τροχιές οχημάτων). Στην συνέχεια, εφαρμόστηκε μία μέθοδος συγκριτικής αξιολόγησης της επίδοσης των μοντέλων, ώστε να καταστεί δυνατή η εκτίμηση της ικανότητας του κάθε μοντέλου όσον αφορά την περιγραφή της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς.

## **Abstract**

One of the most significant tasks in the simulation of traffic flow is the modelling of the longitudinal movement of vehicles. The core model of longitudinal traffic simulation is the car-following model. Car-following model has important applications in traffic and safety engineering. Calibration techniques are crucial in assessing the suitability of these models for analyzing traffic flow. During the past years the calibration was usually done at an aggregated level, using macroscopic traffic stream variables. Nowadays, due to the technology development several methods of collecting disaggregated data like vehicle trajectories, are available and there is an extra interest in calibration procedures based on this kind of data. However, measurements usually contain errors, which may have a negative effect during the calibration process. Therefore, the development of filtering and smoothing data methods is essential in order to discard measurements errors. In this study, a calibration methodology for the car-following models is performed, using initially aggregated data (loop detector data) and next vehicle trajectories data. Then, a performance based benchmarking is applied in order to evaluate the capabilities of each model in representing real driving behavior

.



## Εισαγωγή

Η έντονα αυξανόμενη κυκλοφορία στους αυτοκινητοδρόμους έχει οδηγήσει σε επιδείνωση των κυκλοφοριακών συνθηκών και κατά συνέπεια σε μεγάλο αριθμό συμφορήσεων. Το υψηλό κόστος και περιβαλλοντικές πτυχές αποθαρρύνουν την επιλογή της κατασκευής νέων υποδομών, οι συνέπειες των οποίων είναι αμφιλεγόμενες, αφού μπορεί να δημιουργήσουν επιπλέον ζήτηση. Επομένως, η διαχείριση της κυκλοφορίας έχει εστιάσει στην ανάπτυξη μεθόδων με στόχο την αποδοτικότερη λειτουργία των υφιστάμενων υποδομών αλλά και την πρόβλεψη της απόδοσης στην περίπτωση της κατασκευής νέων.

Σήμερα, εξαιτίας της ραγδαίας τεχνολογικής ανάπτυξης και της διαδομένης χρήσης των προσωπικών ηλεκτρονικών υπολογιστών τα λογισμικά συγκοινωνιακής προσομοίωσης χρησιμοποιούνται ευρέως ως ένα μέσο διαχείρισης της κυκλοφορίας. Η χρήση τους μπορεί να έχει σημαντικά αποτελέσματα, τόσο στην ανάλυση υφιστάμενων υποδομών που χρειάζονται τροποποίηση, όσο και στον σχεδιασμό νέων υποδομών. Επίσης, αυτά τα εργαλεία συγκοινωνιακής προσομοίωσης μπορεί να έχουν αρκετές εφαρμογές στη διαχείριση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας της κυκλοφορίας. Τελικά, τα λογισμικά συγκοινωνιακής προσομοίωσης χρησιμοποιούνται:

- Στον στρατηγικό σχεδιασμό και την ανάλυση νέων υποδομών
- Στον έλεγχο και τη διαχείριση κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο
- Στην ανάλυση της ικανότητας της κυκλοφορίας
- Στην αξιολόγηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφορετικών μέσων συγκοινωνίας
- Στον σχεδιασμό και τη διαμόρφωση κόμβων
- Στην πρόληψη και διαχείριση των ατυχημάτων.

Τα συγκοινωνιακά μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα λογισμικά προσομοίωσης στηρίζονται στις βασικές αρχές της θεωρίας της κυκλοφορίας. Ένα από τα βασικότερα συστατικά αυτών των λογισμικών αποτελεί το μοντέλο car-following. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου αφορά την μοντελοποίηση της διαμήκης κίνησης των οχημάτων.

Το μοντέλο car-following περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ένα όχημα ακολουθεί ένα άλλο, αντιδρώντας στο κυκλοφοριακό του περιβάλλον. Ειδικότερα, το μοντέλο car-

following προβλέπει τη χωρική και χρονική εξέλιξη της κίνησης του οχήματος που ακολουθεί, ενώ είναι γνωστή η τροχιά του μπροστινού οχήματος.

Αν η επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων είναι γνωστή για όλα τα ζεύγη οχημάτων μίας λωρίδας, τότε ο αντίστροφος της απόστασης, δηλαδή η πυκνότητα για ολόκληρη τη λωρίδα είναι δυνατόν να εκτιμηθεί. Επομένως, τα μοντέλα car-following μπορούν να θεωρηθούν ως μία γέφυρα μεταξύ της μεμονωμένης συμπεριφοράς κάθε οχήματος, και στο μακροσκοπικό κόσμο μίας σειράς οχημάτων.

Η διαδικασία του car-following αποτελείται από δύο επίπεδα, την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς σταθερής κατάστασης (steady-state) και της μη σταθερής κατάστασης (non steady state). Τα μοντέλα car-following σταθερής κατάστασης προσδιορίζουν τις ιδιότητες της κυκλοφορίας (μέση ταχύτητα-πυκνότητα-φόρτος) σε διαφορετικά επίπεδα συμφόρησης, ενώ τα μοντέλα μη σταθερής κατάστασης περιγράφουν την συμπεριφορά των οχημάτων κατά την μετάβαση από την μία κατάσταση στην άλλη. Από κάθε μοντέλο car-following μπορεί να προκύψει και το αντίστοιχο μοντέλο σταθερής κατάστασης.

Σε κάθε περίπτωση όπου επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο car-following πρέπει αρχικά να βαθμονομηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να μπορέσει να περιγράψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες της κυκλοφορίας. Επομένως γίνεται κατανοητό, πως η βαθμονόμηση σε πρώτη φάση και η επαλήθευση των μοντέλων στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας εμπειρικά δεδομένα μετρήσεων, αποτελεί μία εξαιρετικά σημαντική διαδικασία κατά την οποία μπορεί να εκτιμηθεί η ικανότητα και η καταλληλότητα του κάθε μοντέλου. Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων ετών, η βαθμονόμηση κυρίως γινόταν χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικά δεδομένα (π.χ. δεδομένα επαγωγικών βρόγχων). Ωστόσο, καθώς η πρόσβαση σε αναλυτικότερα δεδομένα μικροσκοπικής φύσεως γίνεται όλο και ευκολότερη, το ερευνητικό πεδίο της βαθμονόμησης με βάση μικροσκοπικά εμπειρικά δεδομένα έχει σήμερα αποκτήσει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

### **Στόχοι και δομή της εργασίας**

Αρχικά, πραγματοποιείται η αναλυτική παρουσίαση των μοντέλων car-following με στόχο την πλήρη κατανόηση των ιδιοτήτων και των εφαρμογών τους. Στην συνέχεια, βασικός στόχος αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας αποτελεσματικής μεθόδου

βαθμονόμησης, ώστε τα αποτελέσματα των μοντέλων της κυκλοφοριακής ροής να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στα εμπειρικά δεδομένα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, η εργασία αποσκοπεί σε μία έγκυρη αξιολόγηση και σύγκριση των μοντέλων με βάση την ικανότητα περιγραφής της κυκλοφορίας. Τέλος, η εργασία στοχεύει στην όσο το δυνατόν ακριβέστερη περιγραφή της πολυπλοκότητας της οδηγικής συμπεριφοράς ανάμεσα σε διαφορετικούς οδηγούς. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκτίμηση της κατανομής των τιμών κάθε παραμέτρου ανάμεσα σε διαφορετικούς οδηγούς. Συνοψίζοντας, οι στόχοι της εργασίας είναι:

1. Η παρουσίαση και η πλήρης κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου των υπάρχοντων μοντέλων car-following.
2. Η μαθηματική ανάπτυξη της γέφυρας μεταξύ μικροσκοπικής και μακροσκοπικής προσομοίωσης.
3. Η ανάπτυξη μίας αποτελεσματικής μεθόδου βαθμονόμησης.
4. Η επαλήθευση των μοντέλων χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα.
5. Η σύγκριση και η αξιολόγηση των μοντέλων με βάση την καταλληλότητα τους όσον αφορά την αναπαράσταση της κυκλοφορίας.
6. Ο προσδιορισμός των διαφορετικών χαρακτηριστικών της συμπεριφοράς, ανάμεσα στους οδηγούς.

Η εργασία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση και η αξιολόγηση των μοντέλων σταθερής κατάστασης μέσω συγκεντρωτικών δεδομένων που προέκυψαν από μετρήσεις με μαγνητικούς βρόγχους (NGSIM detector data), ενώ στο δεύτερο μέρος πραγματοποιείται η αντίστοιχη βαθμονόμηση των μικροσκοπικών μοντέλων χρησιμοποιώντας εμπειρικές τροχιές οχημάτων (NGSIM vehicle trajectories). Κάθε παράμετρος των μοντέλων βαθμονομήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε το αποτέλεσμα του μοντέλου να ταιριάζουν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στα εμπειρικά δεδομένα. Κατά τη βαθμονόμηση των μοντέλων σταθερής κατάστασης υπολογίζονται παράμετροι μακροσκοπικής φύσεως όπως είναι η κρίσιμη μέση ταχύτητα ή η κρίσιμη πυκνότητα. Αντίθετα, στην περίπτωση των μικροσκοπικών μοντέλων πραγματοποιείται η εκτίμηση παραμέτρων που αφορούν την οδηγική συμπεριφορά όπως είναι η επιθυμητή ταχύτητα ή η επιθυμητή απόσταση μεταξύ δύο οχημάτων.

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά της θεωρίας της κυκλοφοριακής ροής. Προσδιορίζονται οι φυσικές ιδιότητες της κυκλοφοριακής ροής, ενώ πραγματοποιείται και μία κατηγοριοποίηση των μοντέλων κυκλοφορίας. Επίσης παρουσιάζονται αρχικά τα μικροσκοπικά μοντέλα car-following και στην συνέχεια αναπτύσσεται η γέφυρα μέσω της οποίας προκύπτουν και τα μοντέλα σταθερής κατάστασης.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι μέθοδοι και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση. Περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των δεδομένων και η προσομοίωση των μοντέλων. Επίσης προσδιορίζονται οι μέθοδοι και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και της αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των μοντέλων σταθερής κατάστασης παρουσιάζονται γραφικά με τη βοήθεια των θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφορίας, ενώ τα αποτελέσματα των μικροσκοπικών μοντέλων παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων σχετικής απόστασης-χρόνου. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι συχνότητες των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, με τη βοήθεια ιστογραμμάτων.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται κάποια συμπεράσματα, κυρίως όσον αφορά την αξιολόγηση των μοντέλων. Επισημάνονται οι αδυναμίες των υπό μελέτη μοντέλων, ενώ προτείνονται και τρόποι αντιμετώπισής τους. Τέλος, παρουσιάζονται ενδιαφέροντα πεδία μελλοντικής έρευνας που προέκυψαν κατά την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

## Κεφάλαιο 1

### 1. Η θεωρία της κυκλοφοριακής ροής

Η θεωρία της κυκλοφοριακής ροής (Traffic Flow Theory), αναφέρεται στην μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των οχημάτων, των οδηγών και των εγκαταστάσεων (συμπεριλαμβανομένων των αυτοκινητόδρομων, της σήμανσης και των συστημάτων ελέγχου). Βασικός στόχος είναι η κατανόηση και η ανάπτυξη ενός βέλτιστου οδικού δικτύου.

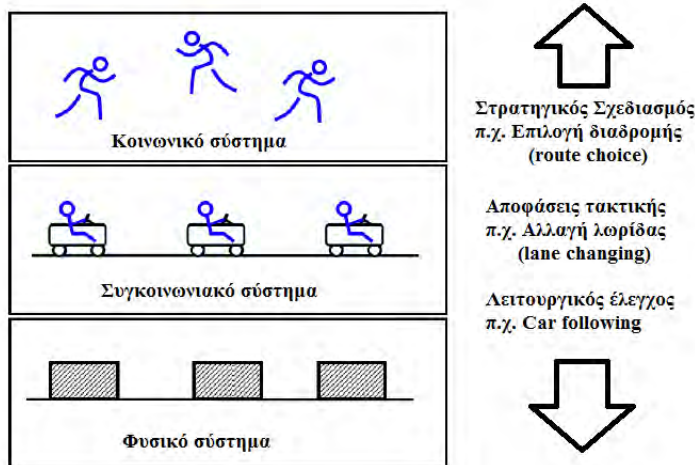
#### 1.1. Η κυκλοφοριακή ροή ως σύστημα

Τα συστήματα διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα φυσικά συστήματα και τα κοινωνικά συστήματα. Τα φυσικά συστήματα αναφέρονται στα μη-ζωντανά αντικείμενα, η αλληλεπίδραση και η κίνηση των οποίων ακολουθεί του φυσικούς νόμους όπως τους Νόμους του Νεύτωνα. Τα κοινωνικά συστήματα αναφέρονται σε ζωντανούς οργανισμούς όπως οι άνθρωποι, η συμπεριφορά των οποίων ποικίλει ανά τον πληθυσμό και δεν ακολουθεί κάποιον συγκεκριμένο κανόνα ή νόμο. Επομένως, ένα φυσικό σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως «σκληρό» (hard), αφού είναι απόλυτο, αυστηρό και περισσότερο έγκυρο. Αντίθετα, η ένα κοινωνικό σύστημα θεωρείται ως «μαλακό» (soft), εξαιτίας της υποκειμενικότητας, της χαλαρότητας και της ανακρίβειας. Ωστόσο, ένα συγκοινωνιακό σύστημα βρίσκεται σε μία ενδιάμεση κατάσταση αφού επηρεάζεται από τους φυσικούς νόμους αλλά και από τους κοινωνικούς κανόνες. Ειδικότερα, στην περίπτωση όπου πραγματοποιείται ένας στρατηγικός σχεδιασμός, το συγκοινωνιακό σύστημα βρίσκεται πιο κοντά στα κοινωνικά συστήματα. Αντιθέτως, όταν ένα συγκοινωνιακό σύστημα αναφέρεται σε αποφάσεις τακτικής και λειτουργικό έλεγχο, βρίσκεται πιο κοντά στα φυσικά συστήματα.

Επομένως η προσπάθεια μοντελοποίησης και προσομοίωσης ενός συγκοινωνιακού συστήματος, πρέπει να επικεντρωθεί στον κατάλληλο συνδυασμό φυσικών νόμων και κοινωνικών κανόνων.

## 1.2. Η φυσική βάση της κυκλοφοριακής ροής

Αρκετά φαινόμενα κυκλοφοριακής ροής συμπεριφέρονται ανάλογα με κάποια φυσικά συστήματα, ωστόσο τα συγκοινωνιακά συστήματα έχουν κάτι ιδιαίτερο το οποίο τα διαχωρίζει από τα φυσικά συστήματα. Στην συνέχεια αναφέρονται τα φυσικά φαινόμενα τα οποία μπορούν να παρατηρηθούν και σε ένα συγκοινωνιακό σύστημα.



Εικόνα 1.1 : Το συγκοινωνιακό σύστημα [3].

### 1.2.1. Φαινόμενα μηχανικής

Στην φυσική, θεωρείται πως η αιτία μιας οποιαδήποτε αλλαγής στην κινητική κατάσταση είναι οι δυνάμεις. Χαρακτηρίστηκα παραδείγματα είναι ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα, δηλαδή ότι αν ασκηθεί μία εξωτερική δύναμη σε ένα αντικείμενο τότε αλλάζει και η ταχύτητά του, και ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα όπου για κάθε δράση υπάρχει και μία αντίδραση. Παρόμοιες «δυνάμεις» υπάρχουν και στην κυκλοφοριακή ροή, ωστόσο κάθε οδηγός τις αντιλαμβάνεται διαφορετικά. Οι φυσικές δυνάμεις θεωρούνται ως ένας εξωτερικός καταναγκασμός, ενώ οι δυνάμεις που γίνονται αντιληπτές εξαρτώνται από τα κίνητρα και τις σκέψεις του κάθε οδηγού. Για παράδειγμα, όταν ένας γρήγορος οδηγός πλησιάζει ένα αργό όχημα τότε αισθάνεται μία «δύναμη» (ένα άγχος ή μια πίεση στο μυαλό του οδηγού). Ο αργός οδηγός, δεν είναι σίγουρο ότι θα αποτελέσει το αντικείμενο για τη «δύναμη της αντίδρασης», εξαρτάται από το επίπεδο προσοχής του οδηγού. Επομένως ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα μπορεί να μην βρίσκεται σε ισχύ σε αυτήν την περίπτωση. Περισσότερα παραδείγματα φαινομένων μηχανικής παρουσιάζονται παρακάτω:

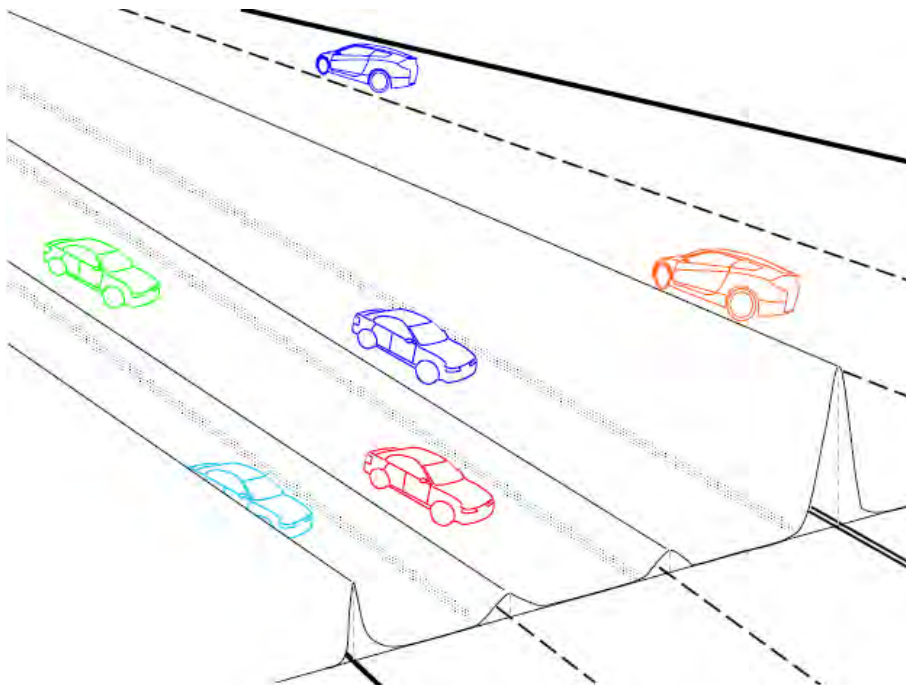
**Κατεύθυνση ροής.** Η κυκλοφοριακή ροή πάντα ακολουθεί μία προκαθορισμένη κατεύθυνση, όπως ακριβώς ένα αντικείμενο όταν πέφτει στο έδαφος. Η αιτία της ελεύθερης πτώσης ενός αντικειμένου είναι η βαρύτητα. Αντίστοιχα μπορεί να εννοηθεί ότι υπάρχει μία παρόμοια «βαρύτητα» και στην κυκλοφοριακή ροή κατά μήκος ενός δρόμου. Ωστόσο, η συγκεκριμένη «βαρύτητα» δεν είναι μετρήσιμο μέγεθος και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η προσωπικότητα των οδηγών (π.χ. επιθετικότητα), οι ιδιότητες του οχήματος (π.χ. η δύναμη της μηχανής), και οι συνθήκες του δρόμου (π.χ. διαφορετικές υπάρχουν σε μία μικρή οδό και διαφορετικές σε ένα αυτοκινητόδρομο).

**Ελεύθερη ροή.** Ένα αντικείμενο κατά διάρκεια της ελεύθερης πτώσης εξαιτίας της αντίστασης του αέρα, θα μεταβεί σε μία ταχύτητα ισορροπίας. Το ίδιο συμβαίνει και με την ταχύτητα ενός οχήματος. Σε αυτήν την περίπτωση η «αντίσταση» προέρχεται από τη προθυμία του οδηγού να συμμορφωθεί με τους κανόνες (π.χ. όρια ταχύτητας). Σε αντίθεση με την ελεύθερη πτώση η οποία θεωρείται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ντετερμινιστικό φαινόμενο, η ελεύθερη κυκλοφοριακή ροή χαρακτηρίζεται από υποκειμενικότητα, αφού επηρεάζεται από τις επιλογές των οδηγών. Κάτω συγκεκριμένες συνθήκες, οι επιλογές μπορεί να ποικίλουν ανάμεσα στους διαφορετικούς οδηγούς και ανάμεσα σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Επιπλέον, διαφορετικοί τύποι δρόμων υποστηρίζουν και διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής. Η ελεύθερη ταχύτητα που επιλέγει ένας μεμονωμένος οδηγός ονομάζεται «επιθυμητή ταχύτητα» (desired speed), ενώ η ελεύθερη ταχύτητα που αναφέρεται σε μία ομάδα οδηγών ονομάζεται «ταχύτητα ελεύθερης ροής» (free-flow speed). Γενικότερα, η «επιθυμητή ταχύτητα» σχετίζεται με την προσωπικότητα του οδηγού και τις συνθήκες του δρόμου, ενώ η «ταχύτητα ελεύθερης ροής» επηρεάζεται από τις συνθήκες του δρόμου και τον πληθυσμό των οδηγών.

**Στάση σε κόκκινο φανάρι.** Όπως ένα αντικείμενο στην φυσική αναγκάζεται να σταματήσει μπροστά από ένα εμπόδιο, τα οχήματα επιβραδύνουν μέχρι να ακινητοποιηθούν μπροστά από ένα κόκκινο φανάρι. Ασκείται μία «δύναμη απώθησης» (repelling force) στον οδηγό, αφού αν περάσει με κόκκινο πιθανότατα να έχει κάποιες δυσάρεστες συνέπειες (π.χ. ατύχημα ή πρόστιμο). Σε αντίθεση με τη φυσική, όπου όλα τα αντικείμενα ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά καθώς ακινητοποιούνται μπροστά σε ένα εμπόδιο, κάθε οδηγός επιβραδύνει σύμφωνα με το δικό του επιθυμητό επίπεδο και

σε κάποιες ακραίες περιπτώσεις ορισμένοι οδηγοί μπορεί να μην σταματήσουν καθόλου.

**Φανταστικά οδοφράγματα λωρίδων.** Τα οχήματα που κινούνται στην ίδια κατεύθυνση σε ένα αυτοκινητόδρομο διαχωρίζονται από τις λωρίδες. Για την αποφυγή κάποιας σύγκρουσης, οι οδηγοί πρέπει να διατηρηθούν στις λωρίδες. Επομένως καθοδηγούνται από φανταστικά οδοφράγματα που βρίσκονται στις δύο άκρες κάθε λωρίδας (Εικόνα 1.2.). Κατά την αλλαγή λωρίδας ο οδηγός διακατέχεται από ένα είδος άγχους, το οποίο τον εξαναγκάζει να μετακινηθεί το γρηγορότερο δυνατόν στην μέση της νέας λωρίδας. Οπότε, ο οδηγός δέχεται μία «δύναμη καταναγκασμού» (correction force) από τα οδοφράγματα. Στην περίπτωση όπου κάποιος οδηγός βρεθεί πίσω ένα αργό όχημα, αυτόματα του δημιουργείται η επιθυμία για αλλαγή λωρίδας. Πρέπει να βρει την κατάλληλη χρονική στιγμή όπου το οδοφράγμα που έχει σχηματιστεί στο μυαλό του έχει το μικρότερο ύψος και είναι προσπελάσιμο, ώστε να πραγματοποιήσει την αλλαγή λωρίδας. Το φανταστικό οδοφράγμα μεταξύ λωρίδων αντίθετης κατεύθυνσης όπως επίσης και αυτό που βρίσκεται στο τέλος του δρόμου έχουν μεγαλύτερο ύψος (Εικόνα 1.2), επειδή ο κίνδυνος σε περίπτωση που διαπεραστούν είναι μεγαλύτερος.



Εικόνα 1.2 : Φανταστικά οδοφράγματα [3].



### 1.2.2. Φαινόμενα Ηλεκτρομαγνητισμού

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους ένα αντικείμενο μπορεί να ασκήσει δύναμη σε ένα άλλο: μέσω πρόσκρουσης και μέσω δράσης από απόσταση. Το χτύπημα μίας μπάλας από ένα ρόπαλο αποτελεί ένα παράδειγμα της πρώτης περίπτωσης ενώ η έλξη μίας βελόνας από ένα μαγνήτη αναφέρεται στο δεύτερο τρόπο. Σε έναν αυτοκινητόδρομο τα οχήματα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κυρίως μέσω δυνάμεων από απόσταση. Κάποια παραδείγματα δυνάμεων αυτού του τύπου συμπεριλαμβάνονται στα προαναφερθέντα μηχανικά φαινόμενα, όπως επίσης και στα ακόλουθα:

**Car-following.** Όταν ένα όχημα με μεγάλη ταχύτητα προσεγγίζει ένα άλλο με μικρότερη, ο γρήγορος οδηγός αντιλαμβάνεται πως θα πραγματοποιηθεί σύγκρουση αν συνεχίσει με την ίδια ταχύτητα. Ο φόβος των επιπτώσεων μίας επερχόμενης σύγκρουσης ωθεί τον οδηγό να δράσει ανάλογα ώστε να την αποφύγει. Αν η αλλαγή λωρίδας δεν είναι εφικτή και εάν ο αργός οδηγός δεν επιταχύνει, τότε ο γρήγορος οδηγός αναγκάζεται να επιβραδύνει και σταδιακά θα φτάσει την ίδια ταχύτητα όταν βρεθεί σε μία ασφαλή απόσταση από το μπροστά όχημα. Σύμφωνα με τον νόμο του Κουλόμπ, το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης, την οποία ένα σωματίδιο Α ασκεί σε ένα άλλο Β, είναι ανάλογο προς το γινόμενο των φορτίων τους, και αντιστρόφως ανάλογο προς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης. Ομοίως, όταν ο γρήγορος οδηγός προσεγγίζει τον αργό, η «δύναμη» (το άγχος που τον ωθεί στην επιβράδυνση) αυξάνεται όσο η μεταξύ τους απόσταση μειώνεται. Επομένως η συγκεκριμένη δύναμη και η μεταξύ τους απόσταση είναι αντιστρόφως ανάλογες όπως ακριβώς συμβαίνει και στον νόμο του Κουλόμπ. Ωστόσο, η ίδια αντίθετη δύναμη μπορεί να μην ασκηθεί στον μπροστινό οδηγό αφού υπάρχει περίπτωση να μην αντιληφτεί ότι προσεγγίζεται από ένα γρηγορότερο όχημα.

**Tailgating.** Συνεχίζοντας το παραπάνω παράδειγμα και υποθέτοντας ότι το γρήγορο όχημα ακολουθεί το μπροστινό όχημα σε επικίνδυνη απόσταση (tailgating), ο μπροστινός οδηγός αντιλαμβάνεται την αντίθετη δύναμη η οποία τον ωθεί να επιταχύνει. Σε αυτήν την περίπτωση, ισχύει ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα. Μία «δύναμη» πρέπει να γίνει αντιληπτή από ένα άτομο, πριν οι επιπτώσεις αυτής της δύναμης αρχίσουν να επηρεάζουν αυτό το άτομο. Η ικανότητα αντίληψης αυτών των δυνάμεων ποικίλει ανάμεσα στους οδηγούς και εξαρτάται κυρίως από την εμπειρία τους.

**Οπισθοχώρηση (shying away).** Όταν δύο οχήματα κινούνται παράλληλα με μεγάλη ταχύτητα, προκαλείται αυτόματα ένα αίσθημα φόβου στον έναν ή και στους δύο οδηγούς. Αυτός ο φόβος μίας πλευρικής σύγκρουσης τους ωθεί να απομακρυνθούν και να μεγαλώσουν την μεταξύ τους απόσταση (διαμήκης και εγκάρσια απόσταση). Το φαινόμενο shying away γίνεται πιο έντονο όταν ένα από τα δύο οχήματα είναι φορτηγό.

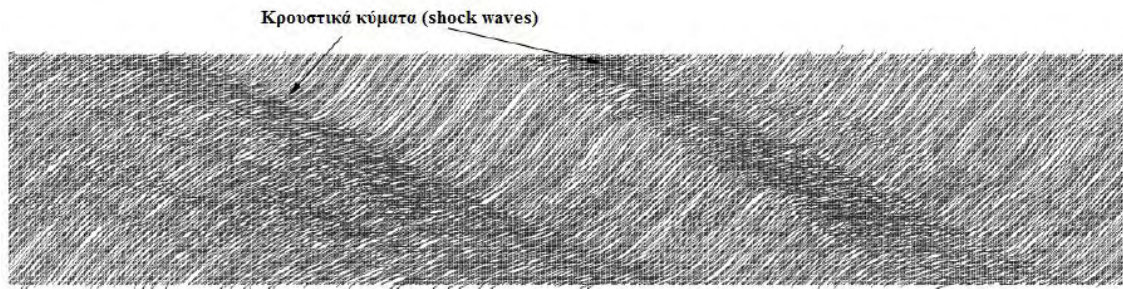
### 1.2.3. Φαινόμενα κυμάτων

**Αρμονικό κύμα.** Η κίνηση μίας σειράς οχημάτων έχει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με ένα αρμονικό κύμα. Χαρακτηρίζεται από το φόρτο της ροής (σε οχήματα ανά ώρα), την ταχύτητα (σε χιλιόμετρα ανά ώρα) και την πυκνότητα (σε οχήματα ανά χιλιόμετρο), ενώ ένα κύμα προσδιορίζεται αντίστοιχα από την συχνότητα (σε Hz ή σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο), από την ταχύτητα (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο) από το μήκος κύματος (σε μέτρα). Επομένως, ο φόρτος ισοδυναμεί με την πυκνότητα, η ταχύτητα της ροής με την ταχύτητα του κύματος και ο χωρικός διαχωρισμός (spacing), το αντίστροφο δηλαδή της πυκνότητας, με μήκος κύματος (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3 : Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων στην κυκλοφοριακή ροή [3].

**Διάδοση του σήματος.** Ο όρος σήμα εδώ αναφέρεται σε μία οποιαδήποτε διαταραχή της κινητικής κατάστασης ενός οχήματος που βρίσκεται σε μία σειρά οχημάτων. Για παράδειγμα, όταν ένας οδηγός φρενάρει απότομα, δημιουργείται ένα κινηματικό κύμα το οποίο διαδίδεται στη σειρά των οχημάτων. Σε αυτήν την περίπτωση το σήμα το οποίο διαδίδεται είναι η μείωση της ταχύτητας. Όταν μία ομάδα γρήγορων οχημάτων προσεγγίζει μία ομάδα οχημάτων με μικρότερη ταχύτητα δημιουργείται ένα κρουστικό κύμα το οποίο διαδίδεται στην κυκλοφορία (Εικόνα 1.4). Σε αυτήν την περίπτωση το σήμα είναι η διασύνδεση μεταξύ αργών και γρήγορων οχημάτων.



Εικόνα 1.4: Οι τροχιές των οχημάτων σχηματίζουν κρουστικά κύματα [3].

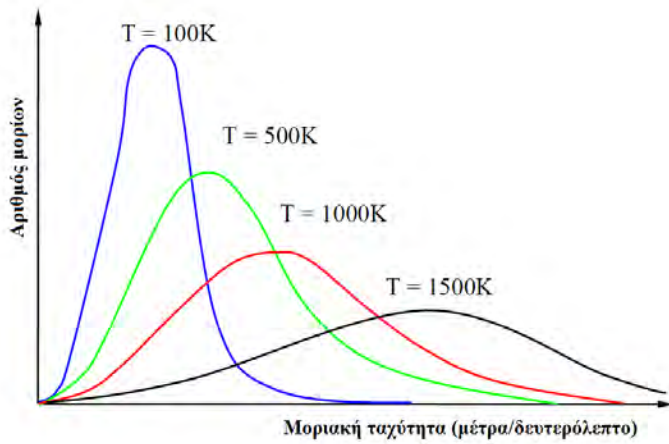
**Συνδυασμός κυματικών και σωματιδιακών ιδιοτήτων (Wave-particle duality).** Σε όλη την ύλη, και ειδικά στα σωματίδια μικρής κλίμακας, παρουσιάζονται ταυτόχρονα κυματικές και σωματιδιακές ιδιότητες. Οι σωματιδιακές ιδιότητες εμφανίζονται όταν το κάθε σωματίδιο μελετάται μεμονωμένα (π.χ. το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο), ενώ οι κυματικές όταν η συμπεριφορά μιας ομάδας σωματιδίων μελετάται στο σύνολό της (π.χ. η περίθλαση των κυμάτων). Στην κυκλοφοριακή ροή, τα μεμονωμένα οχήματα συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο τα μεμονωμένα σωματίδια (π.χ. car-following και lane changing), ενώ μία σειρά οχημάτων παρουσιάζει κυματικές ιδιότητες (π.χ. κινηματικά και κρουστικά κύματα).

#### 1.2.4. Φαινόμενα στατιστικής

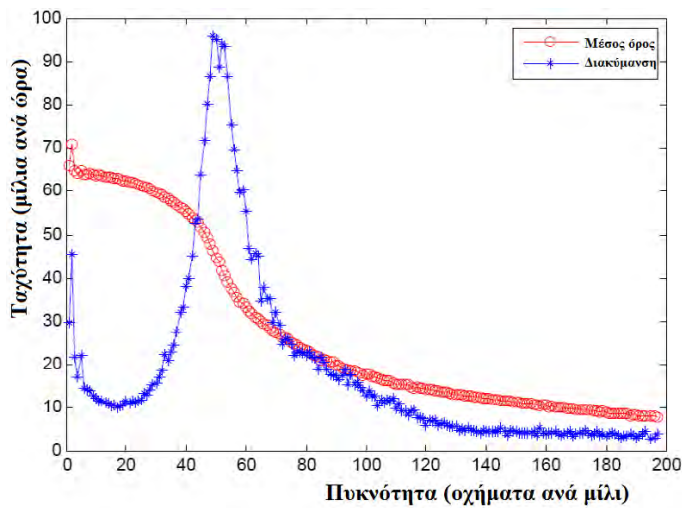
Η κυκλοφοριακή ροή θεωρείται πως παρουσιάζει αρκετές κοινές ιδιότητες με την μονοδιάστατη συμπιεστή ροή ενός ρευστού, όπως είναι η ροή των αερίων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των αερίων, η ταχύτητα των μορίων ακολουθεί την κατανομή Maxwell-Boltzmann (Εικόνα 1.5). Αξίζει να σημειωθεί πως η μεταβολή της ταχύτητας είναι διαφορετική για διαφορετικές θερμοκρασίες  $T$ . Για υψηλότερες θερμοκρασίες η μέση ταχύτητα είναι μεγαλύτερη.

Η κυκλοφοριακή όμως ροή παρουσιάζει μία διαφορετική τάση. Στα εμπειρικά δεδομένα της Εικόνας 1.6 παρατηρείται πως η διακύμανση της ταχύτητας παρουσιάζει ένα μέγιστο γύρω από τη βέλτιστη πυκνότητα, ενώ πέφτει στις δύο άκρες.

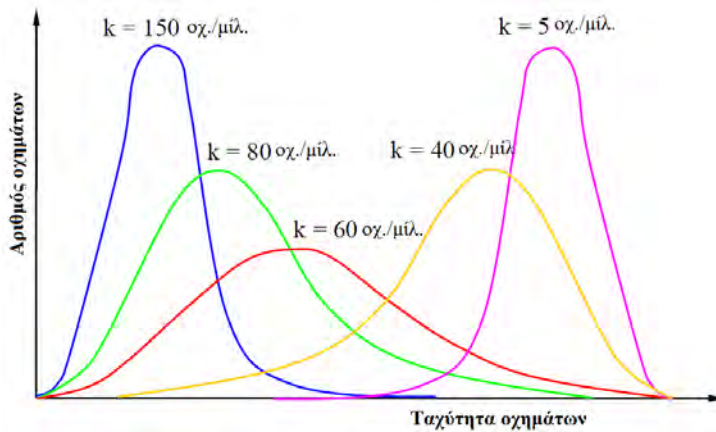
Στις Εικόνες 1.7 και 1.8 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής το οποίο και αποτελεί τη βάση του στοχαστικού θεμελιώδους διαγράμματος.



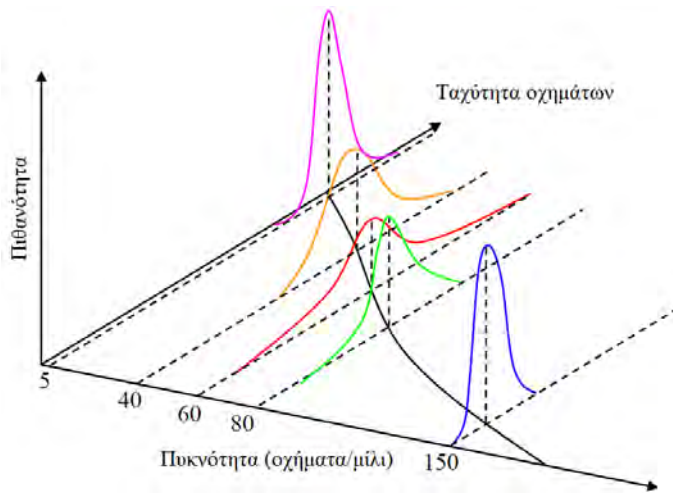
Εικόνα 1.5 : Κατανομή αερίων *Maxweel-Boltzmann*.



Εικόνα 1.6 : Εμπειρικά δεδομένα κυκλοφοριακής ροής.



Εικόνα 1.7 : Μοντέλο κυκλοφοριακής ροής. Οι ομοιότητες με την κατανομή *Maxweel-Boltzmann* είναι εμφανής.

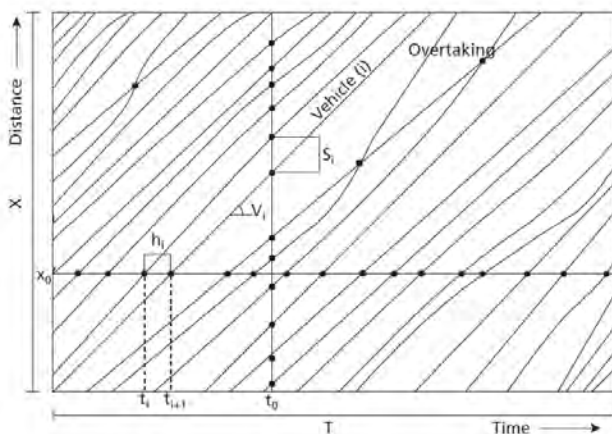


Εικόνα 1.8 : Τρισδιάστατο μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής.

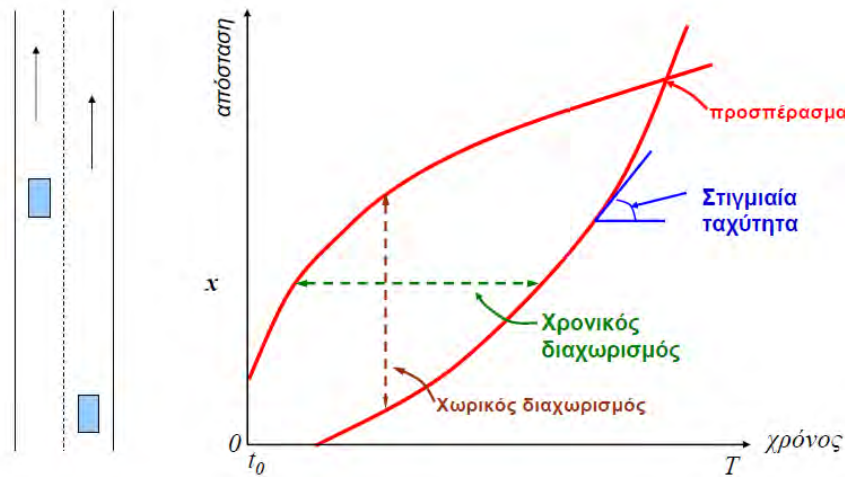
### 1.3. Τροχιές οχημάτων και μεταβλητές μικροσκοπικής ροής

Η τροχιά ενός οχήματος (για το όχημα  $i$ ) θα συμβολίζεται με  $x_i(t)$ , περιγράφει τη θέση ενός οχήματος στο χρόνο  $(t)$ , δηλαδή στην ουσία είναι η καμπύλη του διαγράμματος απόστασης-χρόνου. Στη θεωρία της κυκλοφοριακής ροής, η τροχιά των οχημάτων αποτελεί τη βασική μεταβλητή μέσω της οποίας είναι δυνατός ο υπολογισμός όλων των σχετικών μικροσκοπικών και μακροσκοπικών ποσοτήτων.

Στις Εικόνες 1.9 και 1.10 παρουσιάζονται οι τροχιές τυχαίων οχημάτων. Εύκολα, μέσω των τροχιών μπορεί να υπολογιστεί ο χωρικός διαχωρισμός (distance headway  $S_i$ ) και ο χρονικός διαχωρισμός (time headway  $h_i$ ). Επίσης διακρίνονται τα προσπεράσματα (στα σημεία όπου συναντώνται οι τροχιές). Ακόμα μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα  $\dot{x}_i(t)$  ή  $v_i = dx_i/dt$ , και η επιτάχυνση  $\ddot{x}_i(t)$  ή  $a_i = dv_i/dt$ .



Εικόνα 1.9 : Τροχιές οχημάτων. Μέσω των τροχιών μπορεί να υπολογιστεί ο χωρικός διαχωρισμός, ο χρονικός διαχωρισμός, η επιτάχυνση και η ταχύτητα [22].



Εικόνα 1.10: Τροχιές δύο οχημάτων στο χρόνο  $T$ , όπου παρατηρείται και προσπέραση [23].

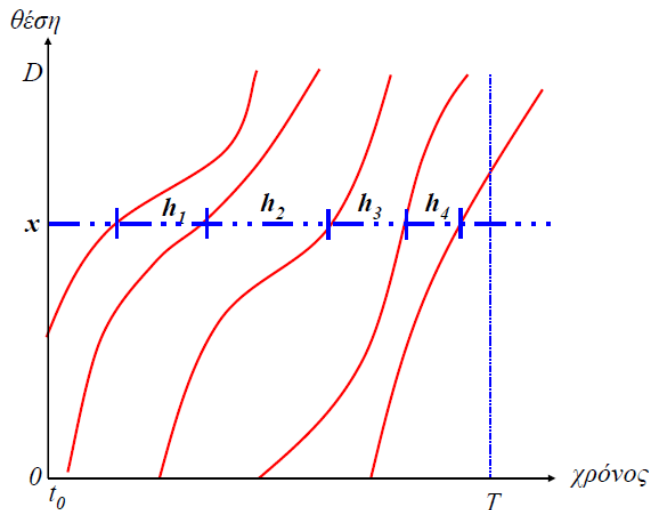
### 1.3.1. Χρονικός διαχωρισμός, χωρικός διαχωρισμός και χρονική κατάληψη

Ο χρονικός διαχωρισμός (time headway) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μικροσκοπικές μεταβλητές ροής. Ο όρος χρονικός διαχωρισμός  $h_i(x)$  αναφέρεται στο χρόνο μεταξύ των διελεύσεων δύο διαδοχικών οχημάτων από μία συγκεκριμένη διατομή ( $x$ ) [23]. Δηλαδή

$$h_i(x) = t_i(x) - t_{i-1}(x) \quad (1)$$

Ο όρος μικτός χρονικός διαχωρισμός (gross time headway  $h_{ti}$ ) αναφέρεται στο χρόνο ανάμεσα στη διέλευση του πίσω προφυλακτήρα του μπροστινού οχήματος μέχρι τη διέλευση του πίσω προφυλακτήρα του πίσω οχήματος. Ο όρος καθαρός χρονικός διαχωρισμός (net time headway or time gap  $g_{ti}$ ) αναφέρεται στο χρόνο ανάμεσα στη διέλευση του πίσω προφυλακτήρα του μπροστινού οχήματος μέχρι τη διέλευση του μπροστινού προφυλακτήρα του πίσω οχήματος [22].

Ο χρονικός διαχωρισμός εξαρτάται από το χαρακτήρα του οδηγού, από τα χαρακτηριστικά του οχήματος και από τις συνθήκες της ροής. Μέσω του ελάχιστου χρονικού διαχωρισμού μπορεί να προσδιοριστεί η χωρητικότητα ενός δρόμου. Η τιμή αυτού του ελάχιστου χρονικού διαχωρισμού είναι περίπου 1.5 δευτερόλεπτο σε συνθήκες στεγνού οδοστρώματος.



Εικόνα 1.11 : Τροχιές οχημάτων και χρονικός διαχωρισμός  $h_i$  [23].

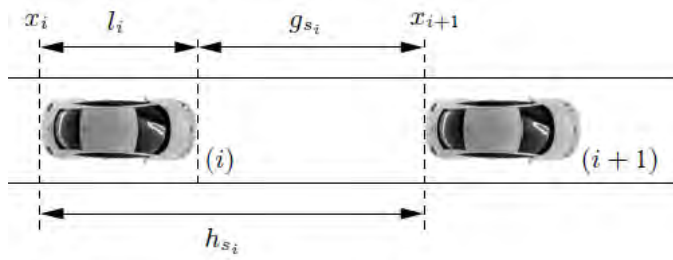
Ο όρος χωρικός διαχωρισμός  $s_i(x)$  αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή ( $t$ ) [23]. Δηλαδή

$$s_i(t) = x_i(t) - x_{i-1}(t) \quad (2)$$

Σε συνθήκες συμφόρησης, ο χωρικός διαχωρισμός καθορίζεται από την συμπεριφορά των οδηγών και εξαρτάται από τις συνθήκες της κυκλοφορίας, την ικανότητα των οδηγών, τα χαρακτηριστικά των οχημάτων και τις καιρικές συνθήκες. Σε συνθήκες ελεύθερης ροής, όπου δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των οδηγών, ο χωρικός διαχωρισμός κυρίως προσδιορίζεται από τη ζήτηση.

Ο όρος μικτός χωρικός διαχωρισμός (gross distance headway or space headway  $h_{si}$ ) αναφέρεται στο απόσταση μεταξύ του πίσω προφυλακτήρα του μπροστινού οχήματος μέχρι έως το πίσω προφυλακτήρα του πίσω οχήματος. Ο όρος καθαρός χωρικός διαχωρισμός αναφέρεται (net distance headway or space gap  $g_{si}$ ) στην απόσταση ανάμεσα στον πίσω προφυλακτήρα του μπροστινού οχήματος μέχρι τη το μπροστινό προφυλακτήρα του πίσω οχήματος [22],[24]. Αν υποθεθεί ότι  $l_i$  είναι το μήκος του πίσω οχήματος (Εικόνα 1.12) τότε ισχύει:

$$h_{si} = g_{si} + l_i \quad (3)$$



Εικόνα 1.12: Καθαρός και μικτός χωρικός διαχωρισμός [24].

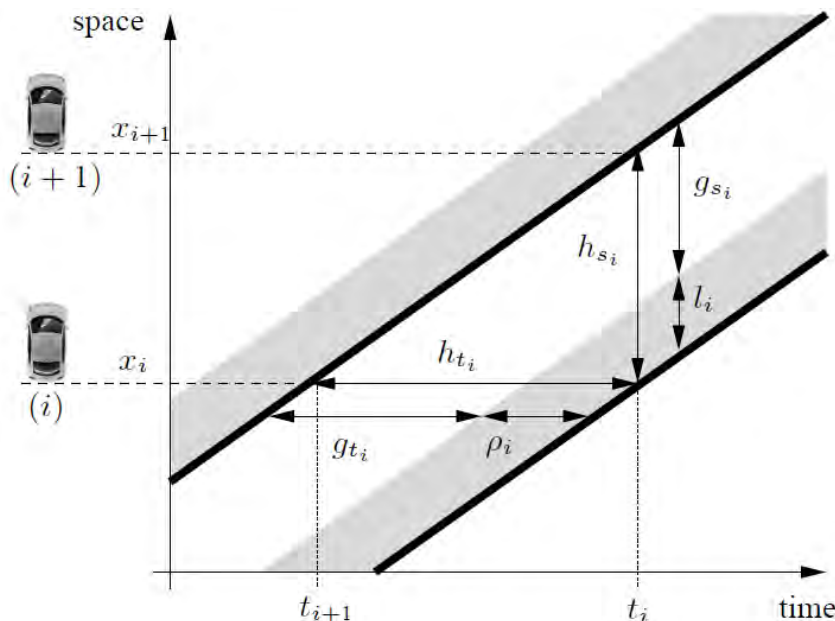
Γίνεται ξεκάθαρο πως υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ χωρικού και χρονικού διαχωρισμού. Αν υποθεθεί πως η ταχύτητα του μπροστινού οχήματος είναι  $v_{i-1}$  τότε ισχύει:

$$s_i = v_{i-1} h_i \quad (4)$$

Ο όρος χρόνος κατάληψης  $\rho_i$  αναφέρεται στο χρόνο μεταξύ της διέλευσης του μπροστινού προφυλακτήρα ενός οχήματος ( $i$ ) και του πίσω προφυλακτήρα του ίδιου οχήματος από μία συγκεκριμένη διατομή. Ισχύει :[24]

$$h_{t_i} = g_{t_i} + \rho_i \quad (5)$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι τροχιές δύο οχημάτων καθώς και τα μεγέθη του χωρικού και του χρονικού διαχωρισμού αλλά και της χρονικής κατάληψης.



Εικόνα 1.13 : Τροχιές δύο οχημάτων και ο αντίστοιχος χρονικός διαχωρισμός, χωρικός διαχωρισμός και η χρονική κατάληψη [24].

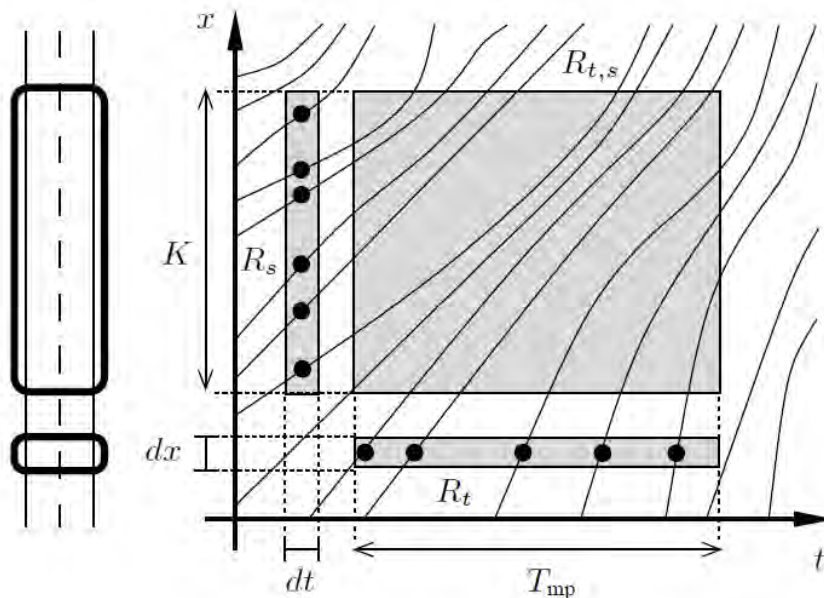


Όταν η ταχύτητα δύο οχημάτων είναι η ίδια και σταθερή, ο χρονικός διαχωρισμός ισούται με το χρόνο τον οποίο το πίσω όχημα χρειάζεται ώστε να φτάσει τη θέση του μπροστινού οχήματος. Ομοίως, ο χρόνος κατάληψης μπορεί να θεωρηθεί ως ο χρόνος που ένα όχημα χρειάζεται ώστε να διασχίσει απόσταση ίση με το μήκος του, δηλαδή  $\rho_i = l_i/v_i$ . Επίσης ισχύει:[24]

$$\frac{h_{si}}{h_{ti}} = \frac{g_{si}}{g_{ti}} = \frac{l_i}{\rho_i} = v_i \quad (6)$$

#### 1.4.Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής

Το διάγραμμα των τροχιών (διάγραμμα χρόνου-απόστασης) μπορεί να αναπαραστήσει μεγάλο μέρος της κυκλοφορία, αν γίνει η θεώρηση ότι κάθε τροχιά επηρεάζει και επηρεάζεται από την άλλη και όλες μαζί παρουσιάζουν μία κοινή ομαδική συμπεριφορά. Το σχήμα της Εικόνας 1.14 έχουν επιλεγεί μαζί πολλές τροχιές μεμονωμένων οχημάτων και παρουσιάζονται κάποιες καινούριες περιοχές μέτρησης. Αντί να εξετάζεται το κάθε όχημα μεμονωμένα, πραγματοποιείται εστίαση σε ένα ποιο συνολικό μακροσκοπικό επίπεδο [24].



Εικόνα 1.14: Οι μακροσκοπικές μεταβλητές προκύπτουν από την περιοχή  $R_{t,s}$  των μικροσκοπικών τροχιών [24].

Παρακάτω ορίζονται οι προαναφερθείσες περιοχές μέτρησης [24]:

$R_t$ : αναφέρεται στις μετρήσεις σε μία συγκεκριμένη περιοχή ( $dx$ ) κατά τη διάρκεια της μέτρησης  $T_{mp}$  (measure period).

$R_s$ : αναφέρεται στις μετρήσεις σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο ( $dt$ ) μίας περιοχής  $K$ .

$R_{t,s}$ : αναφέρεται σε μία γενικευμένη συνολική περιοχή μέτρησης. Παρότι μπορεί να πάρει πολλά σχήματα, στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ορθογώνια.

Η επιλογή του μεγέθους της περιοχής της μέτρησης έχει μεγάλη σημασία. Αν εξεταστεί μία αρκετά μεγάλη περιοχή τότε τα κάποια δυναμικά φαινόμενα μπορεί να μην γίνουν ευδιάκριτα και να παραληφθούν. Επίσης αν η περιοχή είναι πολύ μικρή μπορεί να παρεμποδιστεί η συνεχής επεξεργασία αφού γίνονται εμφανής η διακριτή μικροσκοπική φύση της κυκλοφοριακής ροής.

#### 1.4.1. Κυκλοφοριακός φόρτος, Πυκνότητα, Ταχύτητα και Χρονική κατάληψη

Ο κυκλοφοριακός φόρτος (flow or volume  $q$ ) αναφέρεται στον αριθμό των οχημάτων ( $n$ ), που περνάν από μία συγκεκριμένη διατομή ( $x$ ) κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος ( $T$ ). Δηλαδή:

$$q = \frac{n}{T} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n h_i} = \frac{n}{\bar{h}} \quad (7)$$

Ενώ για την περιοχή  $R_t$  του σχήματος της Εικόνας 1.14 ισχύει:

$$q = \frac{N}{T_{mp}} \quad (8)$$

Η σχέση (7) υποδηλώνει πως ο κυκλοφοριακός φόρτος εξαρτάται άμεσα από το μέσο χρονικό διαχωρισμό  $\bar{h}$ . Επομένως, γίνεται αντιληπτό πως ένα μακροσκοπικό μέγεθος έχει άμεση σχέση με την μικροσκοπική συμπεριφορά.

Η πυκνότητα (density or concentration  $K$ ) αναφέρεται στον αριθμό οχημάτων ( $m$ ) ανά μονάδα μήκους ( $X$ ). Οπότε γίνεται αντιληπτό πως η μέτρηση της πυκνότητα γίνεται στιγμιαία (instantaneous). Δηλαδή ισχύει:

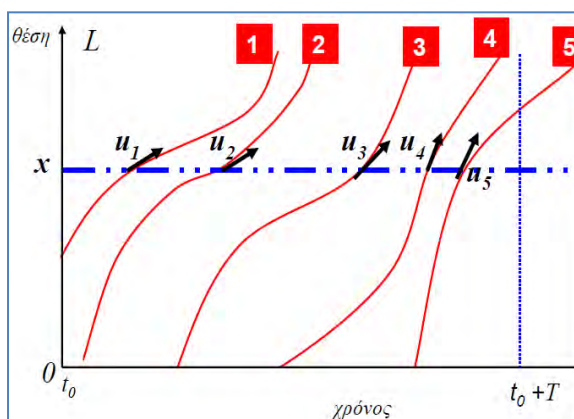
$$K = \frac{m}{X} = \frac{m}{\sum_{i=1}^m s_i} = \frac{1}{\bar{s}} \quad (9)$$

Ενώ για την περιοχή  $R_S$  του σχήματος της εικόνας 1.14 ισχύει:

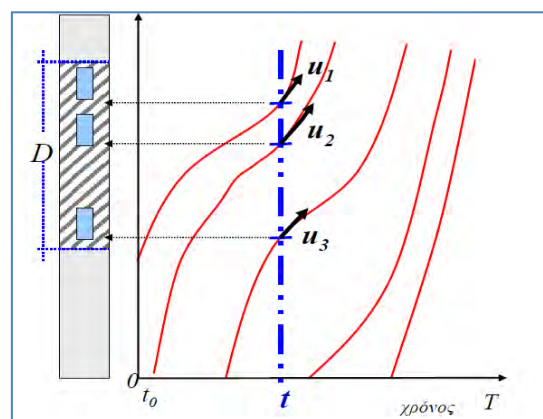
$$k = \frac{N}{K} \quad (10)$$

Η σχέση (9), επίσης δείχνει την σχέση ενός μακροσκοπικού μεγέθους με μικροσκοπική συμπεριφορά. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέτρηση του φόρτου είναι γενικότερα ευκολότερη αφού χρειάζεται εξοπλισμός διατομής (π.χ. ανιχνευτές επαγωγικού βρόχου inductive loops), ενώ η πυκνότητα μετριέται δυσκολότερα, αφού απαιτεί την παρατήρηση ενός οδικού τμήματος στιγμιαία (π.χ. μέσω μίας αεροφωτογραφίας). Η πυκνότητα μεταβάλλεται από την μηδενική τιμή (όταν κανένα όχημα δεν υπάρχει στο οδικό τμήμα), μέχρι μία μέγιστη τιμή όταν το τμήμα είναι πλήρες και τα οχήματα πλησιάζουν το ένα στο άλλο ενώ βρίσκονται σε στάση.

Παρόμοια με τους παραπάνω ορισμούς η μέση ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους: με μετρήσεις σε μία διατομή κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, ή με στιγμιαίες μετρήσεις για ένα ολόκληρο οδικό τμήμα. Οπότε ως μέση χρονική ταχύτητα (local mean speed or time-mean speed  $u_L$  ή  $\bar{u}_t$ ) ορίζεται ο αριθμητικός μέσος των στιγμιαίων ταχυτήτων των οχημάτων που διέρχονται από μία διατομή του δρόμου ( $x$ ) κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος  $T$ . Ενώ, ως μέση χωρική ταχύτητα (instantaneous mean speed or local-mean speed  $u_M$  ή  $\bar{u}_s$ ) ορίζεται ο αριθμητικός μέσος των στιγμιαίων ταχυτήτων των οχημάτων που κινούνται σε ένα τμήμα του δρόμου  $D$  σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή ( $t$ ).



Εικόνα 16: Μέση χρονική ταχύτητα [23].



Εικόνα 15: Μέση χωρική ταχύτητα [23].

Ως χρονική κατάληψη ορίζεται ο συνολικός χρόνος που ένας ανιχνευτής σε μία διατομή καλύπτεται από οχήματα κατά την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου  $T$ . Η χρονική κάλυψη χρησιμοποιείται εναλλακτικά ως προς την πυκνότητα.

### 1.4.2. Θεμελιώδες σχέση της κυκλοφοριακής ροής

Η θεμελιώδης σχέση της κυκλοφοριακής ροής ή η εξίσωση συνέχειας (continuity equation) είναι:

$$q = K \times u_s \quad (11)$$

όπου:

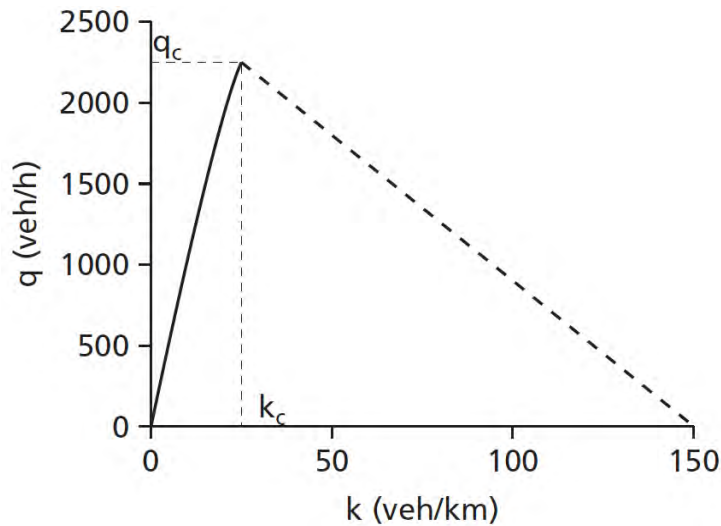
- $q$ : ο κυκλοφοριακός φόρτος
- $u_s$ : η μέση χωρική ταχύτητα
- $K$ : η πυκνότητα

Η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση του στιγμιαίου χαρακτηριστικού της πυκνότητα με το τοπικό χαρακτηριστικό του κυκλοφοριακού φόρτου. Τα κυκλοφοριακά μεγέθη είναι στοχαστικά και μόνο σαν μέσοι όροι μπορούν να εισαχθούν στην σχέση. Από τη θεμελιώδη σχέση μπορούν να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο όταν επικρατούν σταθερές συνθήκες σε όλο το οδικό τμήμα (συνθήκες ελεύθερης ροής οχημάτων χωρίς επιδράσεις από διασταυρώσεις, σηματοδότηση κλπ.), ενώ είναι ακατάλληλη για αστικά δίκτυα.

## 1.5. Θεμελιώδες διαγράμματα κυκλοφορίας

### 1.5.1. Διάγραμμα Φόρτου-Πυκνότητας

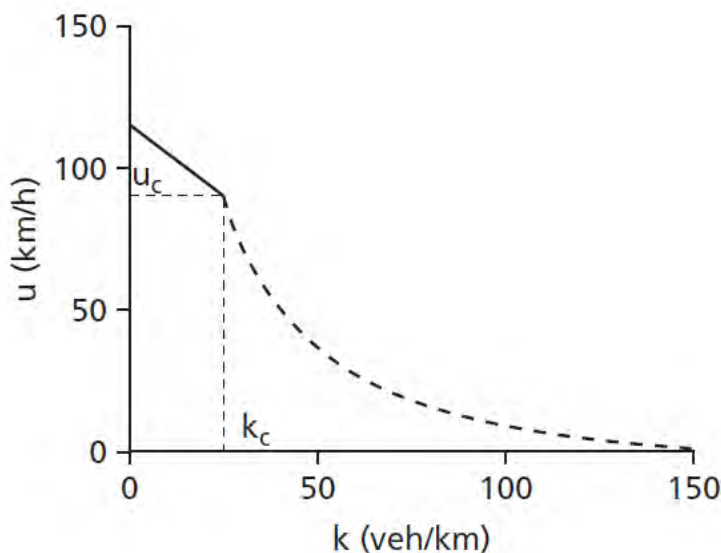
Όπως φαίνεται και στο σχήμα της εικόνας 1.17 η κυκλοφοριακή ροή μπορεί να βρίσκεται σε μη συμφορημένη κατάσταση (για  $K < K_c$ ) ή σε κατάσταση κυκλοφοριακής συμφόρησης (για  $K > K_c$ ). Στην μη συμφορημένη κατάσταση, όταν η πυκνότητα είναι μηδενική τότε και ο φόρτος είναι μηδέν. Καθώς αυξάνεται ο η πυκνότητα, αυξάνεται και ο φόρτος μέχρι το σημείο που ο φόρτος φτάνει την μέγιστη τιμή του,  $q_{max}$  ή  $q_c$  (Capacity Flow), η οποία ισούται με τη χωρητικότητα του δρόμου. Όταν ο φόρτος ισούται με τη χωρητικότητα, τότε η πυκνότητα παίρνει την χαρακτηριστική της τιμή και συμβολίζεται με  $K_m$  ή  $K_c$  (Capacity destiny). Στην συνέχεια, στην κατάσταση κυκλοφοριακής συμφόρησης, περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας συνεπάγεται και μείωση του φόρτου, μέχρι την κατάσταση όπου η κυκλοφορία μηδενίζεται ( $q=0$ ) και η πυκνότητα φτάνει στην μέγιστη τιμή της  $K_{jam}$ . (Πυκνότητα συμφόρησης).



Εικόνα 1.17: Παράδειγμα Θεμελιώδους διαγράμματος Φόρτου-Πυκνότητας [22].

### 1.5.2. Θεμελιώδες διάγραμμα Ταχύτητας-Πυκνότητας

Όταν η πυκνότητα  $K$  ισούται με το μηδέν τότε η ταχύτητα ισούται με την ταχύτητα ελεύθερης ροής ( Free flow speed  $u_{free}$ ). Σε αυτήν την περίπτωση ο οδηγός μπορεί να επιλέξει την ταχύτητα που θα αναπτύξει. Η ταχύτητα αυτή δεν είναι απεριόριστη αλλά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου. Δηλαδή από την οριζοντιογραφία, την μηκοτομή, τη διατομή (λωρίδες κυκλοφορίας) και τα παράπλευρα εμπόδια.



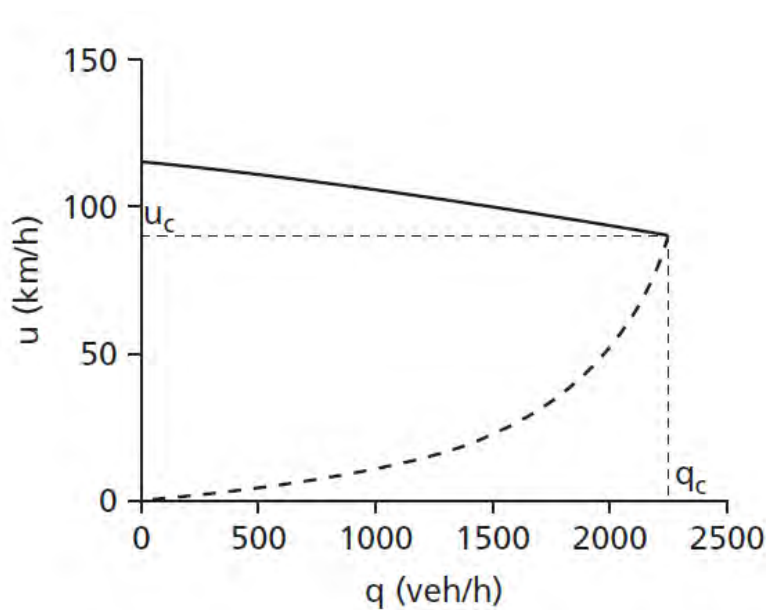
Εικόνα 1.18: Παράδειγμα Θεμελιώδους διαγράμματος Ταχύτητας-Πυκνότητας [22].

Όταν η πυκνότητα φτάσει στην μέγιστη τιμή της  $K=K_{\max}$  ή  $K=K_{\text{jam}}$  (Πυκνότητα συμφόρησης), τότε τα οχήματα βρίσκονται σε στάση και έχουν μηδενική ταχύτητα.

Τέλος, όταν η πυκνότητα πάρει την χαρακτηριστική της τιμή  $K_c$  τότε η ταχύτητα συμβολίζεται με  $u_c$ .

### 1.5.3. Θεμελιώδες διάγραμμα Φόρτου-Ταχύτητας

Στην περίπτωση της μη συμφορημένης κατάστασης, όταν ο φόρτος είναι μηδενικός, τότε η ταχύτητα ισούται με την ταχύτητα ελεύθερης ροής. Καθώς ο φόρτος αυξάνεται η ταχύτητα μειώνεται, μέχρι το σημείο που ο φόρτος φτάσει την μέγιστη τιμή του  $q_c$ . Στην συνέχεια, στην περίπτωση της κατάστασης κυκλοφοριακής συμφόρησης ο φόρτος μειώνεται και ταυτόχρονα μειώνεται και η ταχύτητα, μέχρι την κατάσταση όπου η ταχύτητα μηδενίζεται και η κυκλοφορία διακόπτεται.



Εικόνα 1.19: Παράδειγμα Θεμελιώδους διαγράμματος Ταχύτητας-Φόρτου [22].

### 1.6. Μοντέλα της κυκλοφοριακής ροής

Τα μοντέλα της κυκλοφοριακής ροής χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της κυκλοφορίας, που βοηθούν στην λήψη στρατηγικών αποφάσεων για κατασκευή νέων συγκοινωνιακών υποδομών ή στο λειτουργικό έλεγχο των εγκαταστάσεων. Για παράδειγμα, το μοντέλα της κυκλοφοριακής ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν με

σκοπό την εκ των προτέρων αξιολόγηση μίας νέας συγκοινωνιακής υποδομής. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη φαινομένων συμφόρησης ή ακόμα και για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας.

Η κατηγοριοποίηση των κυκλοφοριακών μοντέλων μπορεί να γίνει σε πολλές διαστάσεις. Αναλόγως με το είδος των μεταβλητών μπορούν να διαχωριστούν σε συνεχή (continuous) και διακριτά (discrete). Επίσης, με βάση τα χαρακτηριστικά τους μπορούν να διακριθούν σε αιτιοκρατικά ή ντετερμινιστικά (deterministic) και σε προσδιοριστικά ή στοχαστικά (stochastic). Ένα ντετερμινιστικό μοντέλο δεν υπόκειται σε τυχαιότητα. Τα στοχαστικά μοντέλα καλούνται και πειράματα τύχης και η μεθοδολογία ανάπτυξης των μοντέλων μπορεί να περιλαμβάνει πιθανότητες και στατιστική, αριθμητικές εξισώσεις και διαφορικές εξισώσεις. Ο πιο συνηθισμένος διαχωρισμός είναι αυτός της μικροσκοπικής και μακροσκοπικής προσέγγισης. Ωστόσο, αυτός ο διαχωρισμός δεν είναι απόλυτα σαφής, αφού υπάρχουν και τα υβριδικά μοντέλα. Για αυτό το λόγο, τα μοντέλα διαχωρίζονται σύμφωνα με:

1. Τον τρόπο αναπαράστασης. Δηλαδή αναπαράσταση της κυκλοφοριακής ροής (μακροσκοπικά), μίας ομάδας οδηγών (μακροσκοπικά) ή μεμονωμένων οδηγών (μικροσκοπικά).
2. Τη βασική θεωρία συμπεριφοράς, η οποία μπορεί να βασίζεται στα χαρακτηριστικά της ροής (μακροσκοπικά) ή σε μεμονωμένου οδηγού (μικροσκοπική).

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση συνοψίζεται στον Πίνακα 1.1:

Πίνακας 1.1: Διάκριση των μοντέλων [22].

Αναπαράσταση	Κανόνες Συμπεριφοράς	
	Μικροσκοπικοί	Μακροσκοπικοί
Με βάση το όχημα	Μοντέλα μικροσκοπικής ροής	Μοντέλα Particle
Με βάση τη ροή	Μοντέλα Gas-Kinetic	Μακροσκοπικά μοντέλα

### 1.6.1. Μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης

Κατά την μικροσκοπική θεώρηση της κυκλοφορίας, η συμπεριφορά των οδηγών (χρονικός διαχωρισμός, η ταχύτητα οδήγησης και η λωρίδα οδήγησης), επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που μπορεί να σχετίζονται με τον οδηγό ή το όχημα (χαρακτηριστικά οχήματος, εμπειρία οδηγού, ηλικία), τις συνθήκες κυκλοφορίας (μέσες ταχύτητες, πυκνότητες), την κατάσταση των υποδομών, τους κανόνες οδήγησης και τον καιρό. Στα προηγούμενα χρόνια έχουν προταθεί διάφορες θεωρίες σχετικές με τους τρόπους με τους οποίους οι παραπάνω συνθήκες επηρεάζουν την παρατηρούμενη οδηγική συμπεριφορά.

Μία σημαντική κατηγοριοποίηση των μικροσκοπικών μοντέλων μπορεί να γίνει με βάση την κατεύθυνση της κίνησης που μελετάται. Μπορούν να διαχωριστούν δύο βασικές κατευθύνσεις κίνησης: η διαμήκη στο δρόμο κίνηση (longitudinal tasks) και εγκάρσια στο δρόμο κίνηση (lateral tasks). Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η μελέτη της επιτάχυνση, της ταχύτητας, του χωρικού διαχωρισμού κ.τ.λ. ενώ στη δεύτερη κατηγορία η μελέτη του φαινομένου της αλλαγής λωρίδας και της προσπέρασης.

Πίνακας 1.2: Διαχωρισμός των μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης [22].

	Διαμήκης κίνηση	Εγκάρσια κίνηση
<b>Υποδομή</b>	Ταχύτητα ελεύθερης ροής	Διατήρηση της πορείας
<b>Αλληλεπίδραση</b>	Car-following	Υποχρεωτική και επιθυμητή αλλαγή λωρίδας

Ένα μικροσκοπικό μοντέλο περιγράφει την κίνηση μεμονωμένων οχημάτων, η οποία θεωρείται ότι επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά των οδηγών και των οχημάτων, την αλληλεπίδραση μεταξύ των οδηγών και των οχημάτων, την αλληλεπίδραση μεταξύ των οχημάτων και του οδοστρώματος και τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας. Στα περισσότερα όμως, μικροσκοπικά μοντέλα θεωρείται πως ένας οδηγός θα ανταποκριθεί μόνο στο όχημα που βρίσκεται στην ίδια λωρίδα ακριβώς μπροστά του (the leader).

Όταν ο αριθμός των οχημάτων είναι πολύ μικρός και οι αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων μεγάλες, ο οδηγός μπορεί να επιλέξει ελεύθερα την ταχύτητά του σύμφωνα με τις ικανότητές του, την κατάσταση του οδοστρώματος και το όριο ταχύτητας. Δηλαδή σε κάθε περίπτωση η ταχύτητά του δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη άλλων οχημάτων. Η ταχύτητα στην οποία στοχεύει ένας οδηγός καλείται ελεύθερη ταχύτητα ή



επιθυμητή ταχύτητα. Στην πραγματικότητα, η ελεύθερη ταχύτητα διαφέρει από οδηγό σε οδηγό, αλλά και για τον ίδιο οδηγό διαφέρει σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Τα περισσότερα μικροσκοπικά μοντέλα θεωρούν πως η ελεύθερη ταχύτητα έχει σταθερή τιμή για κάθε οδηγό κάτι που όπως αποδεικνύεται και σε αυτήν την εργασία δεν ισχύει. Όταν οι συνθήκες της κυκλοφορίας επιδεινωθούν και οι αποστάσεις μεταξύ των οδηγών μειωθούν, οι οδηγοί δεν μπορούν πλέον να επιλέξουν ελεύθερα την ταχύτητα τους, αφού υπάρχει περίπτωση να κινείται μπροστά του ένα πιο αργό όχημα. Επομένως, ο οδηγός αναγκάζεται να προσαρμόσει την ταχύτητά του στις επικρατούσες συνθήκες κυκλοφορίας.

Τα πιο συνηθισμένα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας είναι το μοντέλο car-following το οποίο περιγράφει τη διαμήκη κίνηση, και τα μοντέλα gap-acceptance και lane-changing που αφορούν την εγκάρσια κίνηση των οχημάτων. Το πλεονέκτημα των μικροσκοπικών μοντέλων είναι κυρίως η μεγάλη λεπτομέρεια στην περιγραφή της κυκλοφορίας. Χρησιμοποιώντας αυτά τα μοντέλα, καθίσταται δυνατό να συμπεριληφθεί ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας των οχημάτων, του οδικού δικτύου και των ειδικών συνθηκών που θα προσομοιωθούν. Ωστόσο, τα μικροσκοπικά μοντέλα έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα. Οι μεγάλες απαιτήσεις σε όγκο δεδομένων και η πολυπλοκότητα που απαιτεί ο σχεδιασμός του μοντέλου αποτελούν μειονεκτήματα αυτής της προσέγγισης, λόγω του μεγάλου κόστους σε χρόνο και σε υπολογιστικούς πόρους. Η επιτυχία των μικροσκοπικών μοντέλων σχετίζεται με την ανάλυση σχετικά μικρού μεγέθους δικτύων και κατά συνέπεια η εφαρμογή τους σε μεσαία προς μεγάλα μεγέθους δίκτυα απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και προσπάθεια για ένα κατάλληλα διαμορφωμένο μοντέλο [29].

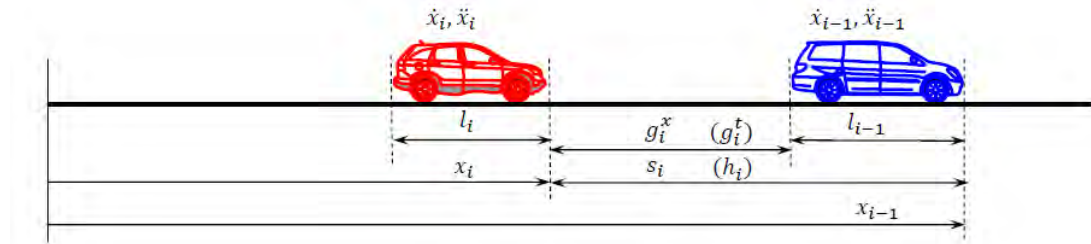
Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατηγορίες στις οποίες μπορούν να διαχωριστούν τα μικροσκοπικά μοντέλα διαμήκης κίνησης (longitudinal tasks).

#### **1.6.1.1. Μοντέλα ασφαλής απόστασης (Safe-distance models)**

Το πρώτο μοντέλο Car-following αναπτύχθηκε το 1953 από τον Pipes [5]. Βασίζεται στην παραδοχή ενός εμπειρικού κανόνα. Από εδώ και στο εξής, ο οδηγός που ακολουθεί (follower) θα συμβολίζεται  $i-1$ , ενώ αυτός που προπορεύεται (leader) με  $i$ . Ο κανόνας λοιπόν που βασίστηκε το μοντέλο του Pipes είναι ο εξής:

«Ένας καλός κανόνας για την περίπτωση όπου ακολουθείς ένα άλλο όχημα, είναι να αφήνεις τουλάχιστον ένα μήκος αυτοκινήτου απόσταση με το μπροστινό όχημα για κάθε δέκα μίλια ταχύτητα την ώρα.»

Για παράδειγμα, όταν ένα όχημα ταξιδεύει με 20 μίλια/ώρα η ιδανική απόσταση από το μπροστινό του σύμφωνα με τον κανόνα είναι δύο φορές το μήκος οχήματος.



Εικόνα 1.20: Τα δύο οχήματα leader ( $i-1$ ) και follower ( $i$ ), το μήκος οχήματος  $l$ , ο χωρικός διαχωρισμός  $g_i^x$ , και ο χρονικός διαχωρισμός  $g_i^t$  [5].

Οπότε σύμφωνα με το σχήμα της Εικόνας 1.20:

$$g_i^x(t)_{min} = [(x_{i-1}(t) - x_i(t)) - l_{i-1}]_{min} = (s_i(t) - l_{i-1})_{min} = \frac{\dot{x}_i(t)}{0.447 \times 10} l_i$$

$$s_i(t)_{min} = 1.34\dot{x}_i(t) + l_i \quad (12)$$

Η ταχύτητα είναι μετρημένη μέτρα ανά δευτερόλεπτο αφού  $1\text{ml/h}=0.447\text{m/s}$ .

Μία παρόμοια προσέγγιση έγινε το 1958 από τον Forbes [3] όπου το μοντέλο που ανέπτυξε στηρίζεται στον εξής κανόνα:

«Για να επιτευχθεί η ασφάλεια, η χρονική απόσταση μεταξύ δύο οχημάτων πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερη ή ίση του χρόνου αντίδρασης του πίσω οδηγού.»

Οπότε αν υποθεθεί ότι ο χρόνος αντίδρασης ισούται με  $\tau_i$  τότε πάλι σύμφωνα με την Εικόνα 1.20:

$$g_i^t(t)_{min} = h_i(t) - \frac{l_i}{\dot{x}_i} \geq \tau_i$$

$$s_i(t) \geq \tau_i \dot{x}_i + l_i \quad (13)$$

Από τις σχέσεις (12) και (13) συμπεραίνεται πως η μόνη διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα είναι ο συντελεστής της ταχύτητας. Και τα δύο μοντέλα, έχουν πολλές φορές

στο παρελθόν συγκριθεί με εμπειρικά δεδομένα από μετρήσεις. Τα κυριότερο συμπέρασμα ήταν ότι, σύμφωνα με τη θεωρία του Pipes, οι χρονικοί διαχωρισμοί είναι λίγο μικρότεροι από τους πραγματικούς, και οι ταχύτητες μεγαλύτερες. Παρόλα αυτά και παρότι το μοντέλο είναι πολύ απλό τα αποτελέσματα της σύγκρισης ήταν αρκετά εκπληκτικά.

Το 1979 ο Gipps [11] πρότεινε ένα μοντέλο ασφαλής απόστασης με δύο κλάδους (two regime model). Το μοντέλο του Gipps χρησιμοποιείται στο λογισμικό AIMSUN. Αποτελείται από τον κλάδο της ελεύθερης οδήγησης (free driving regime), και τον κλάδο του car-following (constrained regime).

Στον κλάδο της ελεύθερης οδήγησης ο οδηγός μπορεί ελεύθερα να οδηγήσει, ή να επιταχύνει στην επιθυμητή του ταχύτητα  $u_{desired}$ :

$$\dot{x}_i^{free}(t+T) = \dot{x}_i(t) + 2.5a_i^{max}T \left(1 - \frac{\dot{x}_i(t)}{u_{desired}}\right) \sqrt{0.025 + \frac{\dot{x}_i(t)}{u_{desired}}} \quad (14)$$

Όπου:

$a_i^{max}$ : η μέγιστη επιθυμητή επιτάχυνση

$T$ : ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού

Στον κλάδο του car-following θεωρείται ότι ο πίσω οδηγός  $i$  μπορεί να αφήσει ικανή απόσταση από τον μπροστινό  $i-1$ . Επίσης, ότι έχει αρκετό χώρο, σύμφωνα με την επιθυμητή μέγιστη επιβράδυνσή ( $b_i^{max}$ ) του για να μπορέσει να σταματήσει σε μία ασφαλή απόσταση, όταν ο μπροστινός του θα φρενάρει απότομα ( $b_{i-1}^{max}$ ):

$$\dot{x}_i^{con}(t+T) = b_i^{max}T + \sqrt{b_i^{max^2}T^2 - b_i^{max}(2(x_{i-1} - s_{n-1} - x_i) - \dot{x}_i(t)T - \frac{\dot{x}_{i-1}(t)^2}{b_{i-1}^{max}})} \quad (15)$$

Όπου:

$s_{n-1}$ : η ελάχιστη επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε στάση, μαζί με το μήκος του οχήματος.

Γίνεται κατανοητό πως για να εξασφαλιστεί η ευστάθεια πρέπει η  $b_i^{max}$  να είναι μεγαλύτερη από τη  $b_{i-1}^{max}$ . Οπότε τελικά η ταχύτητα του πίσω οδηγού ισούται με:

$$\dot{x}_i(t+T) = \min(\dot{x}_i^{con}(t+T), \dot{x}_i^{free}(t+T)) \quad (16)$$

### 1.6.1.2. Μοντέλα Ερεθίσματος-Ανταπόκρισης (Stimulus-Response models)

Ωστόσο, τα μοντέλα ασφαλής απόστασης δεν είναι ικανά να περιγράψουν ακριβώς αρκετά φαινόμενα που παρατηρούνται σε πραγματικές συνθήκες, όπως είναι η υστέρηση και οι αστάθειες της κυκλοφορίας. Τα μοντέλα ερεθίσματος-ανταπόκρισης είναι δυναμικά και μπορούν να περιγράψουν με μεγαλύτερη ρεαλιστικότητα τις αντιδράσεις των οδηγών σε ερεθίσματα όπως είναι οι αλλαγές των αποστάσεων και των ταχυτήτων. Τα συγκεκριμένα μοντέλα είναι κυρίως εφαρμόσιμα στην περίπτωση μεγάλης κυκλοφοριακής ροής, όπου οι πιθανότητες προσπέρασης είναι μικρές και οι οδηγοί αναγκάζονται να ακολουθούν τον μπροστινό τους όχημα. Πραγματοποιείται η παραδοχή πως οι οδηγοί δεν αφήνουν μεγάλη απόσταση από μπροστινό τους, ώστε να συμβεί προσπέραση, αλλά ταυτόχρονα, θεωρείται ότι αφήνουν τις ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας.

Η βασική θεώρηση των συγκεκριμένων μοντέλων είναι ότι όταν δυο οχήματα κινούνται στον ίδιο δρόμο, το όχημα που ακολουθεί μεταβάλλει την συμπεριφορά του σύμφωνα με τις μεταβολές της συμπεριφοράς του προπορευόμενου οχήματος. Η απόκριση του πίσω οχήματος εξαρτάται από την μεταξύ τους απόσταση, τη διαφορά της ταχύτητας, το χρόνο αντίδρασης και την απόδοση του οχήματος.

Για τη διαμόρφωση των μοντέλων υιοθετείται ο παρακάτω μη συνεχής μηχανισμός ερεθίσματος-ανταπόκρισης:

$$\text{Ανταπόκριση} = \lambda \times \text{Ερέθισμα} \quad (17)$$

Όπου  $\lambda$  είναι ένας συντελεστής ευαισθησίας.

Το ερέθισμα θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ταχύτητα, την σχετική ταχύτητα, την απόσταση μεταξύ των οχημάτων, την επιτάχυνση, τις επιδόσεις του οχήματος, κλπ. Το γραμμικό μοντέλο του Chandler (1958) [21] θεωρεί ως ερέθισμα μόνο την σχετική ταχύτητα. Σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο ισχύει [12]:

$$\text{Ερέθισμα}(t) = \dot{x}_{i-1}(t-T) - \dot{x}_i(t-T) \quad (18)$$

Όπου  $\dot{x}_{i-1}(t-T)$  η ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος (lead vehicle),  $\dot{x}_i(t-T)$  είναι η ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί (following vehicle) και  $T$  ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού που ακολουθεί. Στα μοντέλα ερεθίσματος-ανταπόκρισης, θεωρείται πως οι οδηγοί ελέγχουν την επιτάχυνσή τους. Επομένως ισχύει:

$$\text{Ανταπόκριση}(t) = a_i(t) = \ddot{x}_i(t) \quad (19)$$

Όπου  $a_i(t)$  και  $\ddot{x}_i(t)$  είναι η επιτάχυνση του οχήματος που ακολουθεί. Επομένως από τις σχέσεις (17), (18) και (19) προκύπτει:

$$\ddot{x}_i(t) = \lambda \times (\dot{x}_{i-1}(t-T) - \dot{x}_i(t-T)) \quad (20)$$

Η τιμή του συντελεστή  $\lambda$  για την επίτευξη της τοπικής ευστάθειας πρέπει να είναι μικρότερη του 0.5, ενώ για την εξασφάλιση της ασυμπτωτικής ευστάθειας πρέπει να ισχύει η σχέση:  $\lambda \times T < 0.5$  [12].

Στο γραμμικό μοντέλο του Chandler θεωρείται πως η επιτάχυνση ενός οχήματος που ακολουθεί ένα άλλο είναι τελείως ανεξάρτητη από την μεταξύ τους απόσταση. Ωστόσο το 1959 ο Greenberg [2] θεώρησε ότι όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων, τόσο μεγαλύτερη επιρροή ασκεί το μπροστινό όχημα στο όχημα που ακολουθεί. Επομένως, συντελεστής ευαισθησίας  $\lambda$  δεν είναι πλέον μια σταθερά αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογος του χωρικού διαχωρισμού των οχημάτων:

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{s(t)} \quad (21)$$

Όπου  $\lambda_1$  είναι μία νέα σταθερά, η οποία θεωρείται πλέον ως ο συντελεστής ευαισθησίας. Χρησιμοποιώντας την σχέση (20), η (21) γίνεται:

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{\lambda_1}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))} (\dot{x}_{i-1}(t-T) - \dot{x}_i(t-T)) \quad (22)$$

Για την εξασφάλιση της ευστάθειας του μοντέλου του Greenberg θα πρέπει να ισχύει  $\lambda \times T/S < 0.5$  [12].

Λίγο αργότερα το 1691, ο Eddie θεώρησε πως ο συντελεστής  $\lambda$  εκτός του ότι είναι αντίστροφος ανάλογος από την απόσταση μεταξύ των οχημάτων, είναι ανάλογος της ταχύτητας του πίσω οχήματος. Δηλαδή:

$$\lambda = \frac{\lambda_2}{s(t)} \times \dot{x}_i(t) \quad (23)$$

Όπου  $\lambda_2$  είναι ο νέος συντελεστής ευαισθησίας. Οπότε προκύπτει και ο γενικευμένος τύπος που αντιπροσωπεύει την ομάδα μοντέλων που ονομάζονται General Motor Models (GM):

$$\ddot{x}_i(t+T) = a_{l,m} \frac{\dot{x}_i(t+T)}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))} (\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)) \quad (24)$$

Όπου  $a_{l,m}$  μία σταθερά που προσδιορίζεται πειραματικά. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που έχουν πάρει οι συντελεστές  $l$  και  $m$ :

Πίνακας 1.3: Τα Μοντέλα GM και οι συντελεστές  $l$  και  $m$ .

<b>m</b>	<b>l</b>	<b>Μοντέλο</b>
0	0	Chandler (1958)
0	2	Greenshields (1935)
0	1	Greenberg (1959)
0	3/2	Drew (1965)
1	2	Underwood, Edie
1	3	Drake (1967)
0	N+1	Pipes-Munjaj

Το μοντέλο του Tampere [13] είναι ένα μοντέλο ερεθίσματος-ανταπόκρισης δύο κλάδων. Ο κλάδος της ελεύθερης ροής δίνεται από τη σχέση:

$$\ddot{x}_i^{free} = c_3 (u_{desired}(t) - \dot{x}_i(t)) \quad (25)$$

Όπου  $u_{desired}$  είναι η επιθυμητή ταχύτητα ενώ  $c_3$  είναι ένας συντελεστής ευαισθησίας του οδηγού που ακολουθεί και αναφέρεται στη διαφορά της ταχύτητάς του με την επιθυμητή ταχύτητα. Ο κλάδος του car-following αποτελείται από την σχέση:

$$\ddot{x}_i^{con} = c_1 \Delta \dot{x}_{i-1,i}(t) + c_2 (\Delta x_{i-1,i}(t) - \Delta x(t)^*) \quad (26)$$

Όπου  $c_1$  είναι ένας συντελεστής ευαισθησίας που σχετίζεται με την σχετική ταχύτητα,  $c_2$  ένας συντελεστής ευαισθησίας που αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ του χωρικού διαχωρισμού και του επιθυμητού διαχωρισμού, ενώ η ποσότητα  $\Delta x(t)^*$  ισούται με:

$$\Delta x(t)^* = d_i + \gamma \dot{x}_i(t) \quad (27)$$

Όπου  $\gamma$  είναι η επιθυμητή αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο οχημάτων για κάθε αύξηση 1 m/s στην ταχύτητα, και  $d_i$  η επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε στάση. Τελικά η επιτάχυνση του οδηγού που ακολουθεί, σύμφωνα με το μοντέλο του Tampere ισούται με:

$$\dot{x}_i(t + T) = \min \left( \dot{x}_i^{con}(t + T), \dot{x}_i^{free}(t + T) \right) \quad (28)$$

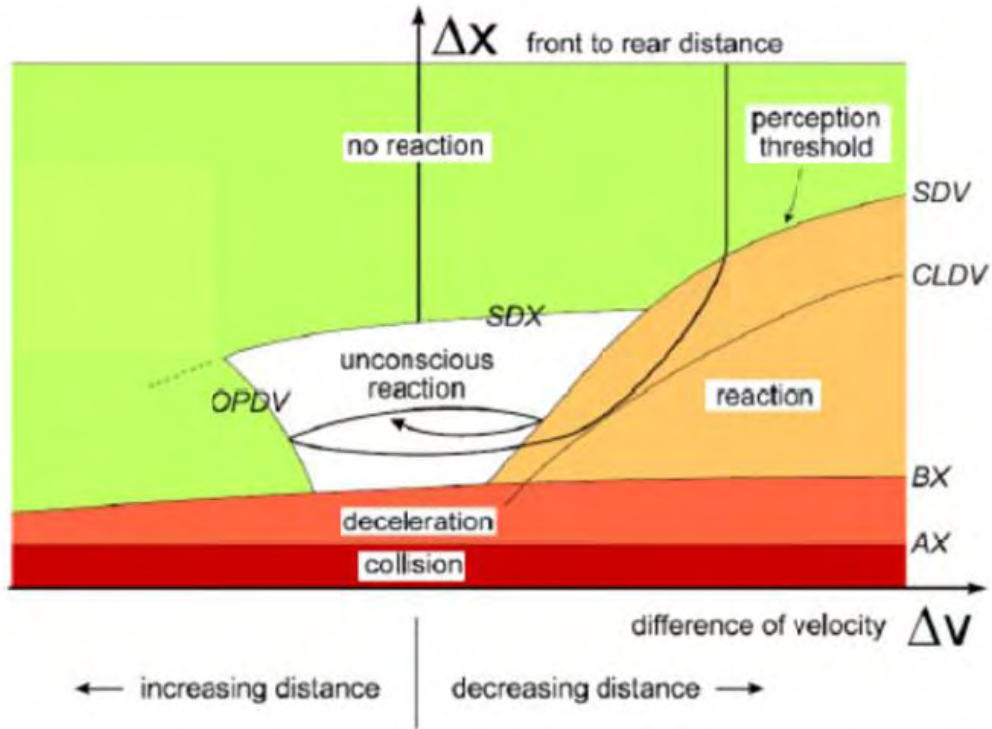
### 1.6.1.3. Ψυχολογικά μοντέλα (Psycho-spacing models)

Οι δύο τύποι μοντέλων που παρουσιάστηκαν παραπάνω έχουν έναν μηχανολογικό χαρακτήρα. Το μοναδικό στοιχείο που συνδέεται με τον ανθρώπινο παράγοντα είναι ο χρόνος αντίδρασης. Στην πραγματικότητα όμως ένας οδηγός:

1. δεν είναι ικανός ώστε να αντιληφτεί ένα ερέθισμα μικρότερο από ένα δεδομένο όριο (όριο αντίληψης)
2. δεν μπορεί να αξιολογήσει και να προσδιορίσει ακριβώς την απαιτούμενη αντίδραση στο ερέθισμα
3. δεν μπορεί να επιταχύνει και να φρενάρι ακαριαία όπως απαιτούν τα μοντέλα

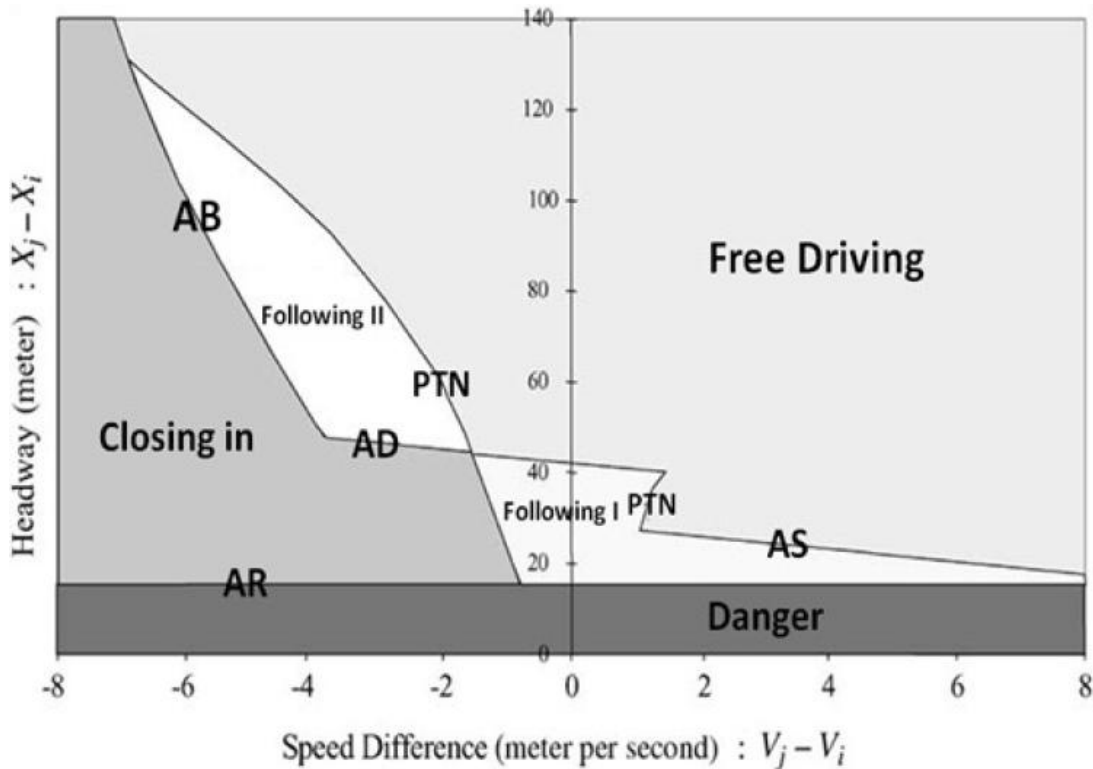
Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της οδήγησης δημιουργείται η ανάγκη στους οδηγούς να διανείμουν την προσοχή τους μεταξύ διαφορετικών εργασιών, και επομένως ο οδηγός δεν μπορεί να αφιερώσει την προσοχή αποκλειστικά στο car-following. Αυτές οι θεωρήσεις αποτελούν πηγές έμπνευσης για την ανάπτυξη ψυχολογικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτού του είδους βασίζονται στην παραδοχή, ότι ο οδηγός θα ενεργήσει ανάλογα όταν φτάσει σε ένα όριο, εκφρασμένο ως συνάρτηση της διαφοράς των ταχυτήτων των δύο οδηγών και της μεταξύ τους απόστασης. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα μοντέλα του Wiedemann [25] και του Fritzche [26].

Το Wiedemann model αναπτύχθηκε το 1974 από τον Ranier Wiedemann. Έγινε ευρύτερα γνωστό από τη χρήση του στο λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης, VISSIM. Η βασική λογική του μοντέλου βασίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 1.21:



Εικόνα 1.21: Wiedemann Psycho-spacing model.

Ενώ στην Εικόνα 1.22 παρουσιάζεται το μοντέλο Fritches (1994). Το μοντέλο του Fritches χρησιμοποιείται στο λογισμικό Paramics.



Εικόνα 1.22: Fritches Psycho-spacing model.



#### 1.6.1.4. Μοντέλα βέλτιστης ταχύτητας

Σύμφωνα με το μοντέλο της βέλτιστης σχετικής ταχύτητας OVRV model (Optimal Velocity with Relative Velocity) [18],[19], η επιτάχυνση του οχήματος που ακολουθεί ισούται με:

$$\ddot{x}_i(t) = -\frac{1}{\tau} \dot{x}_i + \frac{1}{\tau} V_1(\Delta x_{i-1,i}) + \gamma \Delta \dot{x}_{i-1,i}(t) \quad (29)$$

Όπου  $\tau$  είναι ο χρόνος αντίδρασης και  $\gamma$  είναι ένας συντελεστής βαρύτητας της ευαισθησίας της αντίληψης της σχετικής ταχύτητας.  $V_1$  είναι μία μη-γραμμική συνάρτηση που μπορεί να γραφτεί ως:

$$V_1(\Delta x_i) = \frac{u_{desired}}{2} \left( \tanh(s \times h_c) + \tanh\left(s \times (\Delta x_{i-1,i}(t) - h_c)\right) \right) \quad (30)$$

Όπου  $u_{desired}$  είναι η μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα,  $s$  είναι ένας παράγοντας εξομάλυνσης,  $h_c$  είναι ένα όριο απόστασης μεταξύ των δύο οχημάτων, πέρα από το οποίο η ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος παραμένει σταθερή. Ωστόσο, το μοντέλο OVRV δεν μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια τις συνθήκες της ελεύθερης ροής, αφού ο συντελεστής  $\gamma$  δεν εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Το γεγονός αυτό, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός βελτιωμένου μοντέλου βέλτιστης ταχύτητας IOVM (Improved Optimal Velocity Model) [18], το οποίο περιγράφεται από την σχέση (21):

$$\ddot{x}_i(t) = -\frac{1}{\tau} \dot{x}_i + \frac{1}{\tau} V_2(\Delta x_{i-1,i}) + \frac{\gamma}{\max\left(1, \frac{\Delta x_{i-1,i}(t)}{u_{desired} T}\right)} \Delta \dot{x}_{i-1,i}(t) \quad (31)$$

Όπου  $V_2$ :

$$V_2(\Delta x_{i-1,i}) = \min\left(u_{desired}, \frac{\Delta x_{i-1,i}(t) - s_0}{T_0}\right) \quad (32)$$

Όπου  $s_0$  είναι η ελάχιστη επιθυμητή απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων, και  $T_0$  η χρονική απόσταση.

#### 1.6.1.5. Άλλοι τύποι μικροσκοπικών μοντέλων ενός κλάδου

Το 1961 ο Newell πρότεινε ένα μη γραμμικό car-following μοντέλο [8] σύμφωνα με την σχέση (33):

$$\dot{x}_i(t+T) = u_{desired} \left( 1 - e^{-\frac{\lambda_i}{u_{desired}}(\Delta x_{i-1,i}(t)-l_i)} \right) \quad (33)$$

Όπου  $u_{desired}$  η επιθυμητή ταχύτητα,  $T$  ο χρόνος αντίδρασης και  $\lambda$  ένας συντελεστής ευαισθησίας που σχετίζεται με τον οδηγό  $i$  (Η κλίση της καμπύλης του διαγράμματος ταχύτητας- χωρικού διαχωρισμού).

Τέλος, σύμφωνα με το μικροσκοπικό μοντέλο του Van Aerde [6] η επιτάχυνση του  $i$  οχήματος ισούται με:

$$\dot{x}_i(t+\Delta t) = \frac{-c_1 + c_3 u_f + \tilde{s}_i(t) - \sqrt{(c_1 - c_3 u_f - \tilde{s}_i(t))^2 - 4c_3(\tilde{s}_i(t)u_f - c_1 u_f - c_2)}}{2c_3} \quad (34)$$

Όπου  $c_1, c_2, c_3$  συντελεστές ευαισθησίας,  $u_f$  η επιθυμητή ταχύτητα σε κατάσταση ελεύθερης ροής και το  $\tilde{s}_i(t)$  ισούται με:

$$\tilde{s}_i(t) = s_i(t) + [\dot{x}_{i-1}(t+\Delta t) - \dot{x}_i(t)]\Delta t + 0.5\ddot{x}_{i-1}(t+\Delta t)\Delta t^2 \quad (35)$$

## 1.6.2. Η γέφυρα μεταξύ μικροσκοπικών-μακροσκοπικών μοντέλων-Τα μοντέλα σταθερής κατάστασης (Steady-state models)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το μοντέλο car-following αποτελεί την γέφυρα μεταξύ μικροσκοπικής και μακροσκοπικής προσομοίωσης. Από κάθε μικροσκοπικό μοντέλο μπορεί να υπολογιστεί το αντίστοιχο μοντέλο σταθερής κατάστασης (Steady-state model), το οποίο περιγράφεται από μακροσκοπικές παραμέτρους όπως είναι για παράδειγμα η ταχύτητα ελεύθερης ροής και η πυκνότητα συμφόρησης.

### 1.6.2.1. Ανάπτυξη της γέφυρας

Θέτοντας  $m=0$  και  $l=1$  στην σχέση (24) προκύπτει το μικροσκοπικό μοντέλο, το οποίο αντιστοιχεί στο μοντέλο σταθερής κατάστασης του Greenberg [2]:

$$\dot{x}_i(t+T) = a_{1,0} \frac{(\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t))}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))} \quad (36)$$

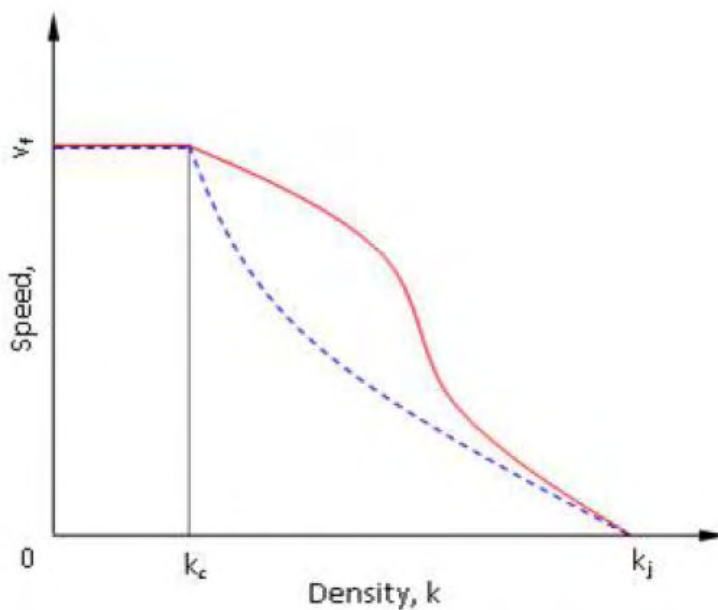
Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (29) προκύπτει:

$$\dot{x}_i(t+T) = a_{1,0} \ln|x_{i-1}(t) - x_i(t)| + C_i = a_{1,0} \ln|s_i(t)| + C_i \quad (37)$$

Όπου  $C_i$  είναι η σταθερά ολοκλήρωσης. Σε συνθήκες σταθερή κατάσταση (steady-state) ή σε συνθήκες ισορροπίας (equilibrium condition), όλα τα οχήματα θεωρείται ότι απέχουν ίση απόσταση μεταξύ τους και κινούνται με την ίδια ταχύτητα. Επομένως, η ταυτότητα  $i$  του οδηγού μπορεί να παραληφθεί αφού δεν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των οδηγών. Ο χρόνος  $t$  μπορεί επίσης να παραληφθεί αφού σε συνθήκες ισορροπίας, η θέση και η ταχύτητα των οχημάτων δεν εξαρτάται από το χρόνο. Επομένως, η ποσότητα  $\dot{x}_i(t+T)$  μπορεί να γραφτεί απλά ως  $u$  (μέση ταχύτητα). Ακόμα, ο μέσος χωρικός διαχωρισμός ισούται με τον αντίστροφο της πυκνότητας δηλαδή  $s = \frac{1}{k}$ . Οπότε η (37) μπορεί να γραφτεί:

$$u = a \ln \frac{1}{k} + C \quad (38)$$

Για τον προσδιορισμό της σταθεράς ολοκλήρωσης  $C$  λύνεται η εξίσωση (38) για τις γνωστές οριακές συνθήκες σε κατάσταση πλήρους συμφόρησης:  $u=0$  και  $K = K_j$  σύμφωνα με το σχήμα της Εικόνας 1.23.



Εικόνα 1.23: Θεμελιώδες διάγραμμα ταχύτητας-πυκνότητας

Άρα:

$$0 = a \ln \frac{1}{K_j} + C \rightarrow C = a \ln K_j \quad (39)$$

Επίσης, σύμφωνα με το σχήμα για ταχύτητα ίση με την ταχύτητα ελεύθερης ροής ( $u = u_f$ ), η πυκνότητα ισούται με την κρίσιμη πυκνότητα ( $K = K_c$ ).

Οπότε η (38) μετατρέπεται:

$$u_f = a \ln \frac{1}{K_c} + C \quad (40)$$

Και από την (39) προκύπτει:

$$u_f = a \ln \frac{1}{K_c} + a \ln K_j \rightarrow a = \frac{u_f}{\ln \left( \frac{K_j}{K_c} \right)} \quad (41)$$

Τελικά από τις (41) και (38):

$$u = \frac{u_f}{\ln \left( \frac{K_j}{K_c} \right)} \ln \frac{K_j}{K} = u_m \ln \frac{K_j}{K} \quad (42)$$

Αν υποτεθεί ότι  $u_m = \frac{u_f}{\ln(K_j/K_c)}$ .

Στο [3] προτείνεται, μία σχέση ταχύτητας-πυκνότητας δύο κλάδων:

$$\begin{cases} u = u_f & \text{when } 0 \leq K < K_c \\ u = u_m \ln \frac{K_j}{K} & \text{when } K_c \leq K \leq K_j \end{cases} \quad (43)$$

Αντίστοιχα, θέτοντας  $m=0$  και  $l=2$  στην σχέση (24) προκύπτει το μικροσκοπικό μοντέλο, το οποίο αντιστοιχεί στο μοντέλο σταθερής κατάστασης του Greenshields [1]:

$$\ddot{x}_i(t+T) = a_{2,0} \frac{(\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t))}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))^2} \quad (44)$$

Ολοκληρώνοντας και τις δύο πλευρές της (44), προκύπτει:

$$\dot{x}_i(t+T) = -a \frac{1}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))} + C \quad (45)$$

Η (38) κάτω από συνθήκες ισορροπίας γίνεται:

$$u = -ak + C \quad (46)$$

Επομένως, πάλι θεωρώντας τις ίδιες οριακές συνθήκες (για  $u=0 \rightarrow K = K_j$  και για  $u = u_f \rightarrow K = K_c$ ), προκύπτει ο συντελεστής  $a$  και τελικά το μοντέλο του Greenshields.

$$a = \frac{u_f}{K_j} \quad (47)$$

$$u = u_f - \frac{u_f}{K_j} K \quad (48)$$

Θέτοντας πάλι  $m=1$  και  $l=2$  στην σχέση (24) προκύπτει το μοντέλο του Underwood:

$$\ddot{x}_i(t+T) = a_{2,1} \frac{\dot{x}_i(t+T)}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))^2} (\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)) \quad (49)$$

Από την ίδια με τα παραπάνω μοντέλα διαδικασία ολοκλήρωσης προκύπτει το μοντέλο σταθερής κατάστασης του Underwood [4]:

$$a = \frac{1}{K_m} \quad (50)$$

$$u = u_f e^{-K/K_m} \quad (50)$$

Για  $m=1$  και  $l=3$  η σχέση (24) αντιστοιχεί στο μακροσκοπικό μοντέλο του Drake:

$$\ddot{x}_i(t+T) = a_{3,1} \frac{\dot{x}_i(t+T)}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))^3} (\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)) \quad (51)$$

$$a = K_m \quad (52)$$

$$u = u_f e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{K}{K_m}\right)^2} \quad (53)$$

Τέλος, για  $m=0$  και  $l=n+1$  από την (21) προκύπτει το μοντέλο Pipes-Munjjal:

$$\ddot{x}_i(t+T) = a_{n+1,0} \frac{(\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t))}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))^{n+1}} \quad (54)$$

Επαναλαμβάνοντας, την ίδια διαδικασία ολοκλήρωσης, υπολογίζεται ο συντελεστής ευαισθησίας  $a$  και τελικά προκύπτει το μοντέλο σταθερής κατάστασης Pipes-Munjjal.

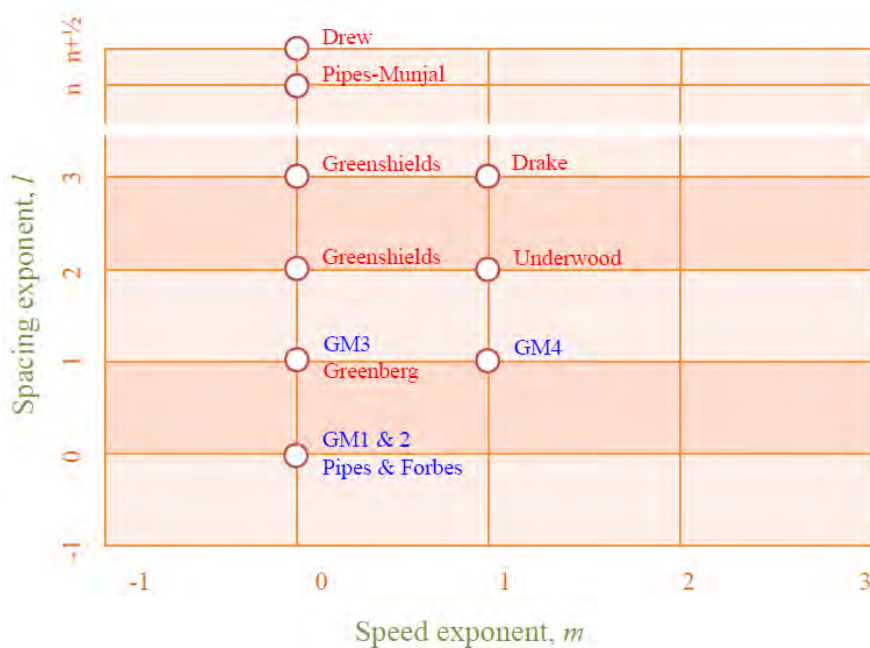
$$a = n \frac{u_f}{K_j^n} \tag{55}$$

$$u = u_f \left[ 1 - \left( \frac{K}{K_j} \right)^n \right] \tag{56}$$

Στον Πίνακα 1.4 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάπτυξη της γέφυρας μεταξύ μικροσκοπικών και μακροσκοπικών μοντέλων GM.

Πίνακας 1.4: Μακροσκοπικά μοντέλα GM.

Greenshields	$u = u_f \left( 1 - \frac{k}{k_j} \right)$
Greenberg two regimes	$u = u_f$ when $0 \leq k < k_c$ $u = u_c \ln \frac{k_j}{k}$ when $k_c \leq k \leq k_j$
Underwood	$u = u_f e^{-\frac{k}{k_c}}$
Drake	$u = u_f e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{k}{k_c} \right)^2}$
Pipes Munjal	$u = u_f \left[ 1 - \left( \frac{k}{k_j} \right)^n \right]$



Εικόνα 1.24: Τιμή του εκθέτη της σχετικής απόστασης  $l$  και του εκθέτη της σχετικής ταχύτητας  $m$  για τα μοντέλα GM.

Παρακάτω παρουσιάζονται ακόμα τέσσερα steady-state μοντέλα:

Κάτω από συνθήκες ισορροπίας, και σύμφωνα με το μοντέλο του Newell [8] της εξίσωσης (24) μπορεί να προκύψει το μοντέλο σταθερής κατάστασης:

$$u = u_f \left[ 1 - e^{\frac{\lambda}{u_f} \frac{1}{k_j} \left( 1 - \frac{k_j}{k} \right)} \right] \quad (57)$$

Το μακροσκοπικό μοντέλο του Van Aerde [6], [7], είναι ένα μοντέλο ενός κλάδου με τέσσερεις παραμέτρους. Δίνεται από την σχέση (58):

$$k = \frac{1}{c_1 + c_3 u + c_2 / (u_f - u)} \quad (58)$$

Όπου:

$$c_1 = \frac{u_f}{k_j u_c^2} (2u_c - u_f) \quad (59)$$

$$c_2 = \frac{u_f}{k_j u_c^2} (u_f - u_c)^2 \quad (60)$$

$$c_3 = \left( \frac{1}{q_c} - \frac{u_f}{k_j u_c^2} \right) \quad (61)$$

Ο Wang το 2010 πρότεινε ένα στοχαστικό μοντέλο ισορροπίας, του οποίου η ντετερμινιστική του μορφή αποτελείται από τρεις παραμέτρους:

$$u = \frac{u_f}{1 + e^{\frac{K - K_c}{\theta}}} \quad (62)$$

Όπου  $\theta$  είναι ένας συντελεστής του μοντέλου.

Ο Del Castillo [10] πρότεινε μία οικογένεια εκθετικών συναρτήσεων που μπορούν να αναπαρασταθούν από την σχέση (63):

$$f(\lambda) = e^{1 - (1 + \frac{\lambda}{n})^n} \quad (63)$$

Όπου  $\lambda$  καλείται η “ισοδύναμη απόσταση” (equivalent spacing) και είναι συνάρτηση της πυκνότητας  $K$  και  $n$  είναι μία παράμετρος. Θέτοντας  $n = 0$  και  $n = \infty$ , προκύπτουν οι δύο ειδικές περιπτώσεις:

$$u = u_f \left[ 1 - e^{-\frac{|C_j|}{u_f} \left(1 - \frac{k_j}{k}\right)} \right] \quad (64)$$

Και

$$u = u_f \left[ 1 - e^{1 - e^{-\frac{|C_j|}{u_f} \left(1 - \frac{k_j}{k}\right)}} \right] \quad (65)$$

Όπου  $C_j$  είναι ταχύτητα του κινηματικού κύματος σε κατάσταση συμφόρησης.

### 1.7. Μοντέλα μακροσκοπικής προσομοίωσης

Στην περίπτωση των μακροσκοπικών μοντέλων, κυκλοφορία των οχημάτων εξετάζεται συνολικά, στο πλαίσιο βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών όπως η ροή, η χωρική πυκνότητα και η μέση ταχύτητα. Τα μοντέλα αυτά εξάγουν εκτιμήσεις για τις αναμενόμενες τιμές των μετρήσεων προς αξιολόγηση. Τα παρεχόμενα των αποτελεσμάτων δίνονται είτε σε επίπεδο πληθυσμού είτε για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Παράλληλα ανταποκρίνονται σε θεμελιώδη διαγράμματα των κυκλοφοριακών μεγεθών. Το κυριότερο πλεονέκτημα των μακροσκοπικών μοντέλων έναντι των μικροσκοπικών, είναι το χαμηλό κόστος που αφορά τους υπολογιστικούς πόρους. Ωστόσο, δεν μπορούν να περιγράψουν με την ίδια λεπτομέρεια τα φαινόμενα της κυκλοφοριακής ροής, και επίσης χρειάζονται περαιτέρω ανάλυση ώστε να είναι ικανά να περιγράψουν τη δυναμική φύση ενός συγκοινωνιακού συστήματος.

### 1.8. Μεσοσκοπική προσομοίωση

Η ανάγκη για την επιτυχή προσομοίωση μεγαλύτερων δικτύων με σχετικά μικρό χρόνο υπολογισμών, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή των μεσοσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν συνήθως σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο λεπτομέρειας την κίνηση των οχημάτων, αλλά σε ένα αρκετά χαμηλότερο επίπεδο τη συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις τους. Αξίζει να σημειωθεί πως τα μοντέλα αυτά μπορεί να ακολουθούν τη μακροσκοπική προσέγγιση



και να συμπληρώνονται από μία συνάρτηση διόρθωσης, η οποία να αντισταθμίζει το χαμένο επίπεδο λεπτομέρειας [29]. Τέλος, τα μεσοσκοπικά μοντέλα ενώ δεν περιγράφουν ένα σύστημα με απόλυτη ακρίβεια μπορούν να παρέχουν αξιόλογες προσεγγίσεις εύκολα και με χαμηλό υπολογιστικό κόστος.

### 1.9. Μέθοδοι συλλογής δεδομένων

Τα μεγέθη, τα οποία μετρώνται παραδοσιακά και λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαχείριση της κυκλοφορίας είναι κυρίως μακροσκοπικής φύσεως, και μπορεί να συμπεριλαμβάνουν [31]:

**Φόρτος.** Ο φόρτος ορίζεται ως ο αριθμός των οχημάτων που παρατηρείται να περνάει ή προβλέπεται ότι θα περάσει από μία συγκεκριμένη διατομή του δρόμου κατά τη διάρκεια ενός δοσμένου χρονικού διαστήματος. Χρησιμοποιείται κυρίως για την καταγραφή μακροπρόθεσμων τάσεων και για την πρόβλεψη εμφάνισης συμφόρησης σε συγκεκριμένα οδικά τμήματα.

**Ταχύτητα.** Η ταχύτητα χρησιμοποιείται αρκετά συχνά για να περιγράψει τις λειτουργίες ενός οδικού τμήματος, επειδή είναι γενικά πιο εύκολο να εξηγηθεί και να κατανοηθεί. Οι μετρήσεις της ταχύτητας συχνά λαμβάνονται από μεμονωμένα οχήματα και στη συνέχεια υπολογίζονται μέσοι όροι ούτως ώστε να περιγραφεί το σύνολο της ροής. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να συγκριθούν με κάποιες βέλτιστες τιμές ώστε να προσδιοριστεί το επίπεδο εξυπηρέτησης ή για να εντοπιστούν κάποια συμβάντα.

**Χρονική κατάληψη.** Ορίζεται σαν το ποσοστό ενός δοσμένου χρονικού διαστήματος όπου ένα δοσμένο οδικό τμήμα είναι καταλυμένο από οχήματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα υποκατάστατο της πυκνότητας. Μπορεί να μετρηθεί από μαγνητικούς ανιχνευτές και επομένως η μέτρησή τους καθίσταται ευκολότερη από την μέτρηση της πυκνότητας. Η χρονική κατάληψη μετράται ξεχωριστά για κάθε λωρίδα και αφού δηλώνει ποσοστό μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 100.

Ωστόσο λόγω τις ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας σήμερα είναι διαθέσιμοι από μετρήσεις περισσότεροι τύποι δεδομένων, οι οποίοι διευκολύνουν σε μεγάλο βαθμό τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Σε αυτές τις μετρήσεις μπορεί να περιλαμβάνονται:

- Χρόνους διαδρομής
- Εντοπισμό της θέσης ενός οχήματος

- Εντοπισμό της θέσης ενός λεωφορείου
- Εντοπισμό της θέσης των οχημάτων έκτακτης ανάγκης
- Μήκος ουρών
- Συνθήκες οδοστρώματος (υγρό, ξηρό, παγωμένο κ.τ.λ.)
- Συνθήκες της ατμόσφαιρας (θερμοκρασία, βροχή, ομίχλη κ.τ.λ.)

Τα δεδομένου πραγματικού χρόνου, αλλά και τα συγκεντρωτικά ιστορικά δεδομένα χρησιμοποιούνται εξίσου κατά τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Τα δεδομένα του πρώτου τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως για τον λειτουργικό έλεγχο της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Τα συγκεντρωτικά ιστορικά δεδομένα αναφέρονται στις παρελθοντικές καταστάσεις ενός συγκεκριμένου οδικού τμήματος, οι οποίες μπορούν να συγκριθούν με τις τωρινές συνθήκες για την αξιολόγηση της εφαρμογής ενός μέτρου. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για τη βαθμονόμηση των μοντέλων προσομοίωσης ώστε να μπορέσουν να προβλεφτούν και να αξιολογηθούν επιρροές της εφαρμογής μελλοντικών βελτιώσεων.

Παρακάτω παρουσιάζονται όλοι οι διαθέσιμοι μέθοδοι μετρήσεως κυκλοφοριακών μεγεθών που χρησιμοποιούνται σήμερα:

**Μαγνητικοί ανιχνευτές:** Αυτός ο τρόπος μέτρησης είναι παγκοσμίως ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος. Οι σπουδαιότεροι εκπρόσωποι αυτής της κατηγορίας είναι οι ανιχνευτές βρόχου (Εικόνα 1.25). Είναι συσκευές που αποτελούνται από ένα βρόχο καλωδίου, τοποθετημένου κάτω από την οδική επιφάνεια, ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα όχημα όταν διέρχεται επάνω από το καλώδιο λειτουργεί ως πυρήνας στο πηνίο, μεταβάλλοντας τη χωρητικότητά του, και με αυτό τον τρόπο πιστοποιεί την διέλευση του [32].

Ο συγκεκριμένος τύπος μέτρησης έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Η κατασκευή τους είναι γενικά ευέλικτη, εύκολη και χωρίς κάποιο σημαντικό κόστος. Επιπρόσθετα, η πολύχρονη εμπειρία της εφαρμογής προσφέρει μία ευχέρεια κατά χρήση αυτών των ανιχνευτών. Επίσης, προσφέρουν σε γενικές γραμμές ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα και η χρήση τους δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες. Ωστόσο η εγκατάστασή τους, μειώνει το χρόνο ζωής του οδοστρώματος και κατά την συντήρησή τους πρέπει να σταματήσει η κυκλοφορία σε μία ολόκληρη λωρίδα.

Τα δεδομένα που προέκυψαν από μετρητές αυτού του τύπου χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τη βαθμονόμηση των μοντέλων σταθερής κατάστασης.



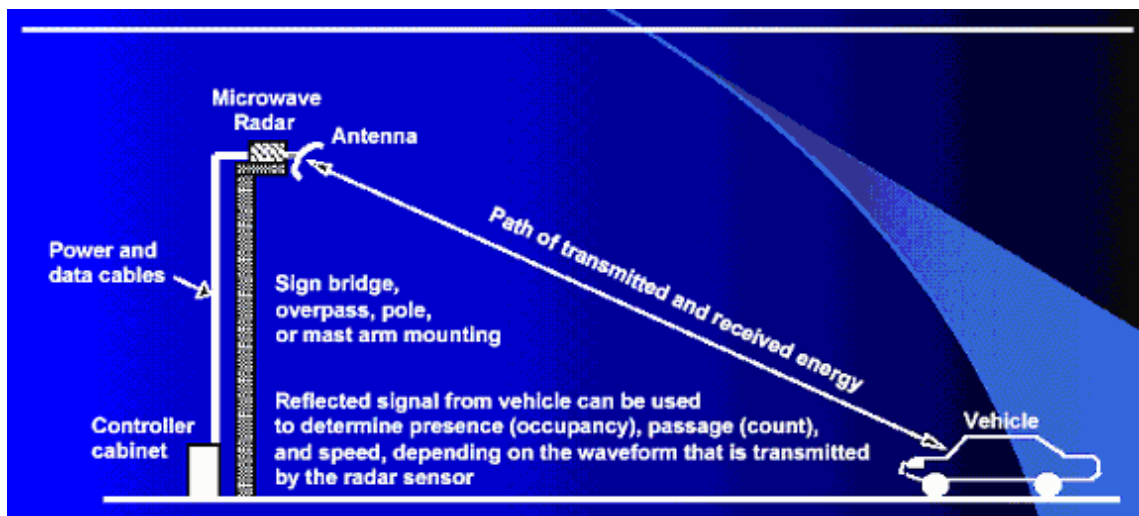
Εικόνα 1.25: Μαγνητικοί Ανιχνευτές [31].

**Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.** Η εφαρμογή συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας αποτελεί την πιο σύγχρονη, αποτελεσματική και συγχρόνως ολοκληρωμένη μέθοδο παρακολούθησης της κυκλοφορίας [32]. Η εικόνα του δρόμου λαμβάνεται από κάμερες τοποθετημένες σε ειδικές εγκαταστάσεις ή σε κορυφή κτιρίων κτίρια επί της οδού. Η εικόνα στην συνέχεια μπορεί να προβάλλεται στις οθόνες των κέντρων διαχείρισης της κυκλοφορίας με στόχο τον έλεγχο της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο.

Επίσης, η εικόνα η οποία λαμβάνεται από κάμερες μπορεί να υφίσταται επεξεργασία για τη λήψη επιθυμητών στοιχείων, όπως είναι για παράδειγμα η απόκτηση δεδομένων μετρήσεων μικροσκοπικών μεγεθών. Σήμερα, η επεξεργασία εικόνας αποτελεί μία από τις πλέον αξιόπιστες και ακριβέστερες πηγές μικροσκοπικών δεδομένων. Μέσω της διαδικασίας αυτής μπορεί να προκύψουν τροχιές μεμονωμένων οχημάτων, ή ακόμα και ταχύτητες μεμονωμένων οχημάτων με μεγάλη ακρίβεια (σε επίπεδο κλάσματος του δευτερολέπτου).

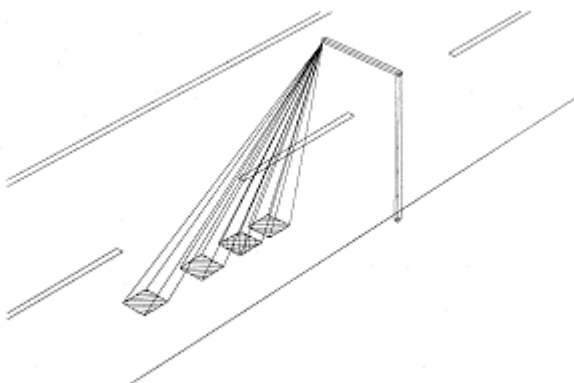
Από την επεξεργασία εικόνων, προερχόμενες από κάμερες τοποθετημένες στην κορυφή κτιρίων, προήλθαν τα μικροσκοπικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση των μικροσκοπικών μοντέλων της κυκλοφοριακής ροής.

**Ανιχνευτές μικροκυμάτων:** Κατά τη λειτουργία τους εκπέμπουν μικροκύματα και μετρούν τη μεταβολή στη συχνότητα των μικροκυμάτων που αντανακλώνται στην επιφάνεια των οχημάτων (Εικόνα 1.26). Με αυτό τον τρόπο μπορεί να μετρηθεί η ταχύτητα των οχημάτων με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, η μέτρηση είναι δυνατή μόνο σε περίπτωση όπου δεν υπάρχει συμφόρηση..



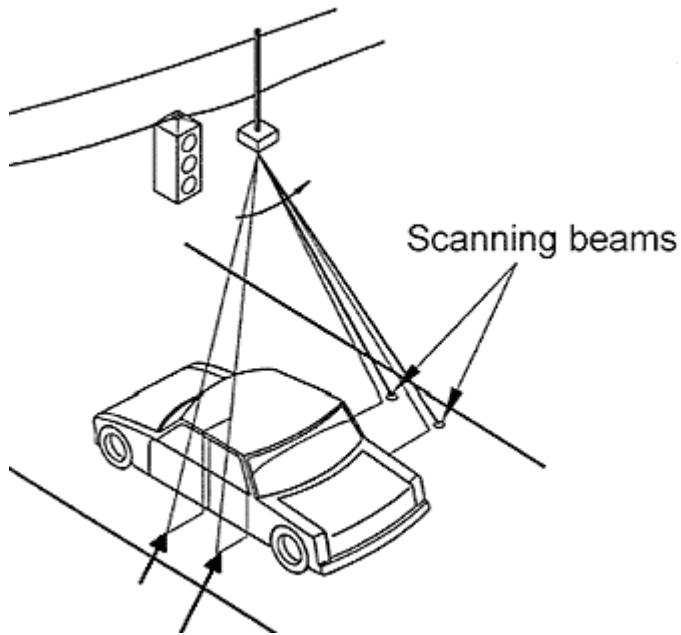
Εικόνα 1.26: Ανιχνευτές μικροκυμάτων.

**Παθητικοί ανιχνευτές υπεράυθρων:** Υπολογίζουν τις μεταβολές στη θερμική ακτινοβολία που προκαλείται από τα οχήματα [32].



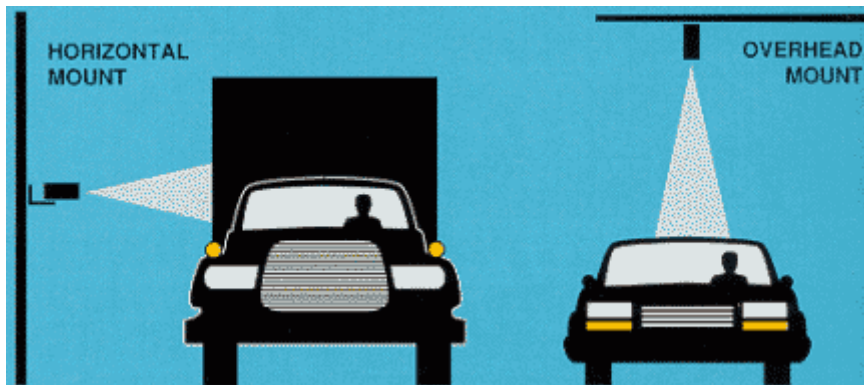
Εικόνα 1.27: Παθητικοί ανιχνευτές υπεράυθρων.

**Ανιχνευτές λέιζερ:** Υπολογίζουν την θέση των οχημάτων χρησιμοποιώντας λέιζερ (Εικόνα 1.28).



Εικόνα 1.28: Ανιχνευτές λέιζερ.

**Ανιχνευτές υπερήχων:** Υπολογίζουν την θέση των οχημάτων, χρησιμοποιώντας υπερήχους οι οποίοι ανακλώνται επάνω σε αυτά και στο οδόστρωμα (Εικόνα 1.29).



Εικόνα 1.29: Ανιχνευτές υπερήχων.

## Κεφάλαιο 2

### 2. Μέθοδος της βαθμονόμησης

#### 2.1.Βαθμονόμηση των μοντέλων σταθερής κατάστασης

##### 2.1.1. Τα υπό μελέτη μοντέλα

Τα steady-state car-following μοντέλα τα οποία βαθμονομήθηκαν, καθώς και ο αριθμός των ελεύθερων παραμέτρων του κάθε μοντέλου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1: Τα μοντέλα σταθερής κατάστασης που βαθμονομήθηκαν

Μοντέλο	Τύπος	Αριθμός Παραμέτρων
Greenshields	$u = u_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)$	2, ( $u_f, k_j$ )
Greenberg two regimes	$u = u_f$ when $0 \leq k < k_c$ $u = u_c \ln \frac{k_j}{k}$ when $k_c \leq k \leq k_j$	2, ( $u_f, k_j, k_c$ )
Underwood	$u = u_f e^{-\frac{k}{k_c}}$	2, ( $u_f, k_c$ )
Drake	$u = u_f e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k}{k_c}\right)^2}$	2, ( $u_f, k_c$ )
Pipes Munjal	$u = u_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^n\right]$	2, ( $u_f, k_j$ )
Newell	$u = u_f \left[1 - e^{-\frac{\lambda}{u_f} \frac{1}{k_j} \left(1 - \frac{k_j}{k}\right)}\right]$	3, ( $u_f, k_j, \lambda$ )
Wang	$u = \frac{u_f}{1 + e^{-\frac{k-k_c}{\theta}}}$	3, ( $u_f, k_j, \theta$ )
Del Castillo	$u = u_f \left[1 - e^{-\frac{C_j}{u_f} \left(1 - \frac{k_j}{k}\right)}\right]$	3, ( $u_f, k_j, C_j$ )
Van Aerde	$k = \frac{1}{c_1 + c_3 u + c_2 / (u_f - u)}$ $c_1 = \frac{u_f}{k_j u_c^2} (2u_c - u_f)$	4, ( $u_f, k_j, u_c, q_c$ )

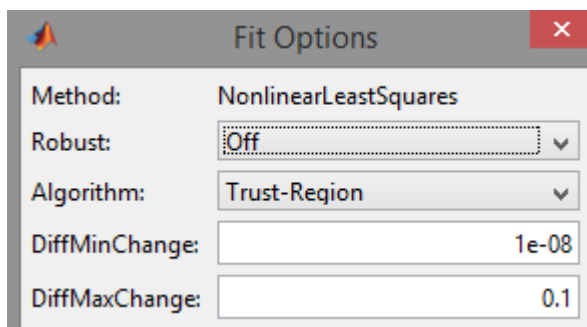
	$c_2 = \frac{u_f}{k_j u_c^2} (u_f - u_c)^2$ $c_3 = \left( \frac{1}{q_c} - \frac{u_f}{k_j u_c^2} \right)$	
--	--	--

### 2.1.2. Δεδομένα

Όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω κεφάλαια οι παράμετροι των μοντέλων σταθερής κατάστασης όπως είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής, η πυκνότητα συμφόρησης ή ο κρίσιμος φόρτος έχουν μακροσκοπικό χαρακτήρα. Οπότε τα συγκεντρωτικά δεδομένα που συλλέγονται από τους επαγωγικούς βρόγχους καθίστανται ικανά για τη βαθμονόμηση αυτών των μοντέλων. Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα «detector data» του NGSIM που προέκυψαν από μετρήσεις ανά 5 λεπτά στον αυτοκινητόδρομο US-101, στο Los Angeles των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Τα συγκεκριμένα δεδομένα αποτελούνται από μετρήσεις της μέσης χρονικής ταχύτητας και του φόρτου για κάθε λωρίδα ξεχωριστά. Με τον αριθμό 1 συμβολίζεται η αριστερή λωρίδα ενώ με 5 η δεξιά.

### 2.1.3. Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και την αξιολόγηση των μοντέλων

Η ανάπτυξη των μοντέλων πραγματοποιήθηκε σε κώδικα Matlab. Για τη βαθμονόμηση και το «ταίριασμα» των καμπυλών των μοντέλων στα δεδομένα χρησιμοποιήθηκε το toolbox του Matlab, Curve fitting tool. Η μέθοδος βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε είναι η μη γραμμική μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων (Non Linear Least Squares) ενώ για την επίλυση της μεθόδου επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Trust-Region.



Εικόνα 2.1: Η επιλογή της μεθόδου Non Linear Least Squares και του αλγορίθμου Trust-Region στο toolbox του Matlab Curve fitting.

Κατά την μέθοδο των ελάχιστων τετράγωνων πρέπει να οριστεί η συνάρτηση (objective function) η οποία και θα ελαχιστοποιηθεί. Ως μεταβλητή αυτής της συνάρτησης επιλέχθηκε η μέση ταχύτητα. Για την σύγκριση της επίδοσης των μοντέλων, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης υπολογίστηκε το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα σφάλμα (Relative Mean Square Error) της εξίσωσης (66):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{i,measured} - u_{i,predicted})^2}{n}} \quad (66)$$

## 2.2.Βαθμονόμησης των μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης

### 2.2.1. Τα υπό μελέτη μοντέλα

Τα μικροσκοπικά μοντέλα car-following, για τα οποία πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Τα μικροσκοπικά μοντέλα που βαθμονομήθηκαν

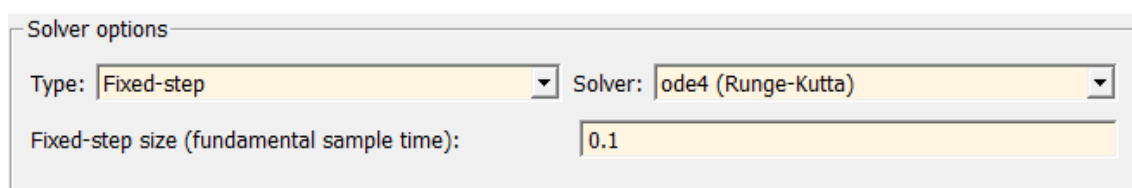
Μοντέλο	Τύπος
General Motors model	$\ddot{x}_i(t+T) = a_{i,m} \frac{\dot{x}_i(t+T)^m}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))^l} (\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t))$
Gipps	$\dot{x}_i(t+T) = \min(\dot{x}_i^{con}(t+T), \dot{x}_i^{free}(t+T))$ $\dot{x}_i^{free}(t+T) = \dot{x}_i(t) + 2.5a_i^{max}T \left(1 - \frac{\dot{x}_i(t)}{u_{desired}}\right) \sqrt{0.025 + \frac{\dot{x}_i(t)}{u_{desired}}}$ $\dot{x}_i^{con}(t+T) = b_i^{max}T + \sqrt{b_i^{max2}T^2 - b_i^{max} \left(2(x_{i-1} - s_{n-1} - x_i) - \dot{x}_i(t)T - \frac{\dot{x}_{i-1}(t)^2}{b_{i-1}^{max}}\right)}$
Tampere	$\dot{x}_i(t+T) = \min(\dot{x}_i^{con}(t+T), \dot{x}_i^{free}(t+T))$ $\ddot{x}_i^{free} = c_3(u_{desired}(t) - \dot{x}_i(t))$



	$\ddot{x}_i^{con} = c_1 \gamma \Delta \dot{x}_{i-1,i}(t) + c_2 (\Delta x_{i-1,i}(t) - \Delta x(t)^*)$ $\Delta x(t)^* = d_i + \gamma \dot{x}_i(t) \quad ($
IOVM	$\ddot{x}_i(t) = -\frac{1}{\tau} \dot{x}_i + \frac{1}{\tau} V_2(\Delta x_{i-1,i}) + \frac{\gamma}{\max\left(1, \frac{\Delta x_{i-1,i}(t)}{u_{desired} T}\right)} \Delta \dot{x}_{i-1,i}(t)$ $V_2(\Delta x_{i-1,i}) = \min\left(u_{desired}, \frac{\Delta x_{i-1,i}(t) - s_0}{T_0}\right)$
OVRV	$\ddot{x}_i(t) = -\frac{1}{\tau} \dot{x}_i + \frac{1}{\tau} V_1(\Delta x_{i-1,i}) + \gamma \Delta \dot{x}_{i-1,i}(t)$ $V_1(\Delta x_i) = \frac{u_{desired}}{2} \left( \tanh(s \times h_c) + \tanh\left(s \times (\Delta x_{i-1,i}(t) - h_c)\right) \right)$
Newell non linear	$\dot{x}_i(t + T) = u_{desired} \left( 1 - e^{-\frac{\lambda_i}{u_{desired}} (\Delta x_{i-1,i}(t) - l_i)} \right)$
Van Aerde	$\dot{x}_i(t + \Delta t) = \frac{-c_1 + c_3 u_f + \tilde{s}_i(t) - \sqrt{(c_1 - c_3 u_f - \tilde{s}_i(t))^2 - 4c_3(\tilde{s}_i(t)u_f - c_1 u_f - c_2)}}{2c_3}$ $\tilde{s}_i(t) = s_i(t) + [\dot{x}_{i-1}(t + \Delta t) - \dot{x}_i(t)]\Delta t + 0.5\ddot{x}_{i-1}(t + \Delta t)\Delta t^2$

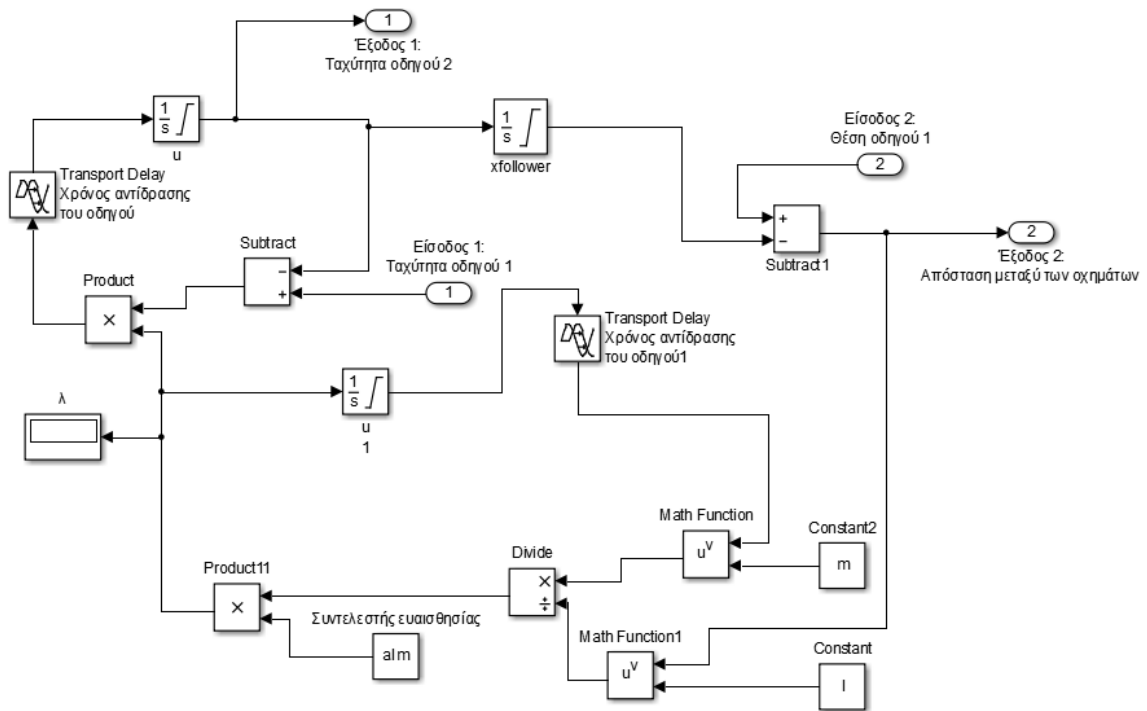
### 2.2.2. Προσομοίωση των μοντέλων

Για την προσομοίωση των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το toolbox του Matlab, Simulink. Το simulink έχει σχεδιασθεί ώστε να λύνει δυναμικά συστήματα διαφορικών εξισώσεων κίνησης. Αναπαραστά τα συστήματα ODE χρησιμοποιώντας διαγράμματα με μπλοκς και μπορεί να καλέσει οποιαδήποτε συνάρτηση του Matlab. Για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων επιλέχθηκε ο solver ode4(Runge-Kutta) με βήμα 0.1 δευτερόλεπτα.



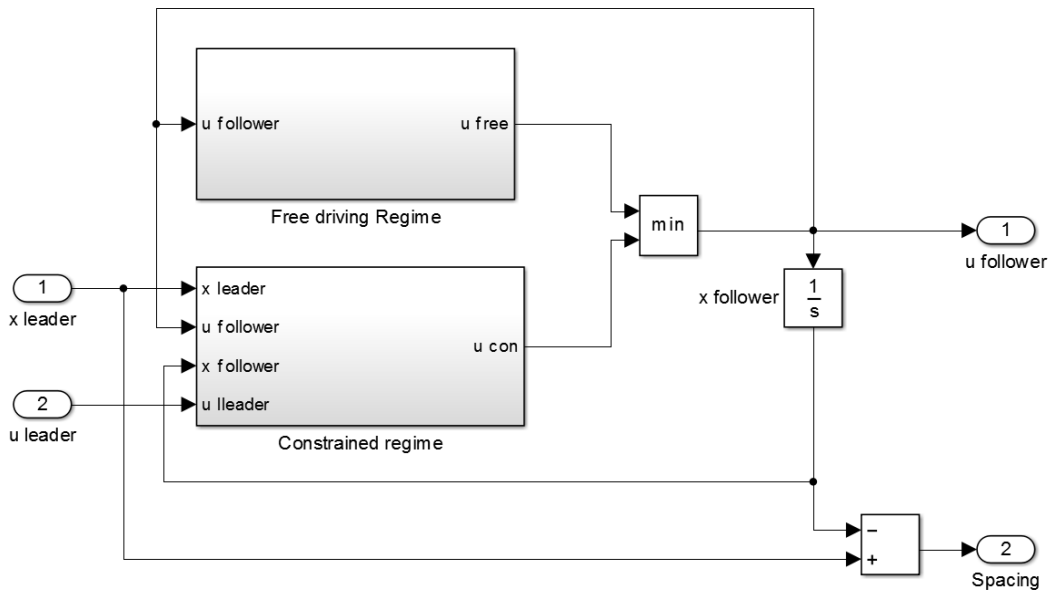
Εικόνα 2.2: Η επιλογή του Solver των διαφορικών εξισώσεων ode4 (Runge-Kutta) βήματος 0.1 δευτερολέπτων.

**General motor models.** Ο οδηγός που προπορεύεται θεωρείται ως οδηγός 1, ενώ ο οδηγός που ακολουθεί ως οδηγός 2. Όπως φαίνεται και στο σχήμα της εικόνας το μοντέλο έχει δύο εισόδους, την θέση και την ταχύτητα του οδηγού 1, ενώ υπολογίζεται η ταχύτητα του οδηγού 2 και η μεταξύ τους απόσταση. Οι σταθερές  $m$  και  $l$  παίρνουν διαφορετική τιμή για κάθε μοντέλο GM (Εικόνα 1.22), ενώ ο συντελεστής ευαισθησίας και ο χρόνος αντίδρασης υπολογίζονται μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης.

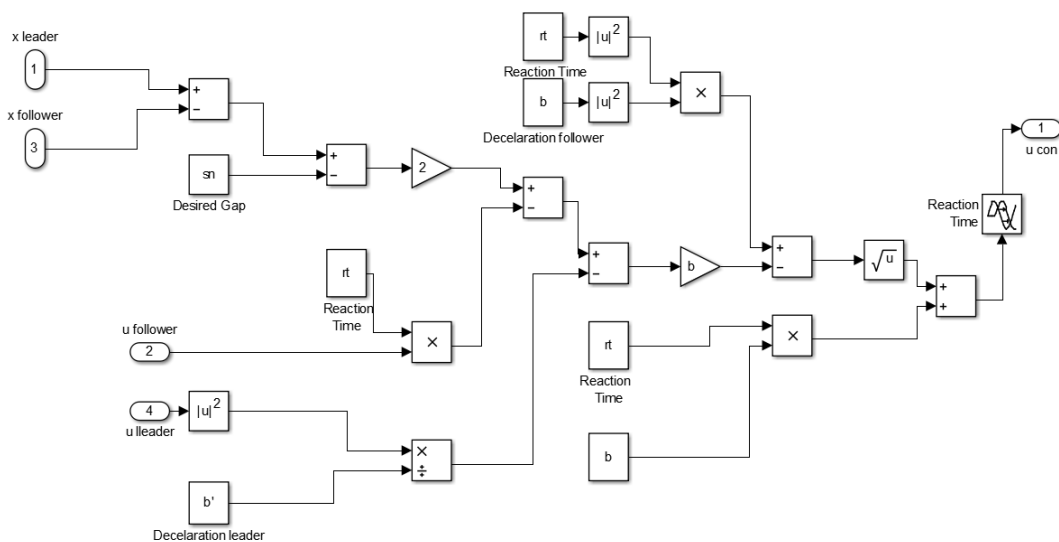


Εικόνα 2.3: Η προσομοίωση των μοντέλων GM στο Simulink

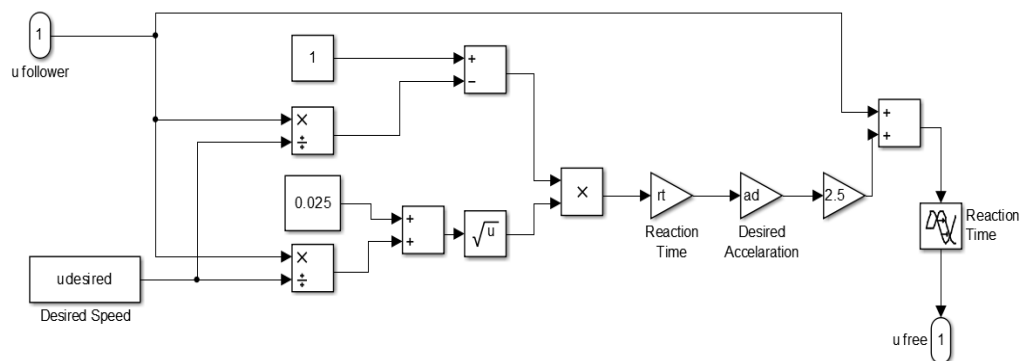
**Gipps model.** Το μοντέλο του Gipps αποτελείται από δύο κλάδων. Ο κλάδος της ελεύθερης οδήγησης παρουσιάζεται στο σχήμα της εικόνας 2.4. Η είσοδος στον κλάδο της ελεύθερης οδήγησης είναι η ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί την στιγμή  $t-dt$ , ενώ η έξοδος είναι η ταχύτητα του ίδιου οχήματος την στιγμή  $t$ . Οπότε η ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί, στην φάση της ελεύθερης οδήγησης δεν εξαρτάται από την κινητική κατάσταση του μπροστινού του. Η τιμή της επιθυμητής επιτάχυνσης, της επιθυμητής ταχύτητας και του χρόνου αντίδρασης υπολογίζονται μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Ο κλάδος του car-following παρουσιάζεται στην εικόνα 2.5, όπου από την ταχύτητα και τη θέση του μπροστινού οχήματος, υπολογίζεται η ταχύτητα και η θέση του οχήματος που ακολουθεί. Μέσω της βαθμονόμησης υπολογίζονται η επιθυμητή επιβράδυνση, η επιθυμητή επιβράδυνση, ο χρόνος αντίδρασης και η επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε στάση.



Εικόνα 2.4: Η προσομοίωση του μοντέλου του Gipps στο Simulink.

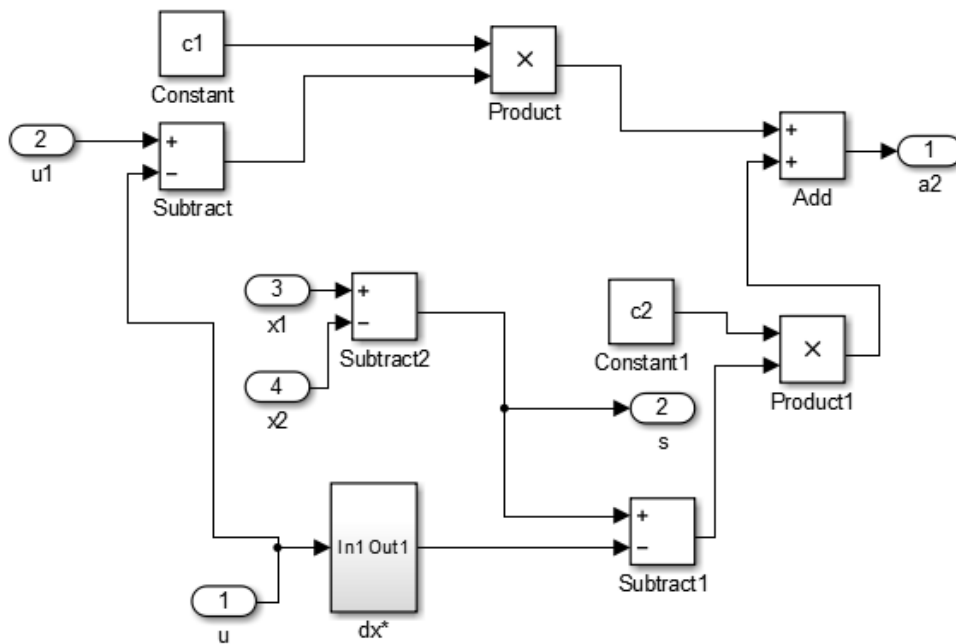


Εικόνα 2.5: Ο κλάδος του car-following του μοντέλου του Gipps.

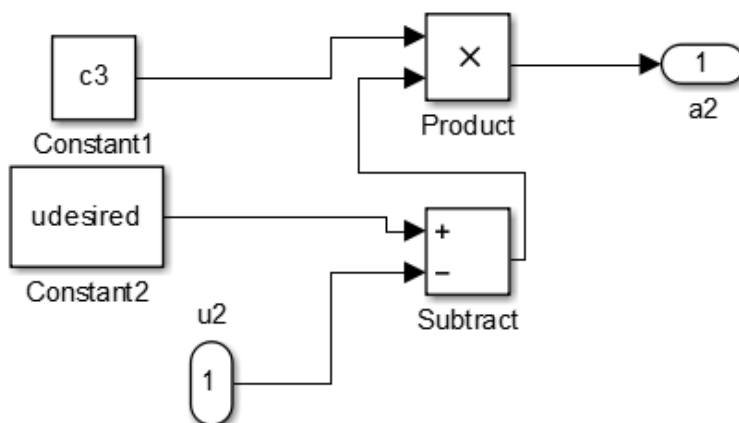


Εικόνα 2.6: Ο κλάδος της ελεύθερης ροής του μοντέλου του Gipps.

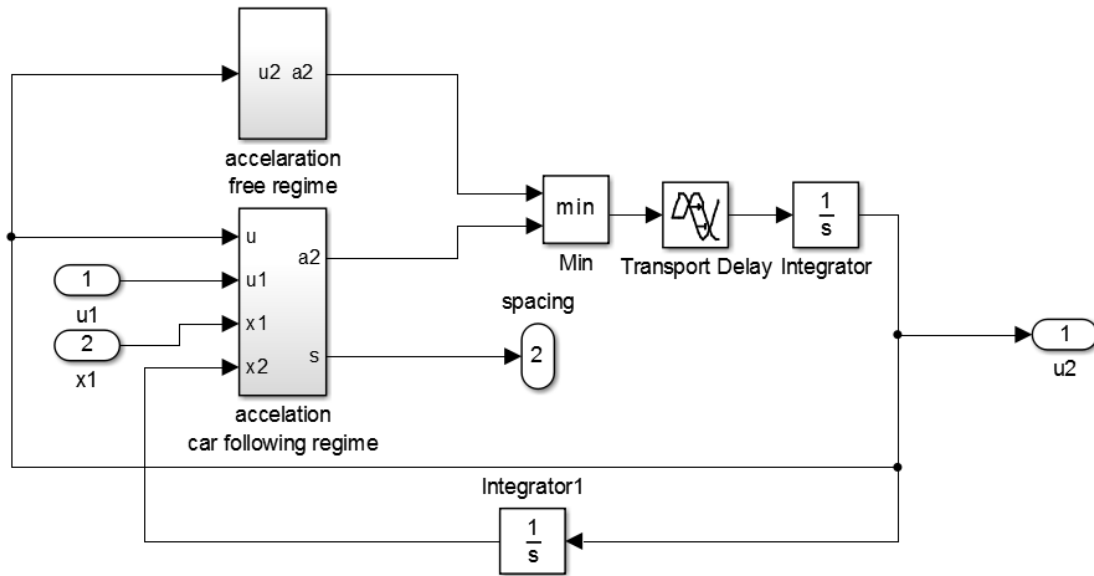
**Tampere Model.** Παρόμοια με το μοντέλο του Gipps, το μοντέλο του Tampere αποτελείται από δύο κλάδους. Κατά τη βαθμονόμηση υπολογίζεται η τιμή της επιθυμητής ταχύτητας και του συντελεστή ευαισθησίας  $c_3$ , από τον κλάδο της ελεύθερης οδήγησης ενώ από τον κλάδο του car-following υπολογίζονται οι συντελεστές ευαισθησίας  $c_1$ ,  $c_2$  και  $\gamma$ , και η επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε στάση.



Εικόνα 2.7: Ο κλάδος σε κατάσταση συμμόρφωσης του μοντέλου του Tampere.

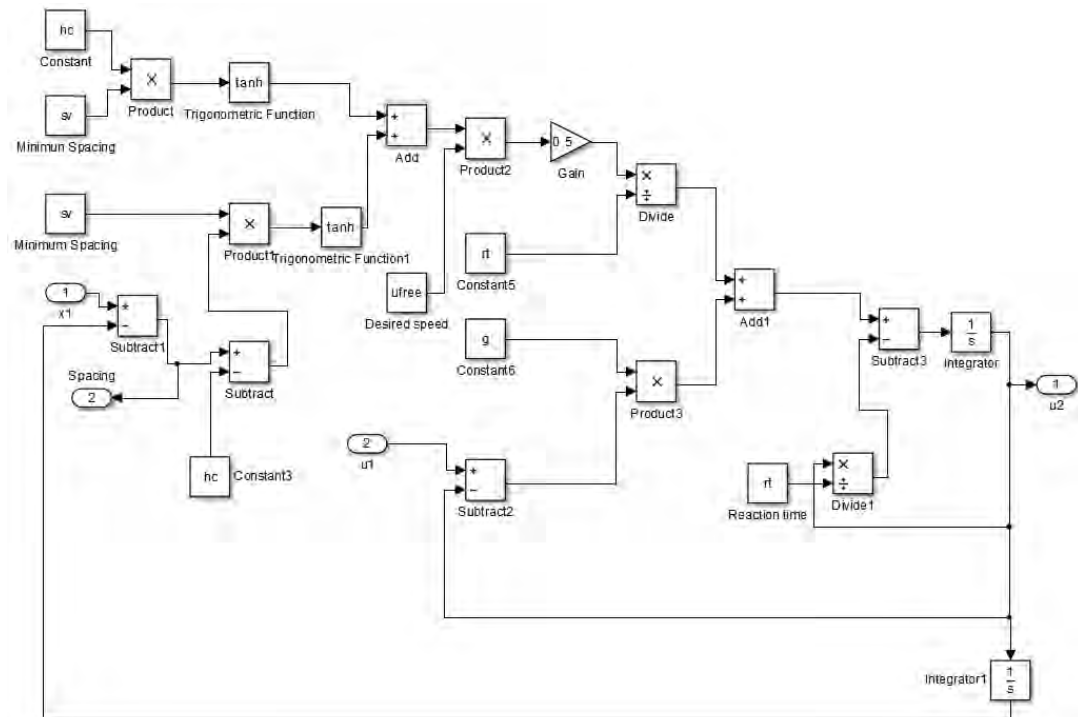


Εικόνα 2.8: Ο κλάδος της ελεύθερης ροής του μοντέλου του Tampere.



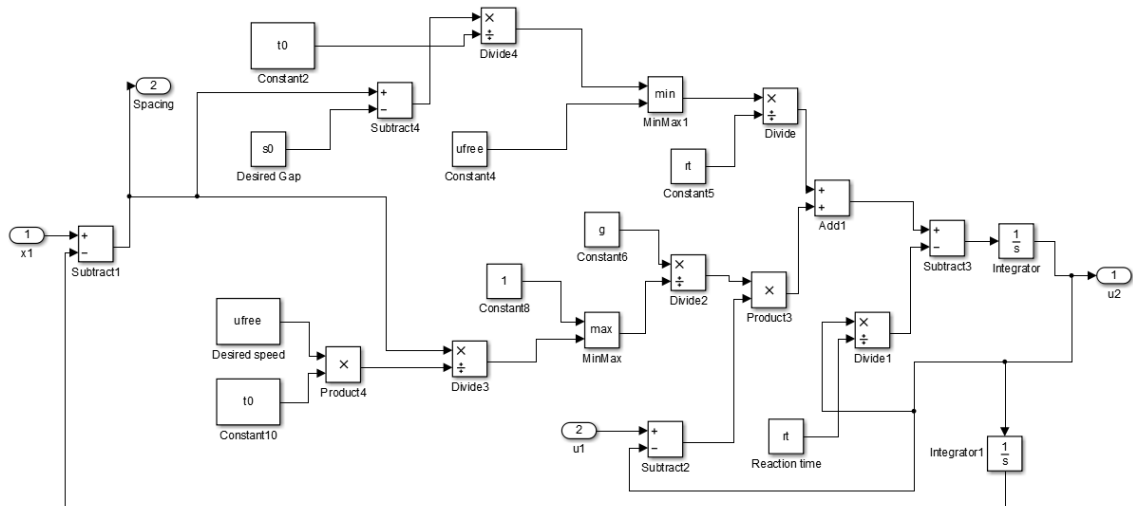
Εικόνα 2.9: Η προσομοίωση του μοντέλου του Tampere στο Simulink.

**Optimal Velocity Model.** Το μοντέλο Optimal Velocity (Εικόνα 2.10) δέχεται σαν είσοδο τη θέση και τη ταχύτητα του μπροστινού οχήματος, και υπολογίζει την ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί. Μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης υπολογίζονται οι συντελεστές  $hc$  και  $\gamma$ , η επιθυμητή ταχύτητα και ο χρόνος αντίδρασης.



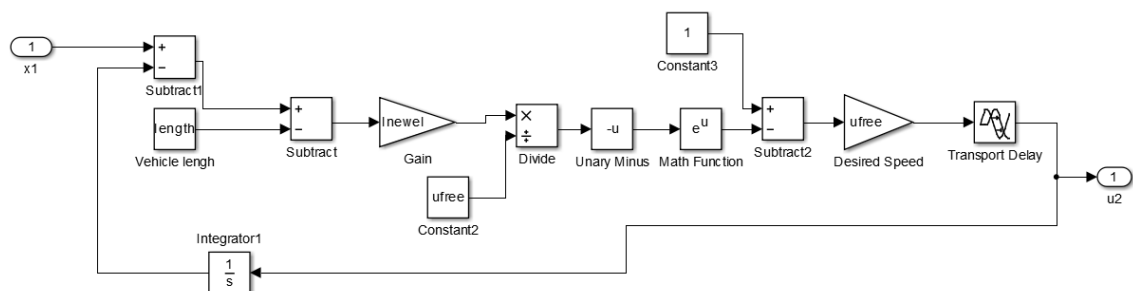
Εικόνα 2.10: Η προσομοίωση του μοντέλου βέλτιστης ταχύτητας στο Simulink.

**Imprived Optimal Velocity Model.** Η προσομοίωση του βελτιωμένου μοντέλου βέλτιστης ταχύτητας στο Simulink παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.11. Οι τιμές των παραμέτρων  $s_0$ ,  $t_0$  και  $\gamma$  η επιθυμητή ταχύτητα καθώς και ο χρόνος αντίδρασης υπολογίζονται από τη διαδικασία της βαθμονόμησης.



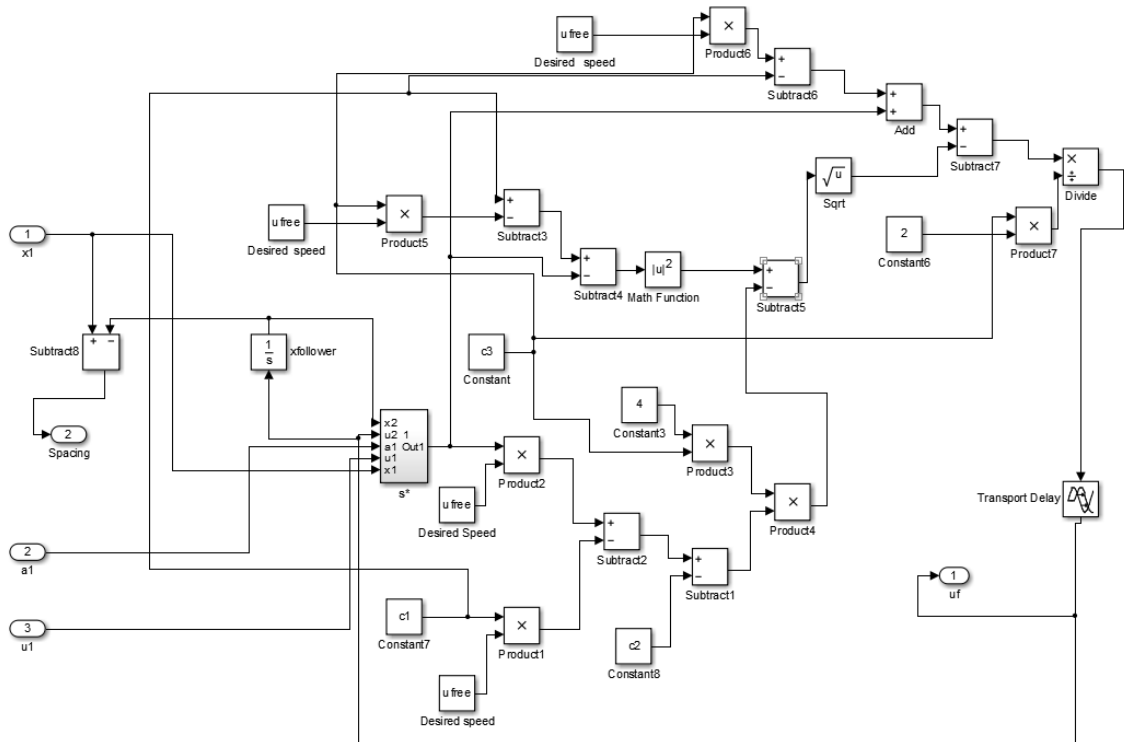
Εικόνα 2.11: Η προσομοίωση του βελτιωμένου μοντέλου βέλτιστης ταχύτητας στο Simulink.

**Newell Non linear Model.** Το μη γραμμικό μοντέλο του Newell υπολογίζει την ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί σύμφωνα με το σχήμα της εικόνας . Ο συντελεστής ευαισθησίας  $\lambda$ , ο χρόνος αντίδρασης και η επιθυμητή ταχύτητα προσδιορίζονται κατά τη βαθμονόμηση.



Εικόνα 2.12: Η προσομοίωση του μη γραμμικού μοντέλου του Newell στο Simulink.

**Van Aerde microscopic model.** Το μικροσκοπικό μοντέλο του Van Aerde έχει τρία μεγέθη ως είσοδο, την ταχύτητα, την θέση αλλά και την επιτάχυνση του μπροστινού οχήματος. Κατά τη βαθμονόμηση υπολογίζονται οι συντελεστές ευαισθησίας  $c_1, c_2$  και  $c_3$ , η επιθυμητή ταχύτητα, ο χρόνος αντίδρασης και η επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε στάση.



Εικόνα 2.13: Η προσομοίωση του μικροσκοπικού μοντέλου του Van Aerde στο Simulink.

### 2.2.3. Επεξεργασία των δεδομένων

Για την βαθμονόμηση των μικροσκοπικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν οι τροχιές οχημάτων (vehicle-trajectory data) του NGSIM. Οι τροχιές συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια 45 λεπτών (7.50 πμ- 8.35 πμ.) στον αυτοκινητόδρομο του Hollywood (Hollywood Freeway) του Los Angeles στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 15 Ιουνίου το 2005. Στην παρούσα εργασία τα δεδομένα χωρίστηκαν σε ζεύγη «Leader-Follower». Η τροχιά του προπορευόμενου οχήματος κάθε ζεύγους λειτουργούσε σαν είσοδος στα μοντέλα του Simulink, ενώ το αποτέλεσμα της κάθε προσομοίωσης, δηλαδή η συμπεριφορά του οχήματος που ακολουθεί συγκρίνονταν με την πραγματική τροχιά του οχήματος.

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στα [15], [16] και [17] οι μετρήσεις των μικροσκοπικών δεδομένων, δηλαδή των τροχιών των οχημάτων περιέχουν σημαντικά λάθη. Έχουν

παρατηρηθεί για παράδειγμα αρνητικές ταχύτητες ή μη φυσιολογικές τιμές επιταχύνσεων. Από το [16] συμπεραίνεται ξεκάθαρα πως τα σφάλματα των μετρήσεων μπορεί να έχουν σημαντικές αρνητικές συνέπειες κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Στη βιβλιογραφία μέχρι στιγμής έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι εξομάλυνσης (smoothing methods) των δεδομένων με στόχο την απαλοιφή των σφαλμάτων. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί επιτυχώς η διαδικασία εξομάλυνσης των δεδομένων, πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος ώστε λάθη να καταργούνται στο μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό τους, χωρίς όμως να χάνονται η πραγματική δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η χρησιμοποίηση του αλγορίθμου moving average με βήμα 0.1 δευτερόλεπτα [16]. Η εξομάλυνση πραγματοποιήθηκε επί των τροχιών και των δύο οχημάτων κάθε ζεύγους. Στην συνέχεια μέσω παραγωγίσις των εξομαλυσμένων τροχιών υπολογίστηκε η ταχύτητα και η επιτάχυνση.

$$\frac{dx}{dt} = v(t), \frac{dv}{dt} = \dot{v}(t) \quad (67)$$

Ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη και έχει διερευνηθεί ευρέως στην πρόσφατη βιβλιογραφία, είναι το κατά πόσο ένα ζεύγος καθίσταται ικανό ώστε να βαθμονομηθούν όλες οι παράμετροι ενός μοντέλου. Ορισμένες παράμετροι περιγράφουν συνθήκες ελεύθερης ροής, ενώ κάποιες άλλες συνθήκες συμφόρησης. Επομένως το κάθε ζεύγος δεδομένων θα πρέπει να εμπεριέχει τουλάχιστον μία μετάβαση από συνθήκες ελεύθερης ροής σε συνθήκες συμφόρησης. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως στην περίπτωση που επικρατούν καθόλη τη διάρκεια μιας μέτρησης συνθήκες ελεύθερης ροής τότε είναι αδύνατο να υπολογιστούν παράμετροι όπως η μέγιστη επιθυμητή απόσταση σε στάση. Παρόμοια, σε συνθήκες συμφόρησης δεν μπορεί να υπολογιστούν παράμετροι όπως η ταχύτητα ελεύθερης ροής. Επομένως, κάθε ζεύγος δεδομένων πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια ώστε να εξασφαλίζεται η εναλλαγή ανάμεσα στις δύο καταστάσεις. Εδώ, το κριτήριο επιλέχθηκε είναι ότι η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του μπροστινού οχήματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10 feet/s [18]. Τα ζεύγη τα οποία δεν πληρούσαν την παραπάνω προϋπόθεση απορρίφθηκαν και δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

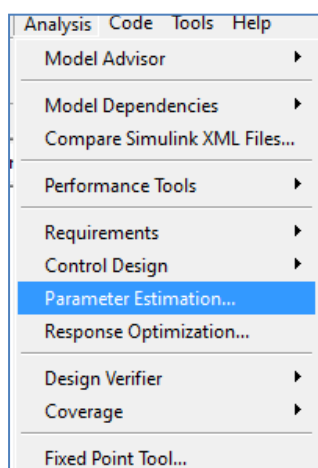


#### 2.2.4. Η μέθοδος της βαθμονόμησης και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Οι μετρημένες τροχιές συγκρίθηκαν με τις μοντελοποιημένες τροχιές με την μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Σε κάθε βαθμονόμηση η επιλογή του μεγέθους που θα χρησιμοποιηθεί στην συνάρτηση ελαχιστοποίησης είναι πολύ σημαντική. Στην περίπτωση της βαθμονόμησης μικροσκοπικών μοντέλων ως μεταβλητή στην συνάρτηση που θα ελαχιστοποιηθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επιτάχυνση, η ταχύτητα ή σχετική απόσταση. Σύμφωνα με το [19] ούτε η επιτάχυνση ούτε η ταχύτητα δεν είναι κατάλληλη ως αντικείμενο της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων επειδή τα συγκεκριμένα μεγέθη θα ήταν εξαιρετικά μη ευαίσθητα στις παραμέτρους που ελέγχουν τις σχετικές αποστάσεις. Ωστόσο, όπως αναφέρεται στο [16] για ορισμένα μοντέλα όπως το μοντέλο του Tampere, η βαθμονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια όταν χρησιμοποιούνται οι ταχύτητες. Επομένως, στην συγκεκριμένη εργασία εφαρμόστηκε η συνδιαστική συνάρτηση ελαχιστοποίησης (ταχύτητα και σχετική απόσταση) η οποία προτάθηκε στο [16]. Δηλαδή μέσω της μεθόδου ελαχιστοποιούνται οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης και των μετρήσεων όσον αφορά την ταχύτητα και την σχετική απόσταση ταυτόχρονα, με συντελεστή βαρύτητας και για τα δύο μεγέθη ίσο με 1. Ωστε να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση και η σύγκριση των μοντέλων, για κάθε σετ δεδομένων υπολογίστηκε το παρακάτω συνδυαστικό σχετικό τετραγωνικό σφάλμα.

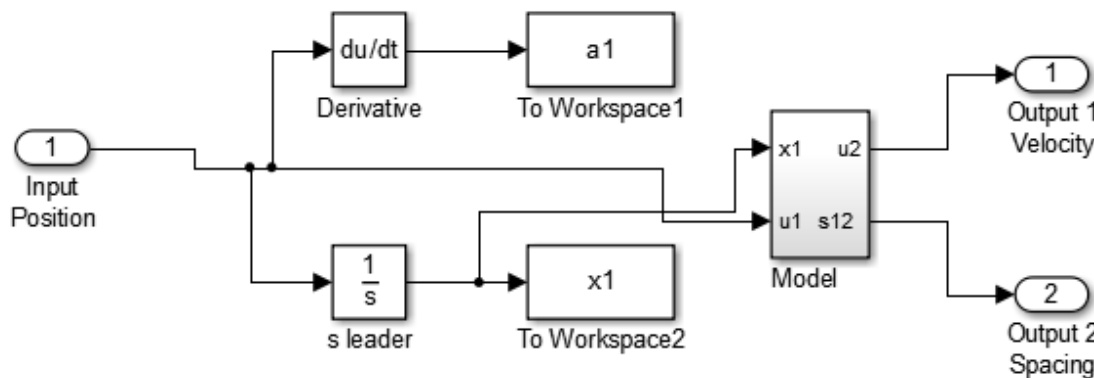
$$Error = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_{i,measured} - s_{i,predicted})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{i,measured}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{i,predicted}^2}} + \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{i,measured} - v_{i,predicted})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{i,measured}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{i,predicted}^2}}$$

Για τη βαθμονόμηση των μοντέλων και την εκτίμηση των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε η επιλογή του Simulink, Parameter Estimation (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Η επιλογή του εργαλείου *Parameter Estimation* στο *Simulink*.

Αρχικά αναπτύχθηκε το διάγραμμα της Εικόνας 2.15. Στο μπλοκ «Model» μπορεί να επικολληθεί το αντίστοιχο υπό μελέτη μοντέλο.



Εικόνα 2.15: Ως Input έχει οριστεί η εμπειρική θέση του πρώτου οδηγού, ενώ τα δύο Output του μοντέλου συγκρίνονται με τα αντίστοιχα εμπειρικά δεδομένα.

Κατά την επιλογή του Simulink Parameter Estimation πρέπει να οριστεί μία χρονοσειρά μετρήσεων η οποία θα λειτουργήσει σαν είσοδος στο μοντέλο και μία ή και περισσότερες χρονοσειρές μετρήσεων, τις οποίες θα χρησιμοποιήσει το toolbox ώστε να τις ταιριάξει με την έξοδο ή τις εξόδους του μοντέλου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική τροχιά του μπροστινού οχήματος. Το κάθε μοντέλο στην συνέχεια προσομοίωσε την ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί και την απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Έπειτα, τα δύο αυτά μεγέθη συγκρίθηκαν μέσω της μεθόδου που παρουσιάστηκε παραπάνω με τις αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις και επομένως υπολογίστηκαν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.

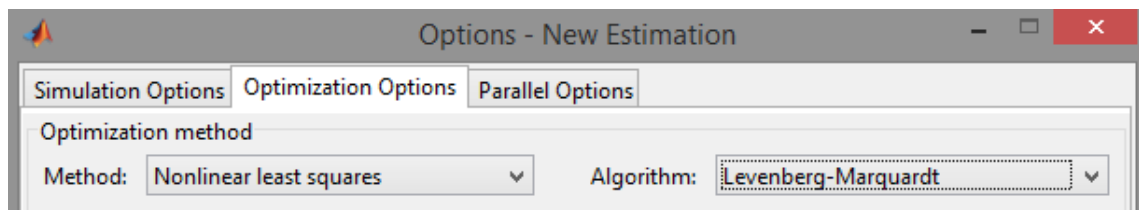
Input Data	Output Data	State Data			
Assign data to blocks					
Input	Data	Time / Ts	Weight	Length	
coidm/Input Position					
Channel - 1			1	-/-	

Εικόνα 2.16: Το Simulink ζητάει να οριστεί μία χρονοσειρά ως είσοδος στο μοντέλο. Στην περίπτωση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μετρημένη εμπειρική τροχιά του προπορευόμενου οχήματος για κάθε σετ δεδομένων.

Input Data	Output Data	State Data		
Assign data to blocks				
Output	Data	Time / Ts	Weight	Length
<b>coidm/Output 1 Velocity</b>				
Channel - 1			1	-/-
<b>coidm/Output 2 Spacing</b>				
Channel - 1			1	-/-

Εικόνα 2.17: Στην συνέχεια το Simulink ζητάει να οριστεί μία ή περισσότερες χρονοσειρές τις οποίες και θα συγκρίνει με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Εδώ έχουν οριστεί δύο μεγέθη, η ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί και η σχετική απόσταση μεταξύ των οχημάτων, τα οποία συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα εμπειρικά δεδομένα.

Στην συνέχεια, για το «ταίριασμα» των εξόδων του μοντέλου με τις μετρήσεις, επιλέχθηκε η μη γραμμική μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων και τέλος, ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt χρησιμοποιήθηκε ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα της βελτιστοποίησης.



Εικόνα 2.18: Η επιλογή της μεθόδου Nonlinear least squares και του αλγορίθμου Lavenberg-Marquardt

## Κεφάλαιο 3

### 3. Αποτελέσματα

#### 3.1.Αποτελέσματα της βαθμονόμησης των μακροσκοπικών μοντέλων

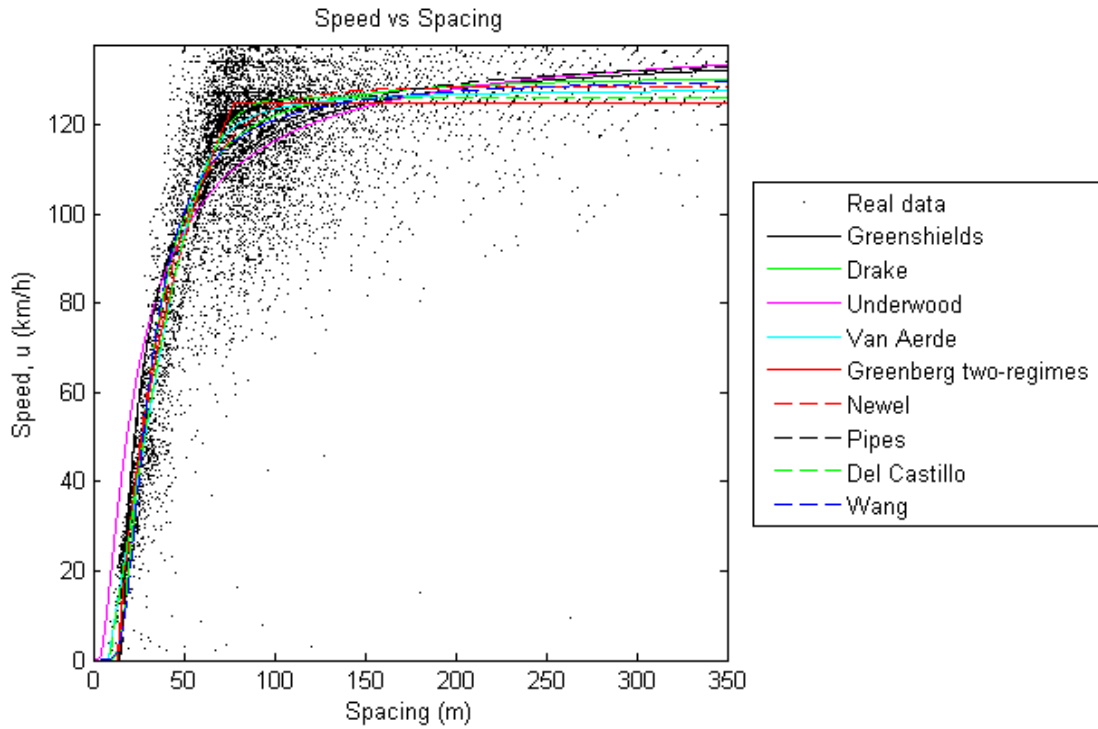
Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.7, οι μετρήσεις των επαγωγικών βρόγχων αναφέρονται σε κάθε λωρίδα ξεχωριστά. Αρχικά, το κάθε μοντέλο βαθμονομήθηκε για κάθε λωρίδα ξεχωριστά και στην συνέχεια για το σύνολο των μετρήσεων.

#### Λωρίδα 1 (αριστερή).

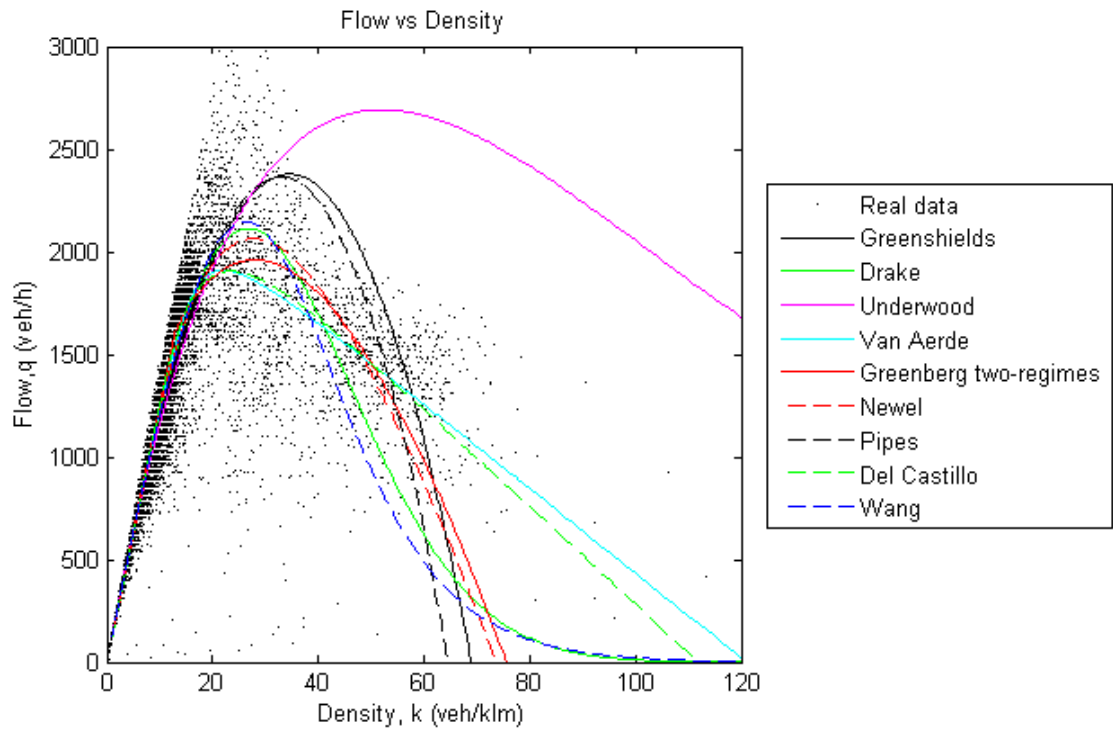
Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων για την λωρίδα 1 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Στην συνέχεια, η σύγκριση της επίδοσης των μοντέλων και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρουσιάζονται με τη βοήθεια των θεμελιωδών διαγραμμάτων.

Πίνακας 3.1: Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων όπως προέκυψαν μετά τη βαθμονόμηση. Όπου  $U_{free}$  είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής,  $K_j$  η πυκνότητα συμφόρησης,  $K_c$  η κρίσιμη πυκνότητα,  $u_c$  η κρίσιμη ταχύτητα,  $q_c$  ο κρίσιμος φόρτος ή ο φόρτος χωρητικότητας,  $C_j$  είναι παράμετρος του μοντέλου *Del Castillo*,  $n$  παράμετρος του μοντέλου του *Pipes*,  $\lambda$  παράμετρος του μοντέλου του *Newell* και  $\theta$  παράμετρος του μοντέλου του *Wang*. Επίσης παρουσιάζεται το σφάλμα *RMSD* για κάθε μοντέλο.

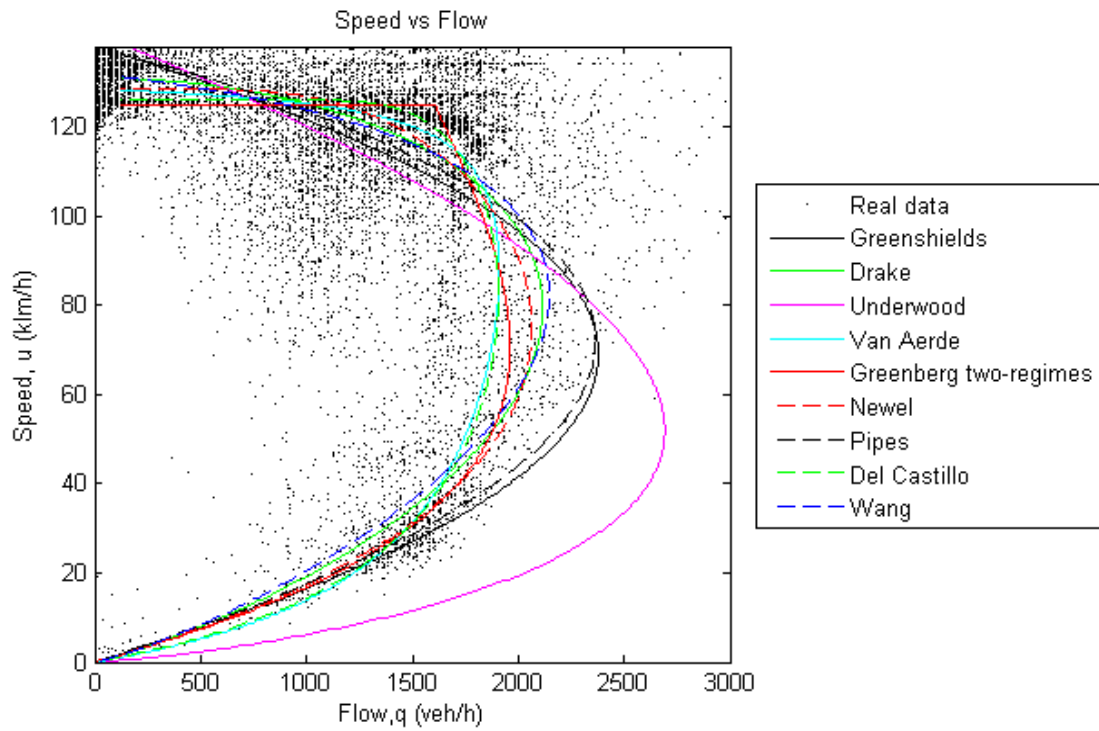
Λωρίδα 1	$u_{free}$ km/h	$K_j$ veh/km	$K_c$ veh/km	$u_c$ km/h	$q_c$ veh/h	$C_j$	$\lambda$	$\theta$	$n$	RMSD
Van Aerde	128.4	120.9	-	87.7	1909	-	-	-	-	3.054
Del Castillo	126	111.9	-	-	-	6.5				3.119
Newell	128.4	73.76	-	-	-	-	1.37	-	-	3.176
Greenberg two regimes	125.1	75.63	-	70.5	-	-	-	-	-	3.181
Wang	140.2	-	29.88	-	-	-	-	0.011	-	3.227
Drake	130.9	26.62	-	-	-	-	-	-	-	3.353
Greenshields	137.9	68.95	-	-	-	-	-	-	-	3.636
Pipes	137.4	64.52	-	-	-	-	-	-	1.1	3.706
Underwood	140.9	51.91	-	-	-	-	-	-	-	4.071



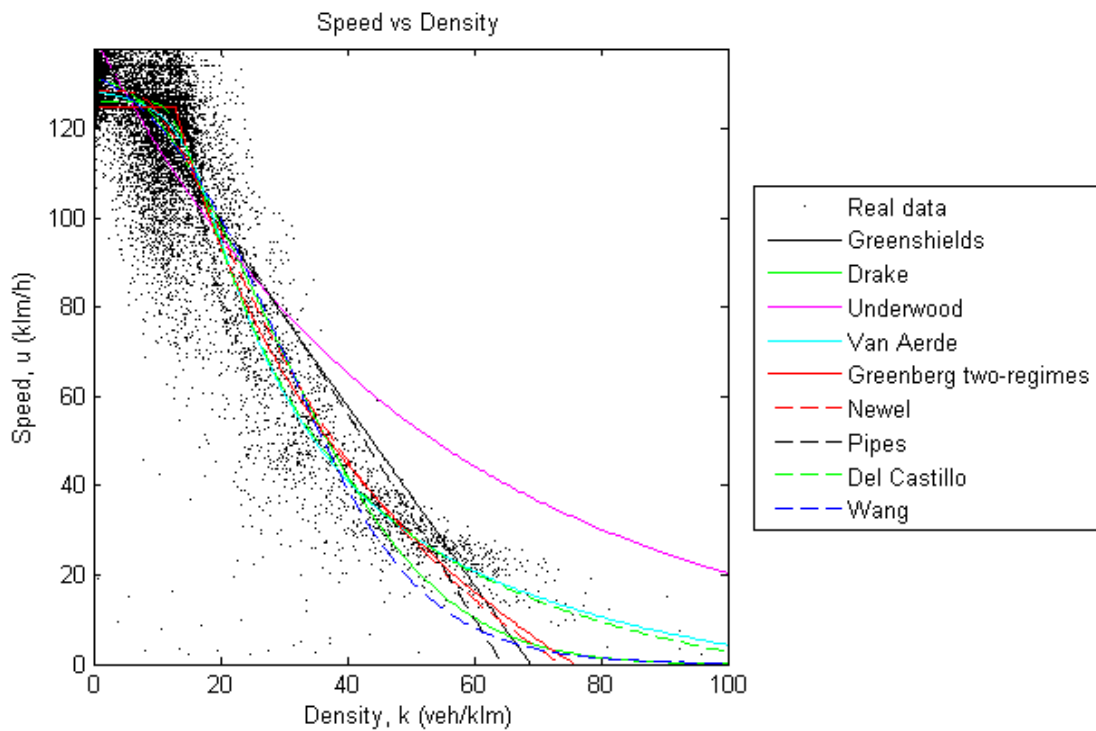
Εικόνα 3.1 : Διάγραμμα ταχύτητας-σχετικής απόστασης (Λωρίδα 1).



Εικόνα 3.2 : Διάγραμμα φόρτου-πυκνότητας (Λωρίδα 1).



Εικόνα 3.3 : Διάγραμμα ταχύτητας-φόρτου (Λωρίδα 1).



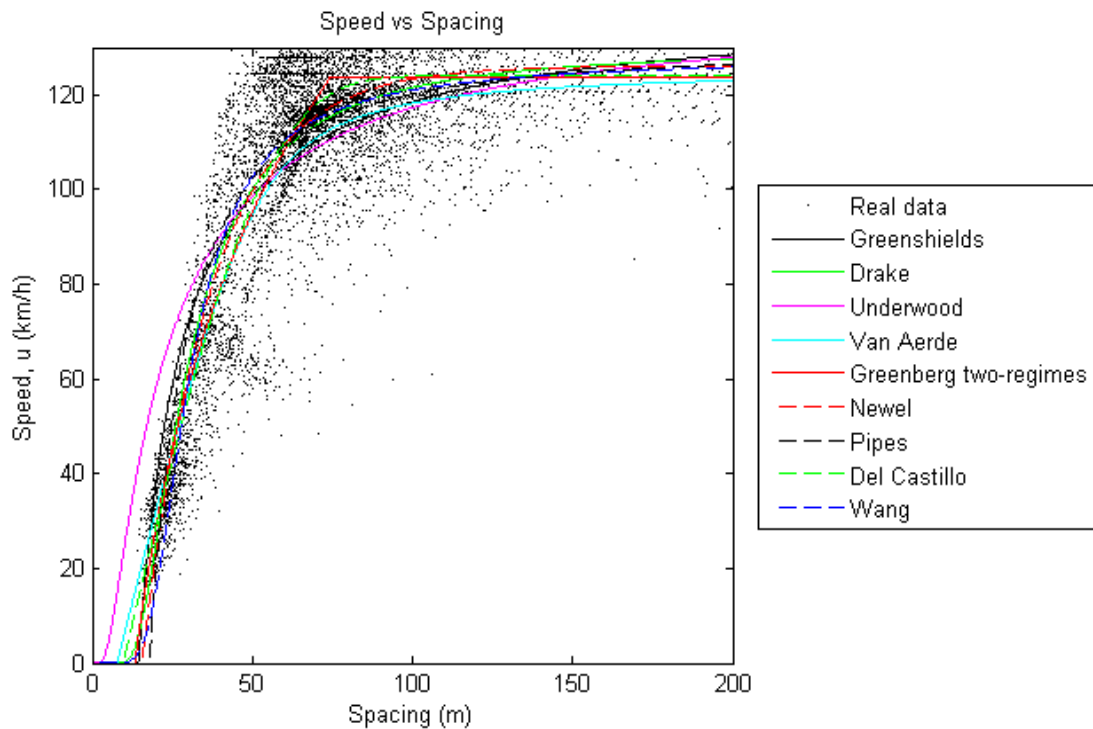
Εικόνα 3.4 : Διάγραμμα ταχύτητας-πυκνότητας (Λωρίδα 1).

## Λωρίδα 2

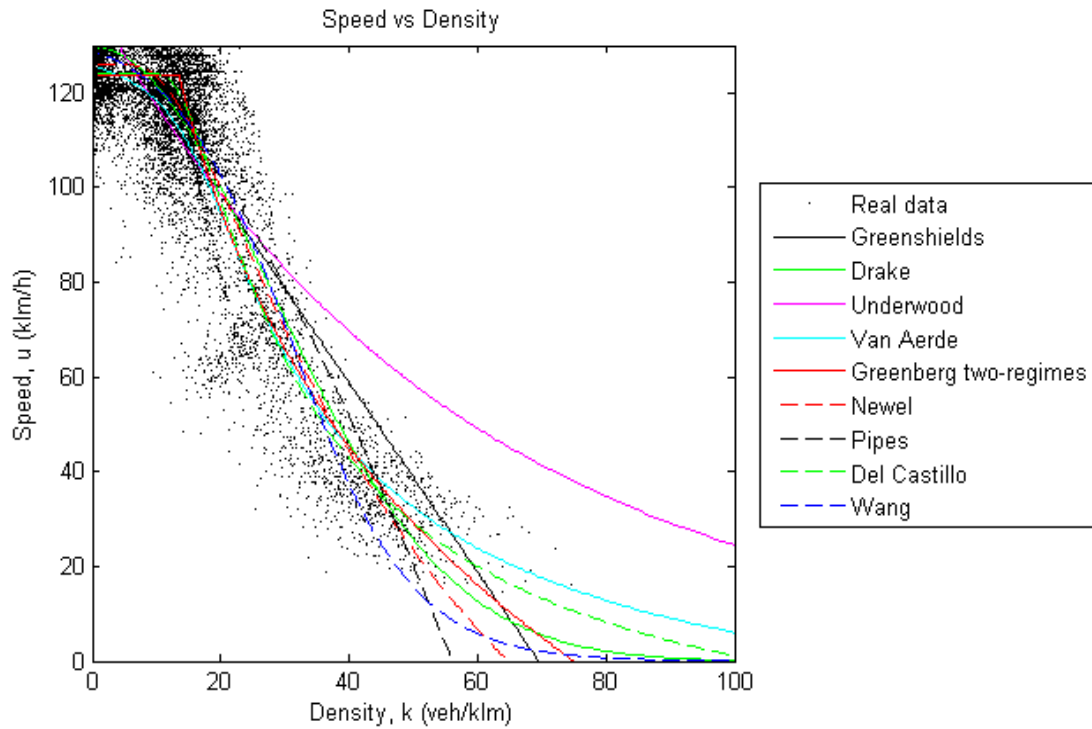
Ομοίως, για τη λωρίδα 2, ο Πίνακας 3.2 περιγράφει την βέλτιστη τιμή των παραμέτρων, ενώ στις εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης.

Πίνακας 3.2 : Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων των μοντέλων για τη λωρίδα 2.

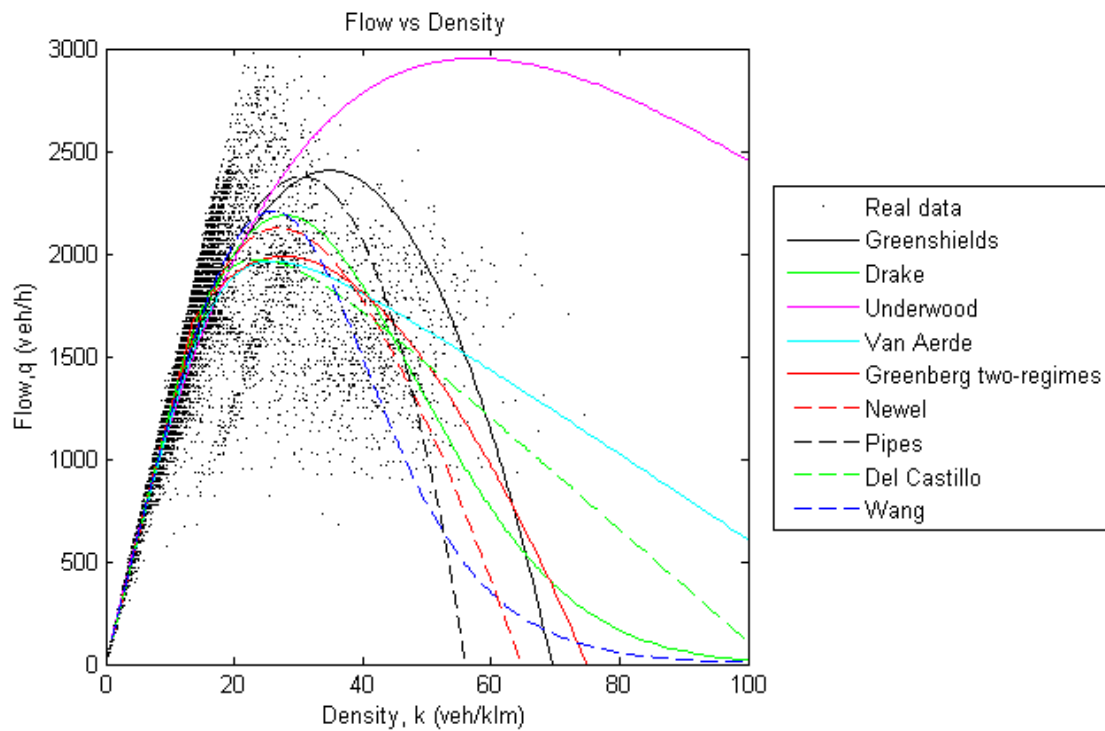
Λωρίδα2	$u_{free}$ km/h	$K_j$ veh/km	$K_c$ veh/km	$u_c$ km/h	$q_c$ veh/h	$C_j$	$\lambda$	$\theta$	n	RMSD
Van Aerde	125.6	128.7	-	76.2	1963	-	-	-	-	2.916
Del Castillo	124	103.9	-	-	-	6.5				2.921
Newell	126	64.73	-	-	-	-	1.37	-	-	2.996
Greenberg two regimes	123.6	75.02	-	70.5	-	-	-	-	-	2.962
Wang	133.3	-	31.24	-	-	-	-	0.011	-	3.095
Drake	129.6	-	27.81	-	-	-	-	-	-	3.106
Greenshields	138.4	69.49	-	-	-	-	-	-	-	3.653
Pipes	129.8	56.03	-	-	-	-	-	-	1.1	3.321
Underwood	139.5		57.51	-	-	-	-	-	-	4.061



Εικόνα 3.5 : Διάγραμμα ταχύτητας-σχετικής απόστασης (Λωρίδα 2).

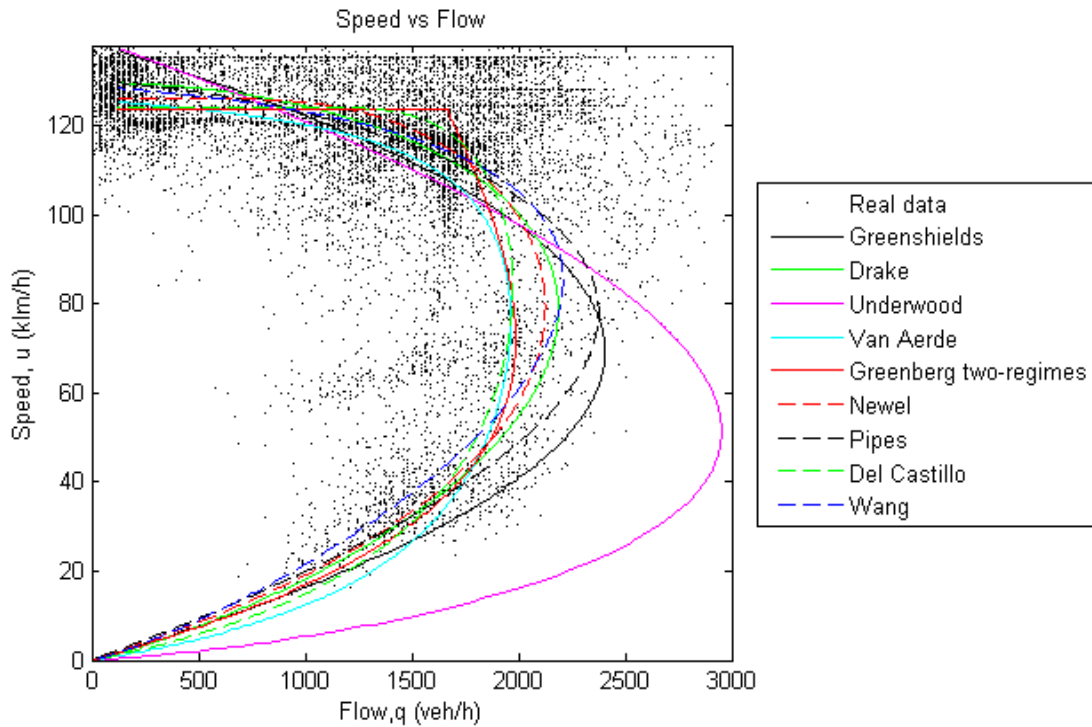


Εικόνα 3.6 : Διάγραμμα ταχύτητας-σχετικής απόστασης (Λωρίδα 2).



Εικόνα 3.7 : Διάγραμμα φόρτου-πυκνότητας (Λωρίδα 2).





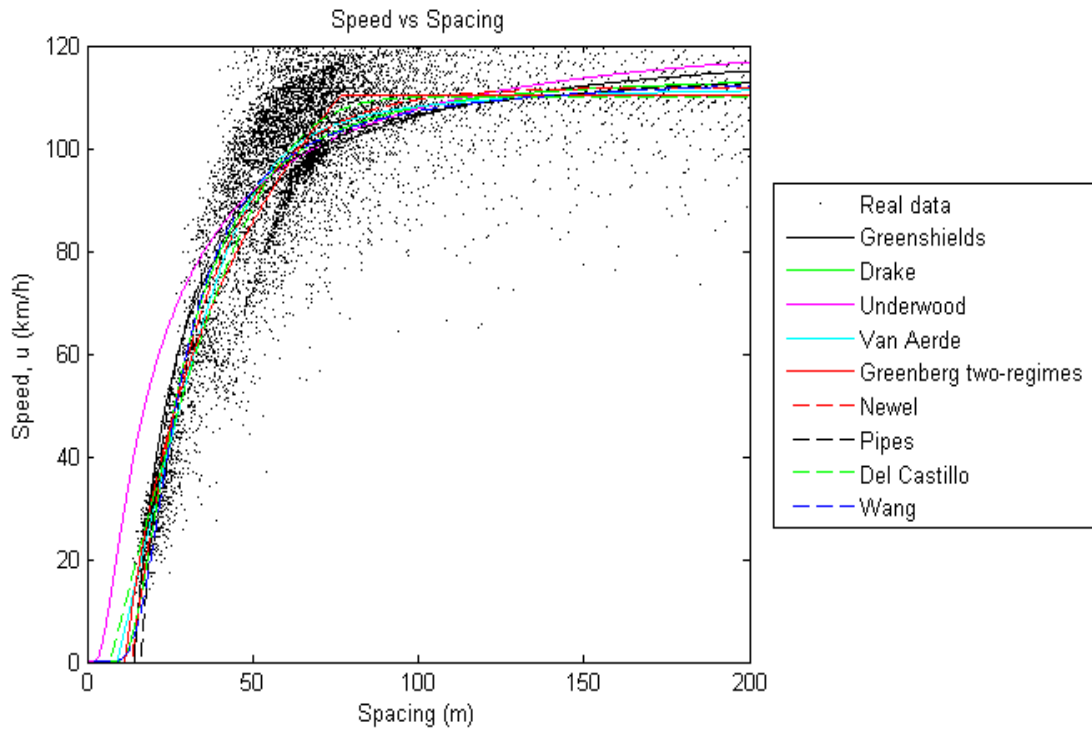
Εικόνα 3.8 : Διάγραμμα ταχύτητας-φόρτου (Λωρίδα 2).

### Λωρίδα 3

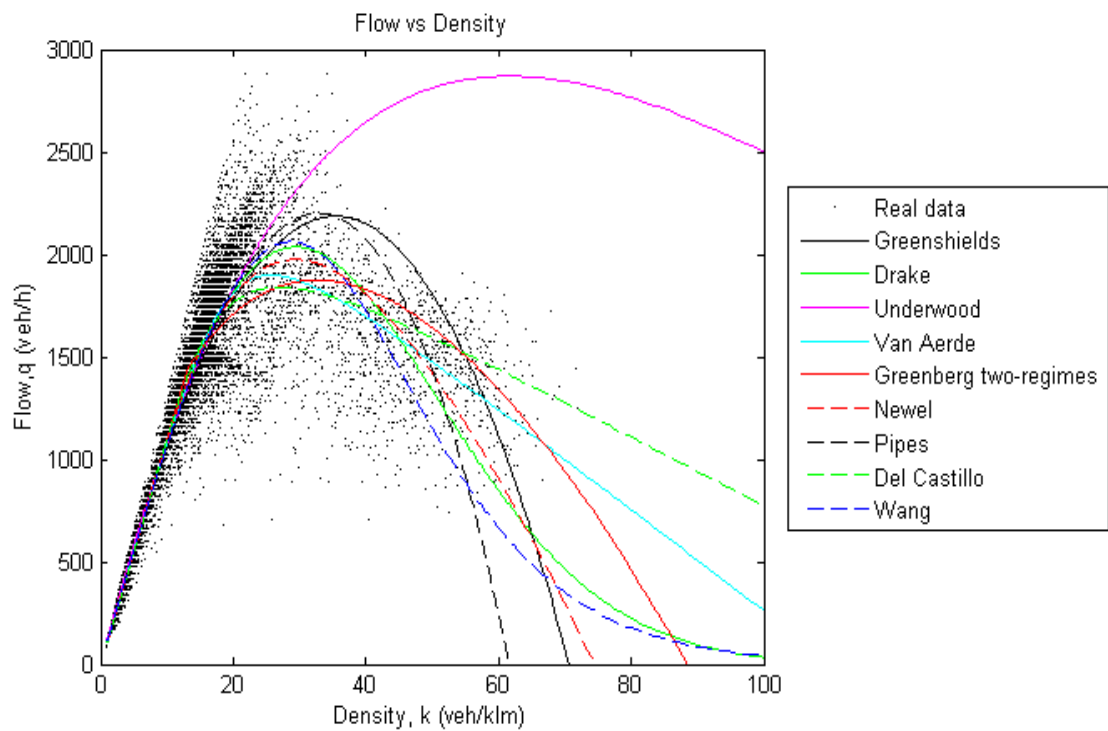
Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων για την λωρίδα 3:

Πίνακας 3.3 : Βέλτιστες τιμές των μοντέλων για τη λωρίδα 3.

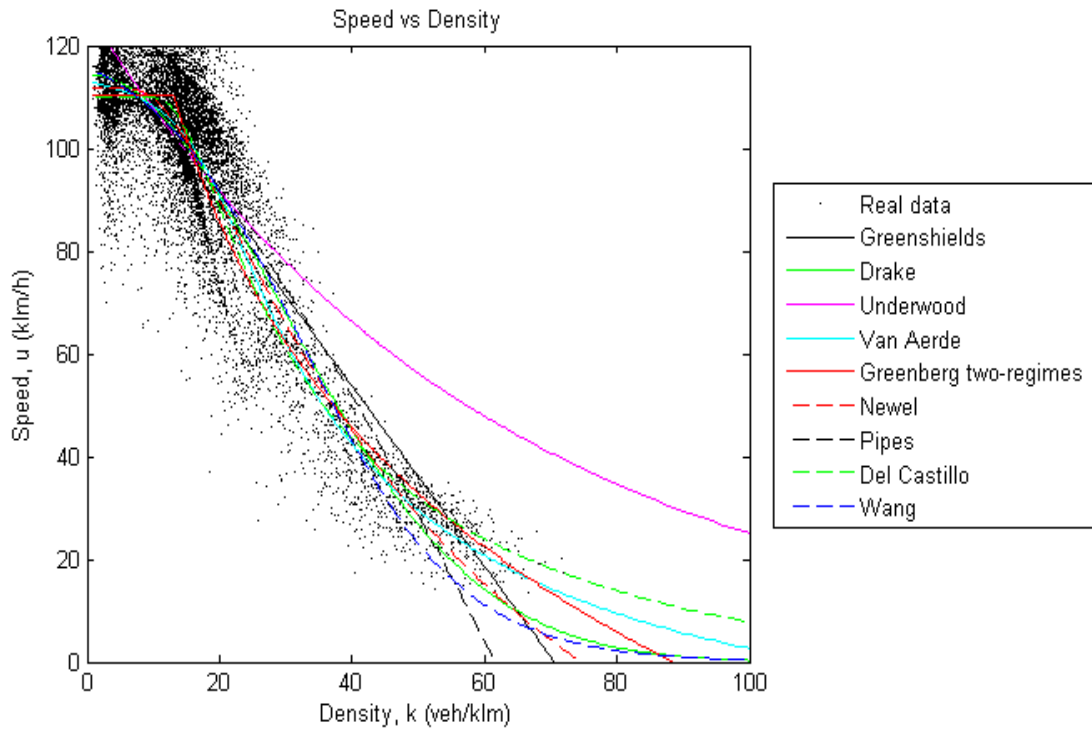
Λωρίδα 3	$u_{free}$ km/h	$K_j$ veh/km	$K_c$ veh/km	$u_c$ km/h	$q_c$ veh/h	$C_j$	$\lambda$	$\theta$	$n$	RMSD
Van Aerde	113.0	110.3	-	76.2	1899	-	-	-	-	2.74
Del Castillo	109.9	145.6	-	-	-	4.7				2.773
Newell	111.8	4.57	-	-	-	-	1.38	-	-	2.752
Greenberg two regimes	110.2	88.45	-	74.16	-	-	-	-	-	2.817
Wang	122.8	-	32.74	-	-	-	-	0.012	-	2.815
Drake	114.4	-	29.34	-	-	-	-	-	-	2.79
Greenshields	123.8	70.62	-	-	-	-	-	-	-	3.09
Pipes	116.4	61.58	-	-	-	-	-	-	1.3	2.942
Underwood	126.6	-	61.58	-	-	-	-	-	-	3.452



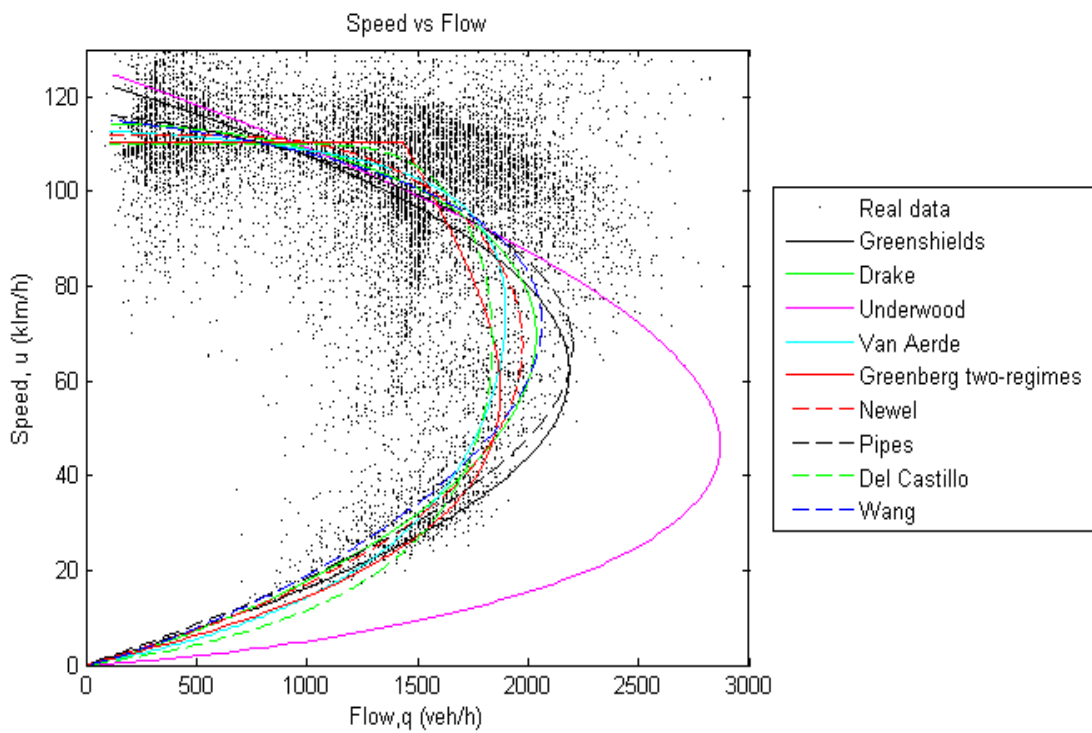
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα ταχύτητας-σχετικής απόστασης (Λωρίδα 3).



Εικόνα 3.10 : Διάγραμμα φόρτου-πυκνότητας (Λωρίδα 3).



Εικόνα 3.11 : Διάγραμμα ταχύτητας-πυκνότητας (Λωρίδα 3).



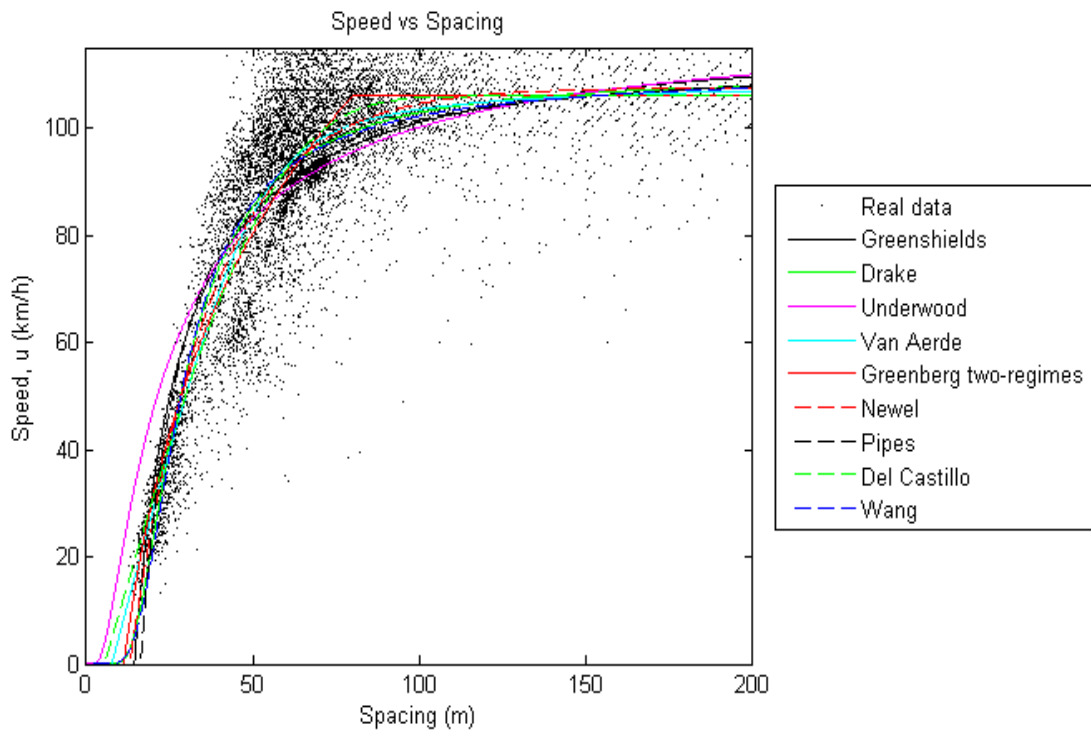
Εικόνα 3.12 : Διάγραμμα ταχύτητας-φόρτου (Λωρίδα 3).

### Λωρίδα 4

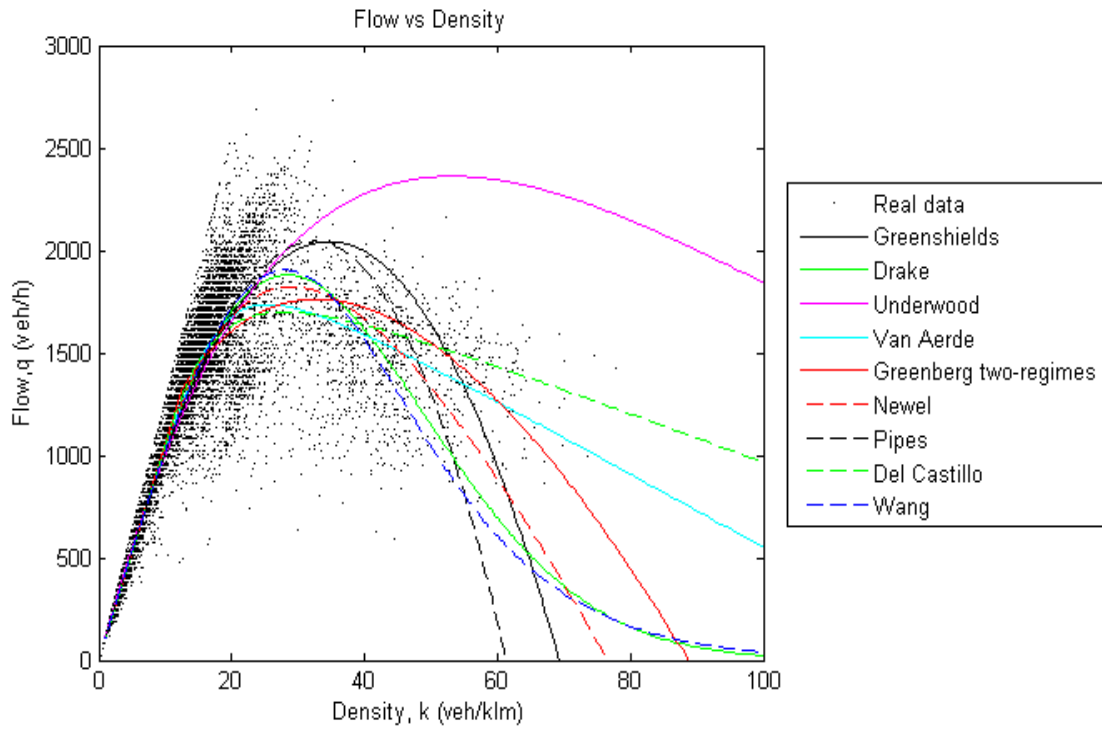
Όμοια για τη λωρίδα 4 σχηματίζεται ο Πίνακας 3.4 με τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.

Πίνακας 3.4 : Βέλτιστες τιμές των μοντέλων για τη λωρίδα 4.

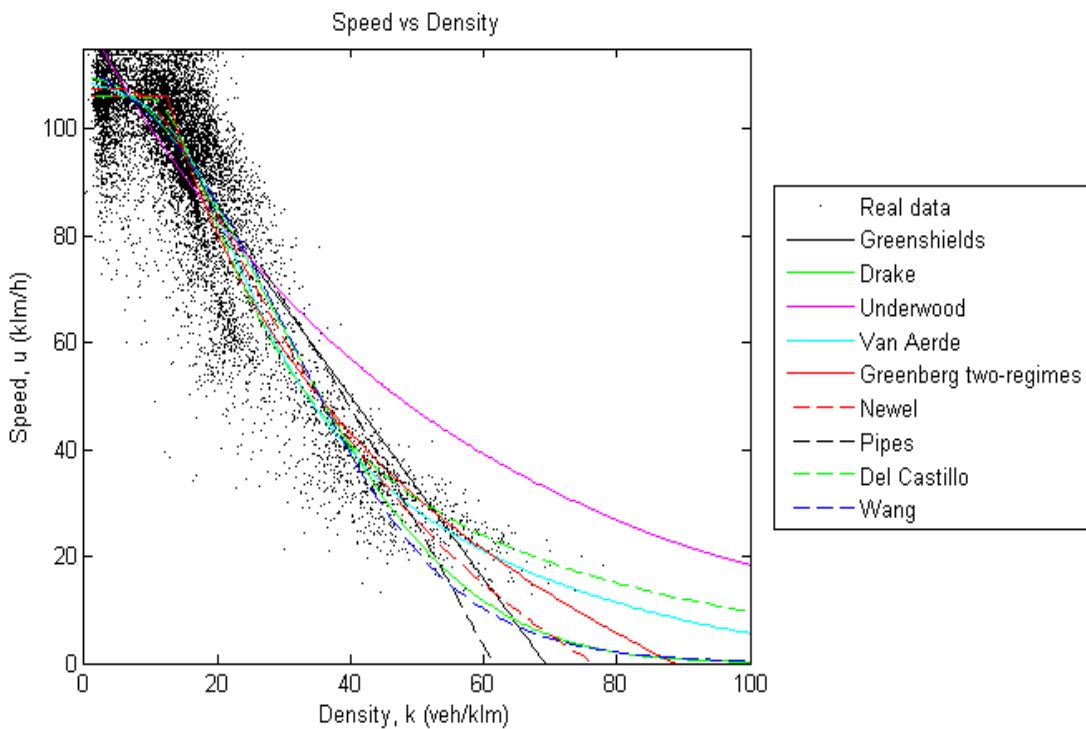
Λωρίδα 4	$u_{free}$ km/h	$K_j$ veh/km	$K_c$ veh/km	$u_c$ km/h	$q_c$ veh/h	$C_j$	$\lambda$	$\theta$	$n$	RMSD
Van Aerde	108.7	130.3	-	68.69	1736	-	-	-	-	2.704
Del Castillo	105.9	180.8	-	-	-	3.3				2.72
Newell	107.5	76.55	-	-	-	-	1.22	-	-	2.709
Greenberg two regimes	106	88.71	-	54	-	-	-	-	-	2.744
Wang	119.4	-	31.35	-	-	-	-	0.012	-	2.777
Drake	109.4	-	28.31	-	-	-	-	-	-	2.747
Greenshields	118.0	69.25	-	-	-	-	-	-	-	2.996
Pipes	112.2	61.32	-	-	-	-	-	-	1.3	2.902
Underwood	120.8	-	53.14	-	-	-	-	-	-	3.285



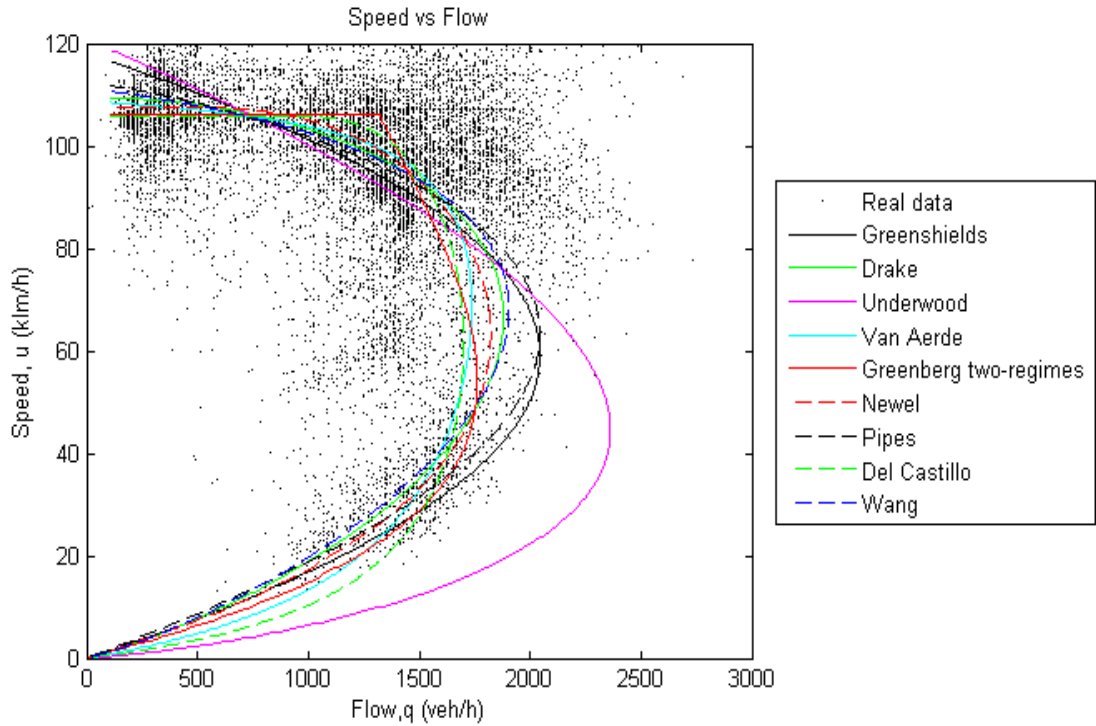
Εικόνα 3.13 : Διάγραμμα ταχύτητας-σχετικής απόστασης (Λωρίδα 4).



Εικόνα 3.14 : Διάγραμμα φόρτου-πυκνότητας (Λωρίδα 4).



Εικόνα 3.15 : Διάγραμμα ταχύτητας-πυκνότητας (Λωρίδα 4).



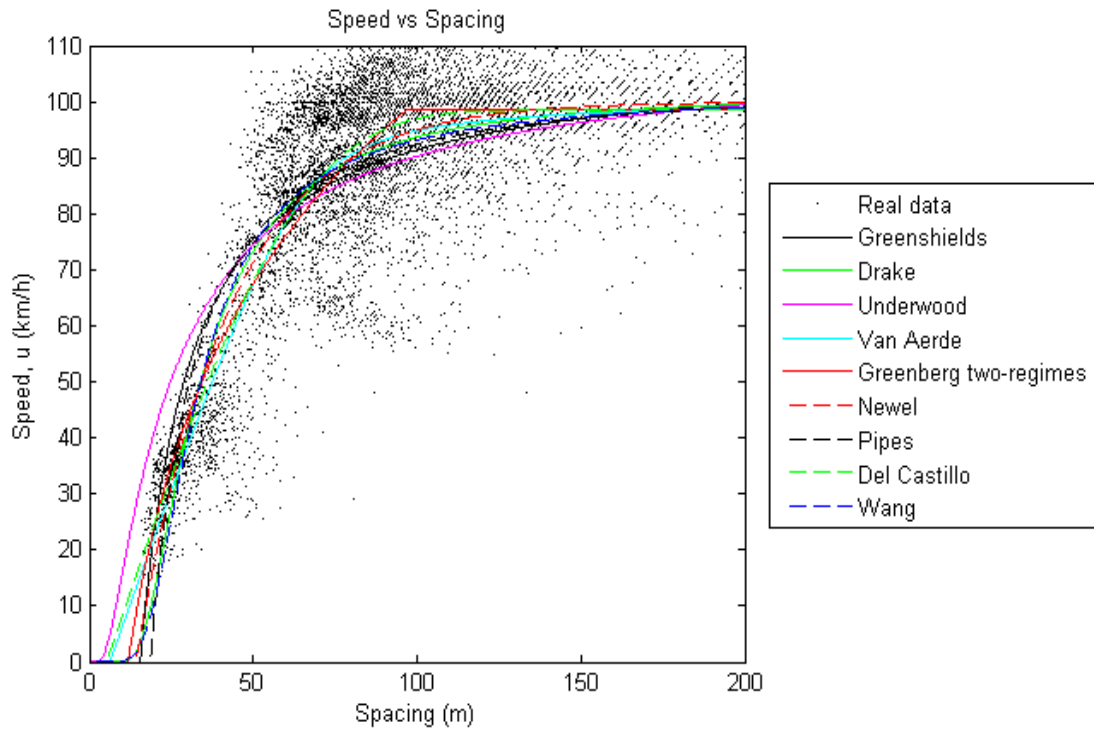
Εικόνα 3.16 : Διάγραμμα ταχύτητας-φόρτου (Λωρίδα 4).

**Λωρίδα 5 (δεξιά λωρίδα)**

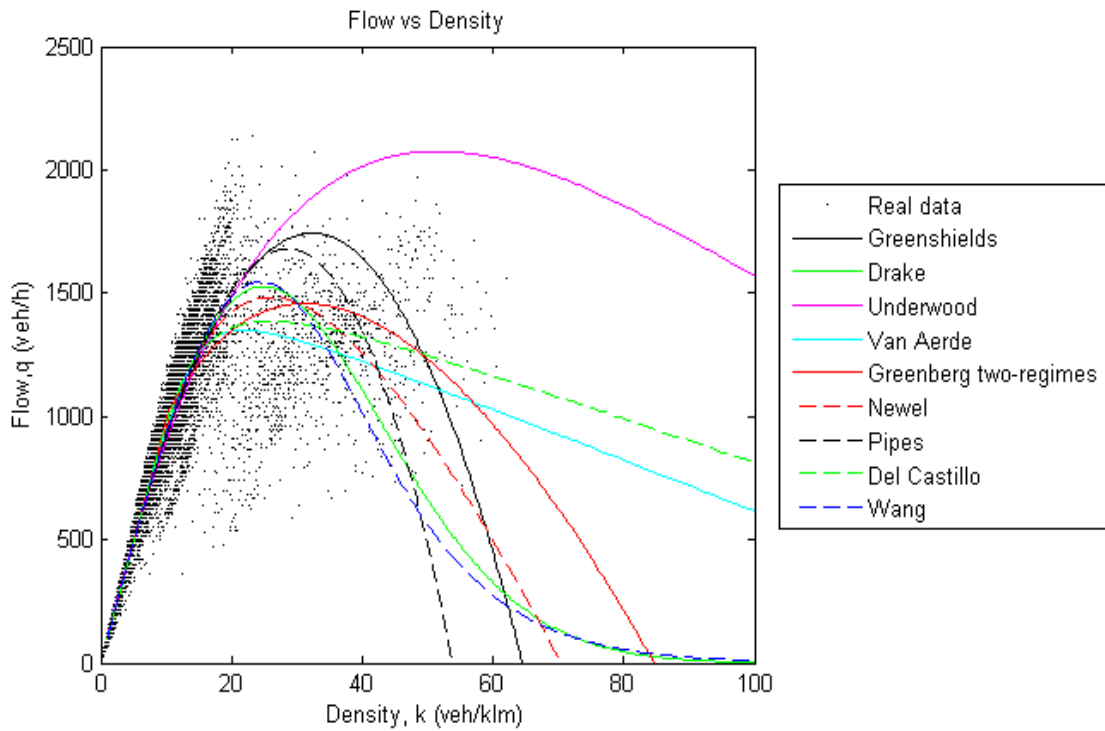
Ενώ τέλος για την λωρίδα 5:

Πίνακας 3.5: Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων για τη λωρίδα 5.

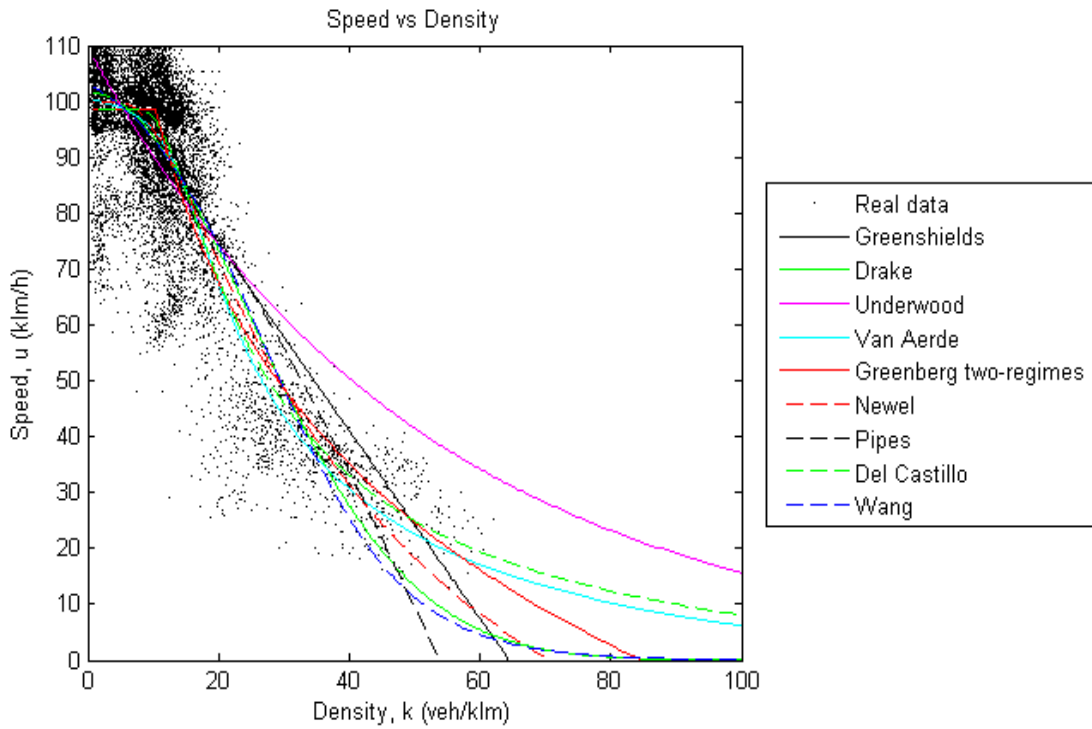
Λωρίδα 5	$u_{free}$ km/h	$K_j$ veh/km	$K_c$ veh/km	$u_c$ km/h	$q_c$ veh/h	$C_j$	$\lambda$	$\theta$	n	RMSD
Van Aerde	100.4	159.1	-	62.42	1349	-	-	-	-	2.578
Del Castillo	98.46	190.7	-	-	-	2.5				2.615
Newell	99.97	70.48	-	-	-	-	0.96	-	-	2.616
Greenberg two regimes	98.64	84.68	-	46.8	-	-	-	-	-	2.678
Wang	110.3	-	27.5	-	-	-	-	0.010	-	2.683
Drake	101.5	-	24.79	-	-	-	-	-	-	2.652
Greenshields	108.1	64.48	-	-	-	-	-	-	-	2.877
Pipes	103.5	53.83	-	-	-	-	-	-	1.3	2.78
Underwood	109.5		51.49	-	-	-	-	-	-	3.074



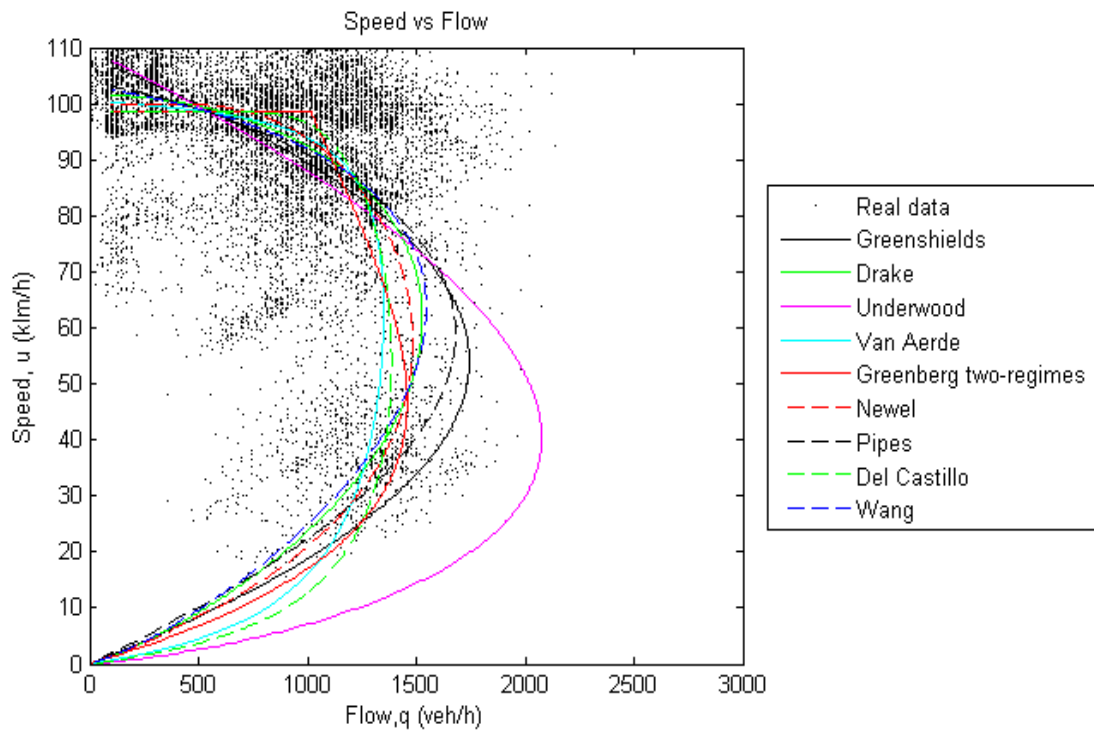
Εικόνα 3.17 : Διάγραμμα ταχύτητας-σχετικής απόστασης (Λωρίδα 5).



Εικόνα 3.18 : Διάγραμμα φόρτου-πυκνότητας (Λωρίδα 5).



Εικόνα 3.19 : Διάγραμμα ταχύτητας-πυκνότητας (Λωρίδα 5).



Εικόνα 3.20 : Διάγραμμα ταχύτητας-φόρτου (Λωρίδα 5).



Παρατηρείται πως για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας η ταχύτητα ελεύθερης ροής είναι διαφορετική, όπως αναφέρεται και στο [22], αφού εξαρτάται από την συμπεριφορά και τις επιθυμίες των οδηγών. Διαφορετική ταχύτητα θα αναπτύξει ένας οδηγός όταν βρει ελεύθερο το δρόμο μπροστά του στη δεξιά λωρίδα και διαφορετική στην αριστερή. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα του κάθε μοντέλου καθώς και η τυπική απόκλιση. Παρατηρείται πως το μοντέλο του Van Aerde έχει την καλύτερη επίδοση, γεγονός που ήταν και αναμενόμενο αφού έχει τις περισσότερες ελεύθερες παραμέτρους, και επομένως μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα

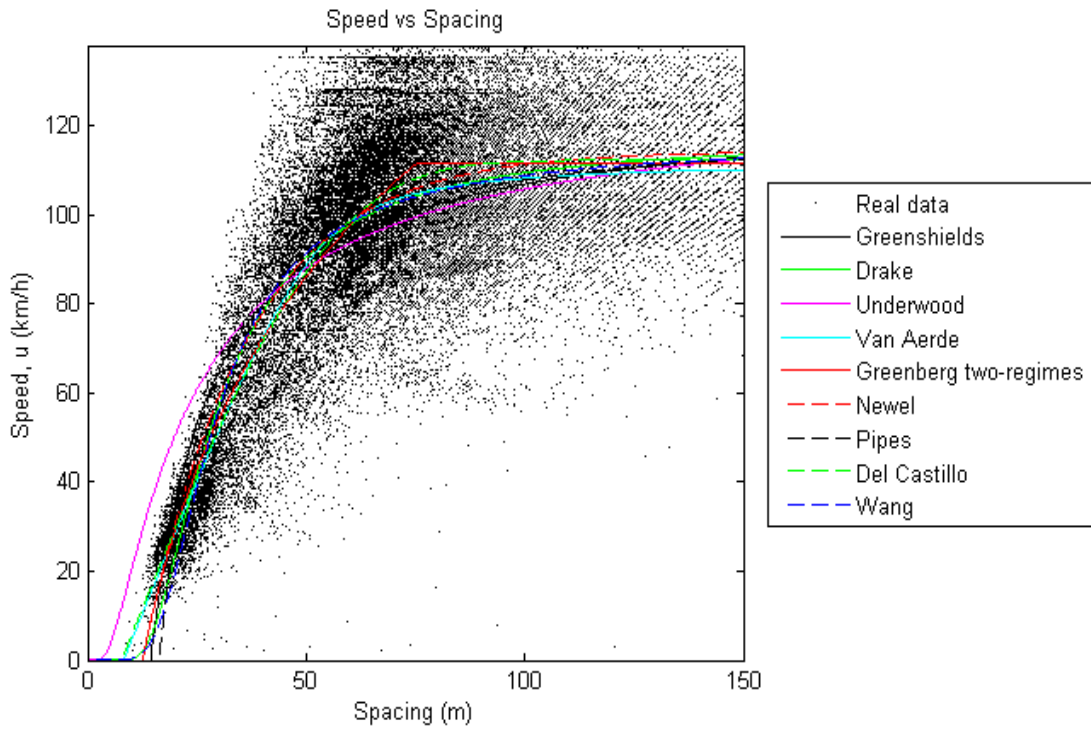
Πίνακας 3.6 : Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του σφάλματος για το κάθε μοντέλο.

Model	RMSE	Std. Deviation
Van Aerde	2.7984	0.18712
Del Castillo	2.8296	0.19582
Newell	2.8498	0.23013
Greenberg two regimes	2.8764	0.20033
Wang	2.9194	0.23050
Drake	2.9296	0.29167
Greenshields	3.2504	0.36764
Pipes	3.3302	0.50042
Underwood	3.5886	0.45594

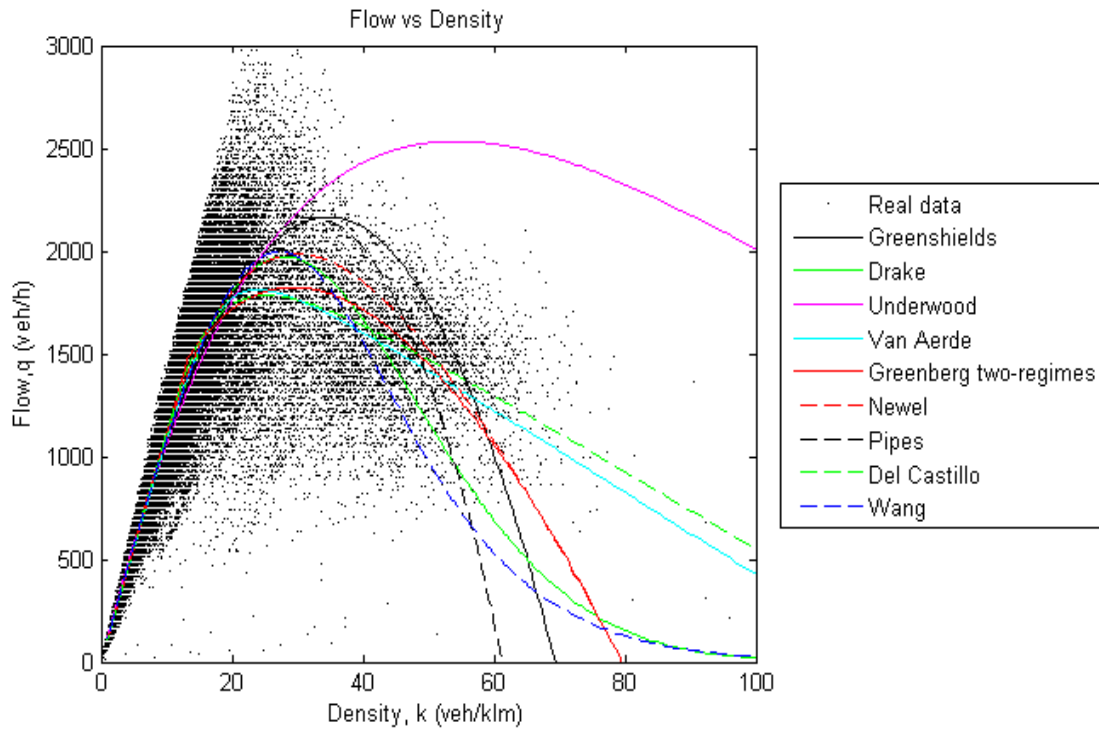
Στον παρακάτω Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης πάνω στο σύνολο των δεδομένων.

Πίνακας 3.7 : Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων των μοντέλων (Σύνολο των μετρήσεων).

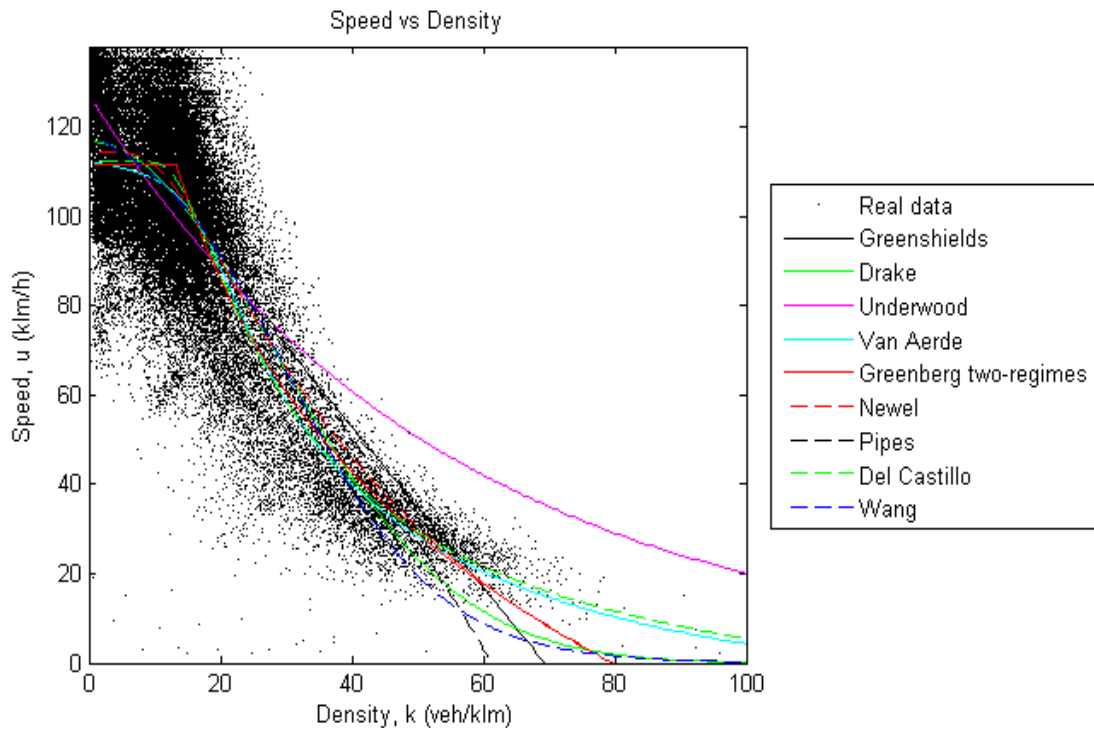
Total	$u_{free}$ km/h	$K_j$ veh/km	$K_c$ veh/km	$u_c$ km/h	$q_c$ veh/h	$C_j$	$\lambda$	$\theta$	n	RMSD
Van Aerde	115	120.6	-	76.2	1811	-	-	-	-	4.053
Del Castillo	112.2	129.2	-	-	-	5.2				4.087
Newell	114.2	72.8	-	-	-	-	1.32	-	-	4.097
Greenberg two regimes	111.5	79.6	-	62.24	-	-	-	-	-	4.113
Wang	125.4	-	31.05	-	-	-	-	0.011	-	4.122
Drake	116.7	-	27.81	-	-	-	-	-	-	4.113
Greenshields	124.8	69.3	-	-	-	-	-	-	-	4.326
Pipes	119.4	61.3	-	-	-	-	-	-	1.3	4.2486
Underwood	127.1		54.18	-	-	-	-	-	-	4.569



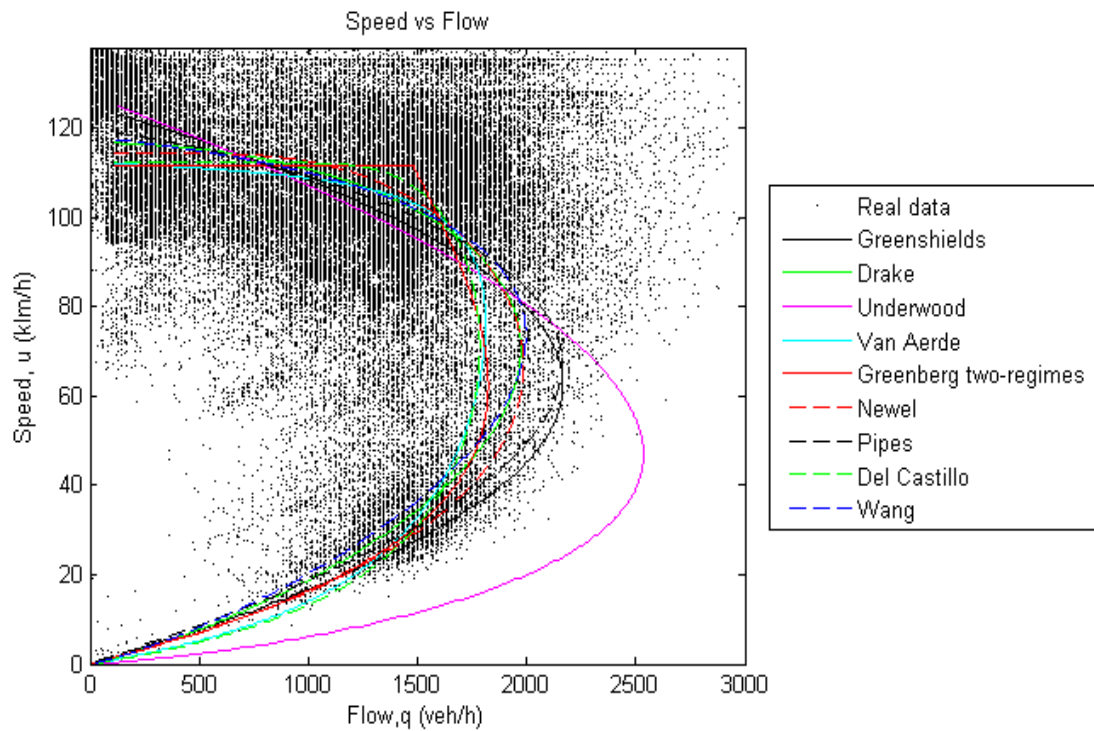
Εικόνα 3.21 : Διάγραμμα ταχύτητας-σχετικής απόστασης (Σύνολο των μετρήσεων).



Εικόνα 3.22 : Διάγραμμα φόρτου-πυκνότητας (Σύνολο των μετρήσεων).



Εικόνα 3.23 : Διάγραμμα ταχύτητας-πυκνότητας (Σύνολο των μετρήσεων).



Εικόνα 3.24 : Διάγραμμα ταχύτητας-φόρτου (Σύνολο των μετρήσεων).

### 3.2.Αποτελέσματα της βαθμονόμησης των μικροσκοπικών μοντέλων

Τα μικροσκοπικά μοντέλα βαθμονομήθηκαν αρχικά με τη χρήση πέντε χαρακτηριστικών ζευγών «leader-follower». Στην συνέχεια, τα μοντέλα με την καλύτερη απόδοση, βαθμονομήθηκαν με τη χρήση και των υπόλοιπων ζευγών δεδομένων. Στους Πίνακες 3.8-3.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των 5 σετ δεδομένων για κάθε μοντέλο ξεχωριστά, και στις Εικόνες 3.25-2.29 παρουσιάζεται η σύγκριση της επίδοσης των μοντέλων με τη βοήθεια του διαγράμματος σχετική απόσταση-χρόνου. Η μονάδα στον άξονα του χρόνου είναι 0.1 δευτερόλεπτα.

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το γραμμικό μοντέλο. Όπου  $T$  είναι ο χρόνος αντίδρασης και  $a_{l,m}$  ο συντελεστής ευαισθησίας.

Γραμμικό μοντέλο	$T$ (s)	$a_{l,m}$	error* $10^{-4}$
Data set 1	1.385	0.655	21.4
Data set 2	0.7322	1.25	39.3
Data set 3	1.35	0.638	22.5
Data set 4	1.456	0.462	25.9
Data set 5	0.74963	0.645	65.7

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το μοντέλο του Greenberg. Όπου  $T$  είναι ο χρόνος αντίδρασης και  $a_{l,m}$  ο συντελεστής ευαισθησίας.

Greenberg	$T$ (s)	$a_{l,m}$	error * $10^{-4}$
Data set 1	1.86	0.655	21.92
Data set 2	0.55	23.422	40.88
Data set 3	1.45	11.553	23.67
Data set 4	0.45	10.716	33.42
Data set 5	0.94	15.540	70.12

Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το μοντέλο του Greenshields. Όπου  $T$  είναι ο χρόνος αντίδρασης και  $a_{l,m}$  ο συντελεστής ευαισθησίας.

Greenshields	$T$ (s)	$a_{l,m}$	error* $10^{-4}$
Data set 1	0.65	232.9	23.05
Data set 2	0.64	259.99	94.45
Data set 3	0.45	209.02	20.31
Data set 4	0.25	174.92	70.92

Data set 5	0.54	237.70	58.59
------------	------	--------	-------

Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το μοντέλο του Gipps. Όπου  $T$  είναι ο χρόνος αντίδρασης,  $a_i^{max}$  η μέγιστη επιθυμητή επιτάχυνση,  $s_{n-1}$  η ελάχιστη επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε στάση, μαζί με το μήκος του οχήματος,  $b_i^{max}$  η επιθυμητή μέγιστη επιβράδυνσή και  $b_{i-1}^{max}$  η εκτίμηση του οδηγού που ακολουθεί για την μέγιστη επιβράδυνση του μπροστινού του.

Gipps	$a_i^{max} (\frac{m}{s^2})$	$b_i^{max} (\frac{m}{s^2})$	$b_{i-1}^{max} (\frac{m}{s^2})$	$u_{desired} (\frac{m}{s})$	$s_{n-1}$ (m)	$T$ (s)	Error
Data set 1	2.7	-1.9	-1.5	12.59	6.17	1.19	10.34
Data set 2	1.06	-0.84	-0.69	20.04	6.19	1.5	11.91
Data set 3	1.31	-0.87	-0.77	14.07	4.33	1.34	10.02
Data set 4	0.56	-0.64	-0.59	24.9	4.87	1.8	19.46
Data set 5	1.33	-0.13	-0.14	14.84	6.63	1.69	28.83

Πίνακας 3.12: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το μοντέλο του Tampere. Όπου  $T$  είναι ο χρόνος αντίδρασης,  $a_i^{max}$  η μέγιστη επιθυμητή επιτάχυνση,  $u_{desired}$  είναι η επιθυμητή ταχύτητα,  $c_3$  είναι ένας συντελεστής ευαισθησίας του οδηγού που ακολουθεί και αναφέρεται στη διαφορά της ταχύτητάς του με την επιθυμητή ταχύτητα,  $c_1$  είναι ένας συντελεστής ευαισθησίας που σχετίζεται με την σχετική ταχύτητα,  $c_2$  ένας συντελεστής ευαισθησίας που αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ του χωρικού διαχωρισμού και του επιθυμητού διαχωρισμού,  $\gamma$  είναι η επιθυμητή αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο οχημάτων για κάθε αύξηση 1 m/s στην ταχύτητα, και  $d_i$  η επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε στάση.

Tampere	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$u_{desired} (\frac{m}{s})$	$\gamma$	$d_i$ (m)	$T$ (s)	Error
Data set 1	0.61	0.3	7.92	12.24	0.88	8.53	0.12	10.68
Data set 2	0.51	0.05	1.37	18.32	0.26	13.35	0.05	8.86
Data set 3	0.69	0.09	0.23	14.12	1.09	6.92	0.94	9.53
Data set 4	0.51	0.01	0.17	14.43	1.86	4.98	1.05	17.61
Data set 5	0.56	0.02	0.19	11.83	3.0835	5.39	0.99	30.61

Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το Improved Optimal Velocity Model. Όπου  $T_0$  είναι ο χρόνος αντίδρασης,  $u_{desired}$  είναι η επιθυμητή ταχύτητα,  $\gamma$  είναι ένας συντελεστής βαρύτητας της ευαισθησίας της αντίληψης της σχετικής ταχύτητας και  $s_0$  είναι η ελάχιστη επιθυμητή απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων.

IOVM	$\gamma$	$T_0$ (s)	$s_0$ (m)	$u_{desired} (\frac{m}{s})$	error
------	----------	-----------	-----------	-----------------------------	-------

Data set 1	0.1	0.9719	7.9814	27.559883	13.3
Data set 2	0.051381	0.8382	10.143	17.981971	37.1
Data set 3	0.149676	1.2844	5.7859	13.905146	12.4
Data set 4	0.1	2.0514	5.9725	12.385499	21.1
Data set 5	0.803595	1.9953	10.750	11.564064	33.6

Πίνακας 5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το *Optimal Velocity with Relative Velocity*. Όπου  $u_{desired}$  είναι η επιθυμητή ταχύτητα,  $\gamma$  είναι ένας συντελεστής βαρύτητας της ευαισθησίας της αντίληψης της σχετικής ταχύτητας  $s_c$  είναι η ελάχιστη επιθυμητή απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων και  $h_c$  είναι ένα όριο απόστασης μεταξύ των δύο οχημάτων.

OVRV	$g$	$h_c$	$s_c$	$u_{desired} (\frac{m}{s})$	error
Data set 1	0.0063558	15.8723520	0.144208	16.60075	12.98
Data set 2	0.1251043	21.8092808	0.106260	28.62356	35.10
Data set 3	0.1952722	15.8074836	0.102411	17.13682	14.6
Data set 4	0.0188516	20.3245804	0.078858	14.94657	24.70
Data set 5	0.6903185	39.0236262	0.048883	36.06312	33.59

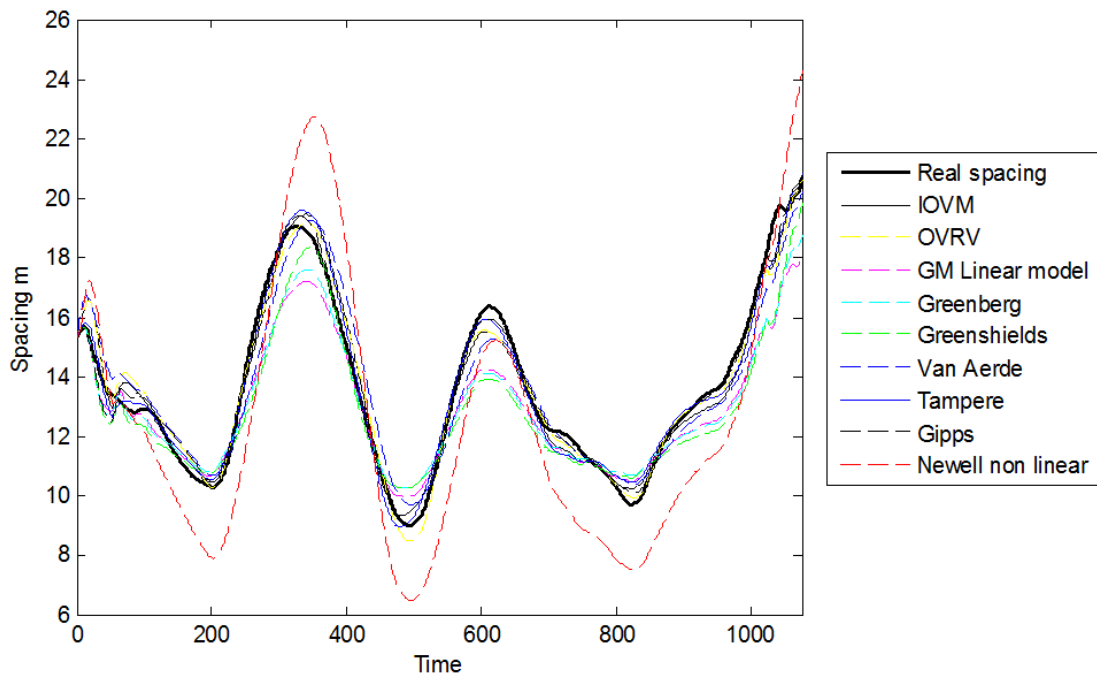
Πίνακας 3.15: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το μοντέλο του *Newel*. Όπου  $\tau$  είναι ο χρόνος αντίδρασης,  $u_{desired}$  είναι η επιθυμητή ταχύτητα και  $\lambda$  ένας συντελεστής ευαισθησίας που σχετίζεται με τον οδηγό  $i$  (Η κλίση της καμπύλης του διαγράμματος ταχύτητας- χωρικού διαχωρισμού).

newel	$\lambda$	$\tau$	$u_{desired} (\frac{m}{s})$	error
Data set 1	0.9	0.51863	29.99	37.9
Data set 2	0.1619	0.74308	28	55.3
Data set 3	1.0080	0.65582	32	15.2
Data set 4	0.5950	1.12	30	22.6
Data set 5	0.4559	0.1	27	48.0

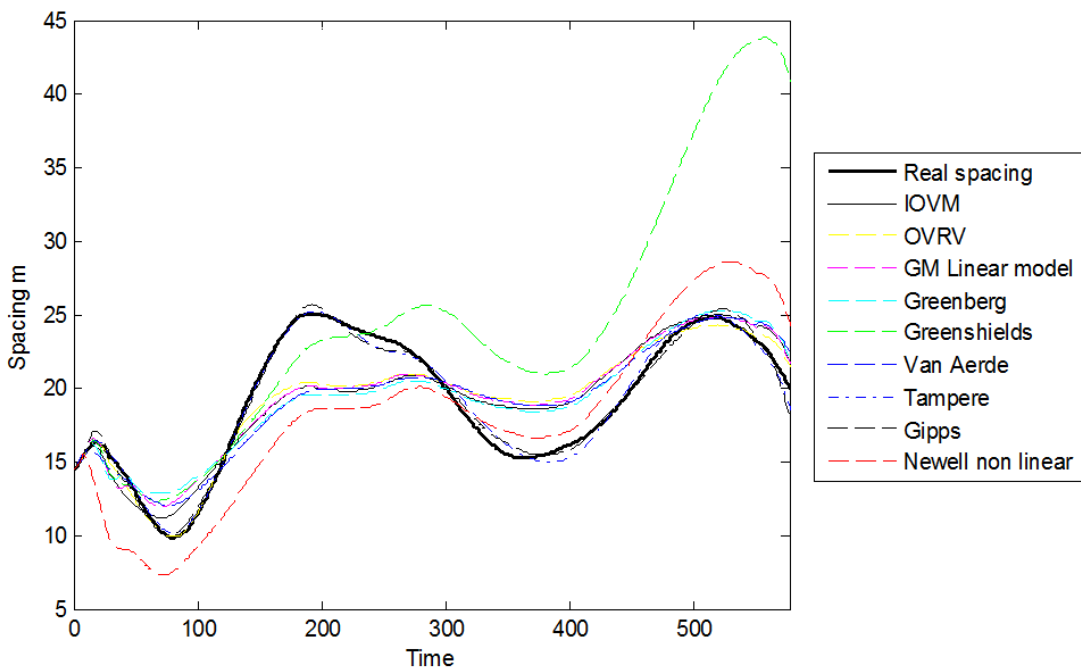
Πίνακας 3.16: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το μοντέλο του *Van Aerde*. Όπου  $u_{desired}$  είναι η επιθυμητή ταχύτητα και  $c_1, c_2, c_3$  συντελεστές ευαισθησίας.

van	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$u_{desired} (\frac{m}{s})$	error
-----	-------	-------	-------	-----------------------------	-------

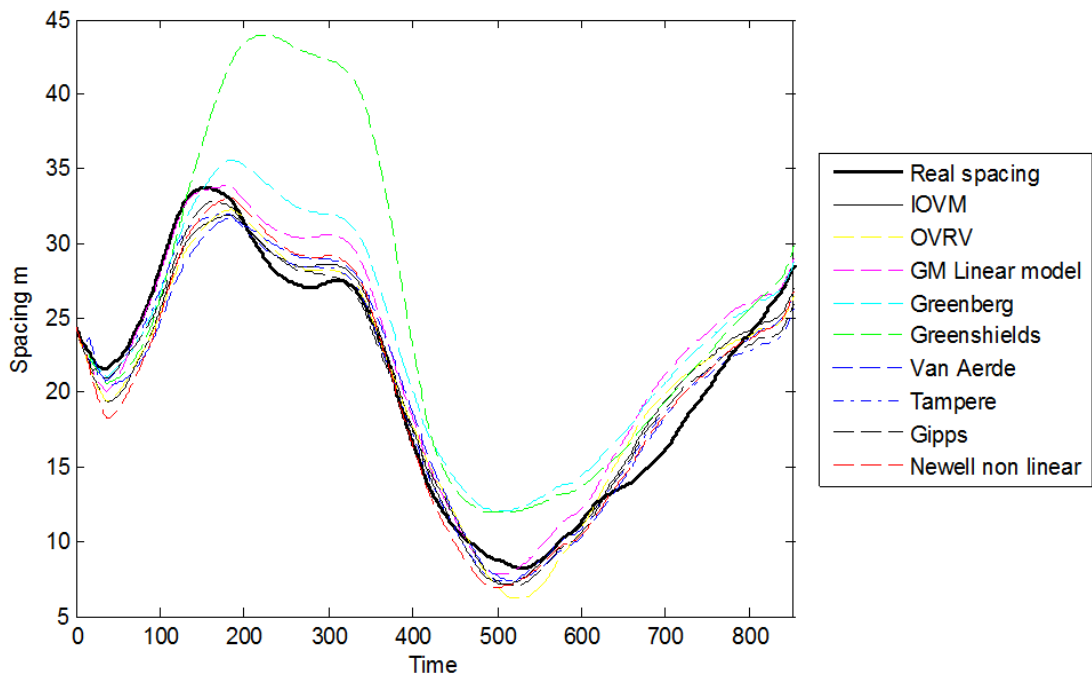
Data set 1	8.01	0.75	0.97	36.63	7.2
Data set 2	10.52	0.1022	0.8160	49.10	39
Data set 3	5.518	182.36	0.7417	27.08	15.3
Data set 4	3.914	40.685	1.9245	22.16	24
Data set 5	10.23	1.4007	2.0305	23.84	33



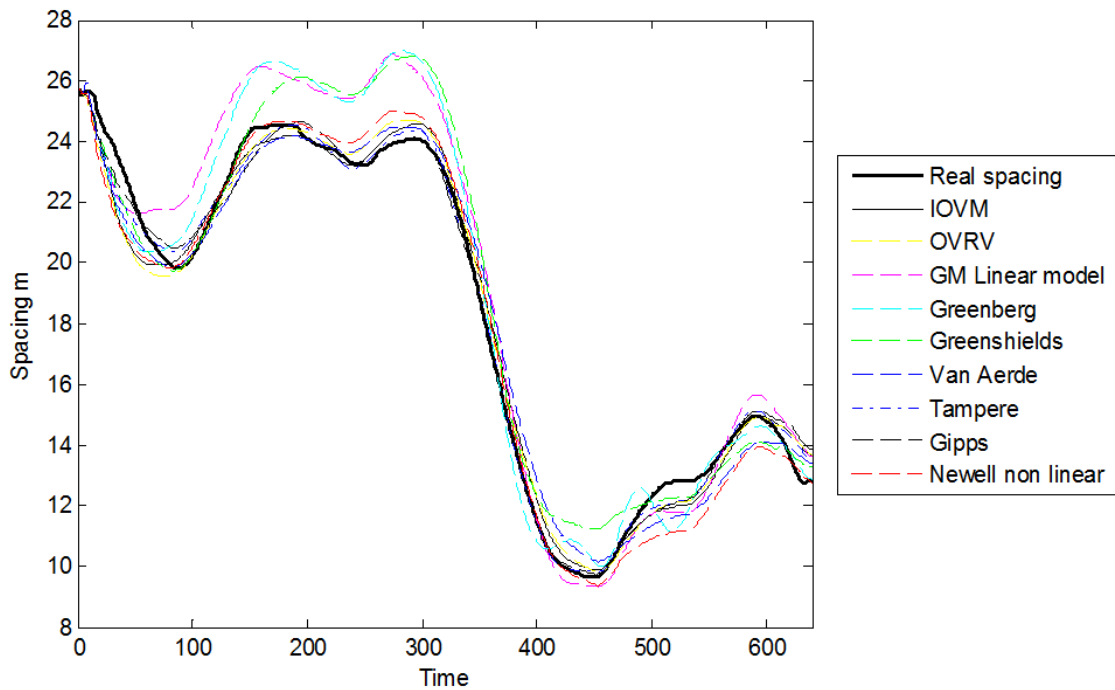
Εικόνα 3.25: Αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το σετ δεδομένων 1.



Εικόνα 3.26: Αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το σετ δεδομένων 2.

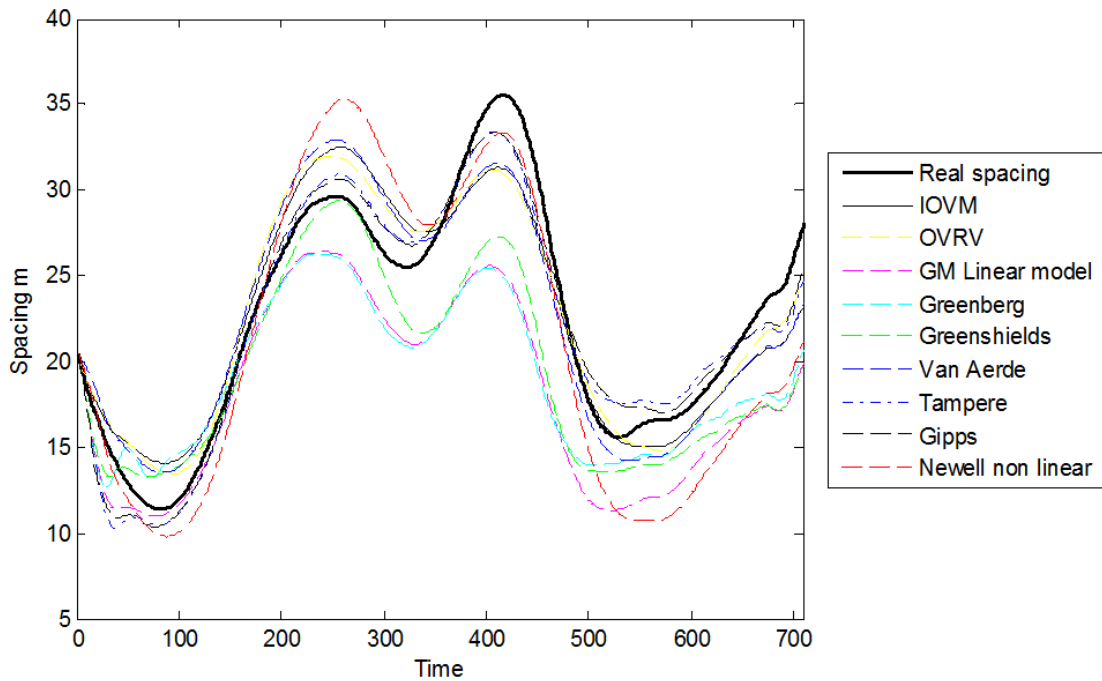


Εικόνα 3.27: Αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το σετ δεδομένων 3.



Εικόνα 3.28: Αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το σετ δεδομένων 4.





Εικόνα 3.29: Αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το σετ δεδομένων 5.

Στον παρακάτω παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και την τυπική του απόκλιση για κάθε μοντέλο, όσον αφορά αυτά τα πέντε σετ δεδομένων. Είναι ξεκάθαρο πως τα μοντέλα με τους δύο κλάδους του Gipps και του Tampere έχουν την καλύτερη επίδοση. Επομένως, τα δύο αυτά μοντέλα βαθμονομήθηκαν και με τη χρήση των υπολοίπων ζευγών «leader-follower». Όταν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων ξεπερνούσαν κάποιο προκαθορισμένο όριο τότε το συγκεκριμένο σετ δεδομένων απορριπτόταν. Επίσης, σύμφωνα με τον περιορισμό του κεφαλαίου απορρίφθηκαν τα σετ δεδομένων όπου η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του μπροστινού οδηγού ήταν μικρότερη από 10 feet/sec. Οπότε, για τη βαθμονόμηση του μοντέλου του Gipps χρησιμοποιήθηκαν 108 σετ δεδομένων, ενώ για το μοντέλο του Tampere 123. Τα αναλυτικά αποτελέσματα για αυτά τα δύο μοντέλα παρουσιάζονται σχηματικά στο Παράρτημα Α, ενώ οι βέλτιστες τιμές κάθε παραμέτρου, οι οποίες προέκυψαν από τη βαθμονόμηση παρουσιάζονται στους πίνακες του Παραρτήματος Β.

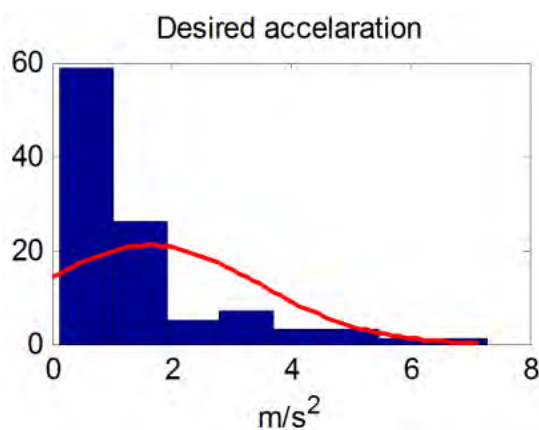
Πίνακας 6: Αξιολόγηση των μικροσκοπικών μοντέλων Car-following.

Data set	1	2	3	4	5	Mean Error	Std.Deviation
Linear	21.4	39.3	22.5	25.9	65.7	34.96	18.61
Greenberg	21.92	40.88	23.67	33.42	70.12	38	19.52
Greenshields	23.05	94.45	20.31	70.92	58.59	53.46	31.76

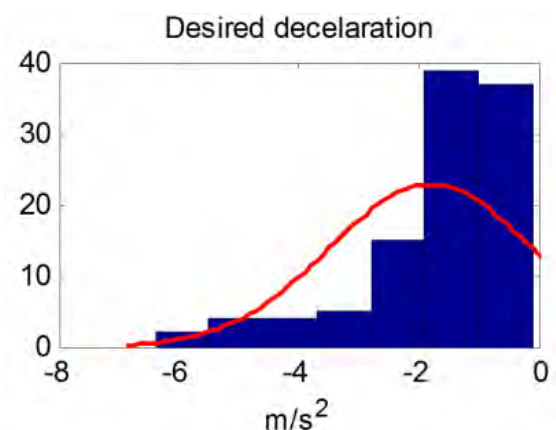
OVRV	12.98	35.10	14.6	24.70	33.59	24.19	10.31
IOVM	13.3	37.1	12.4	21.1	33.6	23.5	11.4
Van Aerde	7.2	39	15.3	24	33	23.7	12.87
Newel	37.9	55.3	15.2	22.6	48	35.8	16.82
Gipps	10.34	11.91	10.02	19.46	28.83	16.11	8.07
Tampere	10.68	8.86	9.53	17.61	30.61	15.45	9.16

### 3.2.1. Συχνότητα των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων

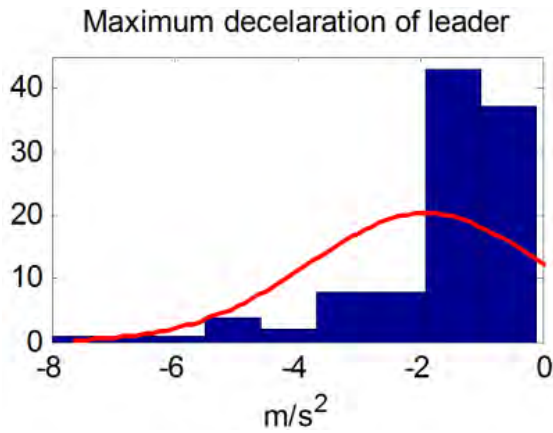
Η οδηγική συμπεριφορά μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στους οδηγούς. Επομένως, ένας από τους βασικούς στόχους των λογισμικών προσομοίωσης είναι να μπορέσουν να αναπαραστήσουν αυτήν την μεταβλητότητα. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της συχνότητας των τιμών κάθε παραμέτρου. Η γνώση της συχνότητας με την οποία κάθε εύρος τιμών μίας παραμέτρου εμφανίζεται ανάμεσα σε ένα πλήθος οδηγών, είναι απαραίτητη ώστε να λογισμικά μικροσκοπικής προσομοίωσης να μπορέσουν να ανταποκριθούν σε αυτήν την ποικιλομορφία της οδηγικής συμπεριφοράς. Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται οι συχνότητες των τιμών για κάθε παράμετρο των μοντέλων του Gipps και του Tampere, έτσι όπως υπολογίστηκαν μέσω της βαθμονόμησης και μία εκτίμηση κανονικής κατανομής.



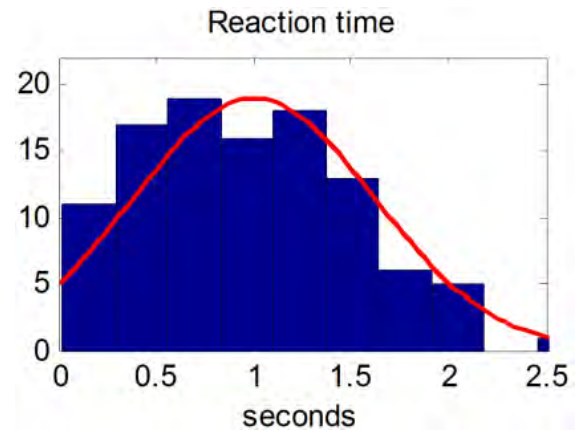
Εικόνα 3.30: Ιστόγραμμα της επιθυμητής επιτάχυνσης για το μοντέλο του Gipps.



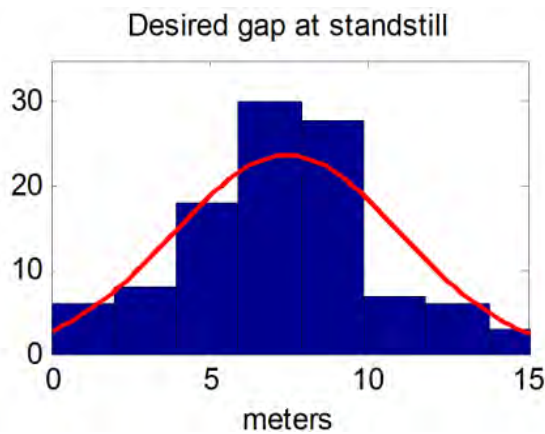
Εικόνα 3.31: Ιστόγραμμα της επιθυμητής επιβράδυνσης για το μοντέλο του Gipps.



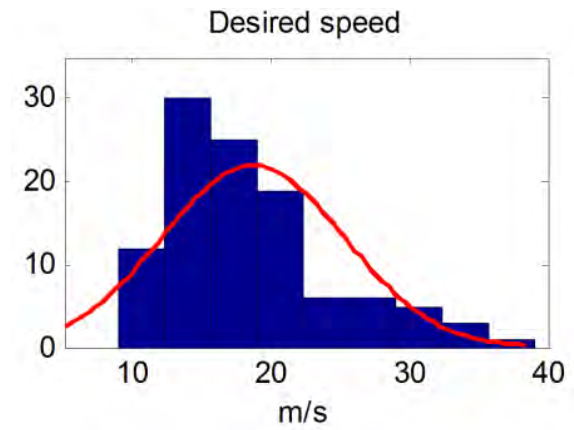
Εικόνα 3.32: Ιστόγραμμα της εκτιμώμενης επιβράδυνσης του μπροστινού οχήματος για το μοντέλο του Giprs.



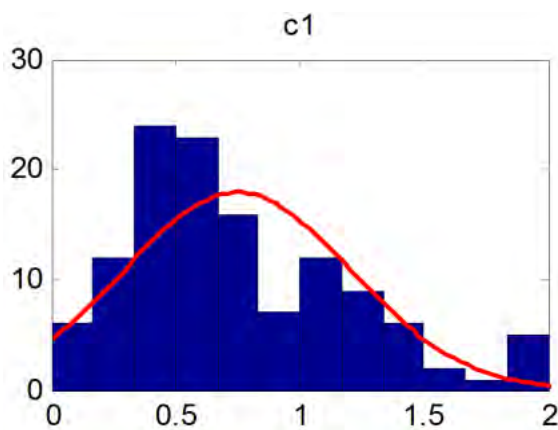
Εικόνα 3.33: Ιστόγραμμα του χρόνου αντίδρασης για το μοντέλο του Giprs.



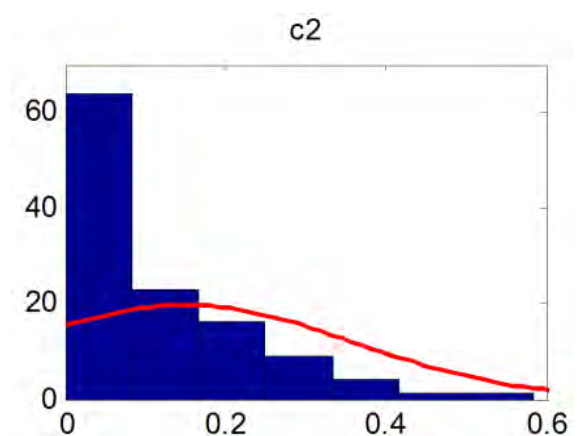
Εικόνα 3.34 : Ιστόγραμμα της επιθυμητής απόστασης σε στάση για το μοντέλο του Giprs.



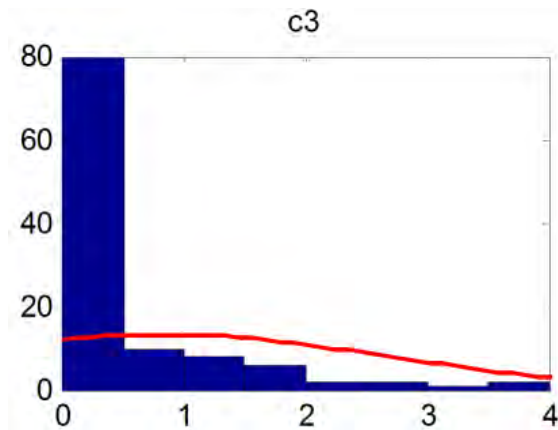
Εικόνα 3.35: Ιστόγραμμα της επιθυμητής ταχύτητας για το μοντέλο του Giprs.



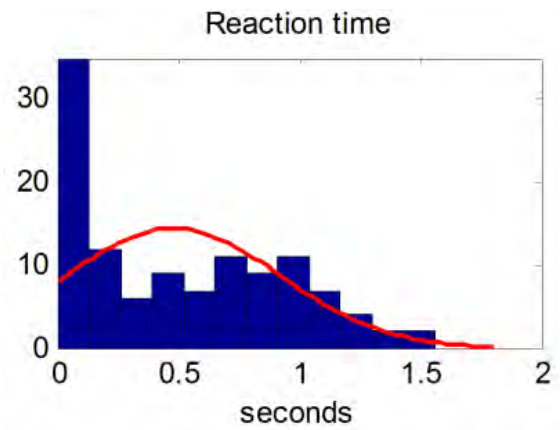
Εικόνα 3.36: Ιστόγραμμα της παραμέτρου  $c_1$  του μοντέλου του Tampere.



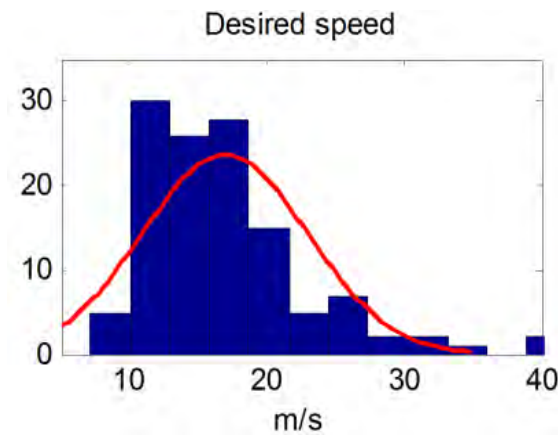
Εικόνα 3.37: Ιστόγραμμα της παραμέτρου  $c_2$  του μοντέλου του Tampere.



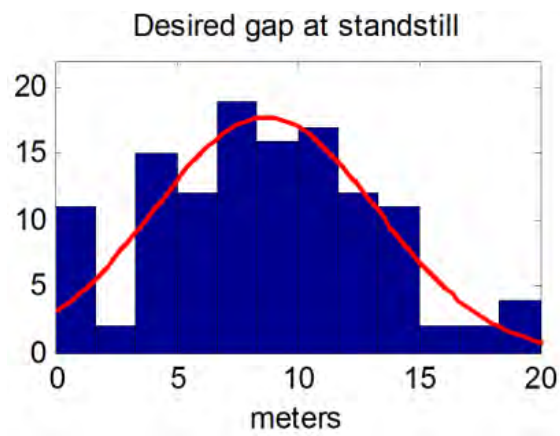
Εικόνα 3.37: Ιστόγραμμα της παραμέτρου  $c_3$  του μοντέλου του Tampere.



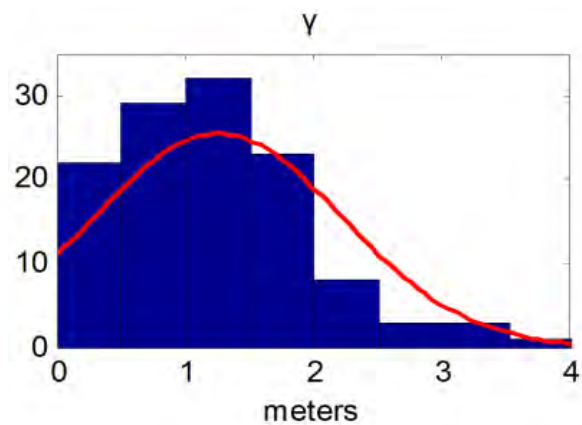
Εικόνα 3.38: Ιστόγραμμα του χρόνου αντίδρασης για το μοντέλου του Tampere.



Εικόνα 3.40: Ιστόγραμμα της επιθυμητής ταχύτητας για το μοντέλου του Tampere.



Εικόνα 3.41: Ιστόγραμμα της επιθυμητής απόστασης σε στάση για το μοντέλου του Tampere.



Εικόνα 3.42: Ιστόγραμμα της παραμέτρου  $\gamma$  του μοντέλου του Tampere.

Στους Πίνακες 3.18 και 3.19 παρουσιάζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για τιμές των παραμέτρων των δύο μοντέλων.

Πίνακας 3.18: Αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το μοντέλο του Tampere.

Tampere (N=123)	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$u_{desired}(\frac{m}{s})$	$\gamma$	$d_i(m)$	$T(s)$	Error $\times 10^4$
Mean	0.75	0.15	0.84	16.96	0.0023	8.68	0.48	22.94
Std.Dev.	0.45	0.21	1.84	5.99	0.0015	4.6	0.43	14.65

Πίνακας 3.19: Αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το μοντέλο του Gipps.

Gipps (N=108)	$a_i^{max}(\frac{m}{s^2})$	$b_i^{max}(\frac{m}{s^2})$	$b_{i-1}^{max}(\frac{m}{s^2})$	$u_{desired}(\frac{m}{s})$	$s_{n-1}(m)$	$T(s)$	Error $\times 10^4$
Mean	1.64	-1.80	-1.90	18.68	7.44	1.003	23.64
Std.Dev.	1.83	1.69	1.91	6.58	3.57	0.616	12.40

### 3.2.2. Έλεγχος κανονικότητας

Για τον έλεγχο κανονικότητας της κατανομής των παραμέτρων εφαρμόστηκε το kolmogoron smirnov τεστ. Για την πραγματοποίηση του τεστ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό στατικής SPSS. Θεωρείται ότι κατά την μηδενική υπόθεση η υπό έλεγχο κατανομή δεν διαφέρει από την κανονική, ενώ κατά την εναλλακτική υπόθεση, η υπό έλεγχο κατανομή διαφέρει από την κανονική. Εφαρμόστηκε η μέθοδος Monte Carlo με επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %. Οπότε, όταν το p-value είναι μικρότερο από 5%, τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και η κατανομή διαφέρει από την κανονική. Στους Πίνακες παρουσιάζεται το p-value των βέλτιστων τιμών για κάθε παράμετρο των μοντέλων του Gipps και του Tampere.

Πίνακας 3.20: Τεστ κανονικότητας Kolmogoron Smirnov, p-value για το μοντέλο του Gipps.

Gipps	p-value
$a_i^{max}$	0
$b_i^{max}$	0
$b_{i-1}^{max}$	0
$T$	0.526

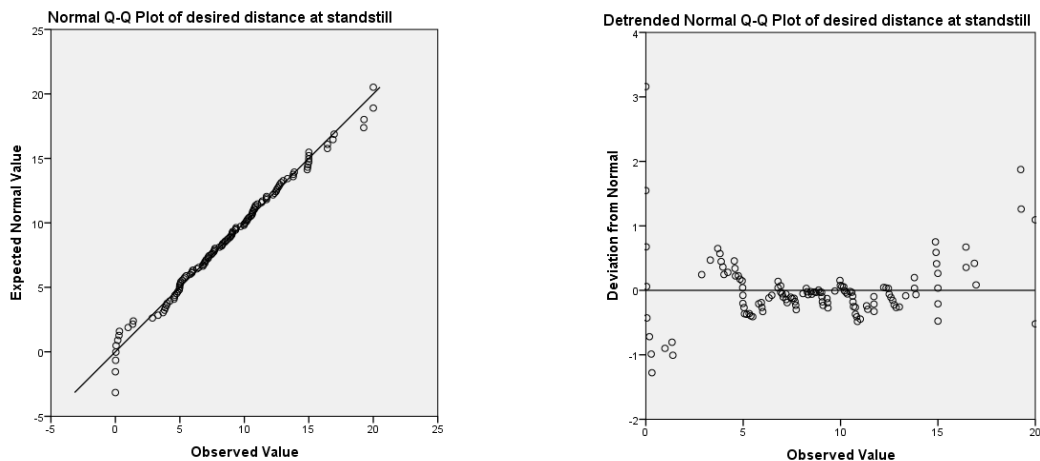
$s_{n-1}$	0.188
$u_{desired}$	0.028

Πίνακας 3.21: Τεστ κανονικότητας Kolmogorov Smirnov, p-value για το μοντέλο του Tampere.

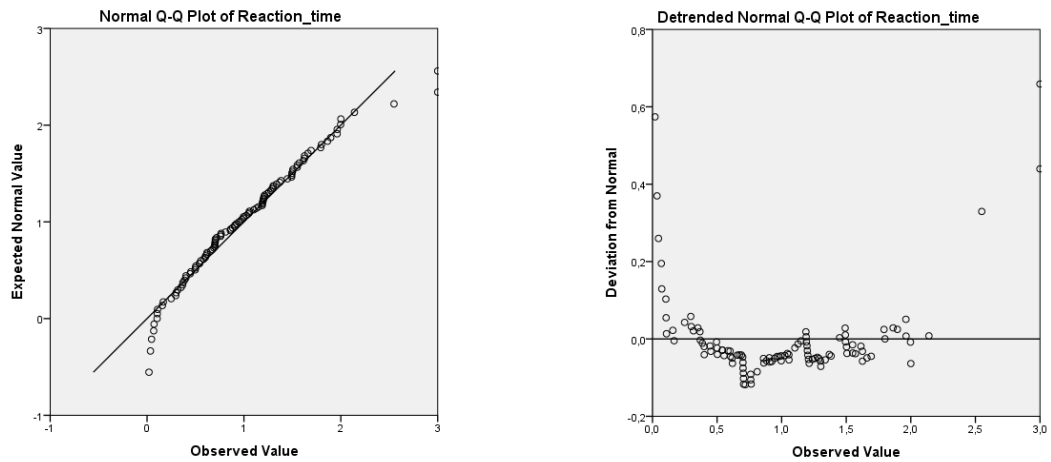
Tampere	p-value
$c_1$	0.030
$c_2$	0
$c_3$	0
$u_{desired}$	0.028
$\gamma$	0.031
$d_i$	0.097
$T$	0.013

Παρατηρείται πως, όσον αφορά το μοντέλο του Gijbms, κανονική κατανομή ακολουθούν οι τιμές του χρόνου αντίδρασης και της μέγιστης επιθυμητή απόσταση σε στάση, ενώ για το μοντέλο του Tampere, οι τιμές της μέγιστης επιθυμητής απόστασης σε στάση.

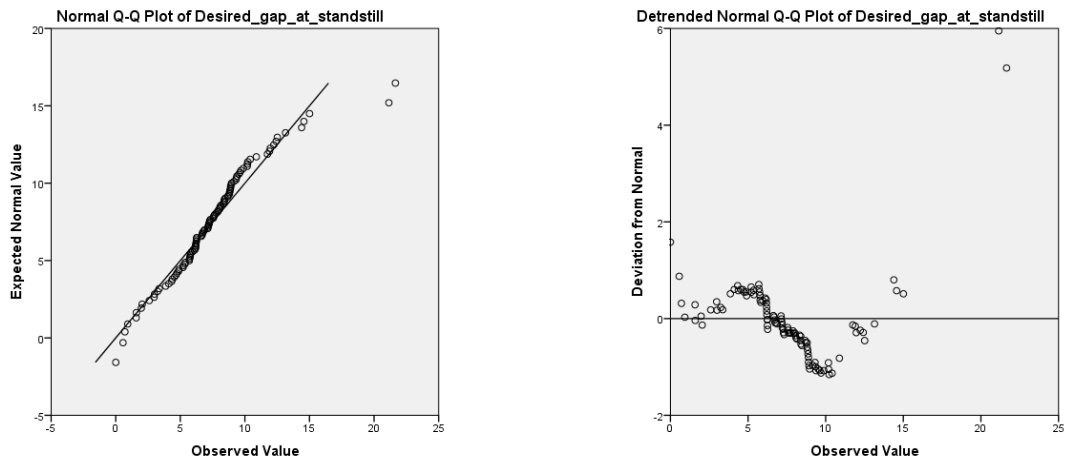
Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της κανονικότητας γραφικά. Το διαγράμματα Q-Q Plot (quantile-quantile plot) αποτελεί μία γραφική τεχνική για τον προσδιορισμό της κατανομής. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα Q-Q Plot για τις παραμέτρους που από το kolmogorov smirnov τεστ βρέθηκε ότι ακολουθούν κανονική κατανομή .



Εικόνα 3.43 : Q-Q Plot της παραμέτρου, επιθυμητή απόσταση σε στάση για το μοντέλο του Gijbms.



Εικόνα 3.44 : Q-Q Plot της παραμέτρου, χρόνος αντίδρασης για το μοντέλο του Gipps.



Εικόνα 3.45 : Q-Q Plot της παραμέτρου, επιθυμητή απόσταση σε στάση για το μοντέλο του Tampere.

### 3.2.3. Έλεγχος συσχέτισης

Για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson. Ο δειγματικός συντελεστής του Pearson συμβολίζεται με  $r$  και ορίζεται από τον τύπο :

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x \times S_y} \quad (68)$$

Όπου,

$$s_{xy} = \text{Con}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{n - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \times \bar{x} \bar{y}}{n - 1} \quad (69)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (70)$$

Και

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (71)$$

Επομένως

$$\begin{aligned} r &= \frac{s_{xy}}{s_x \times s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \times \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2}} \end{aligned} \quad (72)$$

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης  $r$  δίνει ένα μέτρο του μεγέθους της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών, και παίρνει τιμές στο κλειστό διάστημα  $[-1, 1]$ .

- Αν  $r = \pm 1$  υπάρχει τέλεια γραμμική συσχέτιση.
- Αν  $-0.3 \leq r < 0.3$  δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει άλλου είδους συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών.
- Αν  $-0.5 < r < -0.3$  ή  $0.3 \leq r < 0.5$  υπάρχει ασθενής γραμμική συσχέτιση.
- Αν  $-0.7 < r < -0.5$  ή  $0.5 \leq r < 0.7$  υπάρχει μέση γραμμική συσχέτιση.
- Αν  $-0.8 < r \leq -0.7$  ή  $0.7 \leq r < 0.8$  υπάρχει ισχυρή γραμμική συσχέτιση.
- Αν  $-1 < r \leq -0.8$  ή  $0.8 \leq r < 1$  υπάρχει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση.

Θετικές τιμές του  $r$  δεν υποδηλώνουν, κατ' ανάγκην μεγαλύτερο βαθμό γραμμικής συσχέτισης από το βαθμό γραμμικής συσχέτισης που υποδηλώνουν αρνητικές τιμές του  $r$ . Το πρόσημο του  $r$  καθορίζει το είδος, μόνο, της συσχέτισης (θετική ή αρνητική), δηλαδή για το αν αύξηση της μιας μεταβλητής αντιστοιχεί σε αύξηση ή σε μείωση της άλλης μεταβλητής.

Συσχέτιση δε σημαίνει οπωσδήποτε και αιτιότητα. Όταν δύο μεταβλητές  $X$  και  $Y$  βρίσκονται συσχετισμένες αυτό σημαίνει μόνο ότι οι μεταβλητές αυτές συνδέονται με



κάποια σχέση. Δεν συνεπάγεται, κατ' ανάγκη, αιτιότητα, όμως μπορεί να συνδεούνται με μία σχέση αιτιότητας.

Στον Πίνακα 3.22 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης Pearson για τις παραμέτρους του μοντέλου του Tampere.

Πίνακας 3.22: Τιμές του συντελεστή του Pearson για τις παραμέτρους του μοντέλου του Tampere.

	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$u_{desired}$	$\gamma$	$d_i$	$T$
$c_1$	1	0.332	-0.065	0.014	0.014	-0.116	-0.140
$c_2$	0.332	1	0.037	0.067	0.067	-0.120	-0.307
$c_3$	-0.065	0.037	1	-0.253	-0.129	0.096	-0.229
$u_{desired}$	0.014	0.067	-0.253	1	-0.202	0.035	0.123
$\gamma$	0.14	0.067	-0.129	-0.202	1	-0.174	0.181
$d_i$	-0.116	-0.120	0.096	0.035	-0.174	1	-0.115
$T$	-0.140	-0.307	-0.229	0.123	0.181	-0.115	1

Ενώ για το μοντέλο του Gipp's:

Πίνακας 3.23: Τιμές του συντελεστή του Pearson για τις παραμέτρους του μοντέλου του Gipp's.

	$a_i^{max}$	$b_i^{max}$	$b_{i-1}^{max}$	$T$	$s_{n-1}$	$u_{desired}$
$a_i^{max}$	1	0.112	0.117	-0.108	0.166	-0.135
$b_i^{max}$	0.112	1	0.665	-0.063	-0.001	-0.077
$b_{i-1}^{max}$	0.117	0.665	1	-0.063	-0.001	-0.077
$T$	-0.108	-0.063	0.306	1	-0.218	-0.146
$s_{n-1}$	0.166	-0.001	-0.113	-0.218	1	-0.136
$u_{desired}$	-0.135	-0.077	-0.205	-0.146	-0.136	1

Παρατηρείται πως δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση στις μεταβλητές του μοντέλου του Tampere. Υπάρχει μόνο μία πολύ ασθενής συσχέτιση ανάμεσα στον συντελεστή  $c_1$  και  $c_2$ , και ανάμεσα στον συντελεστή  $c_2$  και το χρόνο αντίδρασης.  $c_1$  είναι ένας συντελεστής ευαισθησίας που αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ της σχετικής ταχύτητας και της επιθυμητής ταχύτητας και  $c_2$  ένας συντελεστής ευαισθησίας που αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ της σχετικής απόστασης και του επιθυμητής σχετικής απόστασης. Επομένως, αυτή η θετική γραμμική συσχέτιση ήταν αναμενόμενη αφού από τη θεωρία

της κυκλοφοριακής ροής, η σχετική ταχύτητα αυξάνεται όταν αυξάνεται η σχετική απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Επίσης υπήρχε και μία αρνητική σχέση γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του συντελεστή  $c_2$  και του χρόνου αντίδρασης. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί αφού όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αντίδρασης ενός οδηγού τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής σχετικής απόστασης και της επιθυμητής σχετικής απόστασης.

Στην συνέχεια και για το μοντέλο του Gipps, παρουσιάστηκε μία μέση έως ισχυρή θετική γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στην μέγιστη επιθυμητή επιβράδυνση του οδηγού που ακολουθεί και στην εκτίμηση του ίδιου οδηγού για την μέγιστη επιθυμητή επιβράδυνση του οδηγού που προπορεύεται. Κάτι που είναι αναμενόμενο αφού κάθε οδηγός προσαρμόζει την συμπεριφορά του και αποφασίζει για τις αλλαγές τις κινητικής του κατάστασης σύμφωνα με την εκτίμησή του για μελλοντική συμπεριφορά του οδηγού που βρίσκεται μπροστά του.

## Κεφάλαιο 4

### 4. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

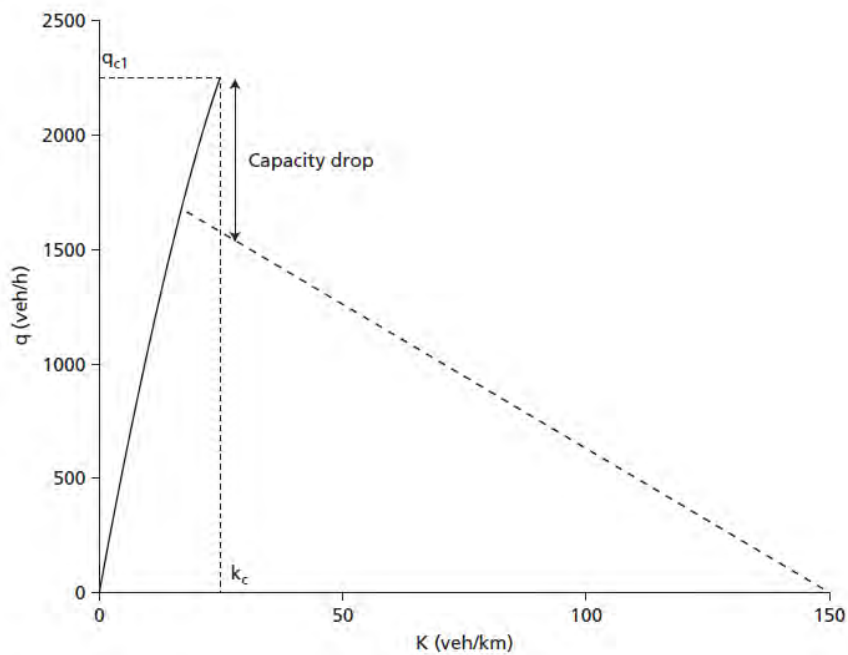
#### 4.1.Βαθμονόμηση των μακροσκοπικών μοντέλων Car-following

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.6, το μοντέλο σταθερής κατάστασης του Van Aerde παρουσίασε την καλύτερη απόδοση μετά το τέλος της βαθμονόμησης. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελείται από τέσσερις ελεύθερες παραμέτρους και κατά συνέπεια μπορεί να περιγράψει την κυκλοφορία με μεγαλύτερη επιτυχία, αλλά με υψηλότερο υπολογιστικό χρόνο. Επίσης, όσον αφορά τις τιμές που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση, για το μοντέλο του Van Aerde υπολογίστηκαν περισσότερο αληθοφανείς τιμές σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα, και ειδικά για την παράμετρο της πυκνότητας συμφόρησης. Από τα μοντέλα με τρεις ελεύθερες παραμέτρους καλύτερη επίδοση είχε το μοντέλο του Del Catillo, ενώ για τα μοντέλα με δύο ελεύθερους παραμέτρους, το μοντέλο του Drake.

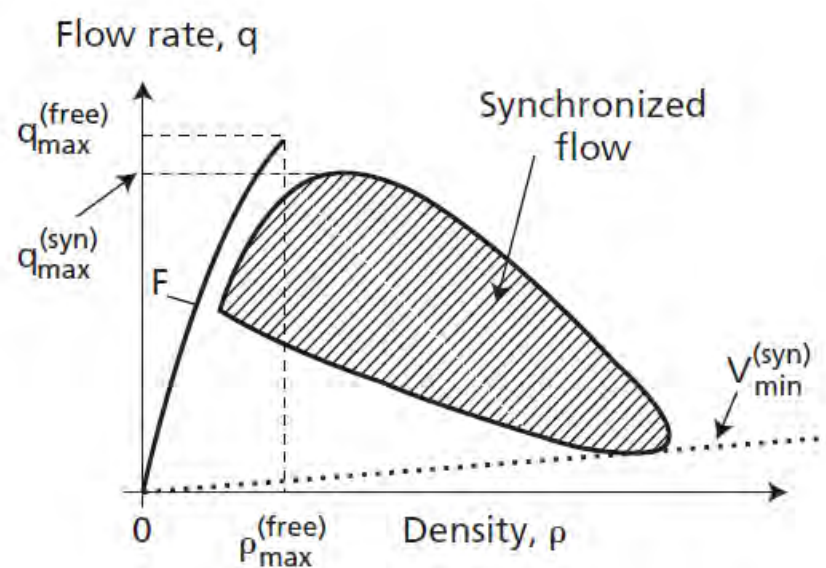
Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως η βαθμονόμηση και στην συνέχεια η αξιολόγηση αυτών των μοντέλων πραγματοποιήθηκε για ένα συγκεκριμένο κομμάτι δρόμου. Επομένως, για να προκύψουν πιο έγκυρα αποτελέσματα και να αξιολογηθεί η προσαρμοστικότητα των μοντέλων, κάθε μοντέλο πρέπει να βαθμονομηθεί χρησιμοποιώντας δεδομένα από περισσότερους δρόμους και κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Τα μοντέλα που ερευνήθηκαν σε αυτήν την εργασία ήταν στατικά και κατά το πλείστον μοντέλα ενός κλάδου. Ωστόσο, πολλά δυναμικά φαινόμενα κυκλοφορίας όπως η πτώση της ικανότητας (Capacity drop), δεν είναι δυνατόν να περιγραφτούν από τα συγκεκριμένα μοντέλα. Το φαινόμενο της πτώσης της ικανότητας (Εικόνα 4.1) περιγράφει το γεγονός όπου, από την στιγμή που η κυκλοφορία περνάει στην κατάσταση της συμφόρησης, οι οδηγοί δεν διατηρούν τις ίδιες μεταξύ τους αποστάσεις, όπως αυτές που είχαν πριν την πτώση της ταχύτητας. Επομένως, η χωρητικότητα μειώνεται. Με τη χρήση μοντέλα, με περισσότερους από έναν ή ακόμα και δύο κλάδους, είναι δυνατόν να περιγραφτούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα παραπάνω φαινόμενα.

Επίσης, τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, αναπτύχθηκαν με τη θεώρηση ότι στην κυκλοφορία υπάρχουν μόνο δύο καταστάσεις (ελεύθερη ροή-συμφόρηση). Ωστόσο, ο Kerper το 2004 θεώρησε ότι η κυκλοφορία μπορεί να περάσει από τρεις καταστάσεις (ελεύθερη ροή-συγχρονισμένη ροή-συμφόρηση), σύμφωνα με το σχήμα της εικόνας 4.2. Επομένως, η ανάπτυξη μακροσκοπικών μοντέλων που θεωρούν ότι η κυκλοφοριακή ροή είναι τριφασική, αποτελεί ένα ενδιαφέρον πεδίο για μελλοντική έρευνα.

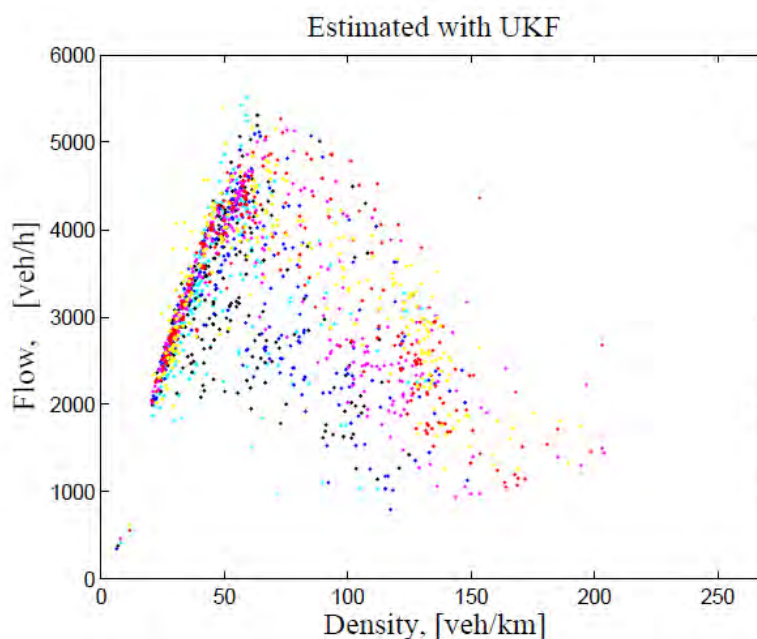


Εικόνα 4.1: Το φαινόμενο της πτώσης της ικανότητας [22].



Εικόνα 4.2: Τριφασική ροή της κυκλοφορίας [22].

Τέλος, τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία, αποτελούνται από μία ντετερμινιστική σχέση ανάμεσα στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής. Ωστόσο, η κυκλοφοριακή ροή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, με στοχαστική κυρίως συμπεριφορά. Επομένως, η ανάλυση της στοχαστικής συμπεριφοράς της κυκλοφορίας αποτέλεσε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο κατά τα τελευταία χρόνια. Για την αποτελεσματικότερη περιγραφή της κυκλοφορίας τα παραπάνω μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί ως το ντετερμινιστικό μέρος, στοχαστικών μοντέλων.



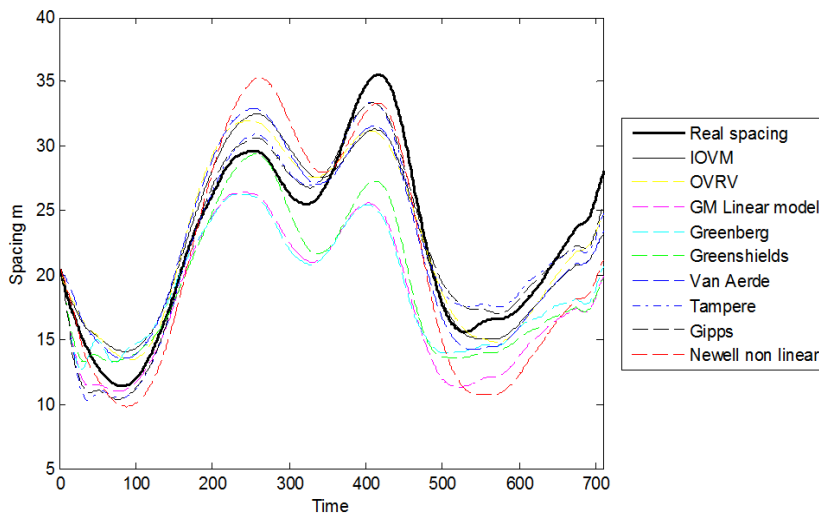
Εικόνα 4.3: Αποτελέσματα στοχαστικού μοντέλου, χρησιμοποιώντας την μέθοδο «Unscented Kalman Filter» [30].

#### 4.2.Βαθμονόμηση των μικροσκοπικών μοντέλων Car-following

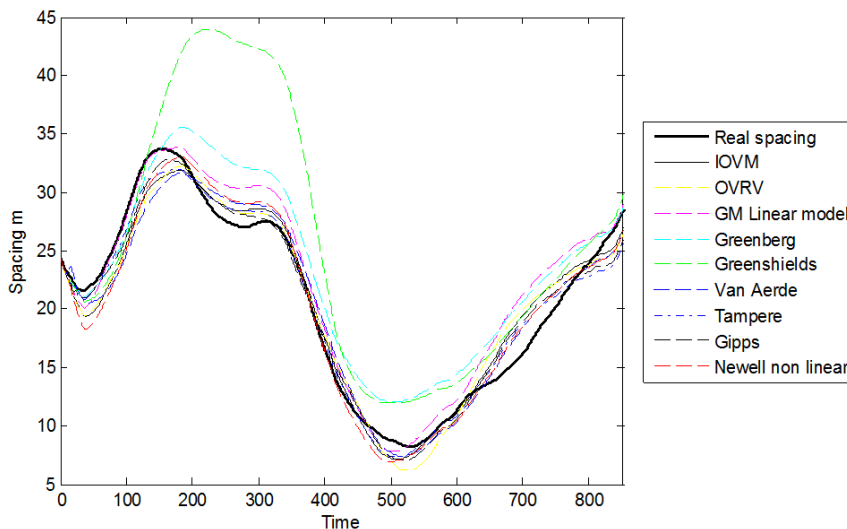
Σύμφωνα με τη βαθμονόμηση που έγινε σε ένα πρώτο στάδιο, χρησιμοποιώντας πέντε χαρακτηριστικά σετ δεδομένων, τα μοντέλα δύο κλάδων του Gipps και του Tampere είχαν την καλύτερη απόδοση. Επίσης, το μικροσκοπικό μοντέλο του Van Aerde παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα ανάμεσα στα μοντέλα ενός κλάδου. Στην συνέχεια, επαναλήφθηκε η διαδικασία της βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας τα υπόλοιπα σετ δεδομένων και πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια εκτίμησης των συχνοτήτων των τιμών των παραμέτρων ανάμεσα στους διαφορετικούς οδηγούς, ούτως

ώστε να καταστεί δυνατή η περιγραφή της ποικιλομορφίας της συμπεριφοράς των οδηγών.

Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης αυτών των μικροσκοπικών μοντέλων εμφανίζονται αρκετά θέματα που χρήζονται περαιτέρω έρευνας και συζήτησης. Αρχικά, κάθε μοντέλο μπορεί να έχει διαφορετική απόδοση για τον κάθε οδηγό. Για παράδειγμα, το μοντέλο του Greenshields είχε καλύτερη απόδοση, συγκρινόμενο με το μοντέλο του Greenberg, για το ζευγάρι δεδομένων 5, αλλά είχε αρκετά χειρότερη απόδοση για το ζευγάρι 3. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο το Greenshields, δεν είναι το κατάλληλο μοντέλο για να περιγράψει την συμπεριφορά του συγκεκριμένου οδηγού του ζευγαριού 3. Παραμένει, όμως ακόμα άγνωστος ο βαθμός στον οποίο επηρεάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης από την «καταλληλότητα» των μοντέλων.



Εικόνα 4.4: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το ζεύγος δεδομένων 5. Το μοντέλο του Greenshields έχει καλύτερη απόδοση από αυτήν του μοντέλου του Greenberg.



Εικόνα 4.5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το ζεύγος δεδομένων 5. Το μοντέλο του Greenshields έχει σαφώς χειρότερη απόδοση από αυτήν του μοντέλου του Greenberg.

Επίσης, παραμένουν ακόμα αναπάντητα κάποια άλλα ερωτήματα όπως: Ποιος είναι ο ελάχιστος αριθμός των ζευγαριών των δεδομένων ώστε τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης να θεωρούν ακριβή; Επίσης, σε ποιον βαθμό επηρεάζουν τα σφάλματα των μετρήσεων ή η εξομάλυνση των μετρήσεων τα τελικά αποτελέσματα; Τέλος, παραμένει ακόμα αναπάντητο το ερώτημα, κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, αν επιλεγθεί διαφορετικό αντικείμενο στην συνάρτηση που ελαχιστοποιείται και αν εφαρμοστεί διαφορετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος αξιολόγησης που αναπτύχθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, δεν λαμβάνει υπόψη την πολυπλοκότητα των μοντέλων. Τα μοντέλα αξιολογήθηκαν αποκλειστικά με βάση τα αποτελέσματα που έδωσαν, χωρίς να συνυπολογίζεται ο υπολογιστικός χρόνος. Σίγουρα, τα μοντέλα με δύο κλάδους προσέφεραν ακριβέστερα αποτελέσματα, ωστόσο είχαν ένα μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο. Σε πολλές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στη δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας, οι υπολογισμοί πρέπει να είναι γρήγοροι και τα μοντέλα εύχρηστα. Οπότε, σε κάθε περίπτωση απαιτείται να βρεθεί μία ισορροπία ανάμεσα στο επιθυμητό επίπεδο της ακρίβειας και στον επιθυμητό υπολογιστικό χρόνο.

Με την ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθόδου βαθμονόμησης, περιγράφηκαν οι μεταξύ των οδηγών διαφορές (inter-driver differences) στην οδηγική συμπεριφορά, αφού εφαρμόστηκαν διαφορετικά μοντέλα car-following σε διαφορετικούς οδηγούς. Ωστόσο, οι οδηγοί μπορεί να αλλάξουν την συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της συλλογής των εμπειρικών δεδομένων και να εμφανιστούν ενδογενείς διαφορές (intra-driver differences). Για παράδειγμα, το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης ήταν μία μόνο τιμή της επιθυμητής ταχύτητας για την συνολική διάρκεια της μελέτης. Ο οδηγός, όμως μπορεί να μεταβάλλει την επιθυμητή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Επομένως, κατά την μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όσο οι μεταξύ των οδηγών διαφορές, τόσο και οι ενδογενείς διαφορές.

Τέλος, το μοντέλο Car-following αποτελεί την συνιστώσα που περιγράφει την διαμήκη κίνηση κατά την μικροσκοπική προσομοίωση. Ωστόσο, η πλευρική κίνηση των οχημάτων (προσπέραση, αλλαγή λωρίδας) μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην κυκλοφοριακή ροή. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η ανάλυση της αλληλεξάρτησης μεταξύ αυτών των δύο συνιστωσών, προκειμένου να μοντελοποιηθεί ακριβέστερα η κυκλοφορική ροή.

## Βιβλιογραφία

1. B.D. Greenshields. *A study of Traffic Capacity*. Proceedings of the Annual Meeting of the Highway Research Board, Vol. 14,448-477, 1934
2. H. Greenberg. An Analysis of Traffic Flow. *Operations Research* Vol. 7,78-85, 1959.
3. Daiheng Ni, *Lecture Notes in Traffic Flow Theory, A Unified Perspective*, University of Massachusetts Amherst
4. R.T. Underwood. *Speed, Volume and Density Relationships. Quality and Theory of Traffic Flow*, Yale University Report, New Haven, Connecticut,1961.
5. P.K. Munjal and L.A. Pipes. *Propogation of On-Ramp Density Perturbationson Uni-Directional and Two- and Three-Lane Freeways*. *Transportation Research Part B*, 5(4), 241-255, 1971.
6. Van Aerde, M., *Single regime speed-flow-density relationship for congested and uncongested highways*. Proceedings of the 74th TRB Annual Conference, Washington DC,1995
7. Rakha, H. and Y. Gao. *Calibration of Steady-state Car-following Models using Macroscopic Loop Detector Data*. Symposium on The Fundamental Diagram: 75Years. Woods Hole, 2008
8. G. F. Newell. *Nonlinear Effects in the Dynamics of Car-following*. *Operations Research*, 9(2):209-229, 1961.
9. Haizhong Wang, Jia Li, Qian-Yong Chen, and Daiheng Ni. *Representing the Fundamental Diagram: The Pursuit of Mathematical Elegance and Empirical Accuracy*. Proceedings of the 89th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, Washington, D.C., 2010.
10. J. M. Del Castillo and F. G. Bentez. *On the Functional Form of the Speed-Density Relationship - I: General Theory*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 29(5):373-389, 1995.
11. P.G. Gipps. *A Behavioral Car-following Model for Computer Simulation*. *Transportation Research, Part B*, 15:105-111, 1981.
12. Rothery, R.W. *Car-following Models*, in: "*Traffic Flow Theory, a state of the art report. Revised Monograph on Traffic Flow Theory*", ed. by: Gartner, N., C.J. Messer & A.K. Rathi, 1999.
13. Tampere, C.M.J., *Human-Kinetic multiclass traffic flow theory and modeling, in Civil Engineering and Geosciences*, Department of Transport & Planning, Technical University of Delft, 2004.
14. NGSIM- Next Generation Simulation. <http://ngsim-community.org/>
15. Kesting, and M. Treiber *Calibrating Car-Following Models using Trajectory Data: A Methodological Study*. In TRB 87th Annual Meeting Compendium of Papers, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.,2008
16. Ossen, S. and S. P. Hoogendoorn. *Calibrating car-following models using microscopic trajectory data, A critical analysis of both microscopic trajectory data collection methods, and calibration studies based on these data*, Delft University of Technology, 2008



17. PuPunzo, V., M.T. Borzacchiello, and B.F. Ciuffo. *Estimation of Vehicle Trajectories from Observed Discrete Positions and Next-Generation Simulation Program (Ngsim) Data* in Transportation Research Board 88th Annual Meeting: Transportation Research Board p.17, 2009.
18. Monteil J., Billot R., Sau J., Buisson C., El Faouzi, *Calibration, estimation and sampling issues of car-following parameters*. In 93th TRB Annual of Meeting of the Transport Research Board, Washington D.C., 2014
19. Martin Treiber and Arne Kesting. *Microscopic calibration and validation of car-following models : A systematic approach*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 00:1 – 18,2014.
20. Gazis, Herman and Rothery, *Nonlinear follow the leader models of traffic flow*, Operation Research 7, 499-505, 1959.
21. Chandler, Herman and Montroll, *Traffic dynamics: studies in car-following*, Operations Research 6, 165-184, 1958.
22. Hoogendoorn, S.P and Knoop, V.L. *Traffic flow theory and modelling*, in: Bert van Wee, Jan Anne Annema and David Banister (Eds.) The Transport System and Transport Policy, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 2013
23. Μ. Κονταράτος, *Βασικά Μεγέθη Κυκλοφοριακής Ροής* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής, Οδοποιία II, [http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/roads/Roads-g\\_files/Edu-g\\_files/Edu-71-g\\_files/DRAFT\\_basika\\_mege8h\\_kyκλοforiakhs\\_rohs.pdf](http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/roads/Roads-g_files/Edu-g_files/Edu-71-g_files/DRAFT_basika_mege8h_kyκλοforiakhs_rohs.pdf)
24. Sven Maerivoet and Bart De Moor, *Traffic Flow Theory Department of Electrical Engineering ESAT-SCD (SISTA), Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, February 2, 2008*
25. Wiedemann, R., *Simulation des Strassenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8, Karlsruhe, Germany. 1974
26. Hans-Thomas Fritzsche, *A model for traffic simulation*, Daimler-Benz AG, 1994
27. Luis Vasconcelos, Luis Neto, Silvia Santos, Ana Bastos Silva, Alvaro Seco. *Calibration of the Gipps car-following model using trajectory data*. Procedia – Transportation Research, 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, Seville, Spain, 2014.
28. Γ. Παπαδόπουλος, *Συσχέτιση δύο μεταβλητών*, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Εργαστήριο Μαθηματικών & Στατιστικής, <http://www.aua.gr/gpapadopoulos/index.php>
29. Χαρωνίτη Ελένη, *Ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης κυκλοφοριακού συμβάντος μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, 2013.

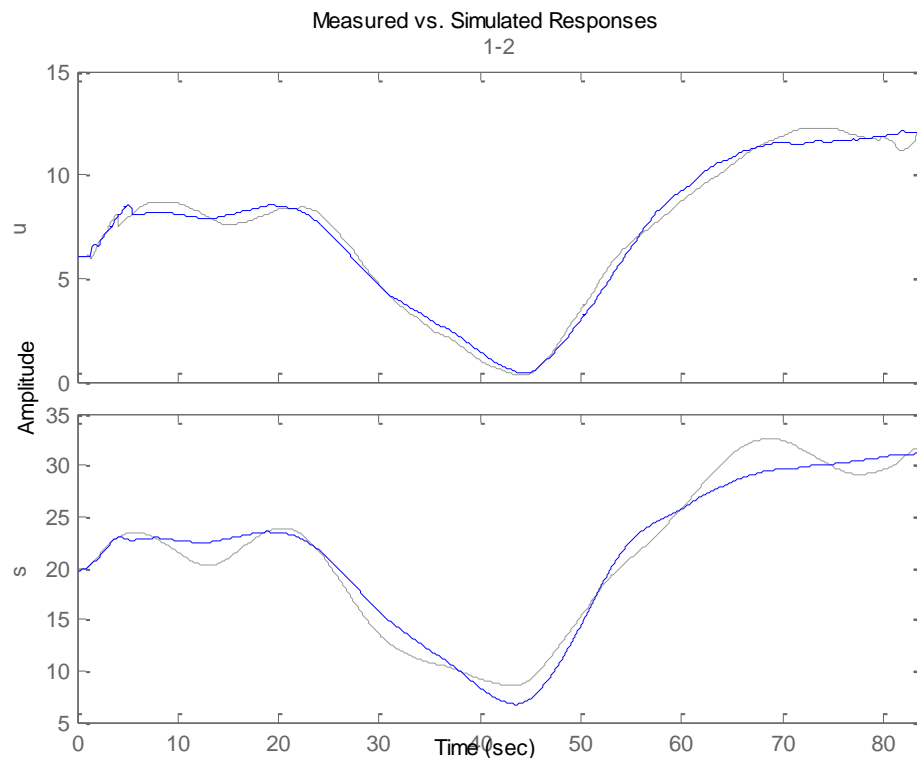
30. Mihaylova, L., Boel, R. and Hegyi, A. *Freeway traffic estimation within particle filtering framework*. Automatica, 43 (2). 290-300, 2007
31. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Freeway Management and Operations Handbook, Chapter 15, *Detection and Surveillance*,  
[http://ops.fhwa.dot.gov/freewaymgmt/publications/frwy\\_mgmt\\_handbook/chapter15\\_01.htm](http://ops.fhwa.dot.gov/freewaymgmt/publications/frwy_mgmt_handbook/chapter15_01.htm)
32. Δημήτρης Τσανακτσίδης, *Εξοπλισμός των οδών: Κεφάλαιο 9: Συστήματα παρακολούθησης κυκλοφορίας*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,  
<http://www.tsanak.gr/civil.htm>

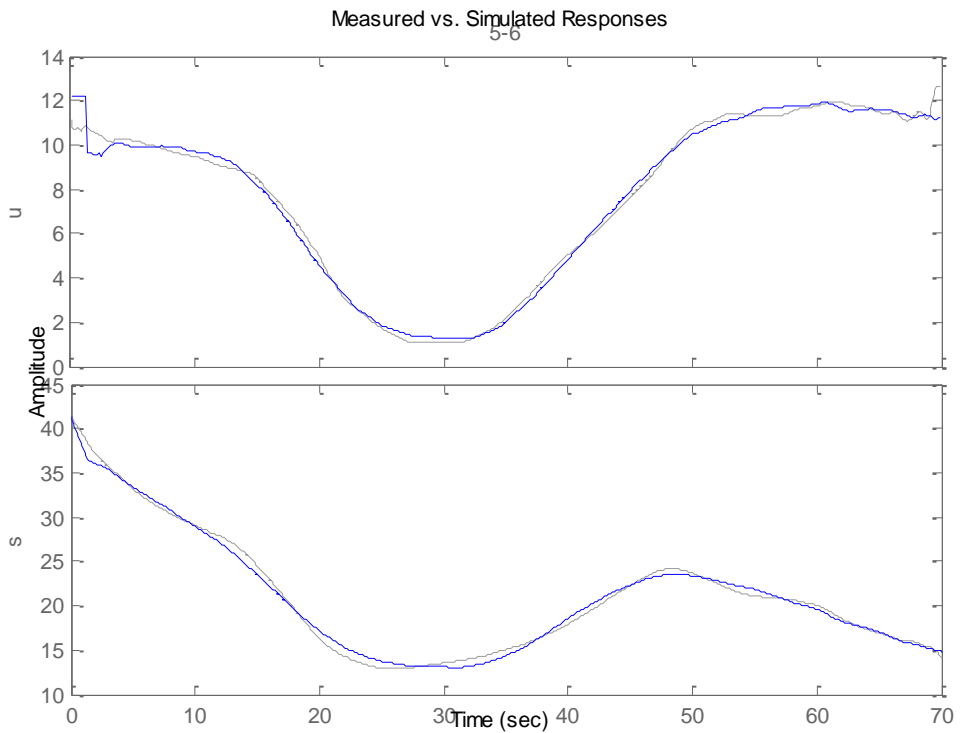
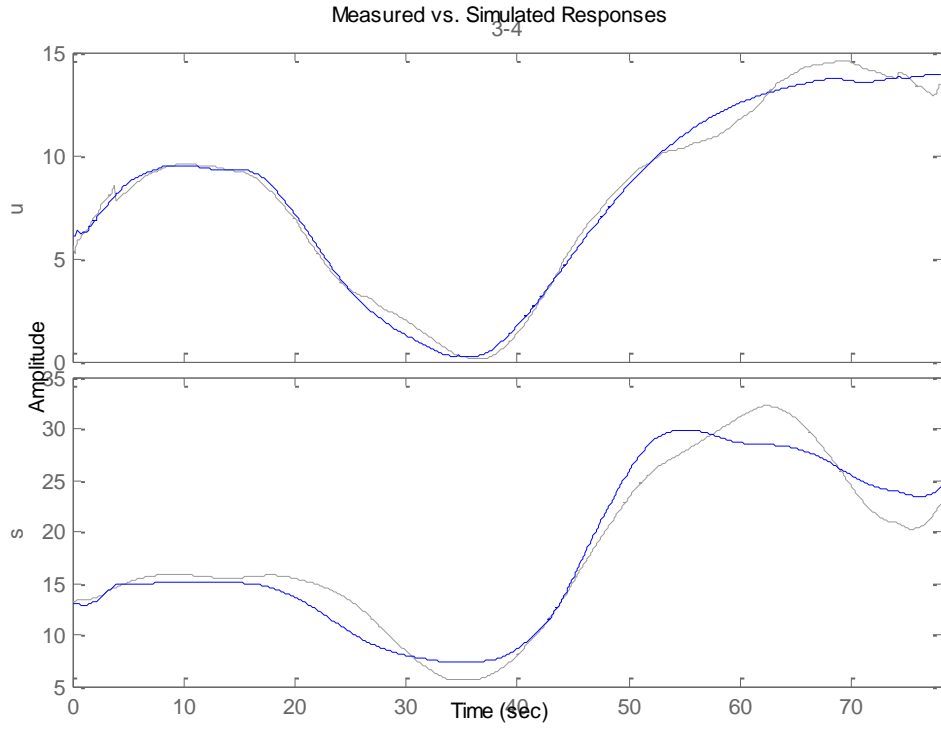
## Παράρτημα

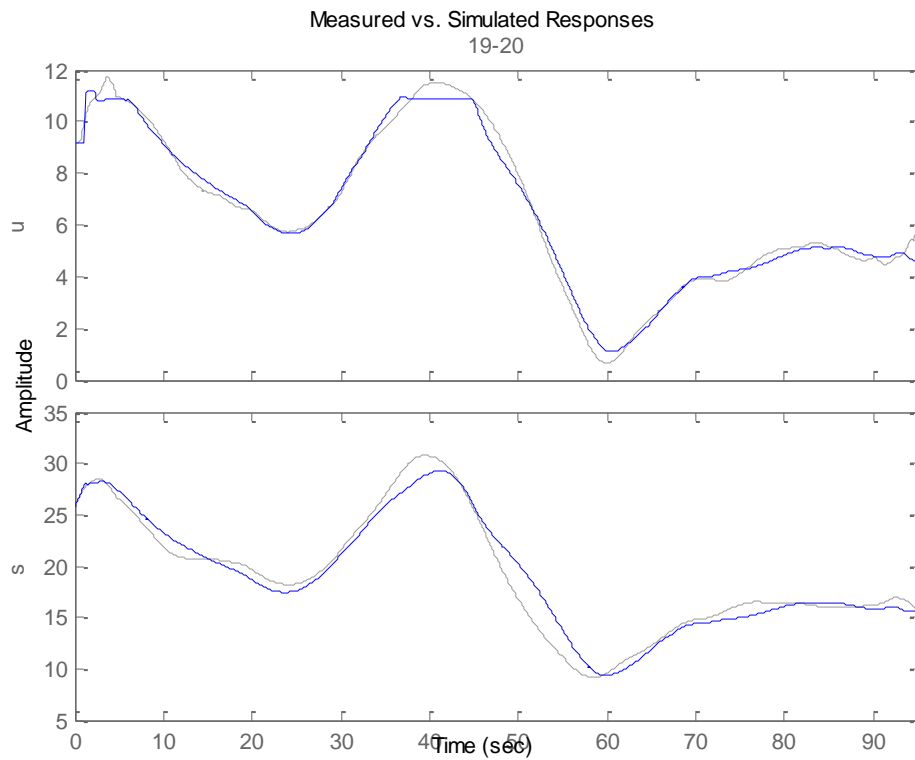
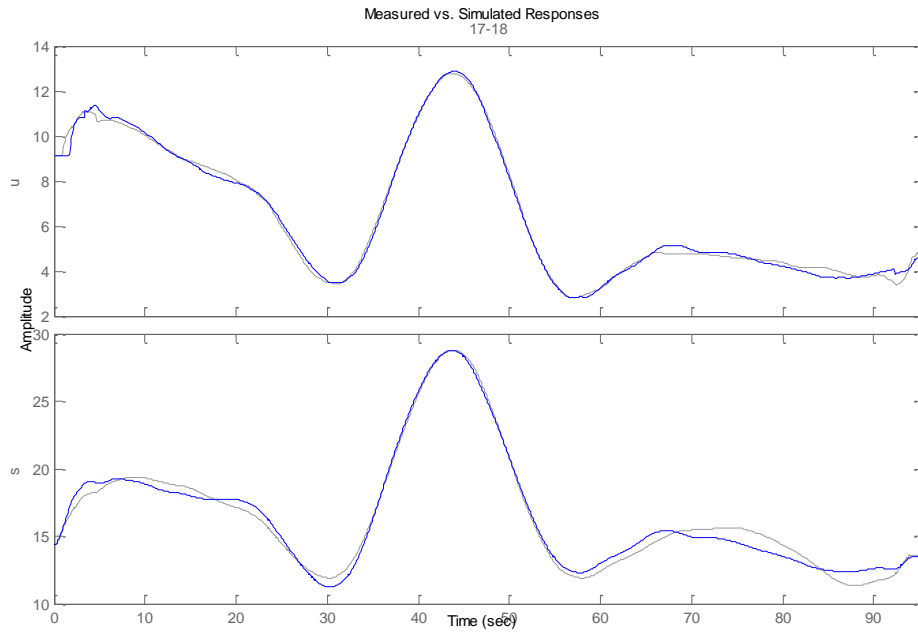
### Α. Αναλυτικά σχηματικά αποτελέσματα βαθμονόμησης των μικροσκοπικών μοντέλων.

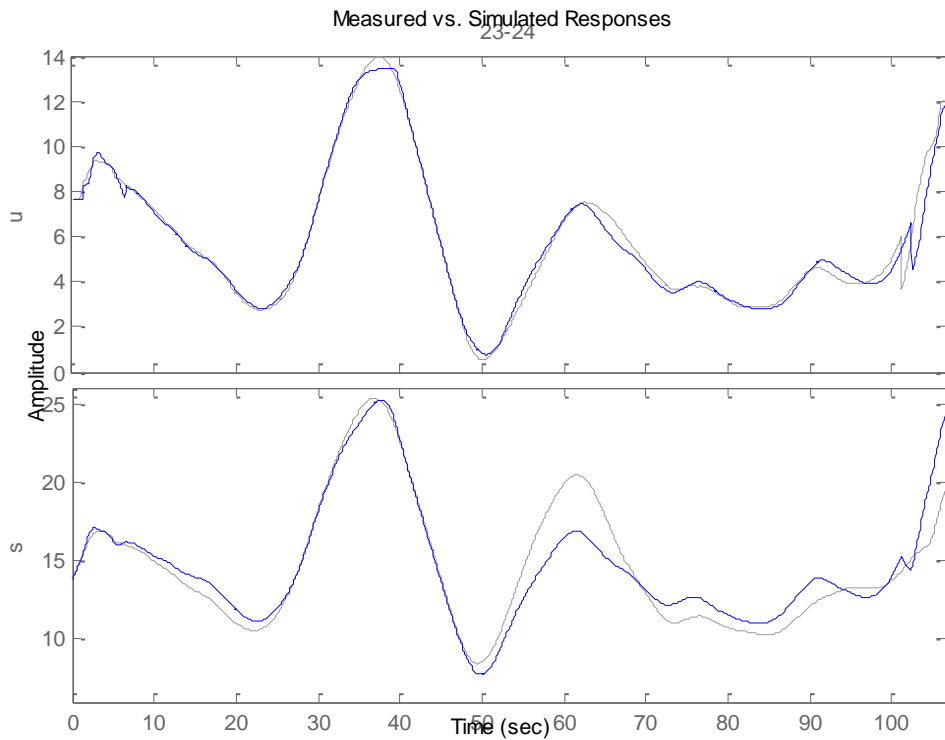
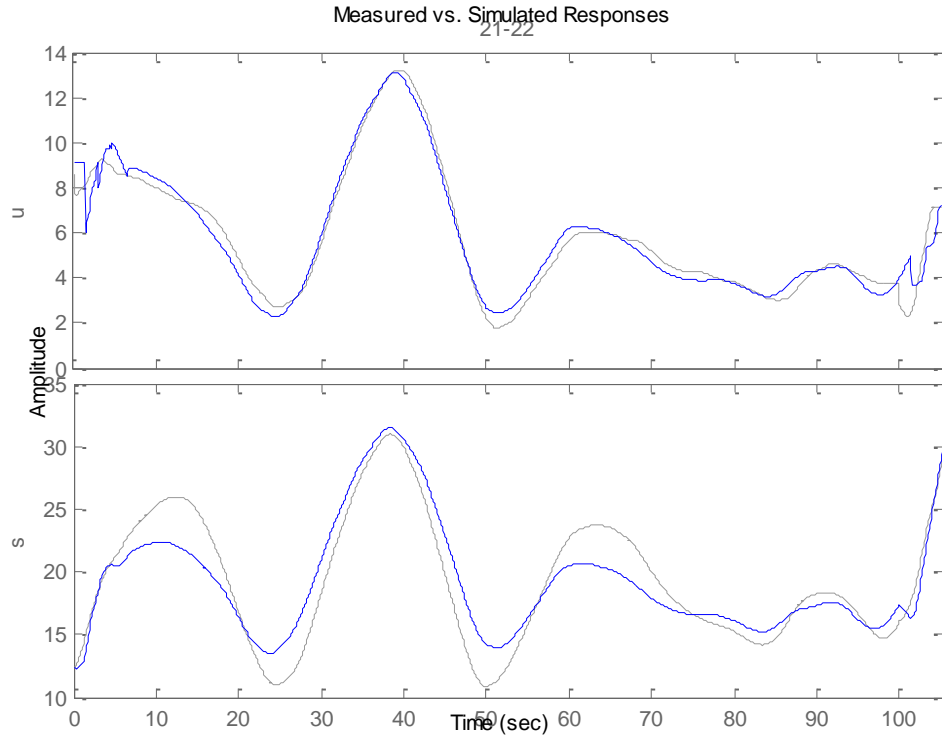
#### Α.1. Αποτελέσματα για το μοντέλο του Gipps.

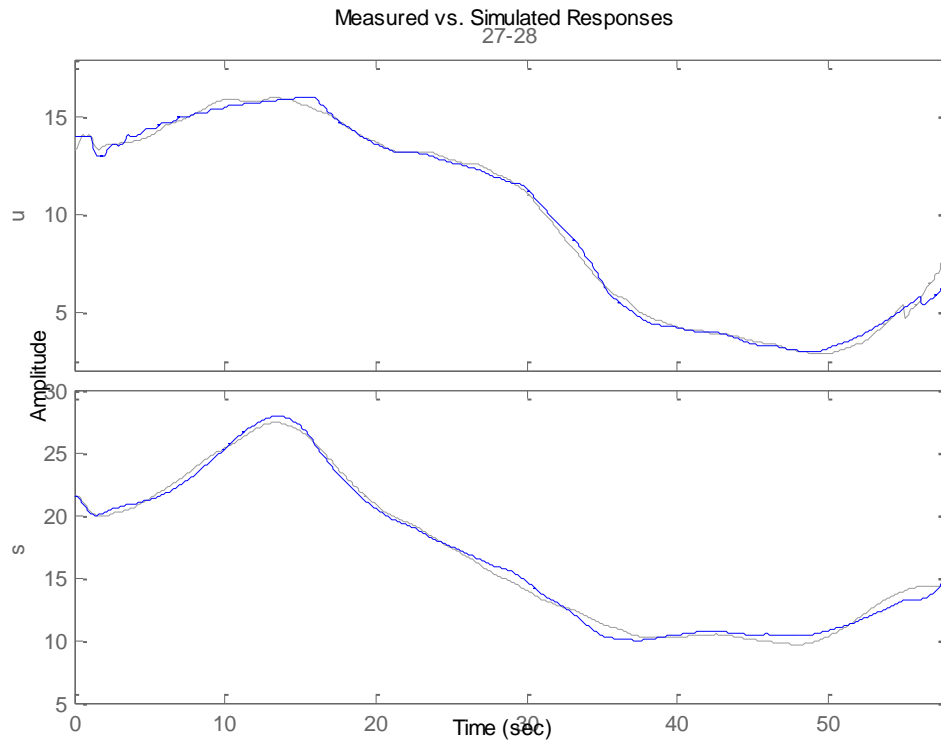
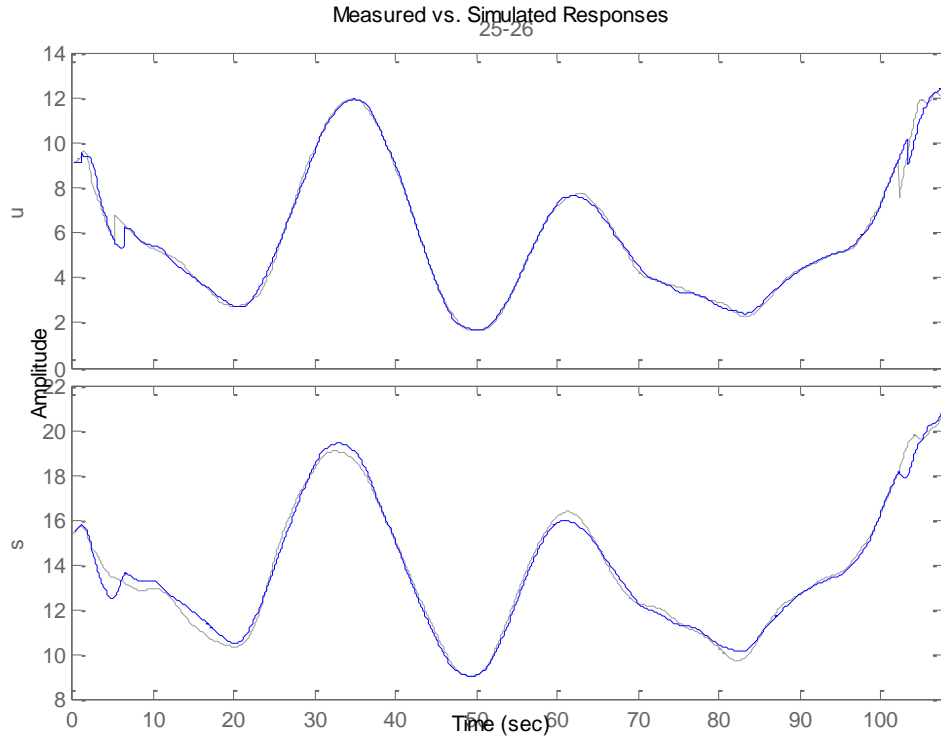
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται σχηματικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του μοντέλου του Gipps για κάθε ένα σετ δεδομένων ξεχωριστά. Στο πάνω μέρος των σχημάτων διακρίνεται ο αύξοντας αριθμός του κάθε οχήματος. Στο πάνω σχήμα κάθε εικόνας παρουσιάζεται η διακύμανση κατά τη διάρκεια του χρόνου της ταχύτητας του πίσω οχήματος ( $u$ ) και ενώ στο κάτω η διακύμανση της σχετικής απόστασης ( $s$ ). Με γκρι χρώμα παρουσιάζεται το μετρημένο μέγεθος, ενώ με μπλε η πρόβλεψη του μοντέλου.

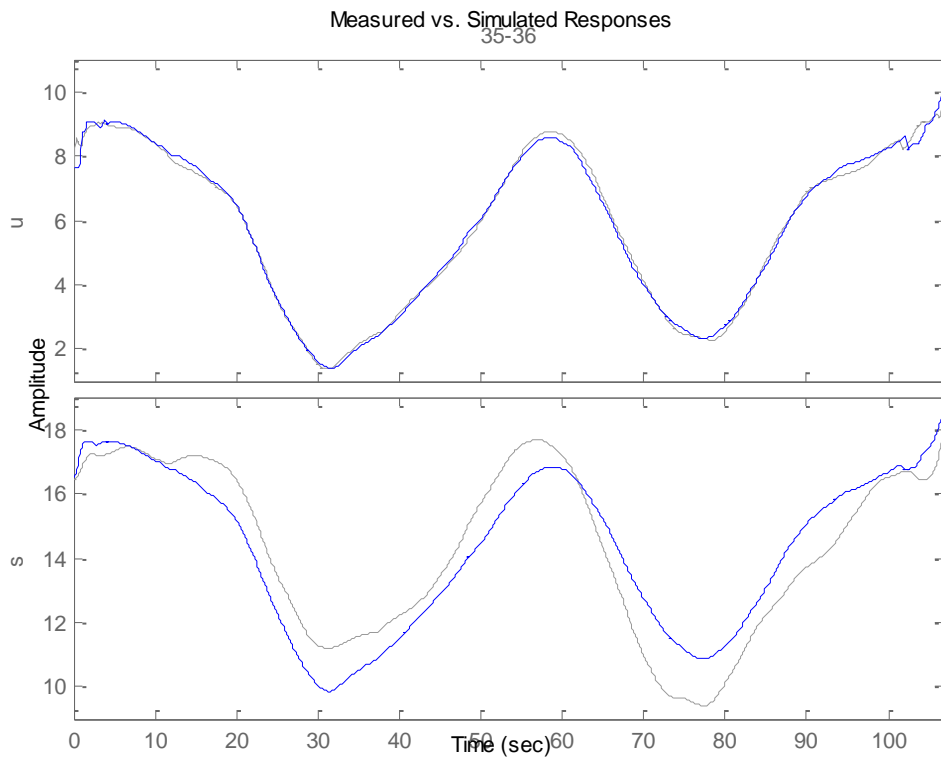
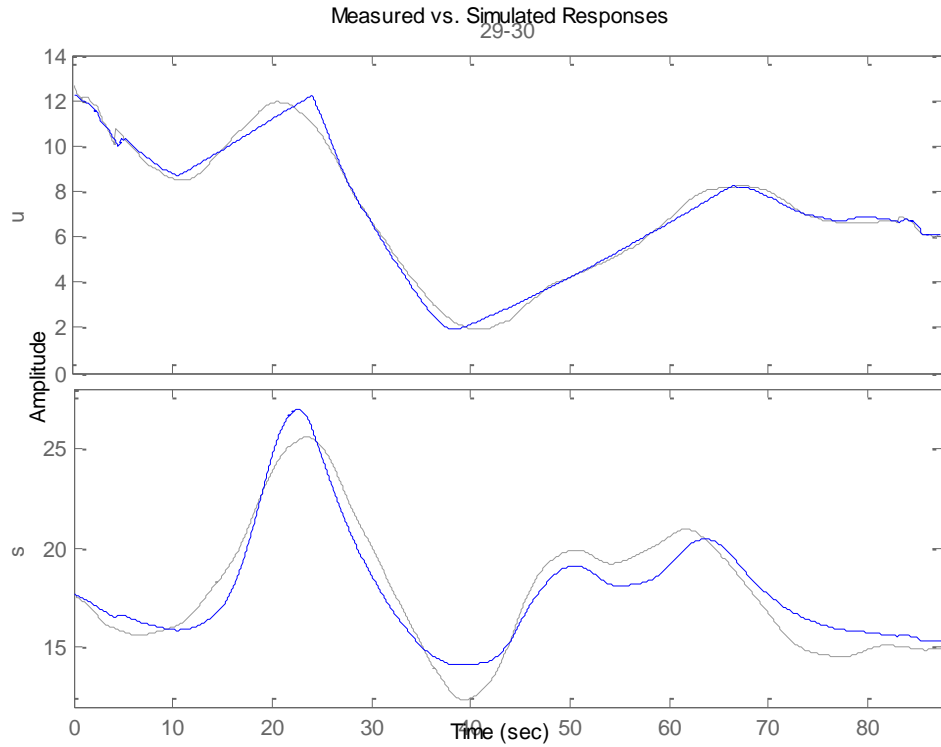




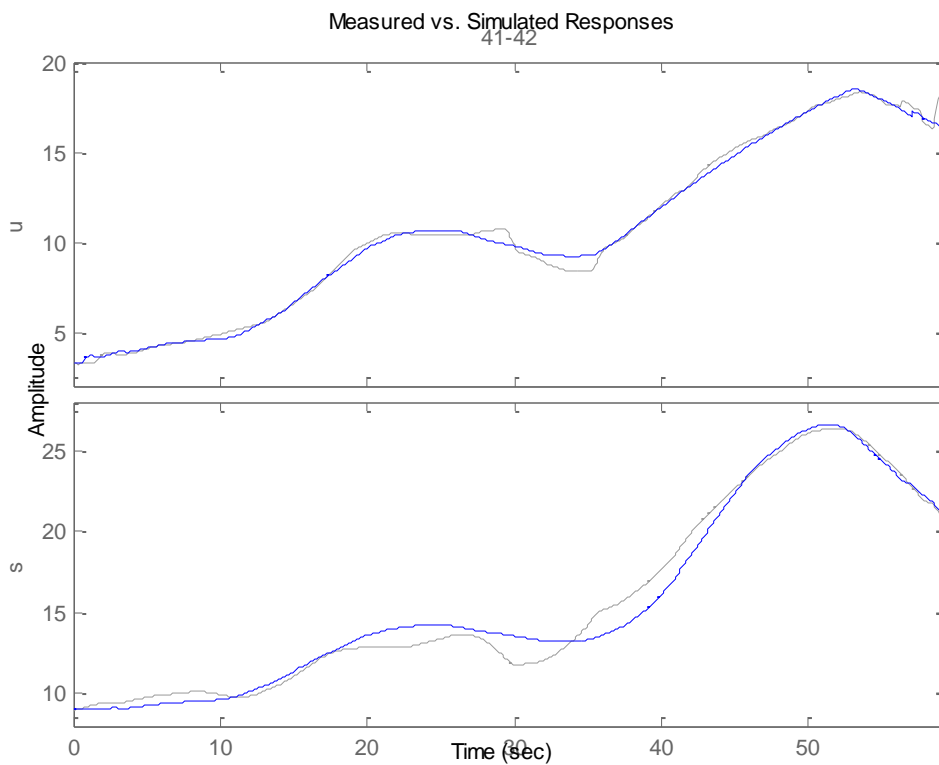
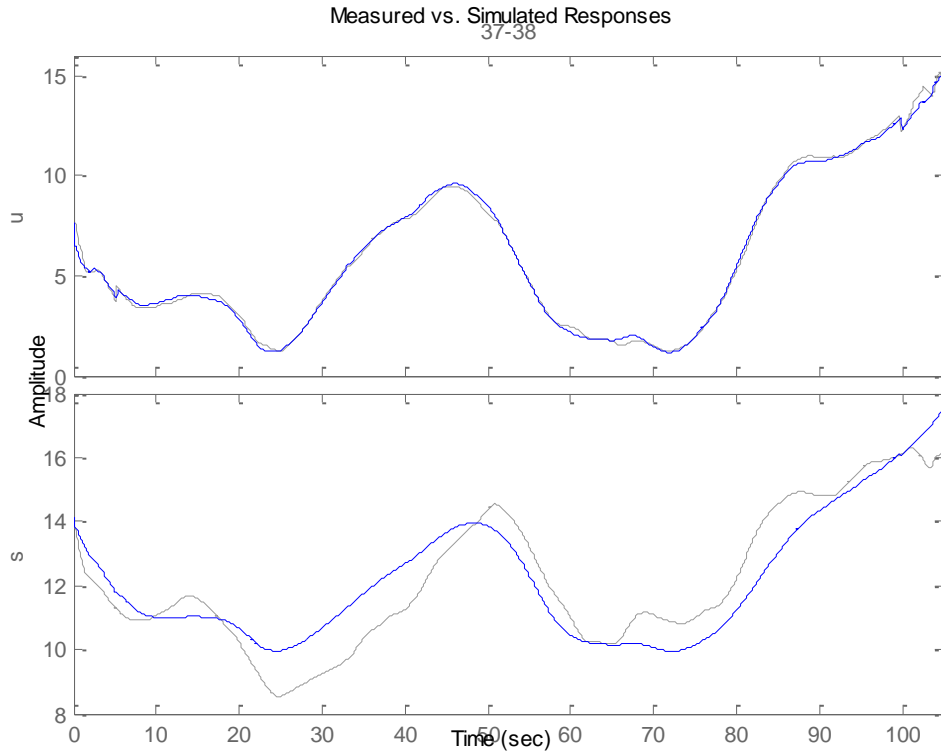


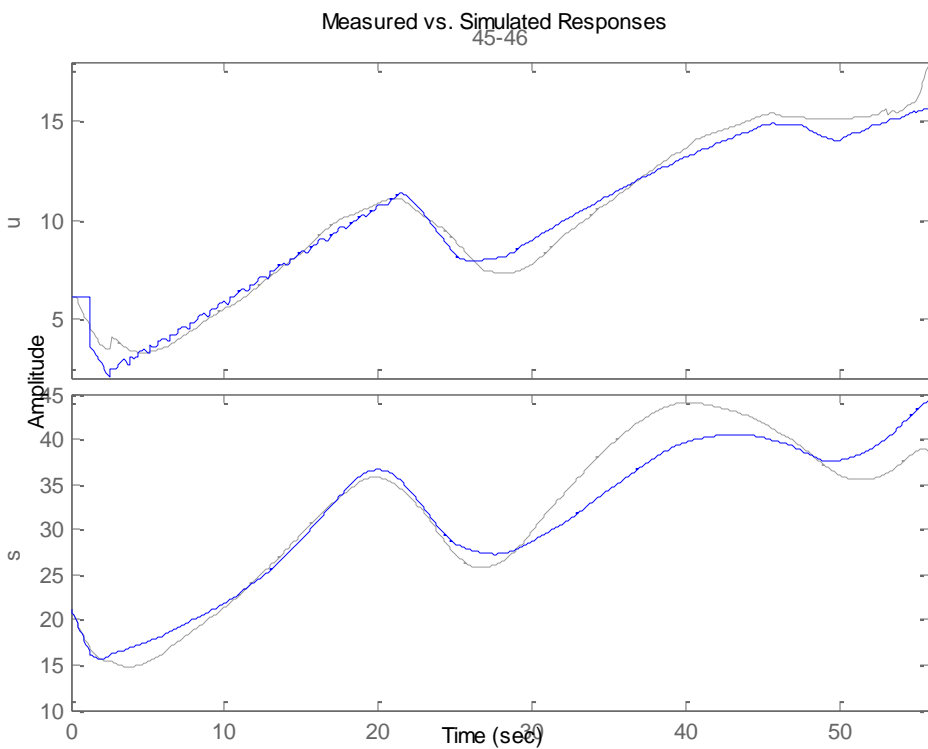
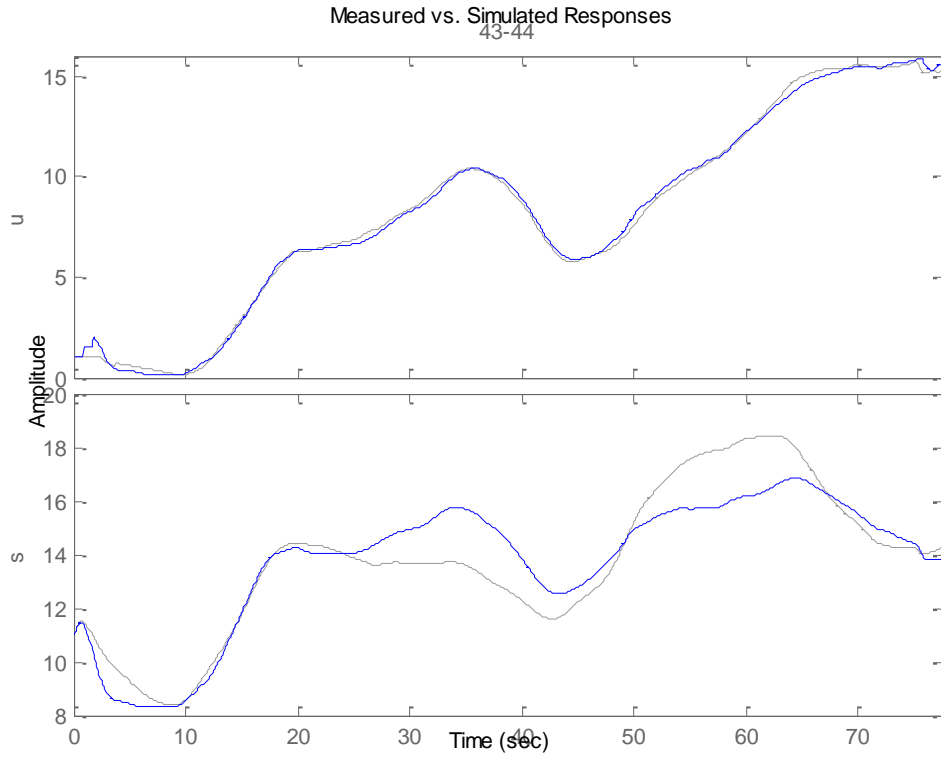


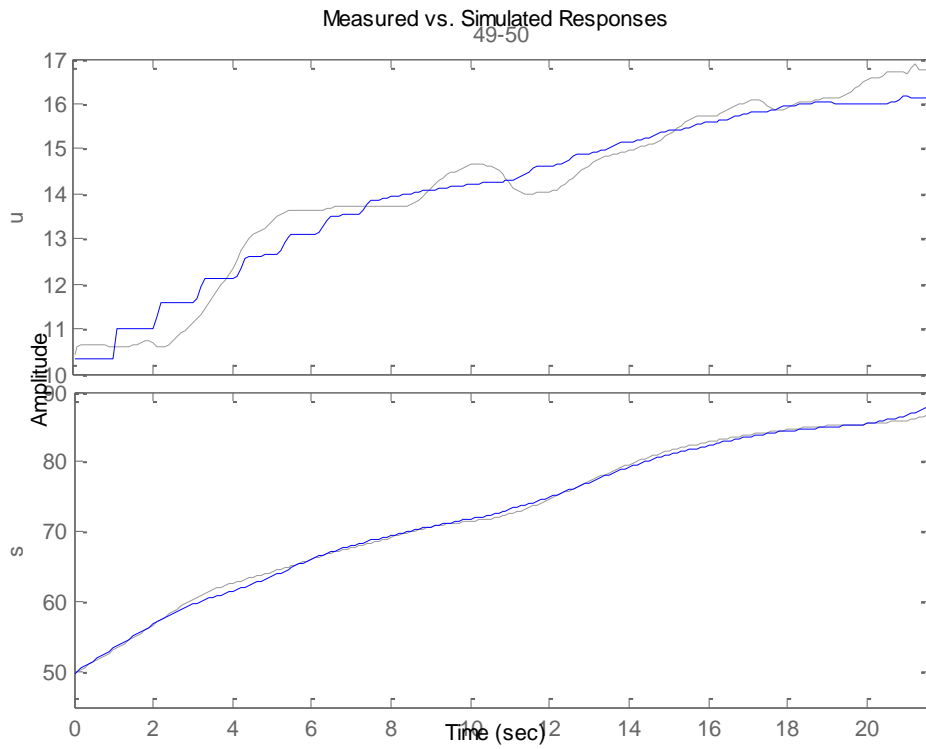
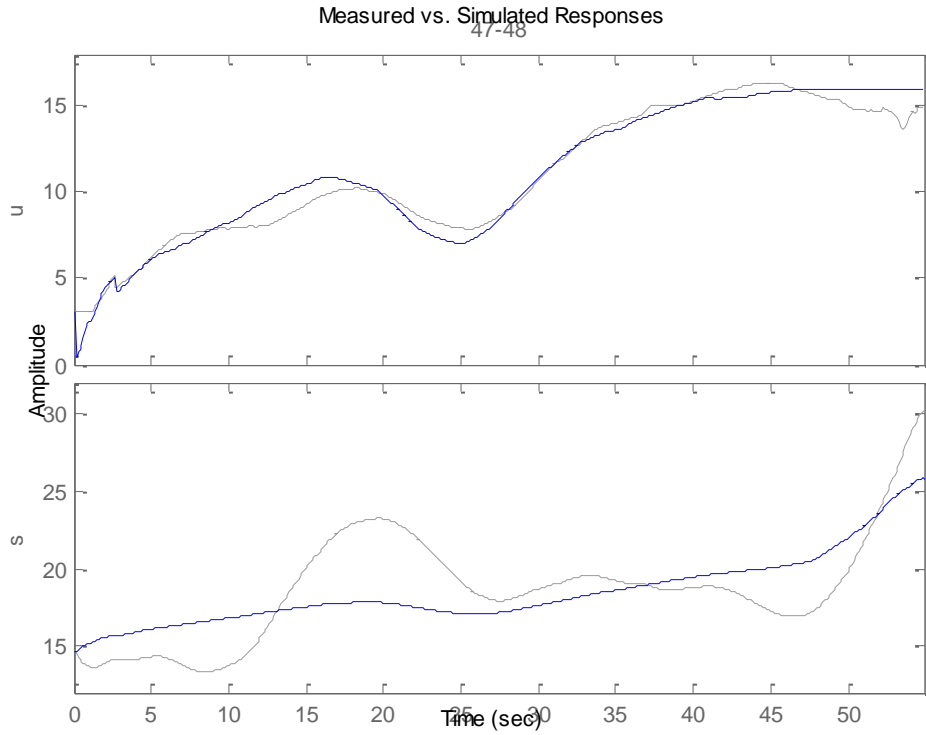


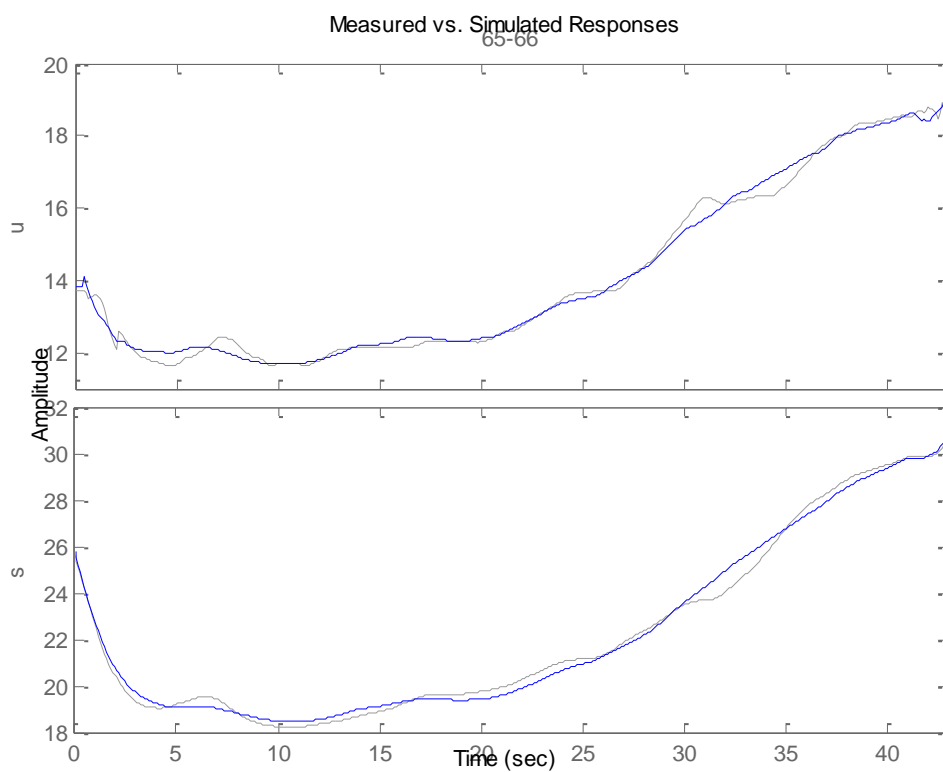
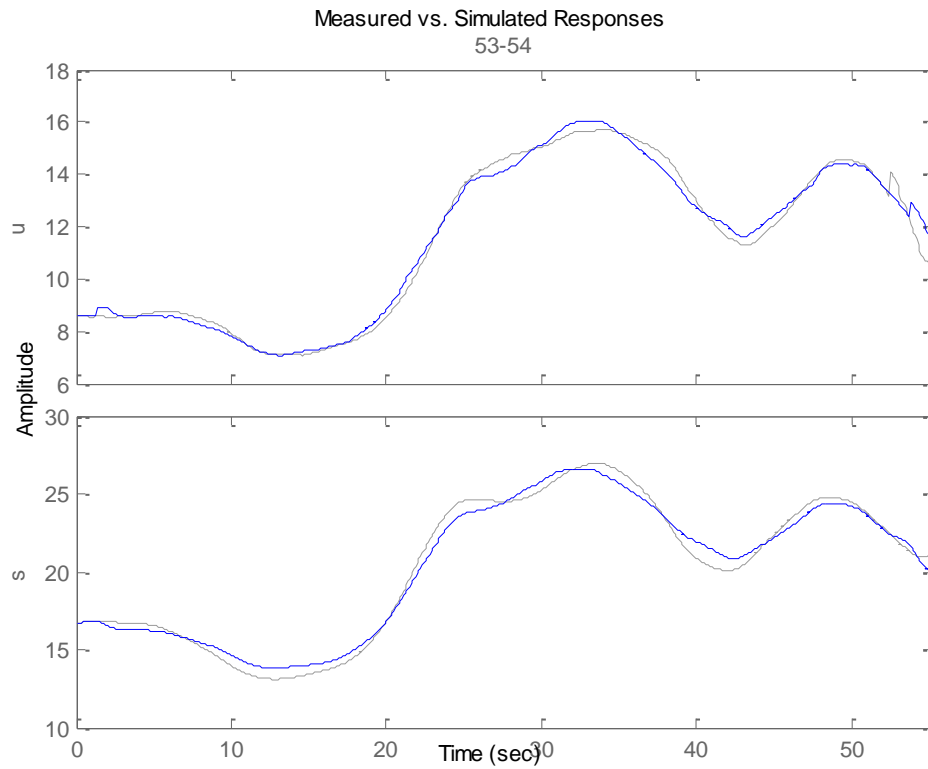


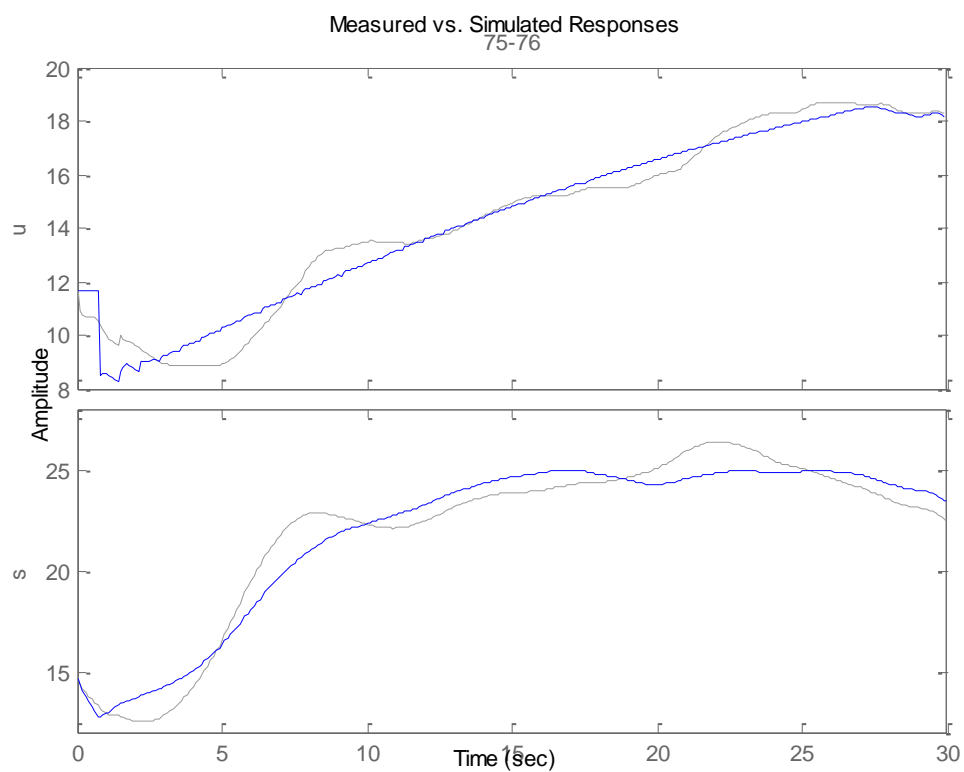
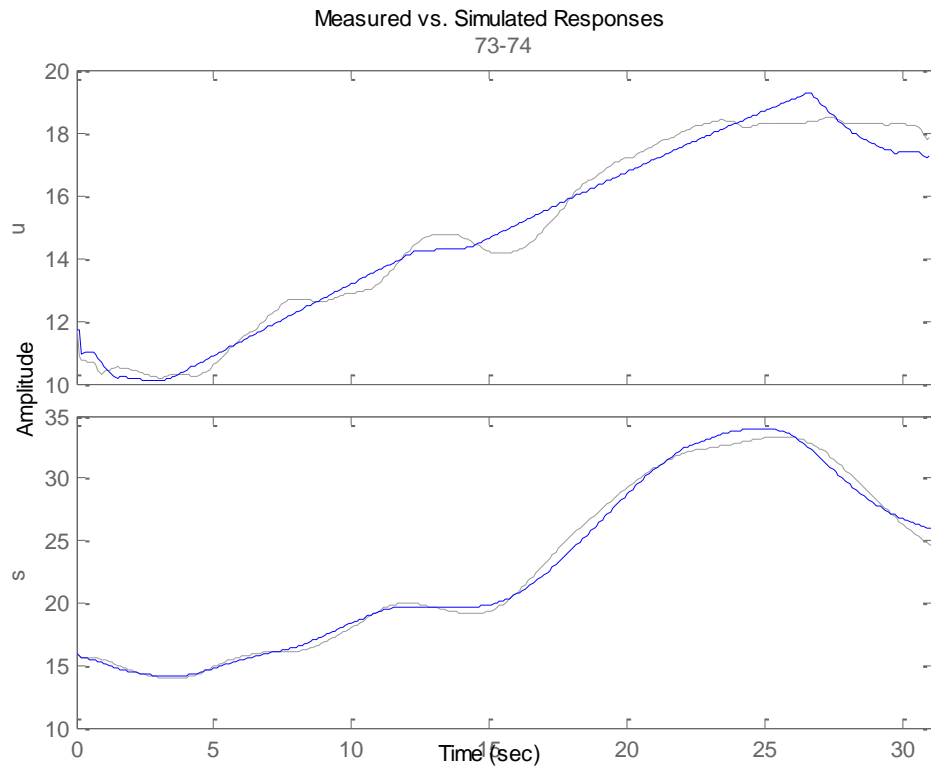


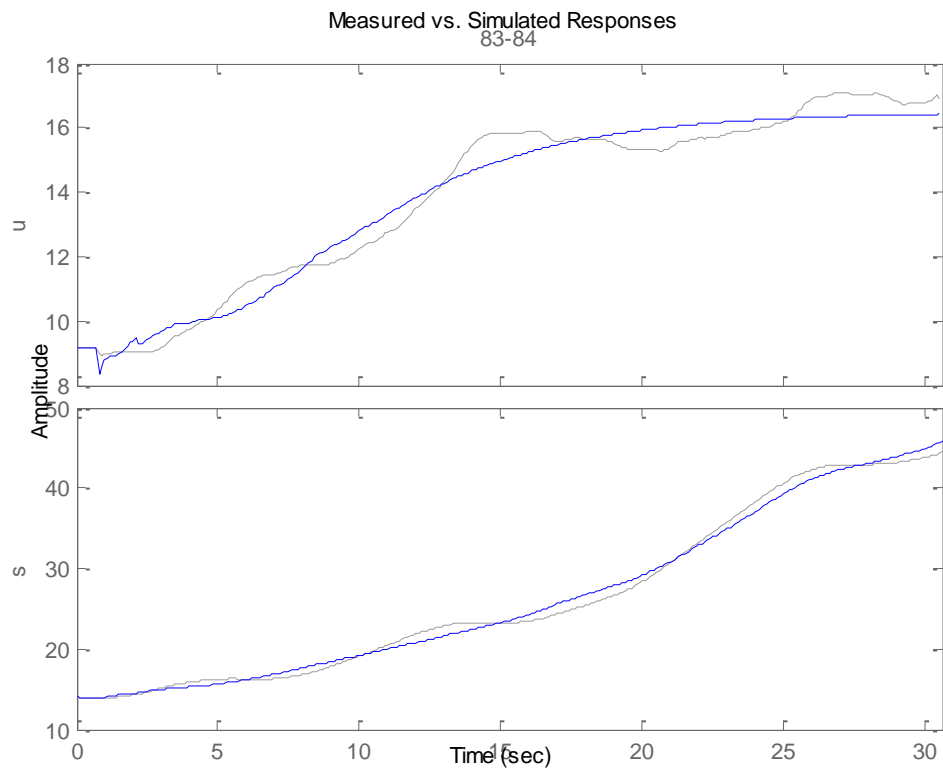
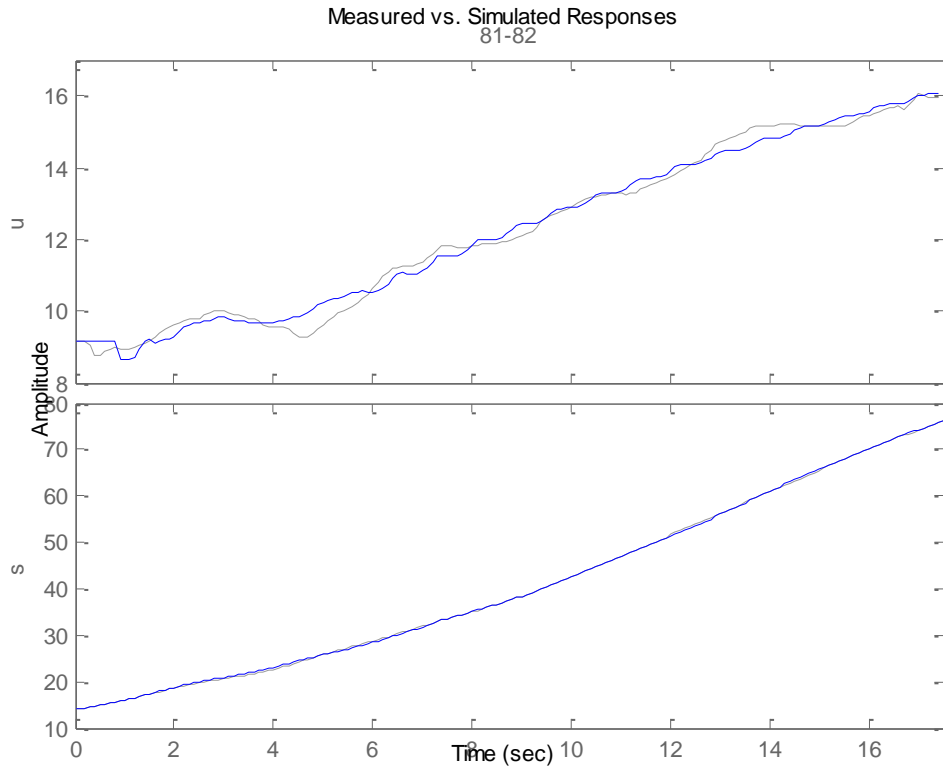


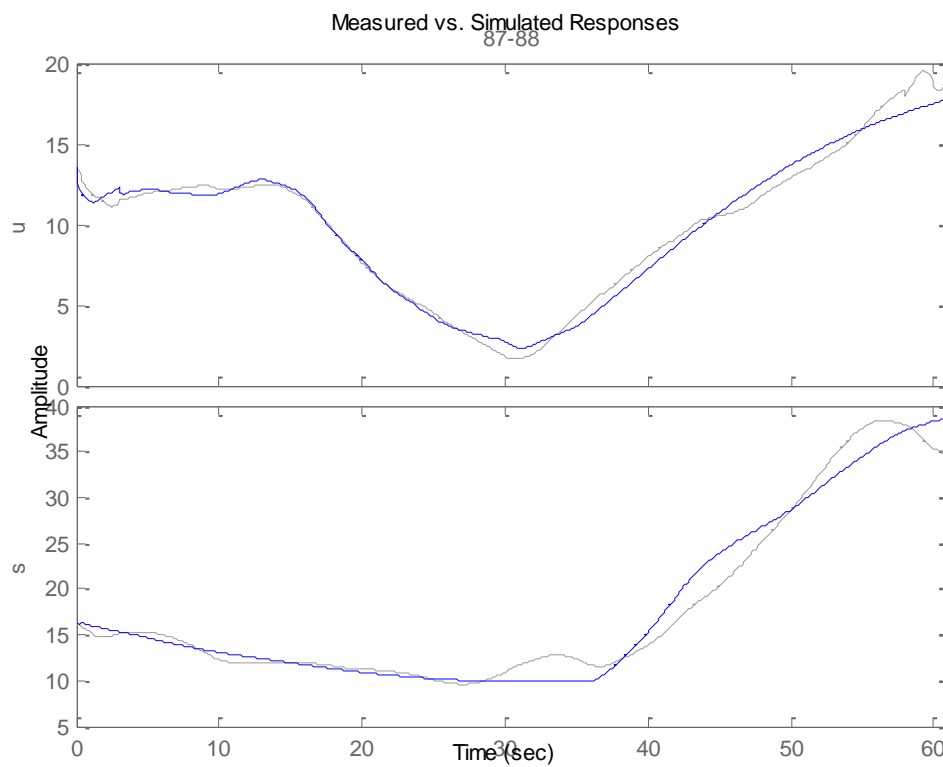
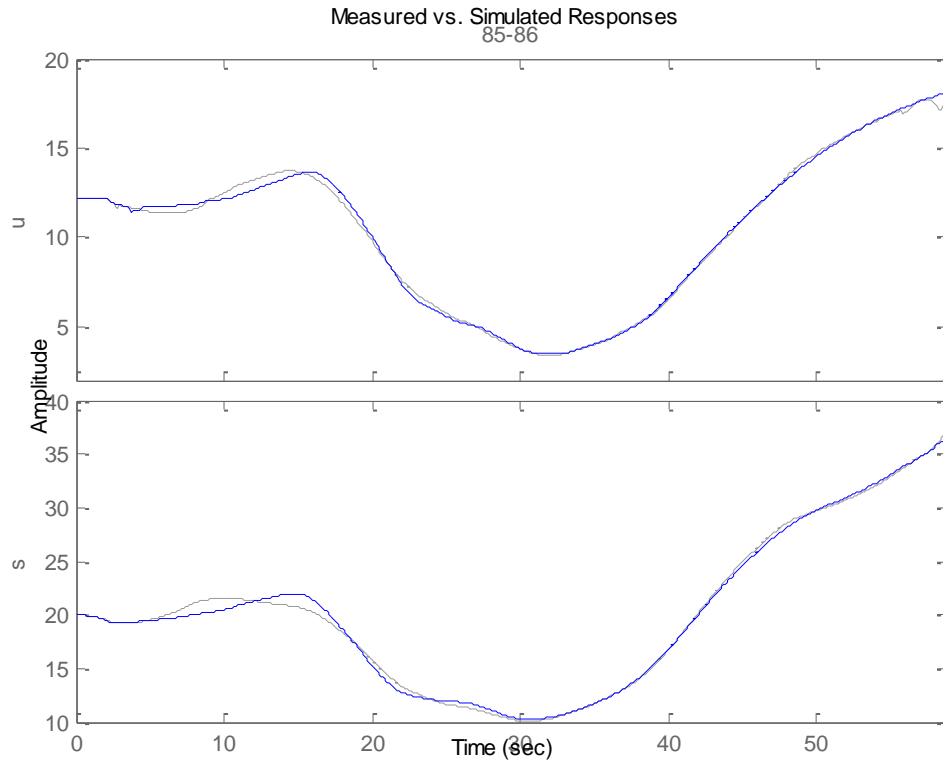


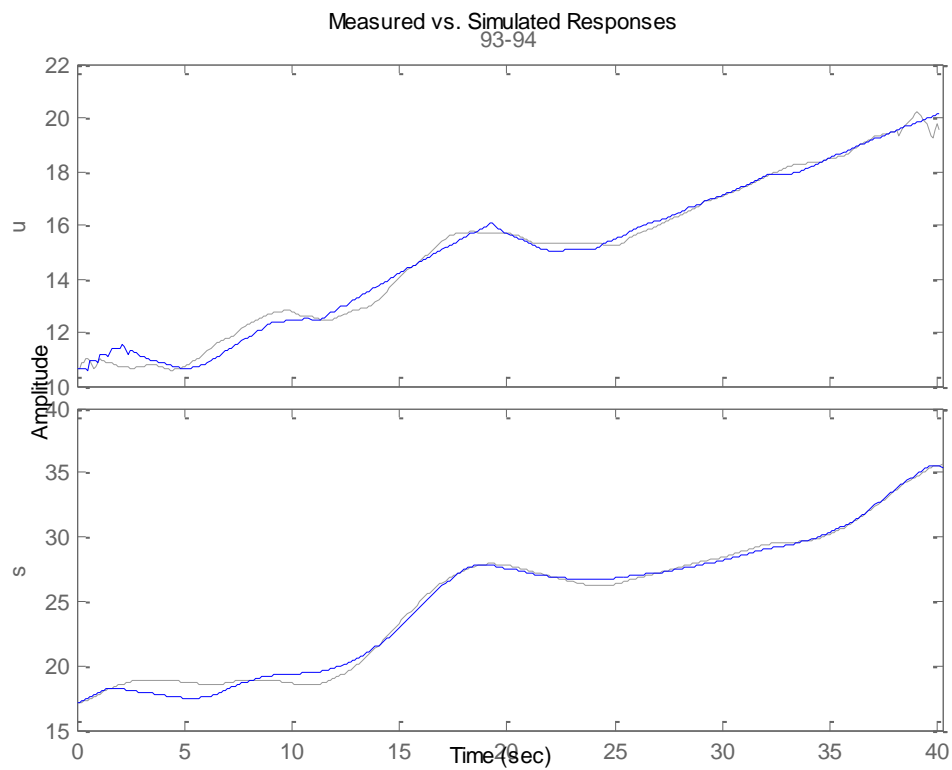
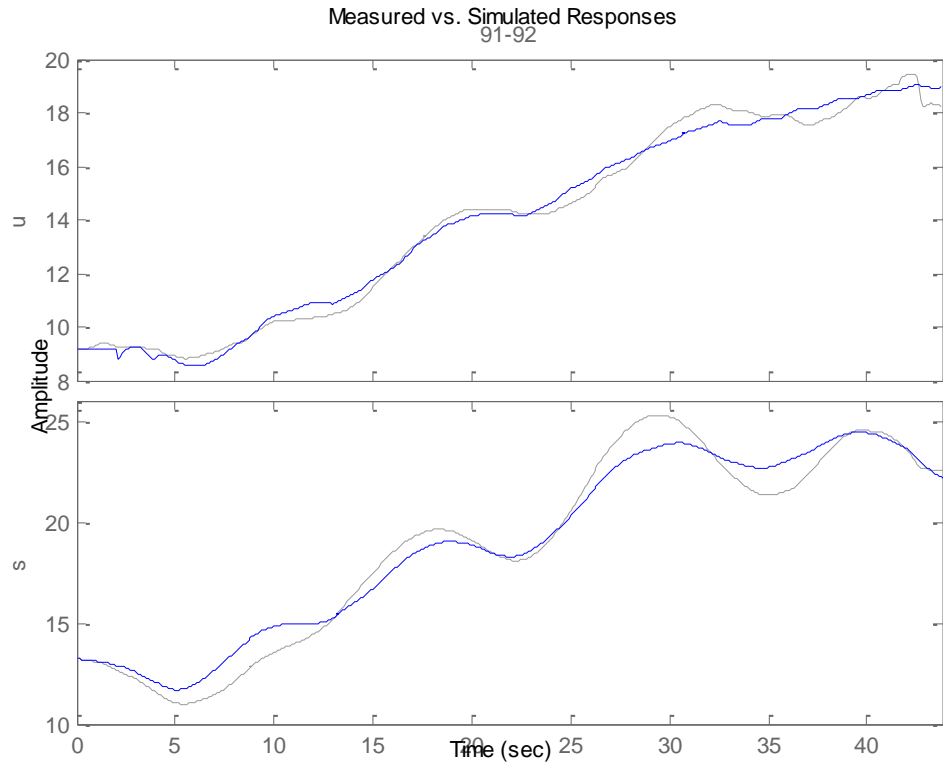




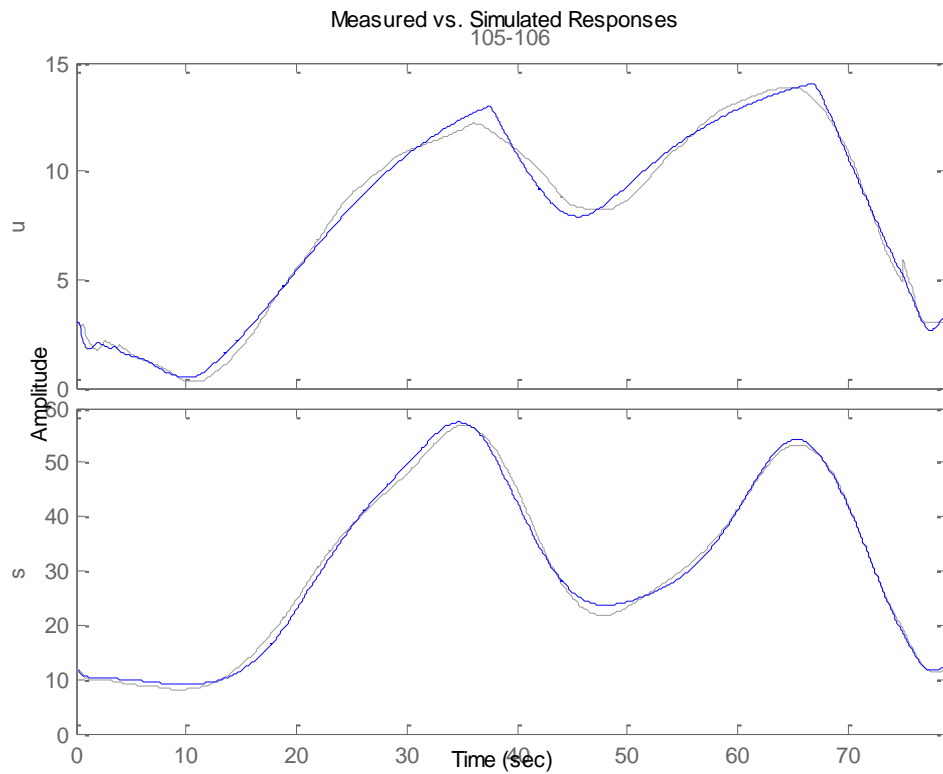
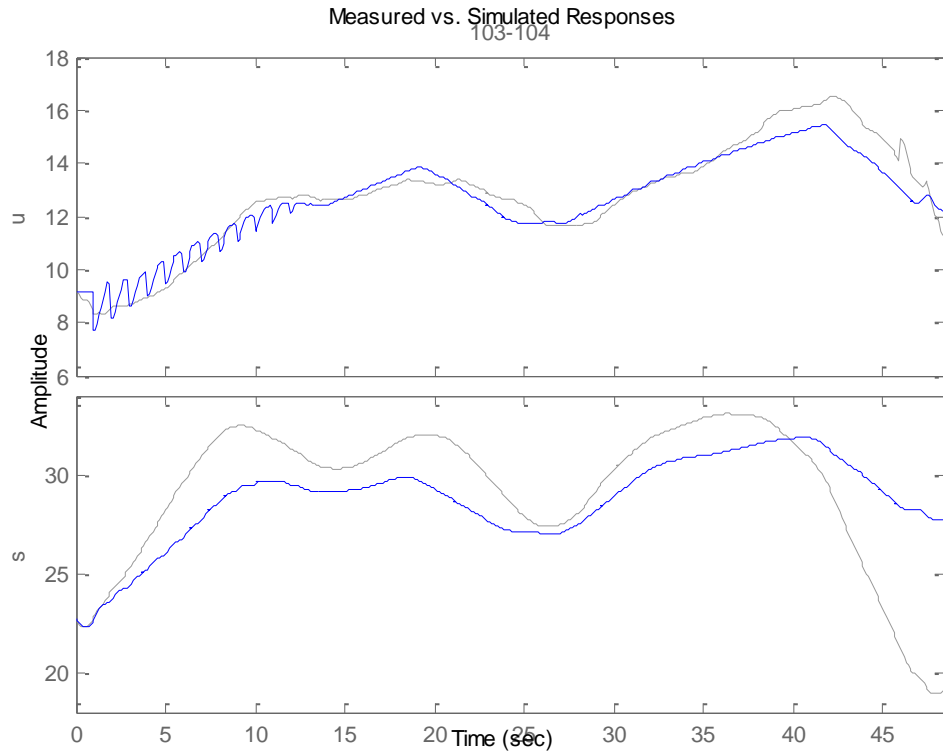


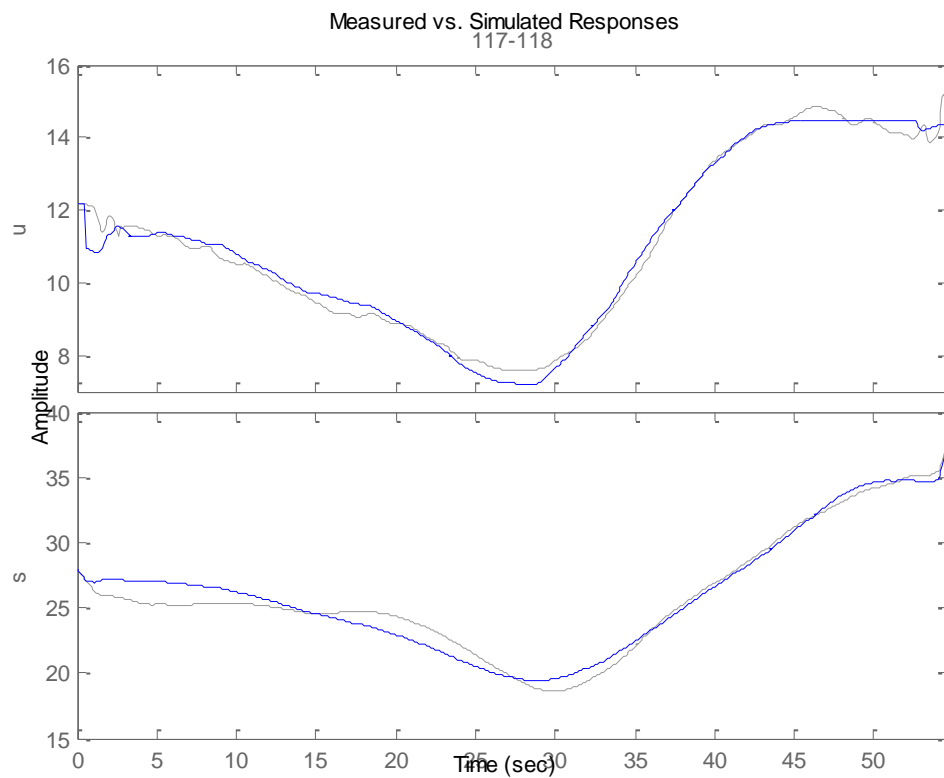
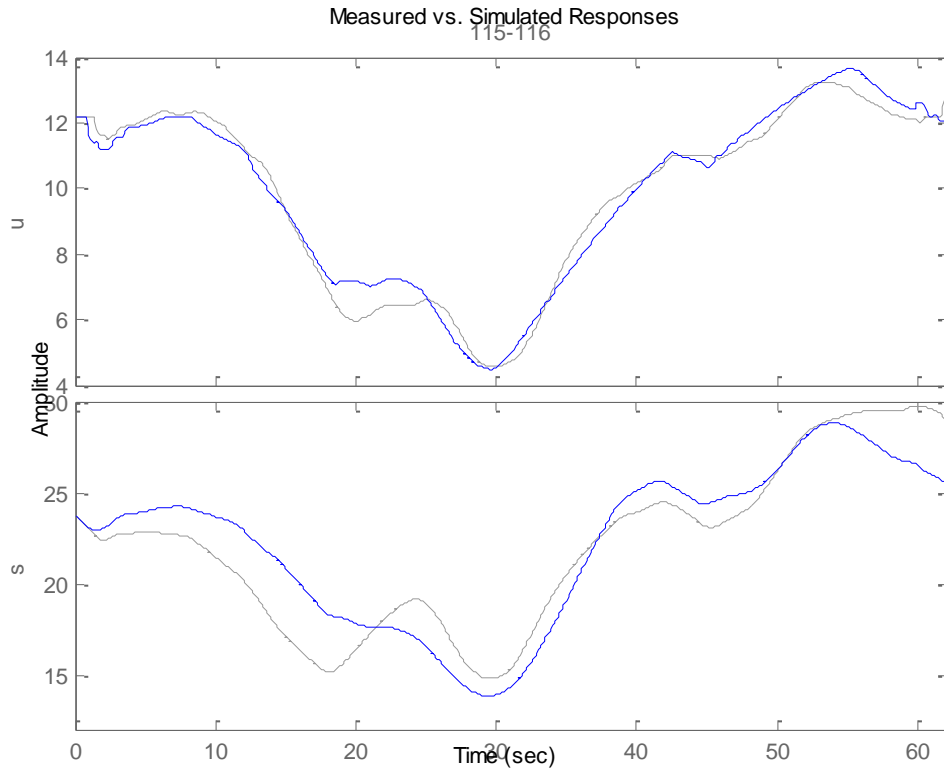


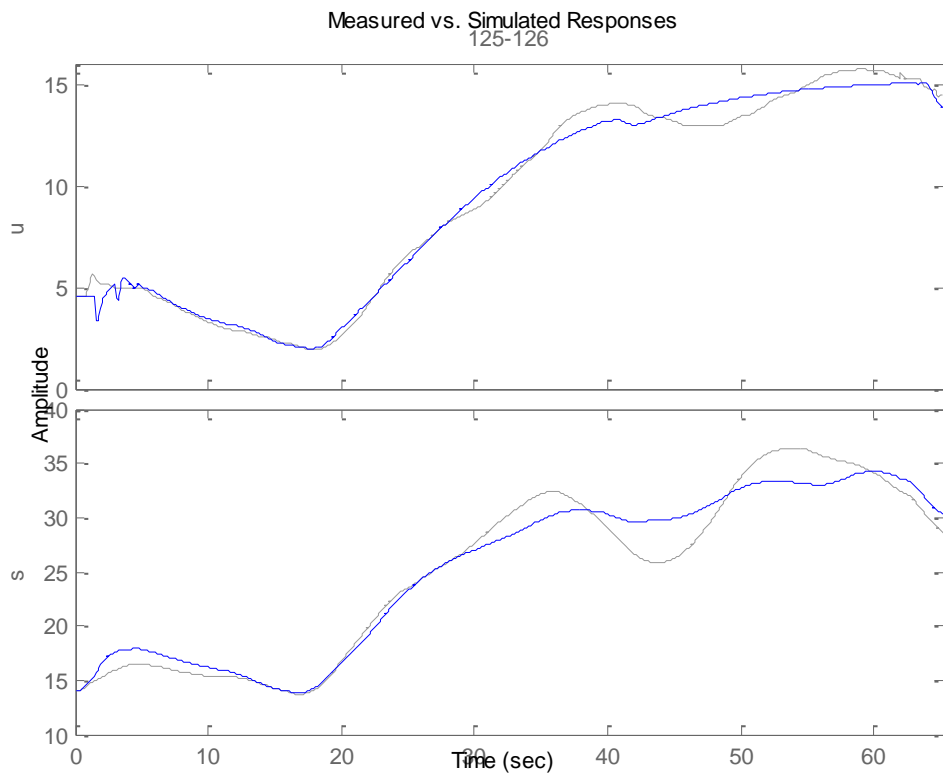
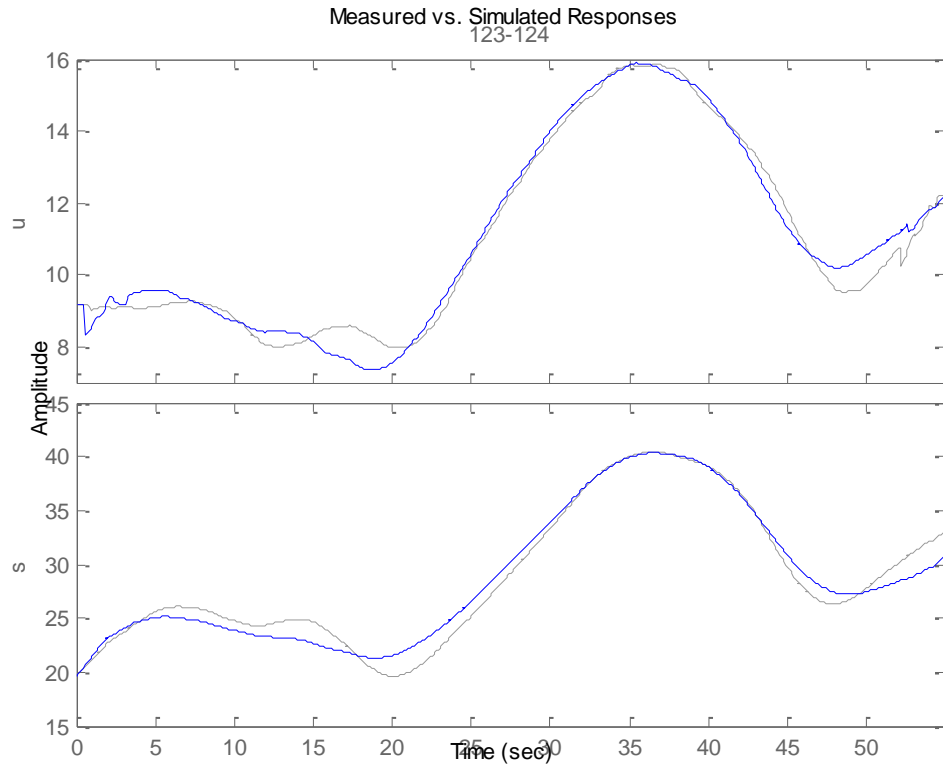


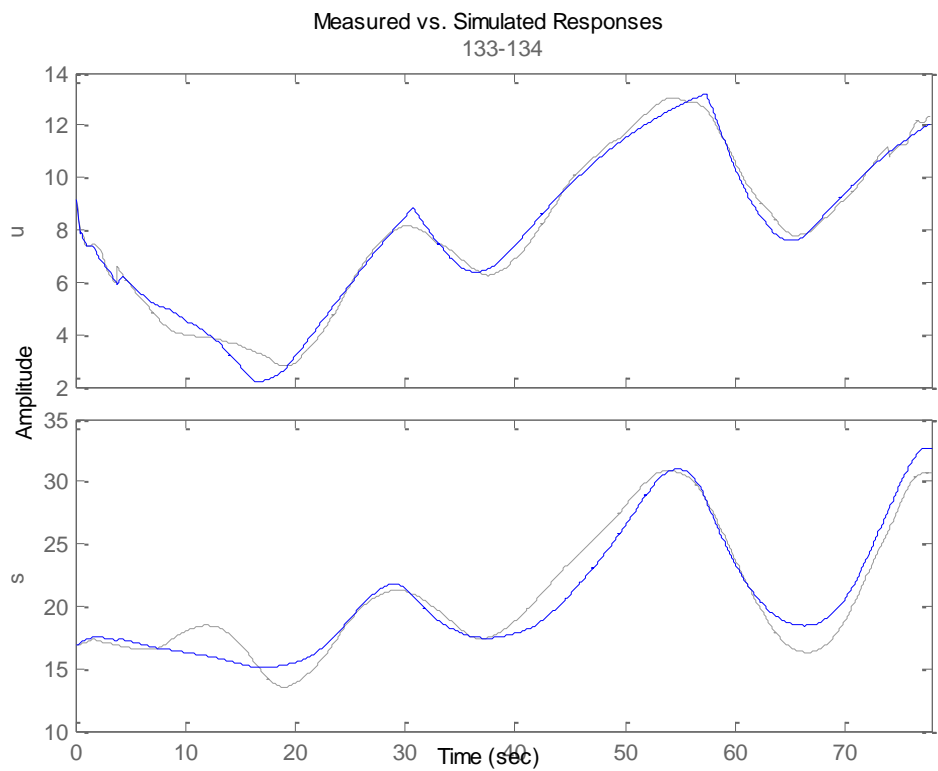
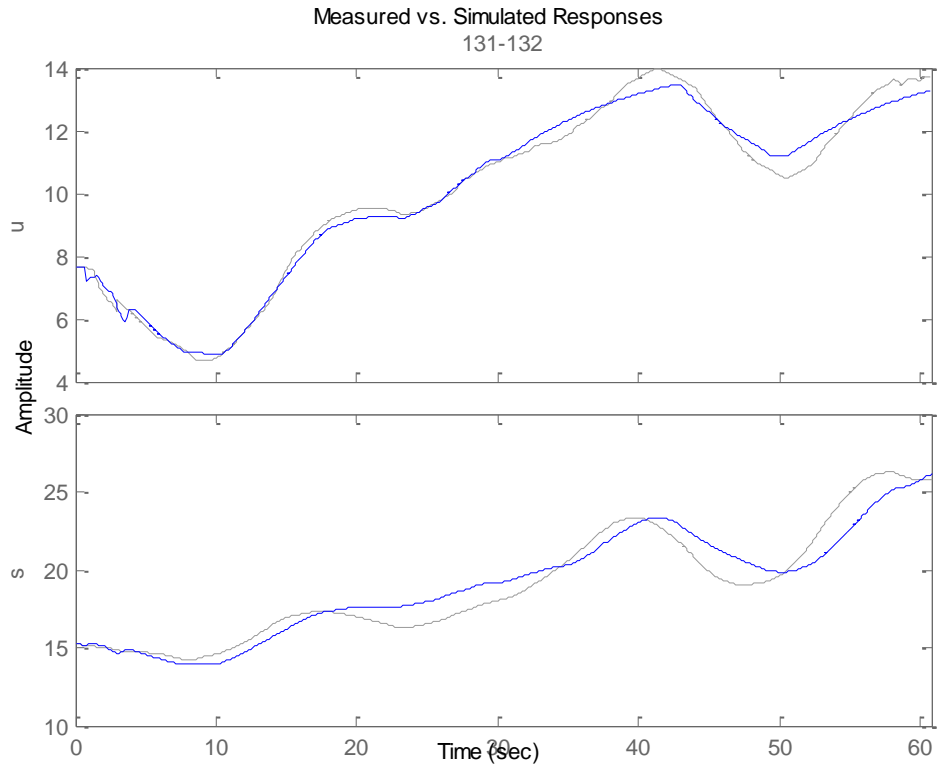


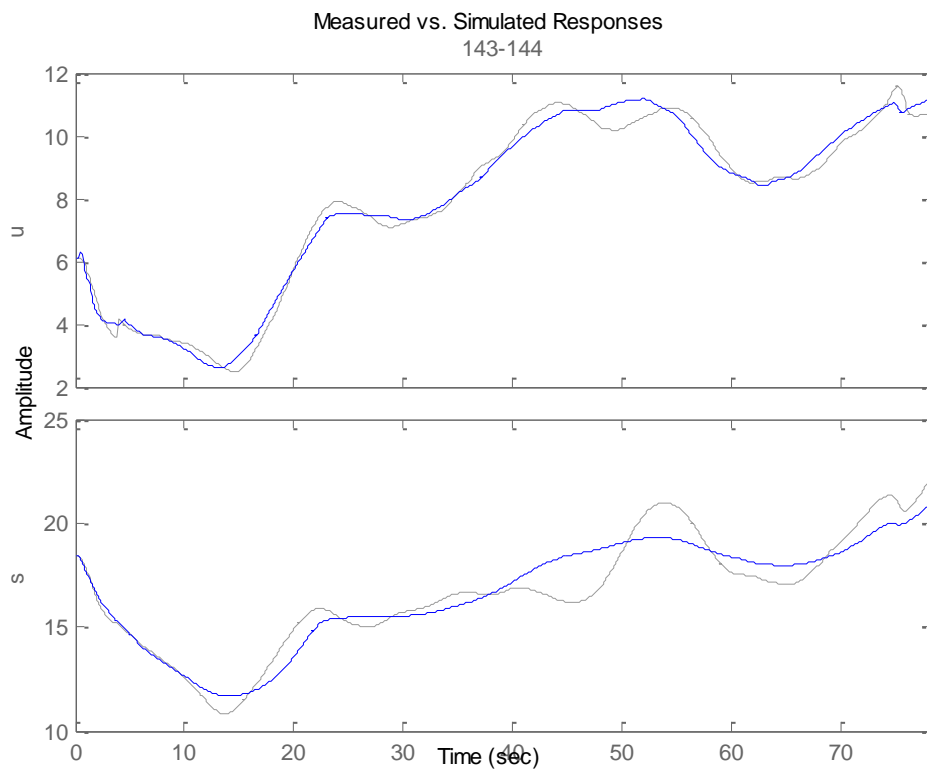
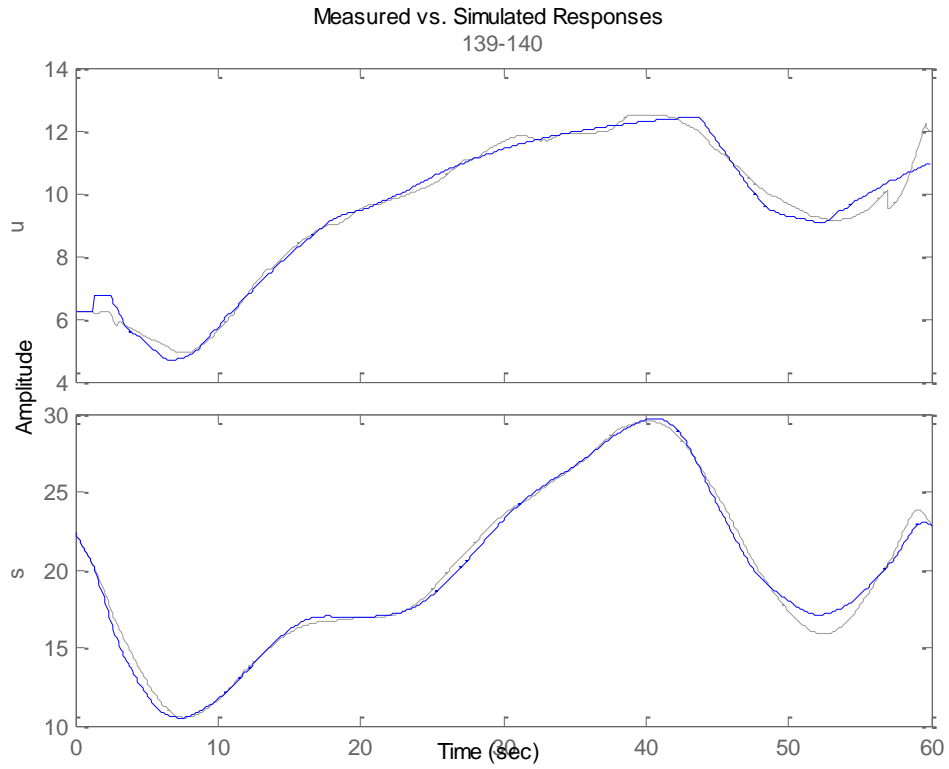


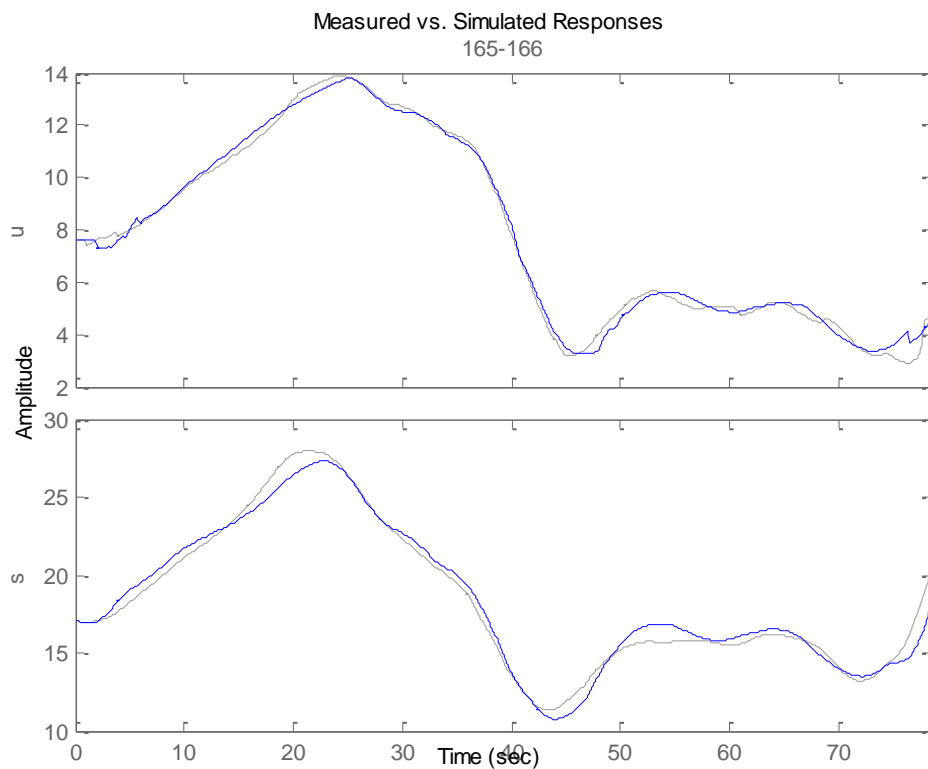
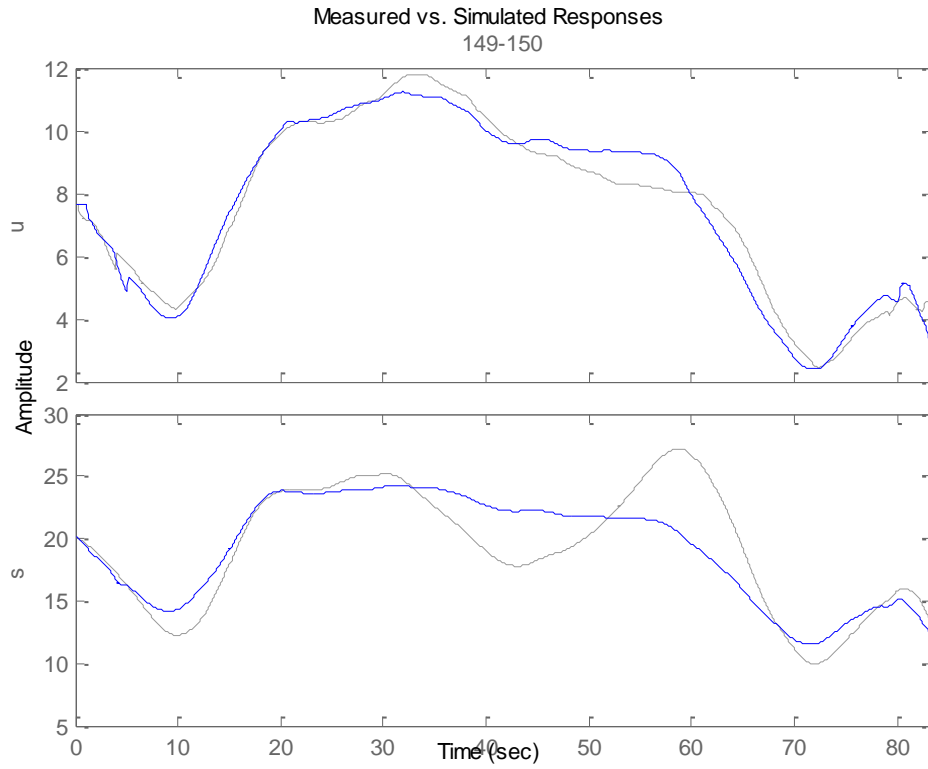


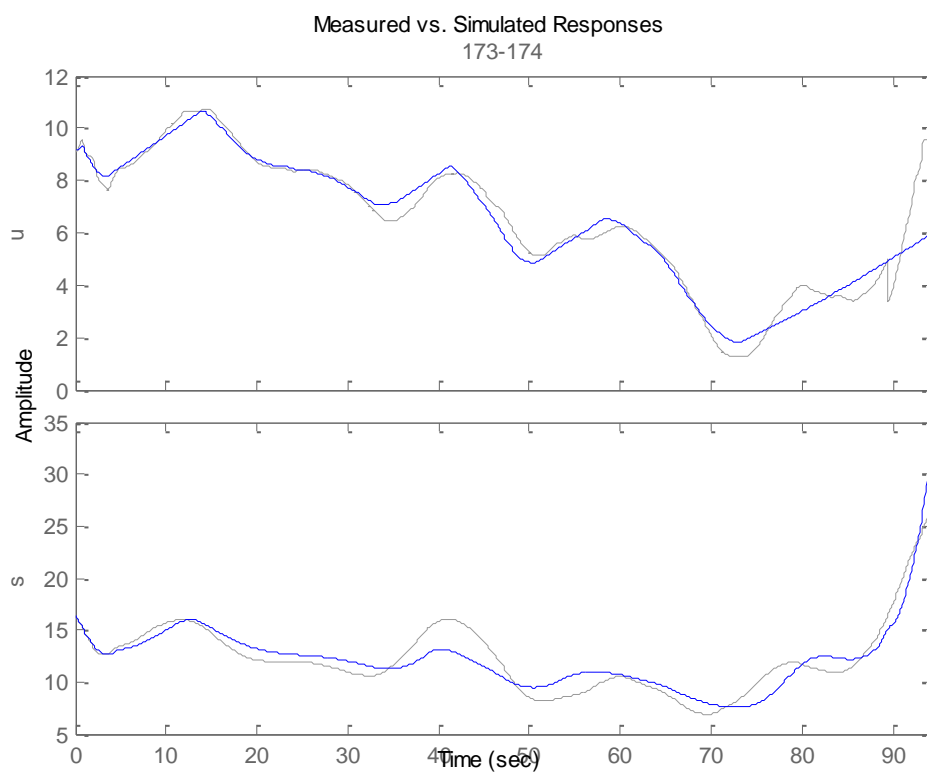
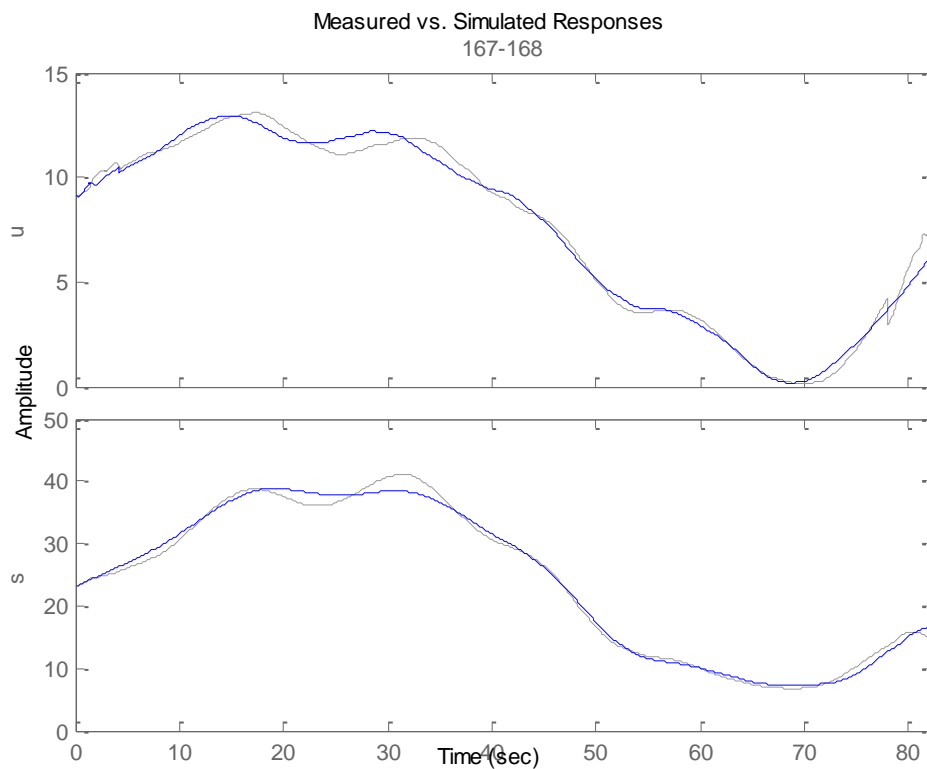


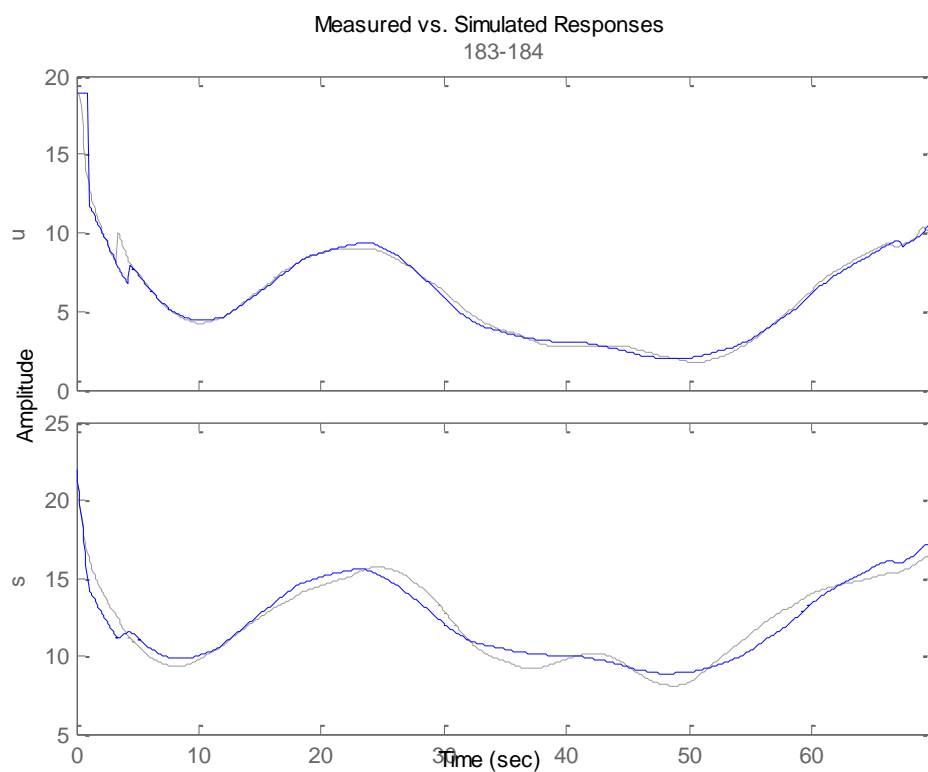
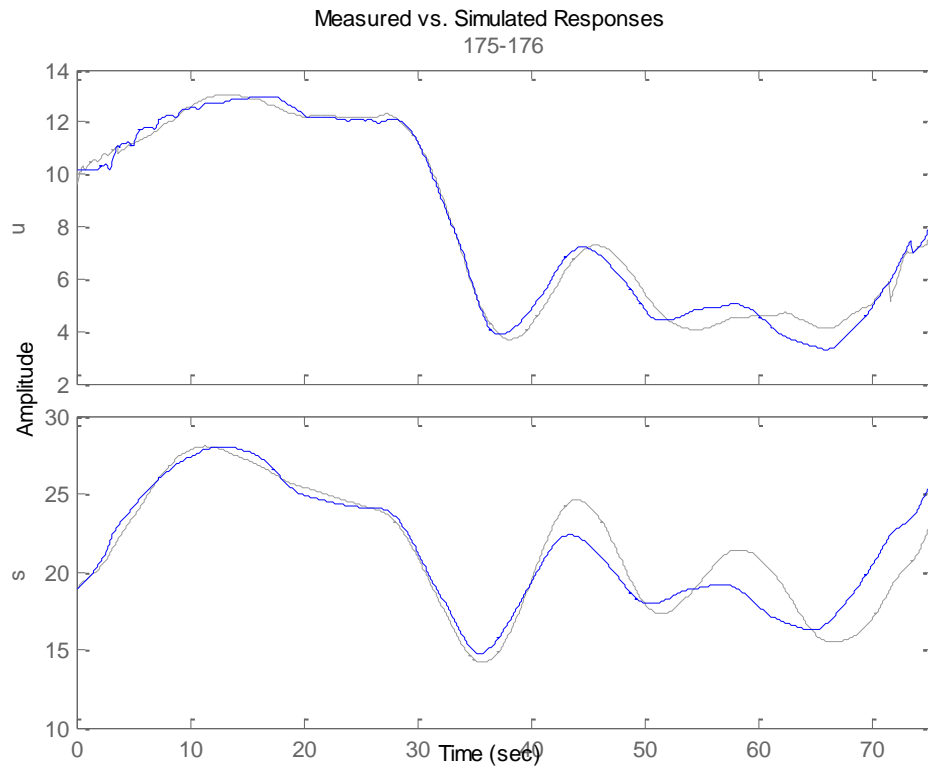




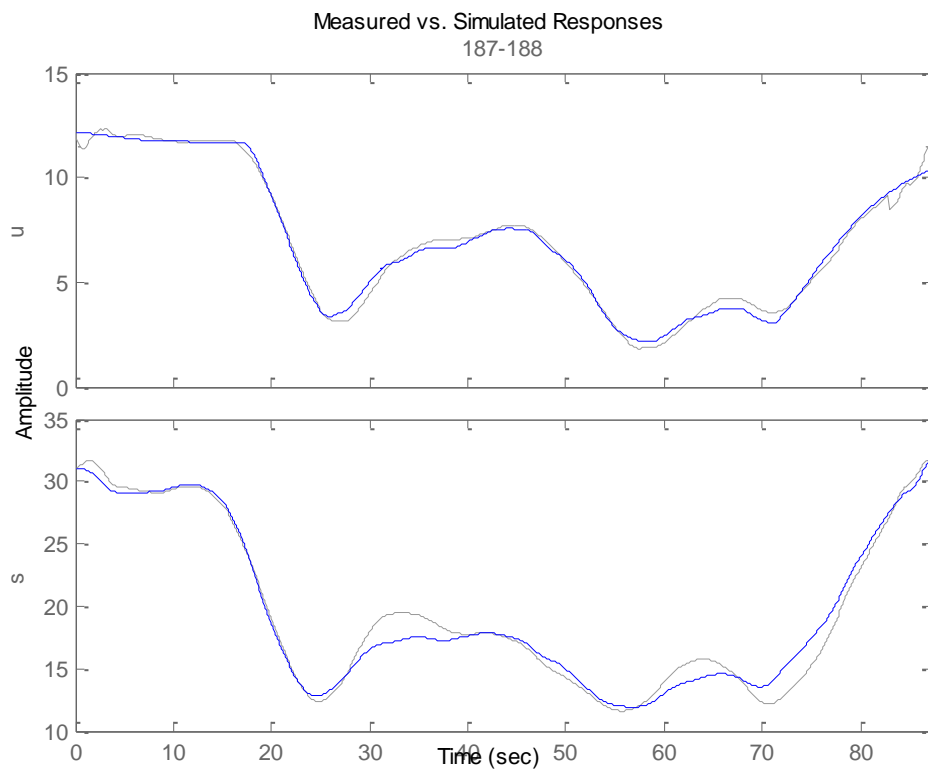
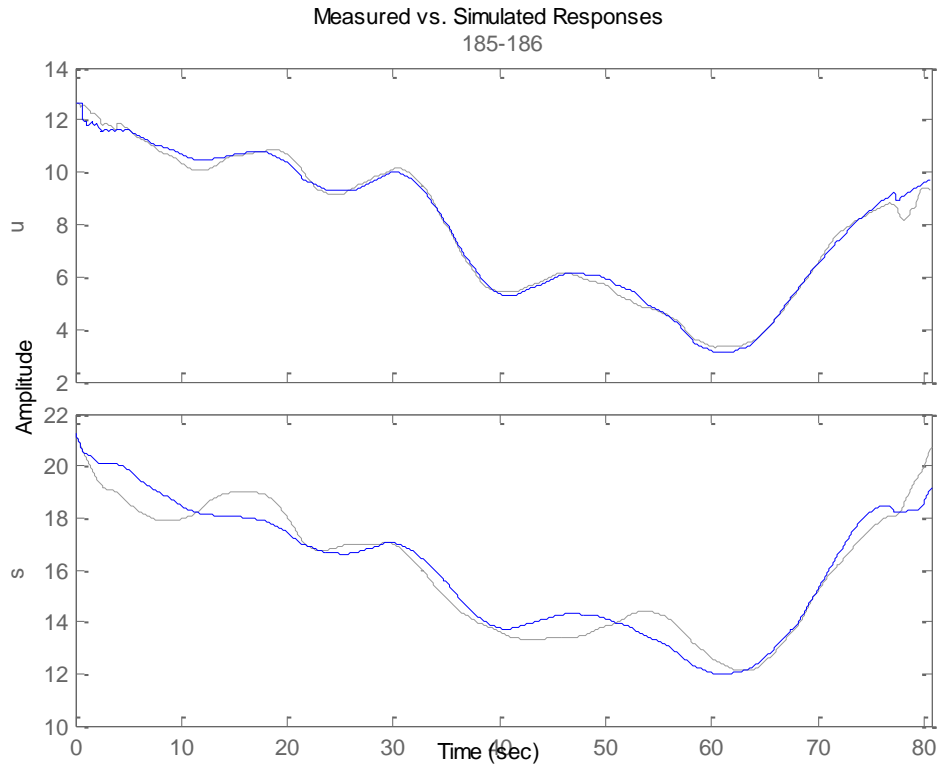


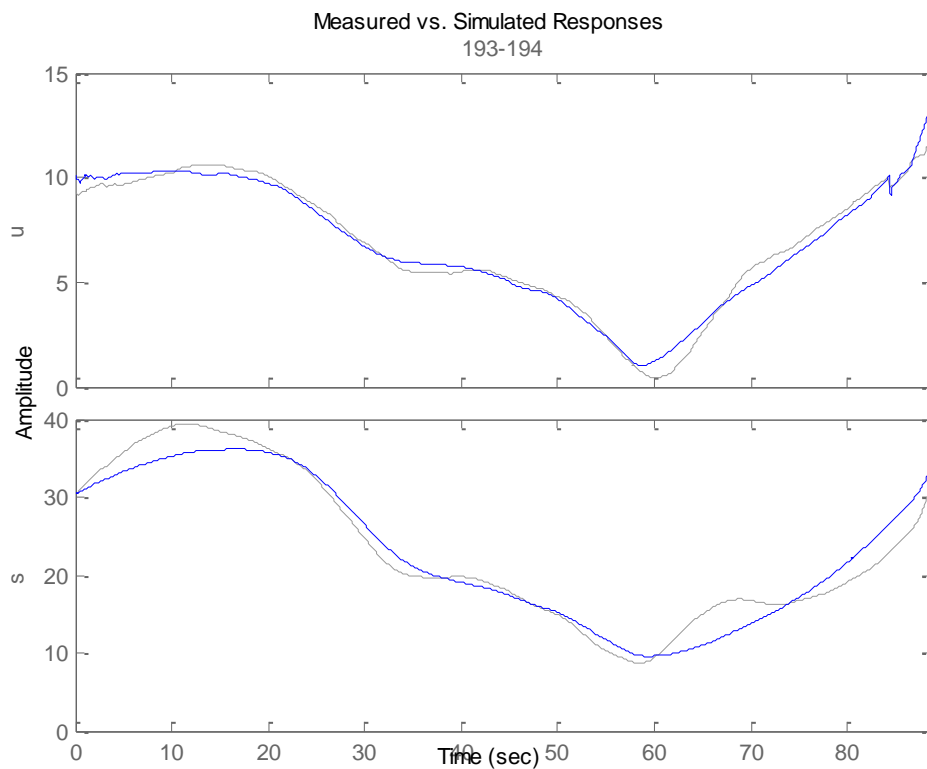
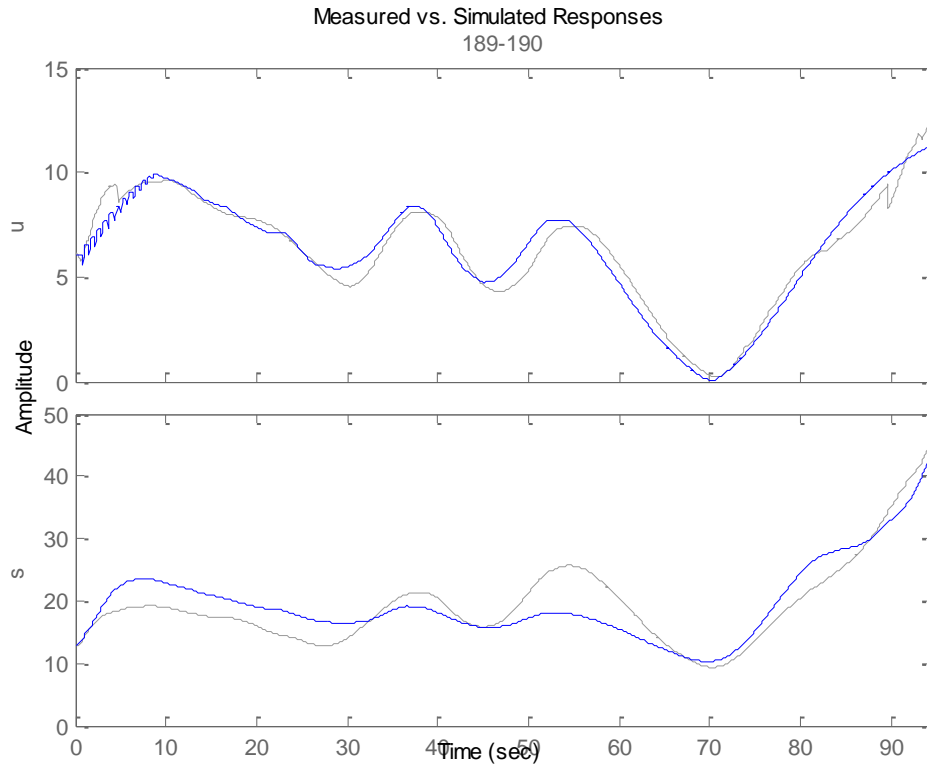


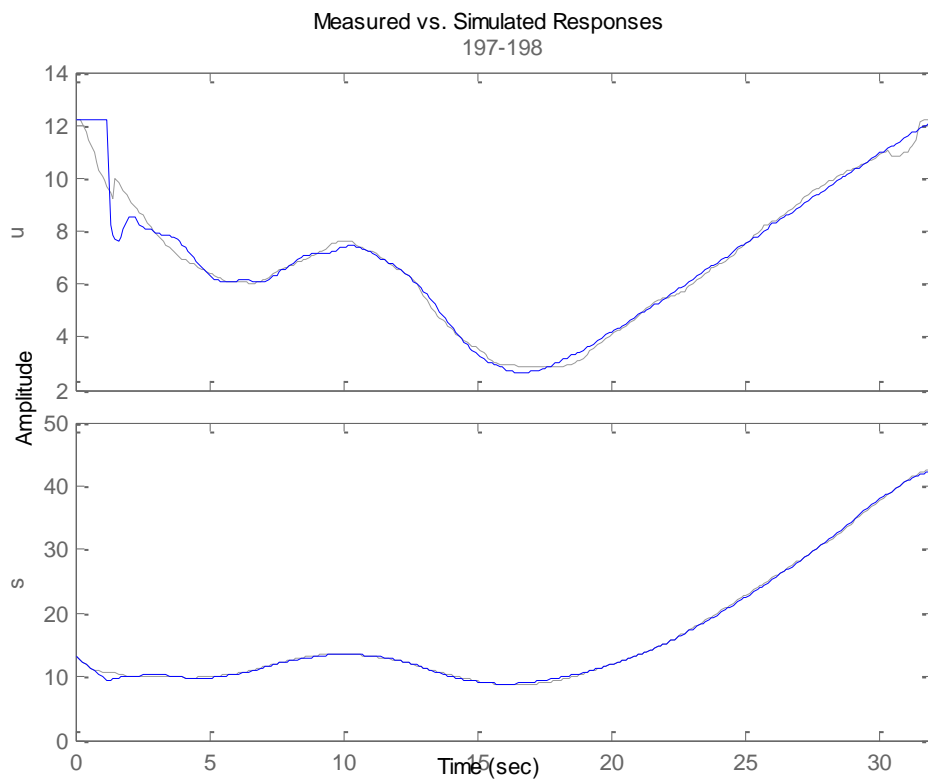
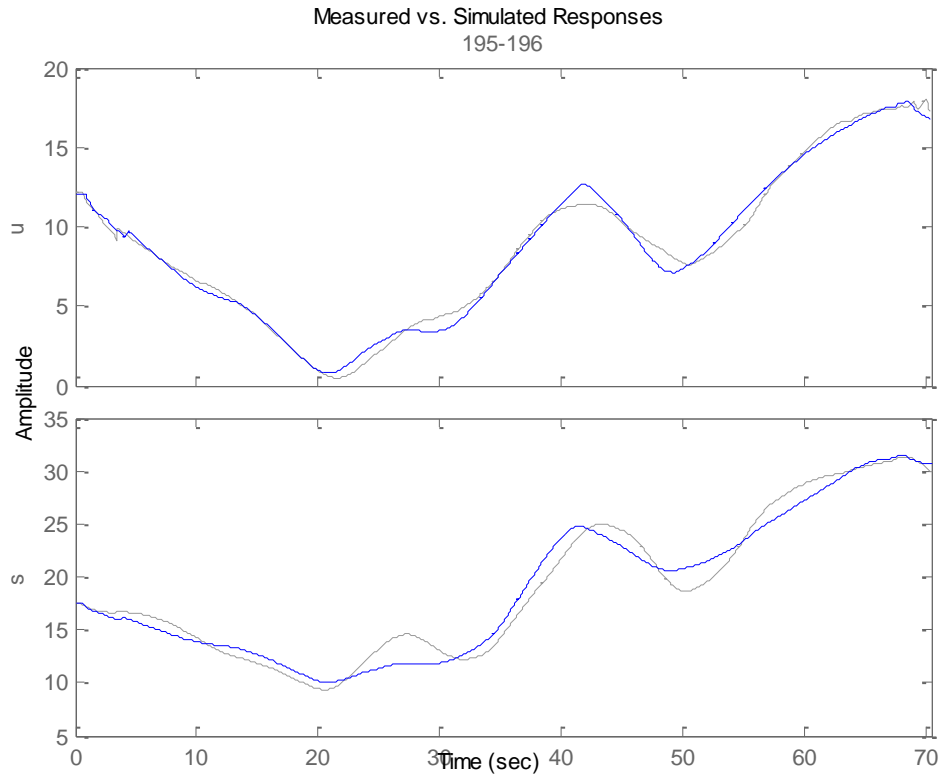


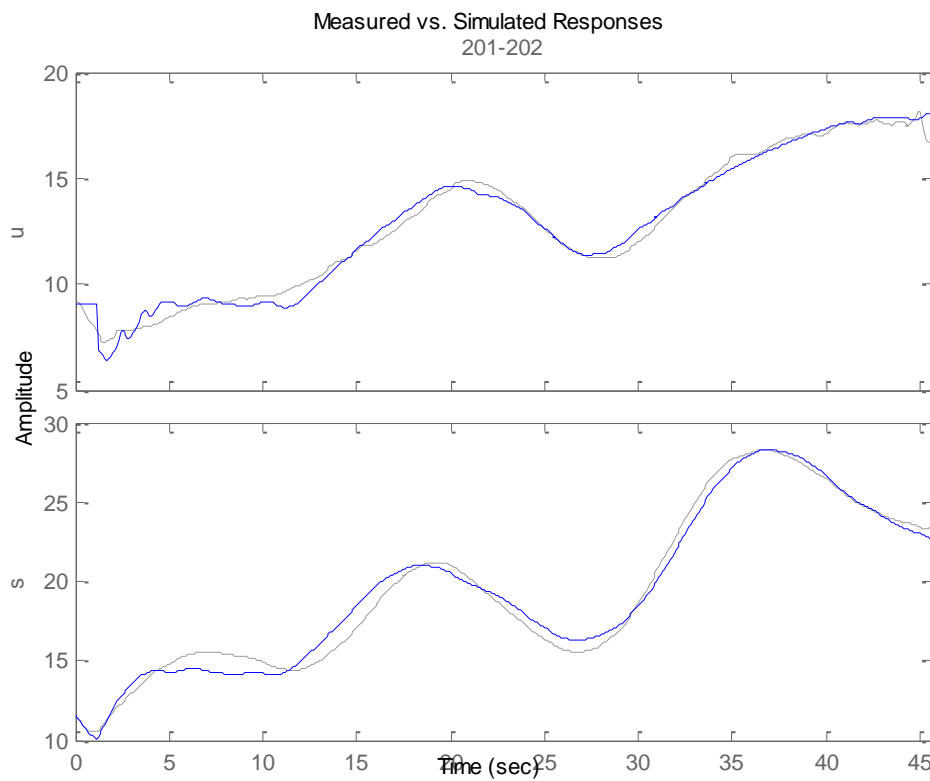
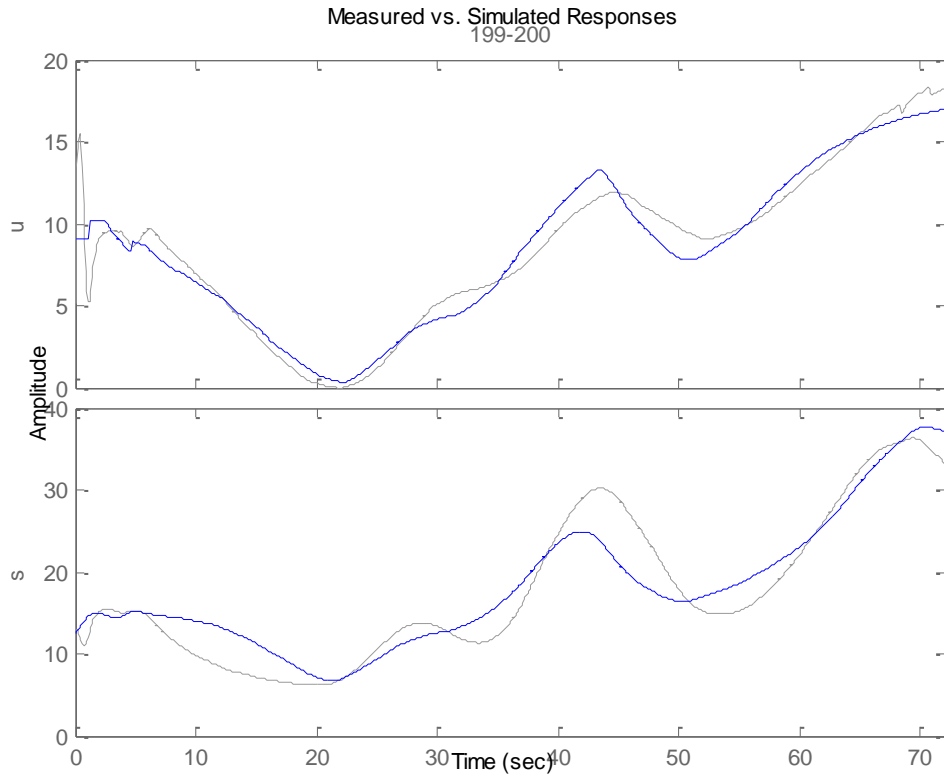


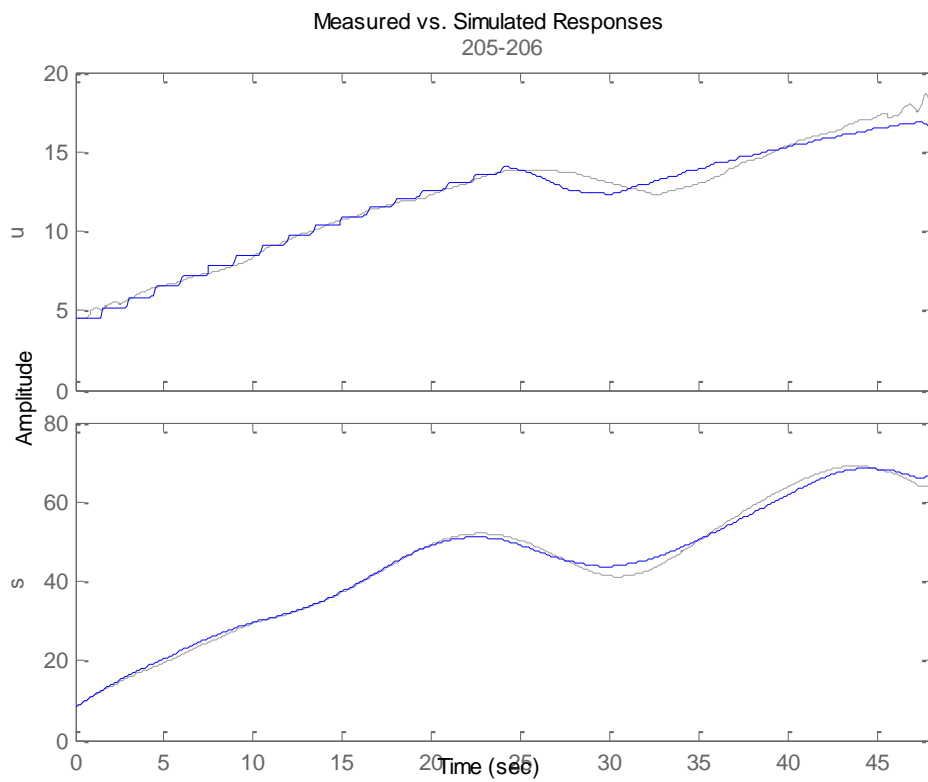
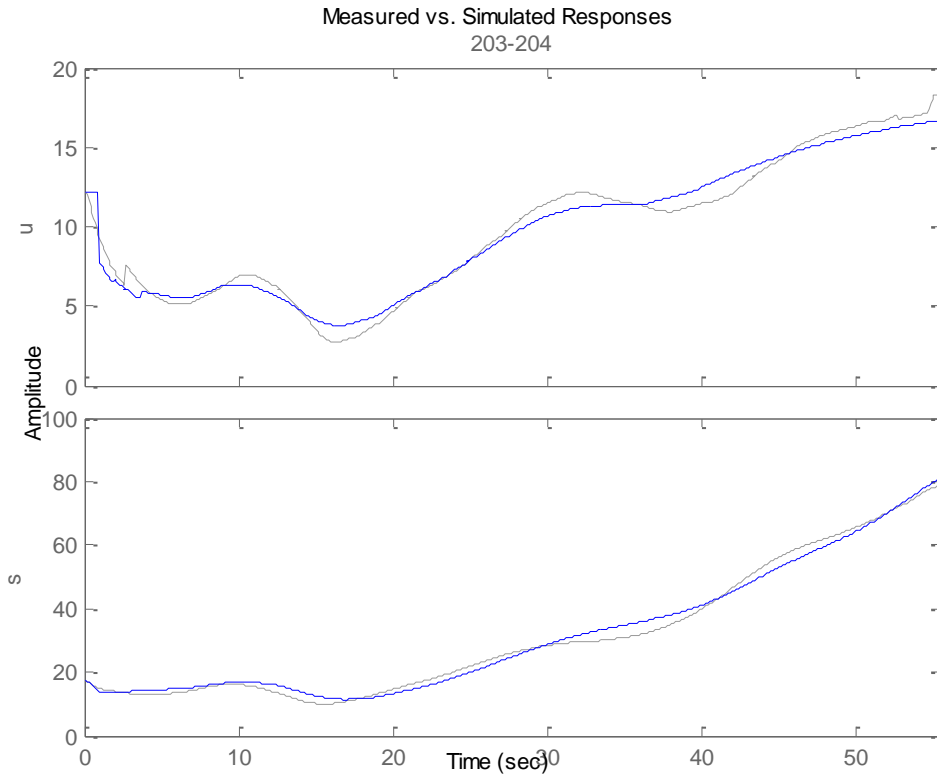


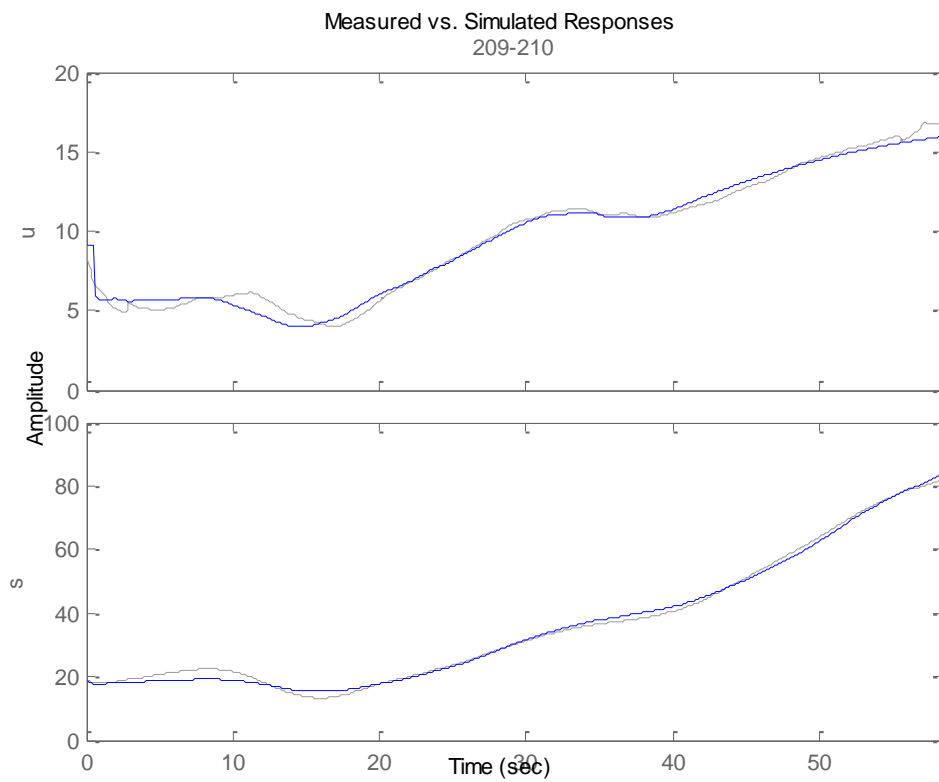
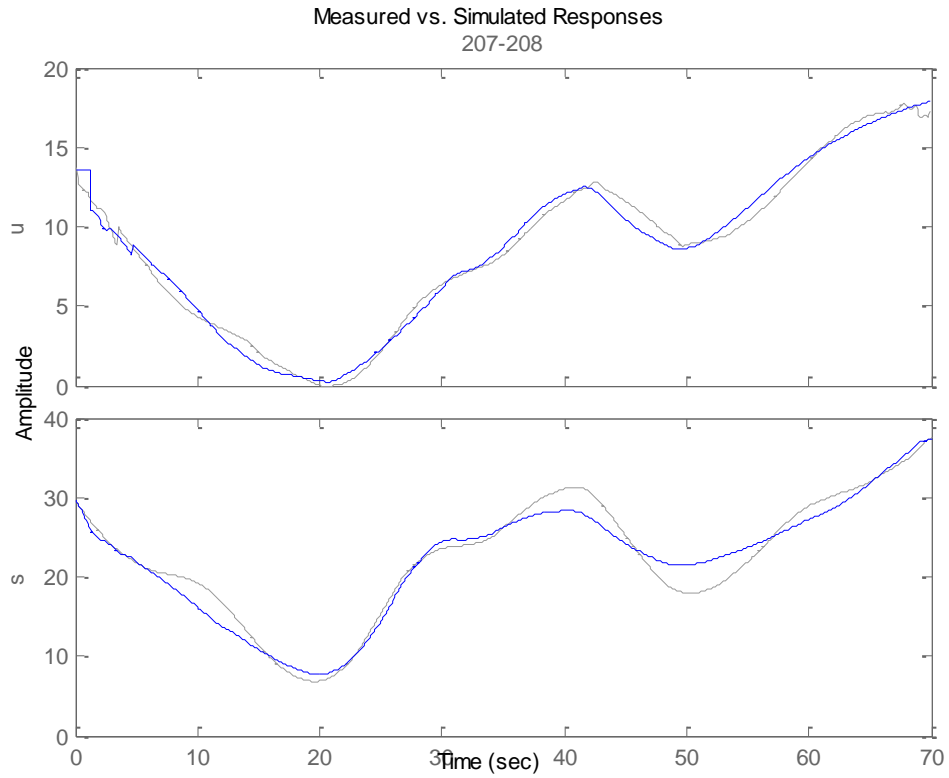


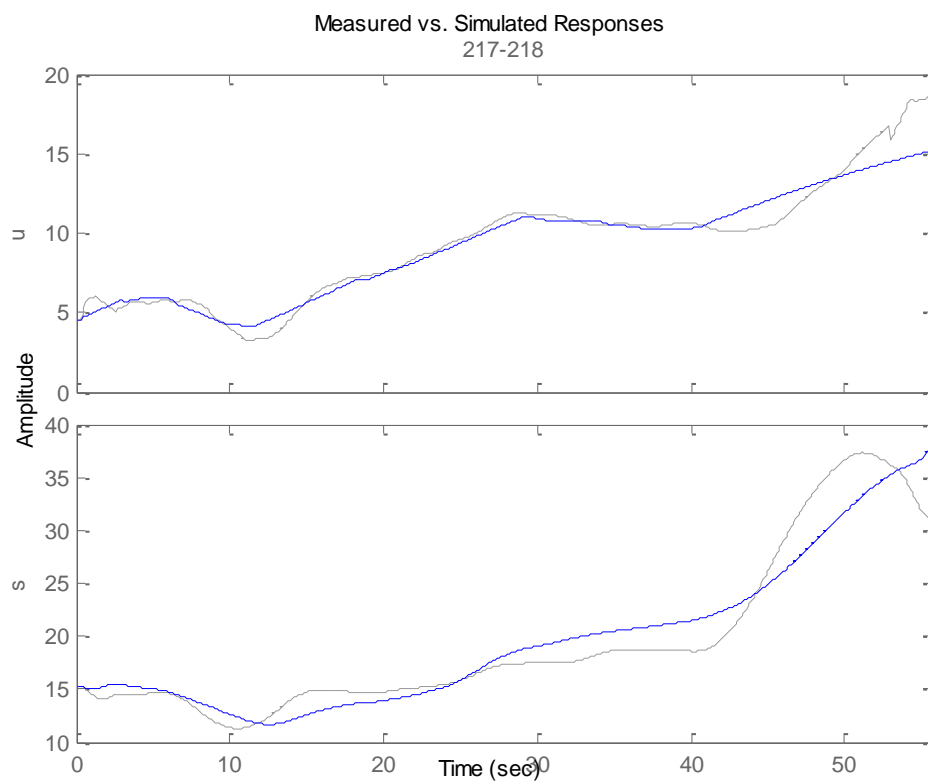
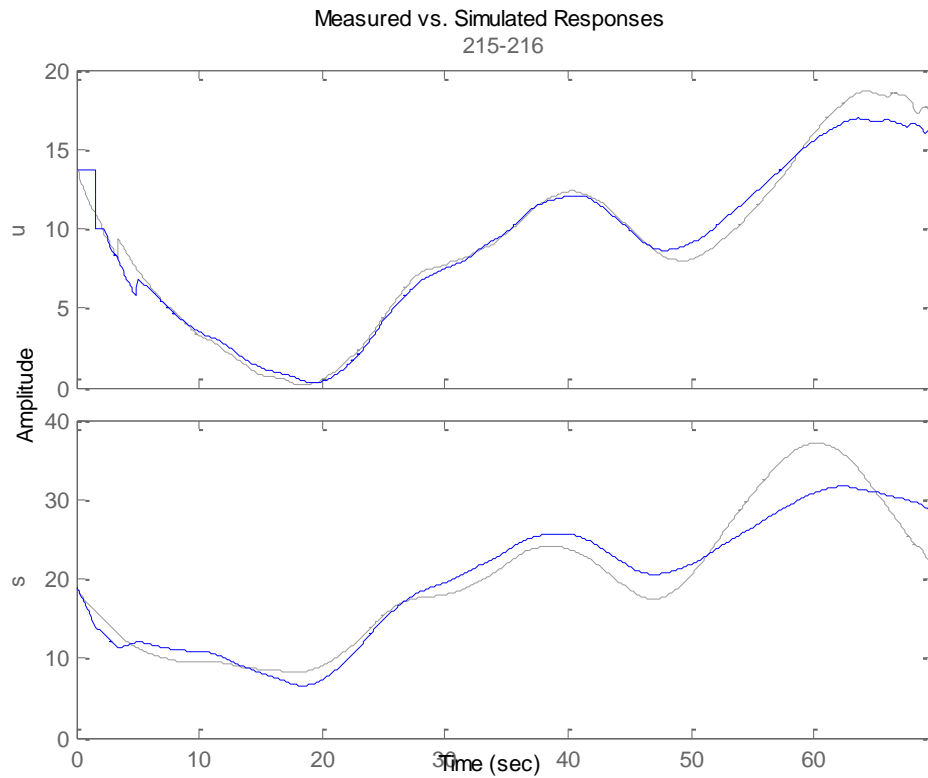


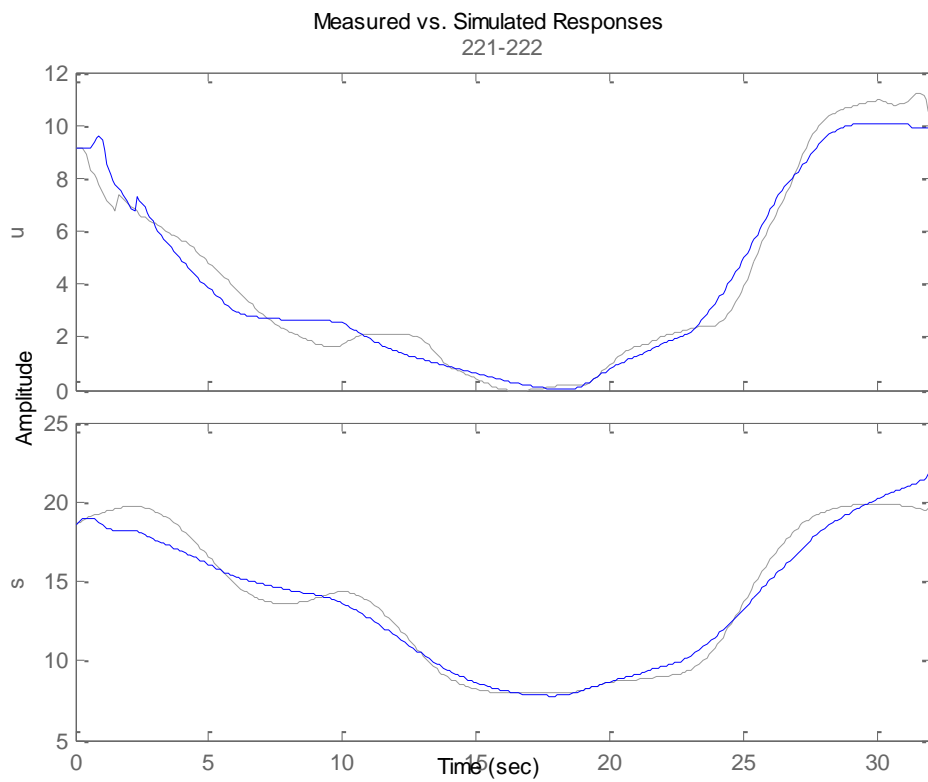
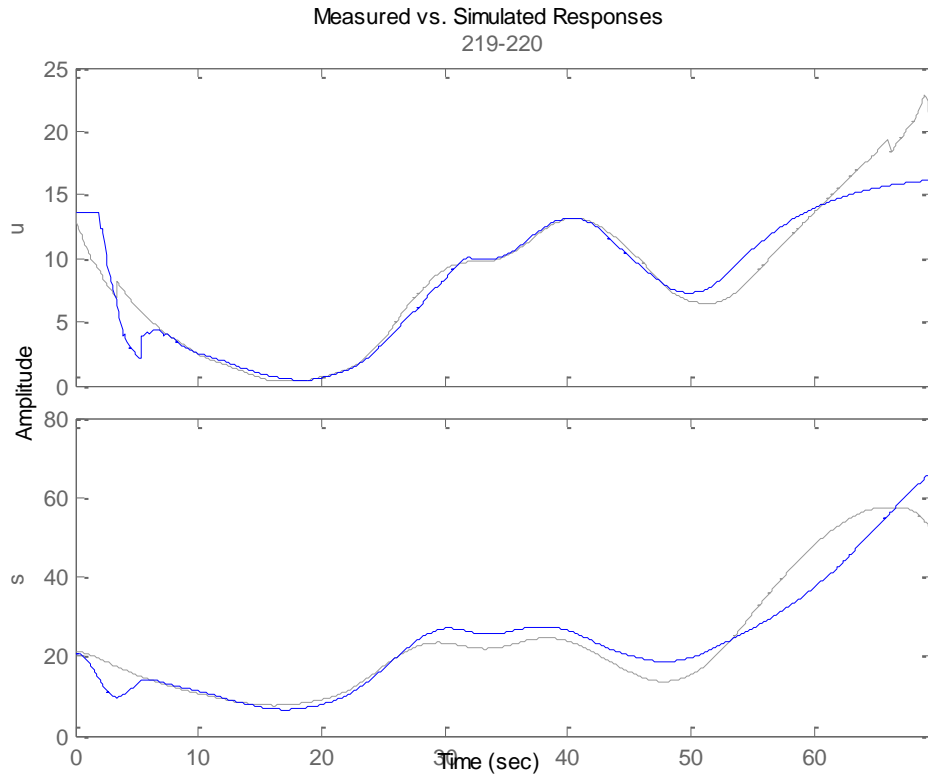




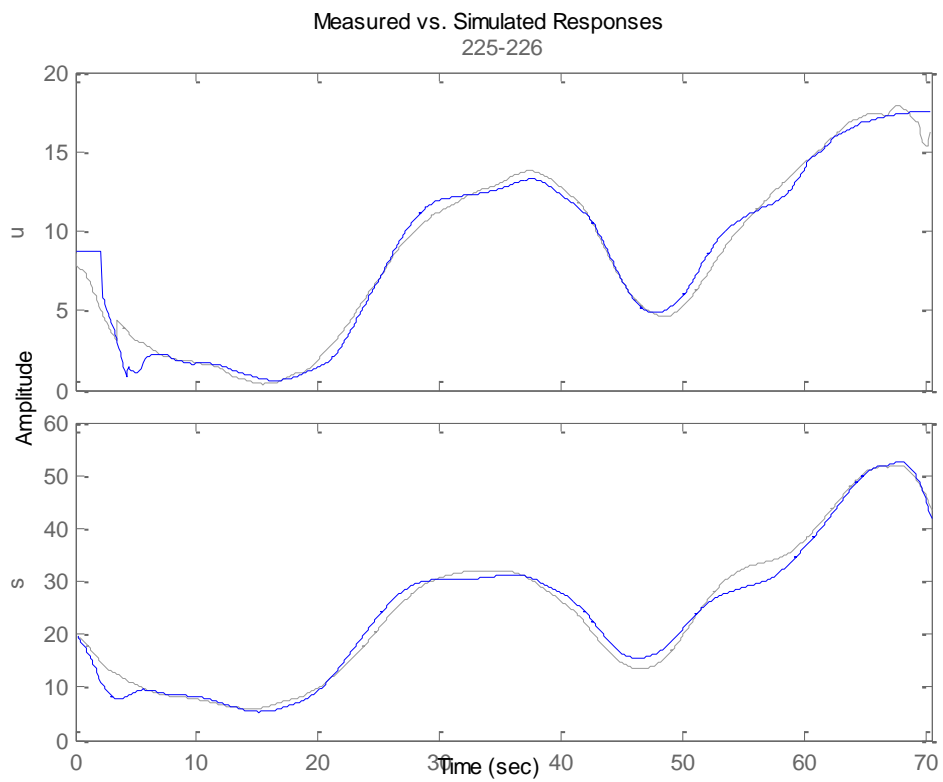
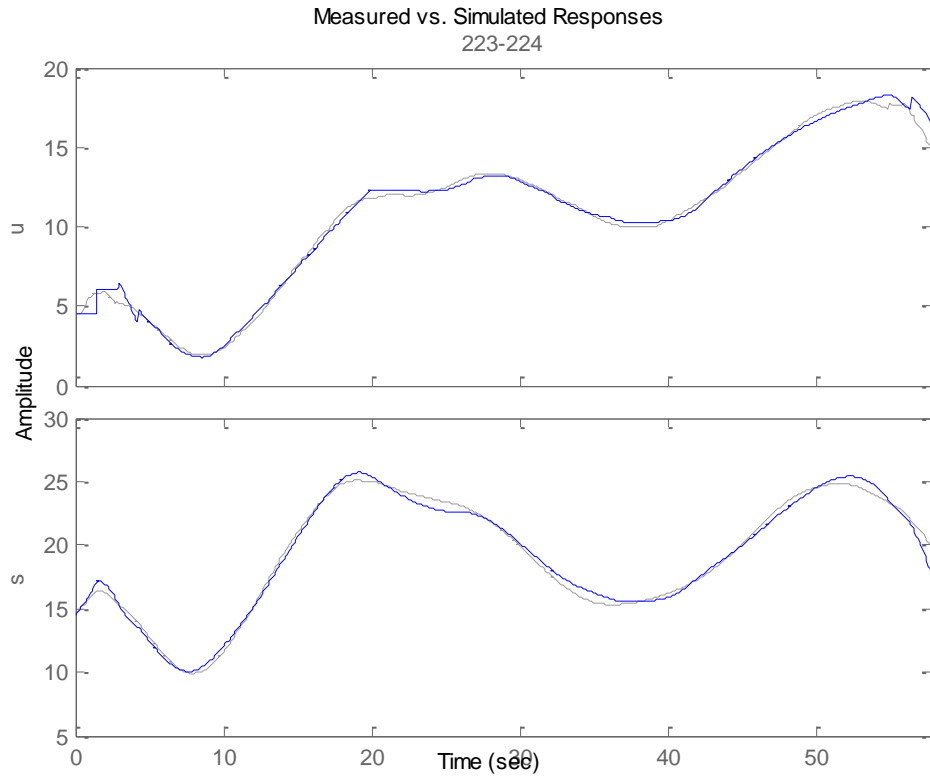


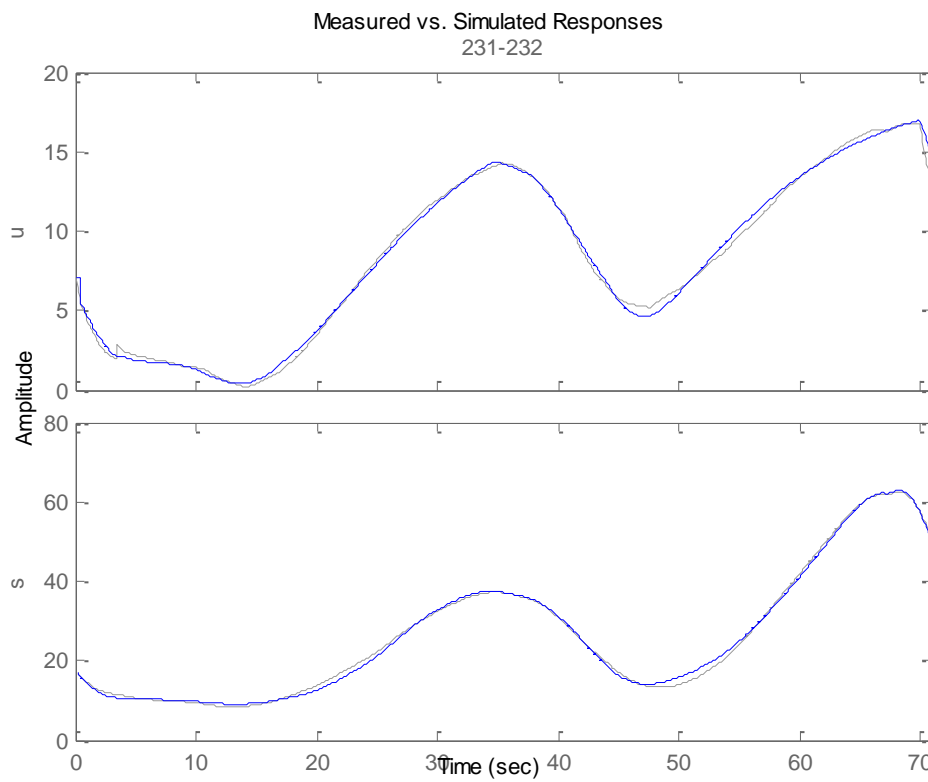
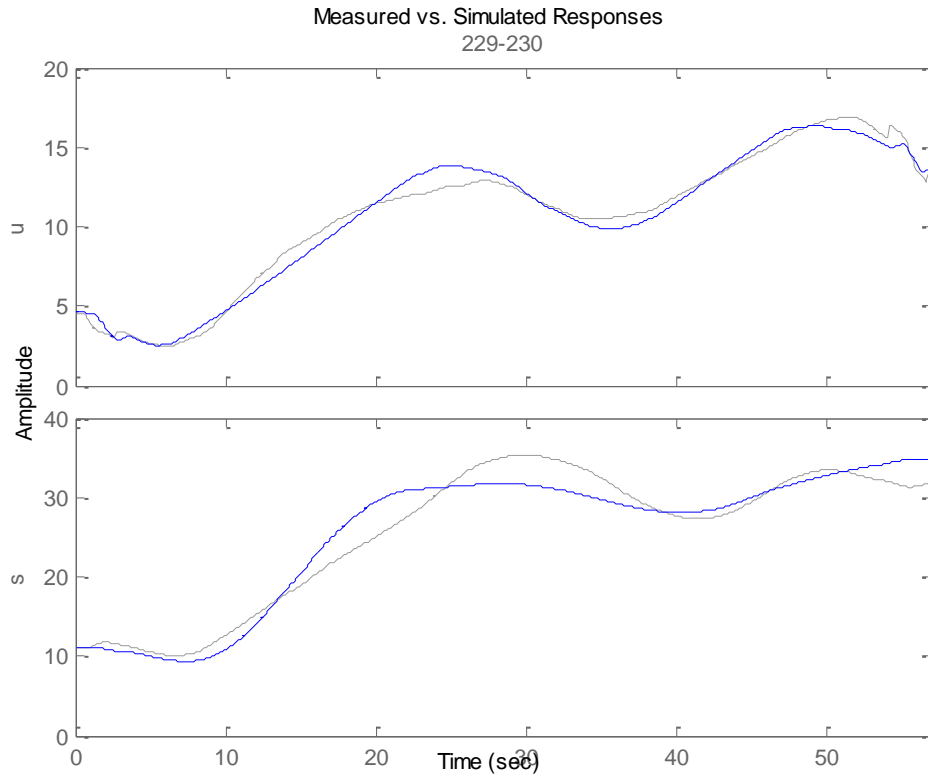


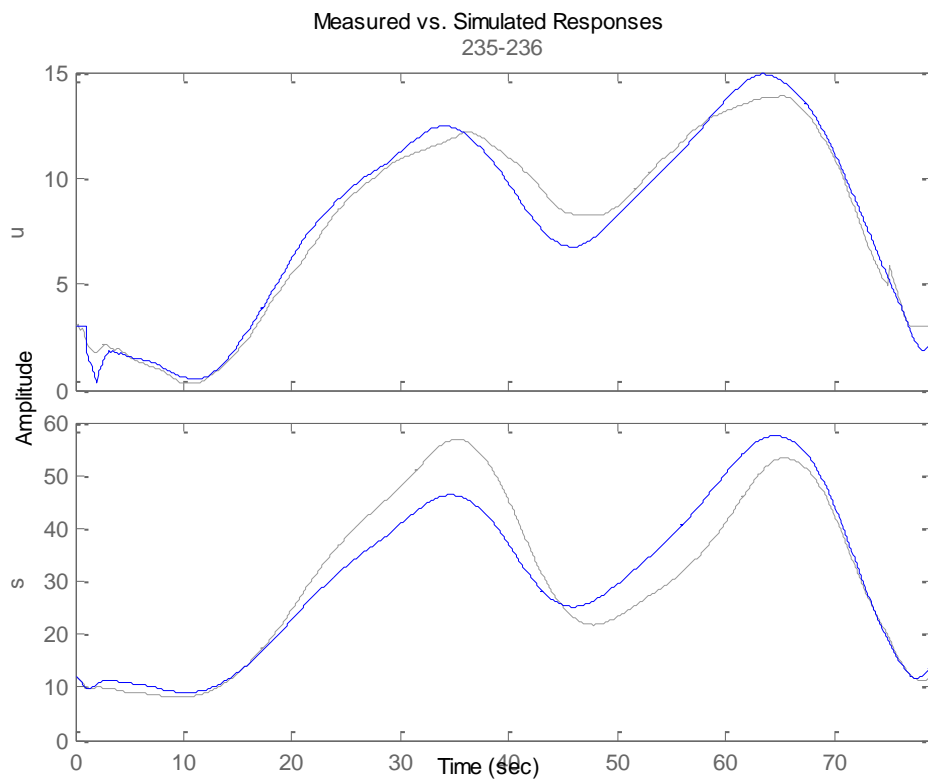
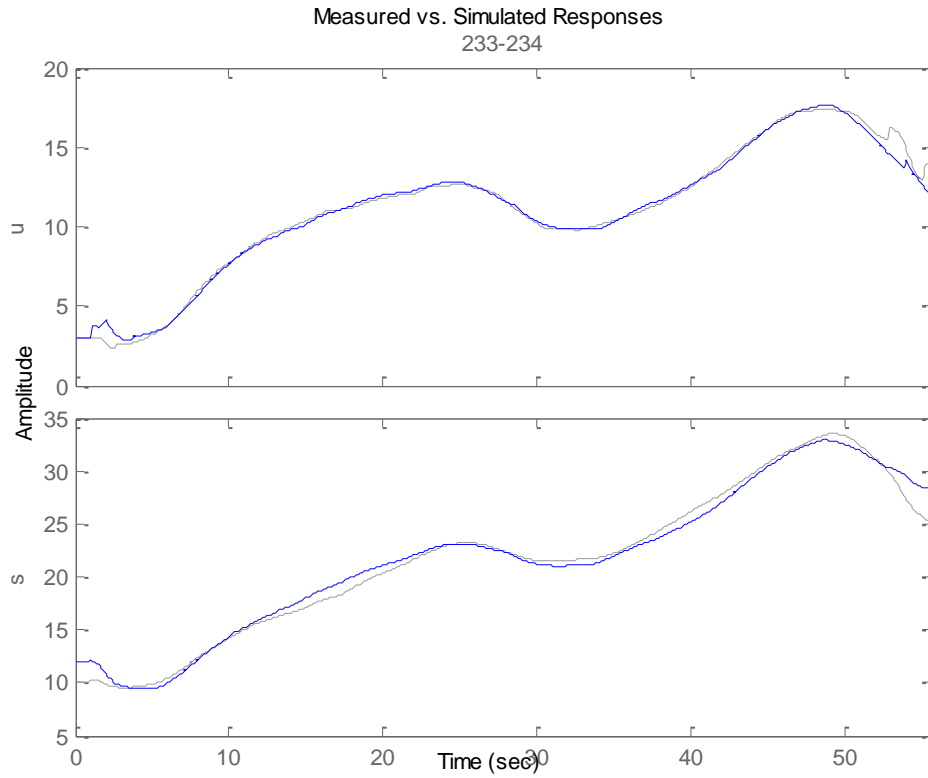


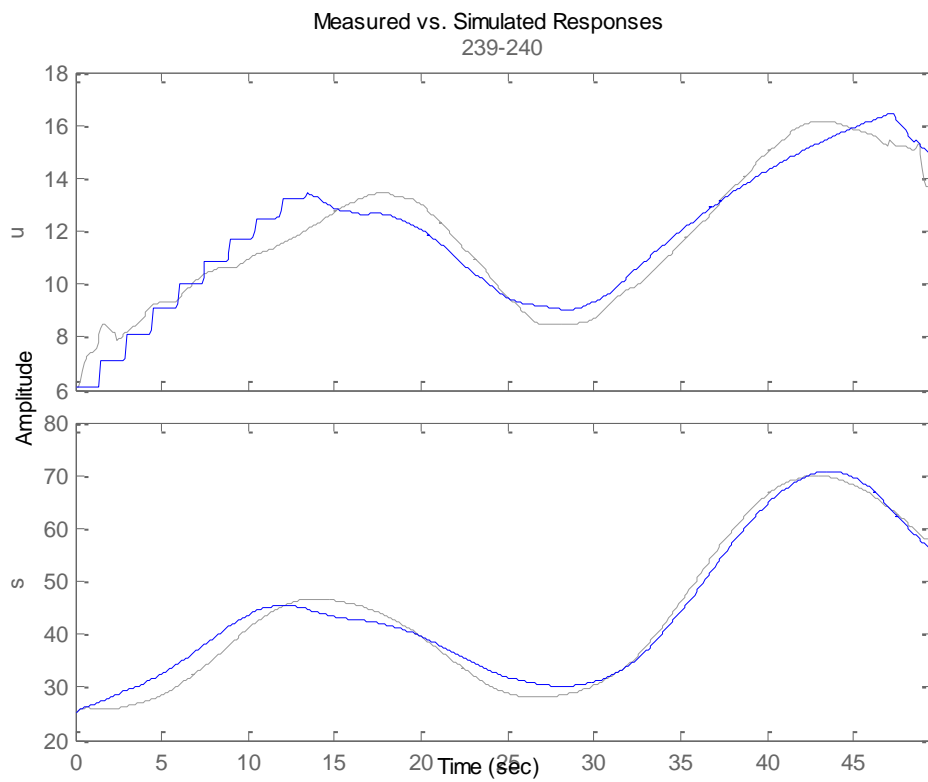
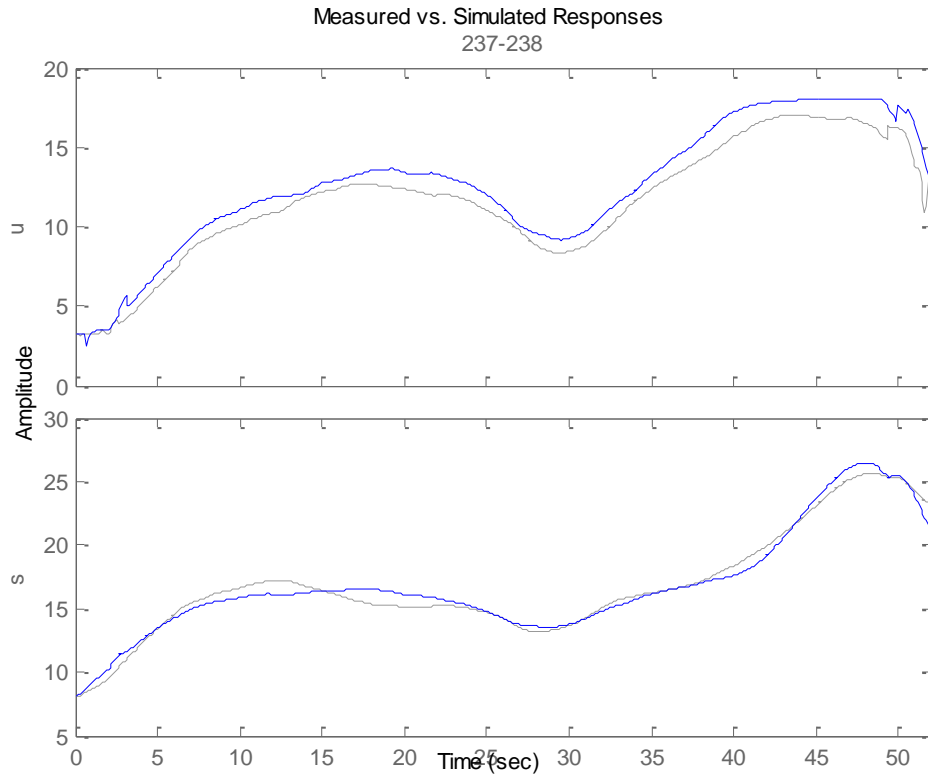


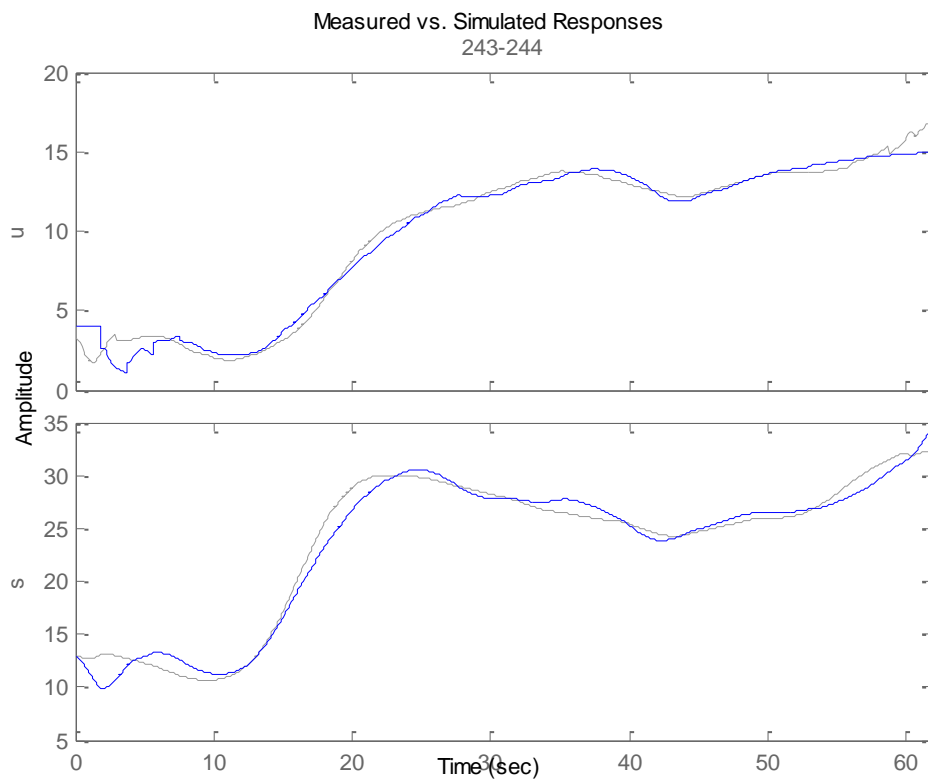
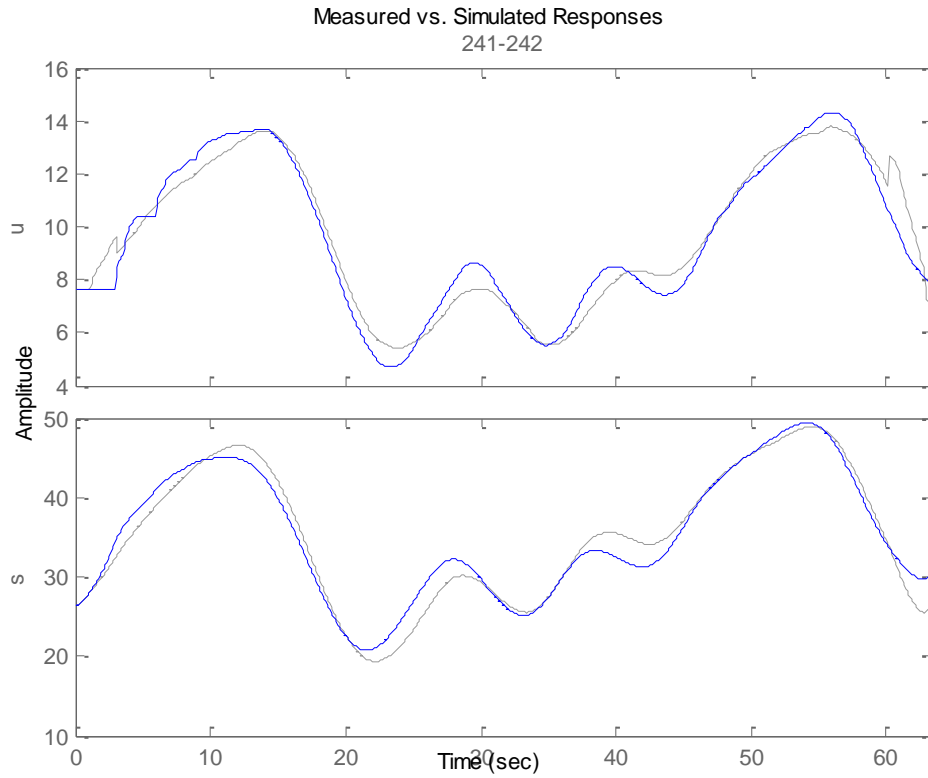


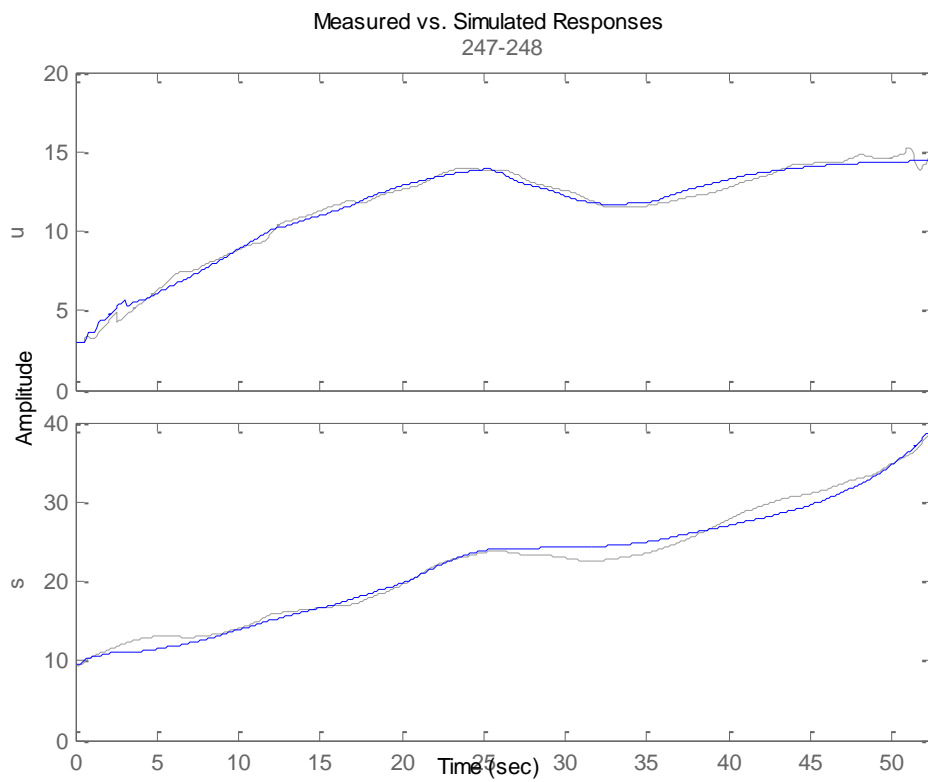
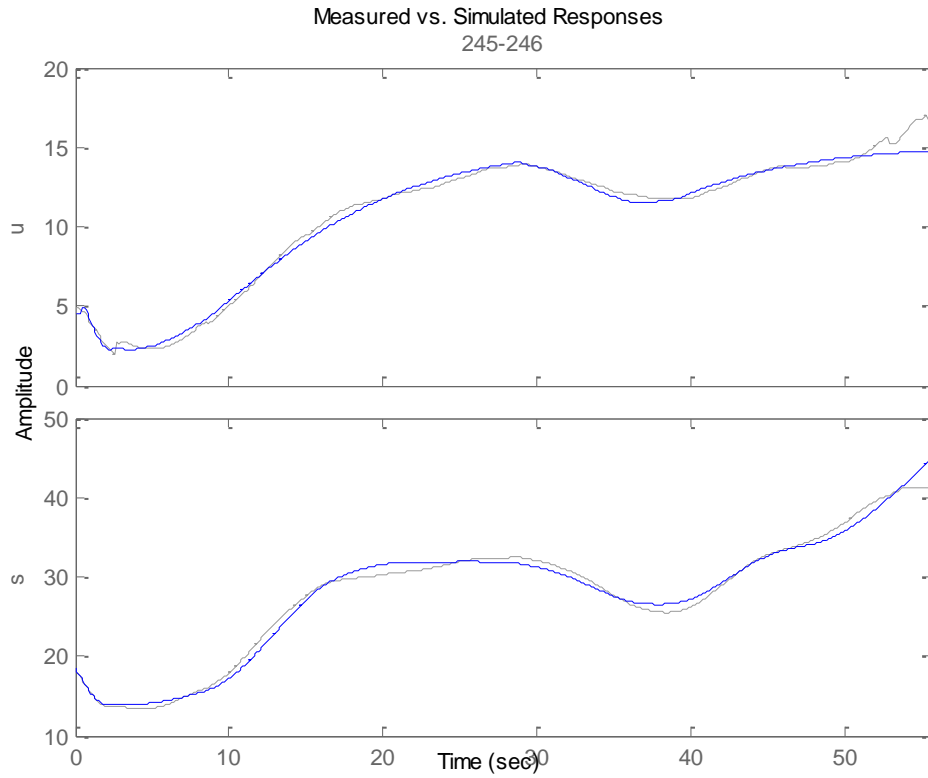


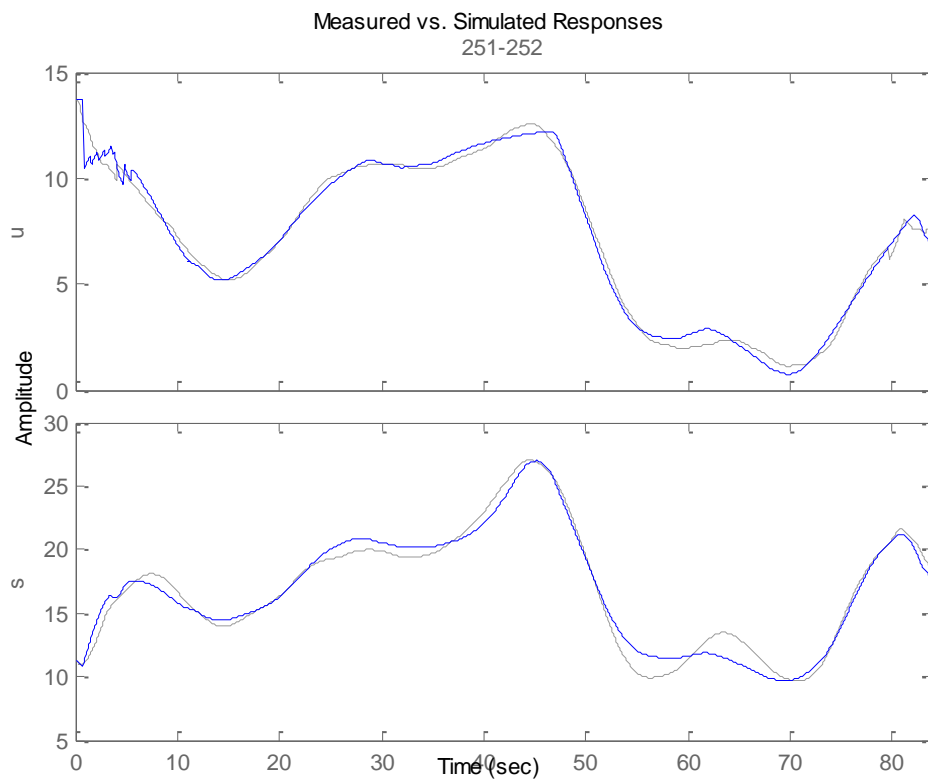
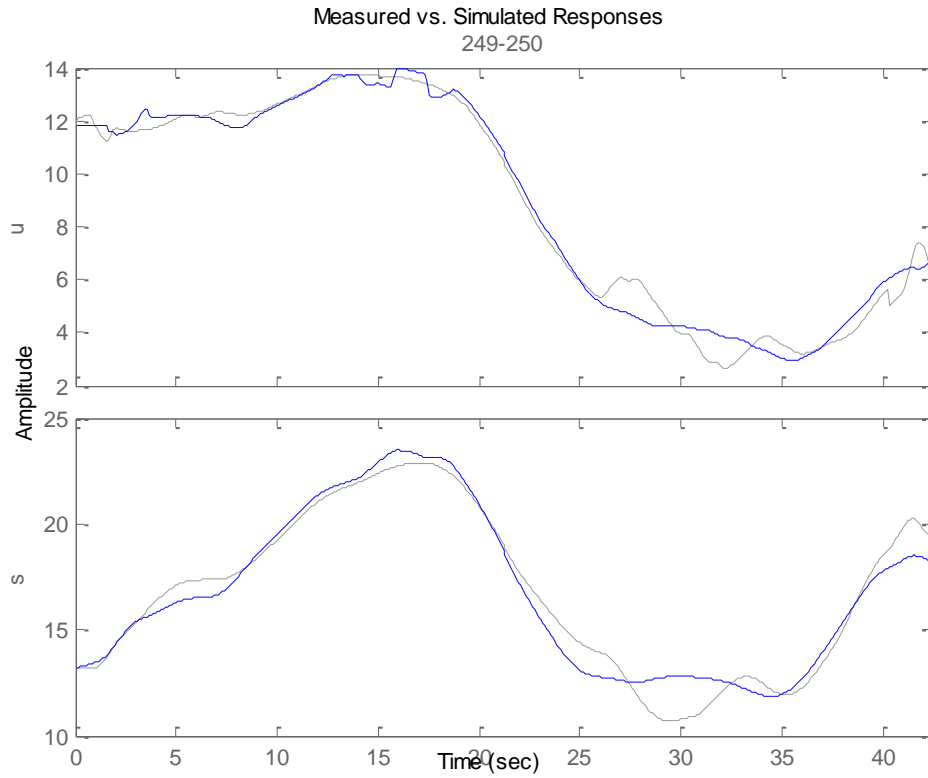


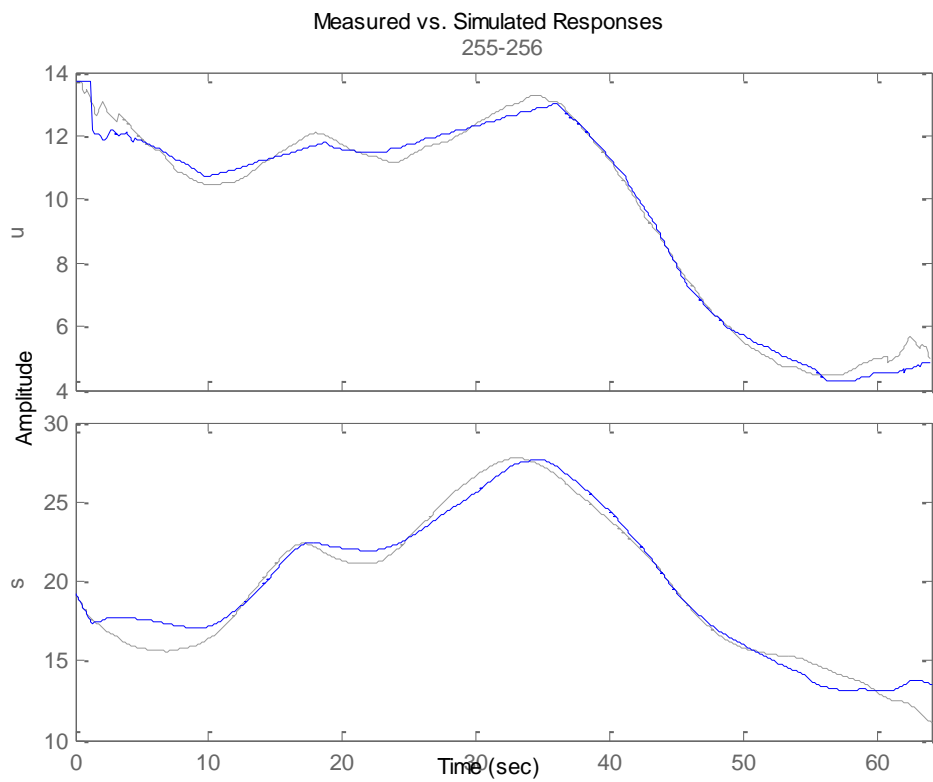
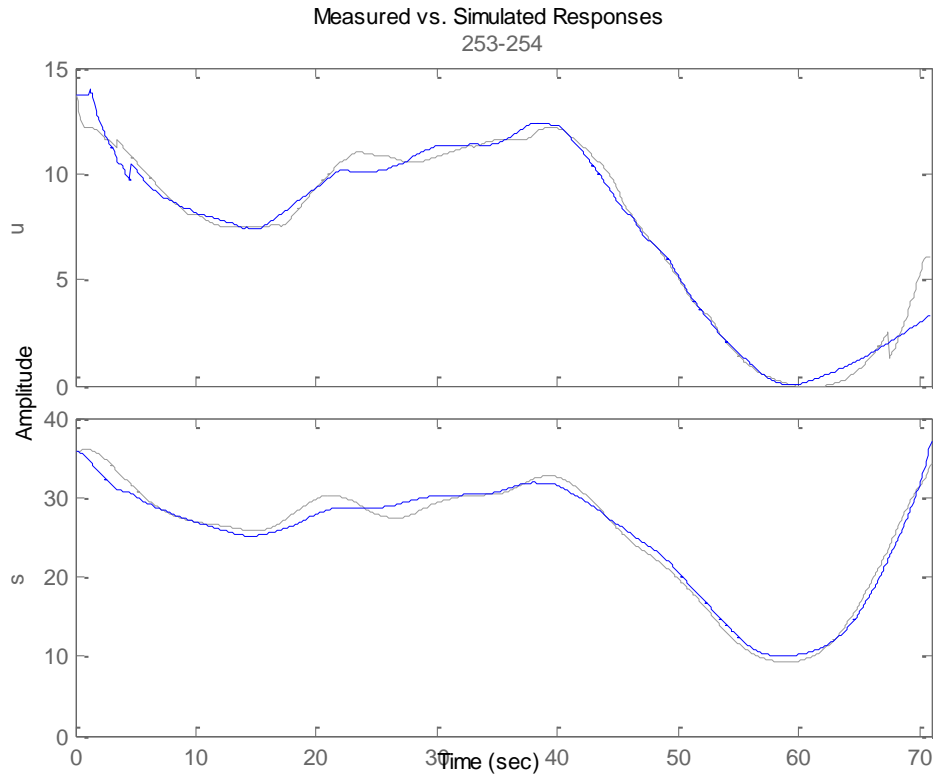




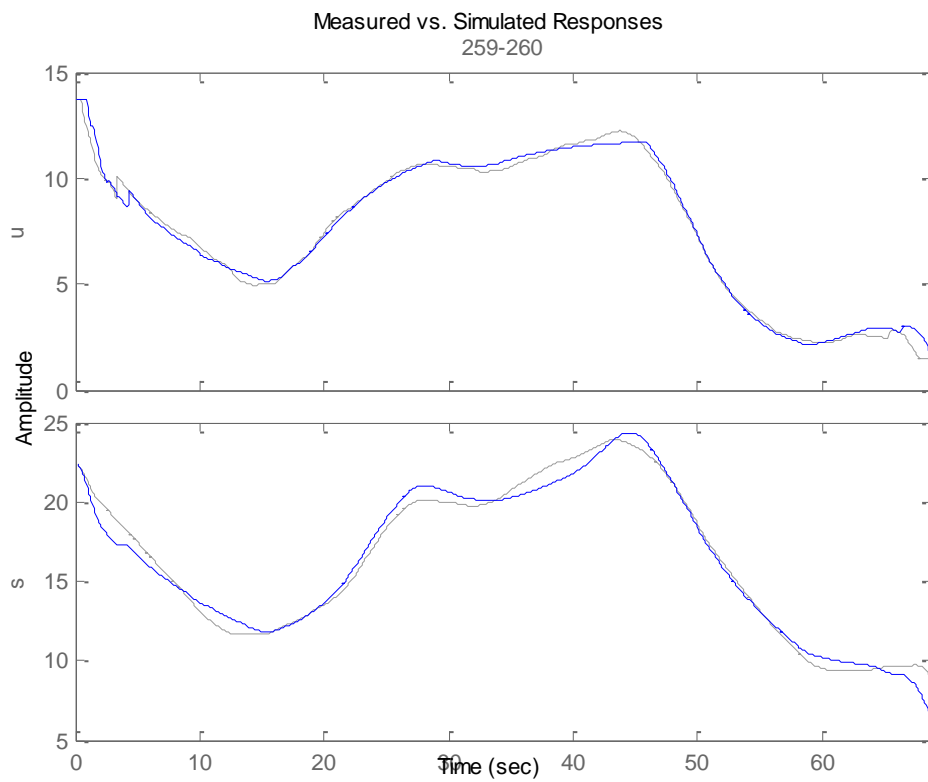
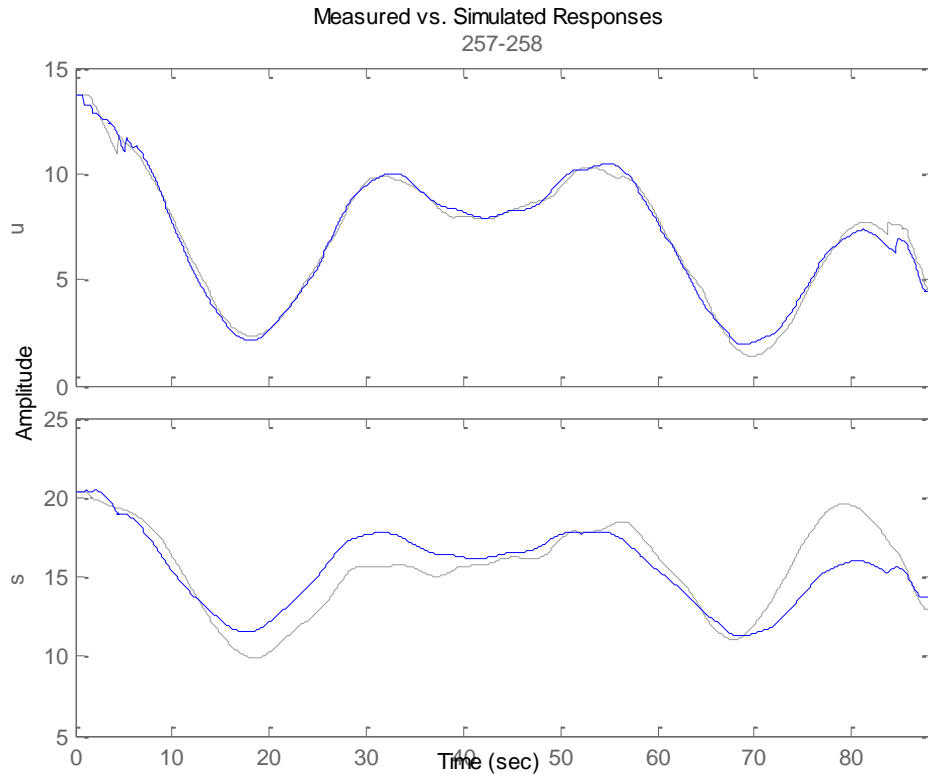


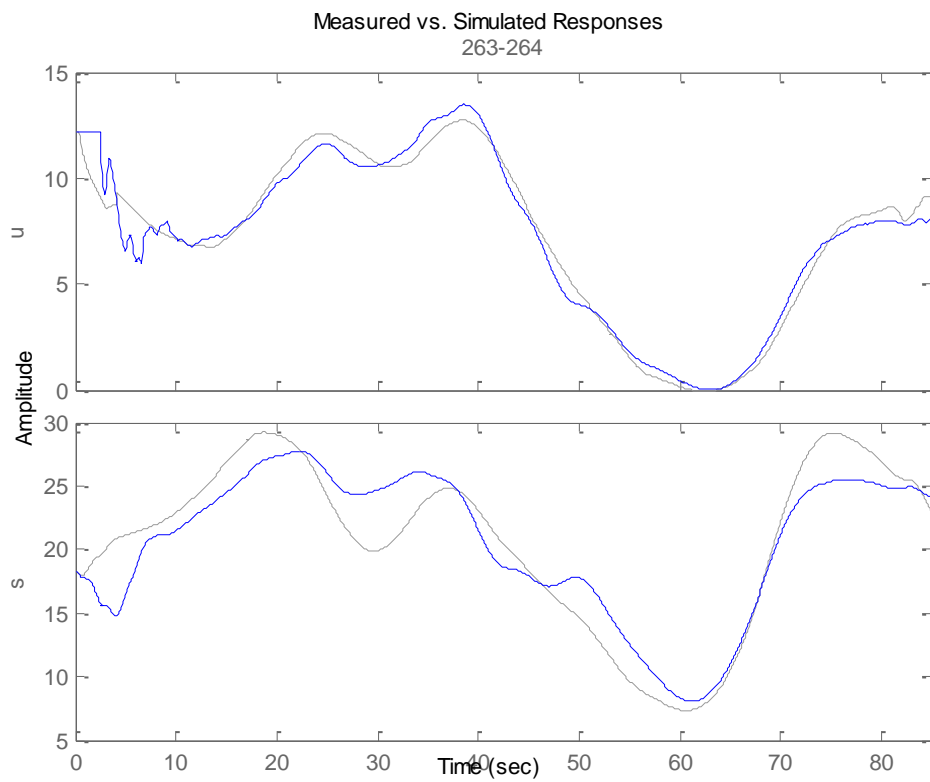
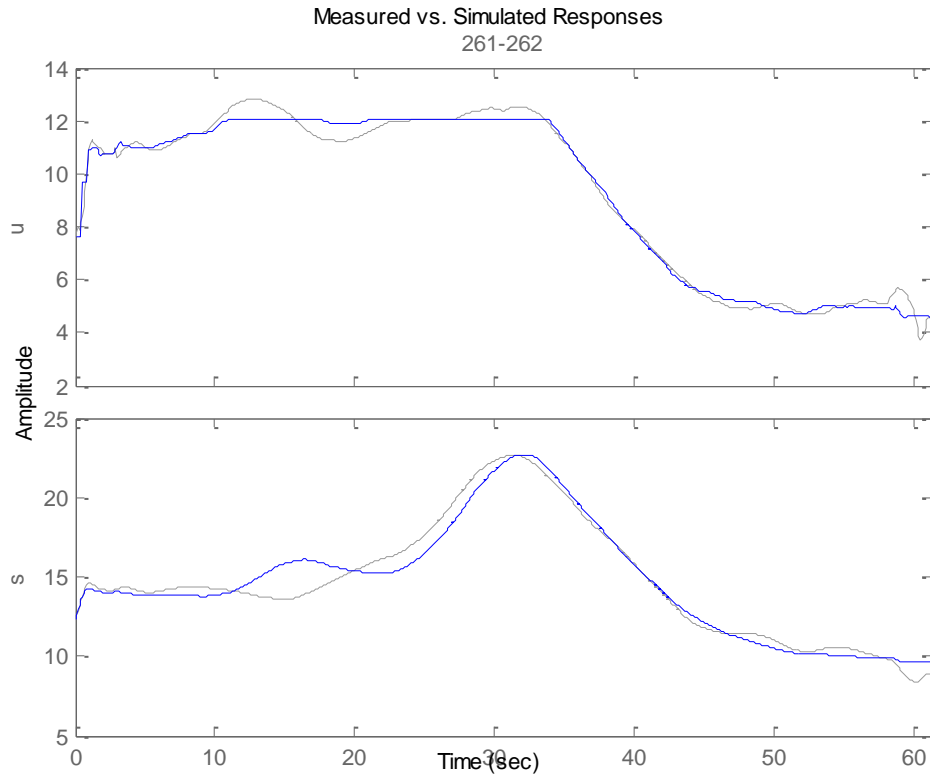


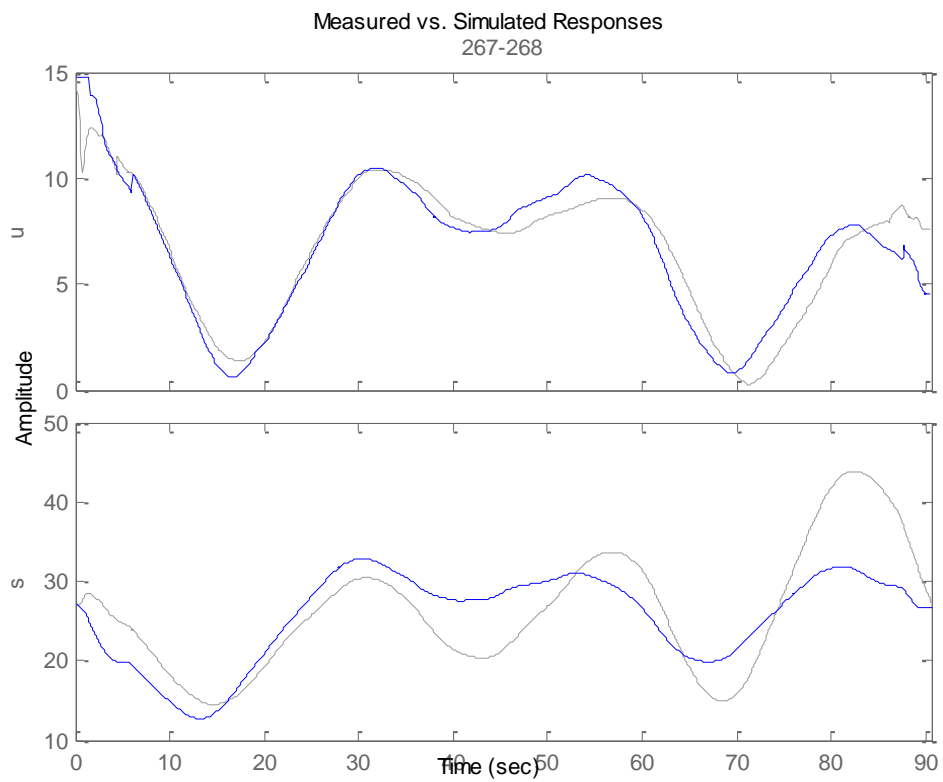
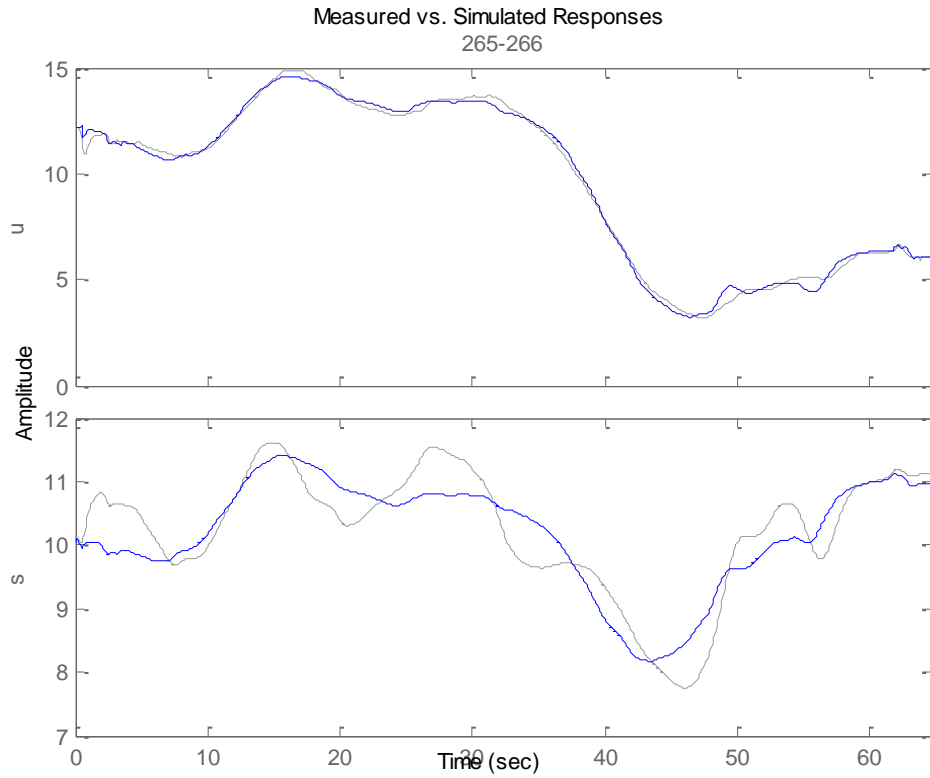


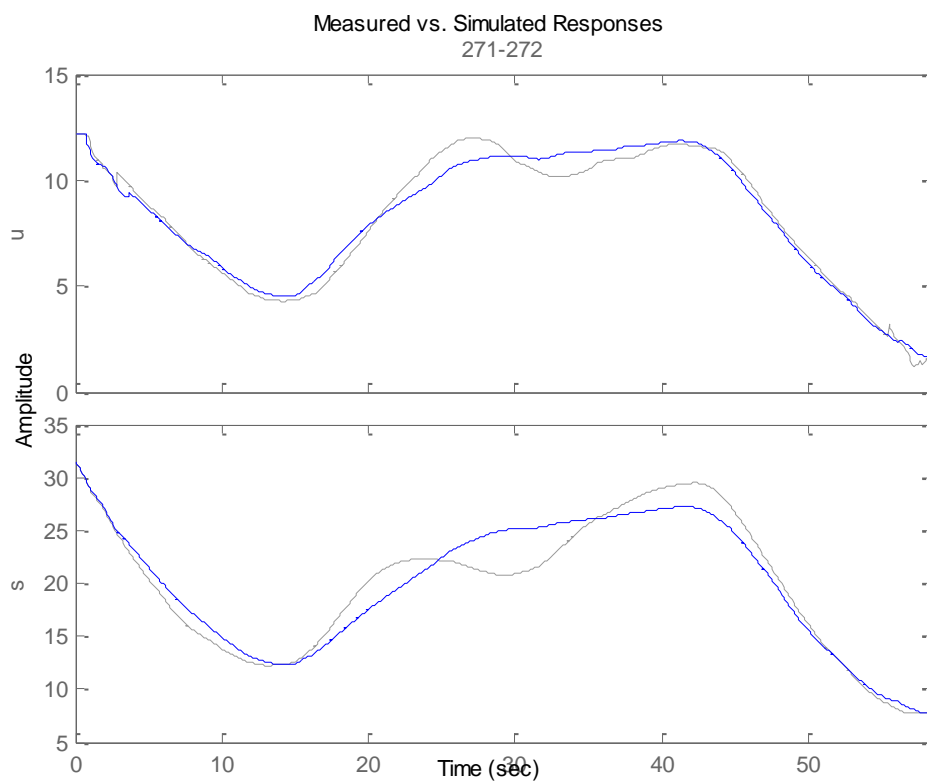
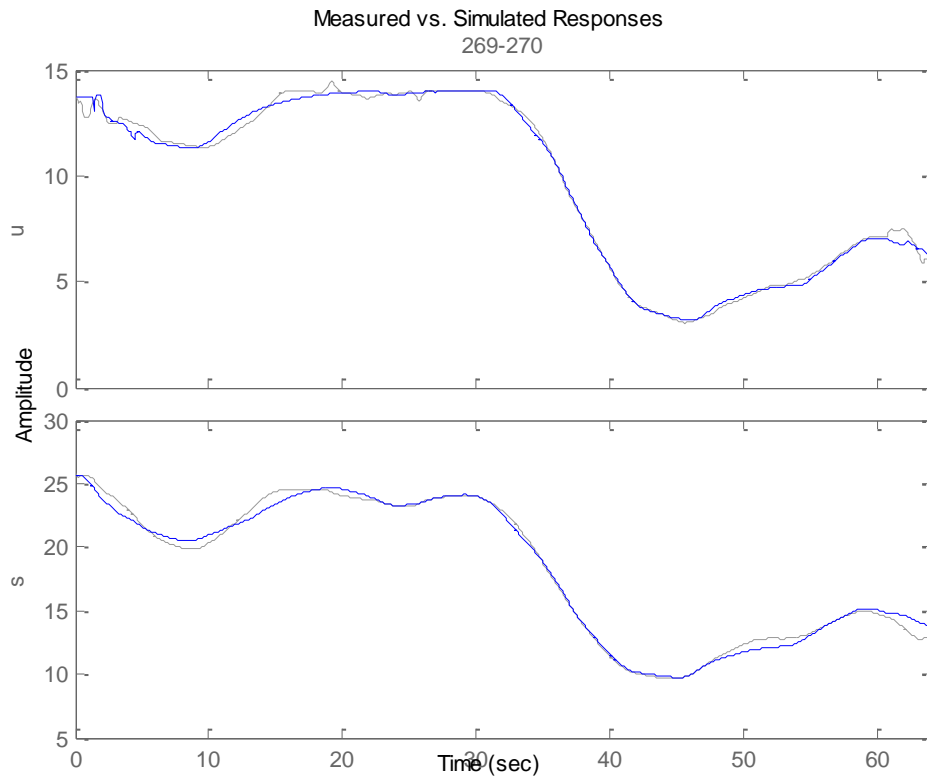


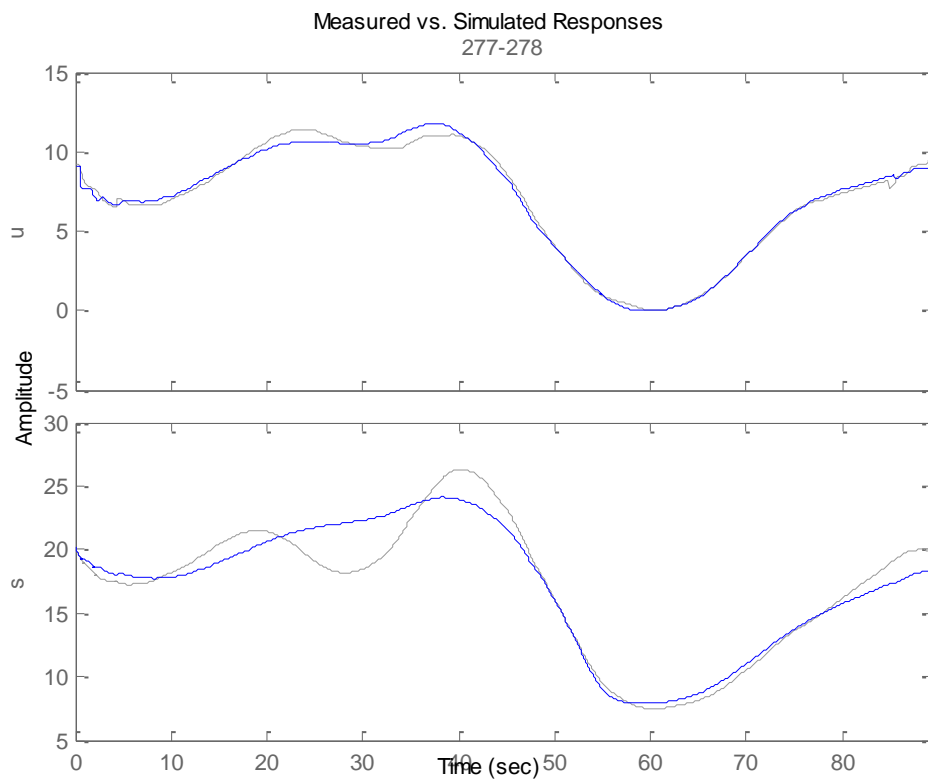
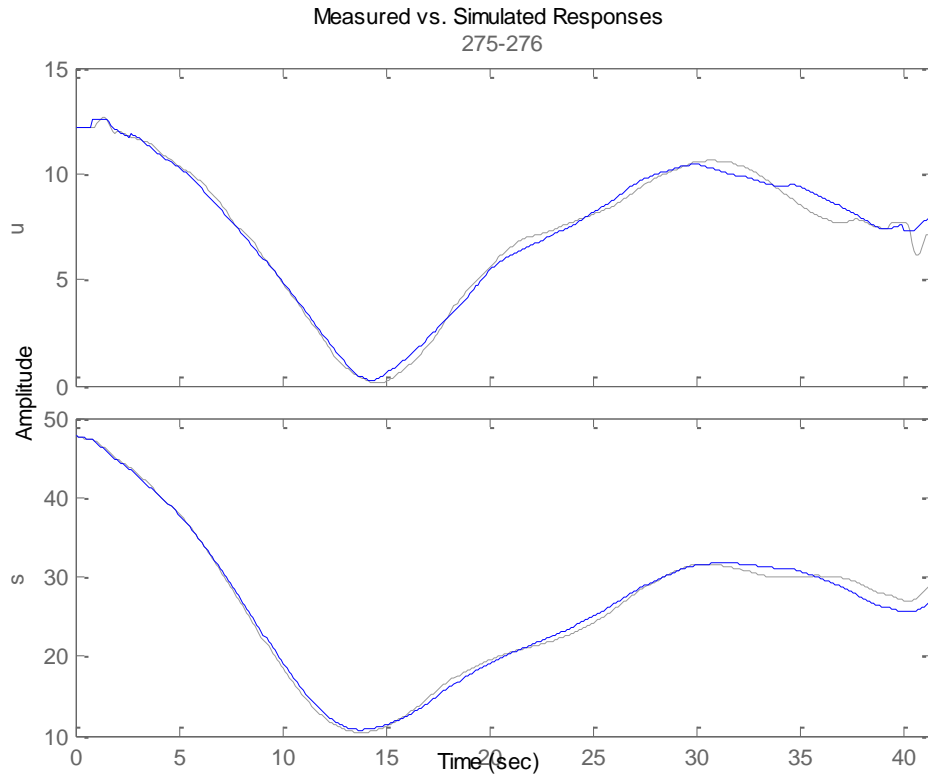


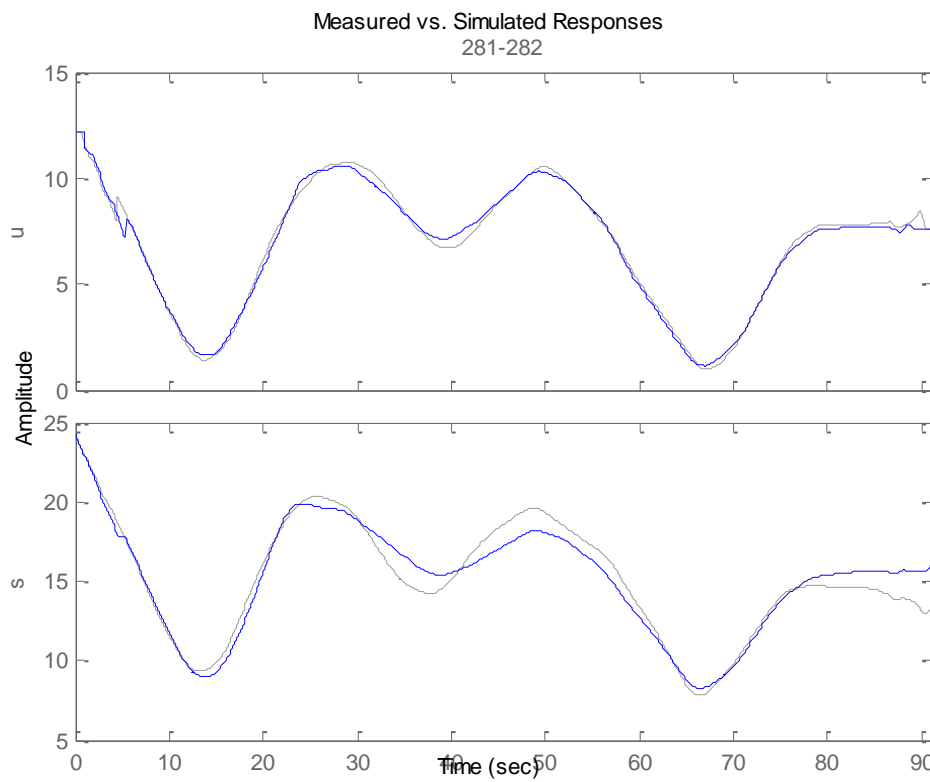
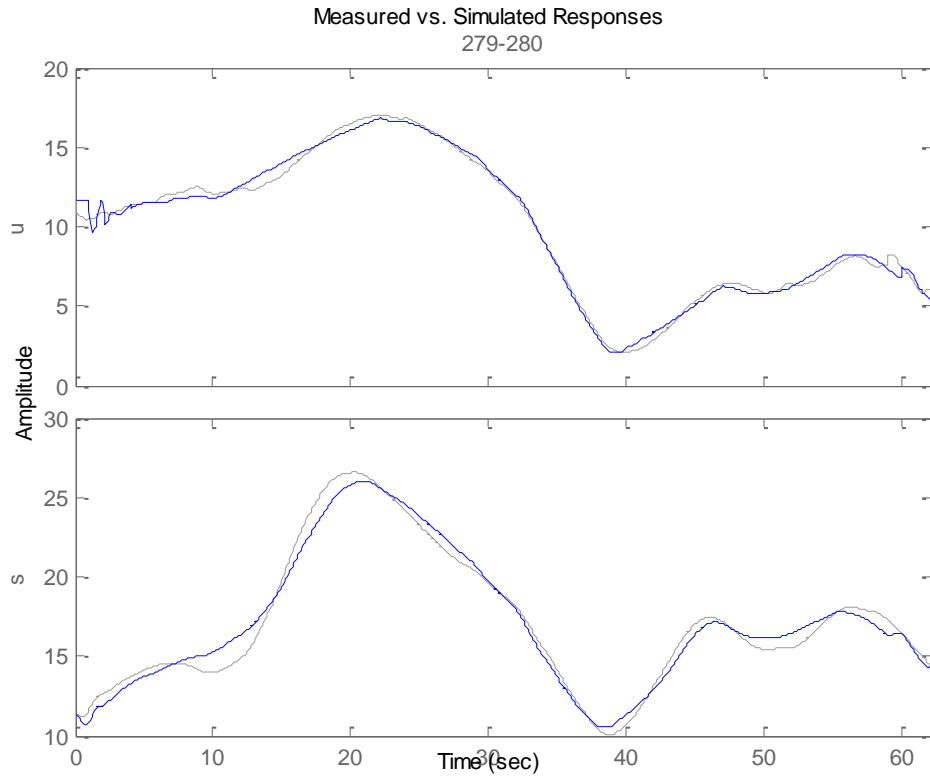


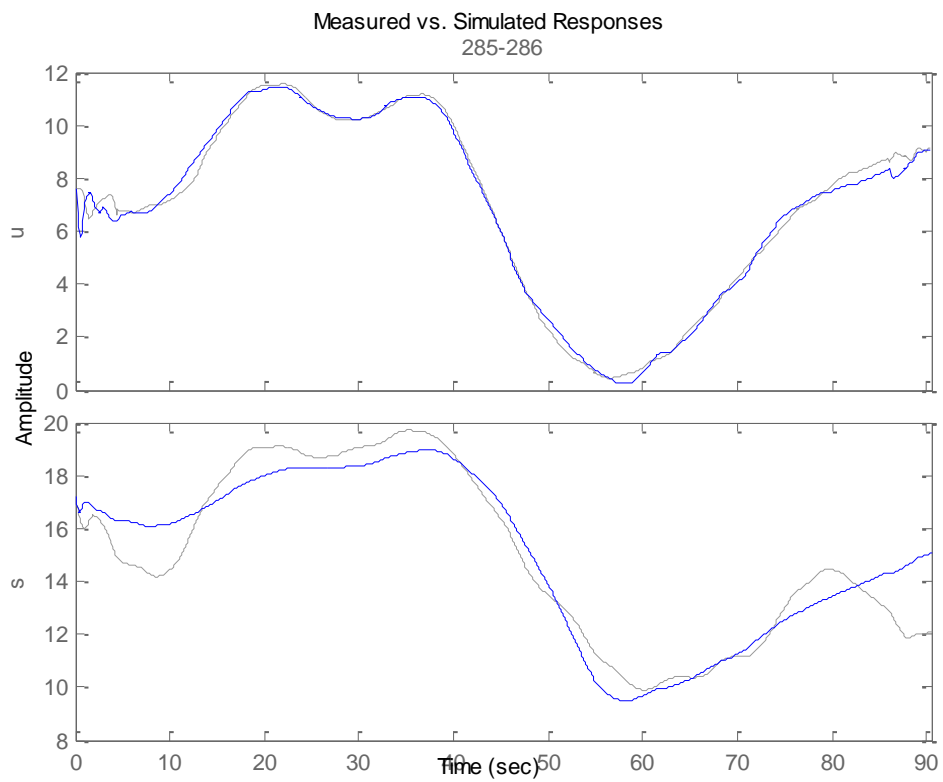
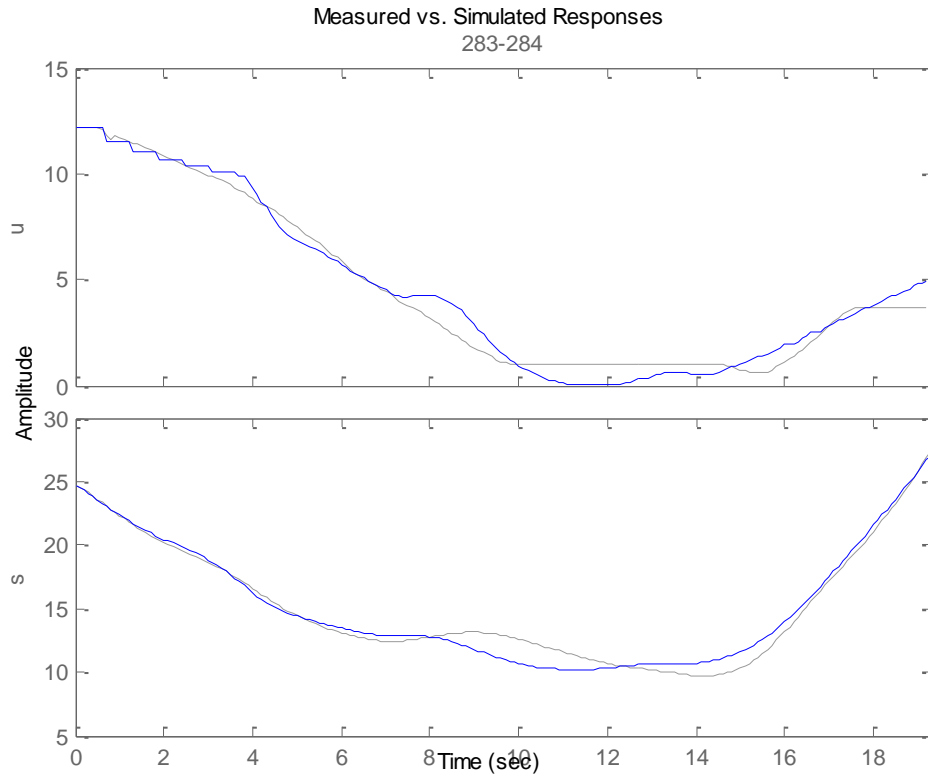


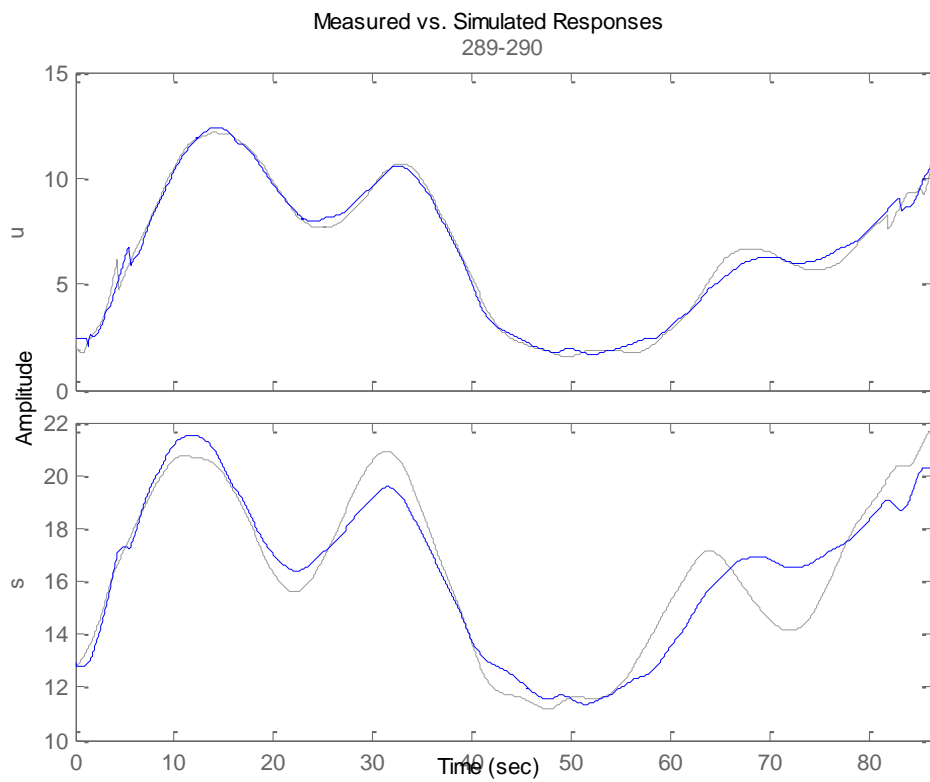
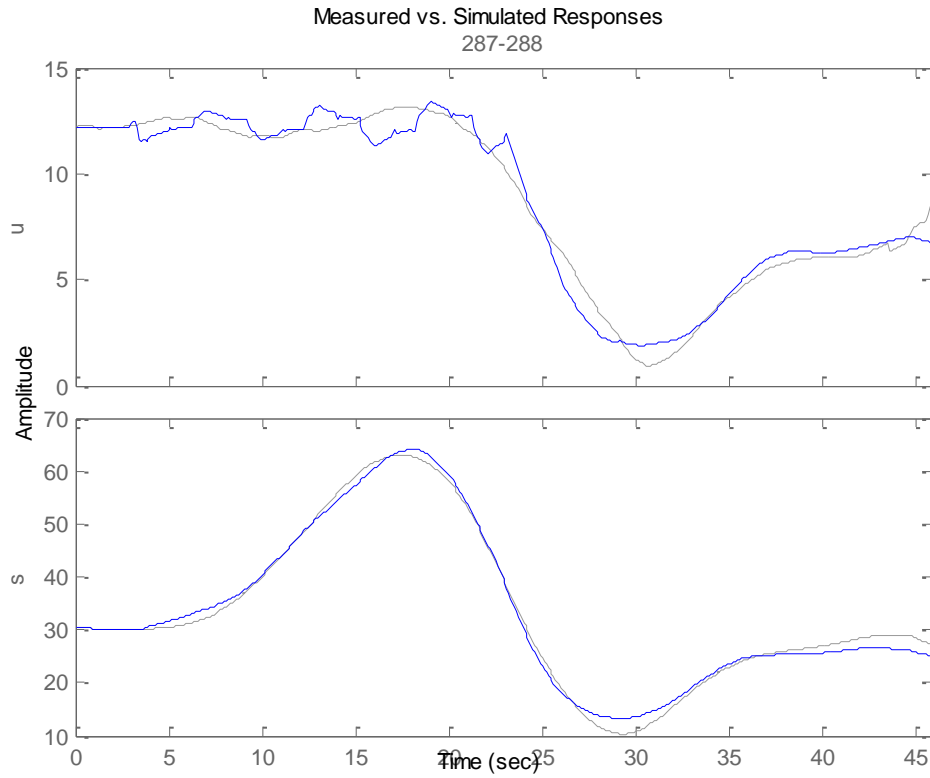




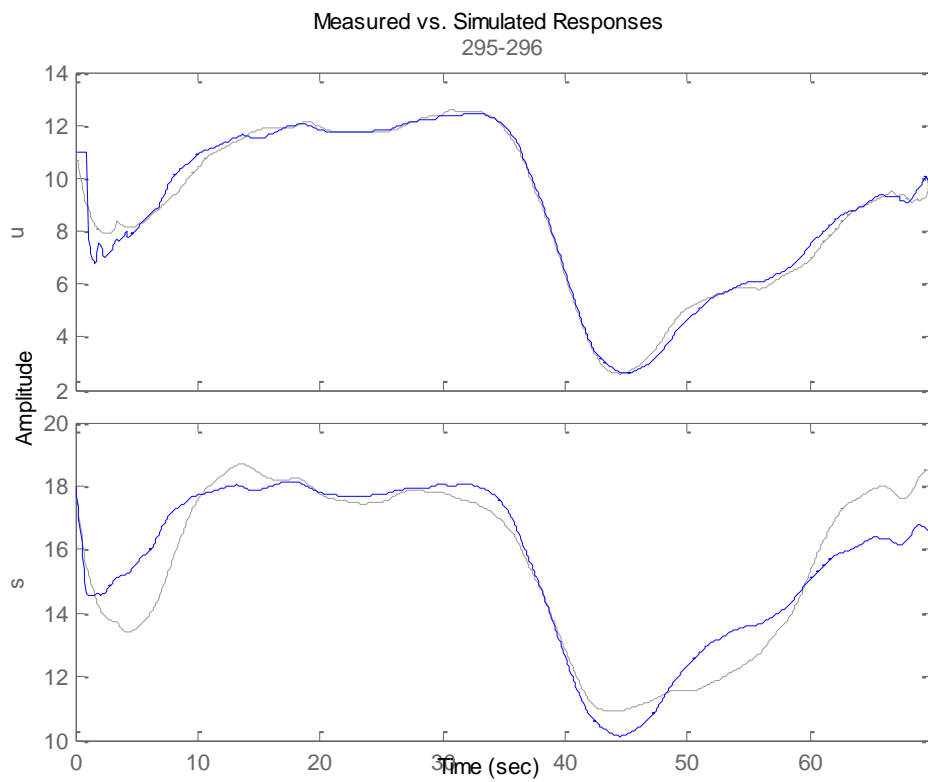
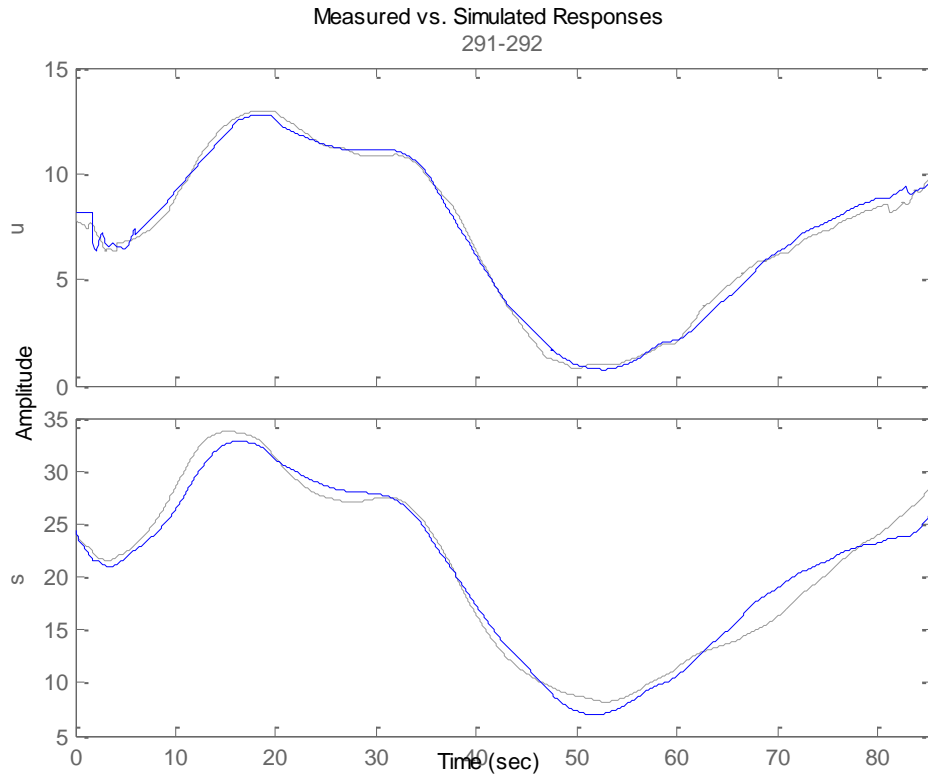


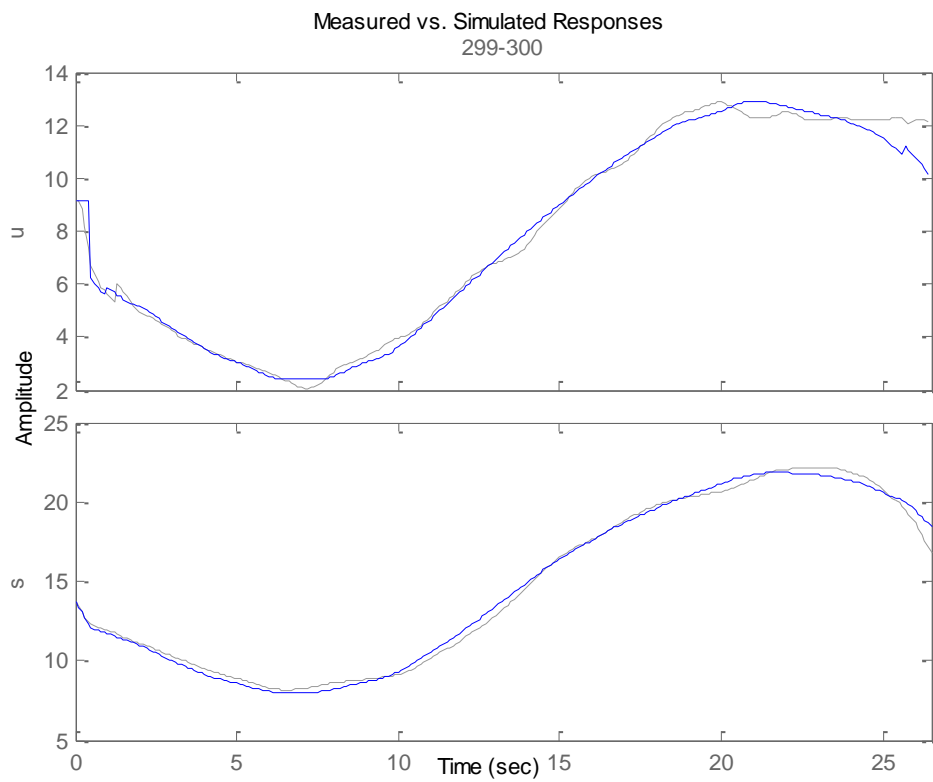
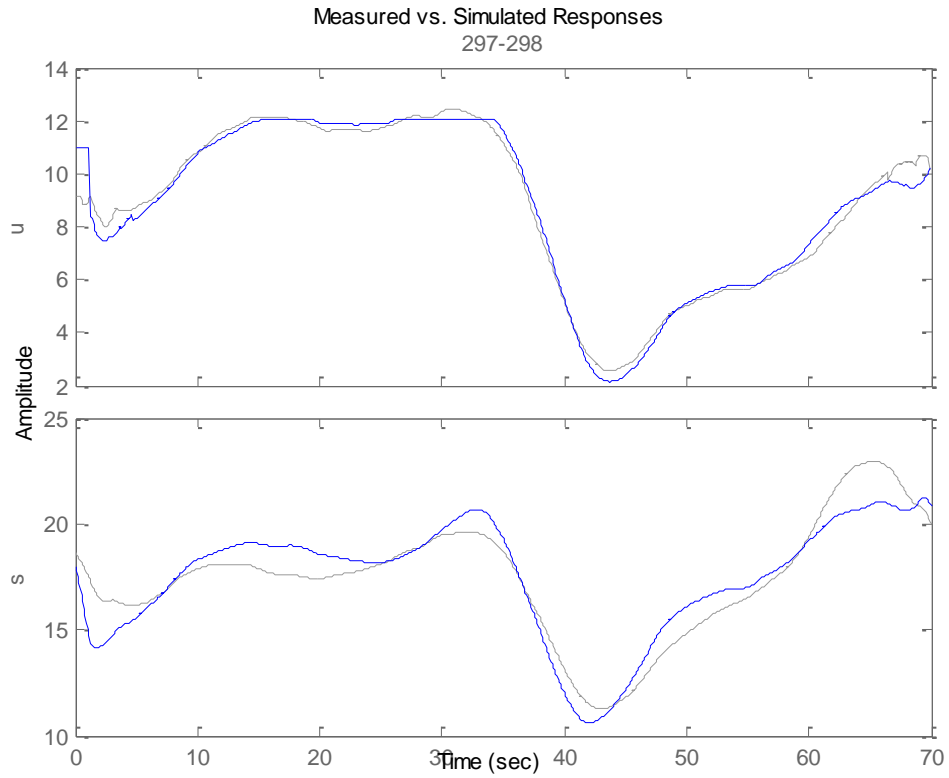


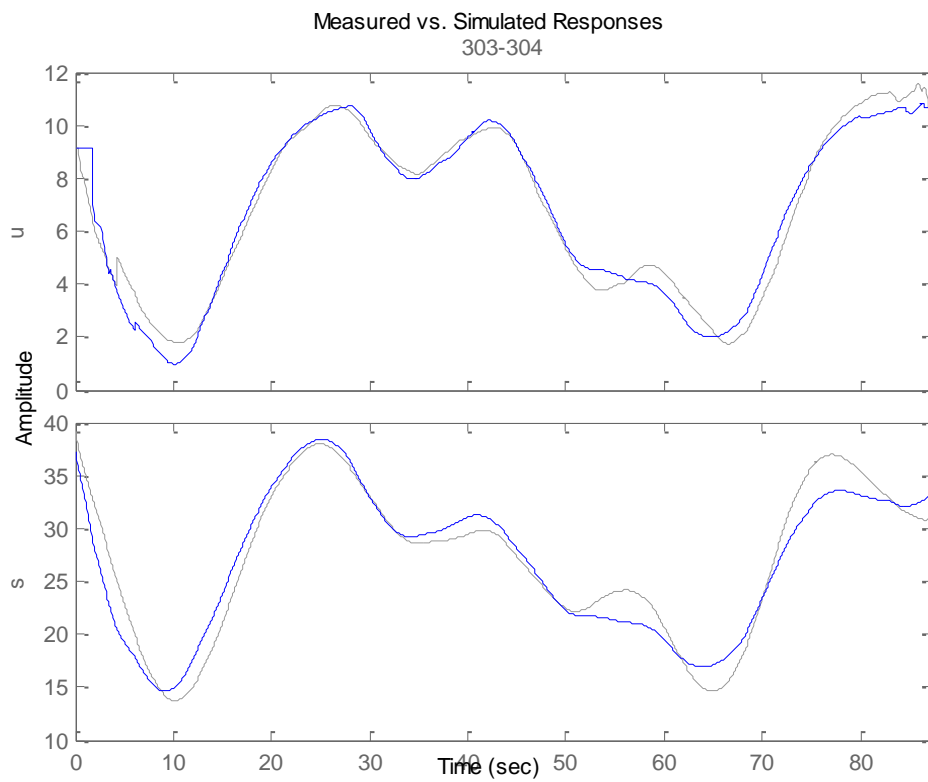
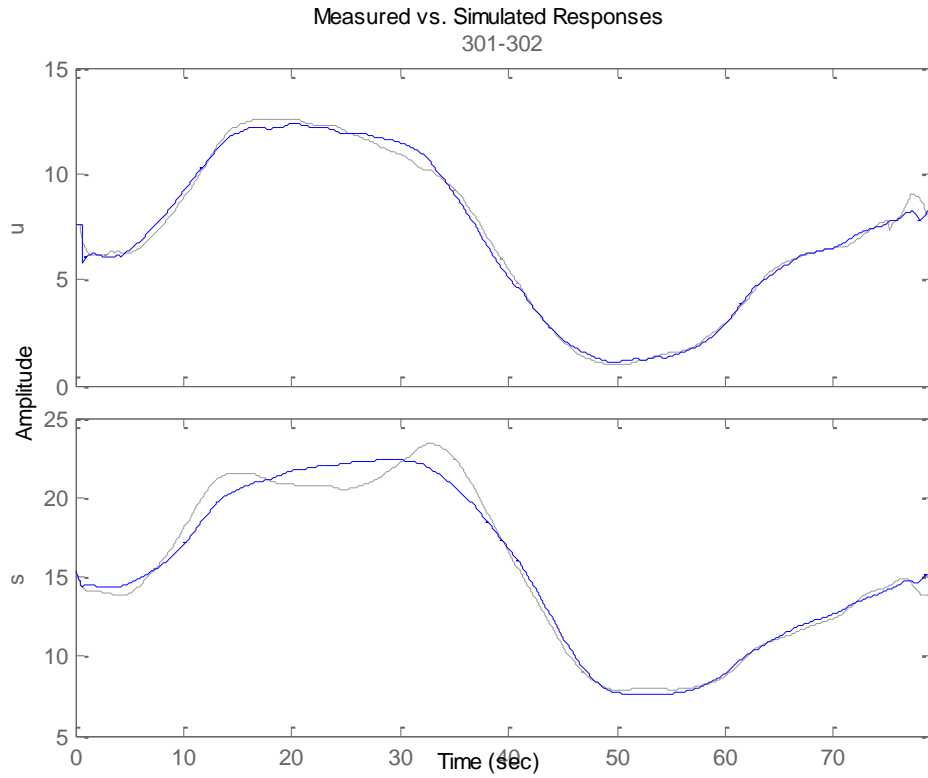


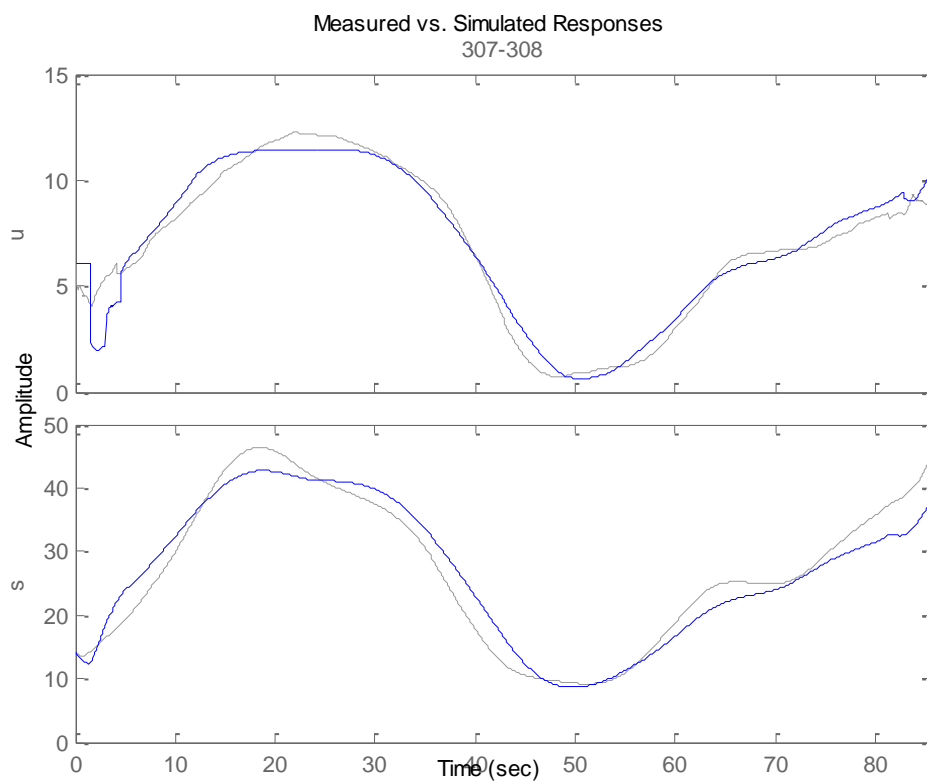
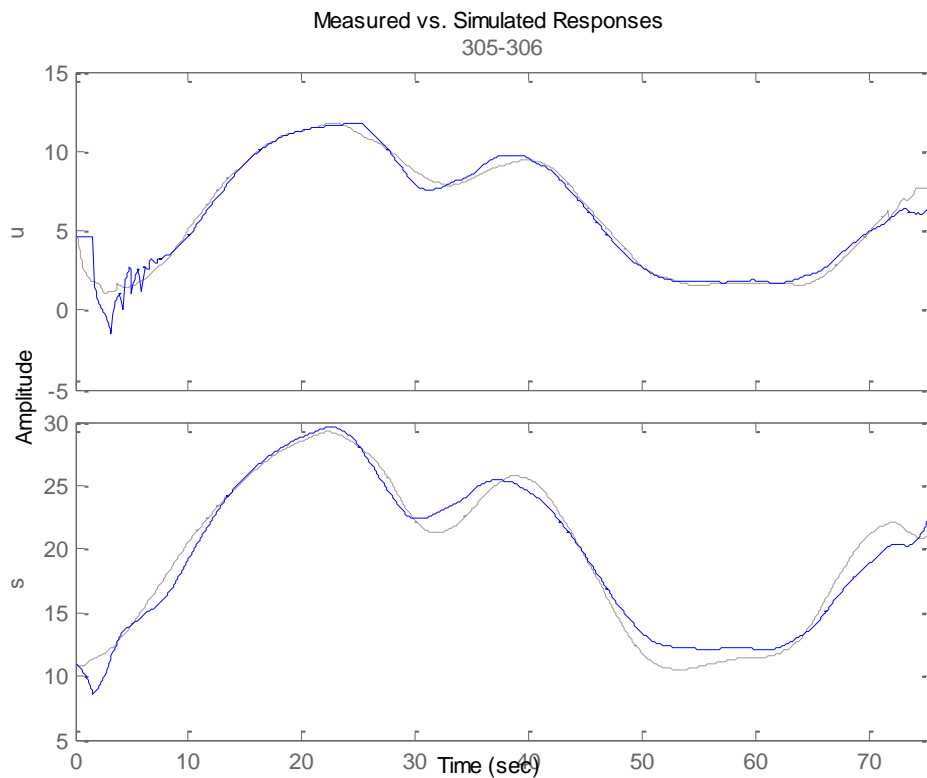


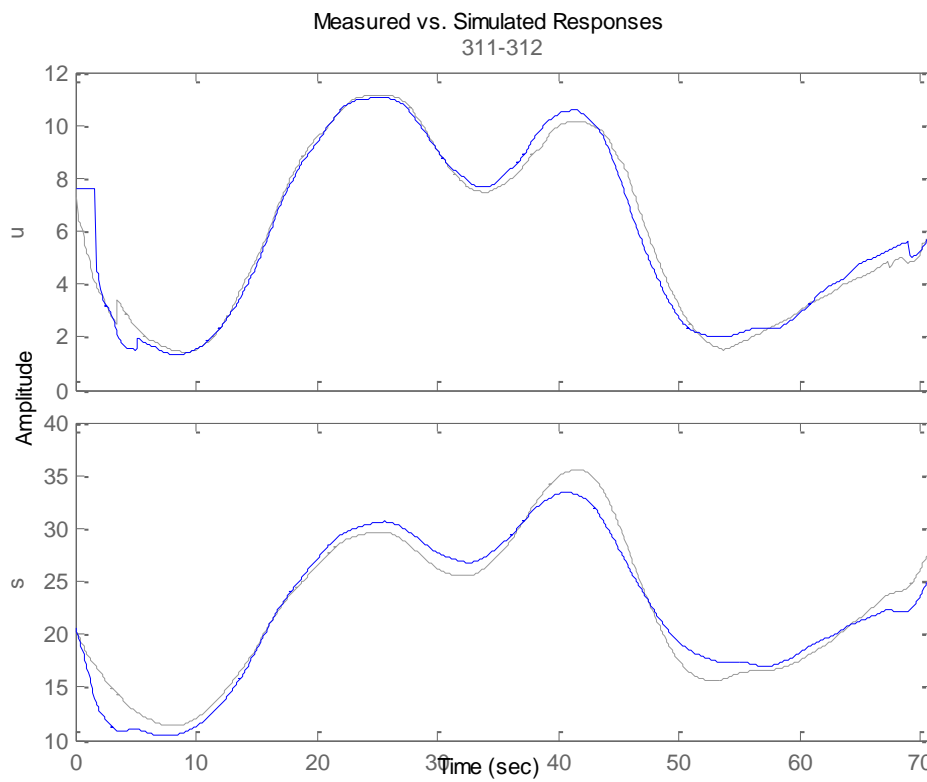
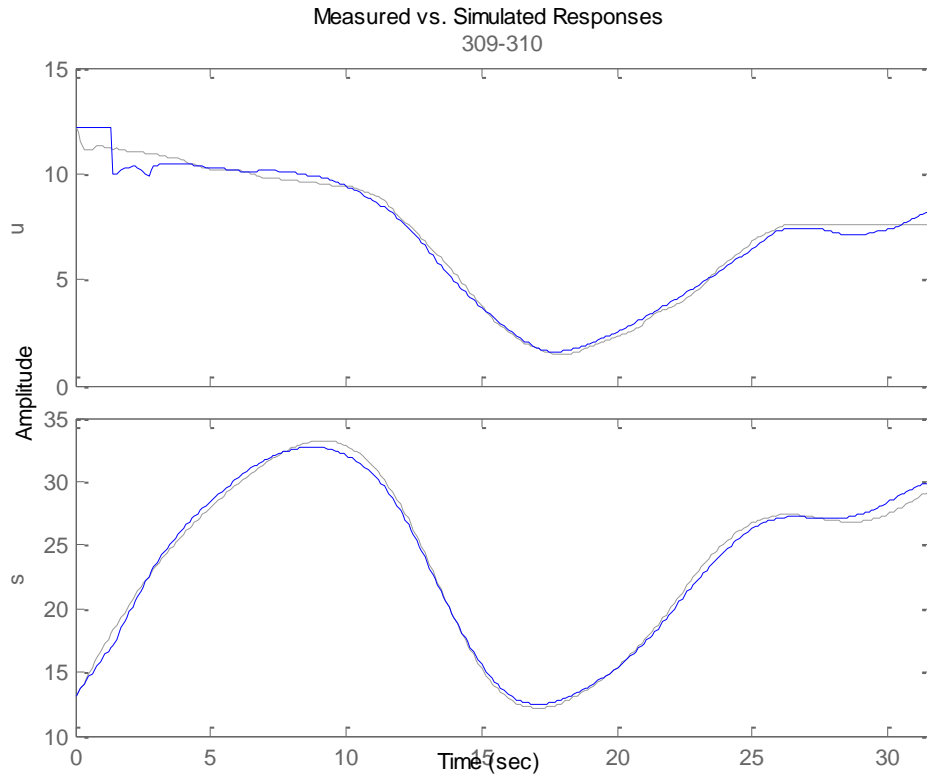


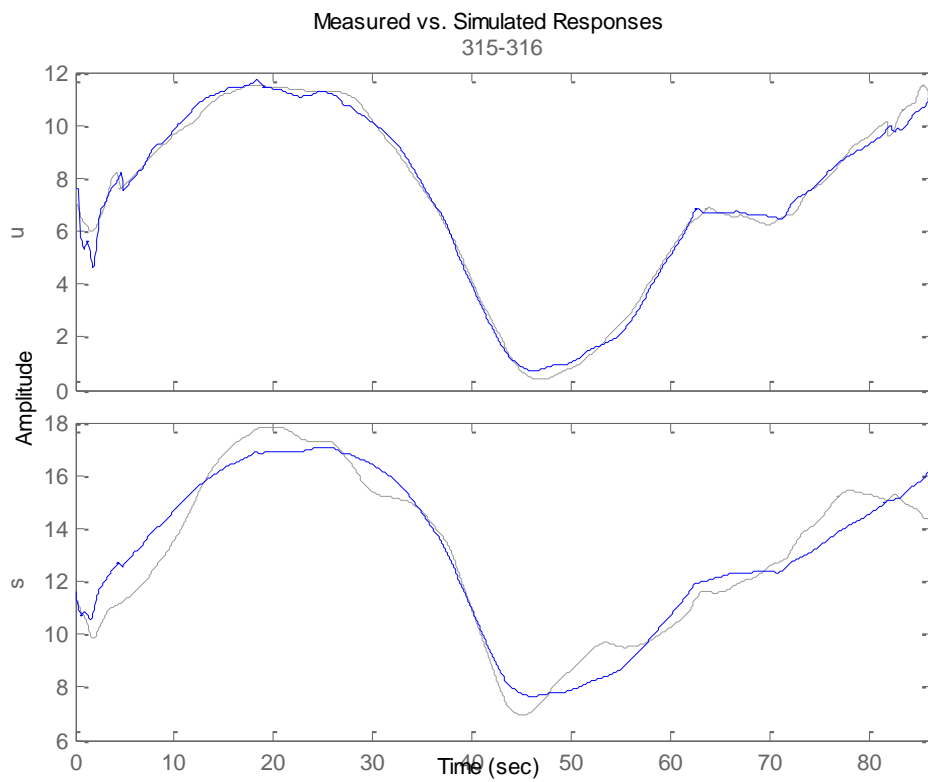
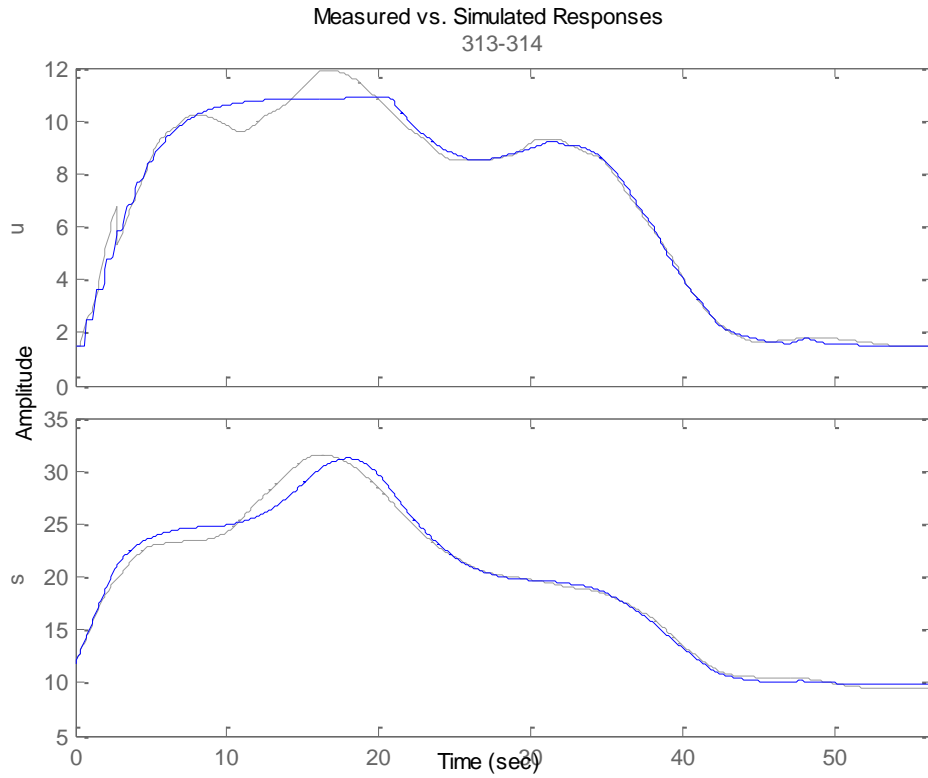


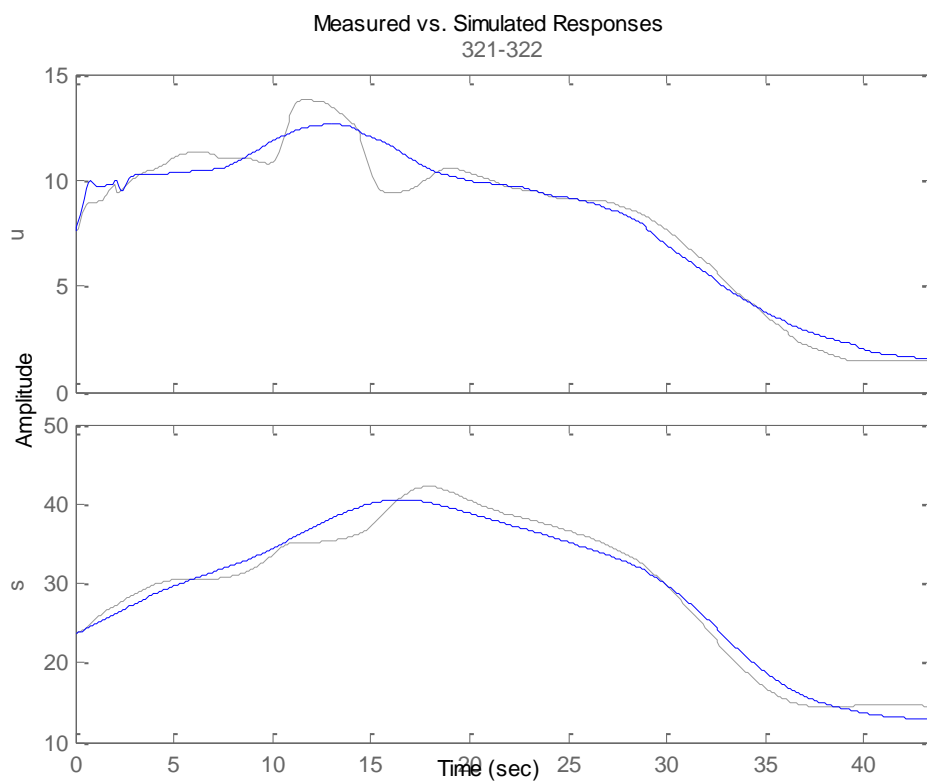
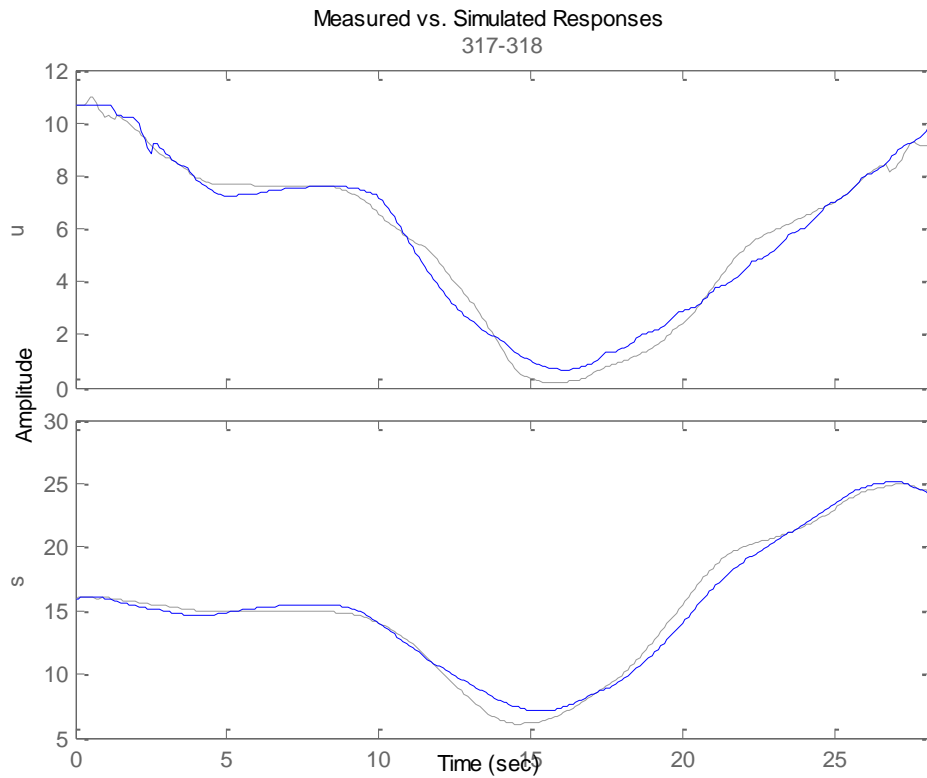


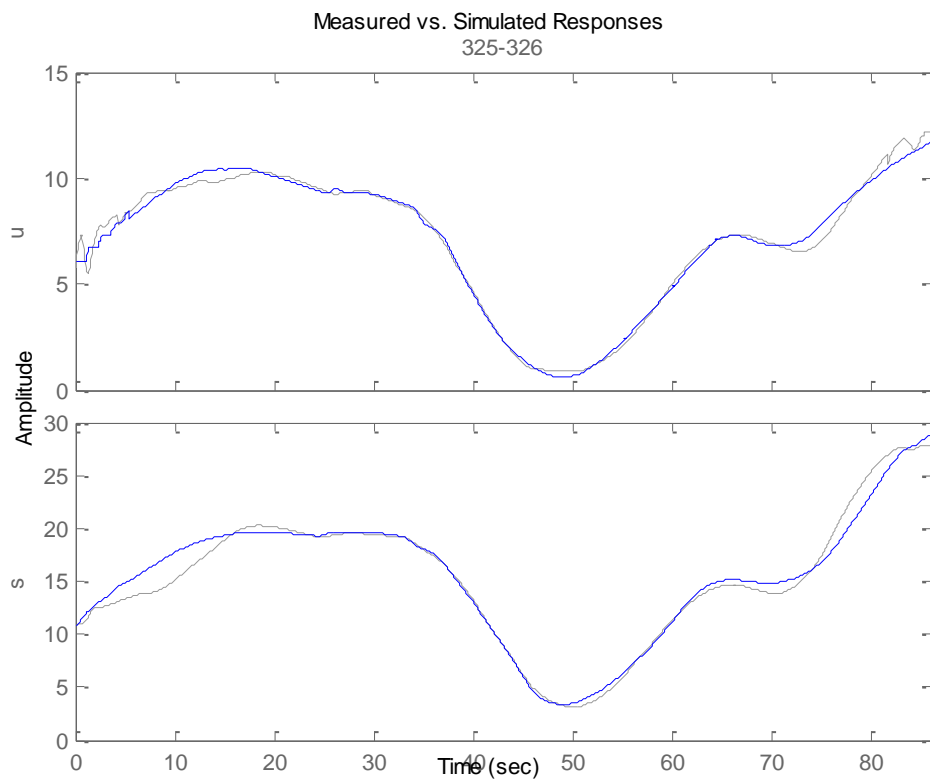
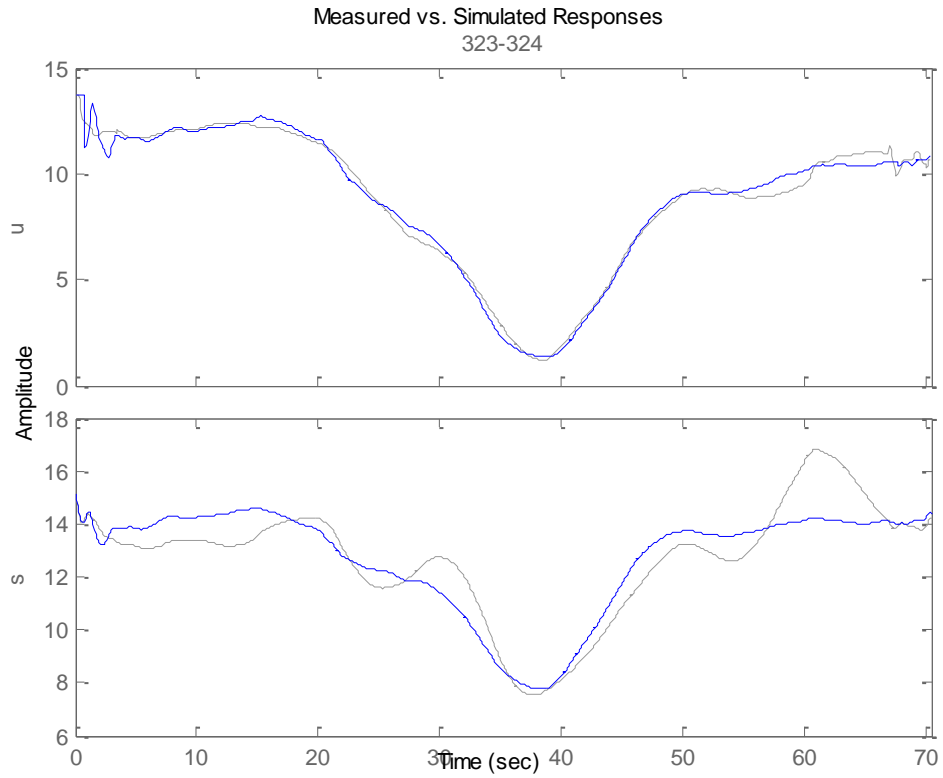




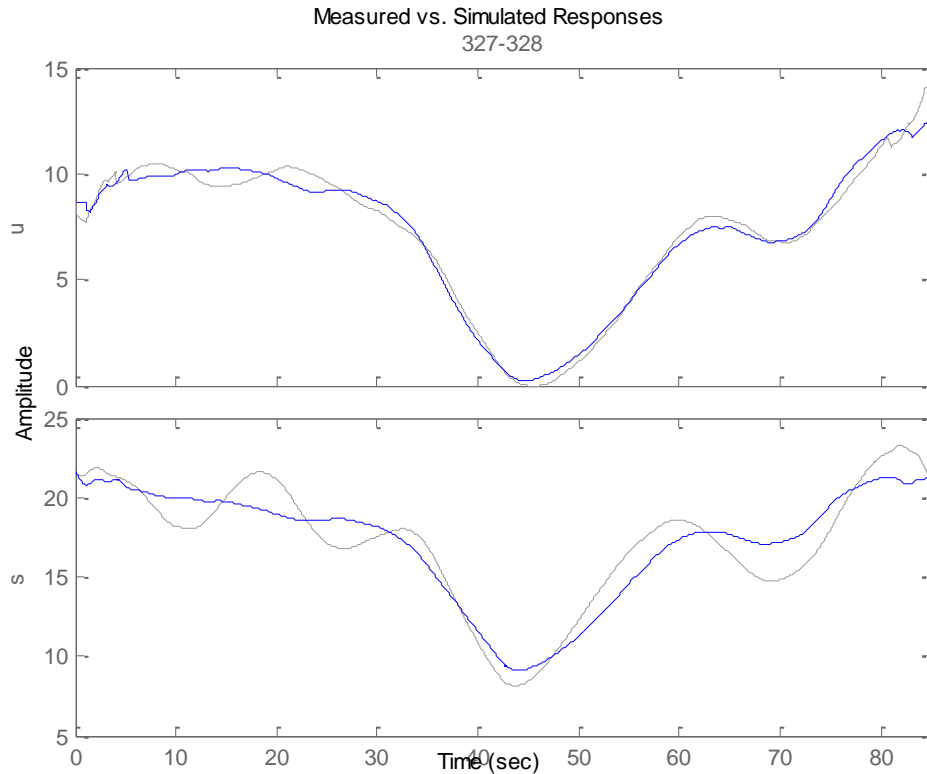






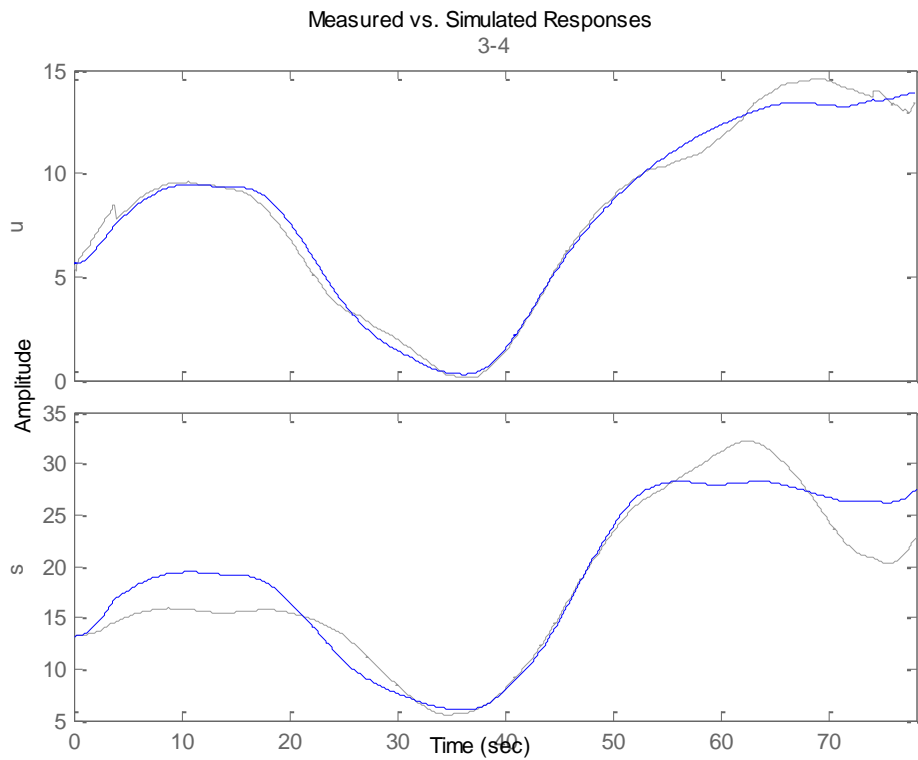
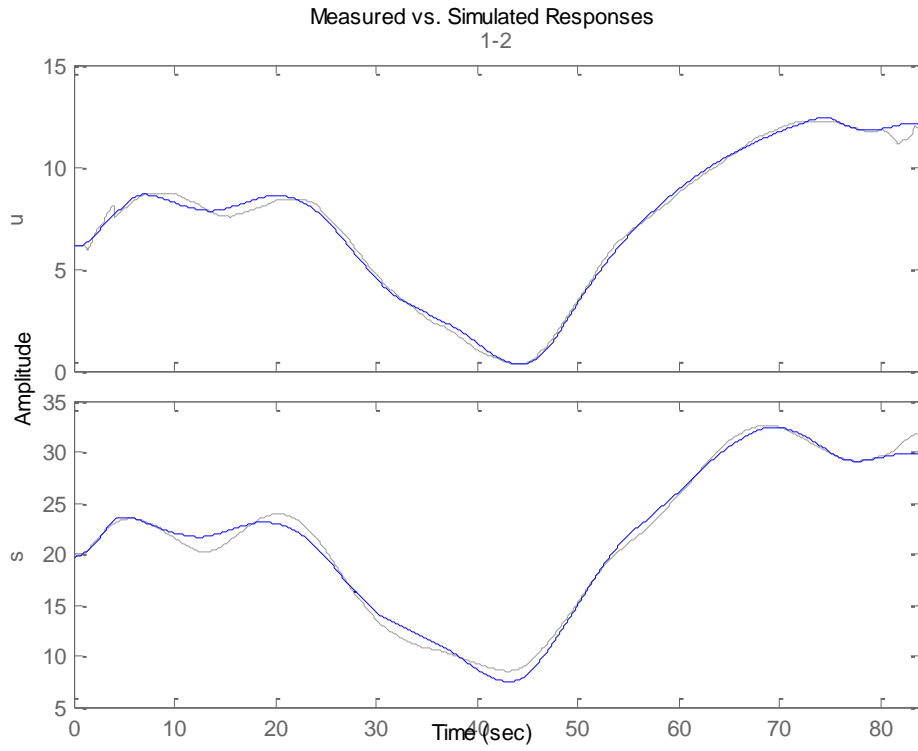


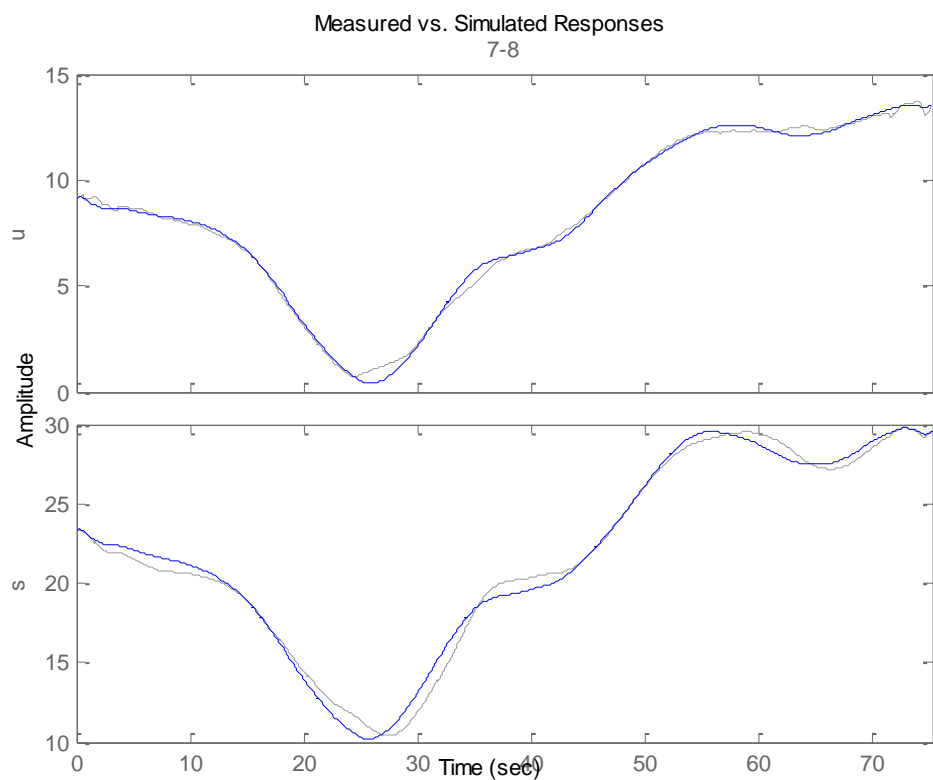
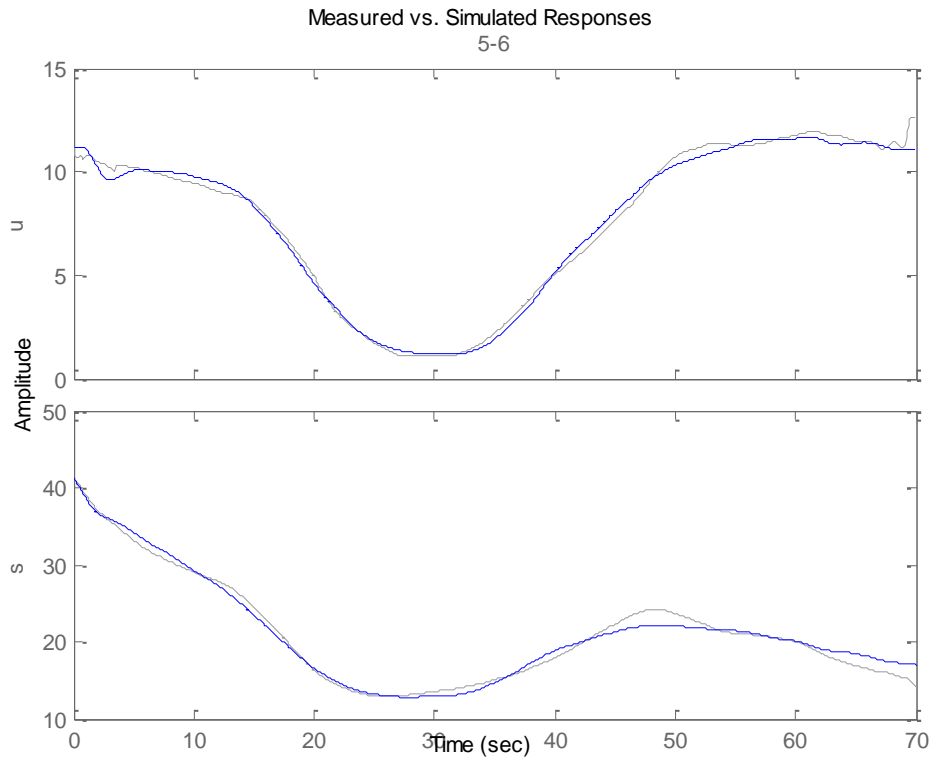


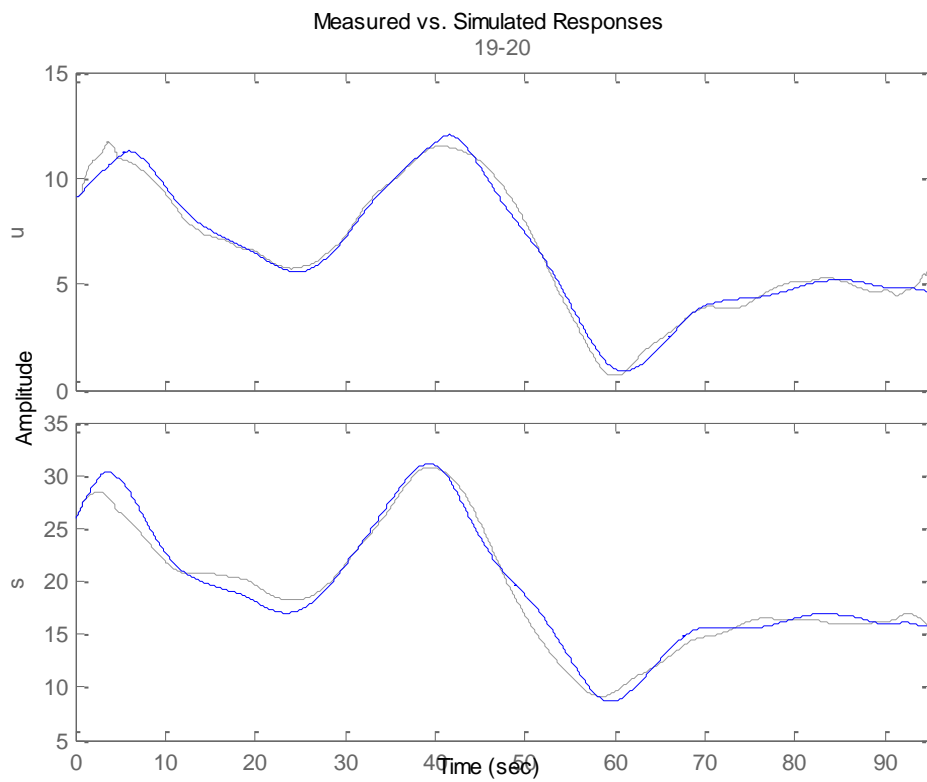
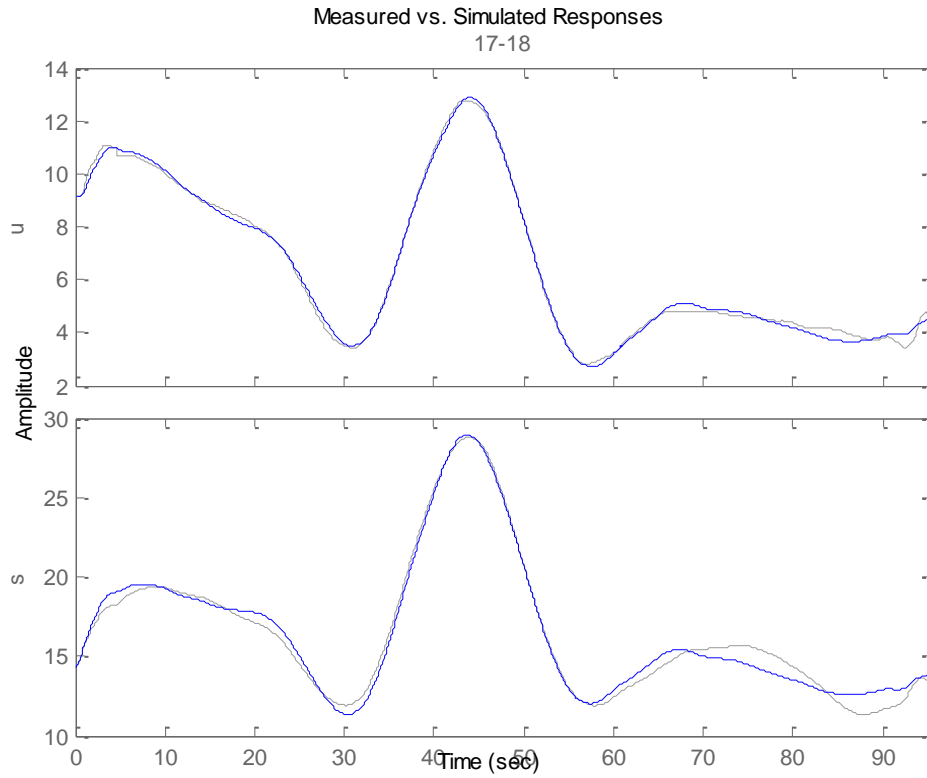


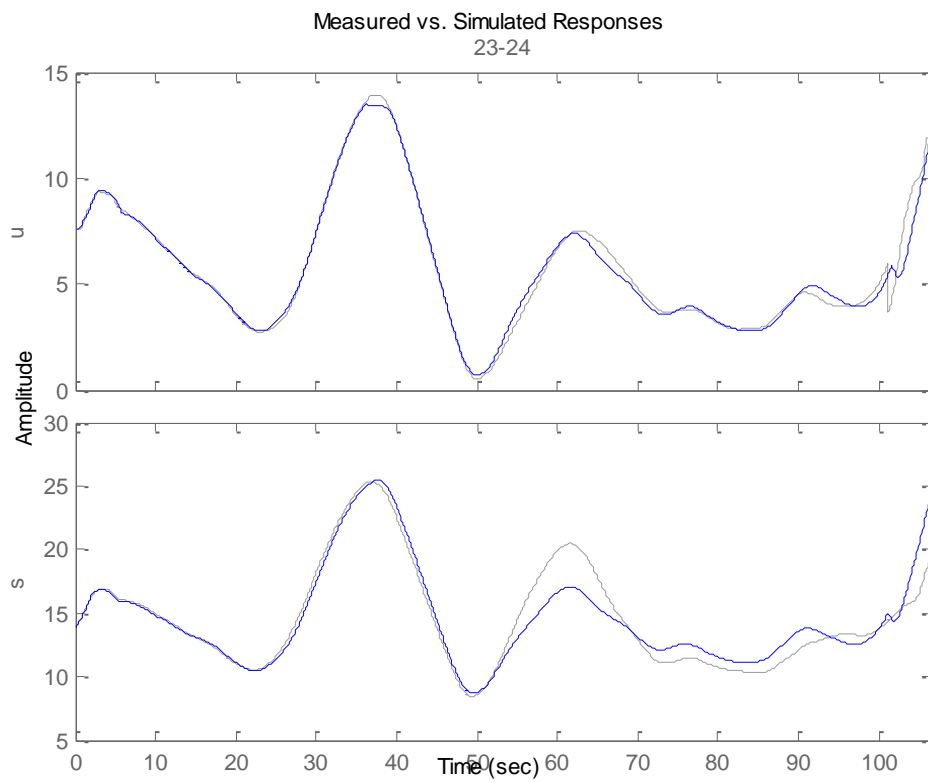
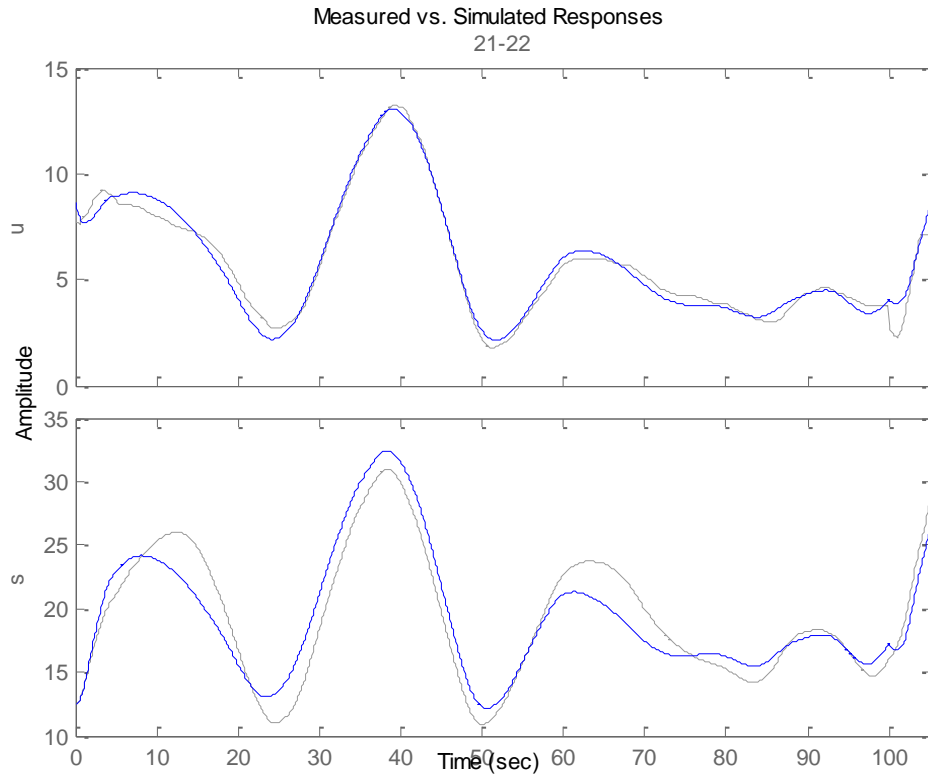
## A.2. Αποτελέσματα για το μοντέλο του Tampere.

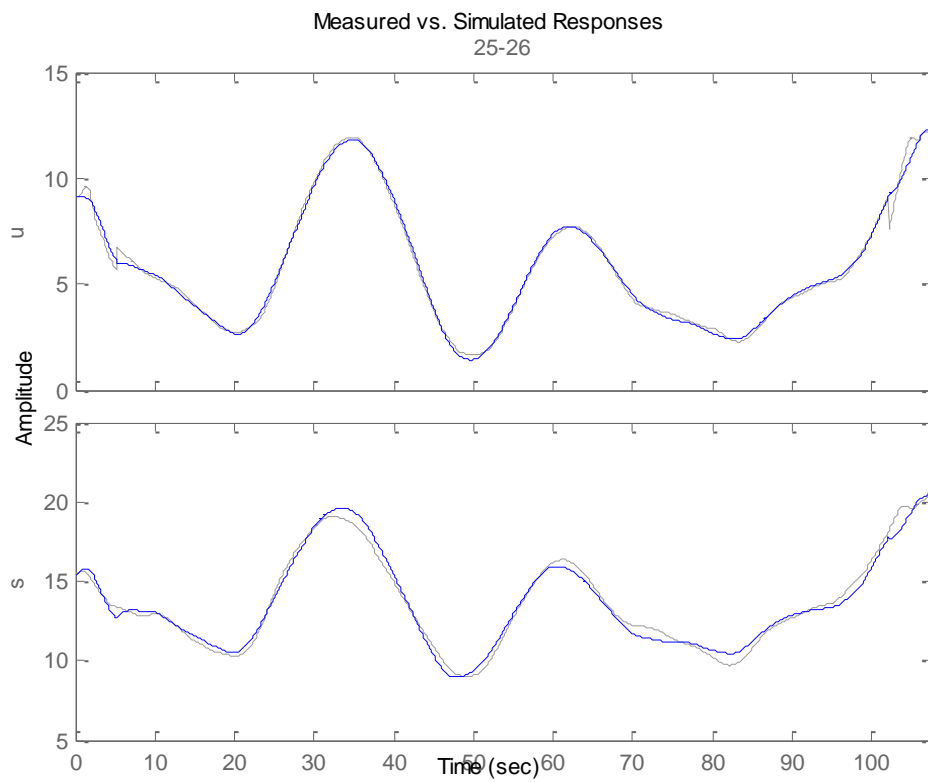
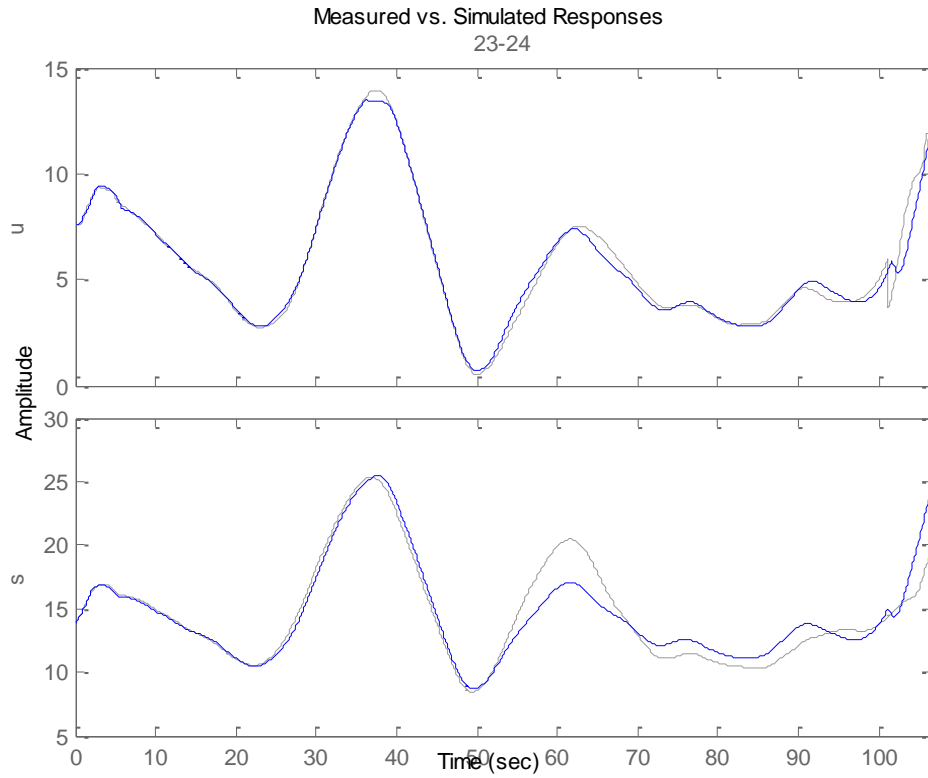
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το κάθε σετ δεδομένων, όσων αφορά το μοντέλο του Tampere. Στο πάνω μέρος των σχημάτων διακρίνεται ο αύξοντας αριθμός του κάθε οχήματος. Στο πάνω σχήμα κάθε εικόνας παρουσιάζεται η διακύμανση κατά τη διάρκεια του χρόνου της ταχύτητας του πίσω οχήματος ( $u$ ) και ενώ στο κάτω η διακύμανση της σχετικής απόστασης ( $s$ ). Με γκρι χρώμα παρουσιάζεται το πραγματικό μετρημένο μέγεθος, ενώ με μπλε η πρόβλεψη του μοντέλου.

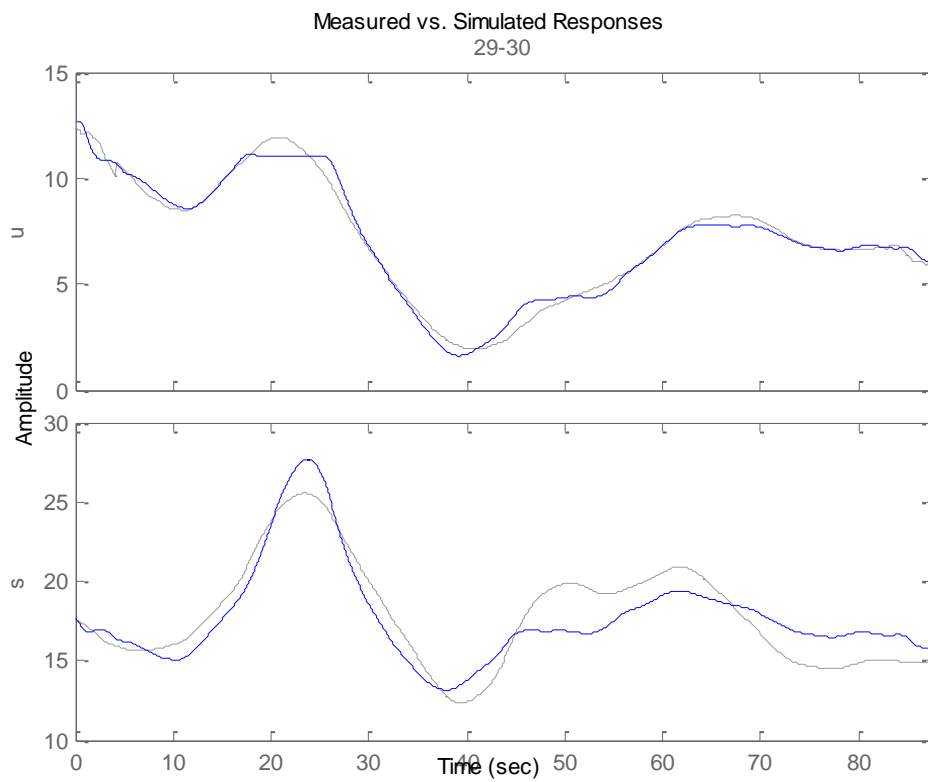
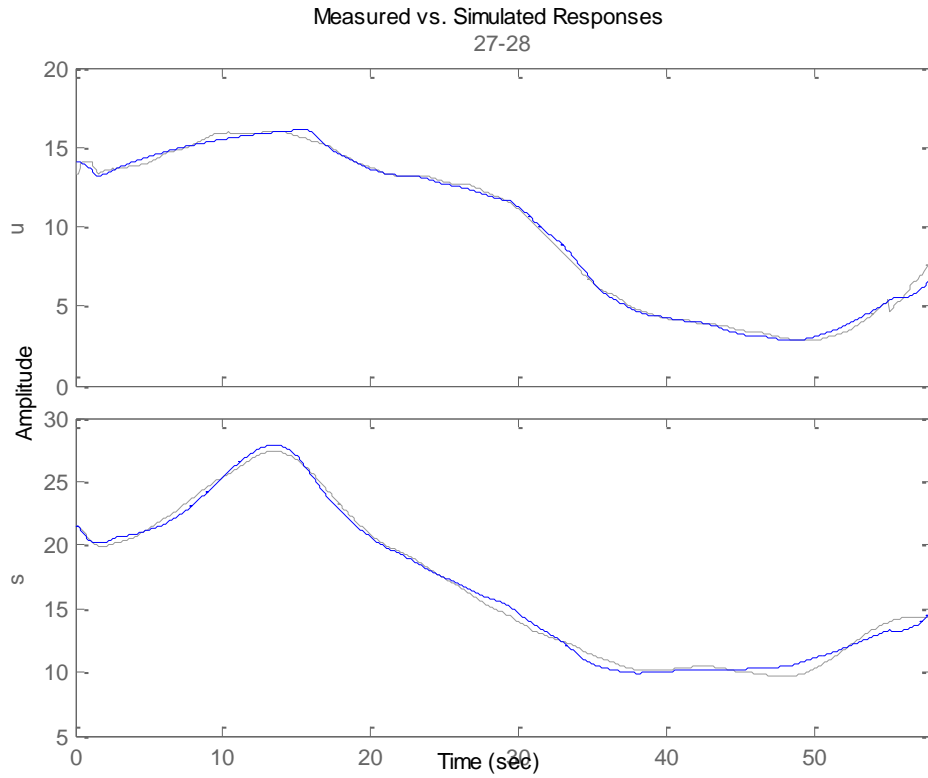


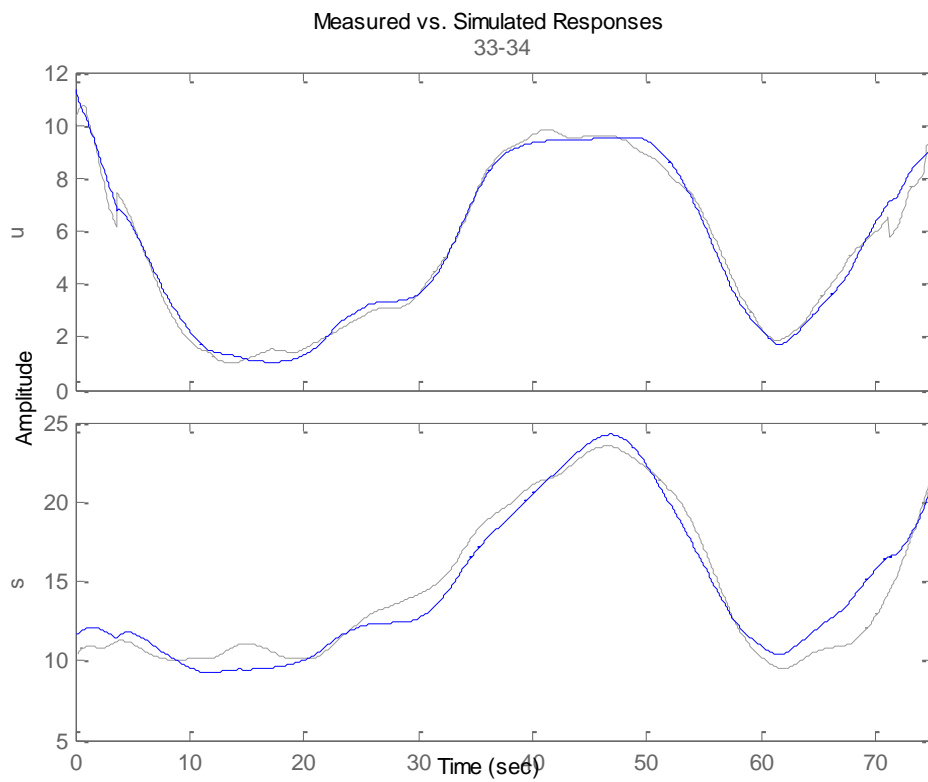
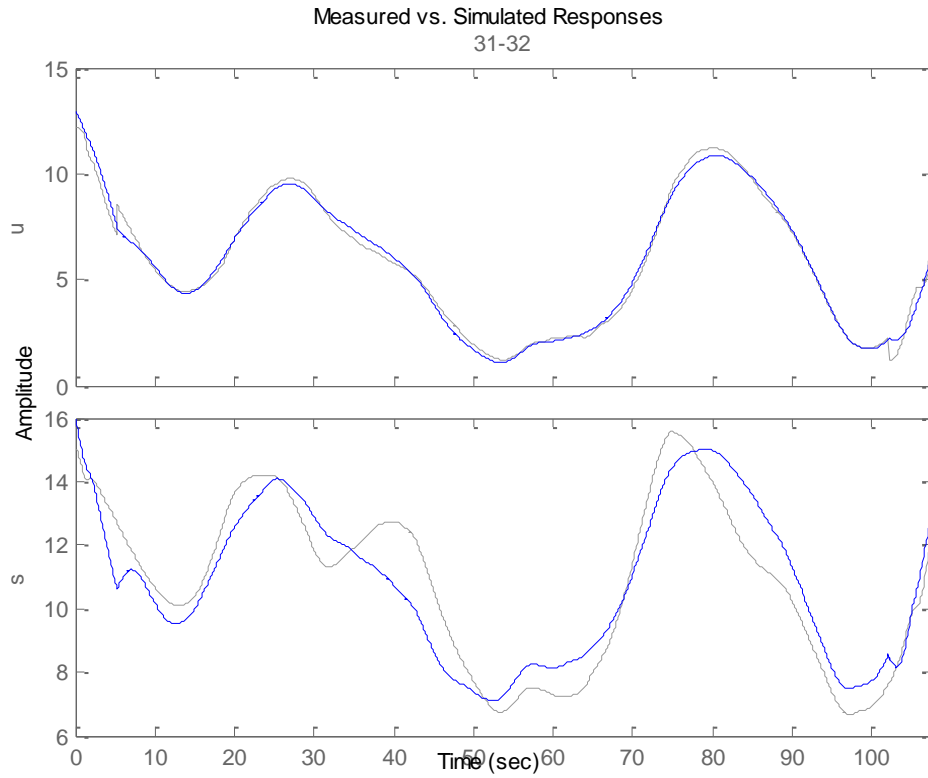




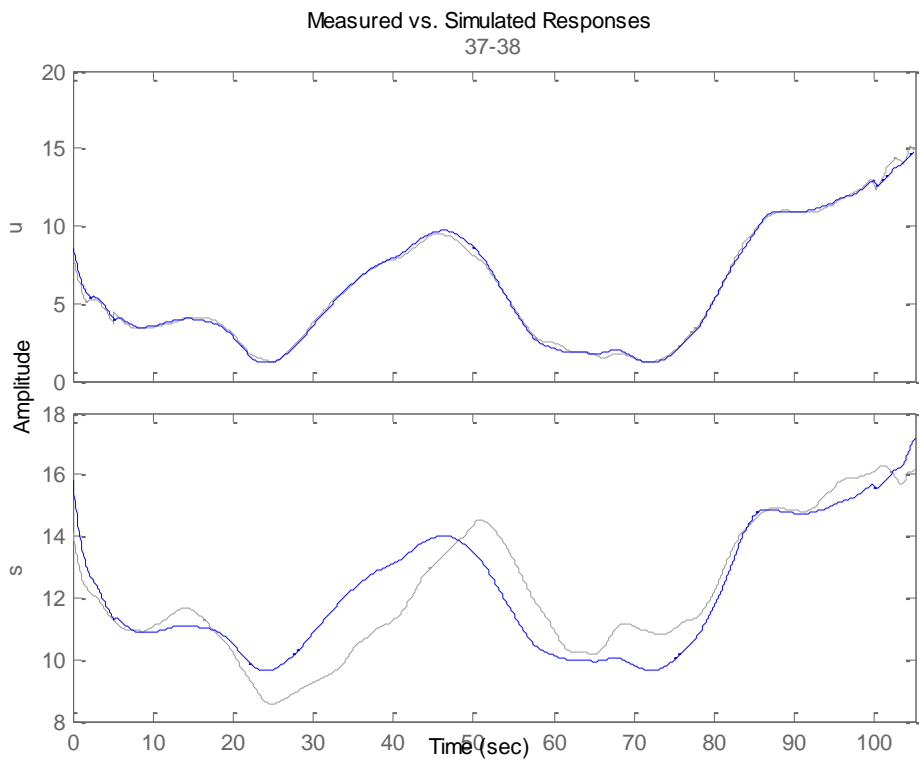
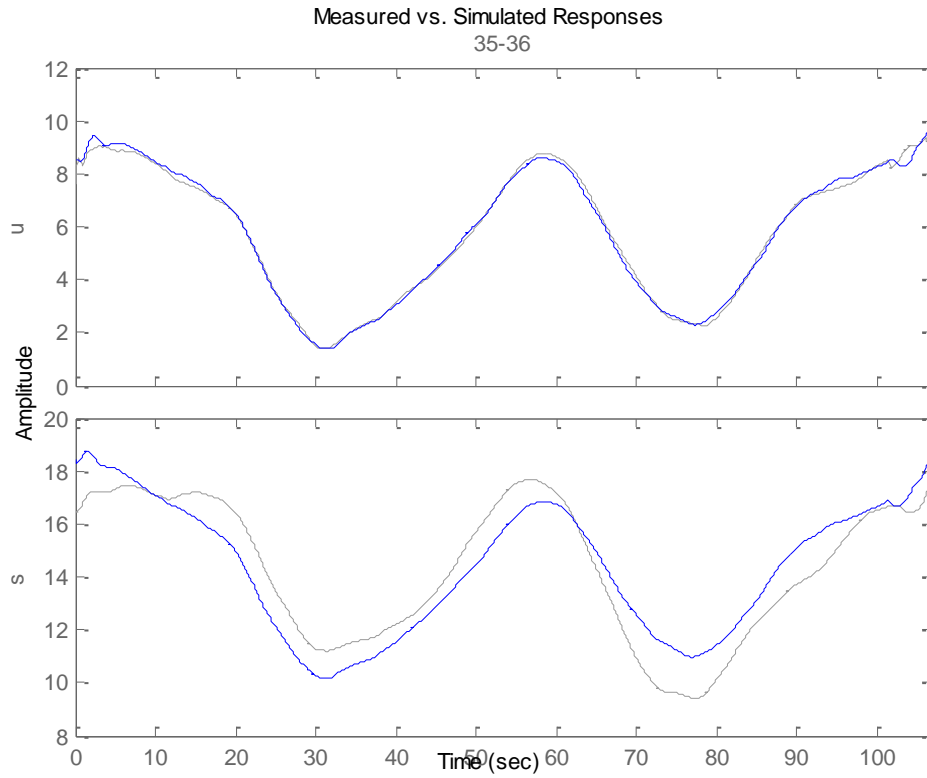


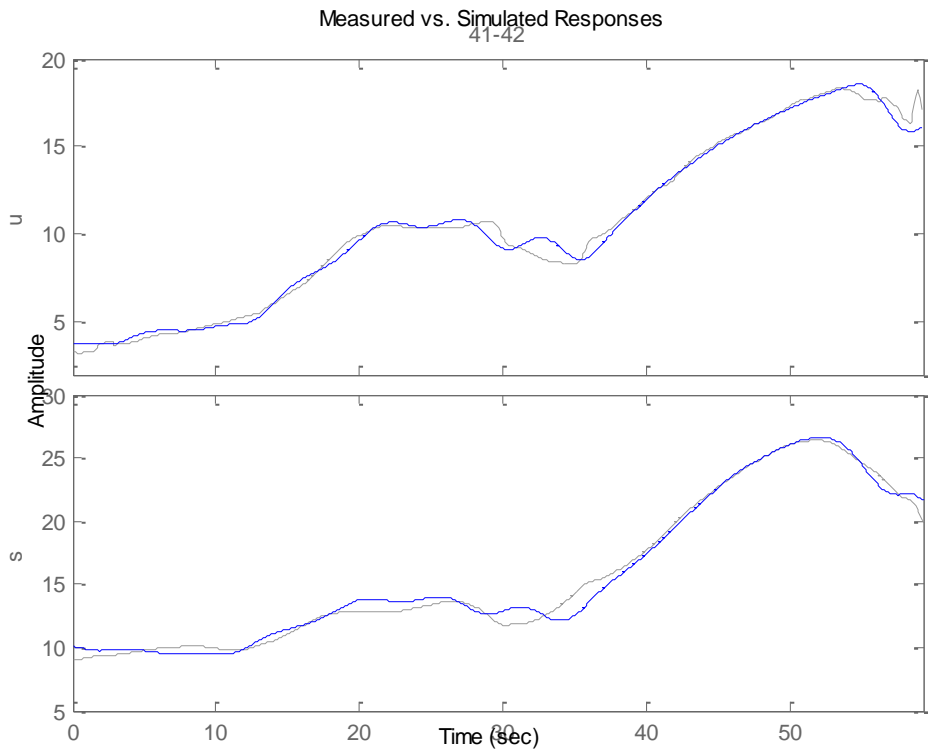
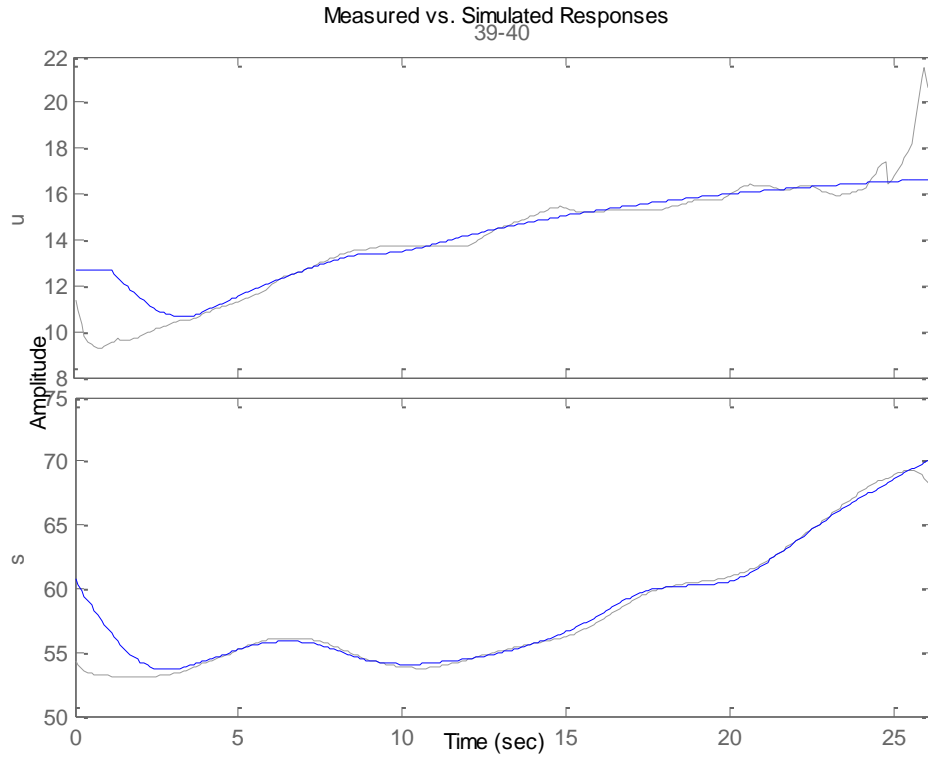


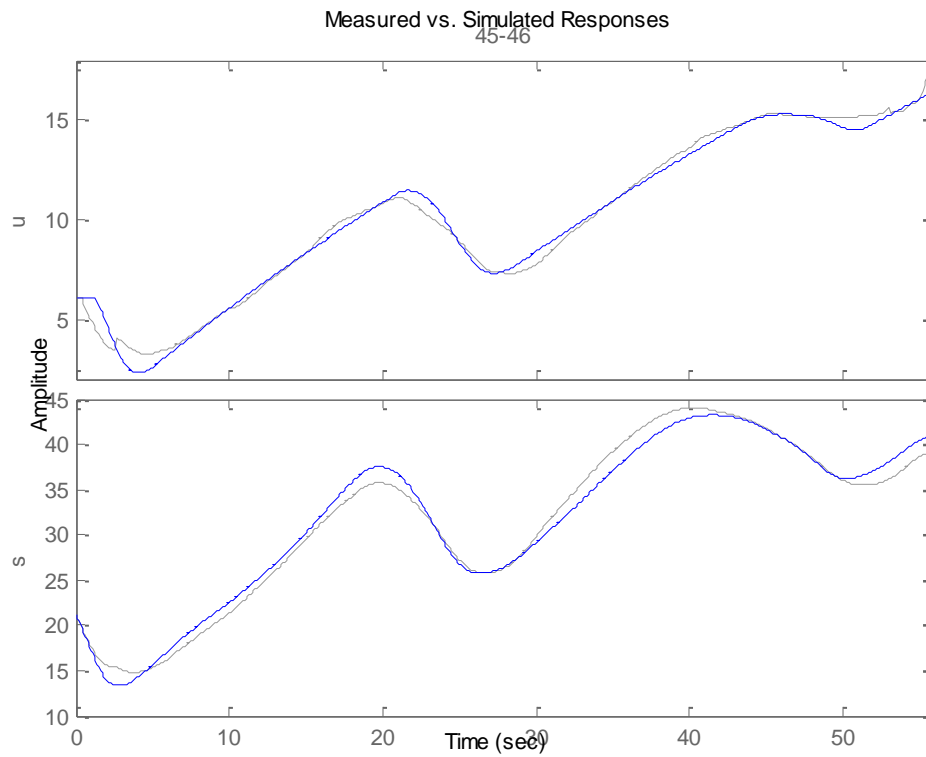
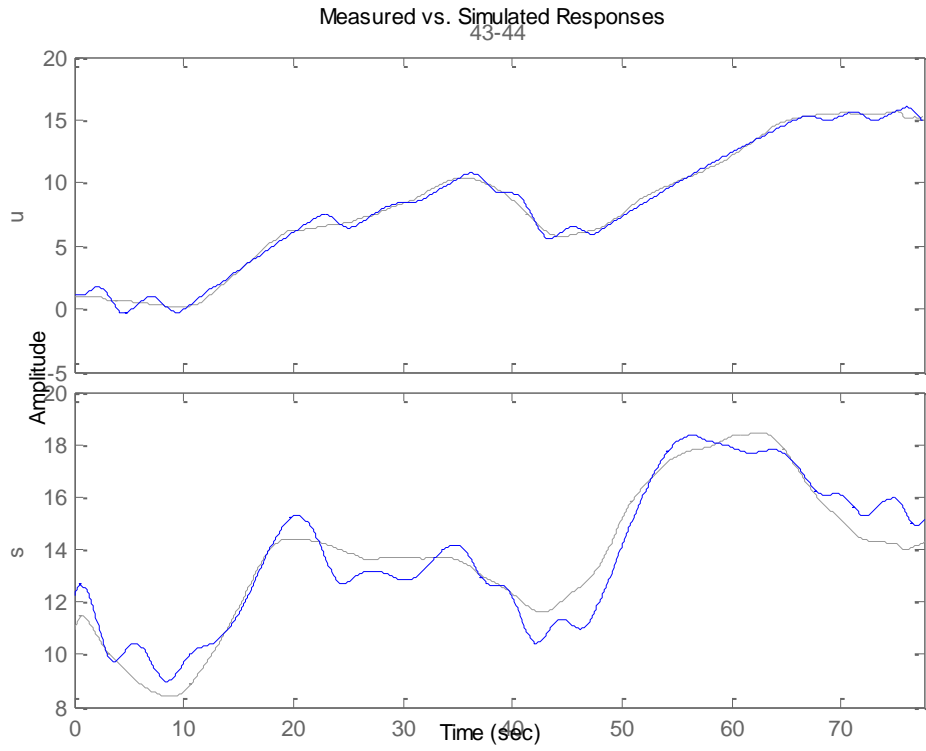


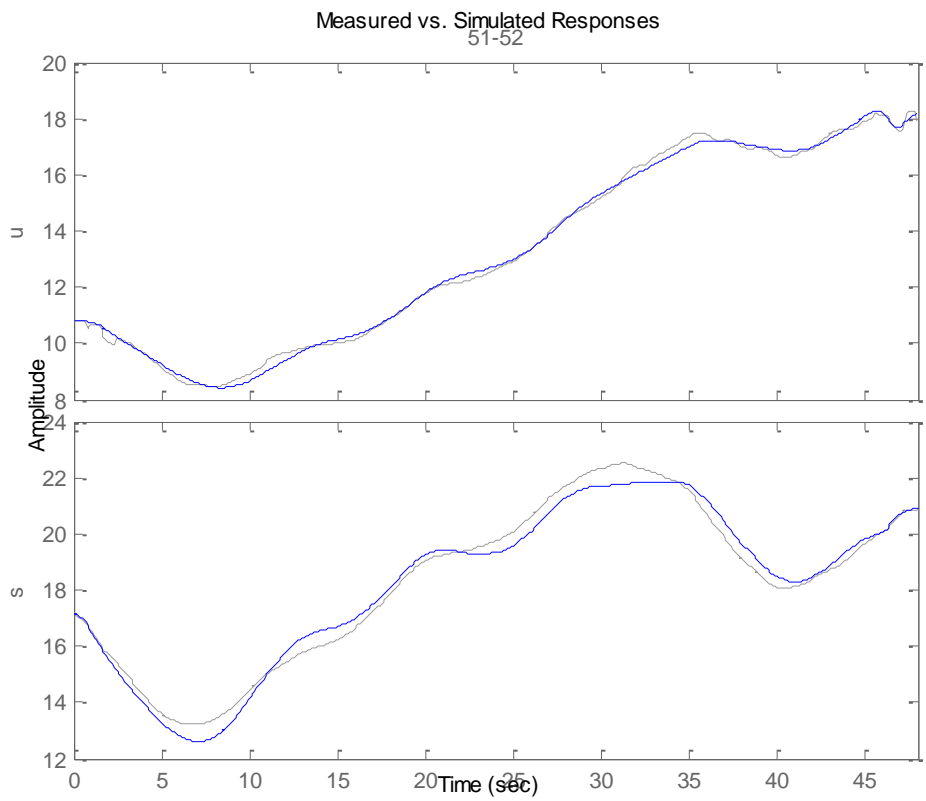
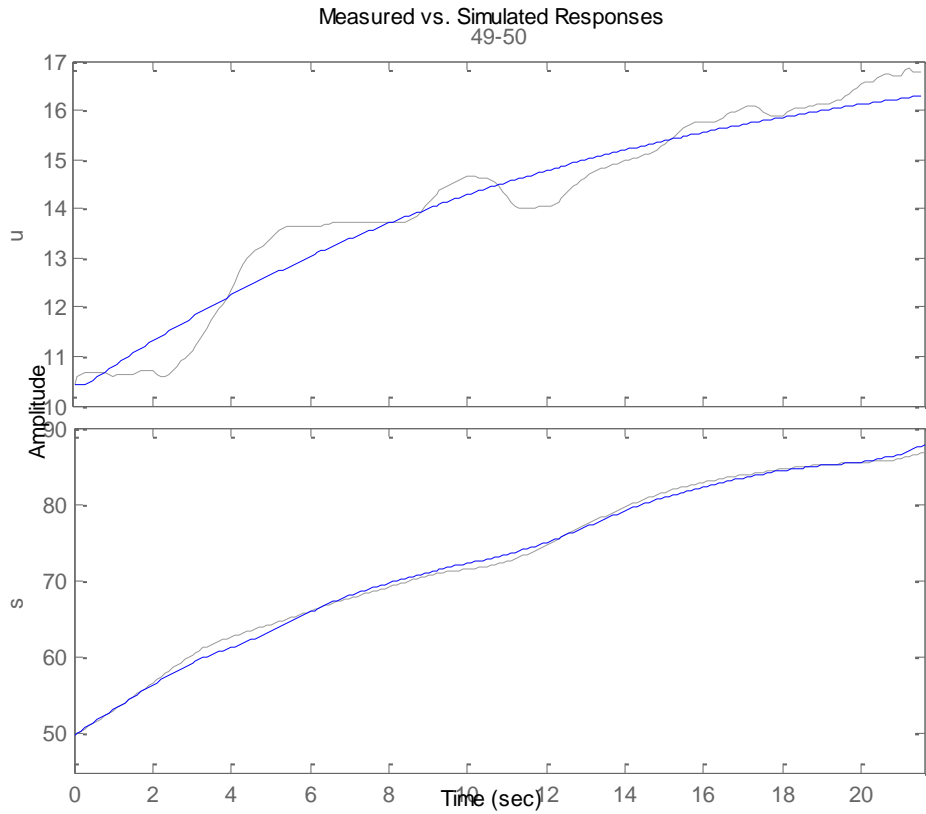


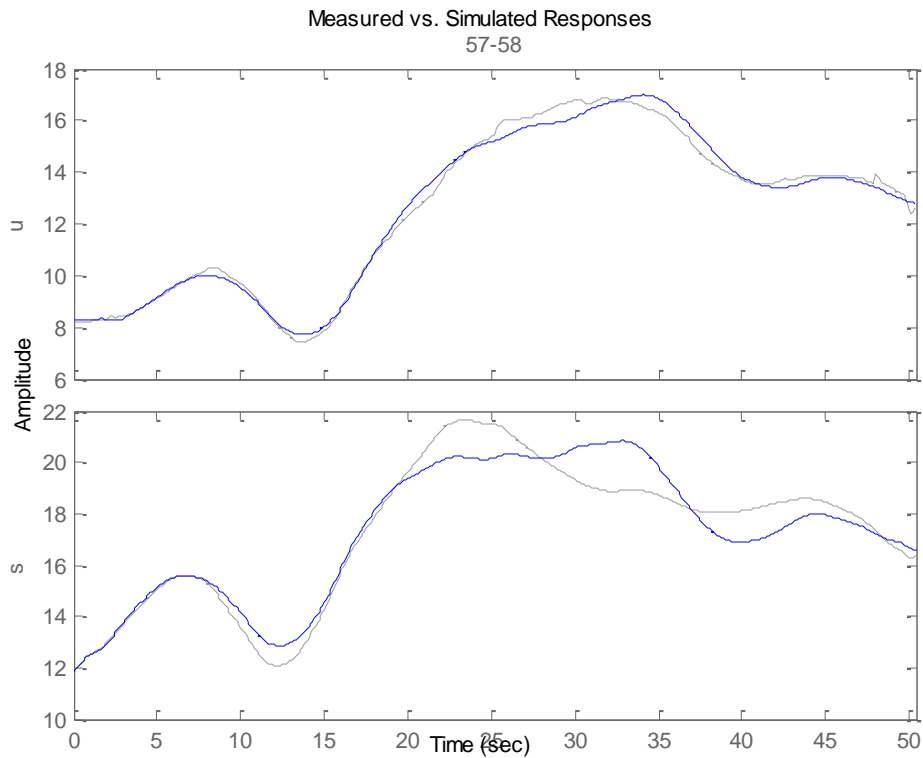
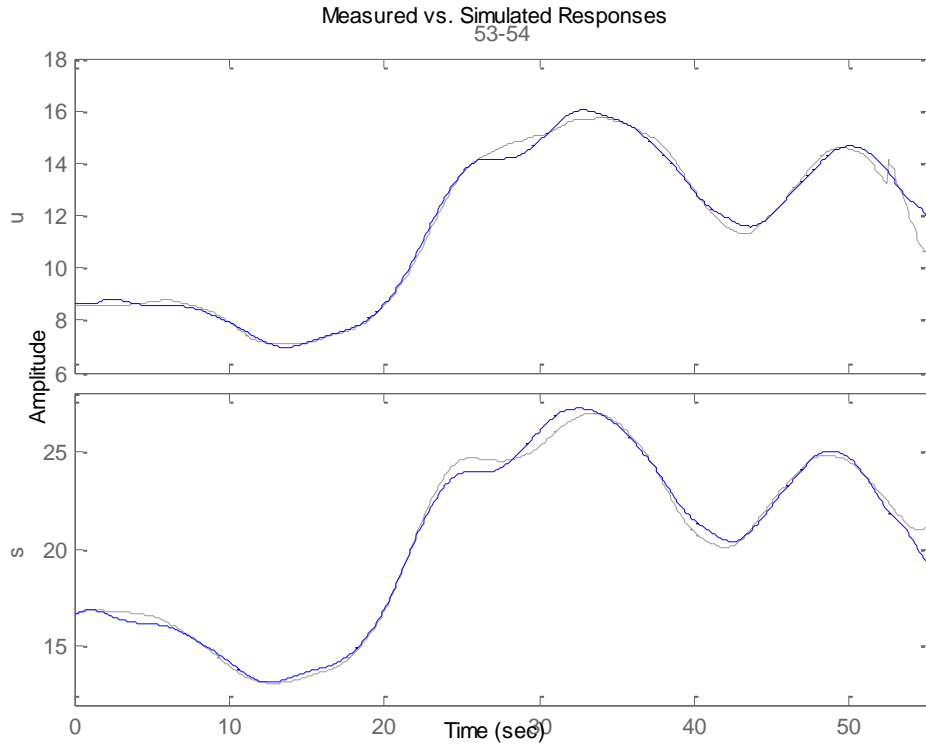


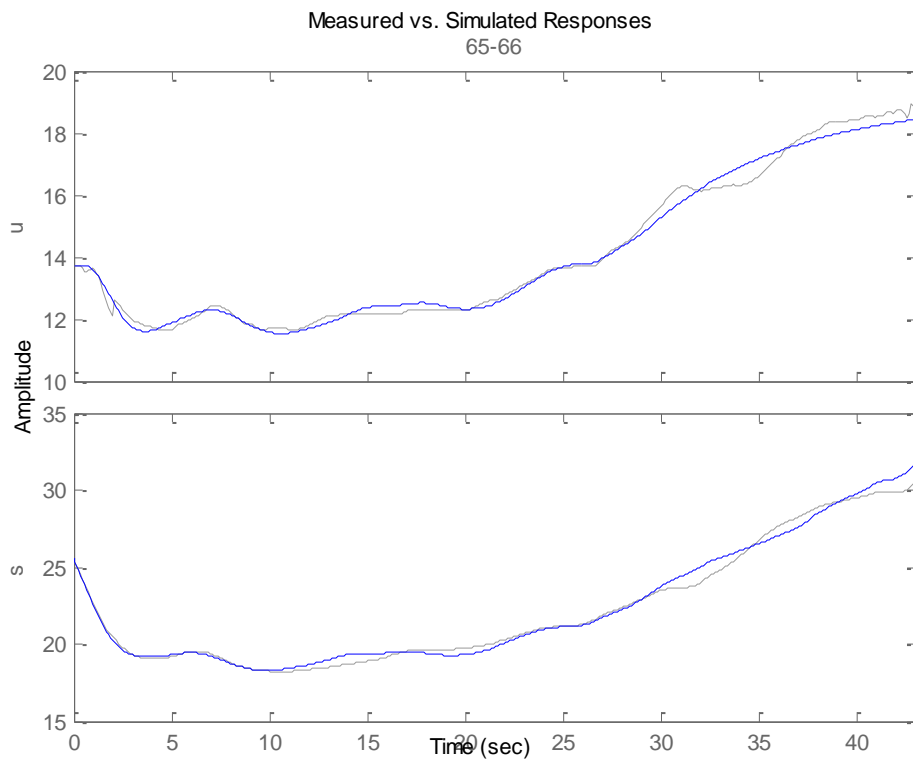
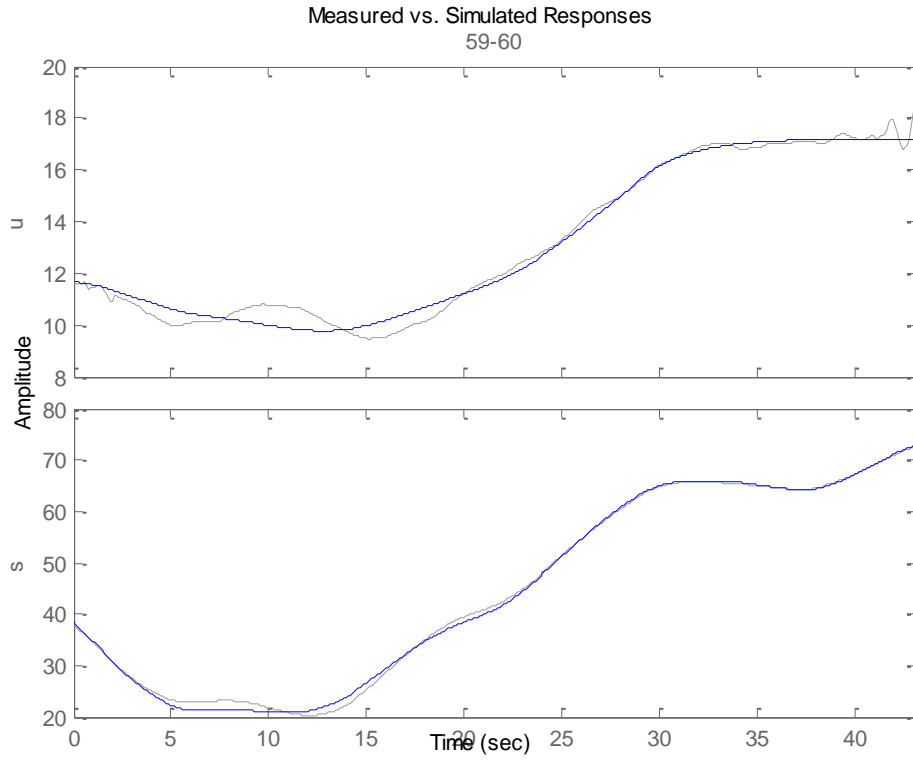


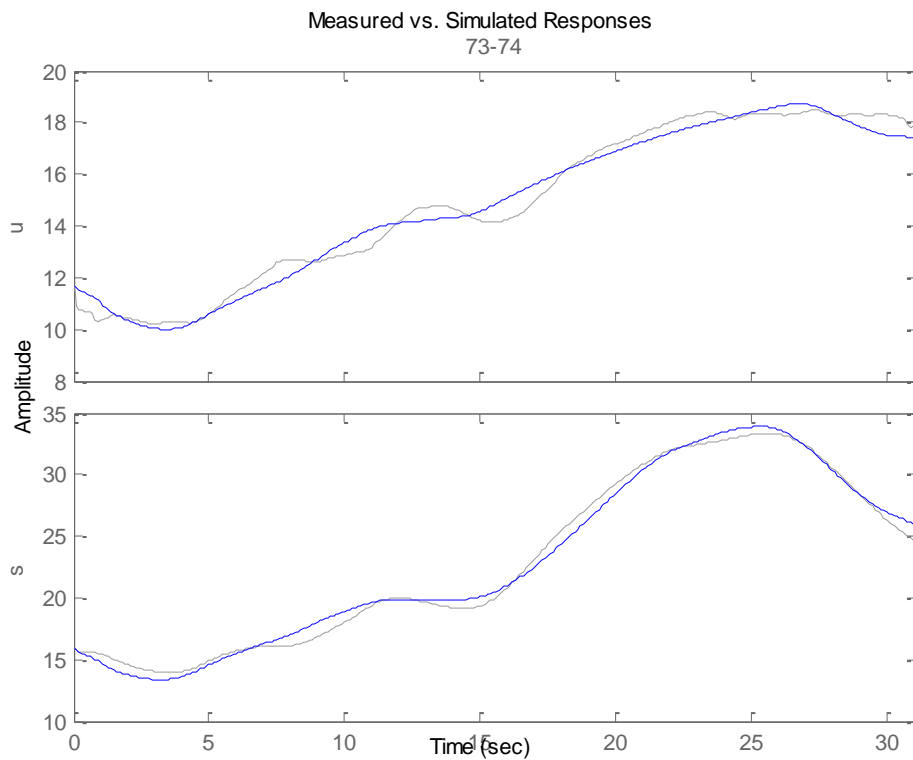
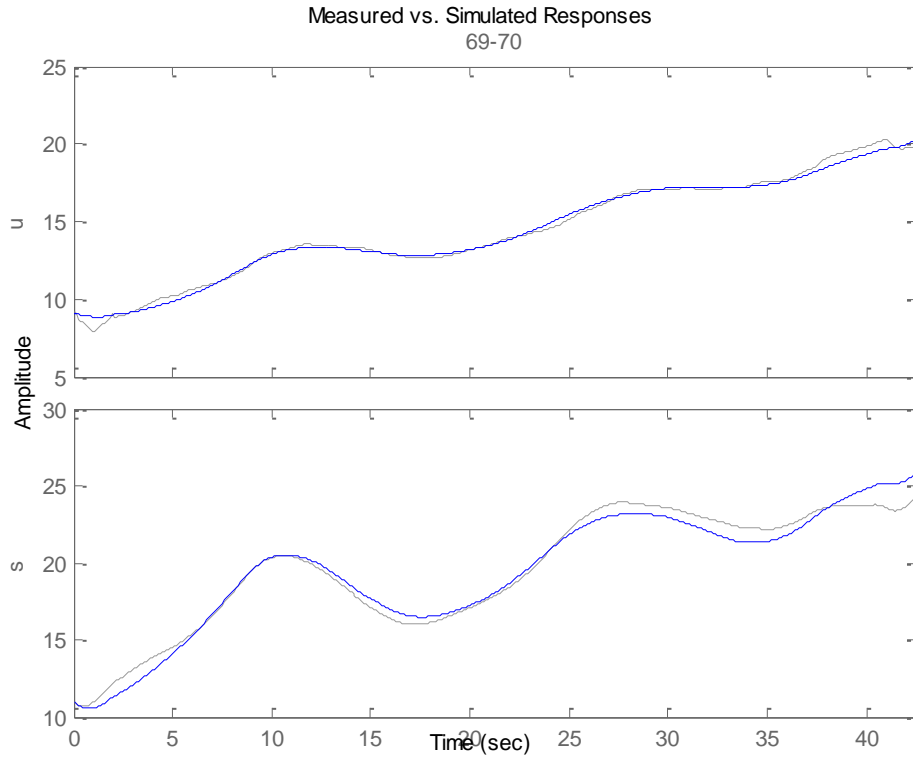


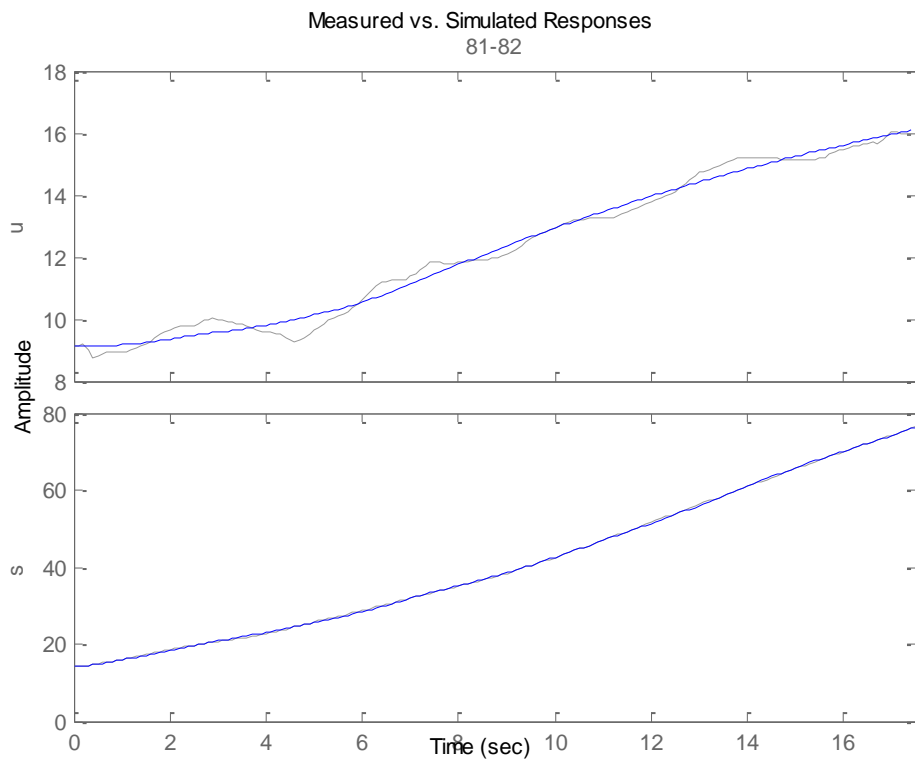
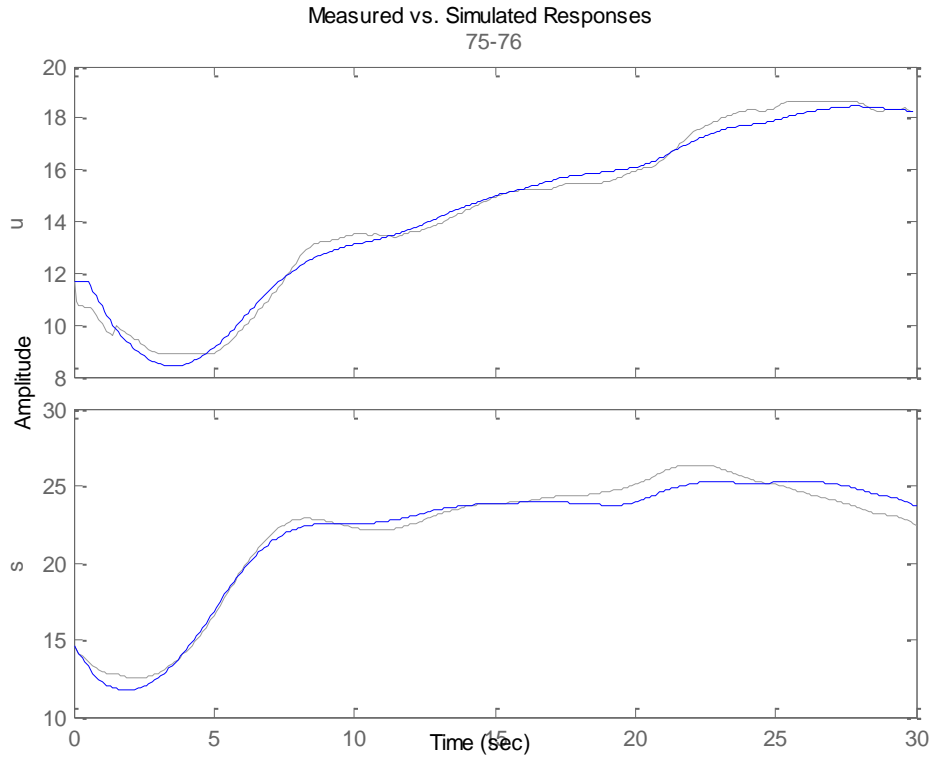




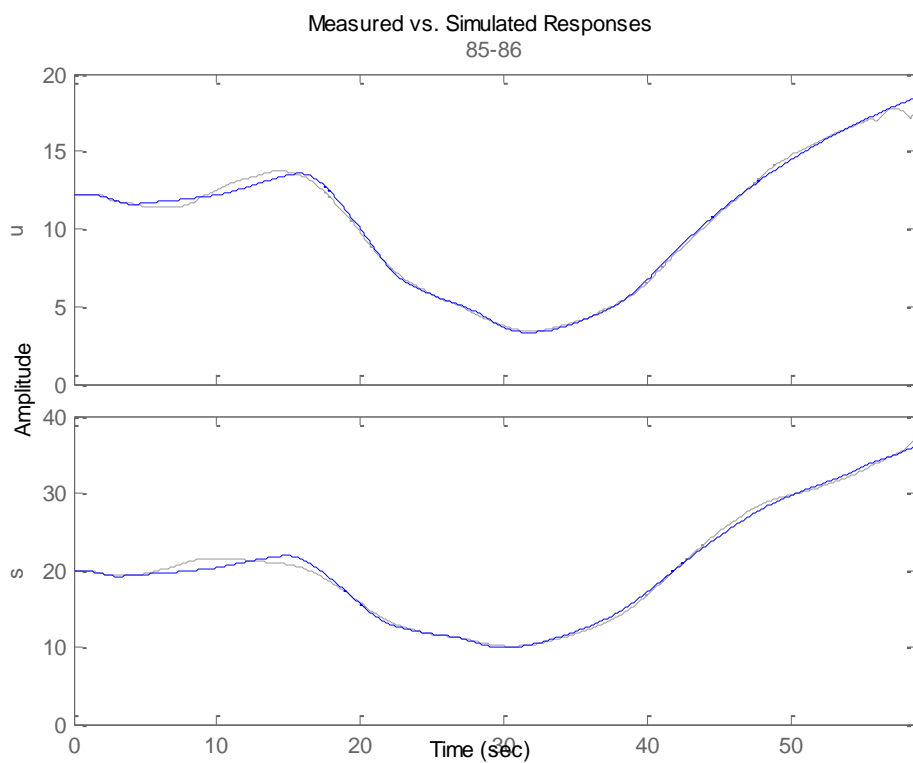
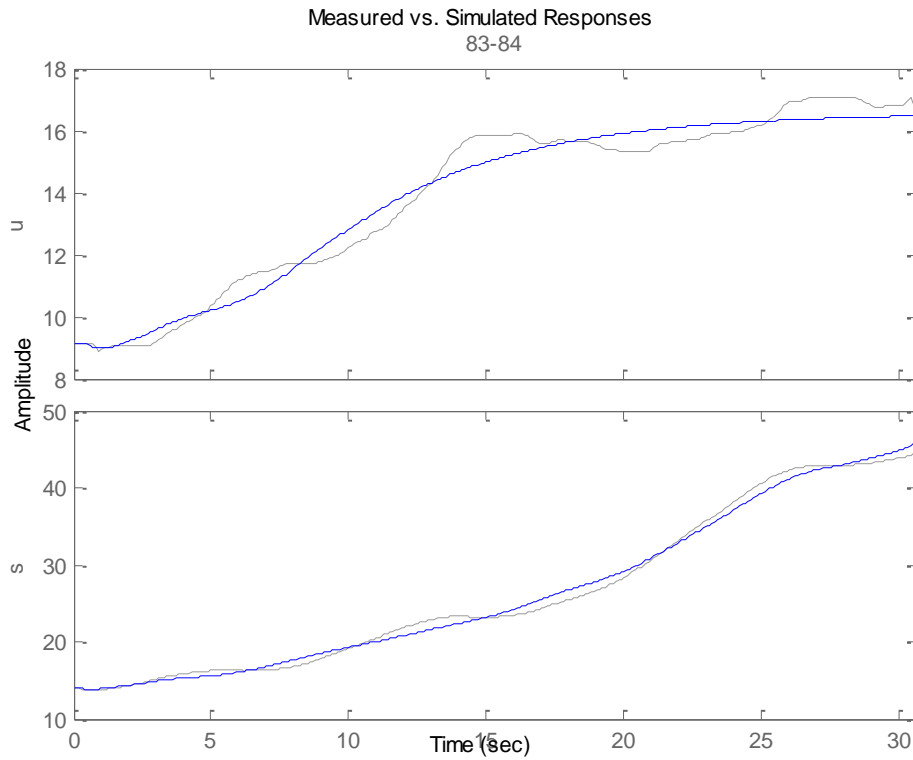


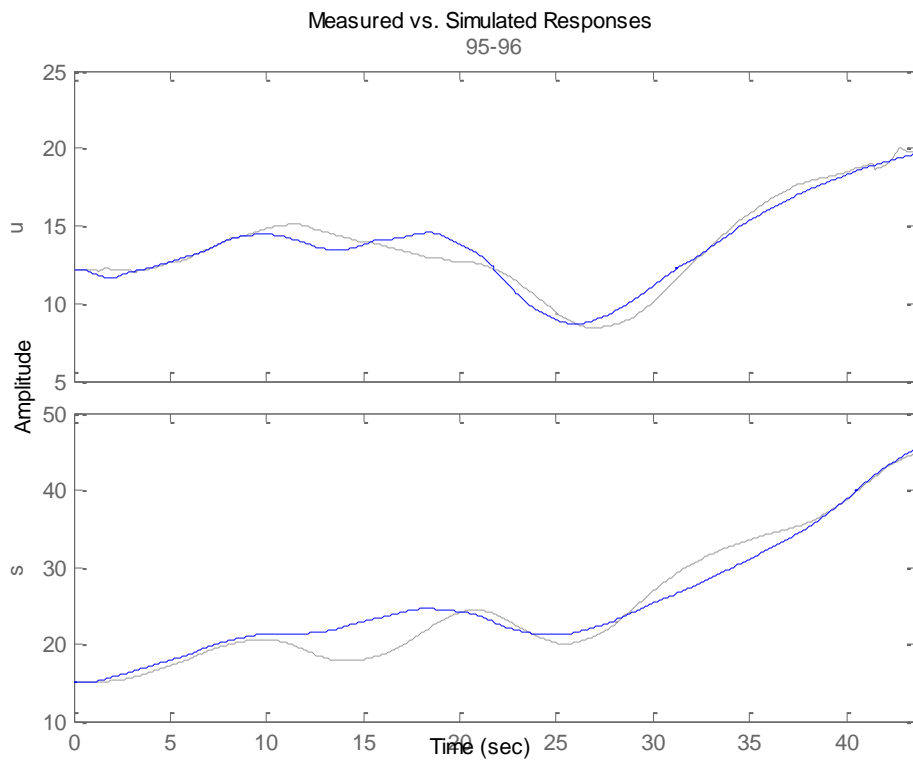
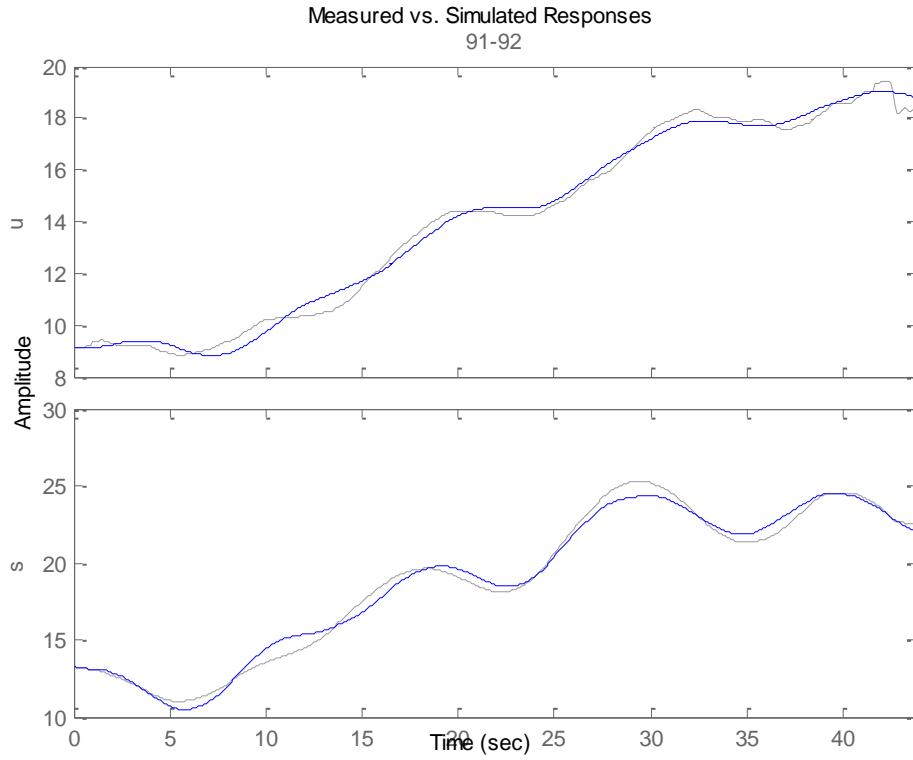


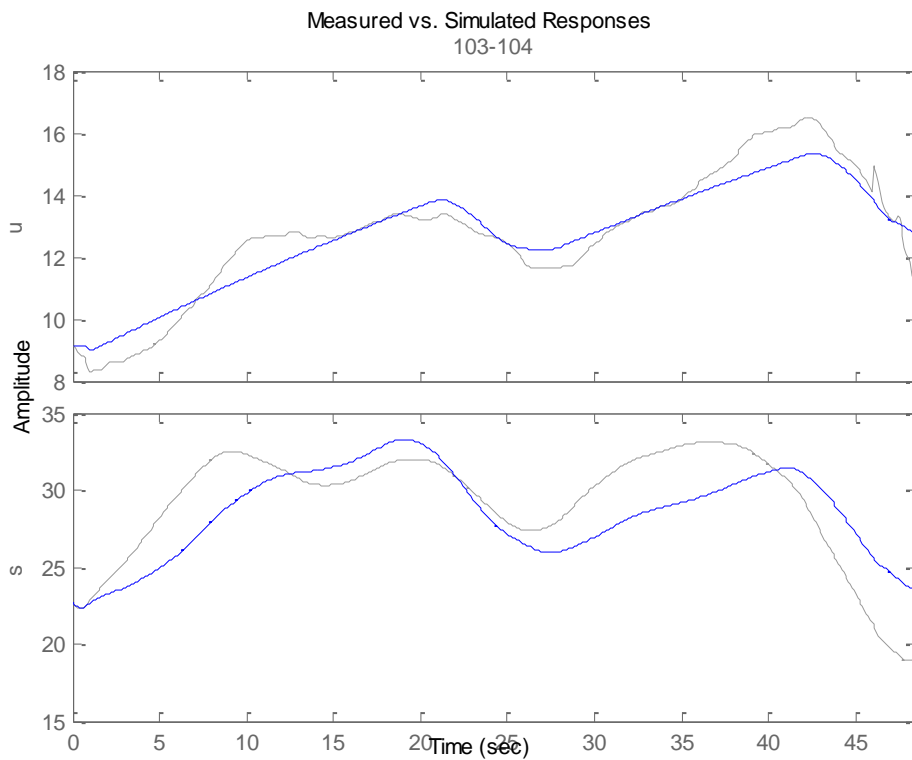
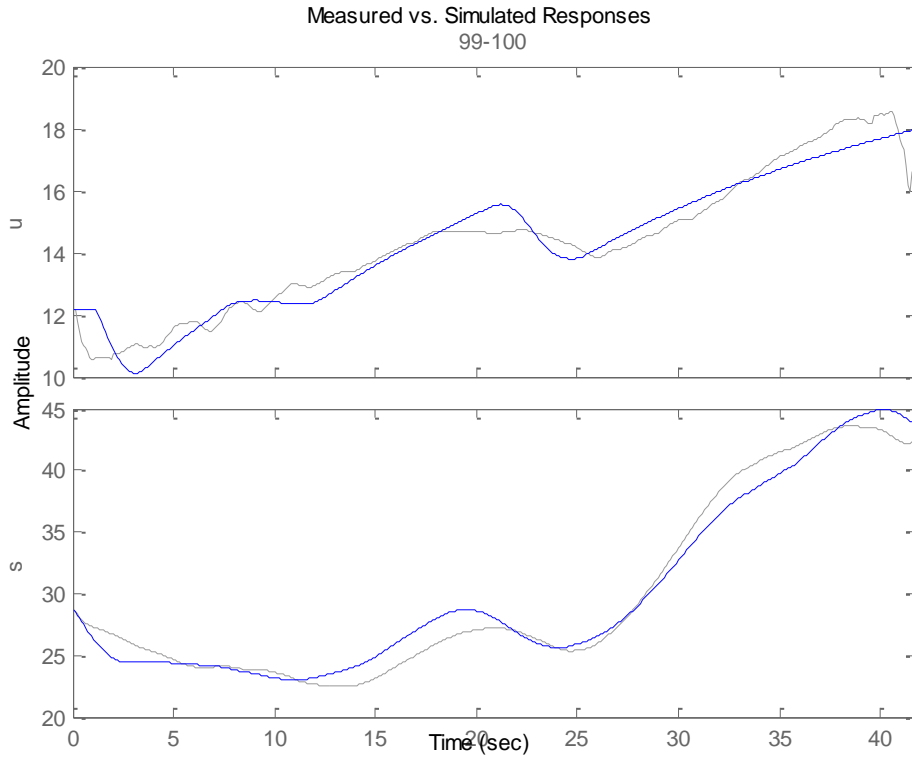


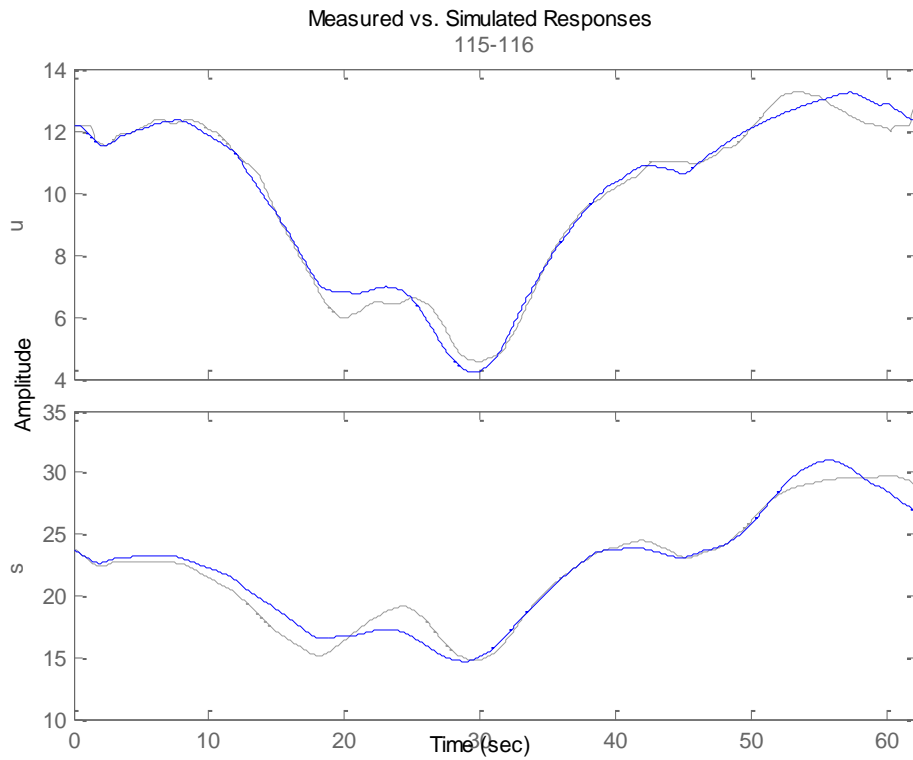
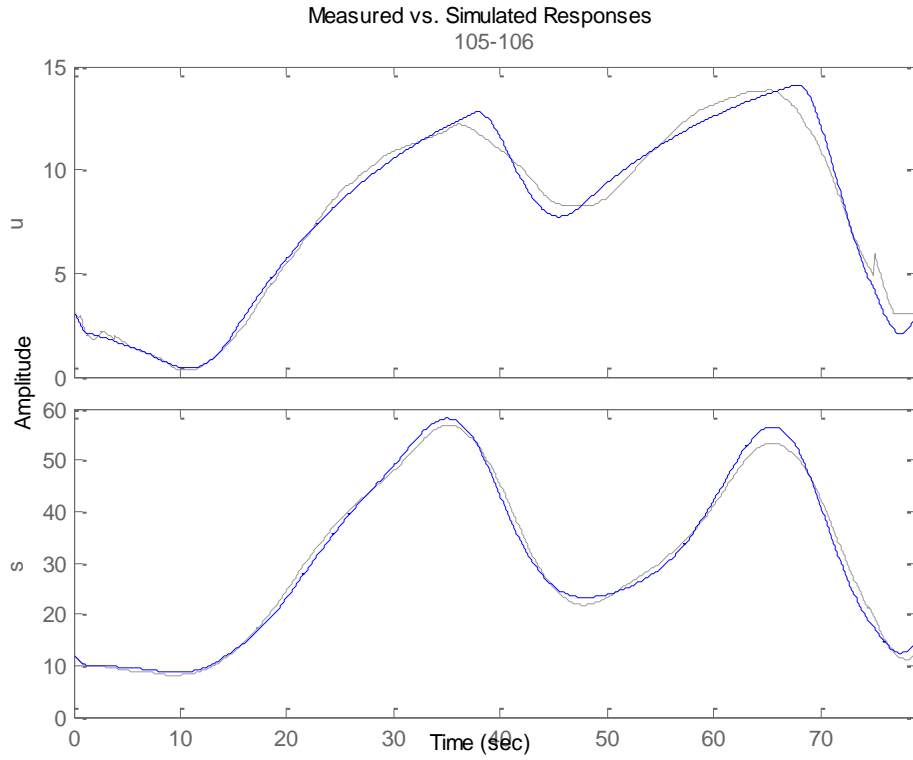


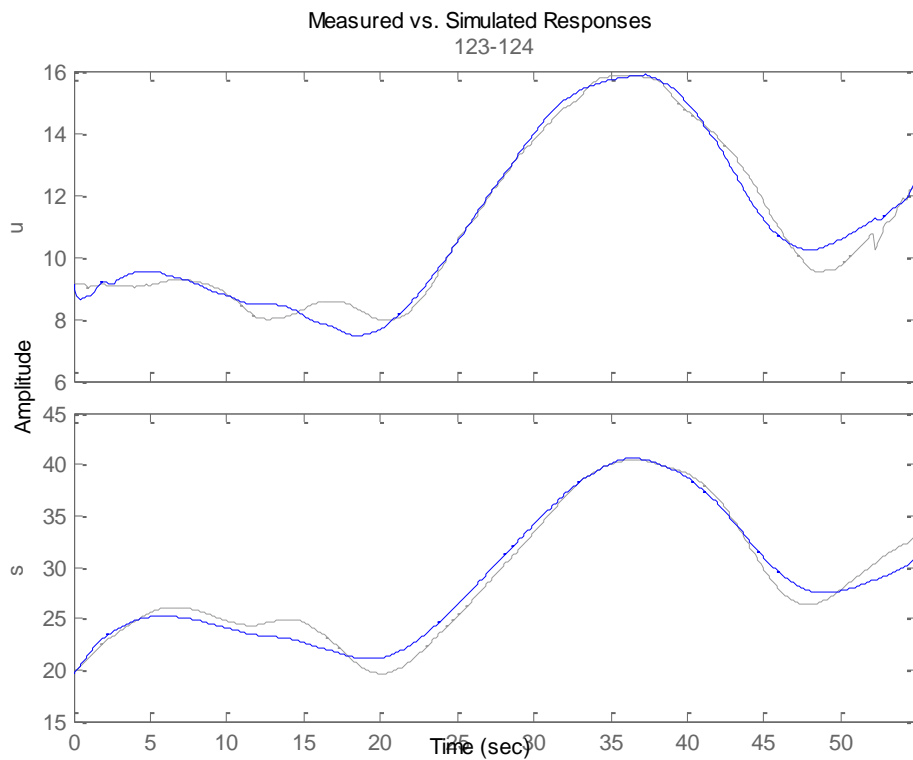
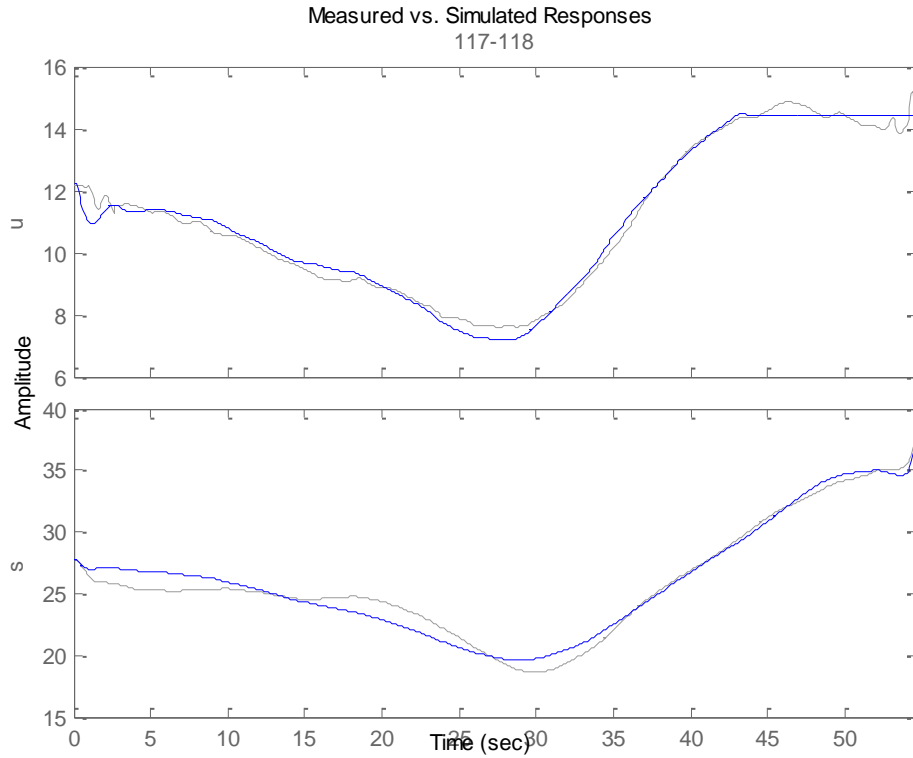


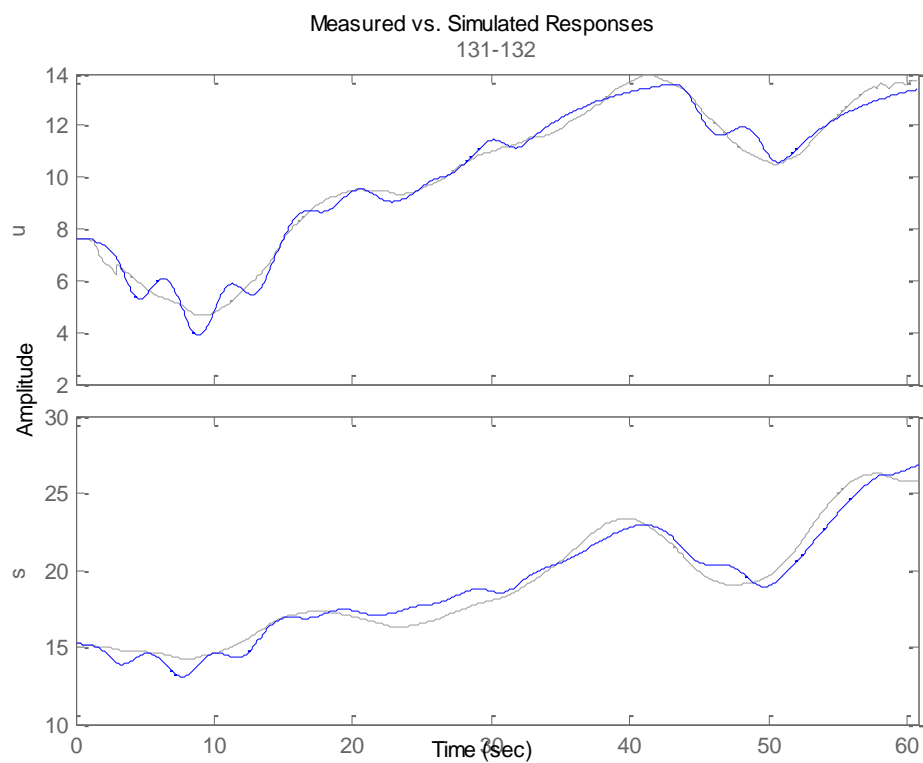
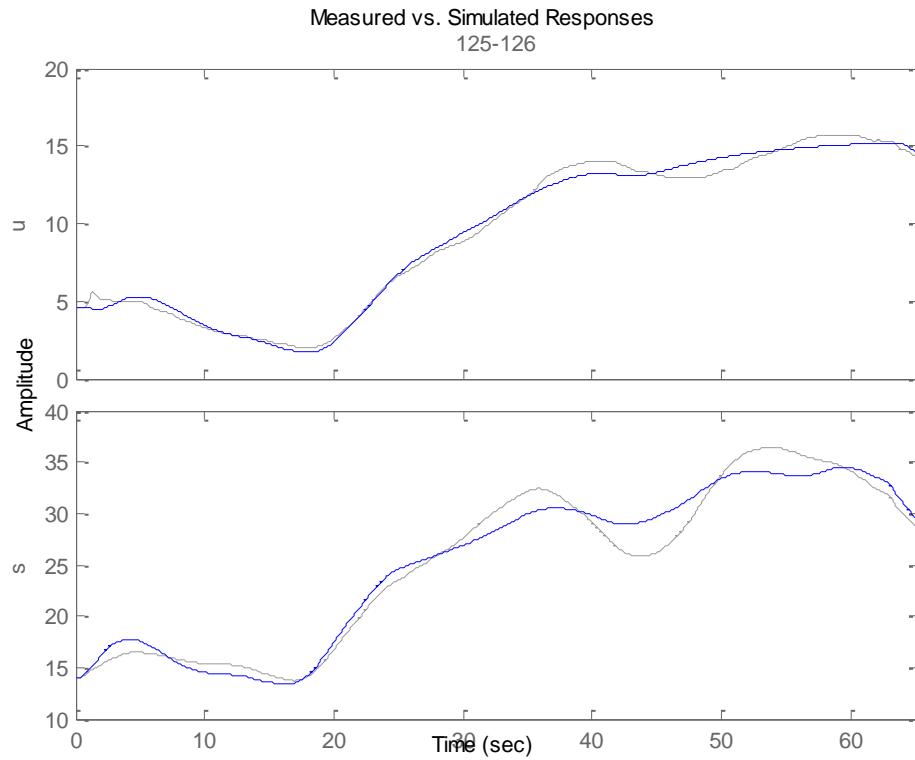


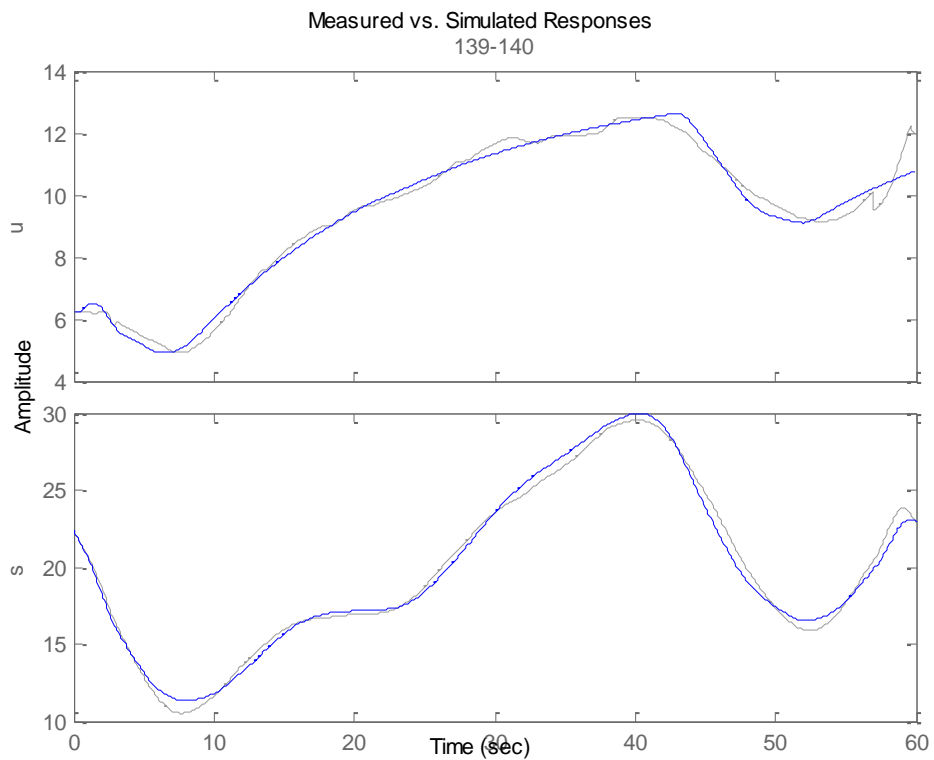
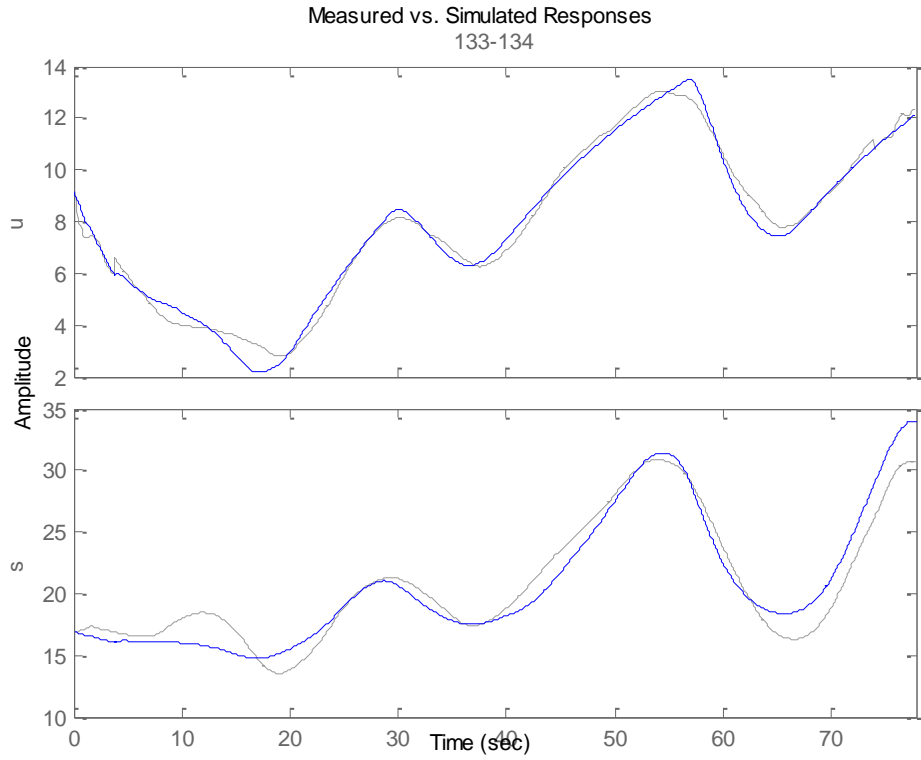


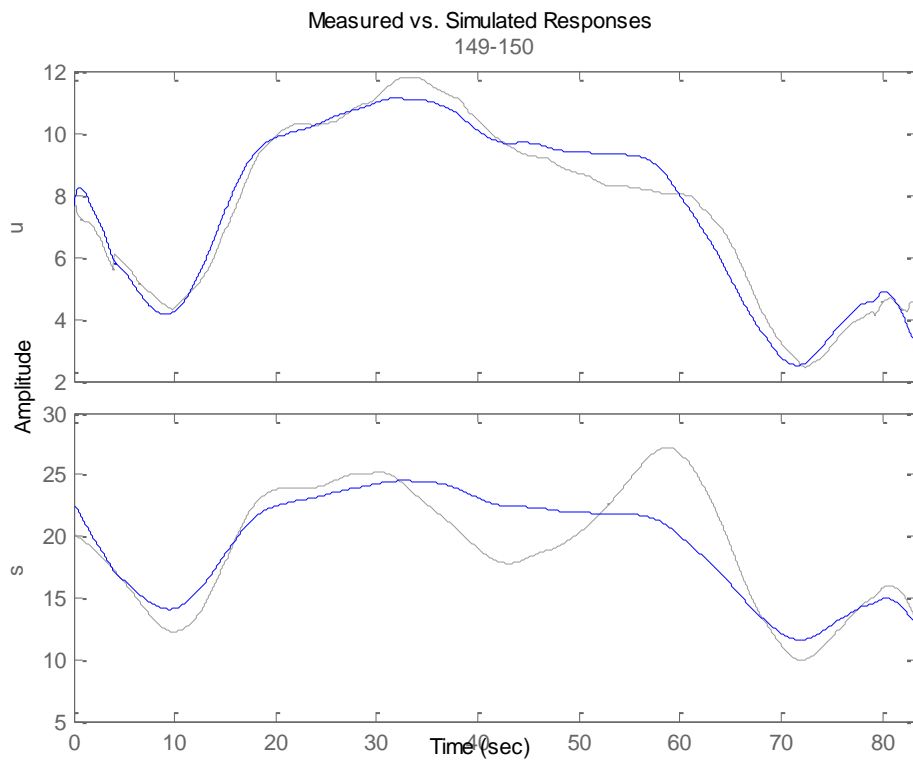
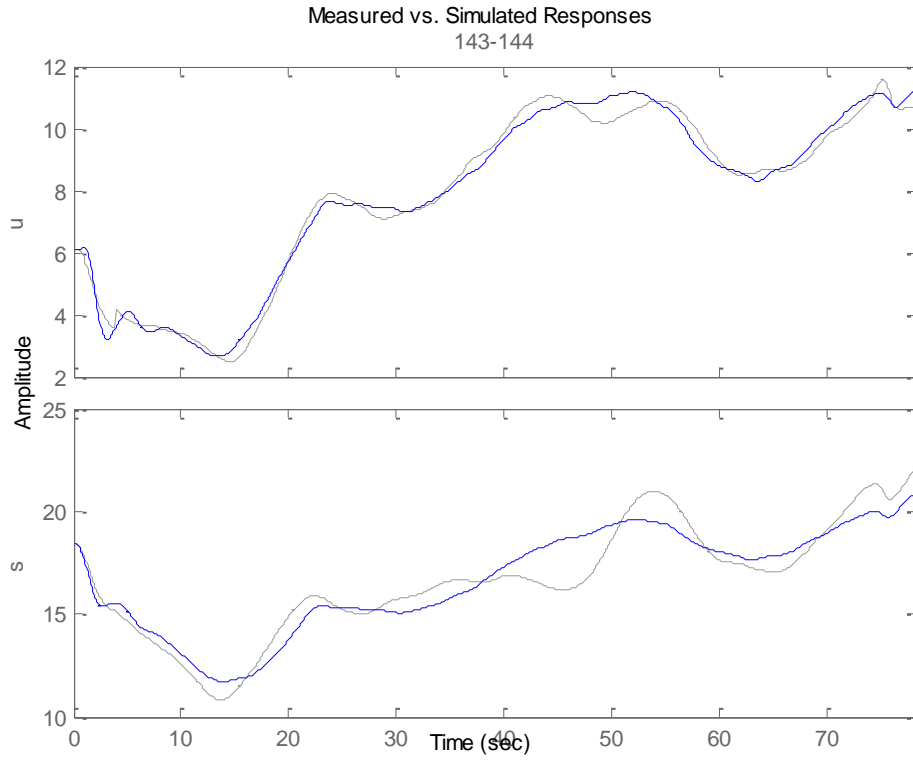




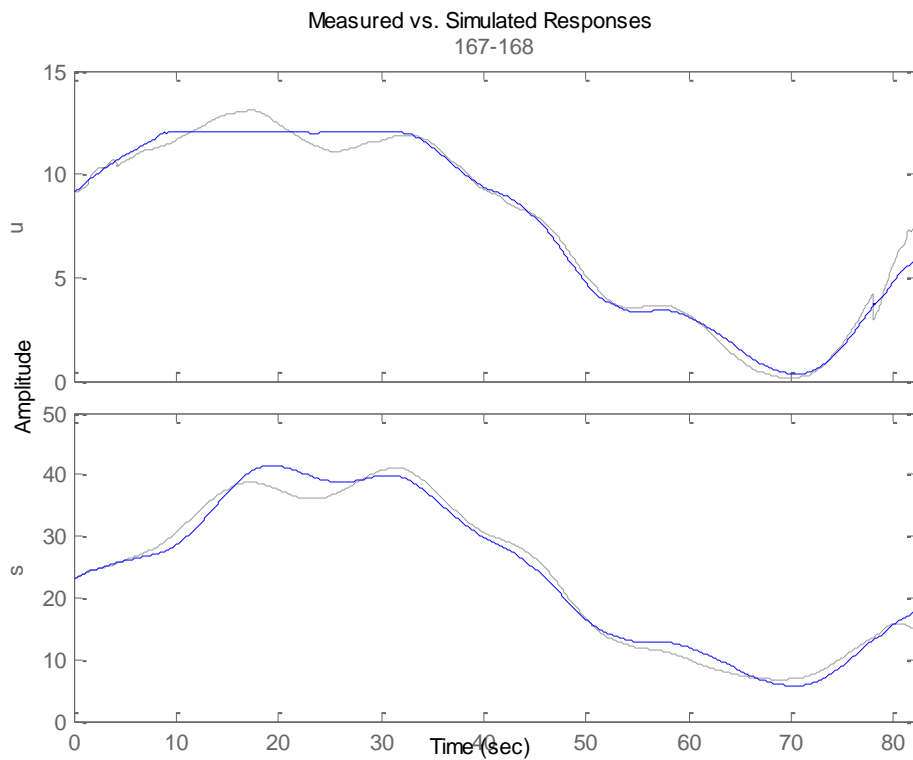
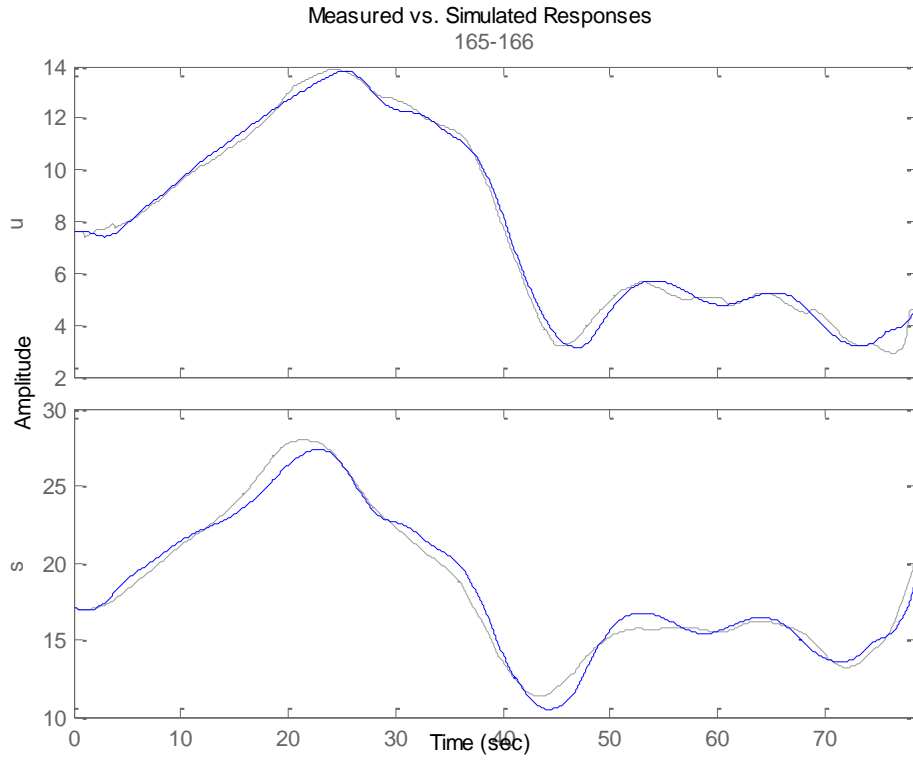


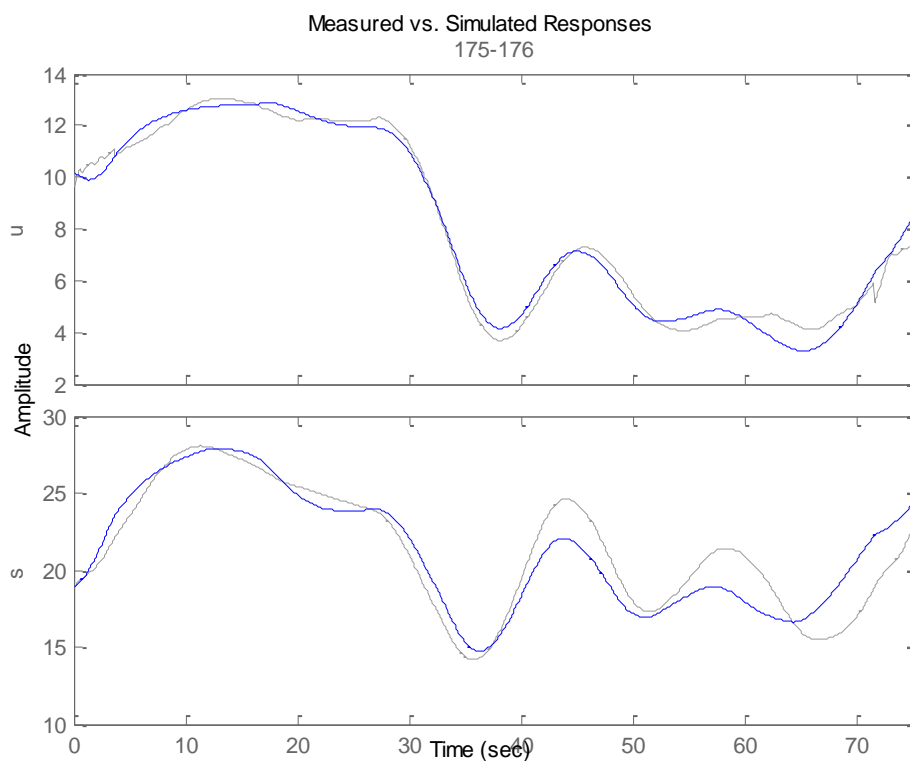
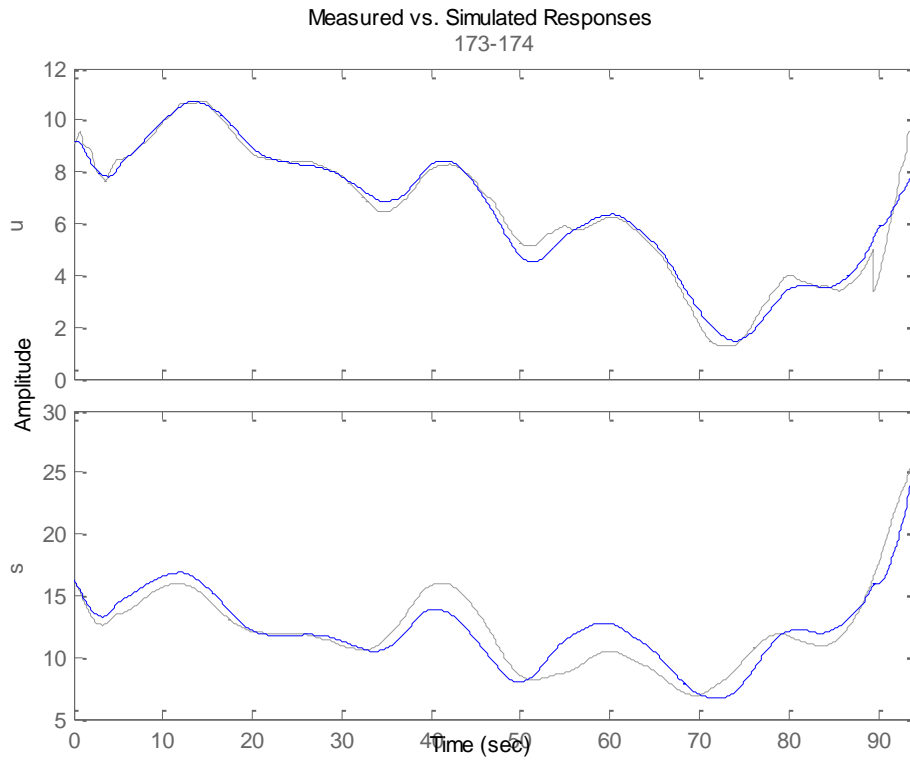


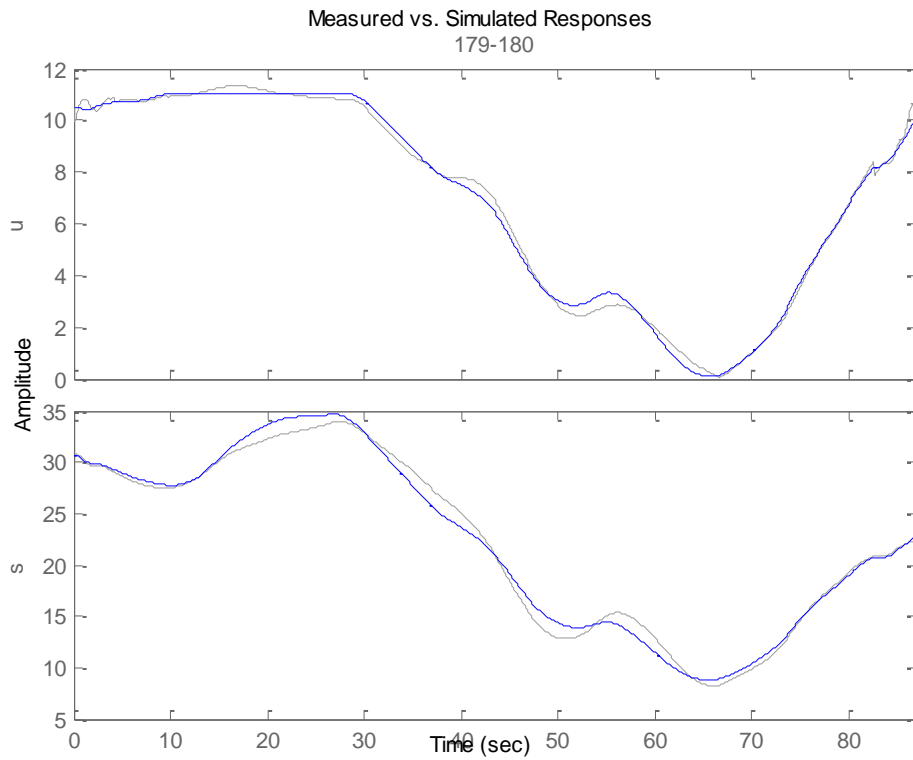
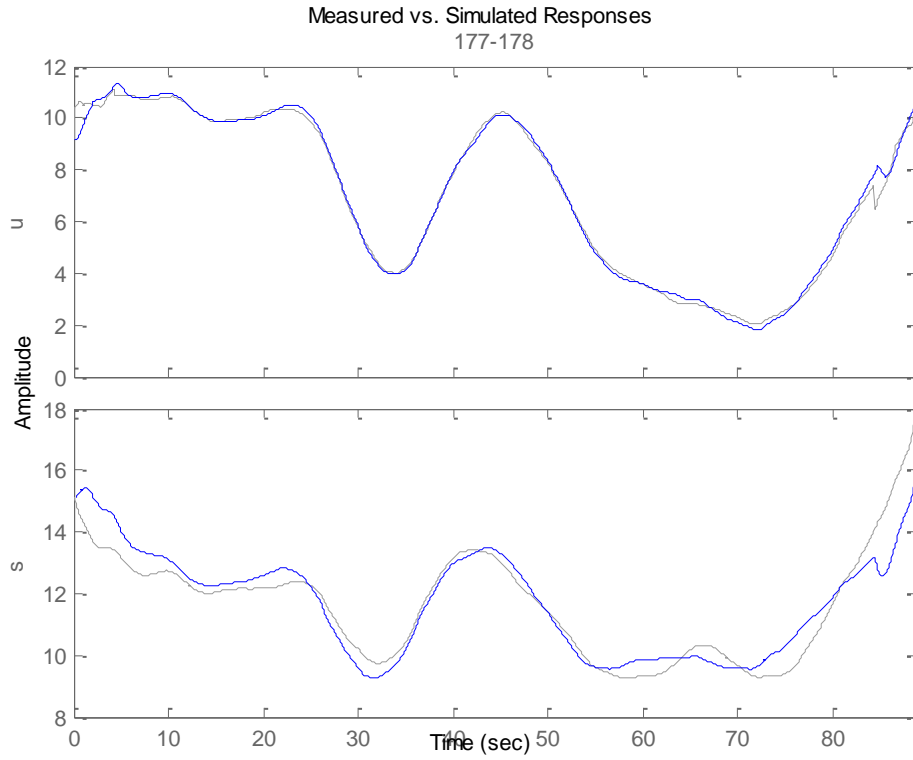


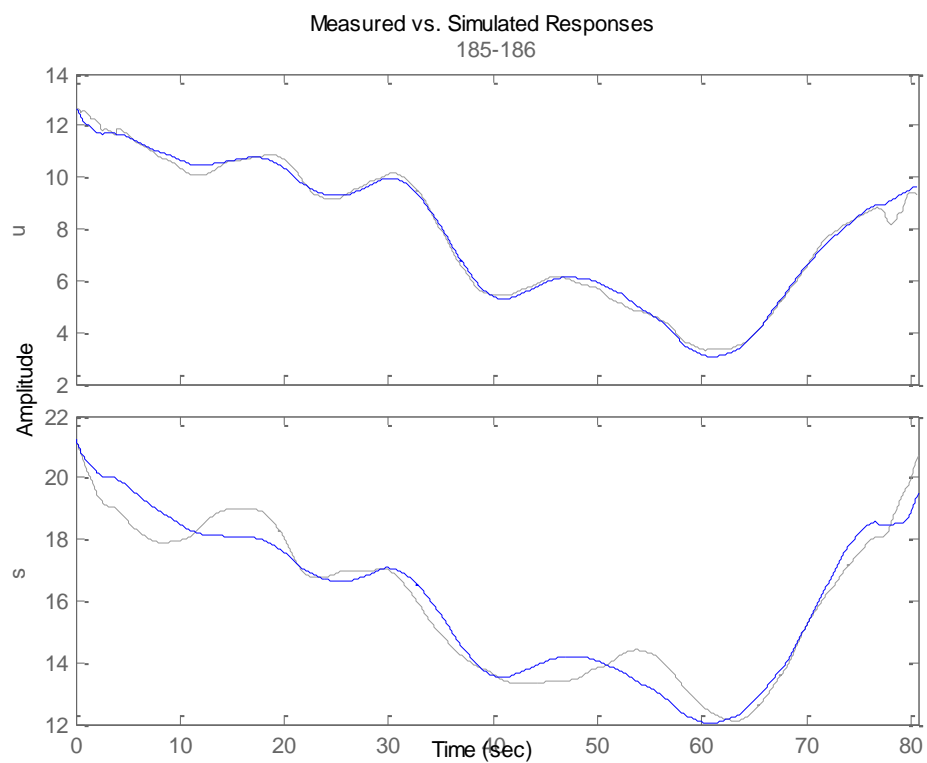
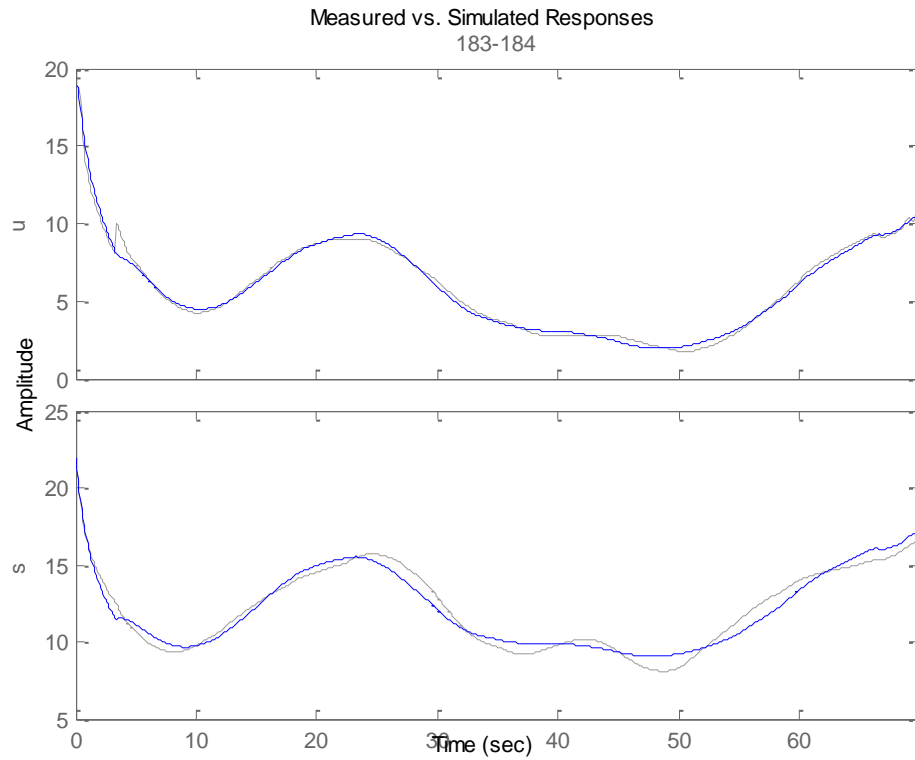


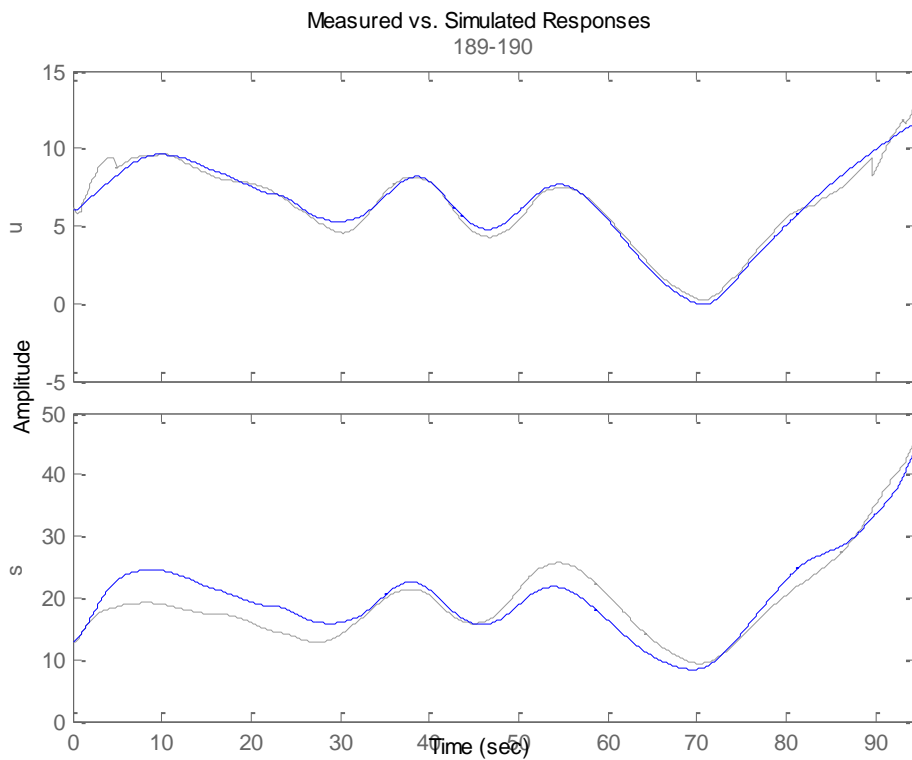
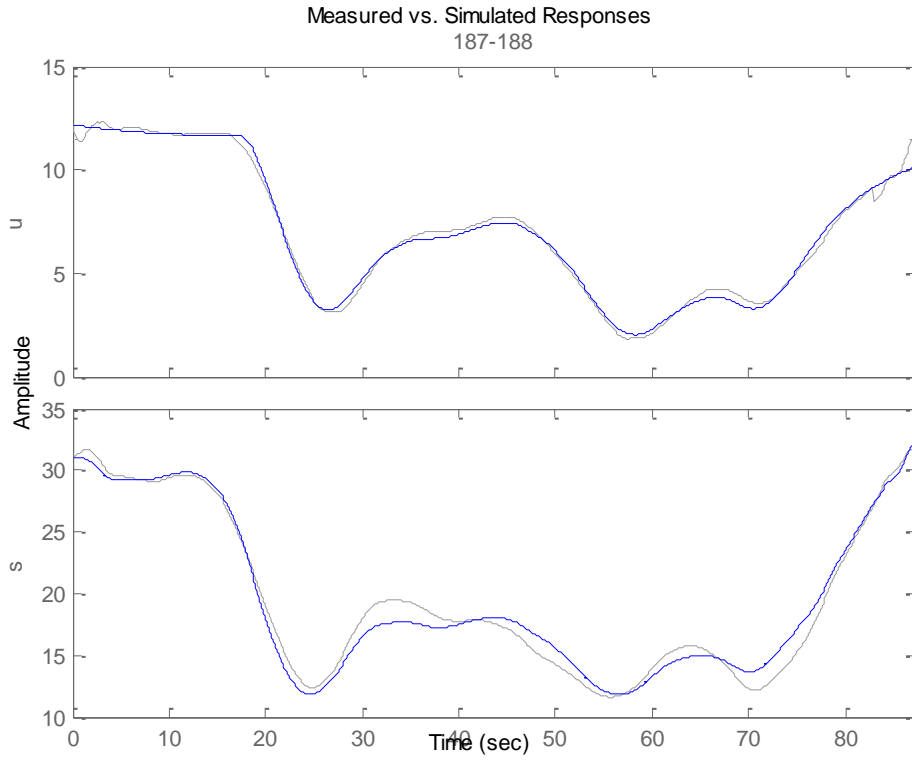


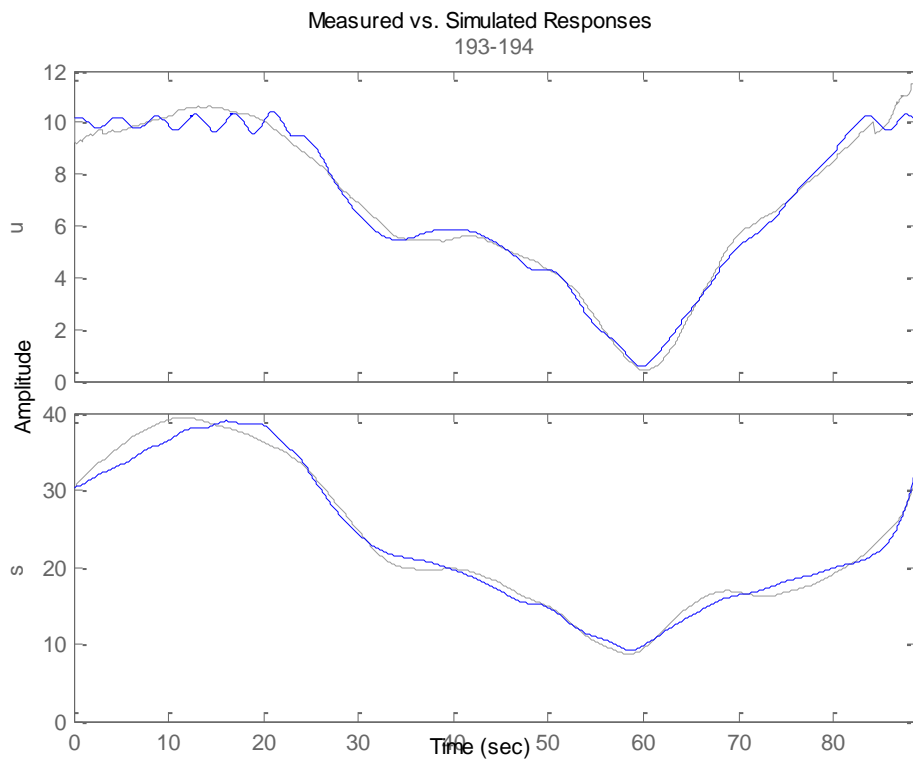
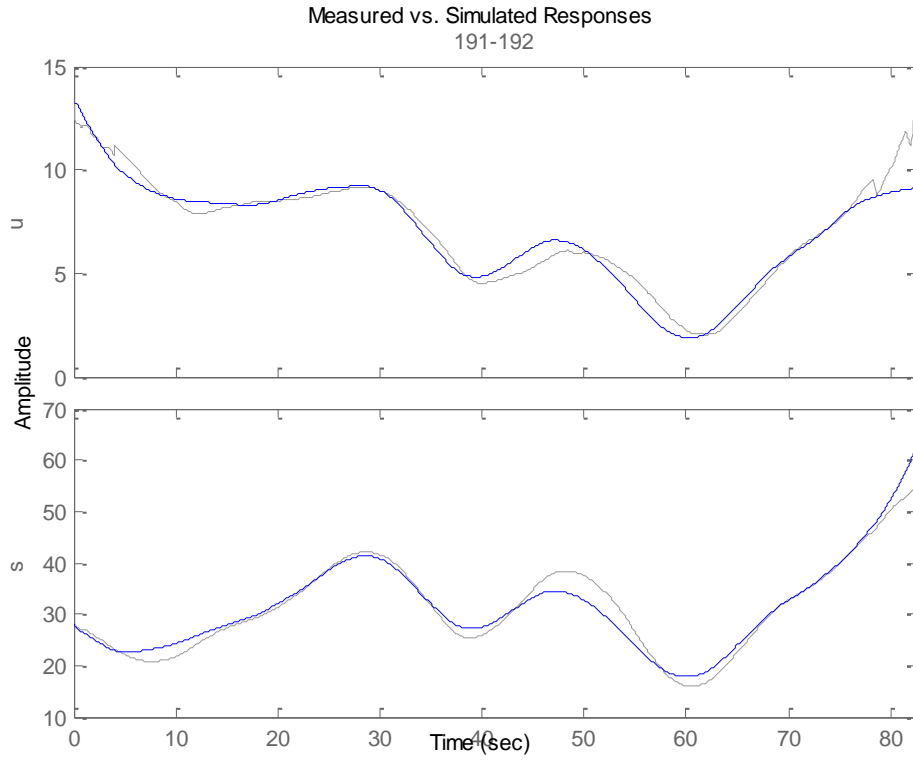


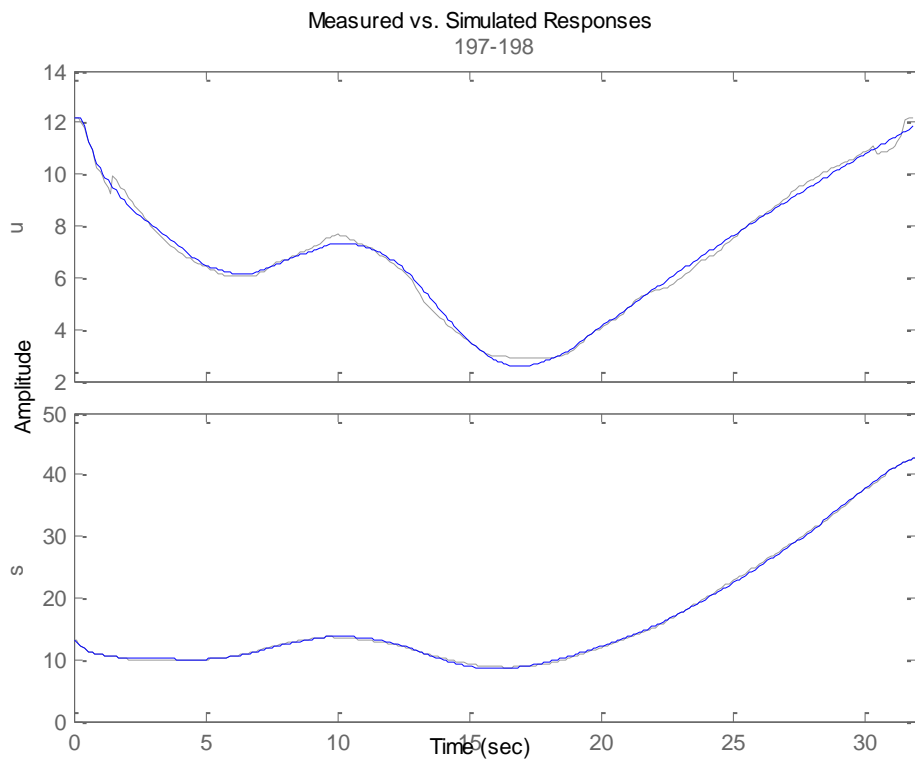
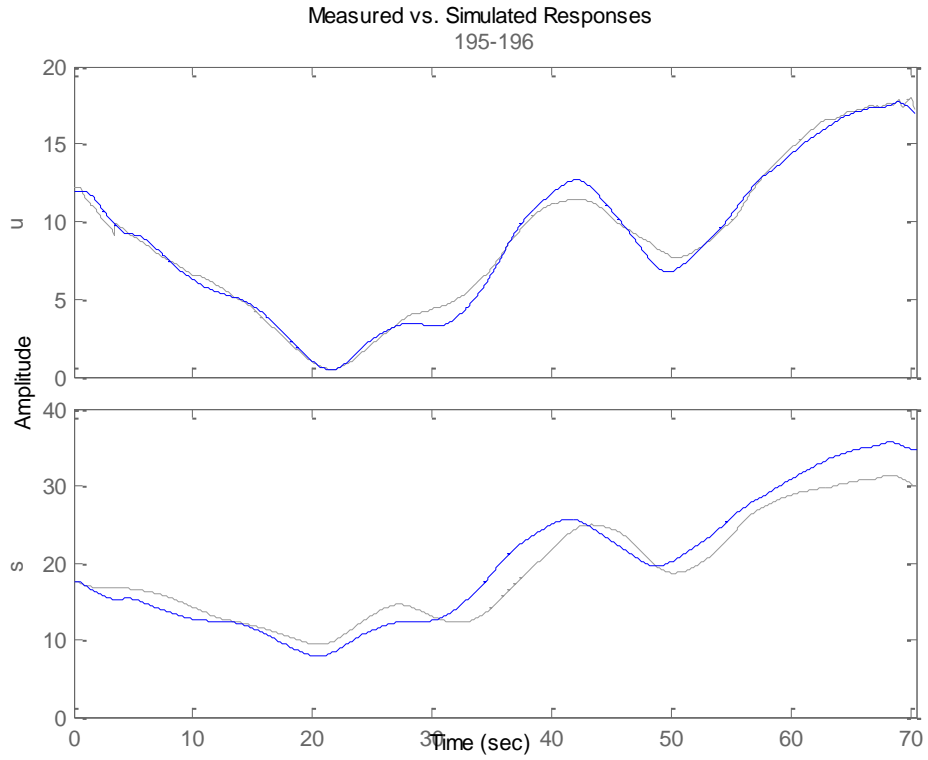


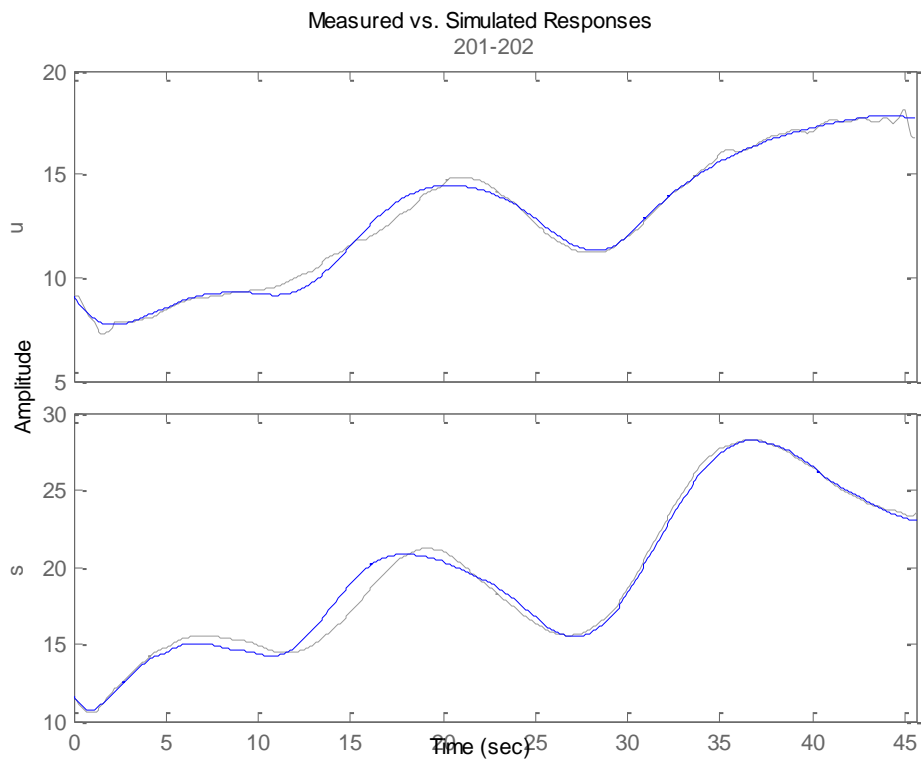
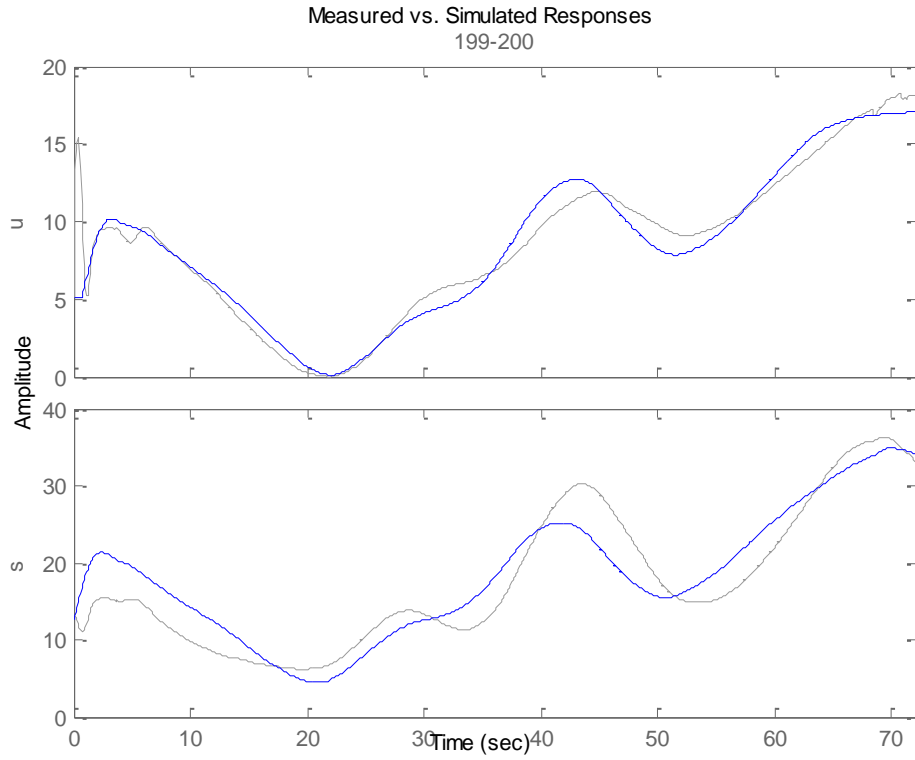




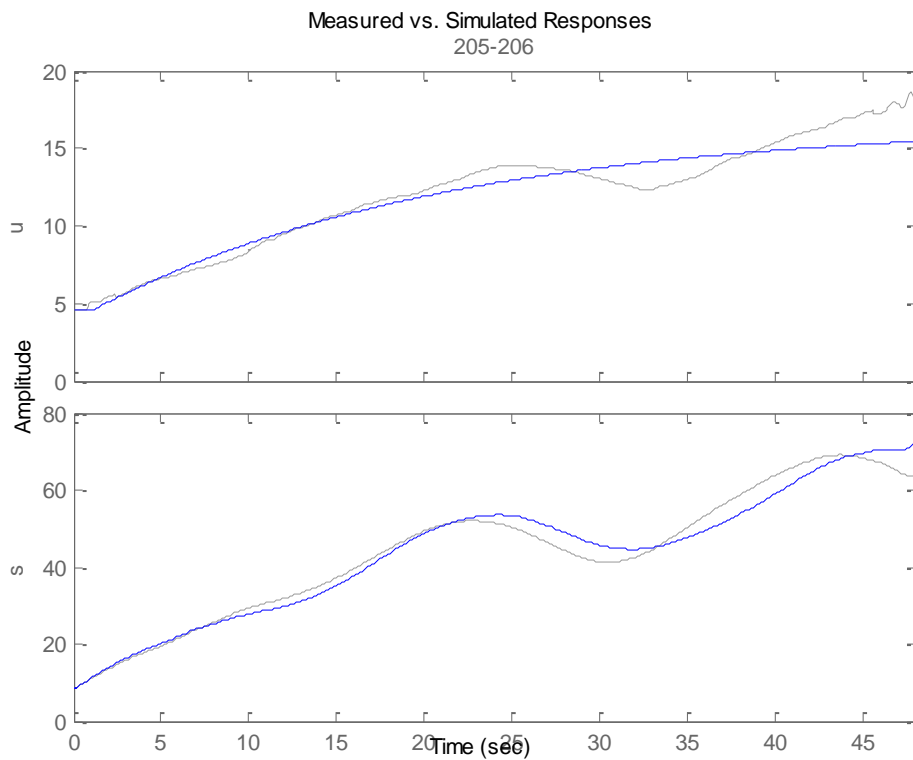
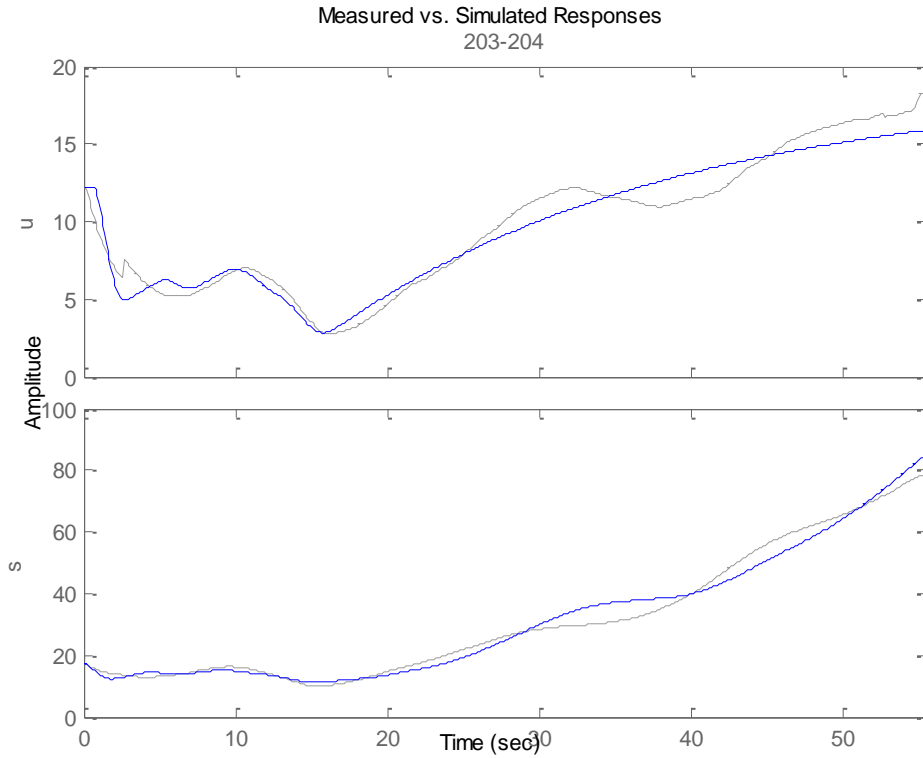


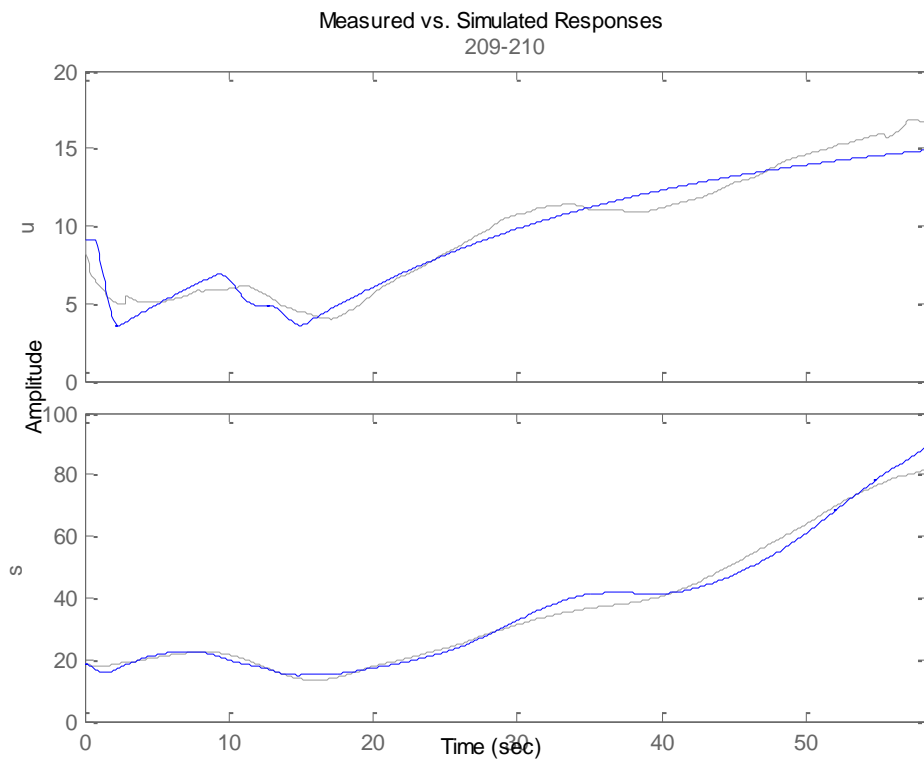
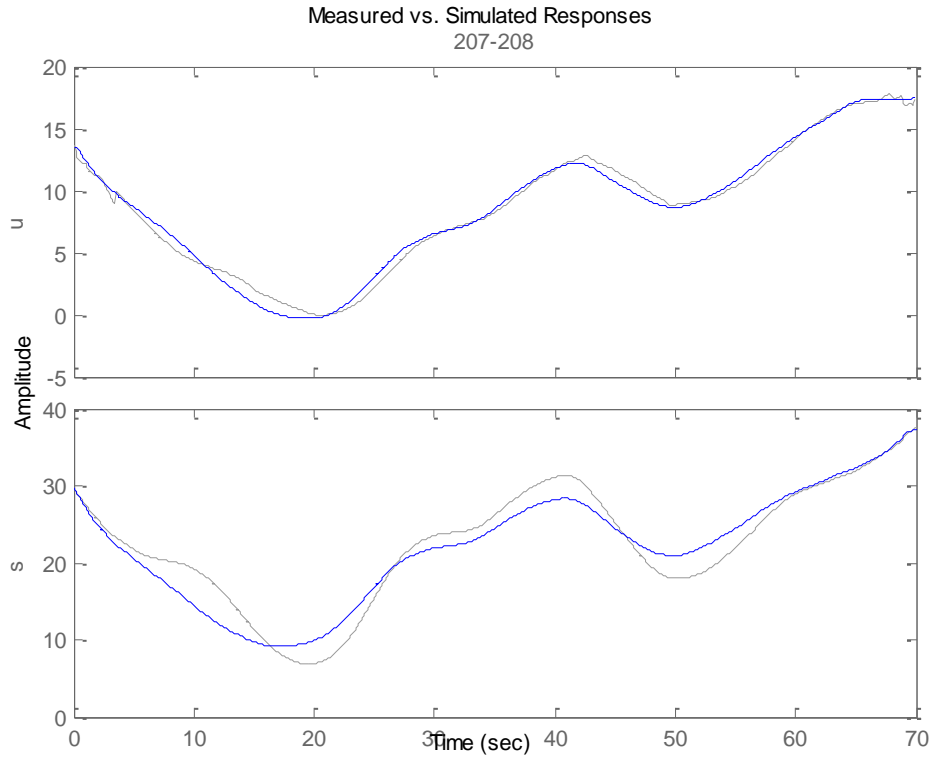


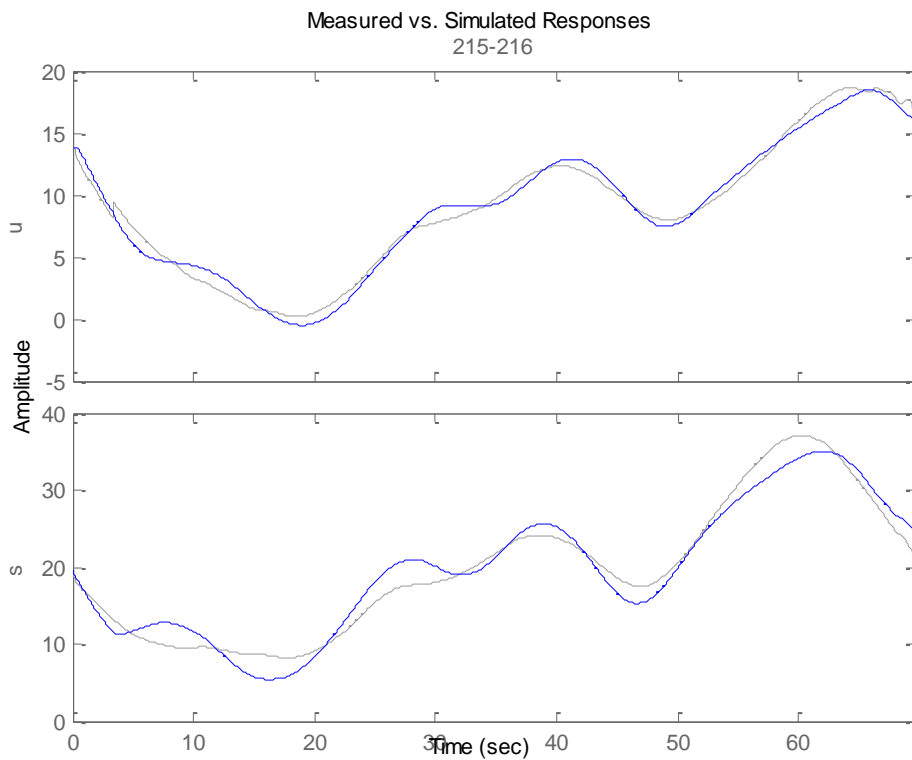
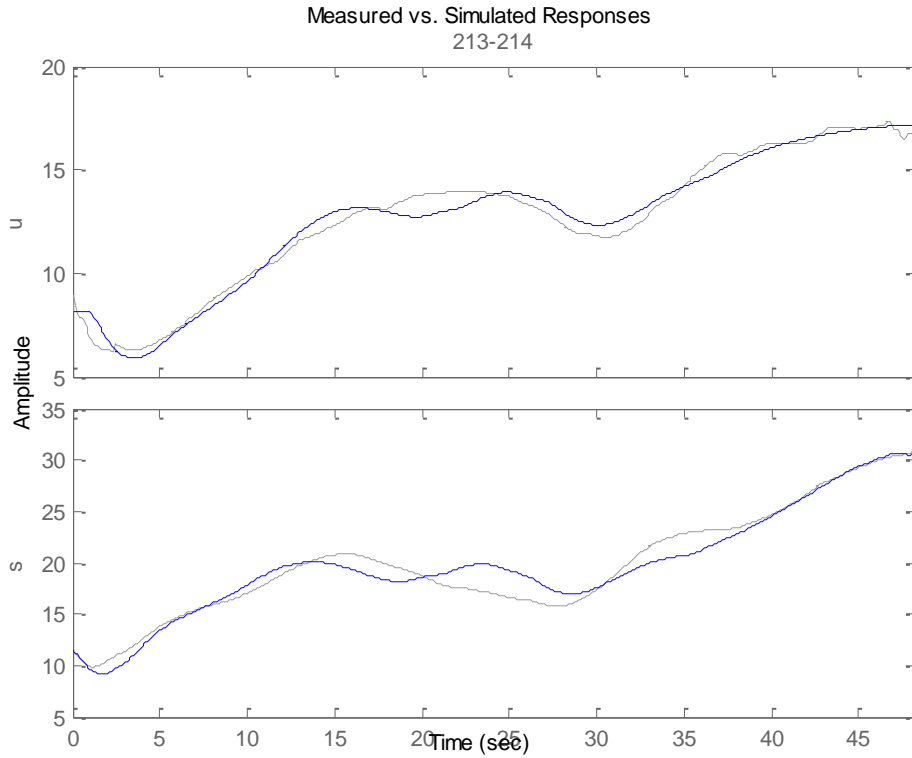


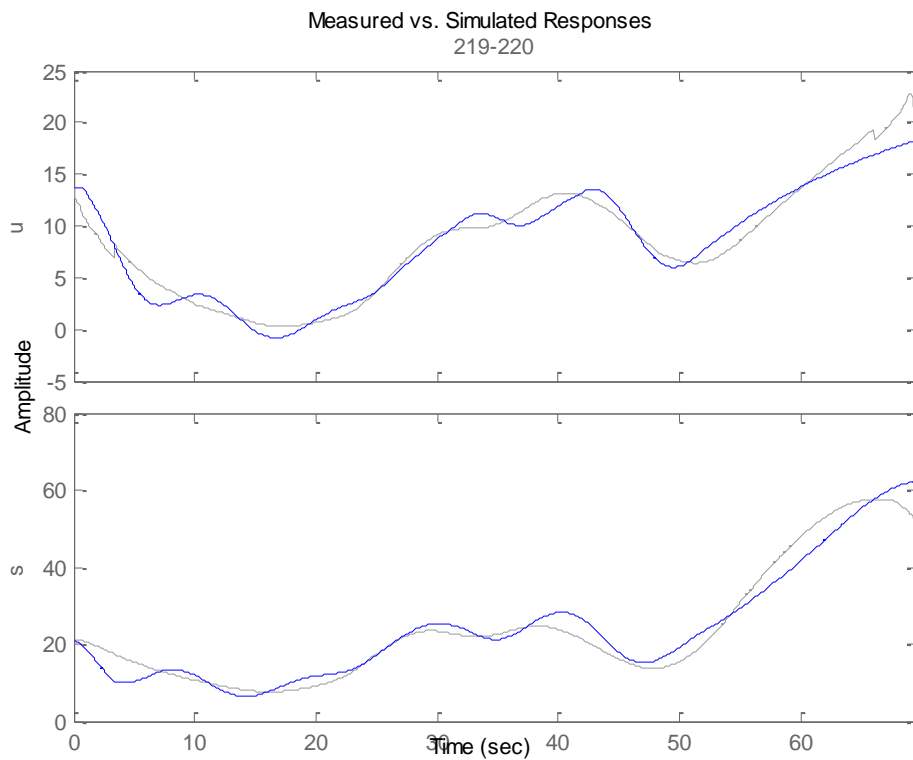
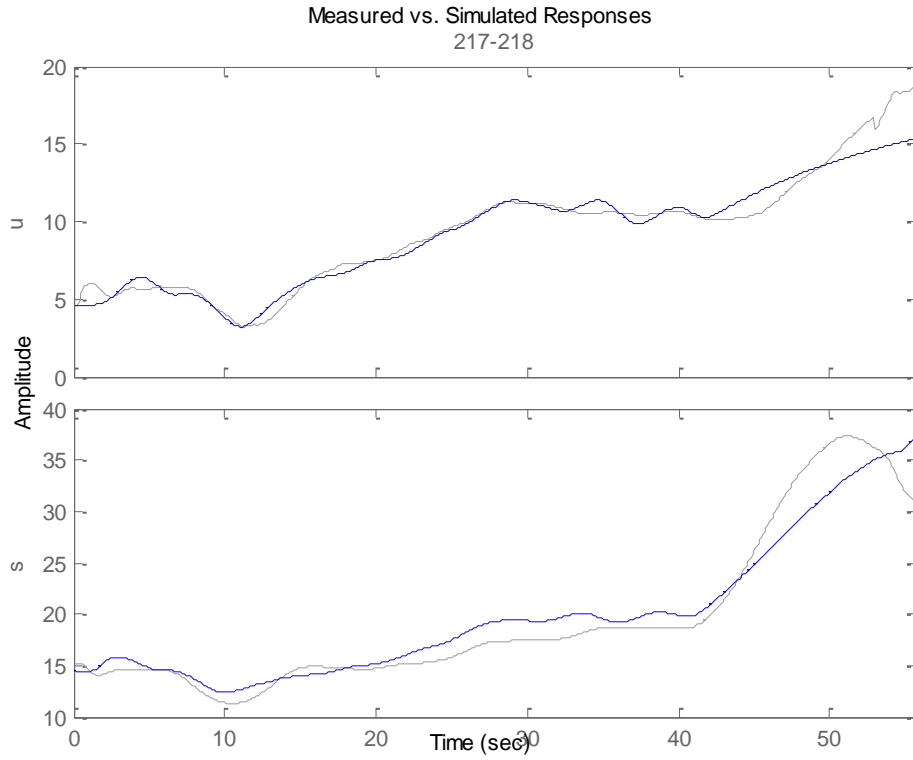


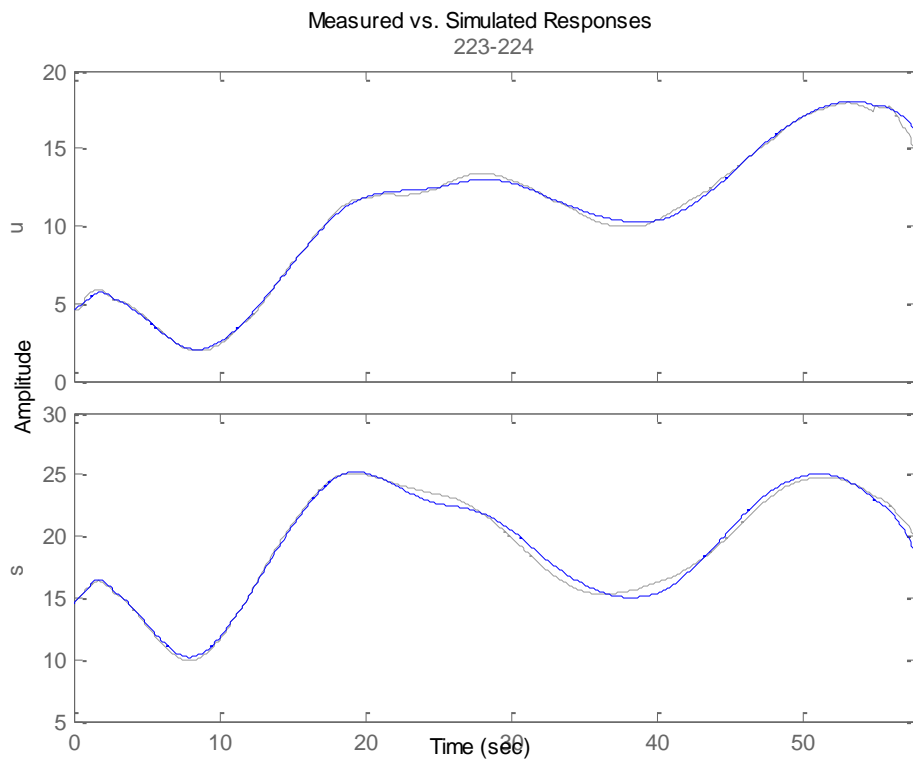
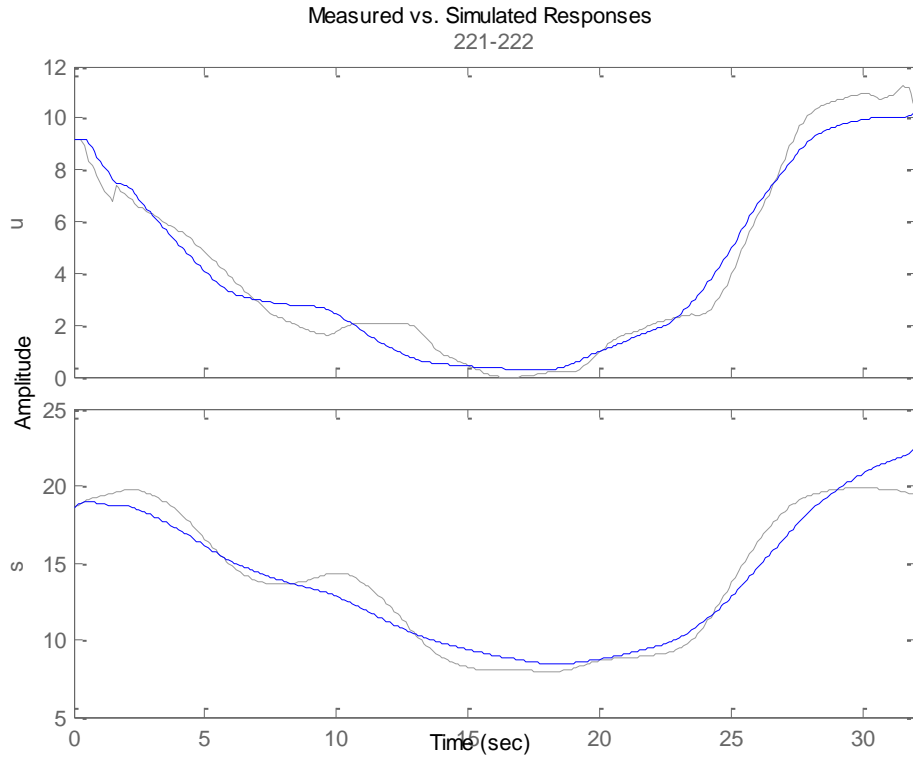


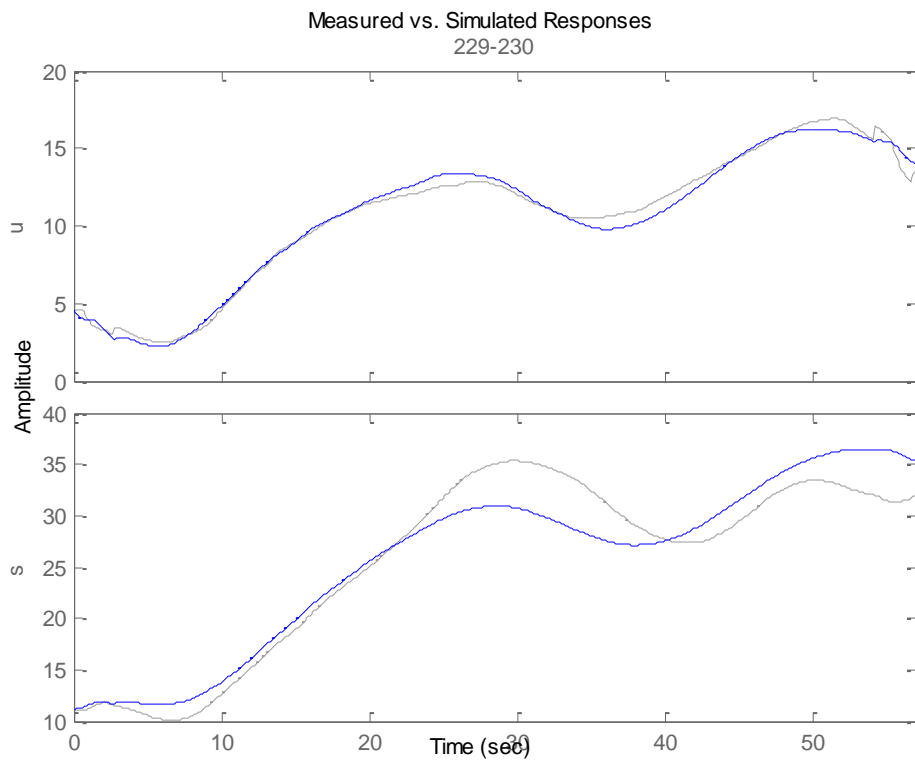
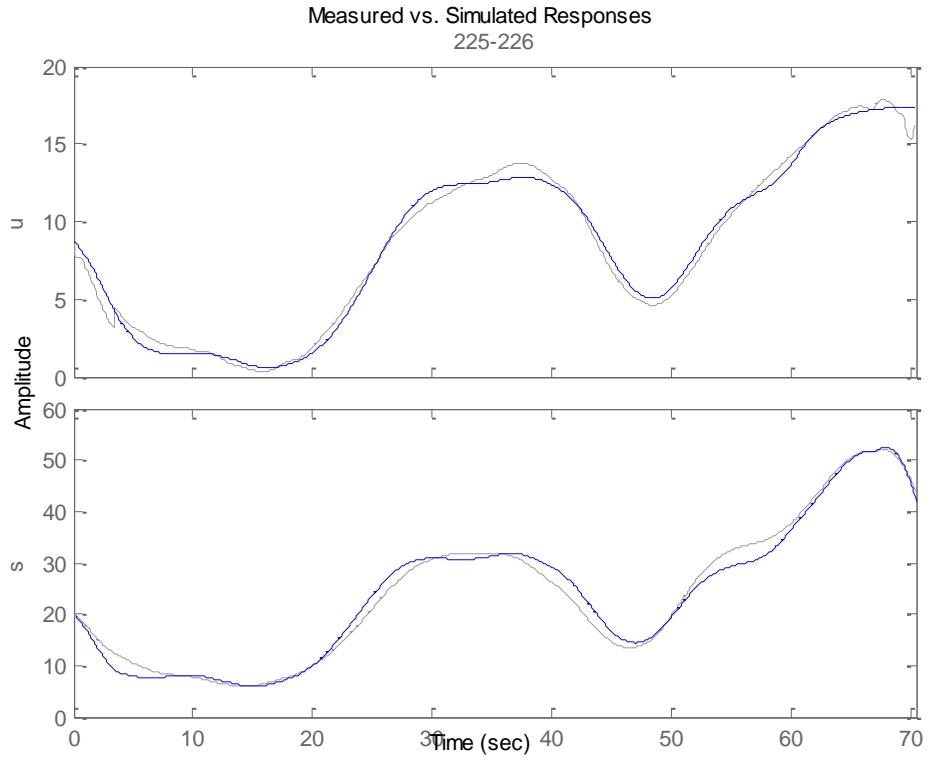


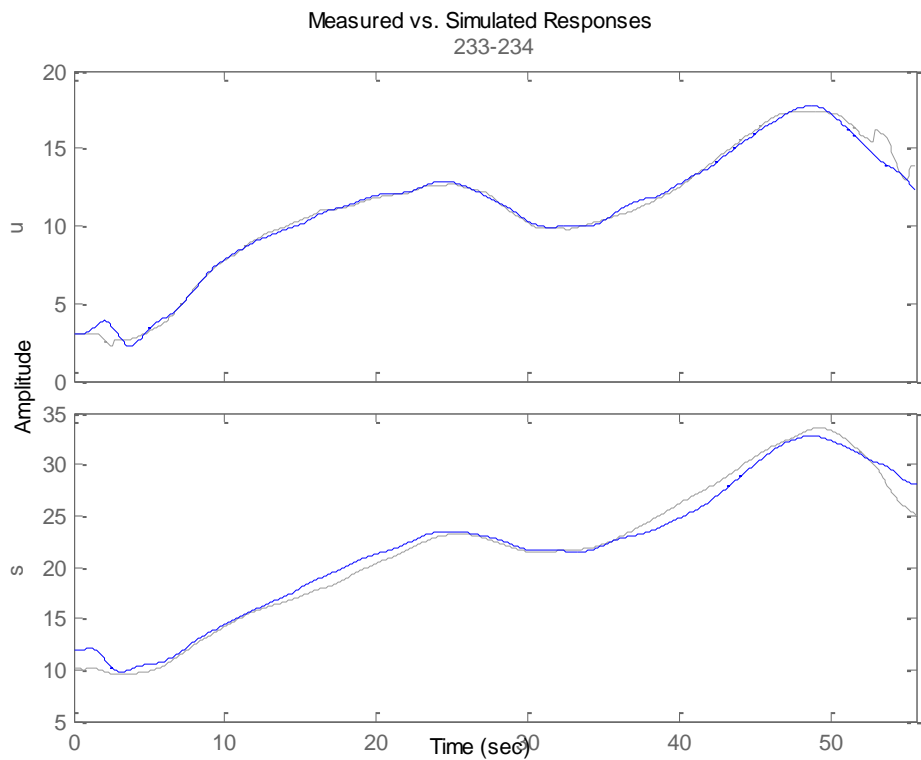
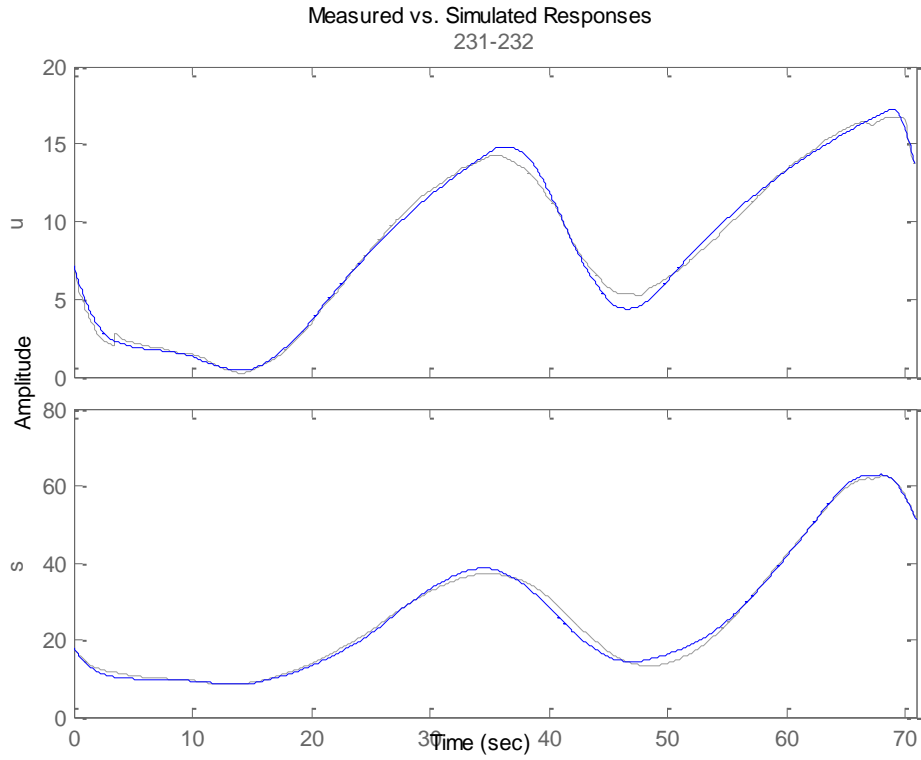


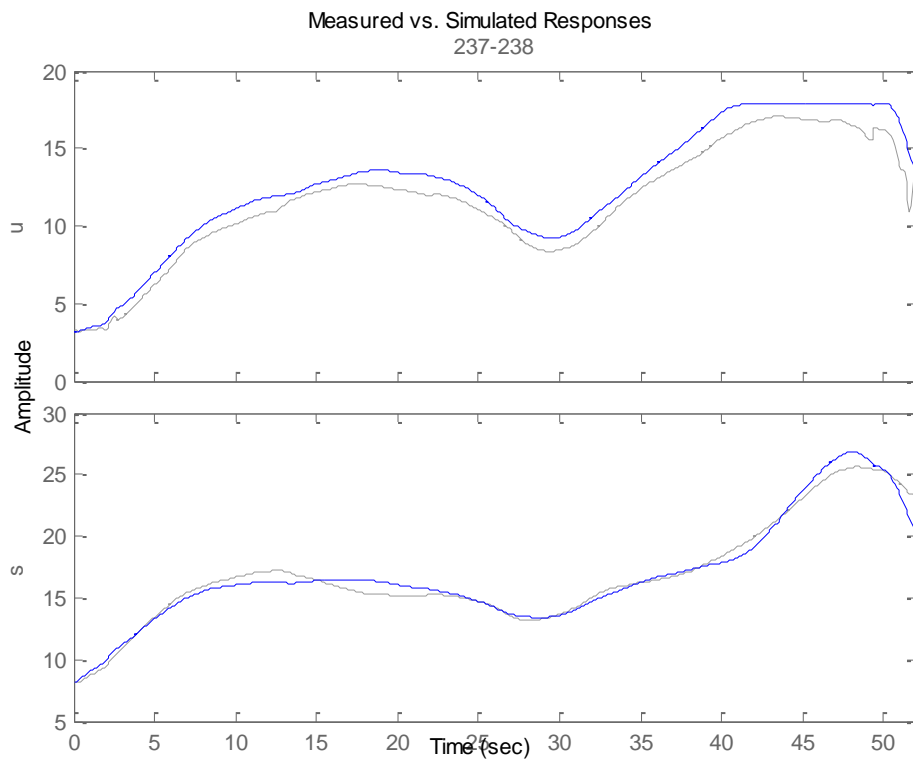
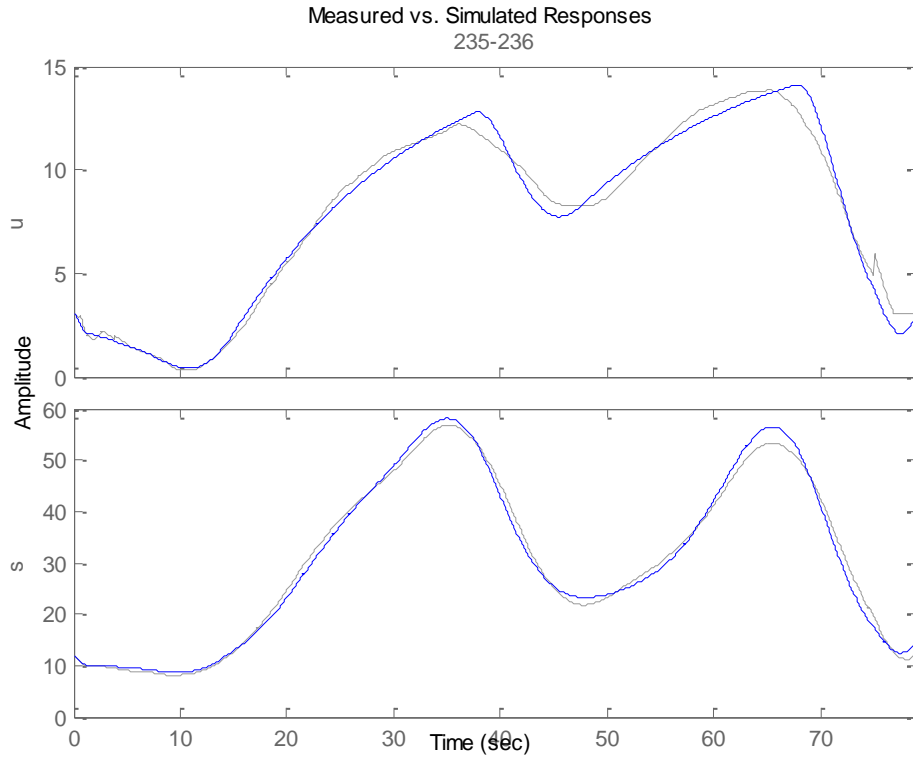




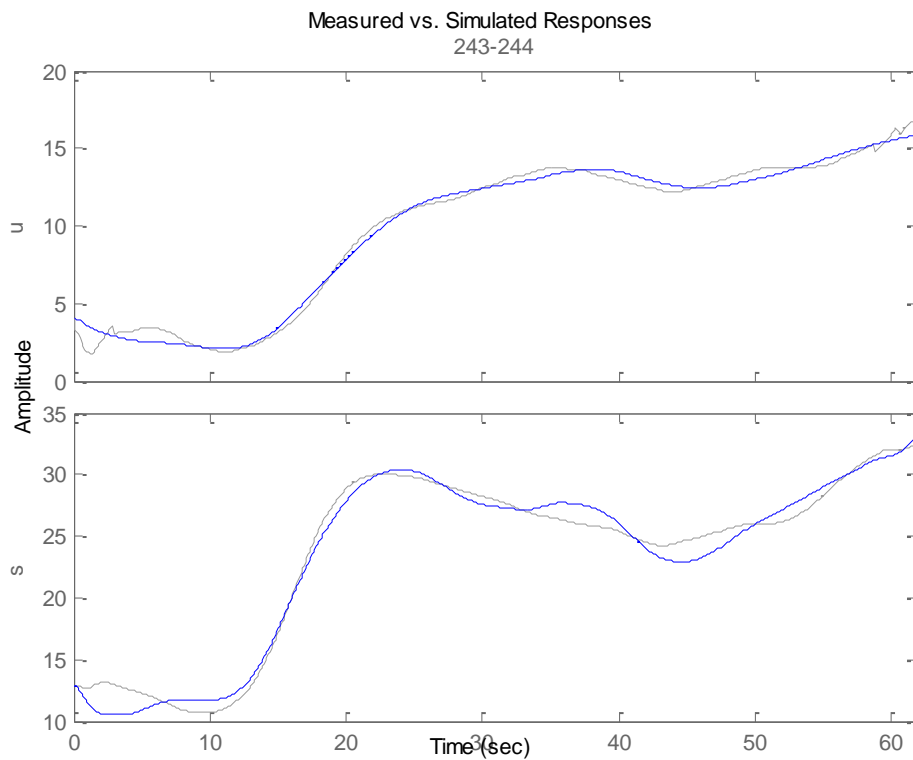
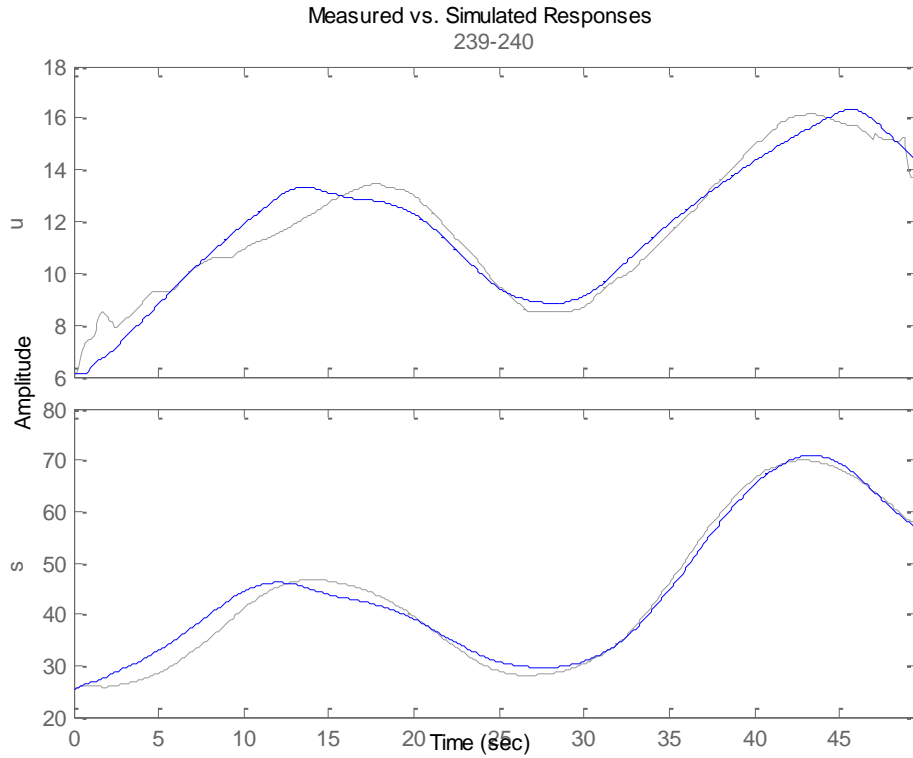


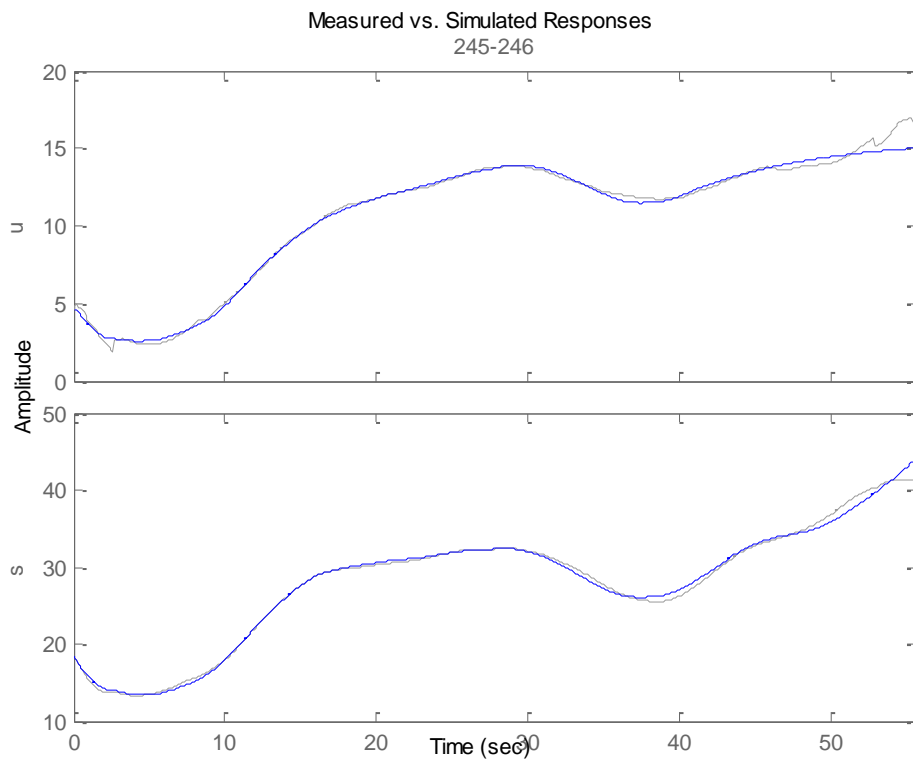
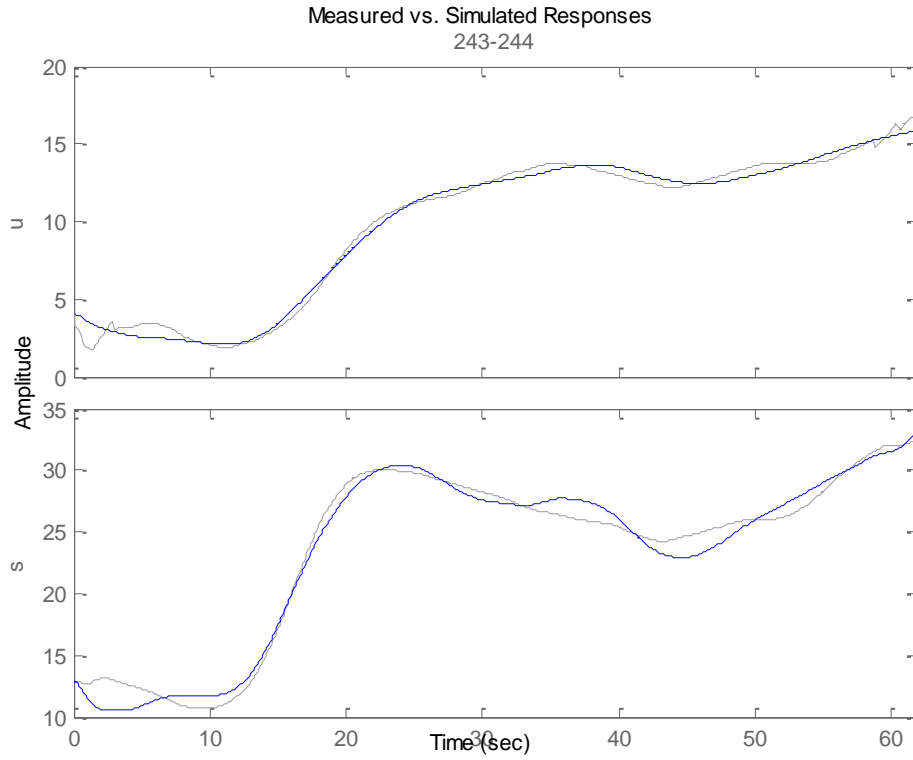


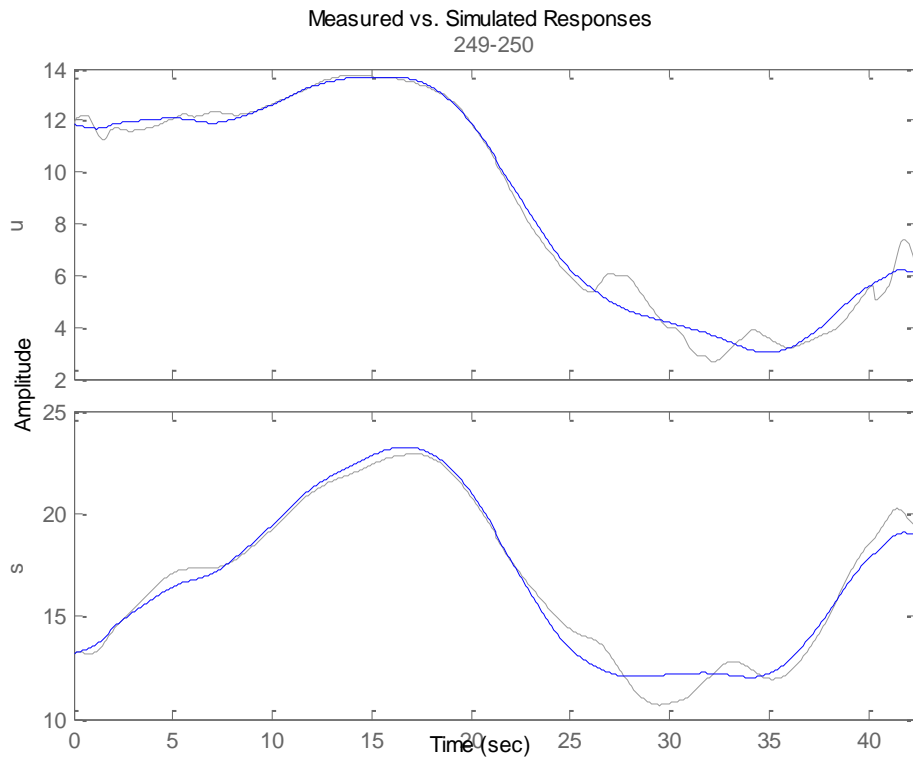
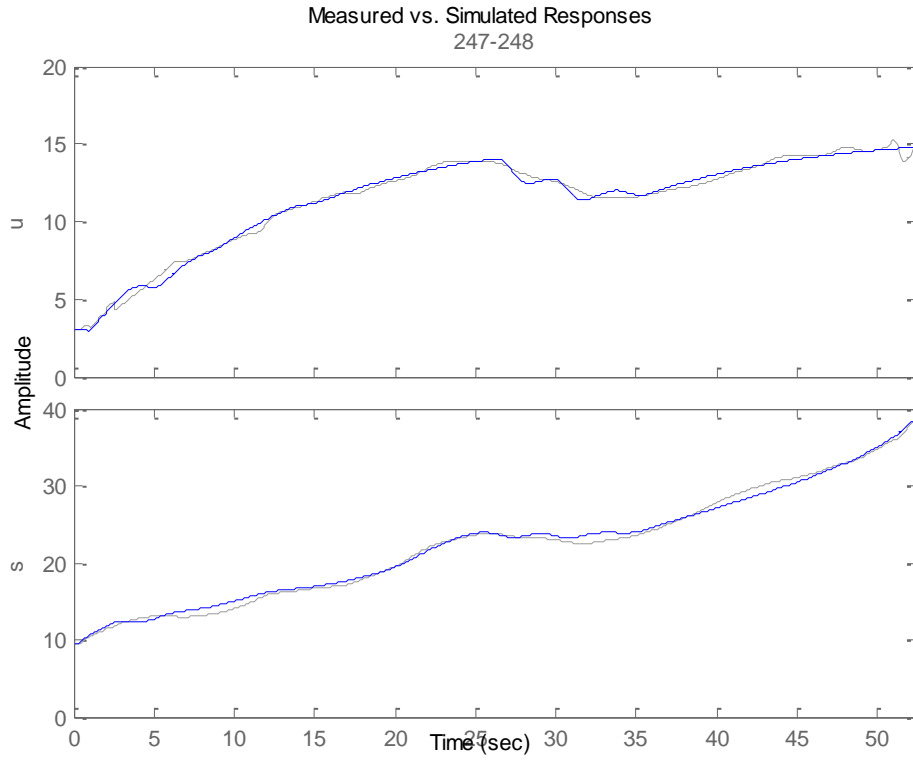


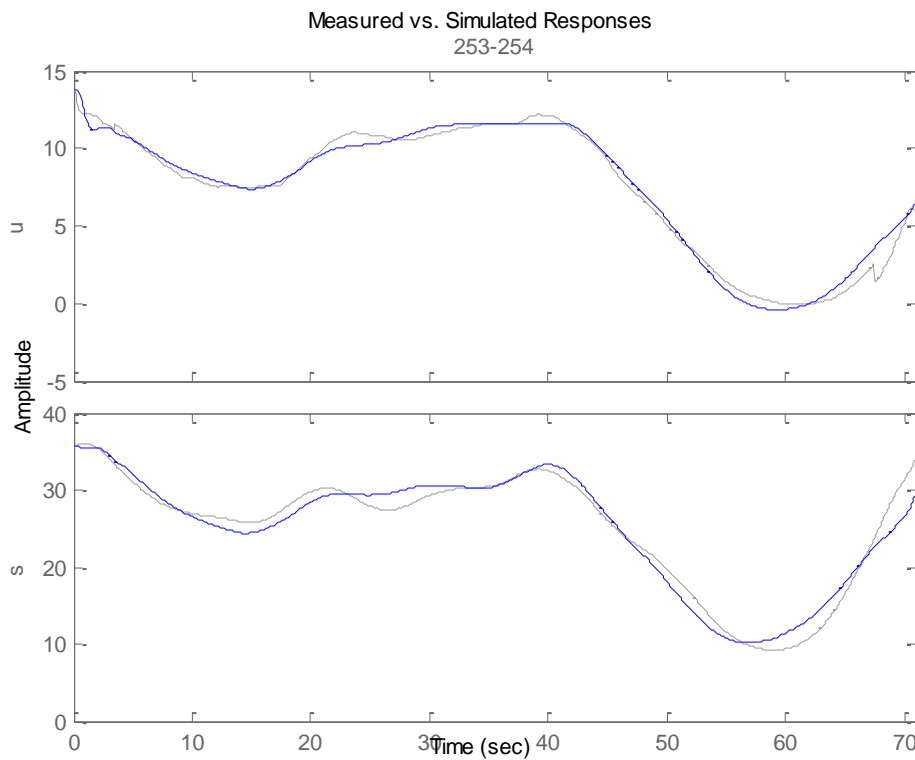
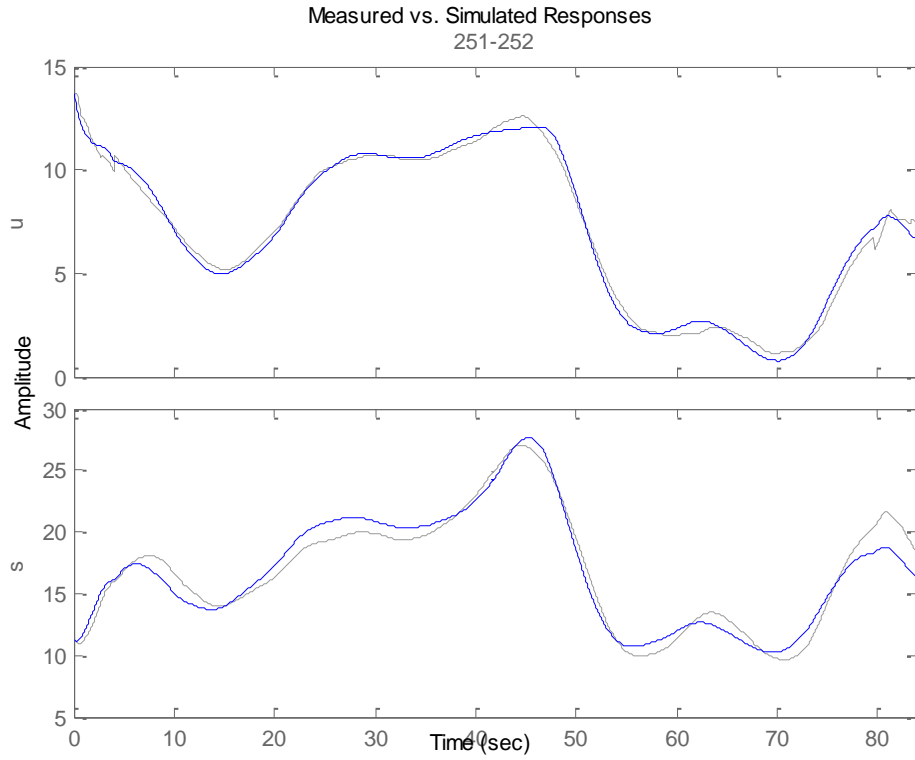


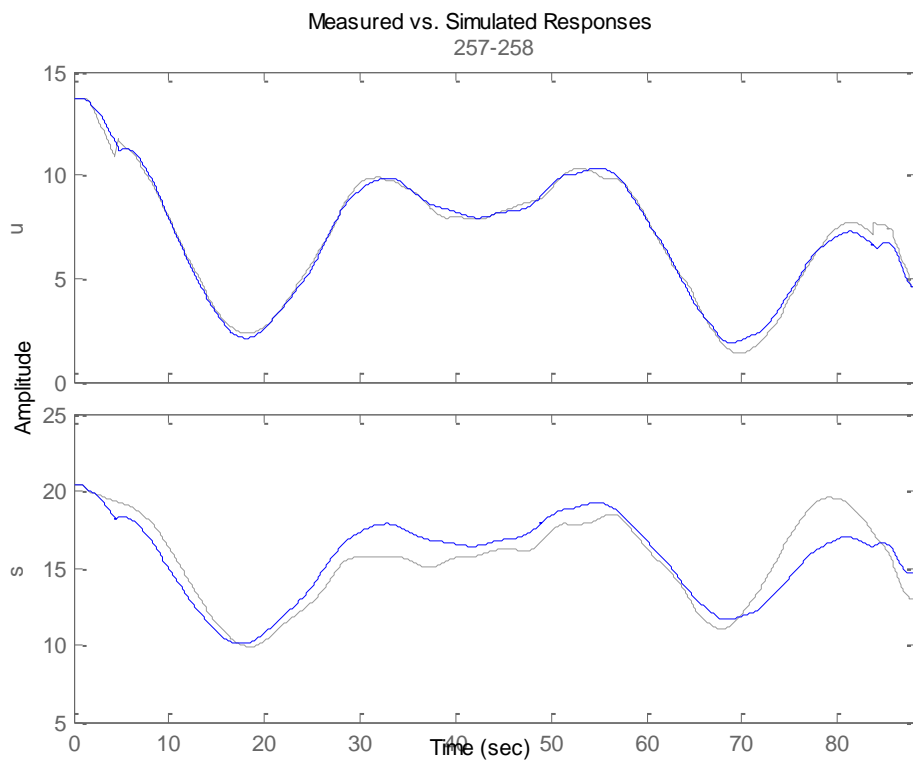
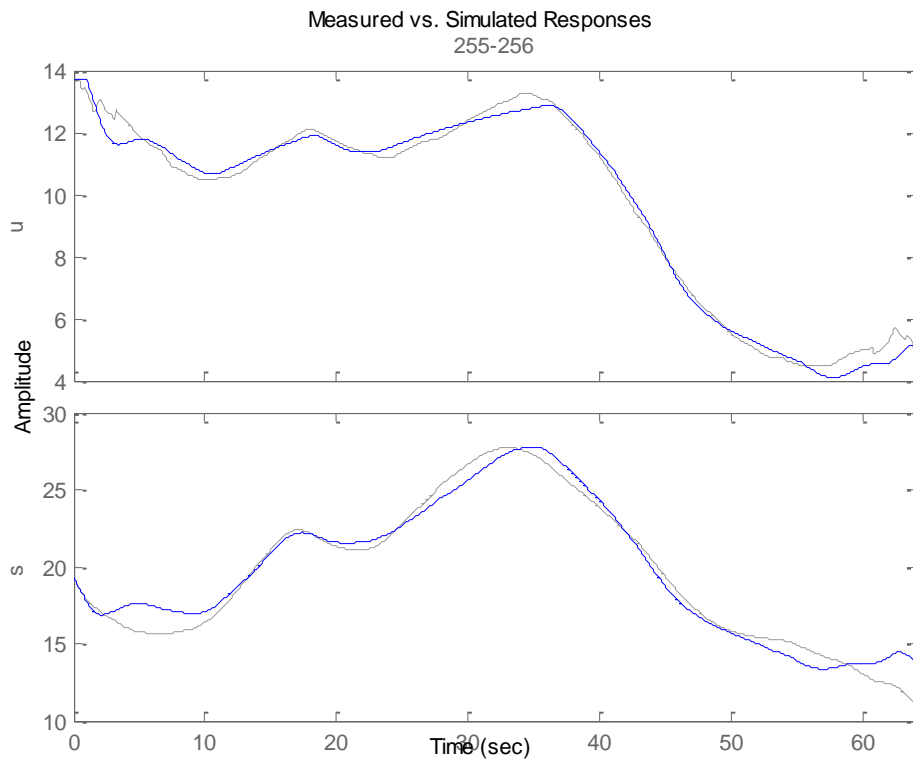


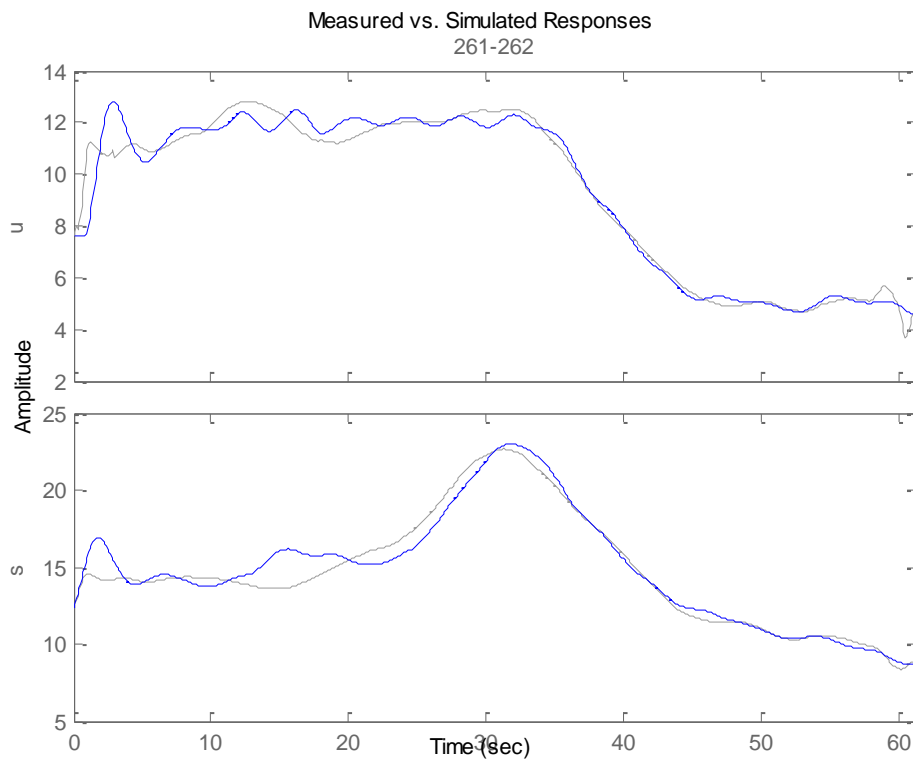
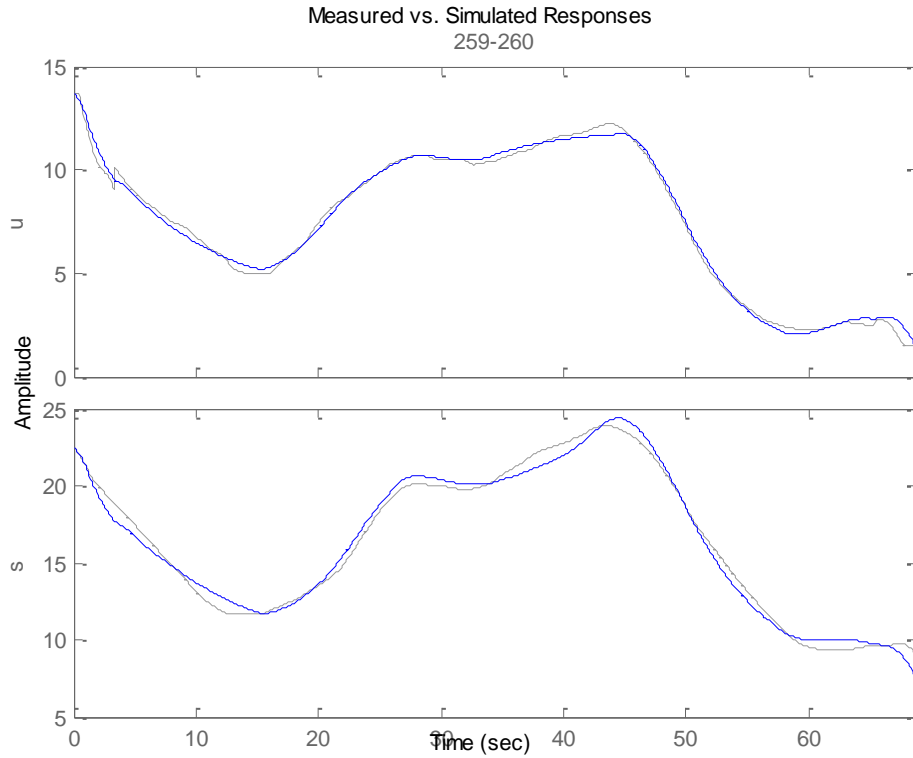


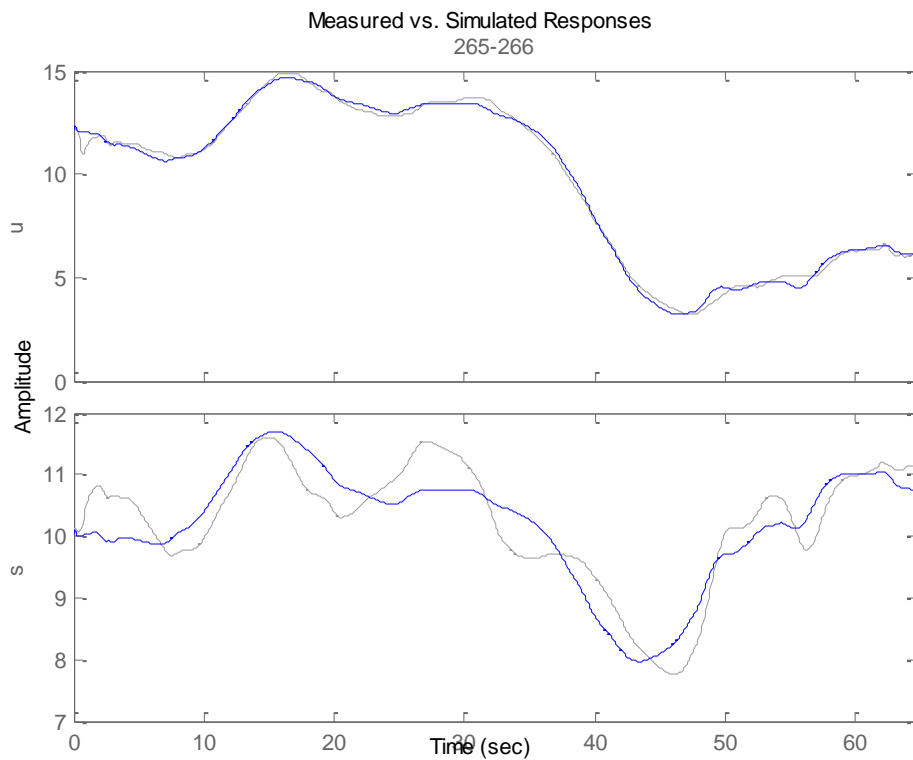
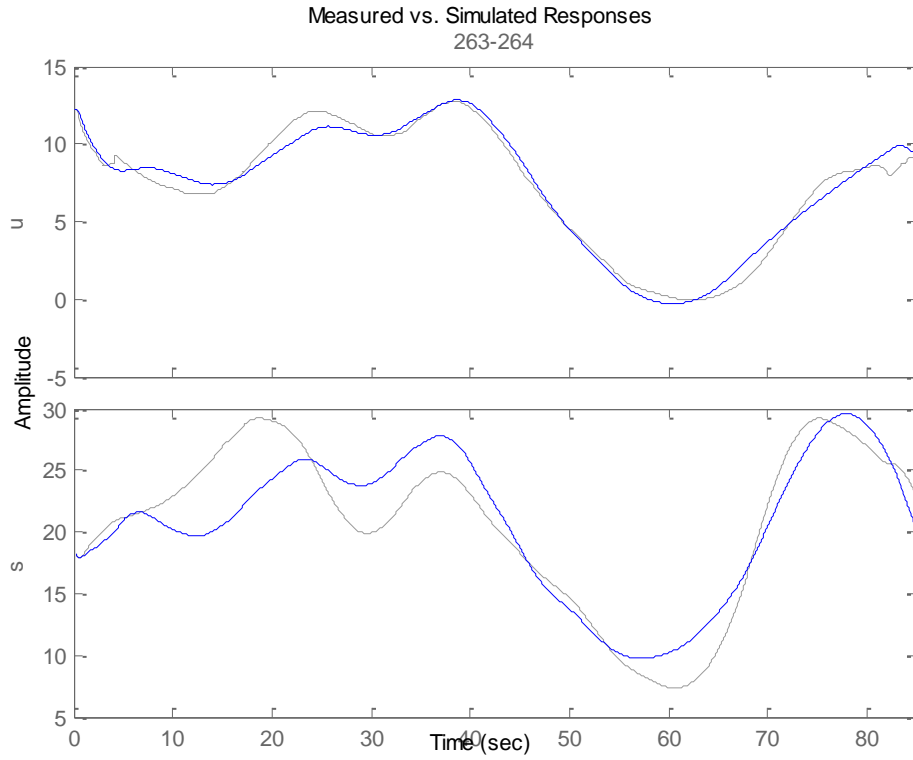


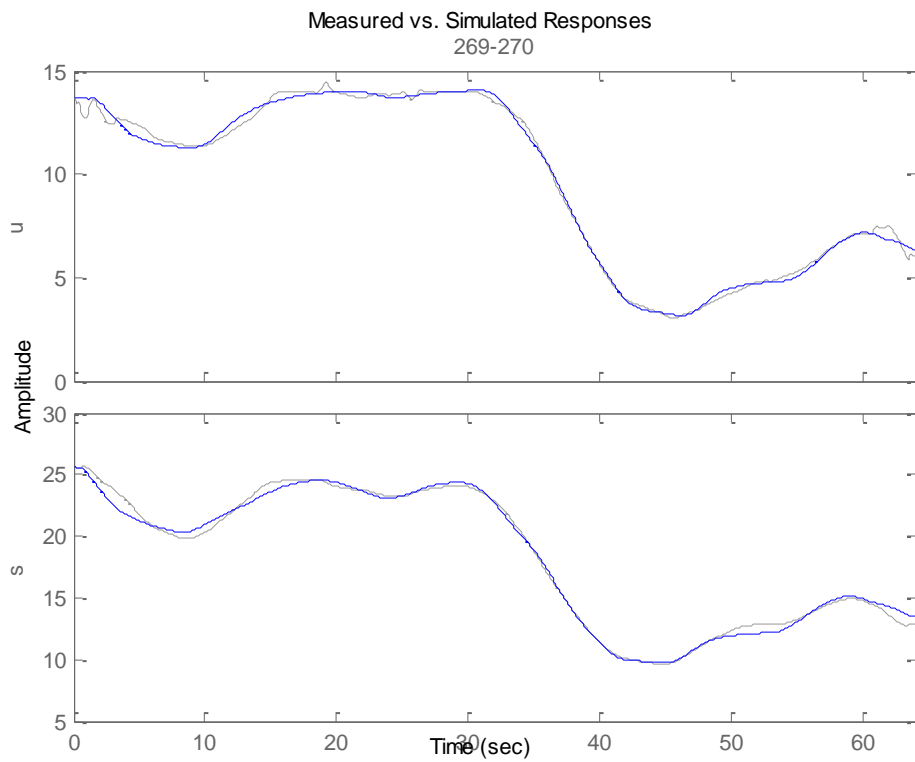
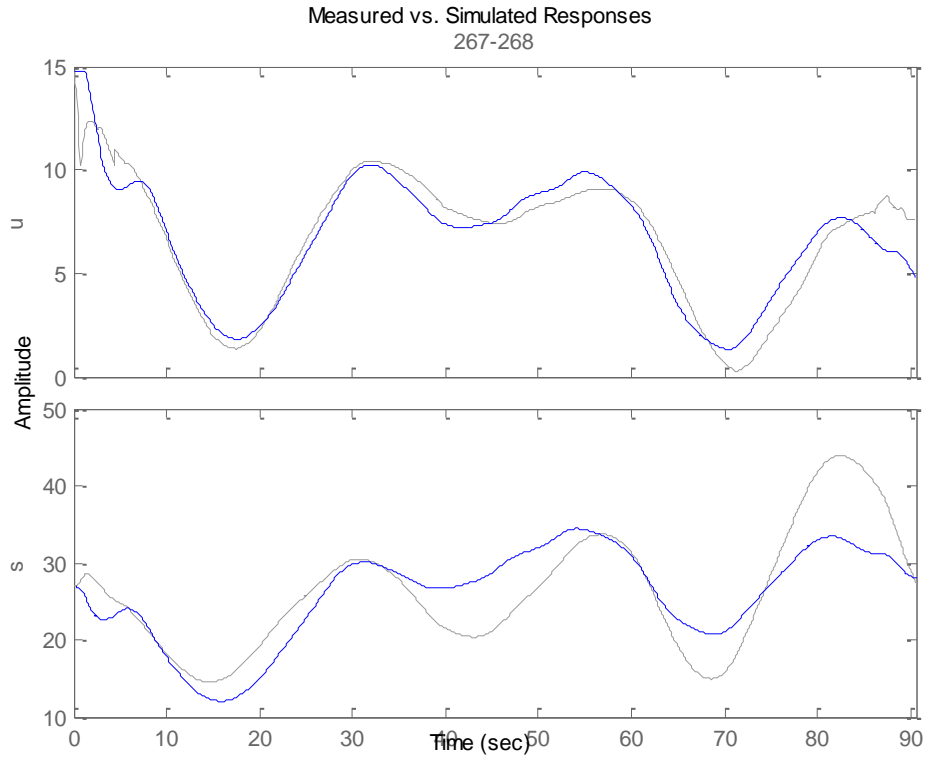




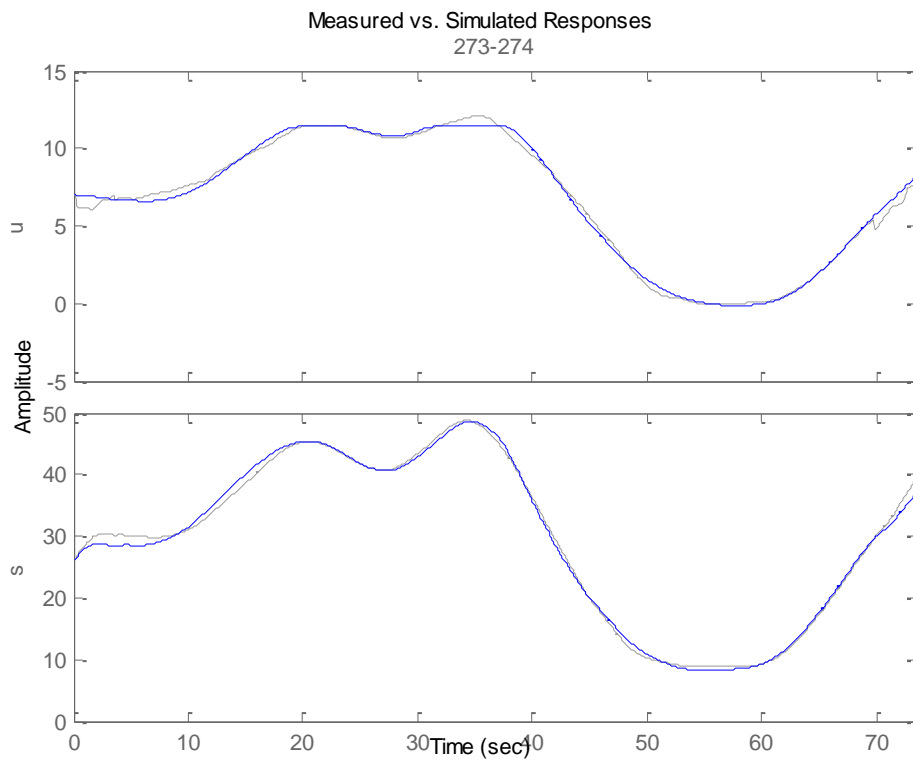
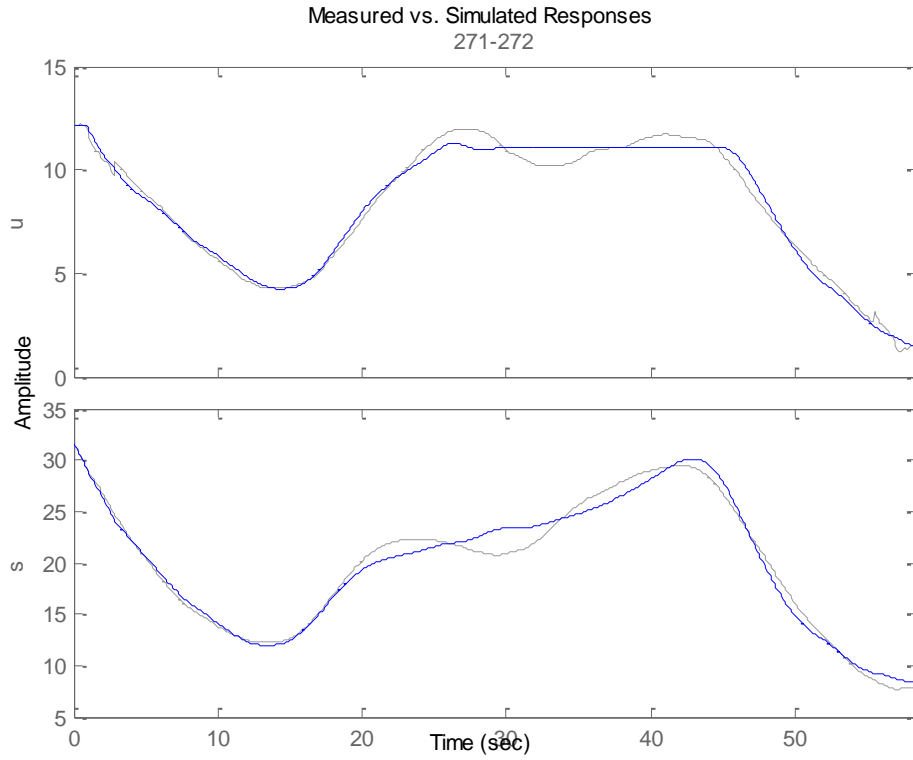


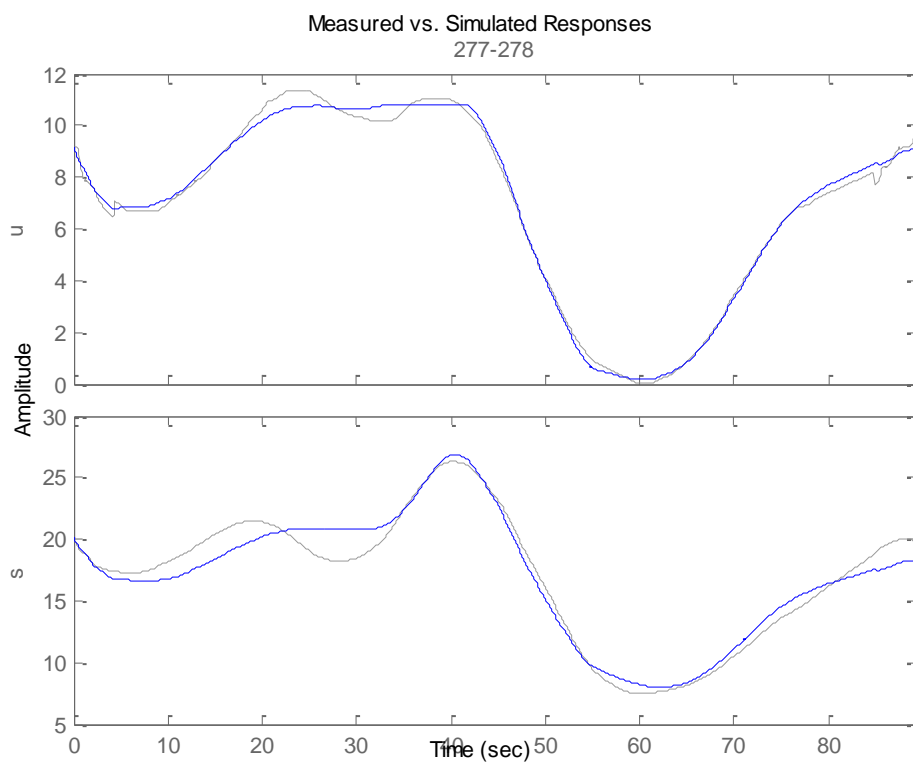
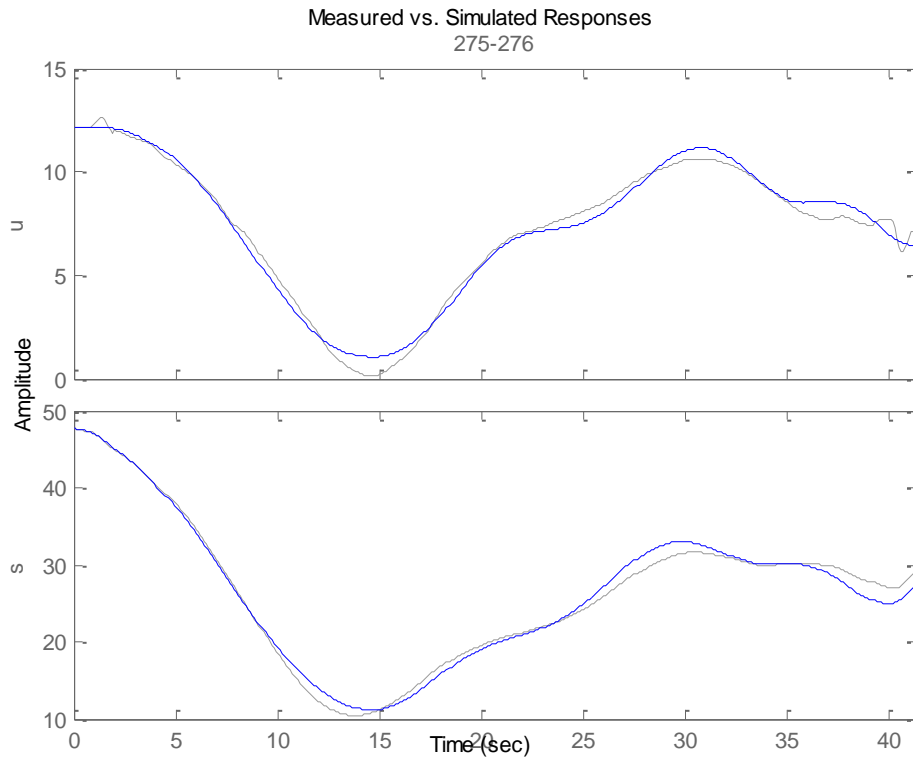


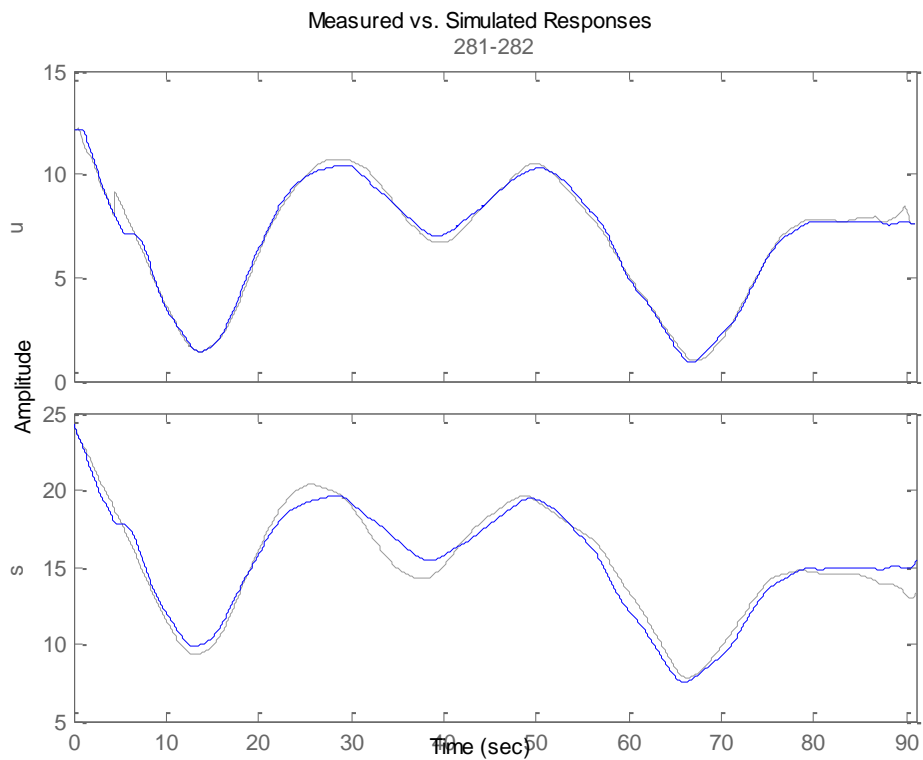
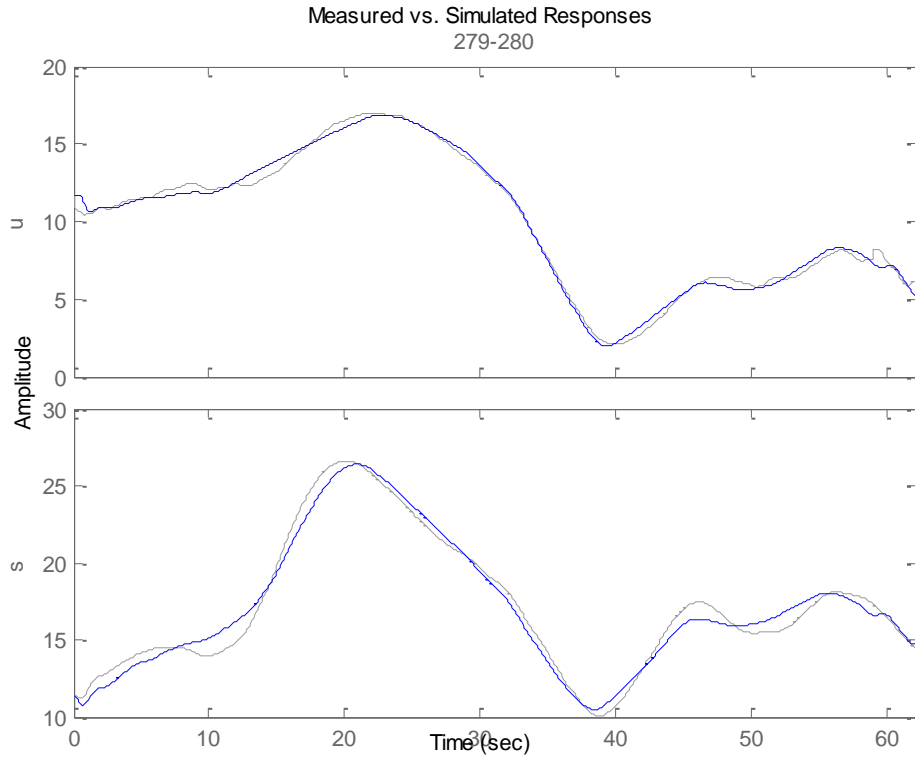


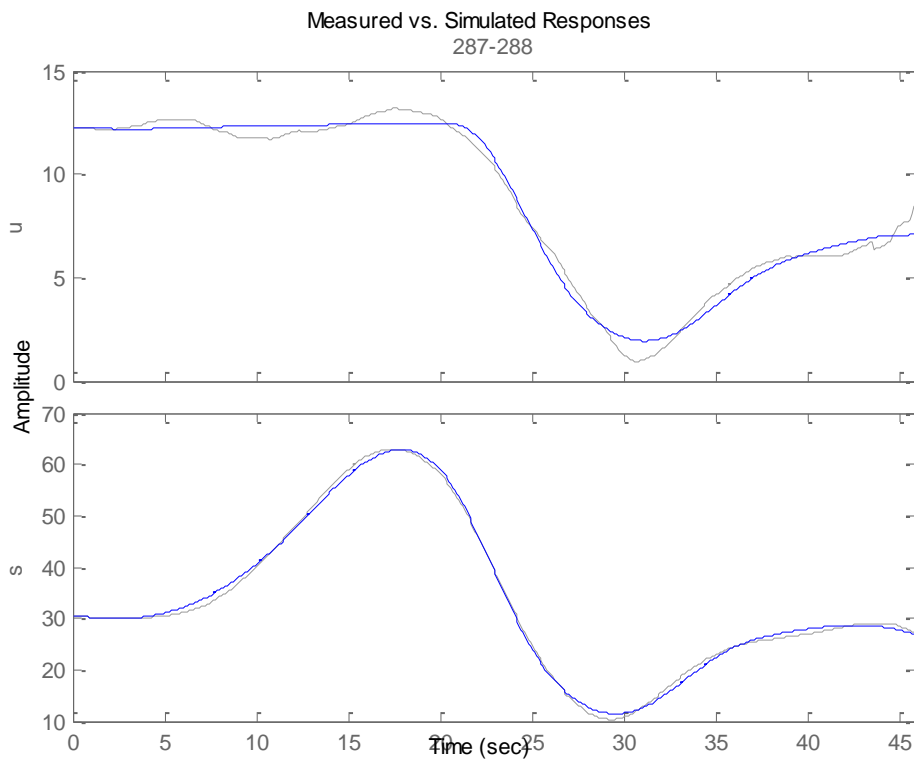
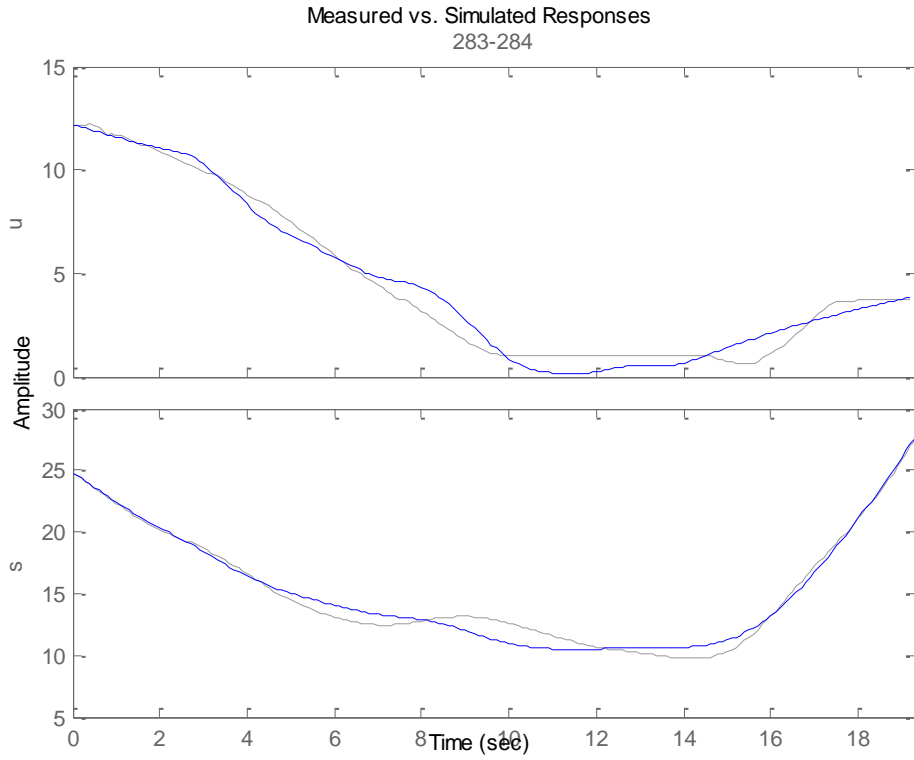


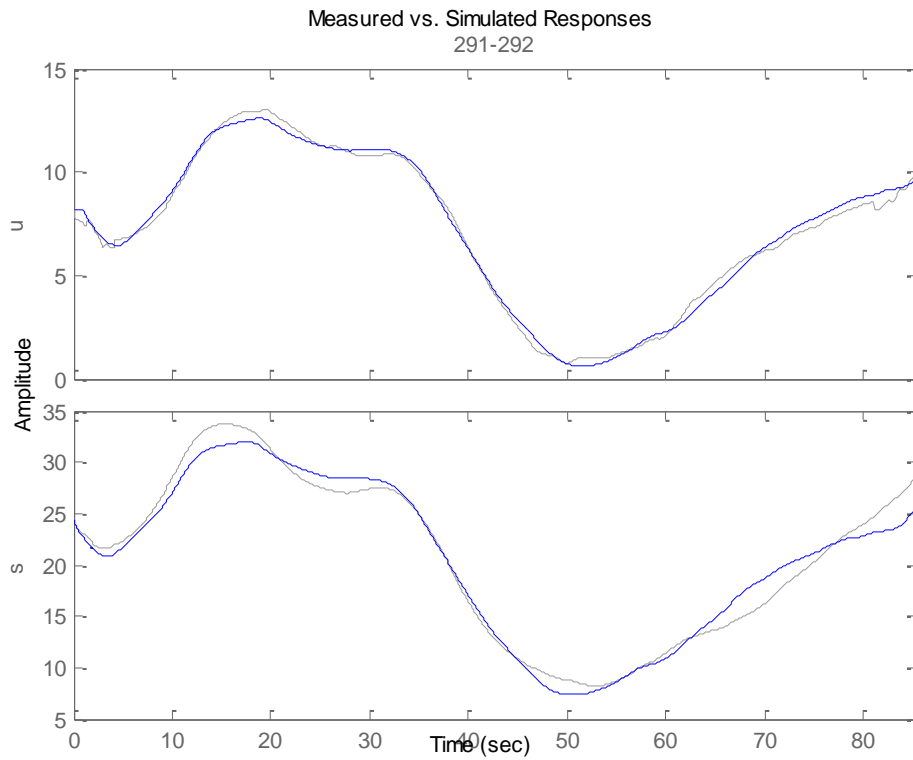
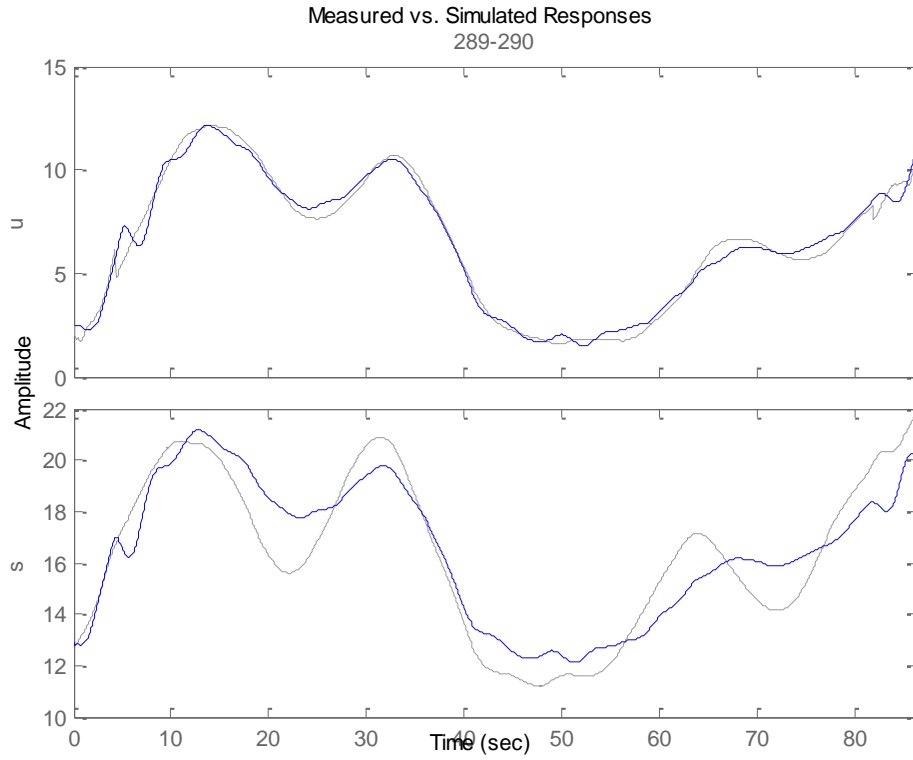


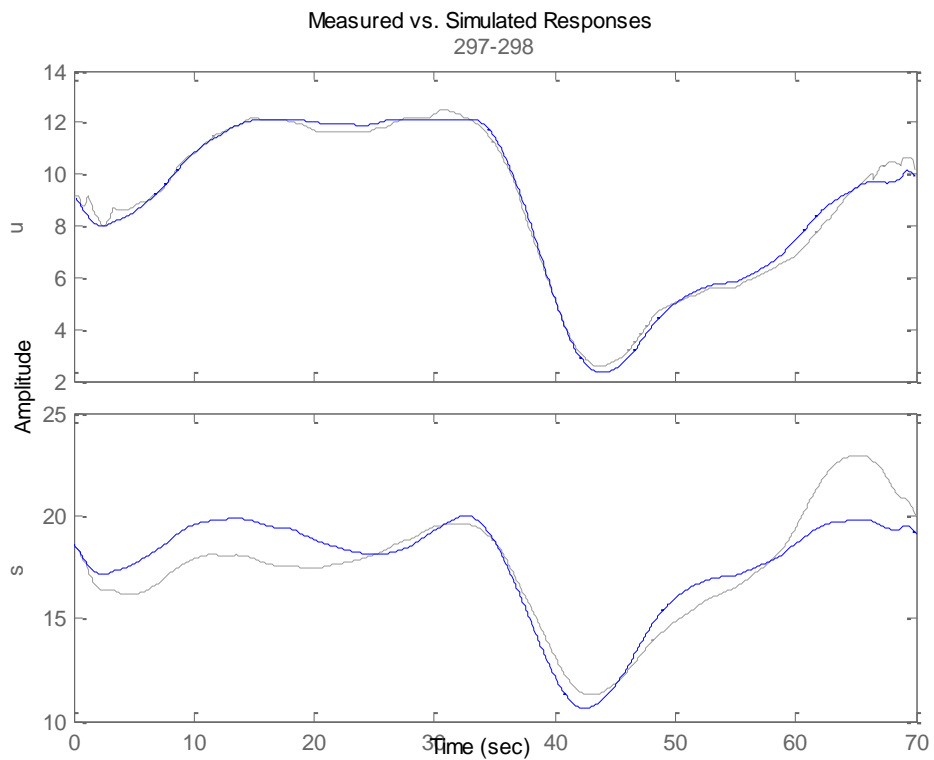
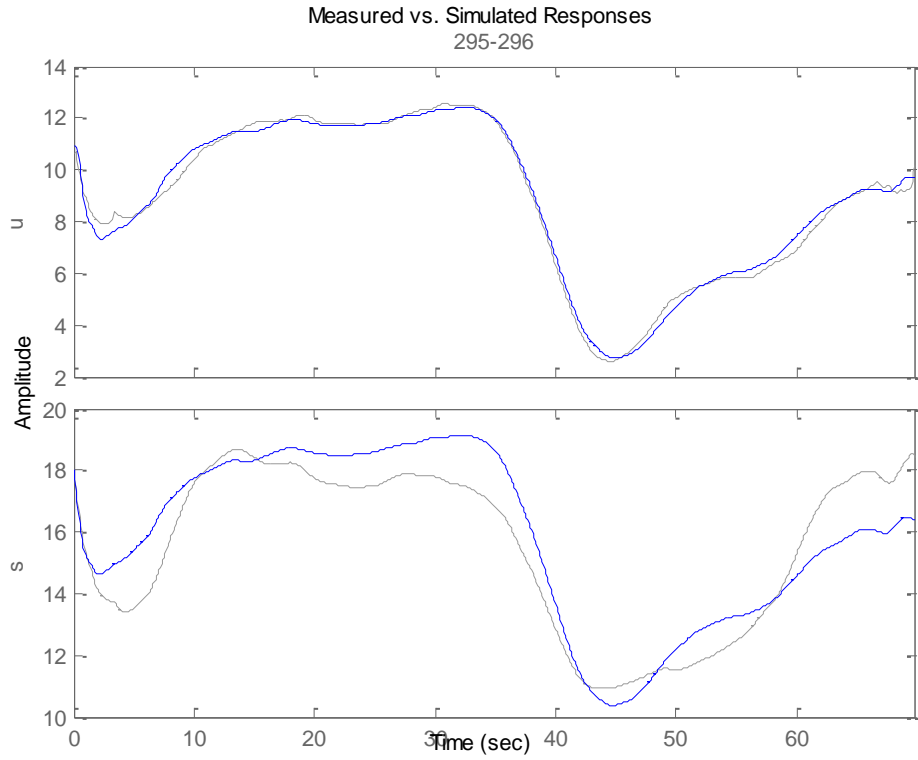


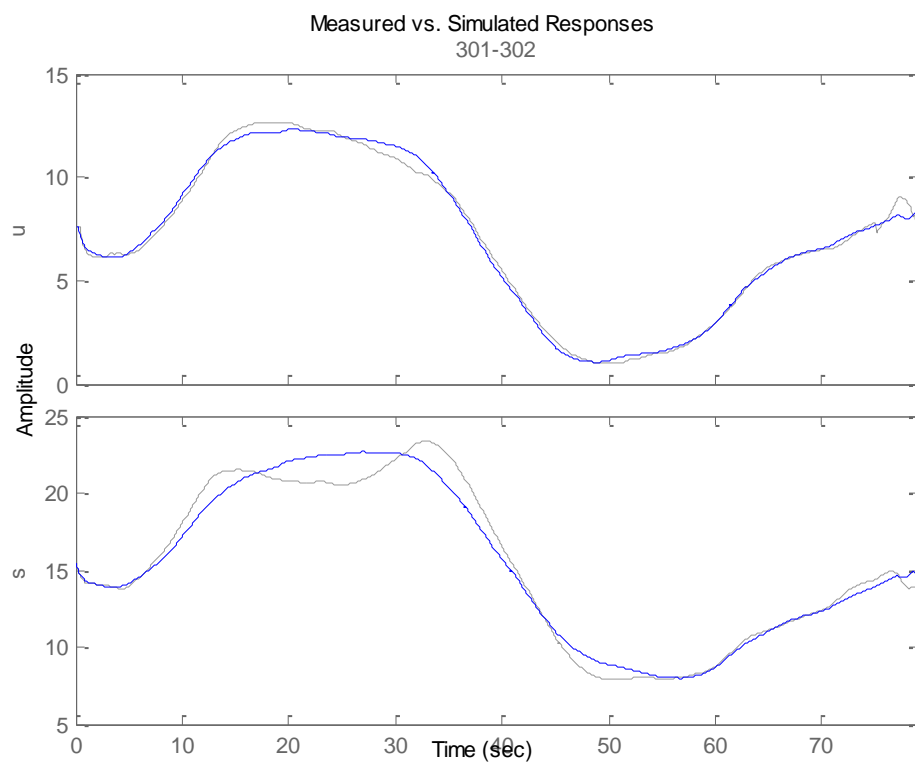
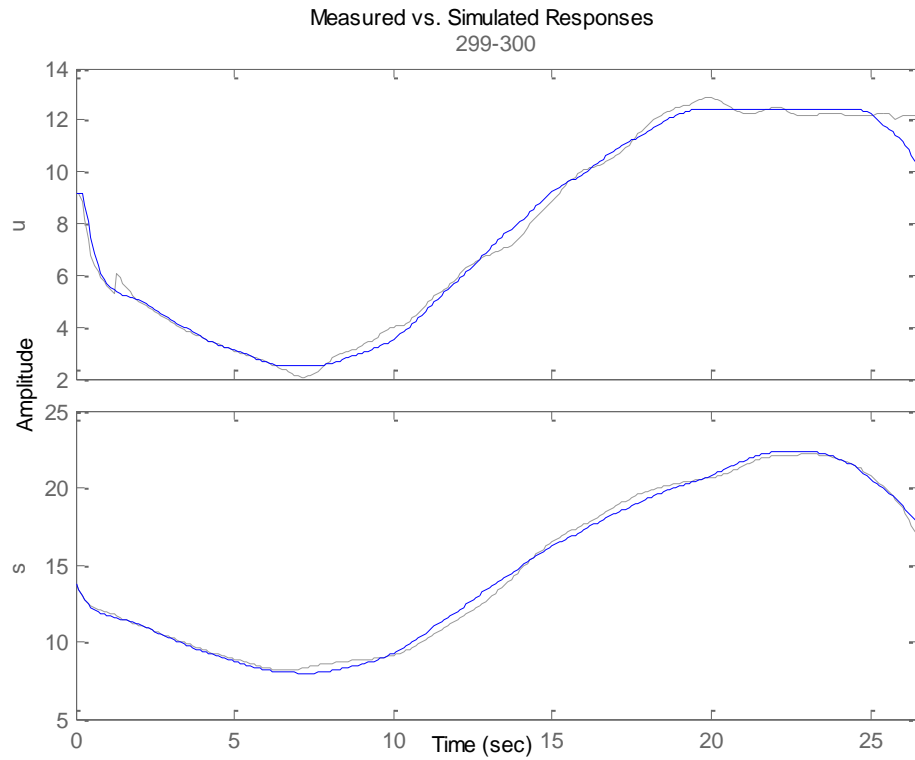


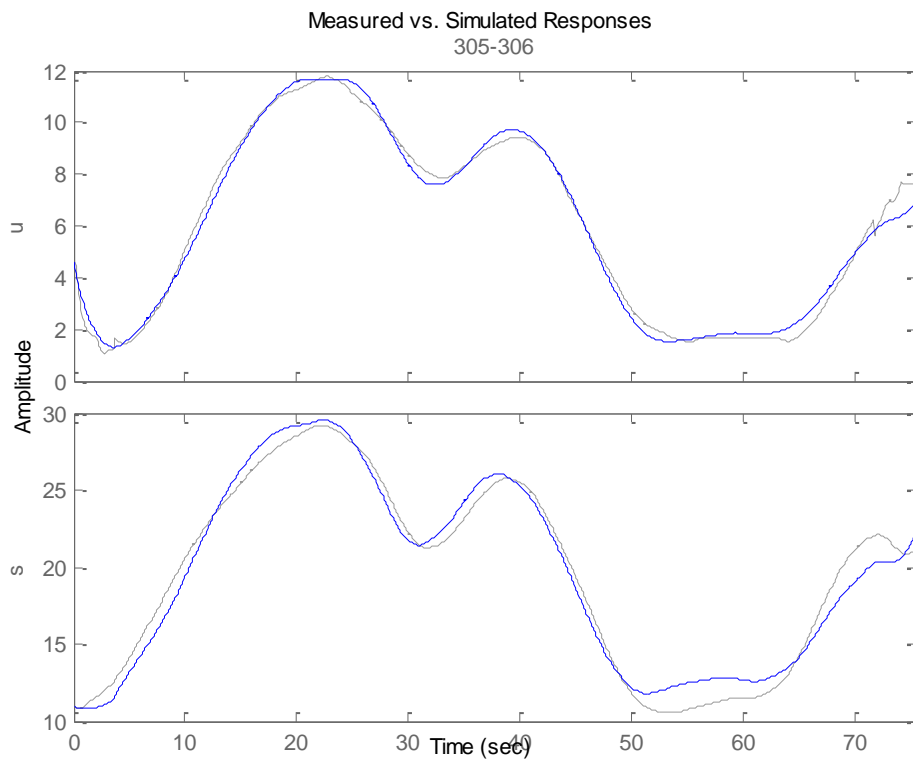
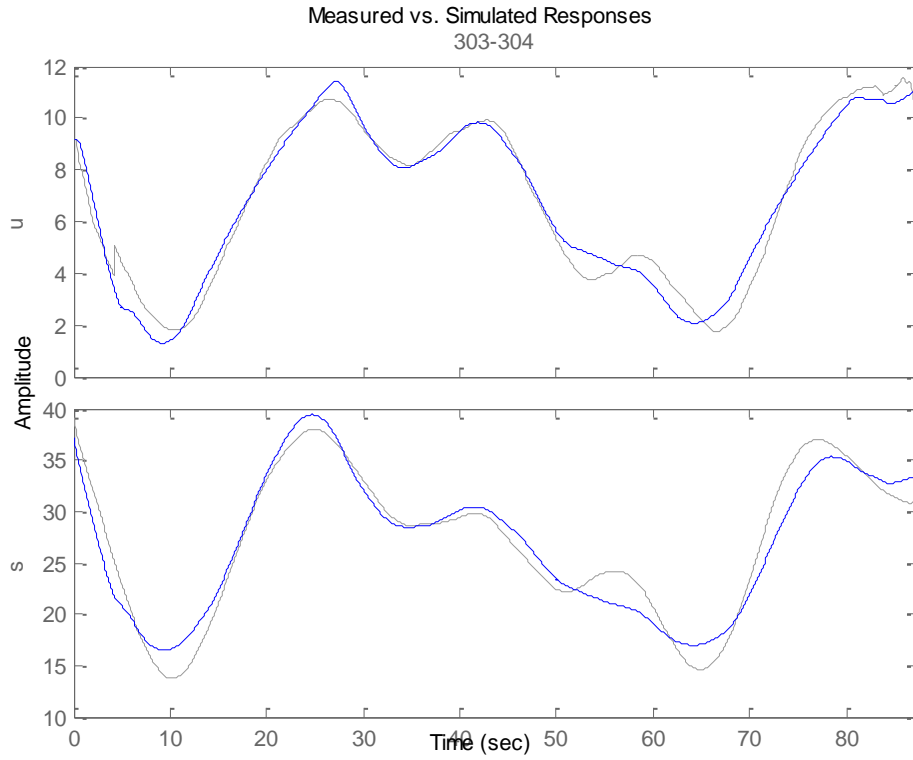




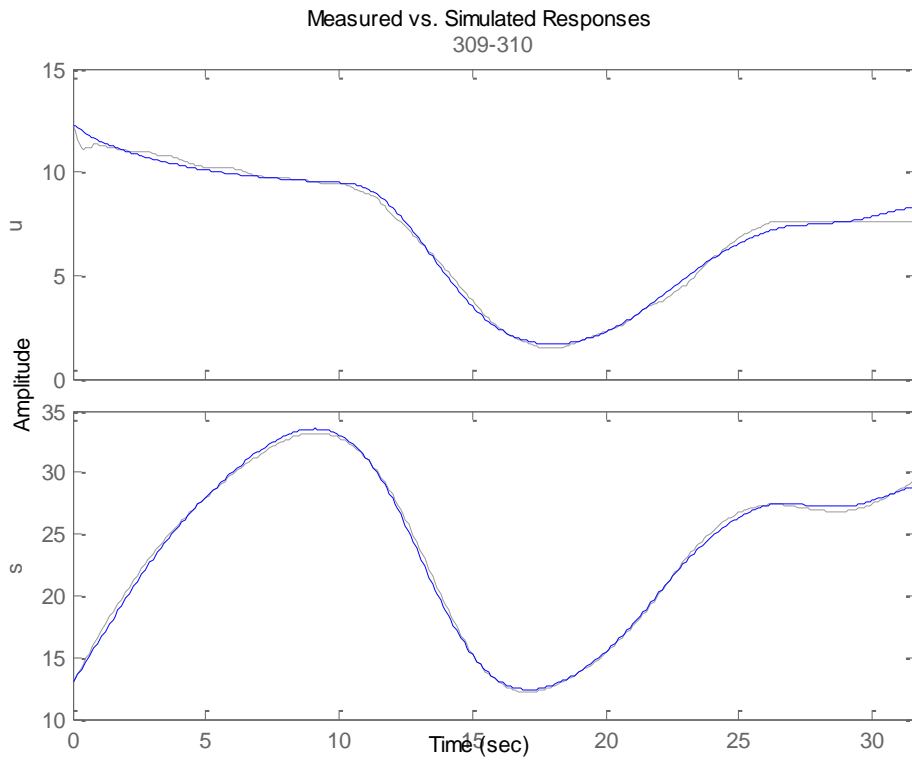
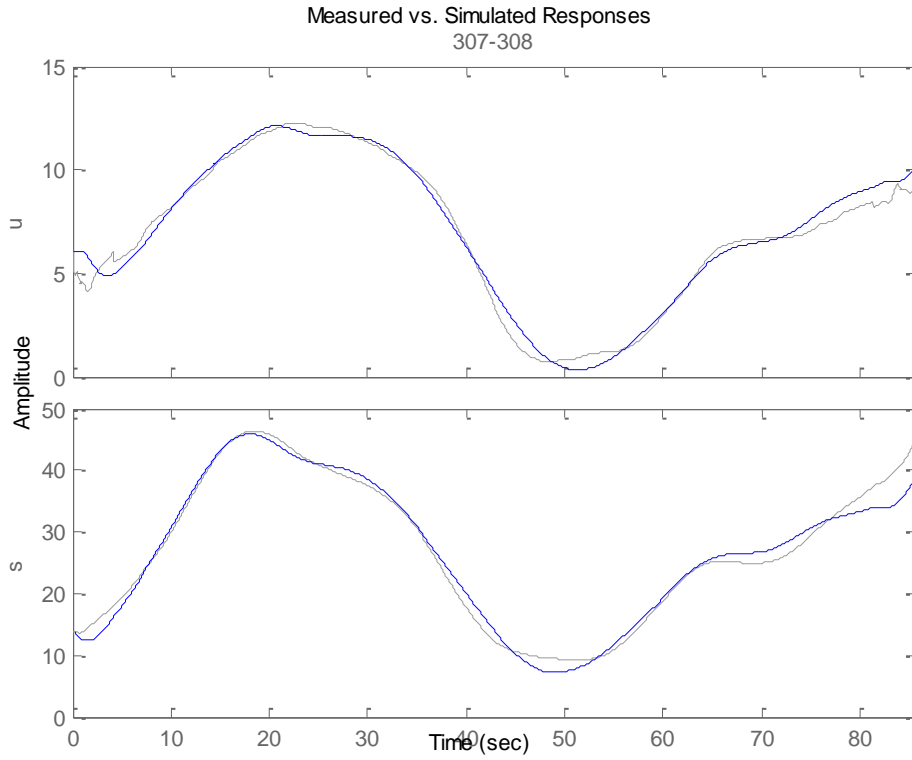


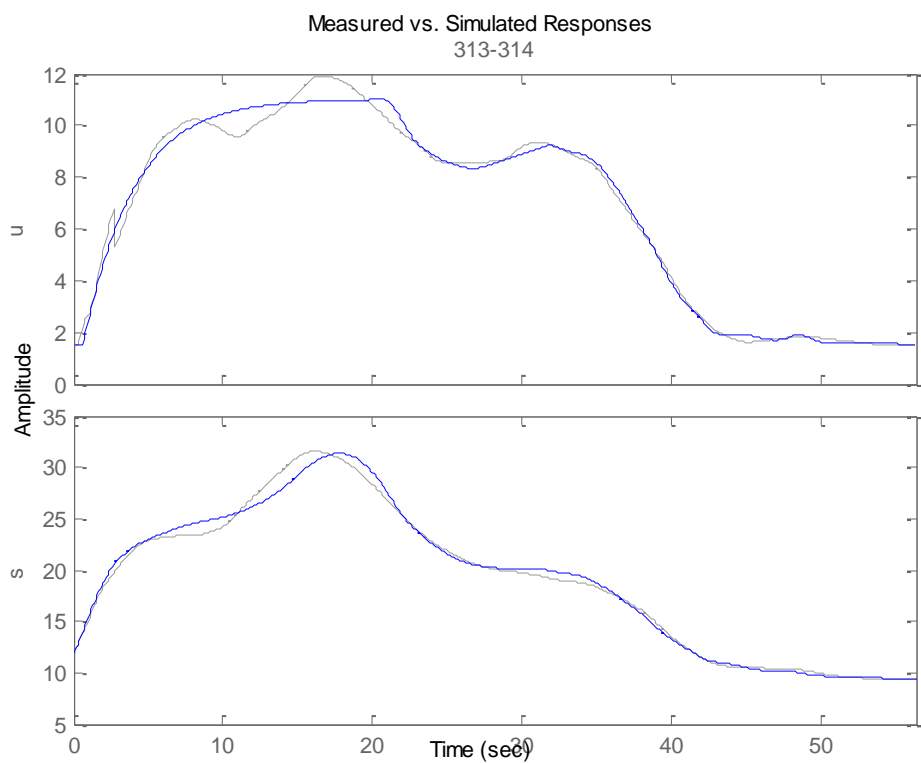
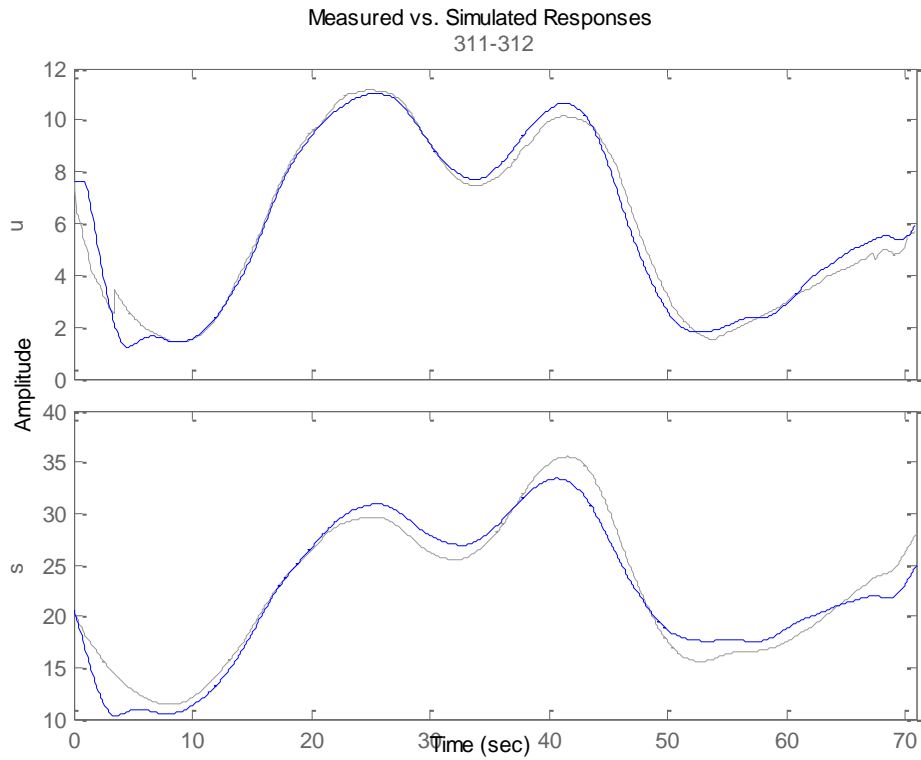


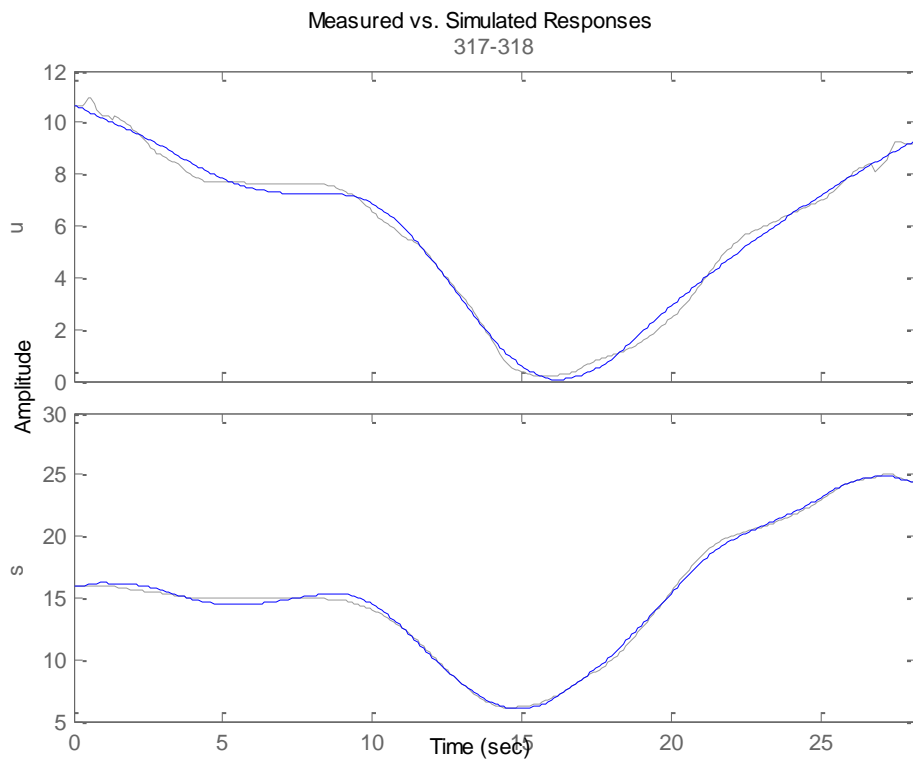
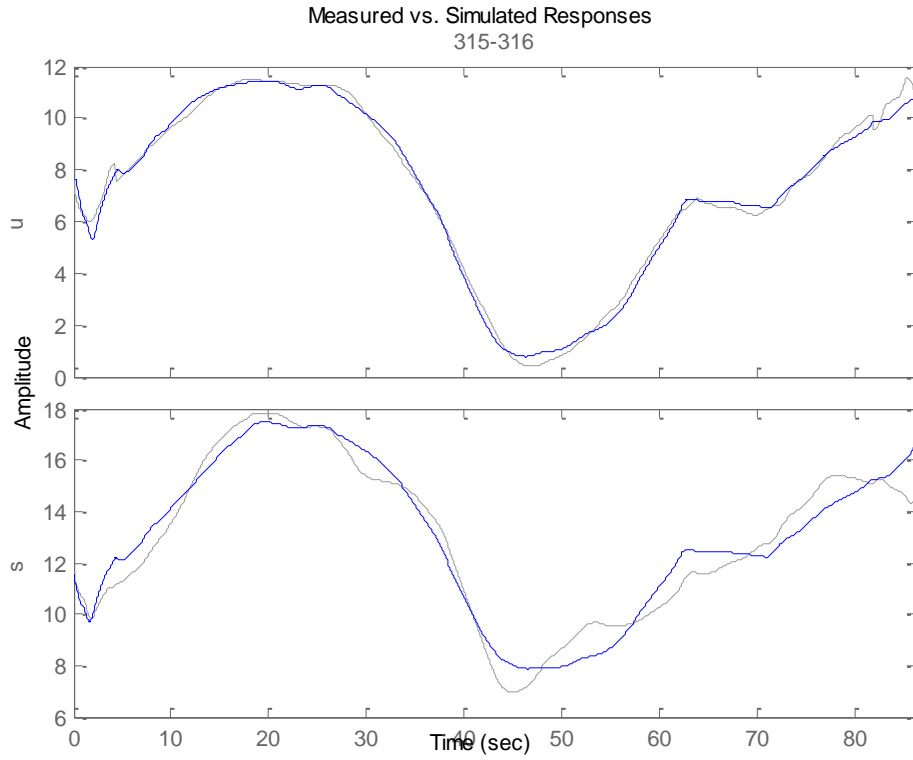


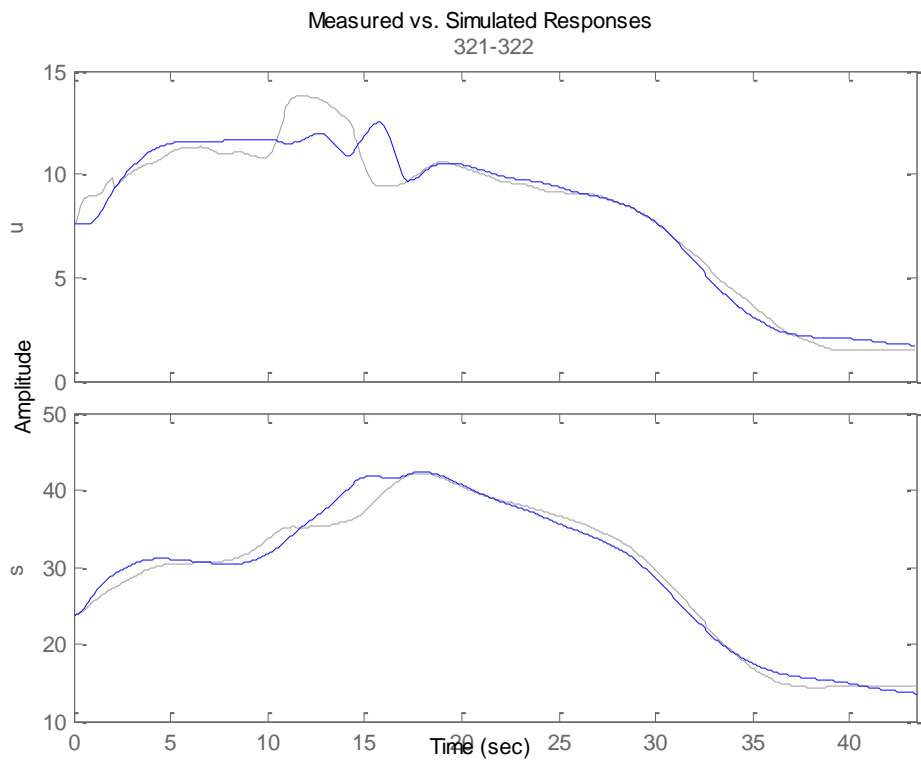
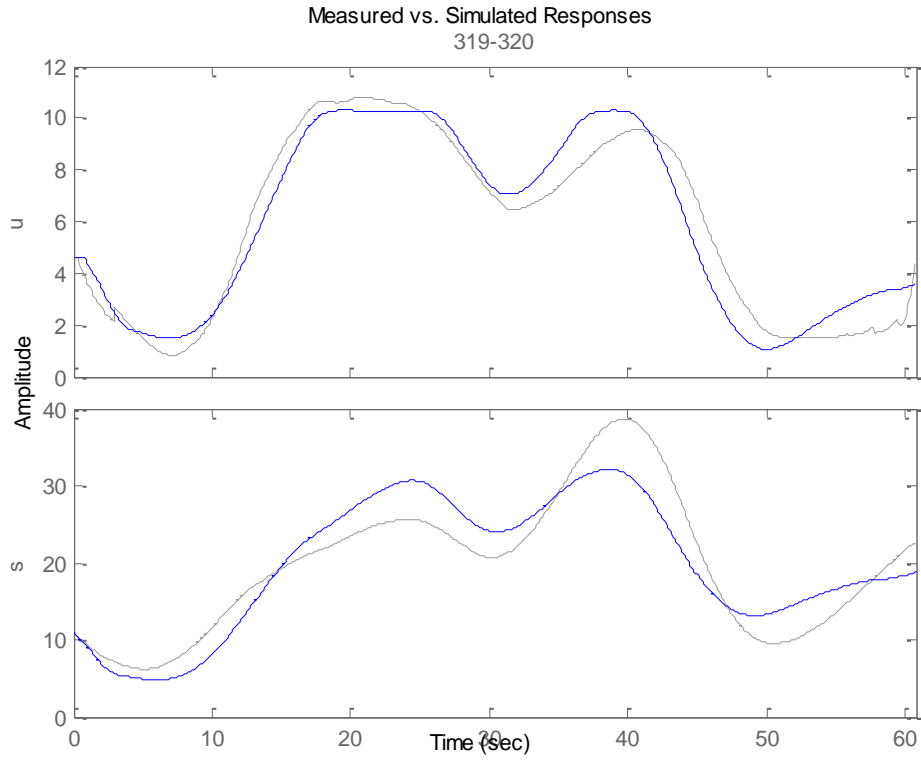


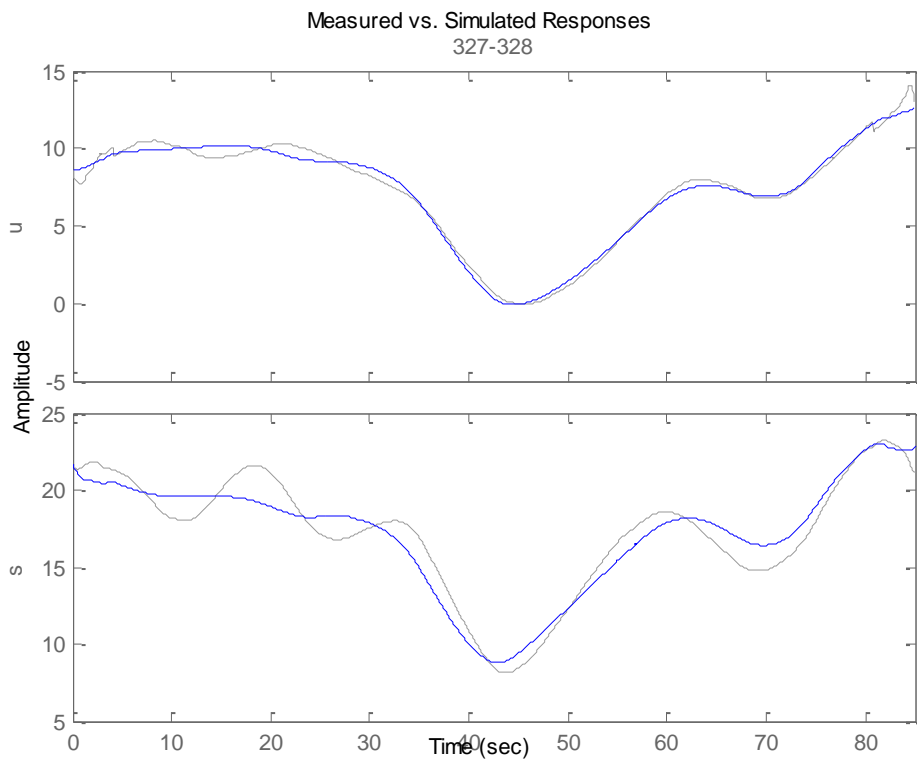
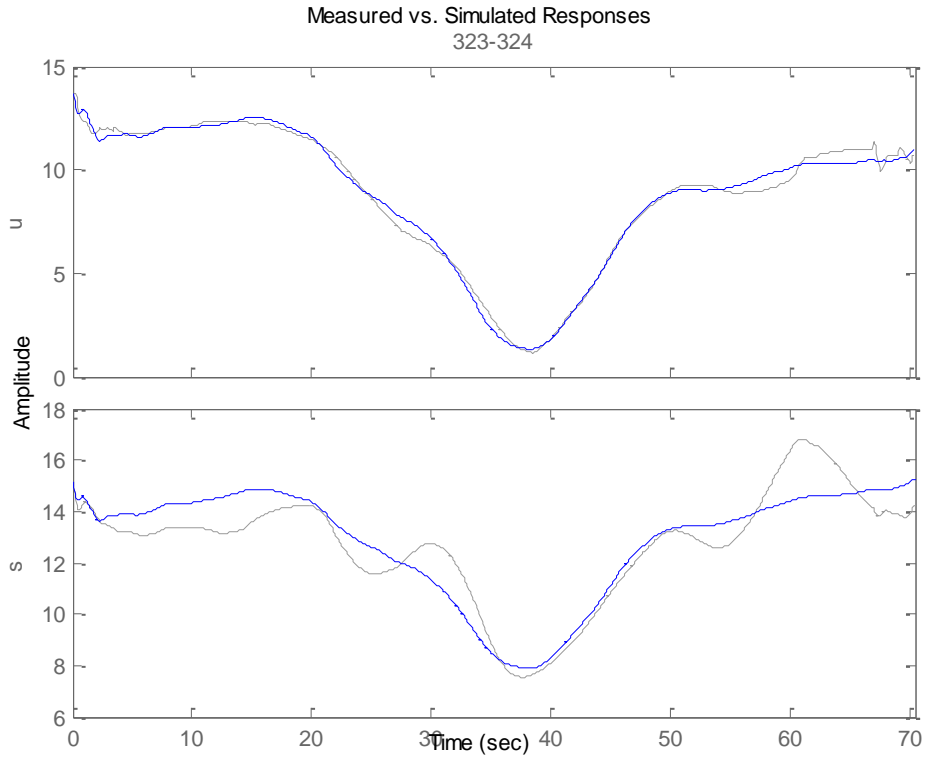


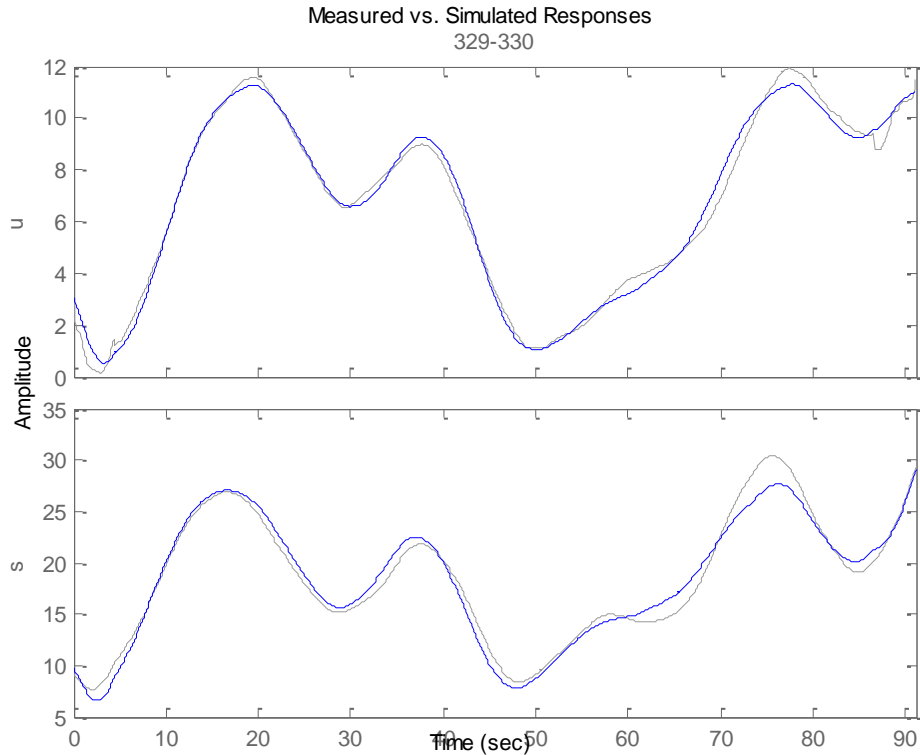












**B. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων βαθμονόμησης των μικροσκοπικών μοντέλων.**

**B.1.Βέλτιστες τιμές για το μοντέλο του Gipps**

Στην συνέχεια, στον Πίνακα B.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του Gipps για κάθε ζεύγος δεδομένων.

Πίνακας B.1

id	Desired acceleration (m/s <sup>2</sup> )	Desired deceleration (m/s <sup>2</sup> )	Estimation of leader's deceleration (m/s <sup>2</sup> )	Reaction time (t)	Desired gap on standstill (m)	Desired speed (m/s)	Error
1-2	,7226	-1,4732	-1,4998	1,3688	5,8266	14,8922	,002168
3-4	,7311	-1,3494	-1,4678	,3702	7,2056	14,3849	,002921
5-6	,6276	-,4055	-,3439	1,3000	10,8845	15,6165	,001420
17-18	3,5648	-,4175	-,4125	1,5494	3,8625	12,4392	,001027
19-20	1,8140	-1,0641	-,8707	1,9999	4,7403	36,7605	,002043
21-22	1,2156	-1,6273	-1,4988	1,4482	8,4680	15,6755	,003073
23-24	2,8252	-1,4175	-1,2232	1,2387	6,2125	13,4682	,002557

25-26	2,7064	-1,9132	-1,4995	1,1877	6,1668	12,5936	,001034
27-28	1,0176	-1,1337	-,9434	1,1267	6,2506	16,3797	,001188
29-30	,2668	-1,3748	-1,3020	,3172	13,1451	33,3349	,001723
35-36	1,5621	-1,5251	-1,4992	,7184	8,3240	21,0288	,001526
37-38	4,3591	-1,3657	-1,4877	,1574	9,6218	21,9246	,001640
41-42	,6567	-1,5899	-1,5000	,6990	5,2040	25,1721	,001693
43-44	,9268	-2,0275	-1,5994	,8621	8,0921	17,3173	,001981
45-46	,5013	-1,5729	-1,5026	1,2895	10,2258	19,5497	,002941
47-48	5,1172	-1,7688	-1,8571	,1033	15,0070	15,9622	,004319
49-50	,7548	-1,5279	-2,9630	1,0554	21,6509	17,3375	,001157
53-54	,9385	-1,6048	-1,5025	1,3031	,7097	34,7404	,001167
65-66	1,7912	-5,6437	-9,9903	,3676	6,7070	29,0023	,000705
73-74	,4636	-4,8189	-9,2264	,1052	7,2689	31,4765	,001523
75-76	,5410	-3,5398	-3,4084	,7012	5,3606	22,5222	,002491
81-82	,7001	-,2277	-,3447	,8107	4,1059	20,2775	,000965
83-84	1,2289	-1,5010	-1,6972	,7033	1,9755	16,4983	,001843
85-86	,9005	-1,5101	-1,2067	1,6138	3,0022	20,3485	,000953
87-88	,7373	-,7437	-,7302	,0463	9,6996	20,6087	,003176
91-92	,7634	-,1093	-,1002	1,9629	8,8968	20,0915	,001648
93-94	,5124	-1,4975	-1,7448	,4959	3,3677	27,3556	,001648
103-104	,4636	-1,7827	-1,6600	,9949	11,9052	18,3690	,003389
105-106	,6258	-1,4726	-2,5346	,3000	8,8417	15,2738	,001511
115-116	,6134	-1,4982	-1,5374	,8824	7,1256	15,7678	,002535
117-118	3,8865	-1,3283	-1,5866	,5541	9,3436	14,4797	,001252
123-124	1,4821	-3,5063	-6,6950	,5023	11,9679	16,7007	,001615
125-126	,6809	-1,7885	-1,4332	1,5057	9,5280	15,2350	,002404
131-132	,6450	-1,9206	-1,7877	,7606	8,8052	14,2853	,001791
133-134	,5601	-3,5326	-4,5807	,1675	14,3919	15,1495	,002007
139-140	,5211	-1,9452	-1,7309	1,2074	1,5846	12,7493	,001128
143-144	,6166	-,6520	-,6876	,3860	9,3169	12,3328	,001721
149-150	,8447	-1,6602	-1,6110	1,0566	7,6059	12,1880	,003580
165-166	,5599	-1,0371	-,8086	1,8626	5,7102	15,6269	,001249
167-168	,6913	-1,0595	-1,8601	,1084	7,3206	31,1888	,001652
173-174	,2410	-4,7117	-7,3243	,2490	6,7359	32,1215	,003349
175-176	,9260	-1,9854	-1,2863	1,9617	7,9305	13,0979	,002186

183-184	,9282	-,6159	-,5819	,9648	6,1026	26,0032	,002585
185-186	,5593	-,9756	-,9341	,6732	8,9642	11,6530	,001227
187-188	,6650	-1,6731	-1,0637	1,6607	7,5486	11,6084	,001583
189-190	,6460	-,9828	-,9814	,7048	10,1876	12,9860	,004437
19-3194	3,1333	-,8640	-1,5466	,0686	9,1495	17,7957	,002648
195-196	1,0928	-,6352	-,6508	,9235	7,2786	20,0706	,002269
197-198	,6911	-1,1714	-1,0559	1,1992	4,5348	23,6118	,002131
199-200	,5856	-2,6785	-5,2614	,0719	6,2015	26,3943	,005487
201-202	,8877	-4,9009	-3,6017	1,1494	1,5959	19,9815	,001509
203-204	,6549	-1,1366	-1,7966	,9459	2,5968	17,6986	,002799
205-206	,4421	-1,6517	-2,0798	1,4918	2,9779	20,3898	,001622
207-208	,9115	-,4712	-,4389	1,2766	7,5776	19,5876	,002702
209-210	,5483	-,6893	-1,0948	,5412	6,2436	17,6449	,001779
215-216	1,2842	-1,0160	-,9005	1,5499	5,6943	18,6751	,004238
217-218	,5483	-,6893	-1,0948	,5412	6,2436	17,6449	,001779
219-220	1,0515	-4,0389	-2,0113	1,9975	5,2086	16,6282	,007264
221-222	2,0488	-,2977	-,3510	,6886	7,7727	13,9370	,007264
223-224	1,0575	-,8439	-,6864	1,4948	6,1904	20,0453	,001191
225-226	1,6521	-1,2405	-1,0006	2,1404	3,2412	17,7290	,002973
229-230	,6961	-,5048	-,5897	,0349	7,2097	29,4618	,002988
231-232	,8619	-2,6650	-5,1519	,4447	8,8089	18,8344	,002988
233-234	1,8047	-,4619	-,4875	1,0443	,9267	26,9580	,001527
235-236	5,5593	-2,0752	-4,6643	1,0247	8,1559	21,2072	,004870
237-238	3,8075	-,4744	-,4413	,6039	14,5667	18,0342	,002727
239-240	,6756	-2,3970	-3,1692	1,4933	4,9067	18,9786	,002507
241-242	,9892	-,3590	-,3210	3,0000	8,0542	16,0373	,002320
243-244	,8250	-4,4557	-2,3336	1,8955	5,3762	15,2496	,002178
245-246	,8128	-4,4794	-9,5175	,3517	12,4191	15,1717	,001508
247-248	1,0666	-,3002	-,3285	,6190	,0009	14,5469	,001536
249-250	9,9757	-,5125	-,4877	1,6254	5,7427	13,5942	,002534
251-252	,7505	-2,7442	-2,7409	,7003	8,8662	12,5401	,001743
253-254	,4487	-,8299	-,8371	1,1915	9,8812	19,6070	,002170
255-256	,1388	-,4631	-,4492	1,2025	4,6639	21,7380	,001448
257-258	1,2923	-2,3958	-1,9733	,8593	8,8905	11,7100	,002486
259-260	,8287	-,1241	-,1213	,9789	,5658	11,8318	,001581



261-262	6,9002	-1,0382	-1,0286	,4000	6,8797	12,0771	,001782
263-264	2,8952	-9,7001	-1,8731	2,5491	7,6822	19,8565	,003663
265-266	8,2218	-,4091	-,3975	,4010	8,9255	15,3850	,001327
267-268	2,5632	-,2550	-,2326	1,5709	21,1473	18,8528	,005928
269-270	1,3151	-,8690	-,7728	1,3372	4,3325	14,0723	,001002
271-272	2,8931	-2,5670	-3,6847	,7602	5,7729	31,8392	,003085
275-276	1,1511	-1,8160	-3,1265	,7050	10,4105	15,9020	,003085
277-278	1,2000	-,6769	-,7369	,5842	7,8984	13,0000	,002283
279-280	,6138	-,9497	-,8532	,9965	8,3906	22,0101	,001523
281-282	1,0739	-1,5633	-1,4550	,9044	6,6851	33,1271	,001579
283-284	,9875	-5,7794	-3,4002	,6004	10,1806	8,9056	,006658
285-286	5,4127	-,3919	-,4084	,2963	9,3782	26,9156	,001798
287-288	3,5023	-2,8759	-1,3657	3,0000	4,3723	12,3408	,002701
289-290	1,4450	-2,5887	-1,7726	1,2575	8,4071	14,0742	,001946
291-292	,5589	-,6410	-,5865	1,7999	4,8650	24,9954	,001946
295-296	1,3697	-1,3876	-1,2527	,9078	6,8102	13,9477	,001803
297-298	3,6658	-,2579	-,2403	1,1896	12,5094	12,0501	,001996
299-300	1,1227	-3,8824	-5,7712	,4997	5,9522	16,6248	,001996
301-302	,7242	-,4543	-,4792	,6162	6,1850	18,5404	,001635
303-304	,9834	-1,3811	-1,0932	1,7924	11,7463	11,0073	,002608
305-306	1,2411	-5,0905	-2,9816	1,6252	8,0214	11,8458	,002733
307-308	1,5131	-2,9842	-4,6892	1,5018	7,1710	11,4580	,003598
309-310	1,0522	-1,9173	-2,6576	1,3827	8,6670	45,8354	,002023
311-312	1,3344	-,1307	-,1371	1,6931	6,6302	14,8385	,002883
313-314	1,7376	-1,8160	-1,9461	,6566	8,3935	10,8605	,002064
315-316	4,7276	-1,5114	-1,6090	,4517	7,1468	24,2860	,001727
317-318	,9095	-9,9946	-4,1581	1,2128	5,7756	23,8849	,003759
321-322	9,9806	-,9464	-1,6267	,0198	12,2301	12,8527	,003221
323-324	2,7915	-1,8477	-1,6094	,7642	6,2593	19,0947	,002185
325-326	,5293	-,3255	-,3337	1,1962	2,0488	14,4115	,001855
327-328	1,9900	-2,0997	-1,6728	1,1019	8,7164	15,9963	,002445

## B.2.Βέλτιστες τιμές για το μοντέλο του Tampere

Στην συνέχεια, στον Πίνακα B.2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του Tampere για κάθε ζεύγος δεδομένων.

Πίνακας A.2

id	c1	c2	c3	$\gamma$	Reaction time (t)	Desired gap at standstill (m)	Desired speed (m/s)	Error
1-2	,27	,22	,06	1,8809	,84	6,93	14,6617	,001156
3-4	,68	,07	,08	1,4079	,00	5,80	15,4999	,003641
5-6	,71	,03	,19	,0000	1,01	13,87	15,1465	,001595
7-8	,67	,04	,09	1,1255	,00	11,34	15,1034	,000984
17-18	,60	,03	,11	2,0260	,47	4,61	17,4308	,000995
19-20	,30	,16	,06	1,6426	,39	8,24	16,8004	,001828
21-22	,42	,15	,51	1,5401	,00	10,76	17,5765	,002642
23-24	,75	,06	1,34	1,2765	,48	7,51	13,3982	,002340
25-26	,61	,30	7,92	,8817	,12	8,53	12,2478	,001068
27-28	1,20	,09	,12	,0002	,49	12,68	16,7006	,001118
29-30	,77	,07	,85	,2442	,68	15,00	11,0315	,002315
31-32	,34	,56	,26	,7693	,01	6,47	14,7004	,002238
33-34	,81	,19	,52	1,0137	,00	8,87	9,4887	,002606
35-36	1,08	,22	,17	1,0000	,56	8,47	14,9211	,001582
37-38	2,00	1,00	,05	,5181	,12	9,02	26,6733	,001827
39-40	,50	,02	,10	1,6957	1,06	7,66	17,3169	,002821
41-42	1,07	,12	,07	,8804	1,35	4,54	21,9226	,001644
43-44	1,29	,32	,02	,4176	1,00	8,65	40,0508	,001840
45-46	,49	,02	,02	,1709	1,26	13,79	41,8883	,001684
47-48	1,50	,36	,02	,1682	,03	,28	26,5888	,010712
49-50	1,35	,33	,08	2,7507	,35	13,02	17,6490	,001290
51-52	,46	,05	3,57	,0109	,68	15,00	18,0608	,000770
53-54	,61	,03	,77	1,6724	1,18	,31	15,7395	,000925
57-58	,60	,19	1,59	,7229	,89	8,07	17,4366	,001608
59-60	,07	,02	,41	1,7709	,01	9,35	17,2135	,001075
65-66	,56	,29	,13	1,2646	,67	3,69	19,0447	,000860
69-70	,34	,07	1,77	,8429	,04	5,07	20,8673	,001247

73-74	,59	,10	,09	1,0931	,00	3,31	20,8468	,001575
75-76	,47	,12	1,50	,6027	,55	12,58	19,6099	,001614
81-82	,17	,02	,07	1,9729	,01	9,10	20,5640	,000987
83-84	,68	,02	,16	,9501	,43	4,21	16,5753	,001811
85-86	,74	,02	,05	,0832	,90	19,25	24,8878	,001036
87-88	1,53	,01	,05	,8742	,29	7,61	22,3178	,003935
91-92	,29	,09	,08	1,1989	1,25	,05	21,5255	,001162
95-96	1,04	,01	,10	2,7791	,68	16,44	22,6042	,003055
99-100	,94	,14	,05	1,3343	1,00	5,04	21,0482	,001927
103-104	,60	,03	,01	,8697	,73	5,49	27,8219	,003163
105-106	,49	,05	,06	,0003	,00	11,71	16,9374	,002032
115-116	,81	,05	,10	,5306	,38	15,00	14,2431	,001596
117-118	1,41	,23	3,08	1,9123	,22	4,58	14,4481	,001214
123-124	1,38	1,00	,40	2,2758	,00	3,81	15,9831	,001532
125-126	,38	,09	,10	1,2023	1,12	12,50	15,4796	,002123
131-132	1,21	,18	,15	,7236	1,07	10,49	14,0191	,001488
133-134	1,26	,35	,04	,5686	,00	13,79	19,2665	,002130
139-140	,68	,13	,06	1,6332	,39	,04	13,7705	,001143
143-144	1,25	,06	,04	1,8690	,65	,98	20,1422	,001705
149-150	1,08	1,00	1,60	1,5155	,00	7,70	19,3195	,003587
165-166	,54	,07	,04	,7603	1,15	12,46	18,8407	,001342
167-168	,45	,01	6,70	,8475	,08	6,79	12,0001	,002229
173-174	,52	,05	,09	,2537	,60	10,87	13,6657	,002905
175-176	,40	,16	,30	,7652	,16	15,00	12,8736	,002307
177-178	1,12	,28	,06	,3148	,45	9,33	24,7560	,001498
179-180	,60	,01	10,00	,0014	,00	10,20	11,0475	,001268
183-184	,97	,11	,18	,8297	,16	7,72	14,8350	,001821
185-186	1,33	,09	,09	,6348	,05	10,35	12,0044	,001162
187-188	,37	,25	,12	,9048	,00	11,02	11,5532	,001499
189-190	,48	,04	,03	1,0178	,35	12,34	22,9429	,003574
191-192	,27	,01	,26	3,9883	,26	10,16	9,3149	,002584
193-194	,63	,03	1,62	,1640	1,04	11,40	9,9954	,001822
195-196	,80	,02	1,46	1,7756	,85	12,22	20,0754	,003484
197-198	,62	,16	,02	,7983	,26	8,33	36,0501	,001156
199-200	,51	,07	,27	1,2679	,69	6,32	17,1394	,006206



201-202	,25	,30	,16	1,0243	,00	4,97	18,6151	,001248
203-204	1,11	,11	,04	1,4815	,76	4,84	18,7657	,004158
205-206	,40	,05	,05	1,5000	1,06	7,00	16,6054	,003344
207-208	,59	,04	,87	,6679	,24	14,93	17,4205	,003088
209-210	,93	,28	,04	2,2530	,78	4,01	17,1136	,003240
213-214	,42	,16	,16	,8905	,99	6,79	17,4820	,002240
215-216	,00	,25	,04	1,3419	,44	7,05	30,4208	,003306
217-218	1,22	,12	,07	1,4309	1,17	5,18	18,4735	,004047
219-220	,00	,29	,05	1,3519	,81	8,28	24,5283	,005549
221-222	1,54	,37	,48	1,7123	,06	7,21	13,5353	,006466
223-224	,51	,05	1,37	,2624	,05	13,35	18,3243	,000886
225-226	,00	,32	,38	2,0643	,11	4,98	17,4699	,002538
229-230	2,00	,42	2,64	1,8947	,00	7,20	17,4601	,003046
231-232	,70	,04	,05	,0003	,00	10,83	24,8756	,001685
233-234	1,01	,10	,06	2,0771	,74	,02	26,4779	,001627
235-236	,49	,05	,06	,0002	,00	11,71	16,9383	,002032
237-238	1,46	,18	1,44	,0054	,00	14,90	17,9165	,002767
239-240	,37	,02	,05	2,0272	,75	9,97	23,2331	,002293
241-242	,25	,03	,19	1,5567	,66	20,00	15,8716	,001766
243-244	,22	,07	,09	1,1095	,00	10,62	17,7664	,001766
245-246	,46	,03	,11	1,5626	,25	7,44	15,6288	,001109
247-248	1,90	,01	,09	3,4309	,81	1,39	15,5323	,001079
249-250	,61	,03	9,85	,7243	,00	16,88	13,6760	,002046
251-252	,59	,20	,28	,9768	,00	9,99	12,1406	,001884
253-254	,46	,03	1,48	,5697	,49	20,00	11,6315	,002407
255-256	,69	,03	,06	1,4156	,96	5,96	13,9339	,001491
257-258	1,05	,00	,20	6,0547	,42	19,28	13,8899	,002125
259-260	,87	,03	,17	1,7407	,00	,00	11,9399	,001279
261-262	1,02	,02	1,72	,0058	,99	1,34	12,0464	,002320
263-264	,18	,21	,02	1,2637	,55	10,76	28,0941	,003806
265-266	2,00	,25	2,01	,0042	,03	10,64	14,7929	,001306
267-268	,54	,00	,72	5,0010	1,39	16,45	11,1688	,005377
269-270	,69	,09	,23	1,0926	,94	6,92	14,1234	,000953
271-272	,53	,04	1,20	,0036	,85	12,86	11,0664	,002035
273-274	,13	,13	,97	2,9807	,00	9,06	11,5094	,001333

275-276	,40	,07	,30	3,4156	1,56	,00	11,4490	,002345
277-278	,82	,07	,79	1,4002	,15	5,93	10,8122	,001765
279-280	1,08	,09	,02	,2033	,47	14,87	33,0282	,001493
281-282	,82	,03	,25	1,6327	,96	2,87	10,6892	,001468
283-284	2,00	1,00	,13	,5407	,00	10,27	7,1461	,006436
285-286	1,76	,05	,47	1,2005	,05	3,87	11,1923	,006436
287-288	,24	,01	,08	1,3714	1,56	9,05	12,5360	,001707
289-290	1,18	,00	,51	1,0148	,96	9,31	12,9700	,002347
291-292	,51	,01	,17	1,8598	1,05	4,98	14,4370	,001761
295-296	1,11	,01	1,03	1,0671	,25	6,00	12,7900	,001927
297-298	,87	,08	1,88	,0017	,00	16,96	12,1308	,002021
299-300	,86	1,00	2,76	1,2627	,25	4,75	12,3797	,001990
301-302	1,01	,05	2,11	2,1080	,24	,18	12,4195	,001811
303-304	,61	,18	,05	1,8212	,59	12,75	20,2808	,002626
305-306	,08	,37	9,96	1,6331	,00	9,71	11,6540	,001934
307-308	,28	,03	,07	2,5048	1,24	8,93	15,5466	,002266
309-310	,34	,10	,24	1,8853	,11	11,72	9,2328	,001267
311-312	,56	,02	,19	3,0835	,99	5,39	11,8354	,003061
313-314	,94	,22	,25	1,3396	,60	7,26	11,0234	,001848
315-316	1,17	,04	,28	1,0770	,25	5,31	11,5460	,001586
317-318	,31	,25	,06	,9453	,05	8,74	19,3877	,001962
319-320	,49	,00	,51	1,9650	,90	4,95	10,2683	,006951
321-322	,44	,01	3,54	1,3537	,87	3,96	11,6419	,003521
323-324	1,47	,01	,47	1,1071	,05	10,67	16,1139	,002056
327-328	,57	,17	,07	,8681	,00	10,58	17,8691	,002077
329-330	,37	,11	,30	1,1766	,01	10,07	11,7597	,001854