

Διπλωματική Εργασία

**«Εκτίμηση της κυκλοφοριακής κατάστασης ανά λωρίδα
κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομο με συνδεδεμένα
οχήματα»**

Εκπόνηση : Φιλοπούλου Ίρις



Επιβλέπων Καθηγητής : Παπαγεωργίου Μάρκος

Χανιά 2016

Επιτροπή Διπλωματικής

Μάρκος Παπαγεωργίου

Καθηγητής,
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης,
Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ιωάννης Νικολός

Αναπληρωτής Καθηγητής,
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης,
Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ιωάννης Παπαμιχαήλ

Επίκουρος Καθηγητής,
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης,
Πολυτεχνείο Κρήτης.



Επισημάνσεις Συντάκτη

Με τη παρούσα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθ. Ιωάννη Παπαμιχαήλ και τους δρ. Νικόλαο Μπεκιάρη και dr. Claudio Roncoli, για τη καθοδήγησή τους, τη συνεργασία και την συμβολή τους στην υλοποίηση των δοκιμών και των ελέγχων που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία. Ειδική μνεία θα ήθελα να κάνω στην υπομονή τους να ανεχθούν το ομολογουμένως ανορθόδοξο (αλλά θεωρώ αποτελεσματικό) τρόπο λειτουργίας μου υπό πίεση.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή κ. Μάρκο Παπαγεωργίου για την ευκαιρία που μου παρείχε και την εμπιστοσύνη του, να εργαστώ σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, που πιστεύω ότι με ωφέλησε τόσο στην αναλυτικό τρόπο σκέψης όσο και στην εκμάθηση όρων και πρακτικών που μου ήταν άγνωστες στο παρελθόν.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου - συναδέλφους πλέον, τους συμφοιτητές μου στη σχολή και τους φίλους μου, για την υποστήριξη που μου παρείχαν τόσο στη διάρκεια των σπουδών μου όσο και στην ολοκλήρωσή τους μέσω αυτής της εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Σκοπός της Εργασίας	2
1.3 Προεπισκόπηση κεφαλαίων.....	2
2 Ορολογία.....	5
3 Υπολογισμός δεδομένων κυκλοφοριακής κατάστασης ανά λωρίδα κυκλοφορίας και σε ράμπα εισόδου	6
3.1 Υπολογισμός δεδομένων ταχύτητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας	7
3.2 Υπολογισμός δεδομένων ροής των οχημάτων ανά λωρίδα κυκλοφορίας.....	9
3.3 Υπολογισμός δεδομένων για την ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα	9
3.4 Υπολογισμός δεδομένων πυκνότητας των οχημάτων ανά λωρίδα κυκλοφορίας.....	10
3.5 Υπολογισμός δεδομένων ροής των οχημάτων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητόδρομου	12
4 Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων κυκλοφοριακής κατάστασης ανά λωρίδα κυκλοφορίας .	13
4.1 Πιστοποίηση ορθότητας με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης των οχημάτων για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας.....	13
4.2 Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα με την εφαρμογή μοντέλου.....	18
5 Εκτίμηση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα του αυτοκινητόδρομου, για τα NGSIM δεδομένα	25
5.1 Εκτίμηση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα του αυτοκινητοδρόμου όπου όλα τα οχήματα είναι συνδεδεμένα.	28
5.2 Εκτίμηση της κυκλοφορίας στις λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου όπου το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι 50%.....	33
5.3 Εκτίμηση της κυκλοφορίας στις λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου όπου το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι 20%.....	37
5.4 Εκτίμηση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα του αυτοκινητοδρόμου όπου το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι 2%.....	41
6 Εκτίμηση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα του αυτοκινητόδρομου, με την προσθήκη μοντέλου ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα.....	46
7 Συμπεράσματα.....	50
Βιβλιογραφία	51

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά στη διερεύνηση της κυκλοφοριακής κατάστασης ανά λωρίδα κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομο με συνδεδεμένα οχήματα.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, συλλέχθηκαν μικροσκοπικά στοιχεία κίνησης που διαμορφώνονται από τη πορεία των οχημάτων σε αυτοκινητόδρομο στο Emeryville, της Καλιφόρνιας. Με τη χρήση των στοιχείων αυτών, υπολογίσθηκαν τα δεδομένα της κυκλοφοριακής κατάστασης ανά λωρίδα του αυτοκινητόδρομου κάθε 5 δευτερόλεπτα.

Κατ' αρχάς, υπολογίσθηκαν τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την ολοκλήρωση της εκτίμησης από το φίλτρο Kalman. Τα δεδομένα αυτά εξήχθησαν από τα συγκεντρωτικά στοιχεία που ανακτώνται από τα οχήματα (μέσω των ενσωματωμένων αισθητήρων GPS) και από τους αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στην είσοδο και την έξοδο του αυτοκινητόδρομου. Τα δεδομένα που υπολογίσθηκαν περιλαμβάνουν, τις ταχύτητες των οχημάτων και την συνολική ροή στην είσοδο – έξοδο του υπό μελέτη τμήματος, ανά λωρίδα κυκλοφορίας. Στη συνέχεια, ακολούθησε ο υπολογισμός πρόσθετων δεδομένων (ροής οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα) για την ολοκλήρωση της εκτίμησης από το μοντέλο όσον αφορά στα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα κυκλοφορίας, με στόχο τη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Τέλος υπολογίσθηκαν τα πραγματικά στοιχεία της κίνησης των οχημάτων για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης.

Στην επόμενη ενότητα της εργασίας, έγινε εφαρμογή του μοντέλου εκτίμησης με την εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων/δεδομένων. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης περιέλαβαν την πυκνότητα των οχημάτων σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας και την ροή τους στη μη μετρήσιμη (δεν υπάρχει αισθητήρας μετρήσεων) ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου. Το μοντέλο εκτίμησης εφαρμόστηκε και για την περίπτωση που τα οχήματα δεν είναι στο σύνολό τους συνδεδεμένα (δεν διαθέτουν αισθητήρα GPS στο σύνολό τους). Στο τέλος της ενότητας, τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίθηκαν με τα πραγματικά στοιχεία που έχουν υπολογιστεί στο πρώτο μέρος της εργασίας.

Στην τελευταία ενότητα της εργασίας, εφαρμόστηκε το μοντέλο εκτίμησης για μια ακόμη φορά με την προσθήκη μοντέλου ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα. Έτσι και σε αυτή την περίπτωση, εξήχθησαν νέα αποτελέσματα εκτίμησης της κυκλοφορίας σε λωρίδες του αυτοκινητόδρομου. Τα παραπάνω επαναλήφθηκαν και για τις περιπτώσεις όπου τα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο δεν είναι όλα συνδεδεμένα. Τέλος στην ενότητα αυτή, εξετάστηκε αν τα αντίστοιχα αποτελέσματα εκτίμησης είναι βελτιωμένα και αποδεκτά συγκριτικά με τις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας ανά λωρίδα στο τμήμα του αυτοκινητόδρομου.

Συμπερασματικά προέκυψε ότι το μοντέλο εκτίμησης λειτουργεί ικανοποιητικά σε όλες τις περιπτώσεις και δίνει αποδεκτά αποτελέσματα ακόμη και στις περιπτώσεις όπου τα συνδεδεμένα οχήματα είναι σχετικά περιορισμένα.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η εκτίμηση της κυκλοφορίας σε αυτοκινητοδρόμους είναι πολύ σημαντική στην ανάπτυξη και την εφαρμογή μεθόδων που θα συμβάλουν στην διαχείριση της κυκλοφορίας τους. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των μεταβλητών κίνησης σε τμήματα του δρόμου.

Για την επιτυχή και ευκολότερη εκτίμηση της κυκλοφορίας μπορεί να γίνει χρήση αισθητήρων (1,6,7,8,9). Η τοποθέτηση των αισθητήρων γίνεται σε συγκεκριμένες θέσεις στον αυτοκινητόδρομο.

Τις δυο τελευταίες δεκαετίες με την βοήθεια των αυτοκινητοβιομηχανιών έχουν αναπτυχθεί και δοκιμάζονται οχήματα με αυτοματισμούς και προηγμένα συστήματα επικοινωνίας. Τα οχήματα αυτά μπορούν να ενημερώσουν για τη θέση τους, τη ταχύτητά τους, αλλά και για άλλες χρήσιμες πληροφορίες (1,10,11,12,13). Ένα από τα πιο συχνά παραδείγματα συστήματος επικοινωνίας στα οχήματα, είναι τα κινητά τηλέφωνα που διαθέτουν συσκευές πλοήγησης (GPS) συνδεδεμένες με κάποιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Με την χρήση των οχημάτων αυτών αποφεύγεται το κόστος για την αγορά και την τοποθέτηση αισθητήρων.

Για τις περιπτώσεις που οι πληροφορίες που λαμβάνουμε από τον παραπάνω εξοπλισμό δεν είναι αρκετές για την ανάλυση της κυκλοφοριακής κατάστασης στον αυτοκινητόδρομο, έχουν σχεδιαστεί μοντέλα για την εκτίμηση της κίνησης των οχημάτων. Με τη χρήση του φίλτρου Kalman για παράδειγμα, εκτιμάται η πυκνότητα των αμαξιών σε αυτοκινητοδρόμους και η ροή σε μη μετρήσιμες ράμπες εισόδου και εξόδου. Με άλλα λόγια δηλαδή, ράμπες που η συνολική ροή των οχημάτων σε αυτές δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας.

Το φίλτρο Kalman, επίσης γνωστό ως γραμμική τετραγωνική εκτίμηση (LQE), είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί μια σειρά μετρήσεων (σε συνάρτηση με τον χρόνο) με στατιστικό θόρυβο και άλλες ανακρίβειες. Από το φίλτρο παράγονται εκτιμήσεις και άγνωστες μεταβλητές που τείνουν να είναι πιο ακριβή από ότι εκείνες που βασίζονται σε μία και μόνη μέτρηση.

Το φίλτρο πήρε το όνομά του από τον Rudolf E Kálmán, έναν από τους κύριους εμπνευστές της θεωρίας του.

Το φίλτρο Kalman έχει πολλές εφαρμογές στην σύγχρονη τεχνολογία. Μια κοινή εφαρμογή είναι η καθοδήγηση, η πλοήγηση και ο έλεγχος των οχημάτων, κυρίως των

αεροσκαφών και των διαστημοπλοίων. Επιπλέον, το φίλτρο Kalman έχει μια ευρέως εφαρμοσμένη συμμετοχή στην ανάλυση χρονοσειρών που χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως η επεξεργασία σήματος και η οικονομετρία. Τα φίλτρα Kalman, επίσης, είναι ένα από τα κύρια θέματα στον τομέα του σχεδιασμού ρομποτικής κίνησης και ελέγχου.

1.2 Σκοπός της Εργασίας

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας δεδομένα για την κυκλοφοριακή κατάσταση των οχημάτων με την βοήθεια συνδεδεμένων οχημάτων και φωρατή, θα εξεταστεί και θα αξιολογηθεί η συμπεριφορά ενός συστήματος εκτίμησης της πυκνότητας των οχημάτων σε αυτοκινητόδρομο στις λωρίδες κυκλοφορίας και της ροής των οχημάτων σε μη μετρήσιμη ράμπα εισόδου.

Για τον υπολογισμό των δεδομένων έγινε χρήση δεδομένων NGSIM, καθώς διαθέτουν πληροφορίες για τη κυκλοφοριακή κατάσταση σε ένα μέρος του αυτοκινητοδρόμου το οποίο θεωρήθηκε ότι χωρίζεται σε τμήματα (1). Το κάθε τμήμα έχει μήκος 80 μέτρων. Τα δεδομένα NGSIM προέρχονται από τα συγκεντρωτικά στοιχεία που ανακτώνται από τα κινούμενα οχήματα και από αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στην είσοδο και στην έξοδο του αυτοκινητόδρομου.

Με την βοήθεια των δεδομένων μορφής NGSIM, θα υπολογιστούν στοιχεία χρήσιμα για την εκτίμηση της κυκλοφορίας από το μοντέλο. Στην συνέχεια, θα δοθούν επιπλέον δεδομένα κυκλοφοριακής κατάστασης στο σύστημα εκτίμησης. Η εισαγωγή παραπάνω δεδομένων, έγινε με στόχο την βελτίωση των αποτελεσμάτων εκτίμησης.

Το προτεινόμενο σύστημα εκτίμησης και στις δυο περιπτώσεις, θα δοκιμαστεί για διάφορα ποσοστά συνδεδεμένων οχημάτων εντός του εξεταζόμενου τμήματος του αυτοκινητόδρομου προκειμένου να διαπιστωθεί η επιτυχής λειτουργία του ακόμη και όταν το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι μικρό.

1.3 Προεπισκόπηση κεφαλαίων

Στην συγκεκριμένη ενότητα της εργασίας, θα γίνει συνοπτική ανάλυση των εννοιών που θα ακολουθήσουν για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από το μοντέλο εκτίμησης σχετικά με την κυκλοφοριακή κατάσταση σε έναν αυτοκινητόδρομο. Η εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια :

- Στο δεύτερο κεφάλαιο, δίνονται οι σημασίες εννοιών που θα αναφερθούν στην παρούσα εργασία.
- Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, μέσω της χρήσης δεδομένων που περιλαμβάνουν την πορεία των οχημάτων που κινούνται κατά μήκος του

αυτοκινητοδρόμου υπολογίσθηκαν χρήσιμα δεδομένα για την εκτίμηση της κυκλοφοριακής κατάστασης, για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της και για την βελτίωσή τους. Οι τιμές των δεδομένων αναφέρονται σε χρονικό βήμα 5 δευτερολέπτων. Τα δεδομένα αυτά είναι τα εξής:

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ :

1. Η ταχύτητα των οχημάτων σε κάθε τμήμα (80 μέτρων) και λωρίδα χωριστά την χρονική στιγμή της μέτρησης.
2. Η ροή των οχημάτων στην είσοδο και στην έξοδο του αυτοκινητοδρόμου σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας την χρονική στιγμή της μέτρησης.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ :

1. Η πυκνότητα των οχημάτων σε κάθε τμήμα (80 μέτρων) και λωρίδα χωριστά την χρονική στιγμή της μέτρησης. Η πυκνότητα υπολογίζεται σε οχήματα ανά χιλιόμετρο ανά λωρίδα (Vehicles/km/lane).
2. Η ροή των οχημάτων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου τη χρονική στιγμή της μέτρησης.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ :

1. Η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα σε κάθε τμήμα (80 μέτρων) του αυτοκινητοδρόμου την χρονική στιγμή της μέτρησης.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας, τα αποτελέσματα των δεδομένων που υπολογίσθηκαν για την επιτυχή εκτίμηση της κυκλοφορίας στον αυτοκινητόδρομο, θα αξιολογηθούν με την χρήση κατάλληλων συναρτήσεων.
 - Στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας, θα γίνει χρήση του μοντέλου εκτίμησης της κυκλοφορίας για τον υπολογισμό της πυκνότητας των οχημάτων στις λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου και για τον υπολογισμό της ροής των οχημάτων στην ράμπα εισόδου με την ύπαρξη συνδεδεμένων οχημάτων. Σε κάθε χρονικό βήμα 5 δευτερολέπτων λαμβάνεται μια νέα εκτίμηση. Το μοντέλο εκτίμησης ελέγχθηκε για διάφορα ποσοστά των συνδεδεμένων οχημάτων στο υπό εξέταση κομμάτι του αυτοκινητόδρομου. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πραγματικά δεδομένα πυκνότητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας και τα δεδομένα ροής στην ράμπα, που υπολογίσθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας. Τα πραγματικά αυτά δεδομένα υπολογίσθηκαν με την βοήθεια πληροφοριών που συλλέχθηκαν από συνδεδεμένα οχήματα και από εικονικό ανιχνευτή για την ροή των οχημάτων στη ράμπα εισόδου.

- Στο έκτο κεφάλαιο της εργασίας, έγινε χρήση του μοντέλου εκτίμησης με την προσθήκη δεδομένων για την ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης αξιολογήθηκαν και παρατηρήθηκε εάν με την επιπλέον προσθήκη υπήρξε βελτίωση.

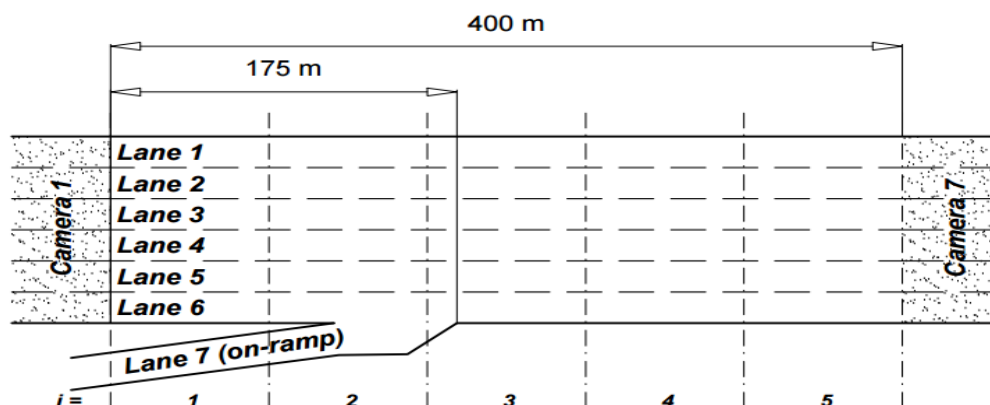
2 Ορολογία

1. GPS (Global Positioning System): Με τον όρο GPS εννοείται το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης μέσω δορυφόρων της Γης. Για την λειτουργία αυτού του συστήματος αναγκαία είναι η σύνδεση σε δίκτυο. Στην παρούσα εργασία, με την βοήθεια του GPS μπορούν να καταγραφτούν οι τροχιές των οχημάτων κατά την κίνηση του σε αυτοκινητόδρομο.
2. Συνδεδεμένα οχήματα: Με τον όρο αυτό εννοούνται τα οχήματα με αυτοματισμούς και συστήματα επικοινωνίας που μπορούν να ενημερώνουν ανά πάσα στιγμή για την κίνηση τους σε αυτοκινητόδρομο.
3. NGSIM data (data from Next Generation SIMulation): NGSIM είναι λογισμικό Προσομοίωσης Κυκλοφορίας σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων που αναπτύχθηκε σε συνεργασία ιδιωτικού και δημόσιου τομέα στις Ηνωμένες Πολιτείες. Συγκεκριμένα αποτελεί το αποτέλεσμα της συνεργασίας της FHWA (Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων), εταιρειών ανάπτυξης λογισμικού προσομοίωσης και της ακαδημαϊκής κοινότητας.
4. Kalman Filter: Με τον όρο Kalman Filter, γνωστό ως γραμμική τετραγωνική εκτίμηση (LQE), είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί μια σειρά μετρήσεων που παρατηρούνται διαχρονικά και παράγει εκτιμήσεις.
5. Τυχαίος περίπατος: Ο τυχαίος περίπατος (random walk) είναι μια μη-στάσιμη χρονοσειρά, όπου το κάθε στοιχείο της προκύπτει από το προηγούμενο με την πρόσθεση μιας τυχαίας τιμής.

3 Υπολογισμός δεδομένων κυκλοφοριακής κατάστασης ανά λωρίδα κυκλοφορίας και σε ράμπα εισόδου.

Προκειμένου να εφαρμοστεί και να αξιολογηθεί το προτεινόμενο μοντέλο εκτίμησης, συλλέχθηκαν μικροσκοπικά στοιχεία κίνησης από NGSIM (Next Generation SIMulation) πρόγραμμα (4). Τα μικροσκοπικά αυτά στοιχεία κίνησης, περιλαμβάνουν τις τροχιές όλων των οχημάτων που κινούνται κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου I-80 στο Emeryville της Καλιφόρνιας στην κατεύθυνση προς το βορρά. Η καταγραφή των στοιχείων κίνησης των οχημάτων πραγματοποιήθηκε στις 13 Απριλίου 2015 από της 4:00 μετά μεσημβρίας μέχρι της 4:15 μετά μεσημβρίας (1). Τα στοιχεία πορείας που συλλέχθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό δεδομένων. Αρχικά, έγινε ο υπολογισμός των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την ολοκλήρωση της εκτίμησης από το μοντέλο Kalman Filter. Τα δεδομένα για την εκτίμηση είναι δεδομένα ταχύτητας των οχημάτων σε κάθε τμήμα και δεδομένα ροής στην είσοδο και στην έξοδο του αυτοκινητόδρομου, σε κάθε λωρίδα χωριστά. Έπειτα, ακολούθησε ο υπολογισμός πρόσθετων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν από τον εκτιμητή για την δημιουργία νέων αποτελεσμάτων. Τα πρόσθετα δεδομένα διαθέτουν πληροφορίες για την ροή των οχημάτων που αποφασίζουν να αλλάξουν λωρίδα. Τέλος, υπολογίσθηκαν δεδομένα που ήταν χρήσιμα για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εκτίμησης.

Για την εκτίμηση της κυκλοφορίας λάβαμε υπόψη ένα τμήμα του αυτοκινητοδρόμου, μήκους 400 μέτρων. Το τμήμα αποτελείται από μια ράμπα εισόδου, όπου η είσοδος της στον αυτοκινητόδρομο τελειώνει στα 175 μέτρα από την αρχή του υπό μελέτη τμήματος. Ο αυτοκινητόδρομος αποτελείται από 6 λωρίδες κυκλοφορίας. Η πρώτη λωρίδα κυκλοφορίας είναι λωρίδα περιορισμένης πρόσβασης σε οχήματα. Η είσοδος σε αυτή την λωρίδα είναι επιτρεπτή για τα οχήματα που έχουν υποχρεωτικά τον οδηγό και έναν ή και παραπάνω συνεπιβάτες (1). Η κυκλοφοριακή κατάσταση στην συγκεκριμένη λωρίδα διαφέρει σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Το τμήμα του αυτοκινητόδρομου χωρίστηκε σε μικρότερα τμήματα διάστασης 80 μέτρων το καθένα. Συνολικά τα τμήματα θα είναι 5. Το υπό μελέτη τμήμα του αυτοκινητοδρόμου απεικονίζεται στην εικόνα 3.1..



Εικόνα 3.1. : Γραφική αναπαράσταση του τμήματος του αυτοκινητοδρόμου I-80 στο Emeryville της Καλιφόρνιας.

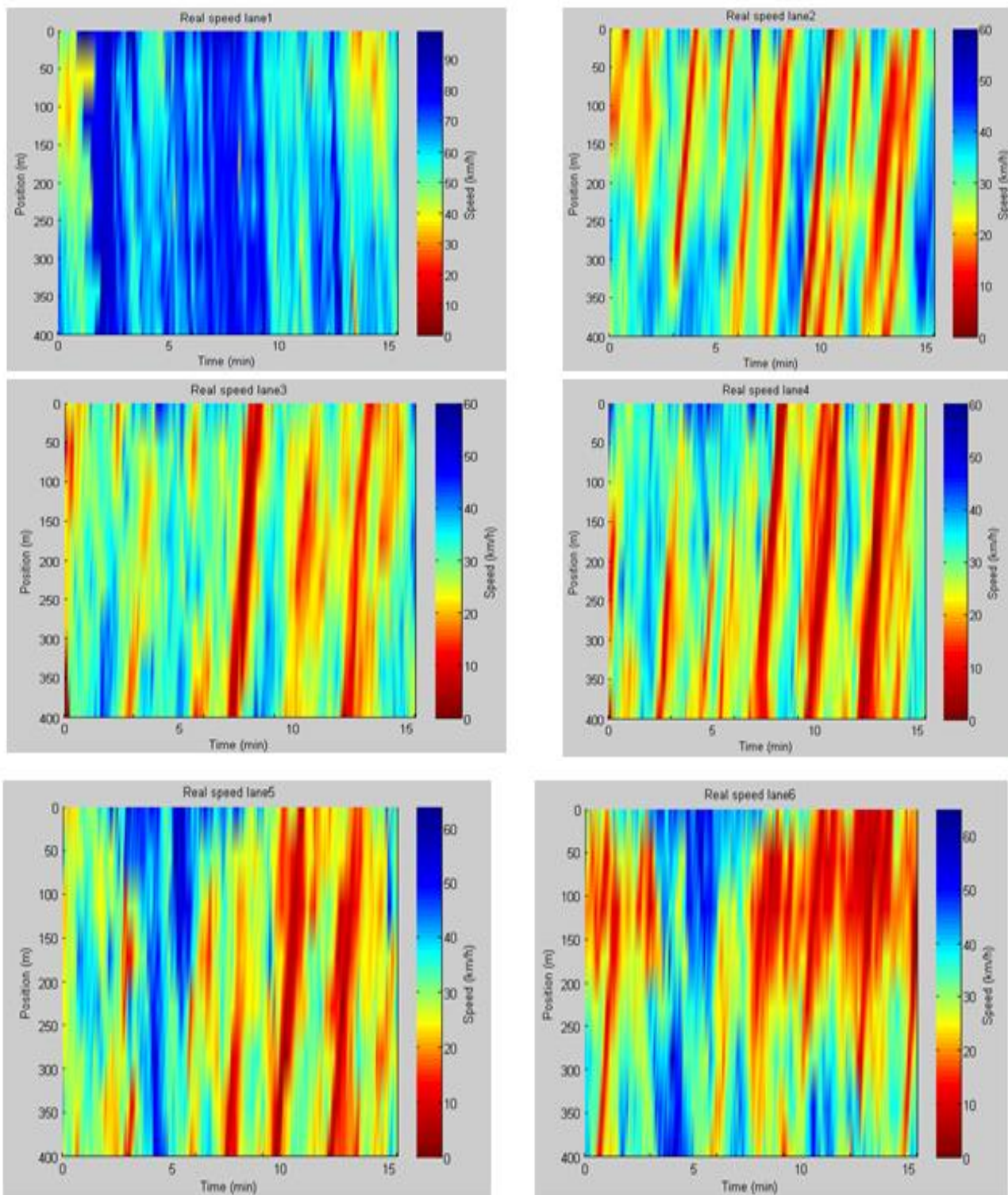
Όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την εκτέλεση της εκτίμησης μέσω του μοντέλου, συλλέχθηκαν από διαθέσιμα δεδομένα για την πορεία τροχιές των οχημάτων. Τα δεδομένα αυτά ανήκουν στην κατηγορία NGSIM δεδομένων. Οι πληροφορίες επεξεργάστηκαν από το μοντέλο εκτίμησης Kalman Filter για να βγουν συμπεράσματα για την κυκλοφοριακή κατάσταση ανά λωρίδα κυκλοφορίας του αυτοκινητόδρομου. Για την εκτέλεση μακροσκοπικών εκτιμήσεων συλλέχθηκαν πληροφορίες για τα οχήματα κάθε 5 δευτερόλεπτα.

3.1 Υπολογισμός δεδομένων ταχύτητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας

Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την ολοκλήρωση της εκτίμησης από μοντέλο αποτελούν πληροφορίες για την κυκλοφοριακή κατάσταση στον αυτοκινητόδρομο. Πιο συγκεκριμένα μια από αυτές είναι, η συνολική ταχύτητα των οχημάτων σε κάθε χρονικό βήμα, σε κάθε λωρίδα και σε κάθε τμήμα του αυτοκινητόδρομου, χωριστά. Η ταχύτητα αυτή υπολογίζεται από το μέσο όρο των ταχυτήτων των συνδεδεμένων οχημάτων σε χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h).

Διάφορα σενάρια εφαρμόζονται για το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων στο μήκος του αυτοκινητοδρόμου που μελετάται. Θεωρήθηκε όμως για την ταχύτητα η υπόθεση πως ο μέσος όρος των ταχυτήτων των συνδεδεμένων οχημάτων δεν διαφέρει από το μέσο όρο των ταχυτήτων όλων των οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο. Στο σενάριο όπου όλα τα οχήματα είναι συνδεδεμένα, τότε η ταχύτητα σε κάθε τμήμα των λωρίδων κυκλοφορίας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας στοιχεία της ταχύτητας από όλα τα οχήματα. Ενώ στην περίπτωση μικρότερου ποσοστού των συνδεδεμένων οχημάτων, το αποτέλεσμα της ταχύτητας θα είναι λιγότερο ακριβές καθώς δεν διατίθενται πληροφορίες από το σύνολο των οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο. Τα οχήματα που εισέρχονται στο δίκτυο τυχαία, σημειώνονται ως συνδεδεμένα (1). Δεδομένα για τις ταχύτητες των οχημάτων στην λωρίδα κυκλοφορίας συλλέχθηκαν κάθε 5 δευτερόλεπτα.

Στην εικόνα 3.2. παρατηρούμε τις τιμές των ταχυτήτων που αναπτύσσουν τα οχήματα καθώς κινούνται κατά μήκος της λωρίδας. Τα οχήματα στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι στο σύνολο τους συνδεδεμένα.



Σχήμα 3.2. : Οι συνολικές ταχύτητες των οχημάτων σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας του αυτοκινητοδρόμου, που εξάγονται από NGSIM δεδομένα.

Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζονται οι ταχύτητες των οχημάτων στην λωρίδα 1. Όπως είδη αναφέρθηκε, η λωρίδα αυτή αποτελείται από περιορισμένο αριθμό οχημάτων. Για το λόγο αυτό, δεν παρατηρούνται μεγάλες αυξομειώσεις της ταχύτητας των οχημάτων με την πάροδο του χρόνου και κατά μήκος της λωρίδας κυκλοφορίας. Από την άλλη μεριά όμως στα επόμενα σκίτσα, στις λωρίδες 2, 3, 4, 5 και 6 τα οχήματα κινούνται με χαμηλότερες ταχύτητες. Επίσης, στις λωρίδες αυτές φαίνεται να δημιουργείται μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση στο χρονικό διάστημα από 7 λεπτά μέχρι 15 λεπτά. Η συμφόρηση αυτή παρουσιάζεται αρχικά στο τέλος της λωρίδας και με την πάροδο του χρόνου μεταφέρεται σταδιακά προς την είσοδο. Το φαινόμενο αυτό, επαναλαμβάνεται περίπου ανά δυο λεπτά (μέσα στο χρονικό διάστημα 7 έως 15 λεπτά). Στην λωρίδα 6 η κυκλοφοριακή συμφόρηση παρουσιάζεται έντονα αυξημένη τόσο στις αρχικές μετρήσεις, όσο και στις τελικές μετρήσεις στα τμήματα που βρίσκονται κοντά στην είσοδο της λωρίδας.

3.2 Υπολογισμός δεδομένων ροής των οχημάτων ανά λωρίδα κυκλοφορίας

Για την εκτίμηση της κυκλοφορίας στον αυτοκινητόδρομο από το μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της ροής των οχημάτων σε κάθε λωρίδα στην είσοδο και στην έξοδο του τμήματος που μελετάται. Η ροή των οχημάτων υπολογίστηκε με την χρήση αισθητήρων κυκλοφορίας που βρίσκονται στην είσοδο και στην έξοδο του αυτοκινητόδρομου. Από αυτά καταγράφεται ο αριθμός των οχημάτων που αναγνωρίζεται (ανεξάρτητα αν τα οχήματα είναι συνδεδεμένα ή όχι) (1). Η ροή υπολογίζεται σε οχήματα ανά ώρα (Vehicles/h).

3.3 Υπολογισμός δεδομένων για την ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα

Επιπλέον συλλέχθηκαν πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με την ροή των οχημάτων που αποφασίζουν να αλλάξουν λωρίδα. Με την βοήθεια των πρόσθετων αυτών πληροφοριών ακολούθησε νέα εκτίμηση της κατάστασης της κυκλοφορίας στον αυτοκινητόδρομο. Η συλλογή των επιπλέον πληροφοριών έγινε με στόχο την βελτίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου εκτίμησης. Τα δεδομένα αυτά, δίνουν πληροφορίες για την ροή στις λωρίδες, σε κάθε τμήμα του αυτοκινητόδρομου. Διαφορετικές τιμές της ροής λαμβάνονται κάθε 5 δευτερόλεπτα. Η ροή παίρνει διαφορετικές τιμές στην περίπτωση που τα οχήματα μετακινηθούν με κατεύθυνση προς τα δεξιά και διαφορετικές με την μετακίνησή τους προς τα αριστερά. Πληροφορίες για την ροή συλλέχθηκαν για διάφορα ποσοστά συνδεδεμένων οχημάτων στο υπό μελέτη τμήμα του αυτοκινητοδρόμου.

Για τον υπολογισμό της κάθετης ροής που εκτελούν τα οχήματα για να αλλάξουν λωρίδα, χρησιμοποιήθηκε από τα δεδομένα τροχιών των οχημάτων η θέση των οχημάτων (σε

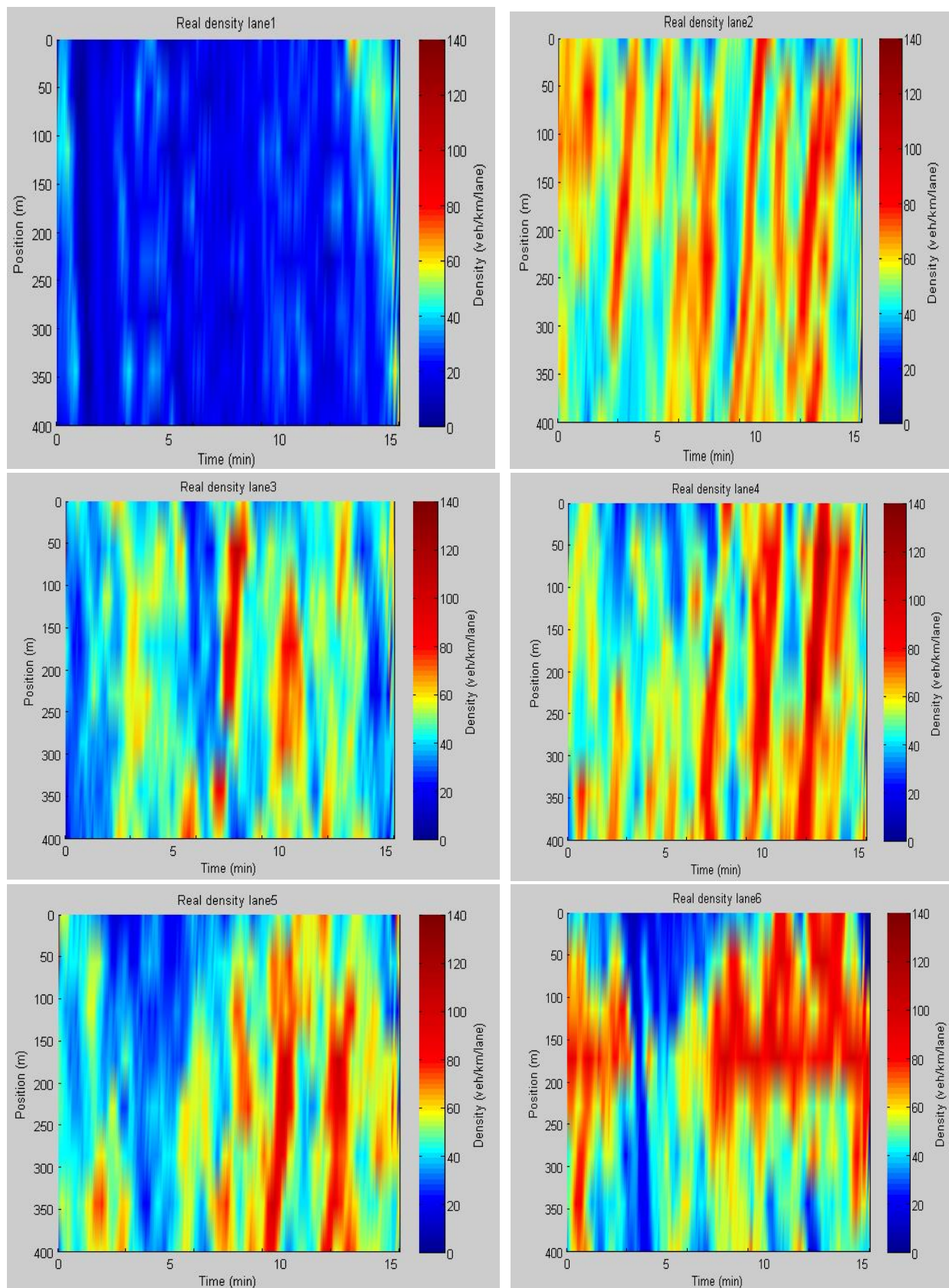
ποια λωρίδα βρισκόταν το όχημα την χρονική στιγμή της μέτρησης και σε ποια την προηγούμενη χρονική στιγμή).

3.4 Υπολογισμός δεδομένων πυκνότητας των οχημάτων ανά λωρίδα κυκλοφορίας

Στην ενότητα αυτή, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης, έγινε ο υπολογισμός των δεδομένων για την πυκνότητα των οχημάτων στις λωρίδες κυκλοφορίας και των δεδομένων για την ροή των οχημάτων στην ράμπα εισόδου. Τα δεδομένα αυτά υπολογίσθηκαν από την επεξεργασία των στοιχείων κίνησης που διαθέτουμε.

Η πυκνότητα σε κάθε τμήμα του αυτοκινητόδρομου ανά λωρίδα κυκλοφορίας, υπολογίζεται μετρώντας των αριθμό των οχημάτων που είναι παρόντα σε αυτό το τμήμα την χρονική στιγμή της μέτρησης διαιρούμενο με το μήκος του συγκεκριμένου τμήματος (80 μέτρα) (1).

Στην εικόνα 3.3. παρατηρούμε τις τιμές της πυκνότητας για τα οχήματα καθώς κινούνται κατά μήκος της λωρίδας κυκλοφορίας (Vehicles/km/lane).

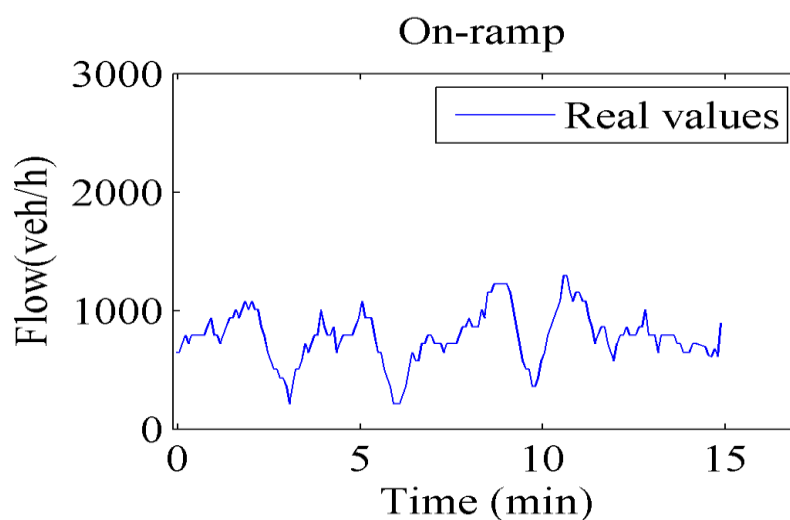


Σχήμα 3.3. Οι συνολικές πυκνότητες των οχημάτων σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας του αυτοκινητοδρόμου.

Από τα σχήματα που απεικονίστηκαν προηγουμένως για την πυκνότητα και για την ταχύτητα των οχημάτων στις λωρίδες κυκλοφορίας του αυτοκινητόδρομου, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά (μεταβολές) και των δυο είναι παρόμοια. Αυτό είναι απόλυτα λογικό, καθώς η αυξημένη πυκνότητα των οχημάτων εμποδίζει την ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων.

3.5 Υπολογισμός δεδομένων ροής των οχημάτων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητόδρομου

Τα δεδομένα της ροής των οχημάτων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου υπολογίζονται με την βοήθεια εικονικού αισθητήρα. Ο αισθητήρας καταγράφει τον αριθμό των οχημάτων που εξέρχονται από την ράμπα και εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο ανάμεσα σε δύο διαδοχικές μετρήσεις (Vehicles/h). Τα δεδομένα ροής παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα συναρτήσεως του χρόνου, όπου κάθε 5 δευτερόλεπτα πραγματοποιείται νέος υπολογισμός των δεδομένων ροής.



Σχήμα 3.4. : Η ροή των οχημάτων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητόδρομου.

4 Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων κυκλοφοριακής κατάστασης ανά λωρίδα κυκλοφορίας

Στην προηγούμενη ενότητα, υπολογίσθηκαν όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την επιτυχή εκτίμηση της κυκλοφορίας στον αυτοκινητόδρομο (δεδομένα για την εκτίμηση, για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων και την βελτίωση τους). Στην παρούσα ενότητα, θα γίνει έλεγχος της ορθότητας των δεδομένων αυτών.

4.1 Πιστοποίηση ορθότητας με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης των οχημάτων για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας

Για την αξιολόγηση των δεδομένων κυκλοφοριακής κατάστασης μετά από τον υπολογισμό τους στις προηγούμενες ενότητες, εφαρμόστηκε ο νόμος της διατήρησης του πλήθους των οχημάτων σε κάθε τμήμα και λωρίδα χωριστά. Η εξίσωσή της διατήρησης σε κάθε τμήμα (80 μέτρων) και σε κάθε λωρίδα χωριστά έχει την ακόλουθη μορφή (3):

$$\rho_{i,j}(k+1) = \rho_{i,j}(k) + \frac{T}{L} \{q_{i-1,j}(k) - q_{i,j}(k) + f_{i,j+1,j}(k) + f_{i,j-1,j}(k) - f_{i,j,j-1}(k) - f_{i,j,j+1}(k)\}$$

T : χρονικό βήμα μετρήσεων(5 sec).

L : το μήκος κάθε τμήματος i (80 μέτρα) ,του αυτοκινητόδρομου.

$\rho_{i,j}(k)$: η πυκνότητα των οχημάτων την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) της μέτρησης στο τμήμα i στην λωρίδα j του αυτοκινητόδρομου.

$q_{i,j}(k)$: η ροή των οχημάτων την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) της μέτρησης στο τμήμα i στην λωρίδα j του αυτοκινητόδρομου.

$f_{i,j+1,j}(k)$: η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα με κατεύθυνση προς τα δεξιά την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) ,στο τμήμα i , καθώς βρίσκονται στην λωρίδα $j+1$.

$f_{i,j-1,j}(k)$: η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα με κατεύθυνση προς τα αριστερά την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) ,στο τμήμα i , καθώς βρίσκονται στην λωρίδα $j-1$.

$f_{i,j,j-1}(k)$: η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα με κατεύθυνση προς τα δεξιά την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) ,στο τμήμα i , καθώς βρίσκονται στην λωρίδα j .

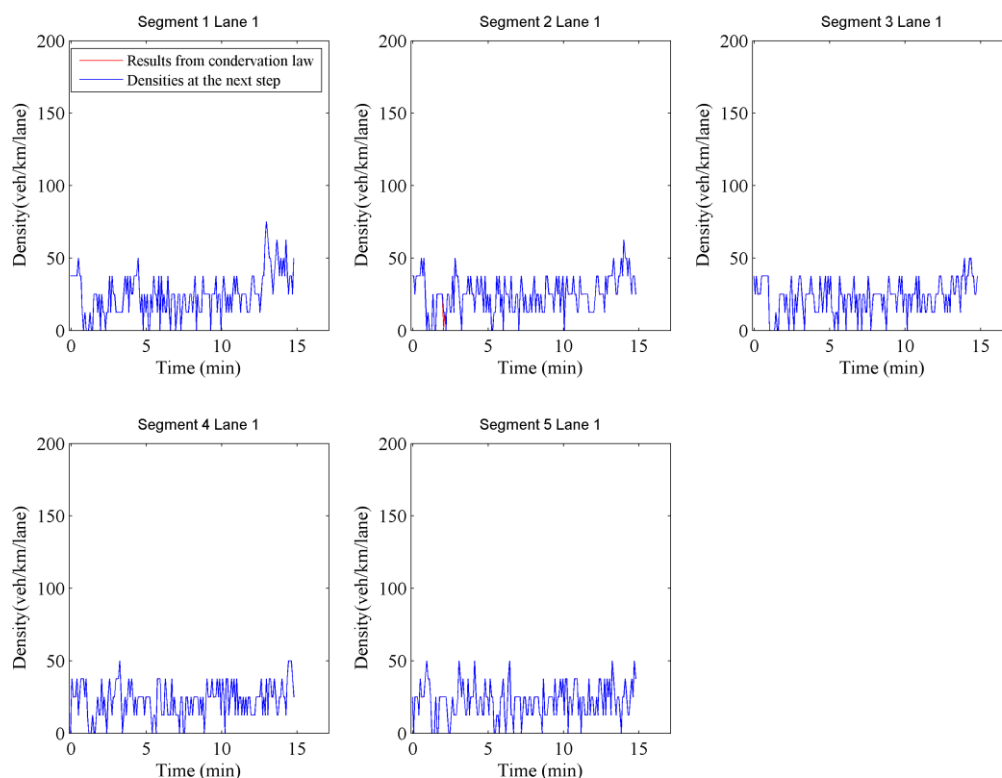
$f_{i,j,j+1}(k)$: η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα με κατεύθυνση προς τα αριστερά την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) ,στο τμήμα i , καθώς βρίσκονται στην λωρίδα j .

Για την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης των οχημάτων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της ροής ανάμεσα στα τμήματα σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας, αλλά και δεδομένα της ροής μεταξύ των λωρίδων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι ροές υπολογίζονται με την βοήθεια της θέσης των οχημάτων σε δυο διαδοχικές χρονικές στιγμές.

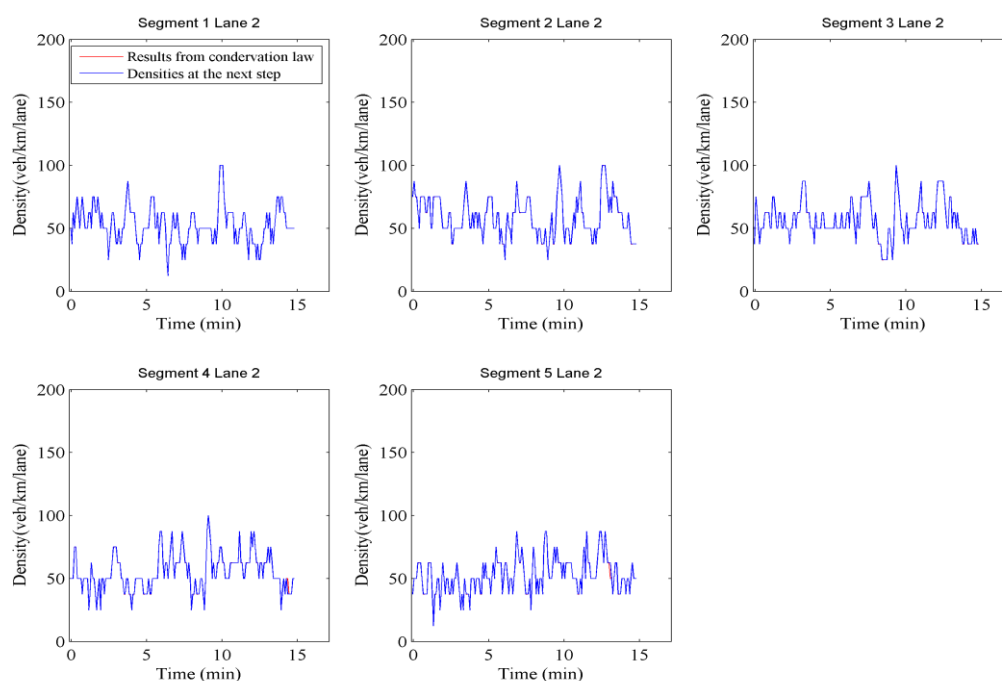
Αστοχίες μπορεί να προκύψουν εξαιτίας της αυξημένης ταχύτητας των οχημάτων σε κάθε τμήμα και λωρίδα κυκλοφορίας ($u_{i,j}(k) > \frac{L}{T}$). Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το όχημα που παρατηρείται σε ένα τμήμα σε μια χρονική στιγμή, την επόμενη χρονική στιγμή να μην εμφανίζεται στο γειτονικό τμήμα ή λωρίδα, αλλά να το έχει ξεπεράσει. Για την αποφυγή της αστοχίας αυτής μειώθηκε ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών μετρήσεων (το χρονικό βήμα) στο 1 sec και έπειτα εφαρμόστηκε ο νόμος της διατήρησης των οχημάτων σε κάθε τμήμα και λωρίδα, χωριστά. Με την χρήση του νόμου έγινε η αξιολόγηση των δεδομένων ροής και πυκνότητας των οχημάτων στο τμήμα και στην λωρίδα εφαρμογής του.

Τέλος, έχοντας επιτύχει σωστά αποτελέσματα για τα δεδομένων σε χρονικό βήμα 1 sec, ακολούθησαν τα συμπεράσματα για τα 5 sec. Στα σχήματα που θα ακολουθήσουν φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του νόμου της διατήρησης με χρονικό βήμα 5 sec για κάθε τμήματα και λωρίδα του αυτοκινητοδρόμου, χωριστά. Τα διαγράμματα απεικονίζουν την συμπεριφορά του νόμου για το σενάριο όπου όλα τα οχήματα είναι συνδεδεμένα.

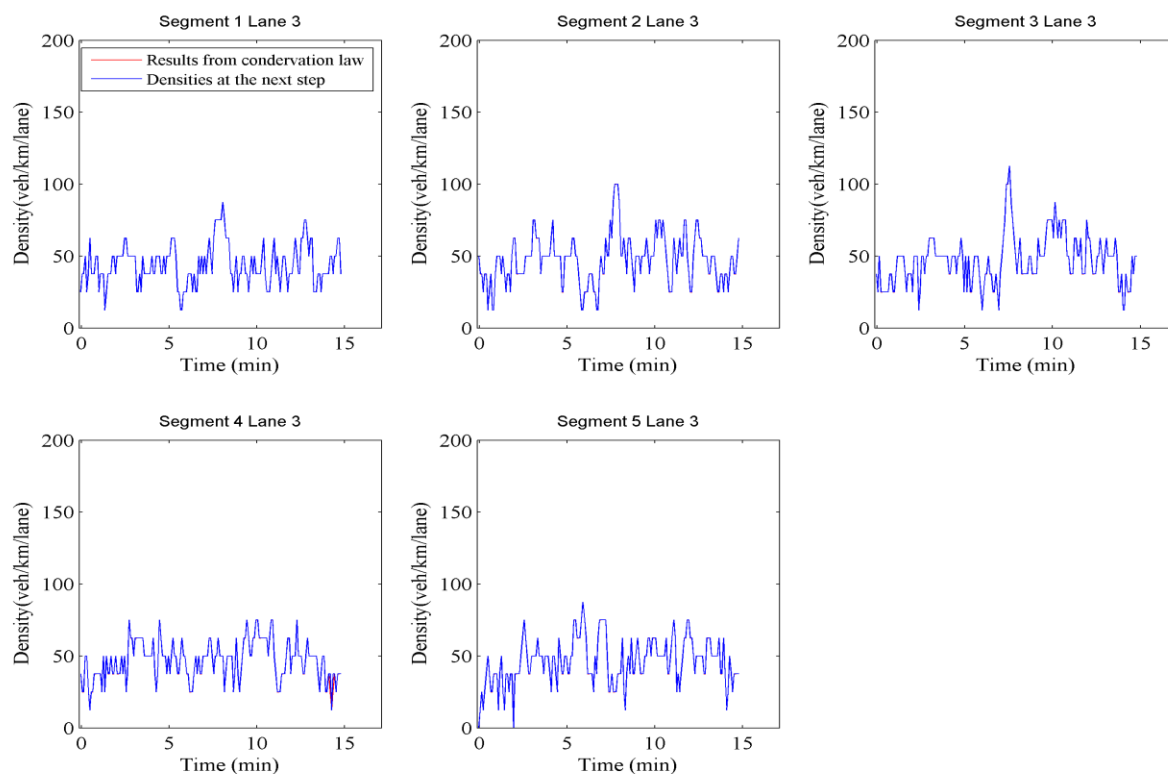
Ακόμη γνωρίζοντας πως η είσοδος της ράμπας στον αυτοκινητόδρομο βρίσκεται στο δεύτερο και τρίτο τμήμα της λωρίδας 6 για την αποφυγή αστοχιών στα τμήματα αυτά χρειάστηκε να προστεθούν στον νόμο της διατήρησης τα δεδομένα της ροής από την ράμπα εισόδου.



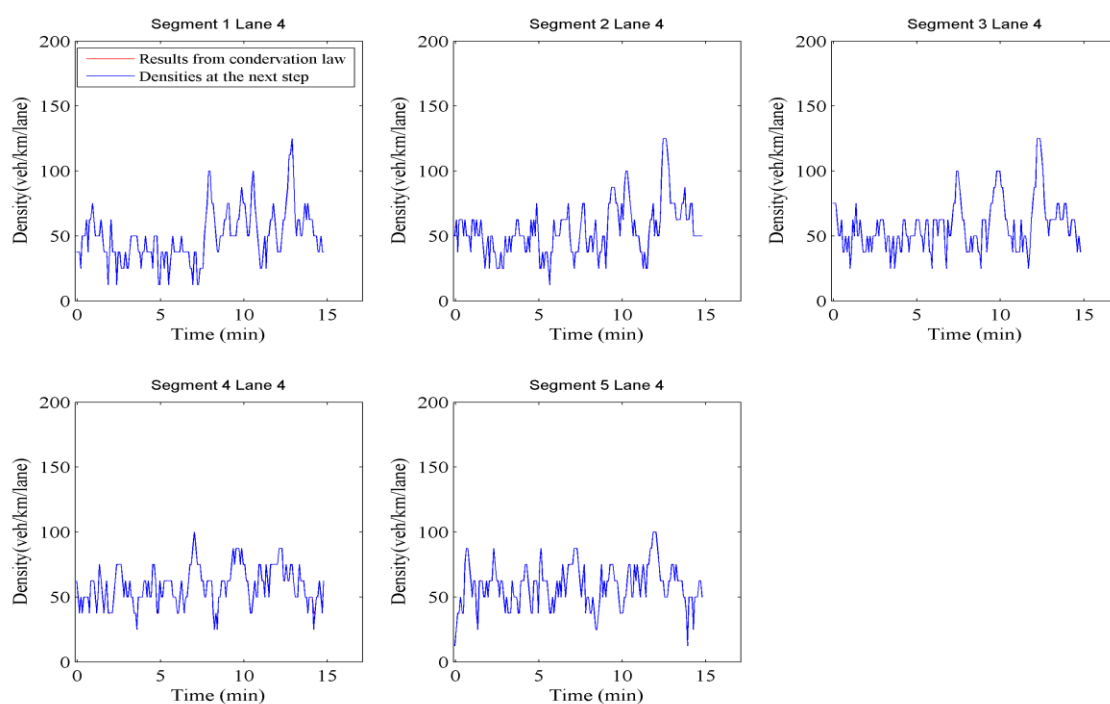
Σχήμα 4.1. : Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης του πλήθους των οχημάτων στην λωρίδα 1, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



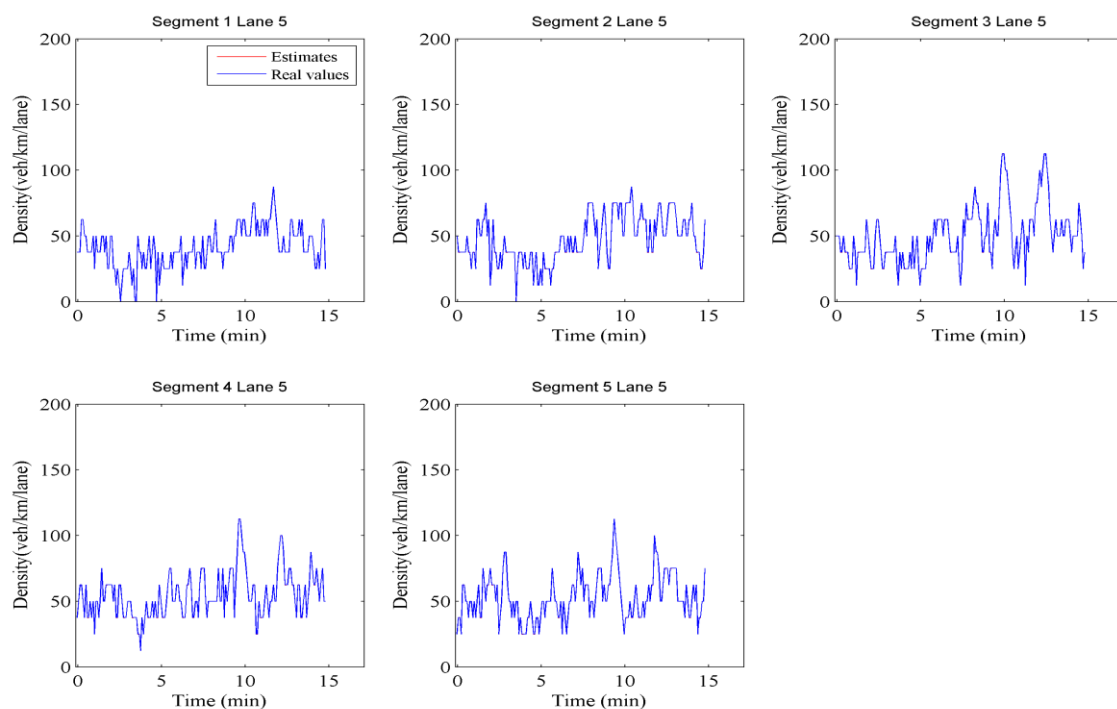
Σχήμα 4.2. : Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης του πλήθους των οχημάτων στην λωρίδα 2, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



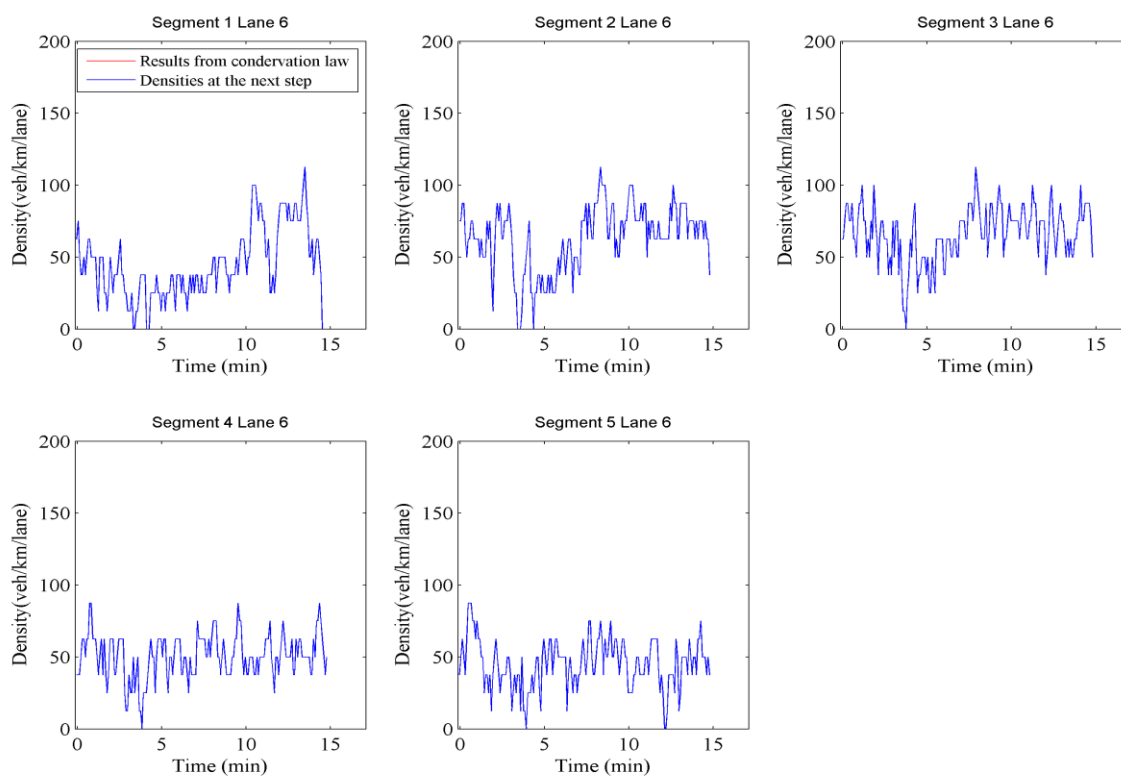
Σχήμα 4.3. : Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης του πλήθους των οχημάτων στην λωρίδα 3, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



Σχήμα 4.4. : Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης του πλήθους των οχημάτων στην λωρίδα 4, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



Σχήμα 4.5. : Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης του πλήθους των οχημάτων στην λωρίδα 5, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



Σχήμα 4.6. : Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης του πλήθους των οχημάτων στην λωρίδα 6, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.

Από τα σχήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, από την ταύτιση των καμπύλων (εμφανίζονται μόνο οι μπλε λόγω ταύτισης με τις κόκκινες), γίνεται φανερό πως οι τιμές των δεδομένων που εισήχθησαν στο νόμο της διατήρησης των οχημάτων είναι η επιθυμητές.

4.2 Πιστοποίηση ορθότητας των δεδομένων ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα με την εφαρμογή μοντέλου

Ένας τρόπος να ελεγχθούν οι ροές των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα σε αυτοκινητόδρομο που τα οχήματα δεν είναι στο σύνολο τους συνδεδεμένα, είναι η εφαρμογή του αναφερόμενου στην συνέχεια μοντέλου. Με την χρήση των παρακάτω εξισώσεων μπορεί να ελεγχθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων της ροής των οχημάτων με κατεύθυνση προς τα αριστερά και προς τα δεξιά.

$$f'_{i,j-1,j}(k) = f_{i,j-1,j}(k) * \left\{ \frac{\rho'_{i,j-1}(k)}{\rho_{i,j-1}(k)} \right\}, \quad f'_{i,j+1,j}(k) = f_{i,j+1,j}(k) * \left\{ \frac{\rho'_{i,j+1}(k)}{\rho_{i,j+1}(k)} \right\},$$

όπου :

$\rho'_{i,j-1}(k)$: η πυκνότητα των οχημάτων την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) της μέτρησης στο τμήμα i στην λωρίδα $j-1$ του αυτοκινητόδρομου. Το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο είναι 100%.

$\rho'_{i,j+1}(k)$: η πυκνότητα των οχημάτων την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) της μέτρησης στο τμήμα i στην λωρίδα $j+1$ του αυτοκινητόδρομου. Το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο είναι 100%.

$\rho_{i,j-1}(k)$: η πυκνότητα των οχημάτων την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) της μέτρησης στο τμήμα i στην λωρίδα $j-1$ του αυτοκινητόδρομου. Η πυκνότητα υπολογίστηκε για διάφορα ποσοστά των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο (μικρότερα του 100%).

$\rho_{i,j+1}(k)$: η πυκνότητα των οχημάτων την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) της μέτρησης στο τμήμα i στην λωρίδα $j+1$ του αυτοκινητόδρομου. Η πυκνότητα υπολογίστηκε για διάφορα ποσοστά των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο (μικρότερα του 100%).

$f'_{i,j-1,j}(k)$: η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα με κατεύθυνση προς τα αριστερά την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) ,στο τμήμα i , καθώς βρίσκονται στην λωρίδα $j-1$. Με άλλα λόγια τα οχήματα που πηγαίνουν από την λωρίδα $j-1$ στην λωρίδα j . Το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο είναι 100%.

$f'_{i,j+1,j}(k)$: η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα με κατεύθυνση προς τα δεξιά την χρονική στιγμή ($k \cdot T$) ,στο τμήμα i , καθώς βρίσκονται στην λωρίδα $j+1$. Με άλλα λόγια τα

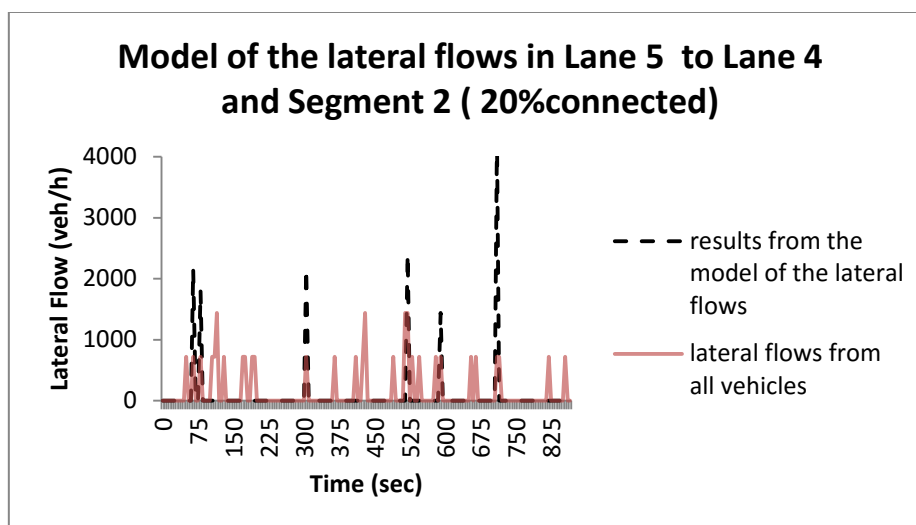
οχήματα που πηγαίνουν από την λωρίδα $j+1$ στην λωρίδα j . Το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο είναι 100%.

$f_{i,j-1,j}(k)$: η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα με κατεύθυνση προς τα αριστερά την χρονική στιγμή ($k \cdot T$), στο τμήμα i , καθώς βρίσκονται στην λωρίδα $j-1$. Με άλλα λόγια τα οχήματα που πηγαίνουν από την λωρίδα $j-1$ στην λωρίδα j . Η ροή στο τμήμα i, j υπολογίστηκε για διάφορα ποσοστά των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο (μικρότερα του 100%).

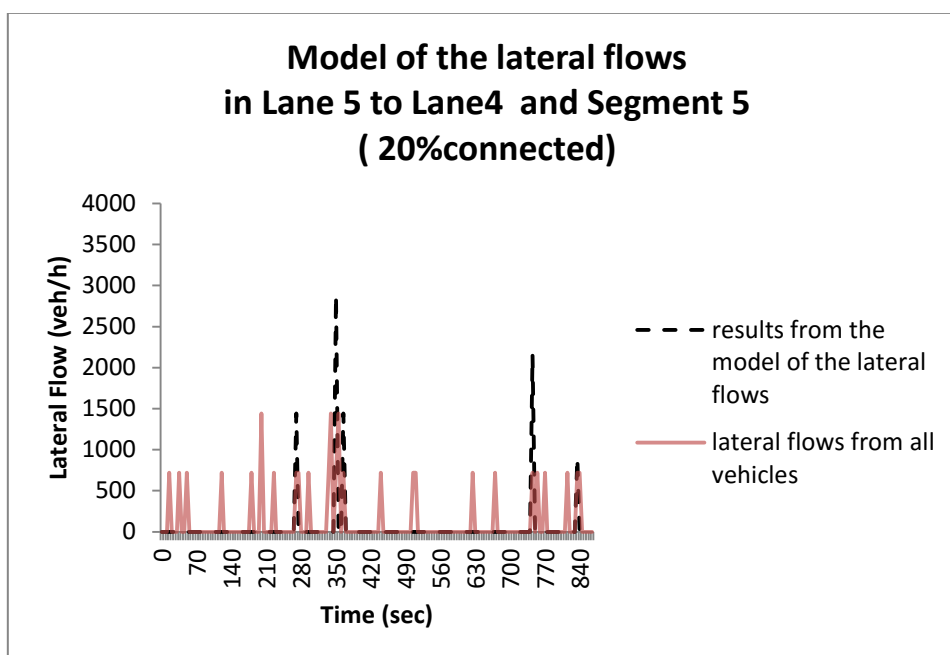
$f_{i,j+1,j}(k)$: η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα με κατεύθυνση προς τα δεξιά την χρονική στιγμή ($k \cdot T$), στο τμήμα i , καθώς βρίσκονται στην λωρίδα $j+1$. Με άλλα λόγια τα οχήματα που πηγαίνουν από την λωρίδα $j+1$ στην λωρίδα j . Η ροή στο τμήμα i, j υπολογίστηκε για διάφορα ποσοστά των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο (μικρότερα του 100%).

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των παραπάνω εξισώσεων σε τμήματα και λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου. Η επιλογή των τμημάτων και της κατεύθυνσης των οχημάτων έγινε με κριτήριο την αυξημένη ροή αυτών κατά την αλλαγή λωρίδας. Με αυτόν τον τρόπο επιλέχτηκαν να παρουσιαστούν τα τμήματα και οι λωρίδες εκείνες όπου η ροή των οχημάτων έπαιρνε μεγαλύτερες τιμές εξαιτίας της ράμπας εισόδου. Δηλαδή, τα οχήματα που βρίσκονται στην λωρίδα 6 και 5 και αποφασίζουν να αλλάξουν λωρίδα κινούμενα προς την λωρίδα 5 και 4, αντίστοιχα. Η αναπαράσταση των κάθετων ροών κατά την αλλαγή λωρίδας προς την αντίθετη κατεύθυνση και η συμπεριφορά τους κατά την εφαρμογή του μοντέλου δεν είχε νόημα καθώς το πλήθος των οχημάτων είναι πολύ μικρό.

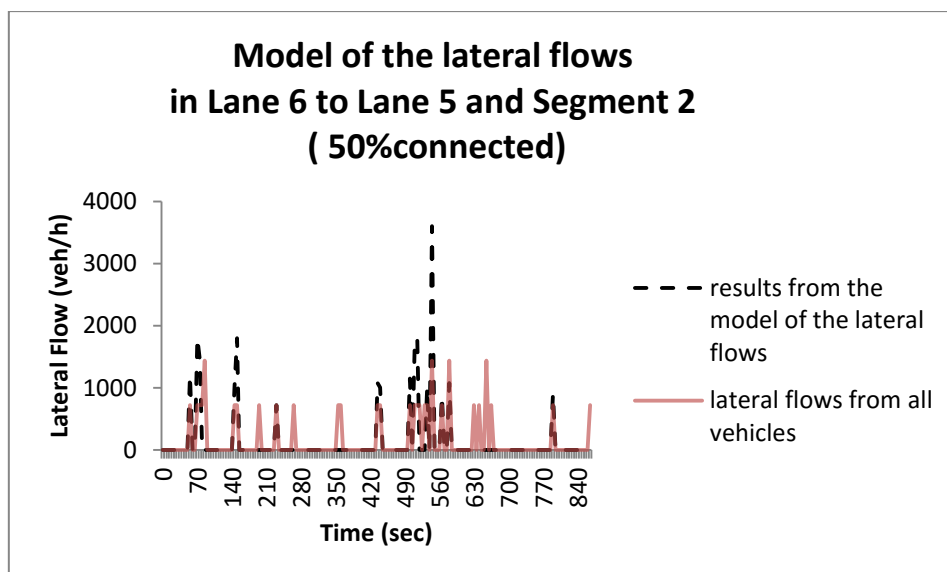
Ο έλεγχος της ροής μέσω για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα εφαρμόστηκε για τις περιπτώσεις που τα συνδεδεμένα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο έχουν ποσοστό 50% και 20%.



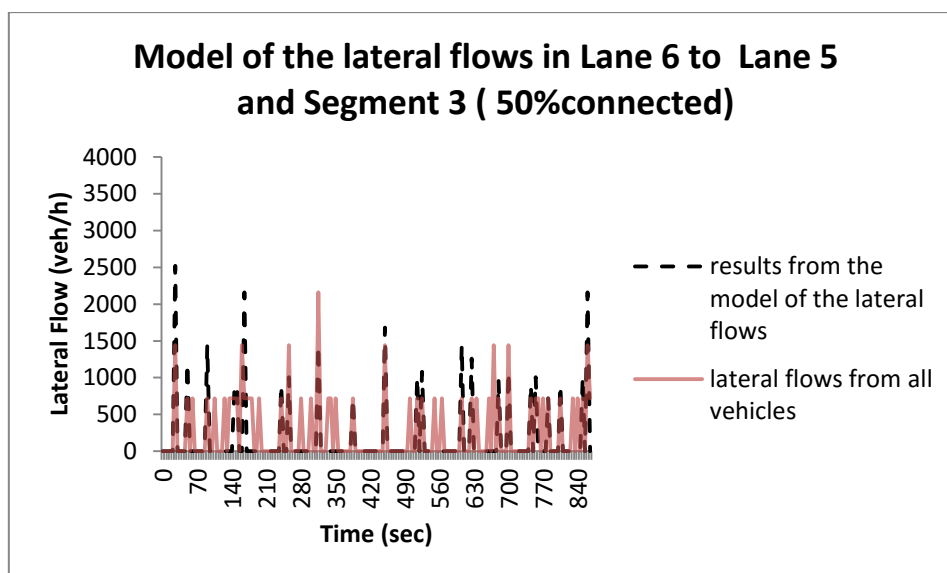
Σχήμα 4.7.: Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 5 στην λωρίδα 4 βρισκόμενα στο τμήμα 2 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



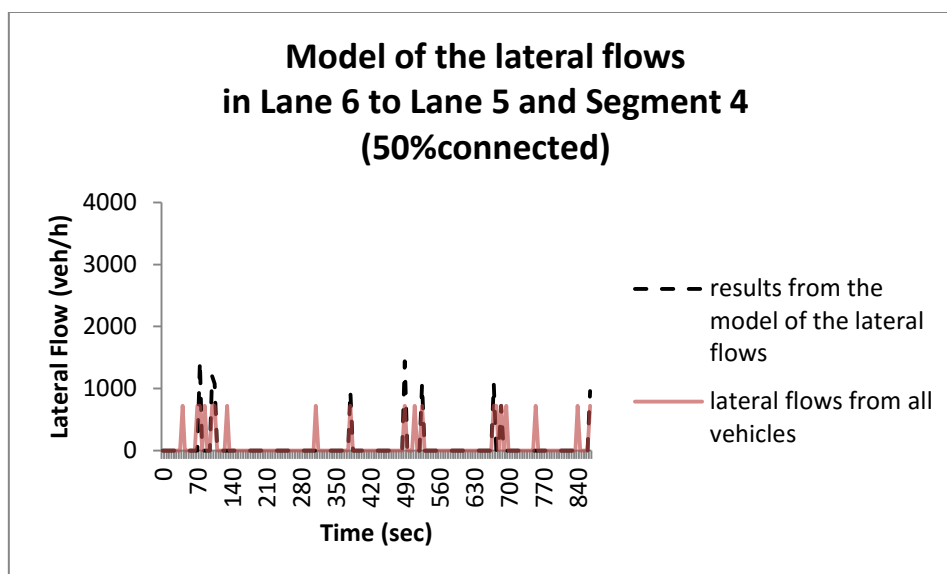
Σχήμα 4.8. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 5 στην λωρίδα 4 βρισκόμενα στο τμήμα 5 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



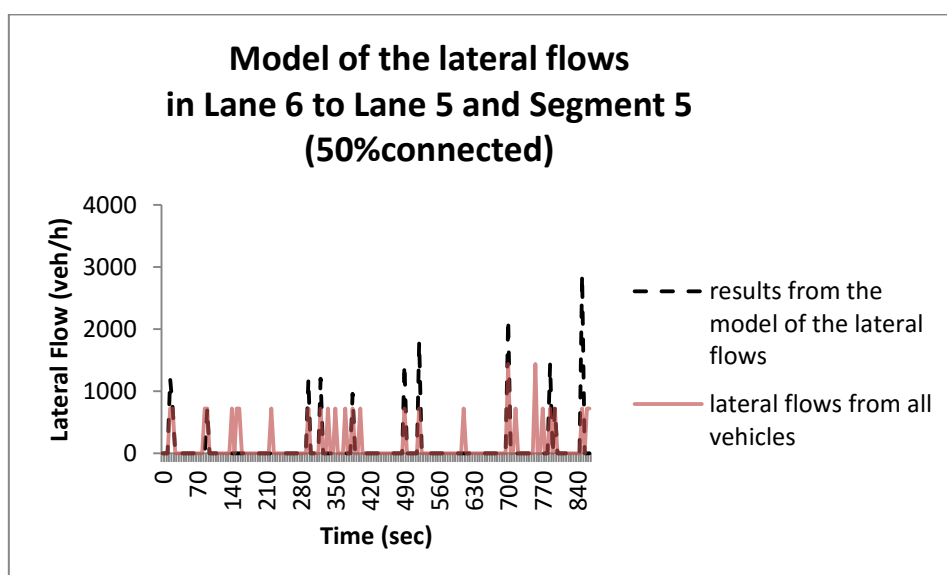
Σχήμα 4.9. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 6 στην λωρίδα 5 βρισκόμενα στο τμήμα 2 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



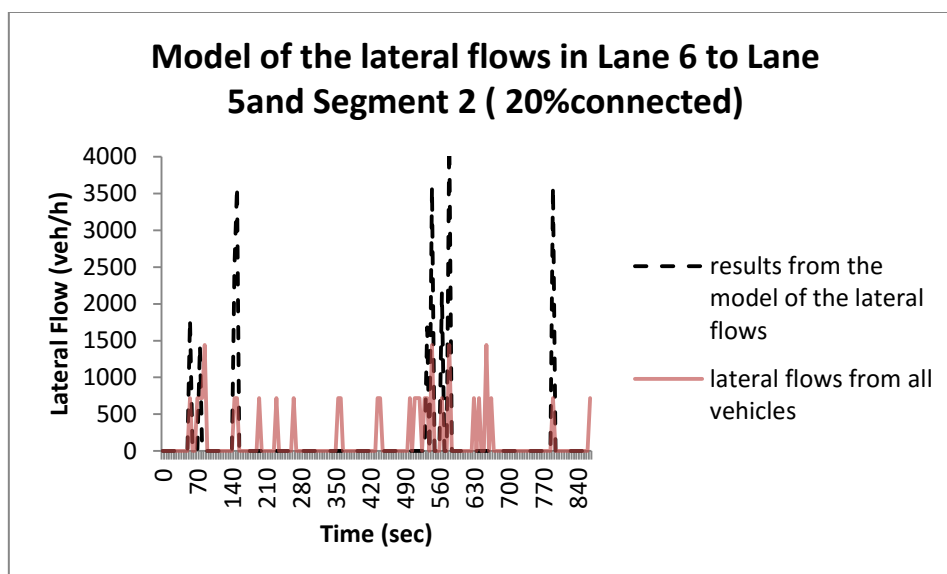
Σχήμα 4.10. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 6 στην λωρίδα 5 βρισκόμενα στο τμήμα 3 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



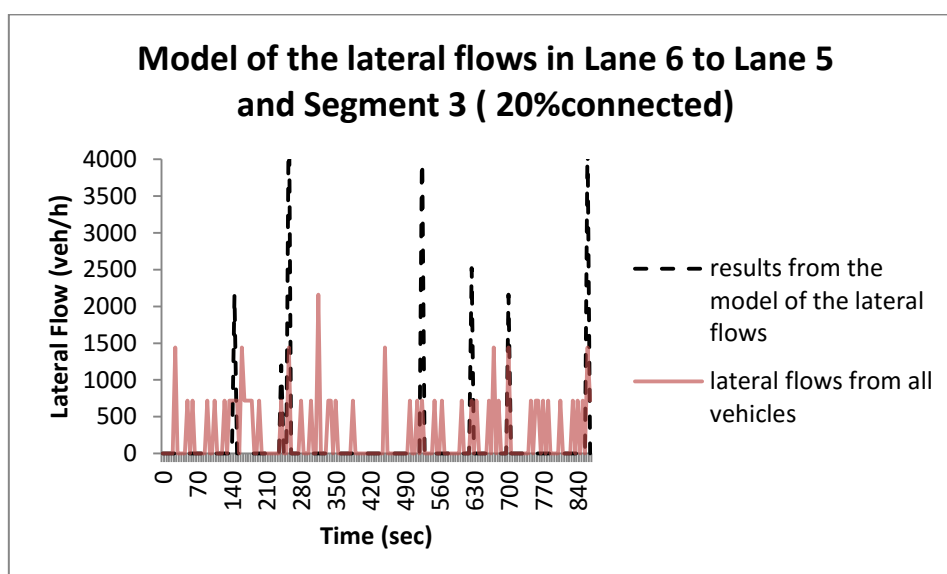
Σχήμα 4.12. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 6 στην λωρίδα 5 βρισκόμενα στο τμήμα 4 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



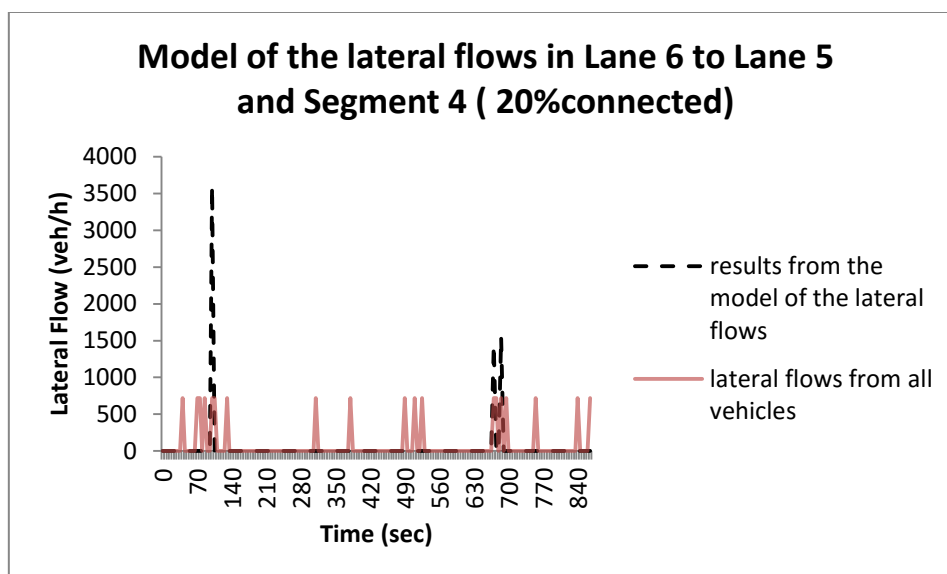
Σχήμα 4.13. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 6 στην λωρίδα 5 βρισκόμενα στο τμήμα 5 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



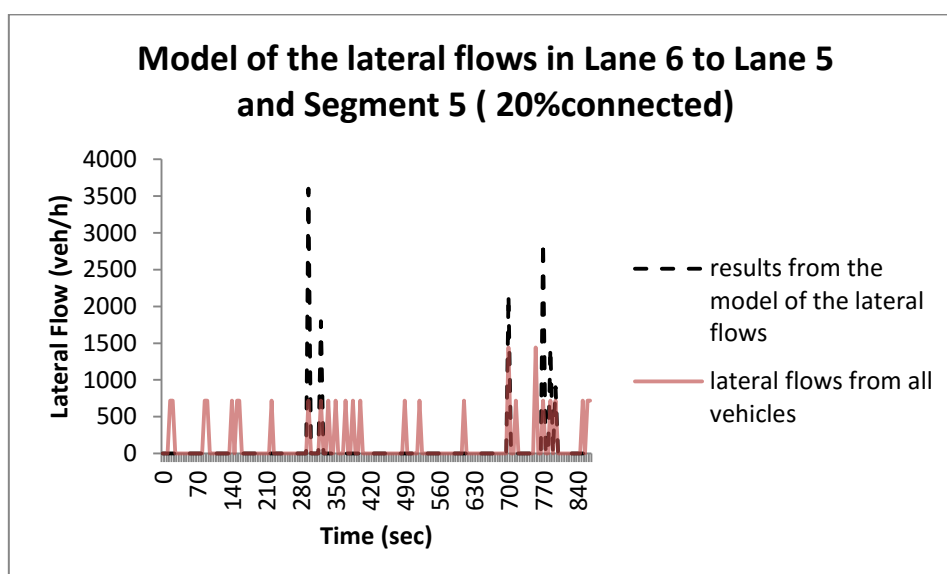
Σχήμα 4.14. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 6 στην λωρίδα 5 βρισκόμενα στο τμήμα 2 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 4.15. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 6 στην λωρίδα 5 βρισκόμενα στο τμήμα 3 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 4.16. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 6 στην λωρίδα 5 βρισκόμενα στο τμήμα 4 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 4.17. : Πιστοποίηση ορθότητας της ροής για τα οχήματα που πηγαίνουν από την 6 στην λωρίδα 5 βρισκόμενα στο τμήμα 5 του αυτοκινητόδρομου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.

Στα παραπάνω διαγράμματα η ροή των οχημάτων στο σενάριο όπου τα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο είναι όλα συνδεδεμένα στη γραμμή 6 και στα τμήματα 2, 3, 4, 5 παίρνει στην πλειονότητα την τιμή 720 Vehicles/h και 0 Vehicles/h. Αυτό υποδηλώνει ότι η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα σε κάθε χρονικό βήμα (5 sec) είναι 0 ή 1 όχημα.

Επίσης παρατηρείται από τα προηγούμενα σχήματα ότι το μοντέλο εμφανίζει αποκλίσεις. Αυτό οφείλεται, στο ότι η μείωση του ποσοστού των οχημάτων που είναι σε σύνδεση σε κάθε τμήμα και λωρίδα δεν σημαίνει απαραίτητα και μείωση με το ίδιο ποσοστό και στα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα. Για αυτόν το λόγο και στα παραπάνω σχήματα σε ορισμένες χρονικές στιγμές, η τιμή της ροής για λιγότερα συνδεδεμένα οχήματα επί το ποσοστό των οχημάτων που είναι σε σύνδεση στο τμήμα και στην λωρίδα που εξετάζουμε, παρατηρείται διαφορετική συγκριτικά με τη τιμή της ροής όπου όλα τα οχήματα είναι σε σύνδεση στο συγκεκριμένο τμήμα του αυτοκινητόδρομου.

Τέλος, μια ακόμη αιτία της εμφάνισης αποκλίσεων στα ανωτέρω διαγράμματα κατά την εφαρμογή του μοντέλου είναι οι μηδενικές τιμές των πυκνοτήτων των συνδεδεμένων οχημάτων στο υπό μελέτη τμήμα στις περιπτώσεις όπου η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα έχει μη μηδενική τιμή. Η αστοχία αυτή εμφανίζεται όταν ανάμεσα σε δυο χρονικές μετρήσεις (5 sec) όχημα φθάνει από προηγούμενο τμήμα στο υπό μελέτη τμήμα και από εκεί αλλάζει λωρίδα. Για την περίπτωση αυτή αντικαταστήθηκε η τιμή της πυκνότητας με τη μηδενική τιμή, με το μέσο όρο των προηγούμενων τιμών της. Στα απεικονιζόμενα διαγράμματα η αστοχία αυτή έγινε αντιληπτή στο τμήμα 2 και 4 της λωρίδα 6 για το σενάριο 20% των συνδεδεμένων στο 690^ο και 515^ο λεπτό, αντίστοιχα.

5 Εκτίμηση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα του αυτοκινητόδρομου, για τα NGSIM δεδομένα

Σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, υπολογίσθηκαν δεδομένα με την χρήση δεδομένων μορφής NGSIM. Τα δεδομένα αυτά, θα εισαχθούν σε μοντέλο εκτίμησης (Kalman filter) για να βγουν συμπεράσματα για την κατάσταση της πυκνότητας και της ροής των οχημάτων ανά λωρίδα κυκλοφορίας και στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητόδρομου, αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα, απαραίτητα τα δεδομένα για την ολοκλήρωση της εκτίμησης από μοντέλο είναι η συνολική ταχύτητα και η ροή των οχημάτων στην είσοδο και στην έξοδο του αυτοκινητοδρόμου (μήκους 400 μέτρων), ανά λωρίδα κυκλοφορίας. Οι πληροφορίες αλλάζουν σε κάθε χρονικό βήμα (5 sec). Τα δεδομένα για την ταχύτητα θα υπολογιστούν στις περιπτώσεις που το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων διαφέρει.

Με την βοήθεια των δεδομένων NGSIM και στην συνέχεια την ολοκλήρωση της εκτίμησης από το μοντέλο, βγήκαν στοιχεία της πυκνότητας και της ροής των οχημάτων σε κάθε τμήμα για κάθε μια λωρίδα κυκλοφορίας και στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων είναι διαφορετικά κάθε 5 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης θα παρασταθούν σε διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά, θα περιέχουν και τα πραγματικά δεδομένα που

υπολογίσθηκαν από τα στοιχεία κίνησης των οχημάτων που διαθέτουμε. Με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί η αξιολόγηση της εκτίμησης. Τέλος η εκτίμηση θα πραγματοποιηθεί και θα παρουσιαστεί σε διαγράμματα για διάφορα ποσοστά των συνδεδεμένων οχημάτων στο τμήμα του αυτοκινητόδρομου.

Για την εκτίμηση των δεδομένων κυκλοφοριακής κατάστασης από το μοντέλο για τον αυτοκινητόδρομο στην Καλιφόρνια η εξίσωση διακριτού χρόνου που περιγράφει την συνολική πυκνότητα, δηλαδή τον αριθμό των οχημάτων, σε κάθε λωρίδα και κάθε τμήμα (80 μέτρων) του αυτοκινητόδρομου είναι (2):

$$\rho_{i,j}(k+1) = \rho_{i,j}(k) + \frac{T}{L} (q_{i-1,j}(k) - q_{i,j}(k) + r_{nij}(k)),$$

- $i = 1, \dots, N$, ο αριθμός του τμήματος που θα γίνει ο υπολογισμός.
- N , το σύνολο των τμημάτων που είναι χωρισμένος ο αυτοκινητόδρομος ($N=5$).
- $j = 1, 2, \dots, 6$ ο αριθμός της λωρίδας που θα γίνει ο υπολογισμός.
- $k = 0, 1, \dots, 174$ το πλήθος των μετρήσεων.
- q_{ij} , η συνολική ροή των οχημάτων στην έξοδο του τμήματος i , της λωρίδας j .
- $T = 5 \text{ sec}$, το χρονικό βήμα μετρήσεων.
- r_{nij} , η εισροή των οχημάτων από την ράμπα εισόδου στο τμήμα $i=2$ της λωρίδας $j=6$.

Ακόμη, γνωρίζοντας ότι η πυκνότητα των οχημάτων είναι συνάρτηση της ροής και της ταχύτητάς τους, η ανωτέρω συνάρτηση μπορεί να μετατραπεί (2):

$$\rho_{i,j}(k+1) = \frac{T}{L} v_{i-1,j}(k) \rho_{i-1,j}(k) + (1 - \frac{T}{L} v_{i,j}(k)) \rho_{i,j}(k) + \frac{T}{L} r_{nij}(k),$$

- $v_{i,j}(k)$, η συνολική ταχύτητα των οχημάτων στο τμήμα i , της λωρίδας j (μέσω της πληροφόρησης από συνδεδεμένα οχήματα για την ταχύτητα τους).

Εφόσον είναι γνωστό πως η εισροή από την ράμπα εισόδου είναι μη μετρήσιμη, ο όρος r_{nij} είναι μηδενικός. Για αυτό τον λόγο, ισχύει η υπόθεση πως η ροή στην ράμπα αυτή είναι σταθερή και μπορεί να περιγραφεί με έναν «τυχαίο περίπατο» (2):

$$\vartheta_i(k+1) = \vartheta_i(k) + \xi_i^{\vartheta}(k), \text{ όπου } \vartheta_i = \frac{T}{L} r_{nij},$$

- $i = 1, \dots, l_r$, με l_r να υποδηλώνει το πλήθος μη μετρήσιμης ροής σε ράμπες εισόδου.
- $n_{i,j}$, το τμήμα και η λωρίδα που βρίσκεται η είσοδος ή η έξοδος της μη μετρήσιμης ράμπας.
- $l_r = \{n_1, \dots, n_{l_r}\}$, το σύνολο των τμημάτων στα όποια έχουμε τις εισόδους από ράμπες μη μετρήσιμης ροής.

Για το τμήμα του δρόμου μήκους 400 μέτρων χωρισμένο σε 5 τμήματα ίσου μήκους το καθένα και ράμπα εισόδου στο δεύτερο τμήμα, η ροή των οχημάτων από την ράμπα εισόδου μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$\vartheta_1(k+1) = \vartheta_1(k) + \xi_1 \vartheta_1(k), \text{ όπου } \vartheta_1 = \frac{T}{L} r_{2,6}.$$

Για τον λόγο αυτό ορίζουμε την μεταβλητή x της πυκνότητας ως πίνακα της μορφής (5):

$$x = (\rho_1, \dots, \rho_5, \vartheta_1)^T$$

Τέλος η συνολική πυκνότητα για κάθε λωρίδα του αυτοκινητόδρομου μπορεί να γραφτεί με την μορφή γραμμικού χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματος (2) :

$$X(k+1) = A(k)x(k) + Bu(k),$$

$$\text{όπου } A(k) = \begin{cases} a_{ij} = \frac{T}{L} * v_{i-1,j}(k), & \text{για } i - j = 1 \text{ και } i \geq 2 \\ a_{ij} = 1 - \frac{T}{L} * v_{i,j}(k), & \text{για } i = j \\ a_{nij} = 1 & \text{για } n_{i,j} \in Lr \text{ και } j = N + i \\ a_{nij} = 1 & \text{για } N < i < N1 \text{ και } j = i \\ a_{nij} = 0 & \text{για κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

$$A \in R^{N1 \times N1}, \quad N1 = N + lr$$

$$u(k) = \begin{cases} u_i = \frac{T}{L} * q_0(k), & \text{για } i = 1 \\ u_i = 0 & \text{για κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

Συνοπτικά, με την χρήση των παραπάνω εξισώσεων εκτιμάται η πυκνότητα (ή, ισοδύναμα, η ροή), σε κάθε τμήμα, λωρίδα του αυτοκινητόδρομου και στο τμήμα εκείνο όπου βρίσκεται η είσοδος μη μετρήσιμης ράμπας.

Επομένως,

$$Y(k) = C * x(k),$$

$$\text{Όπου } C = \begin{cases} c_{ij} = 1, & \text{για όλα τα } i = 1, \dots, lr - 1 \\ c_{ij} = 1, & \text{για } i = lr \text{ και } j = N \\ c_{ij} = 0, & \text{για κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}, \quad C \in R^{lr \times N+lr}$$

Συμπερασματικά, οι εξισώσεις του μοντέλου για την εκτίμηση των δεδομένων πυκνότητας και ροής στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητόδρομου είναι (2):

$$x(k+1) = A(k) * x(k) + u(k) + A(k) * K(k) * (z(k) - C * x(k))$$

$$K(k) = P(k) * C^T (C * P(k) * C^T + R)^{-1}$$

$$P(k+1)=A(k)*(1-K(k)*C)*P(k)*A(k)^T+Q,$$

όπου z είναι η μεταβλητή y με θόρυβο,

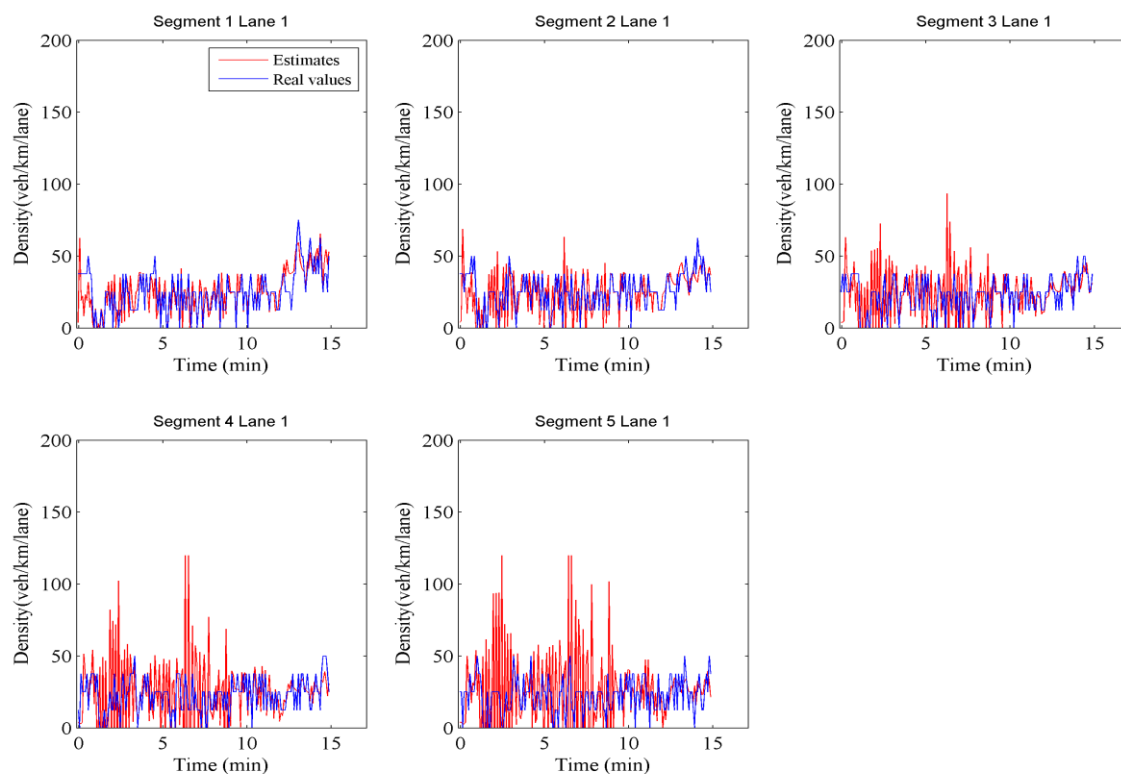
και Q, R είναι μεταβαλλόμενοι παράμετροι.

Είναι ενδιαφέρον να τονιστεί πως η εκτίμηση δεν είναι αναγκαία για το σενάριο όπου όλα τα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο είναι συνδεδεμένα. Καθώς στο σενάριο αυτό, δεδομένα για την πυκνότητα σε κάθε λωρίδα και για την ροή στην ράμπα μπορούν να υπολογιστούν απευθείας από τις πληροφορίες που διατίθενται για τις θέσεις των οχημάτων καθώς κινούνται κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου. Παρ' όλα αυτά, έχει εφαρμοστεί το σύστημα εκτίμησης και για το σενάριο αυτό. Διότι, έχοντας καταγράψει και παρουσιάσει σε διάγραμμα τα αποτελέσματα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των εκτιμήσεων για μικρότερα ποσοστά συνδεδεμένων οχημάτων (1).

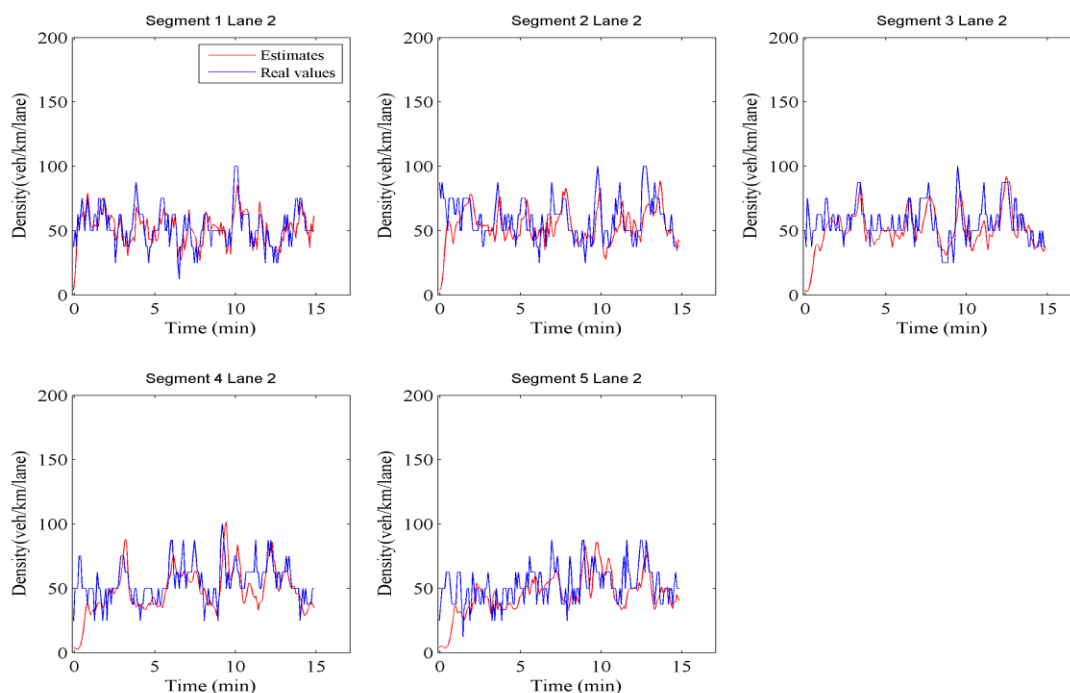
Αστοχίες στις εκτιμήσεις της ροής στην ράμπα εισόδου πιθανόν να προκληθούν από την απόσταση που απέχει ο ανιχνευτής που βρίσκεται στον αυτοκινητόδρομο σε σχέση με την θέση της ράμπας εισόδου. Διότι, η ροή των οχημάτων που εισέρχονται από την ράμπα εισόδου μπορεί να γίνει αντιληπτή μόνο εάν τα οχήματα φθάσουν στην θέση της μέτρησης (στο τέλος του δρόμου). Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκε ένας παραπάνω ανιχνευτής της ροής στο τμήμα και στην λωρίδα του αυτοκινητοδρόμου που βρίσκεται η είσοδος της ράμπας (1).

5.1 Εκτίμηση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα του αυτοκινητοδρόμου όπου όλα τα οχήματα είναι συνδεδεμένα.

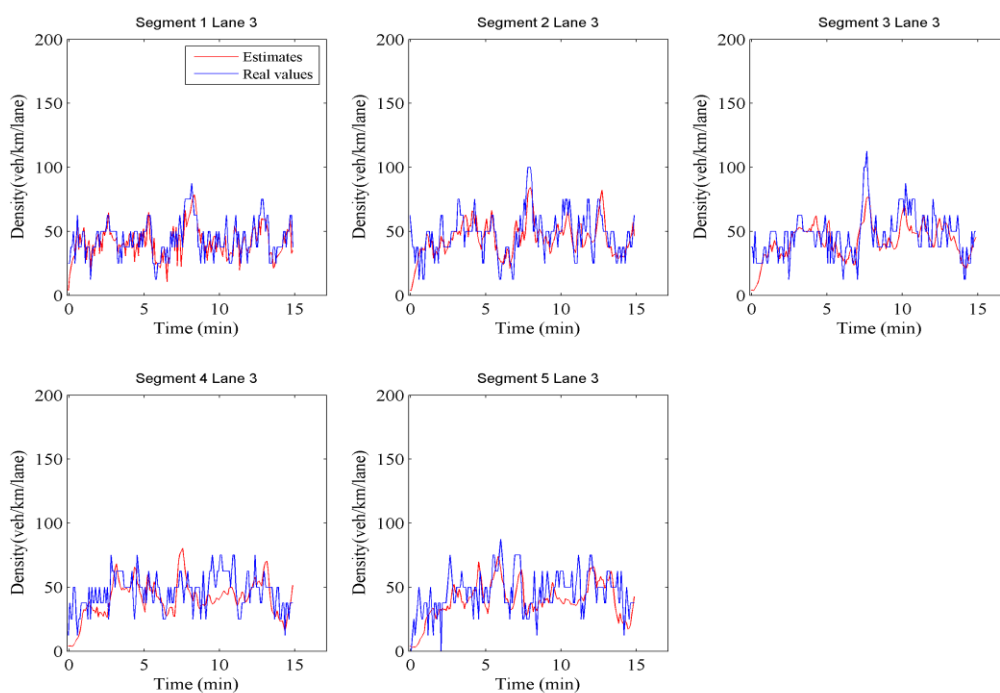
Στην υποενότητα αυτή θα παρουσιαστούν διαγράμματα που θα φανερώνουν τα αποτελέσματα της εκτίμησης στο σενάριο όπου όλα τα οχήματα που βρίσκονται στο τμήμα (400 μέτρων) του αυτοκινητοδρόμου είναι συνδεδεμένα. Εφόσον, όλα τα οχήματα είναι συνδεδεμένα, πληροφορίες για την ταχύτητα, αλλά και για την θέση του κάθε οχήματος στον αυτοκινητόδρομο είναι διαθέσιμα. Κατά συνέπεια το μοντέλο τροφοδοτείται με ακριβείς μετρήσεις του μέσου όρου της ταχύτητας σε κάθε τμήμα και λωρίδα του αυτοκινητόδρομου (1). Οι εκτιμήσεις θα παρουσιαστούν στα ακόλουθα διαγράμματα για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας και κάθε τμήμα που είναι χωρισμένο το υπό μελέτη τμήμα, αλλά και για την ράμπα εισόδου του αυτοκινητόδρομου. Τα διαγράμματα είναι σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου σε κάθε χρονικό βήμα (5 sec) η εκτίμηση αλλάζει τιμή.



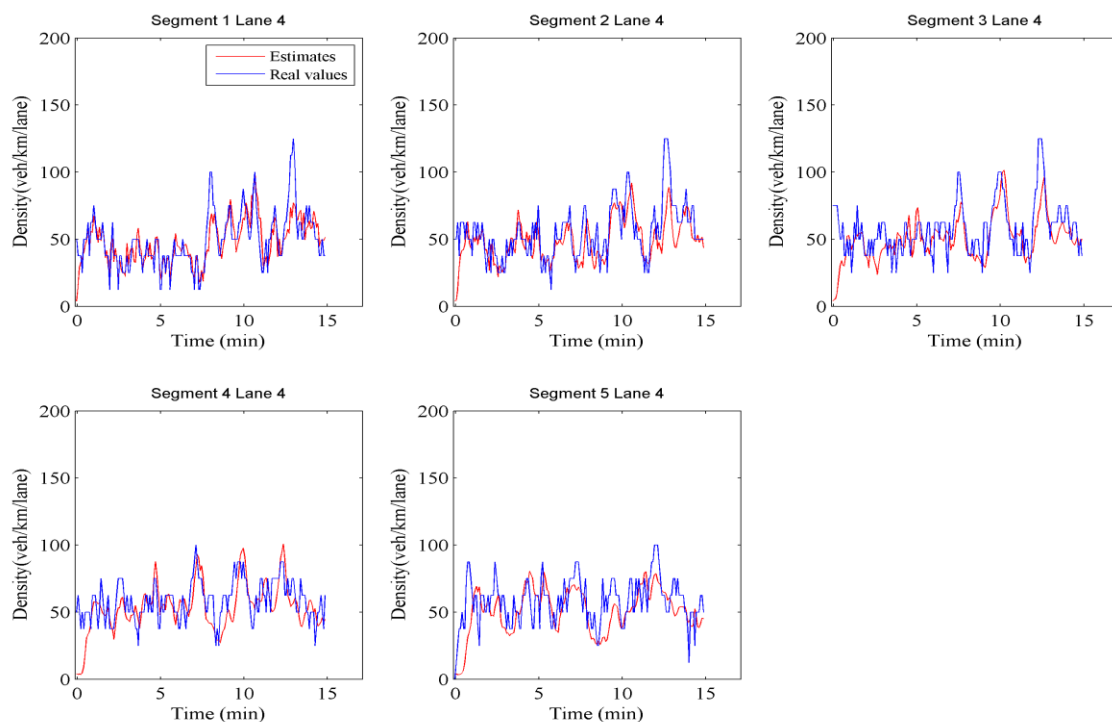
Σχήμα 5.1. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 1 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



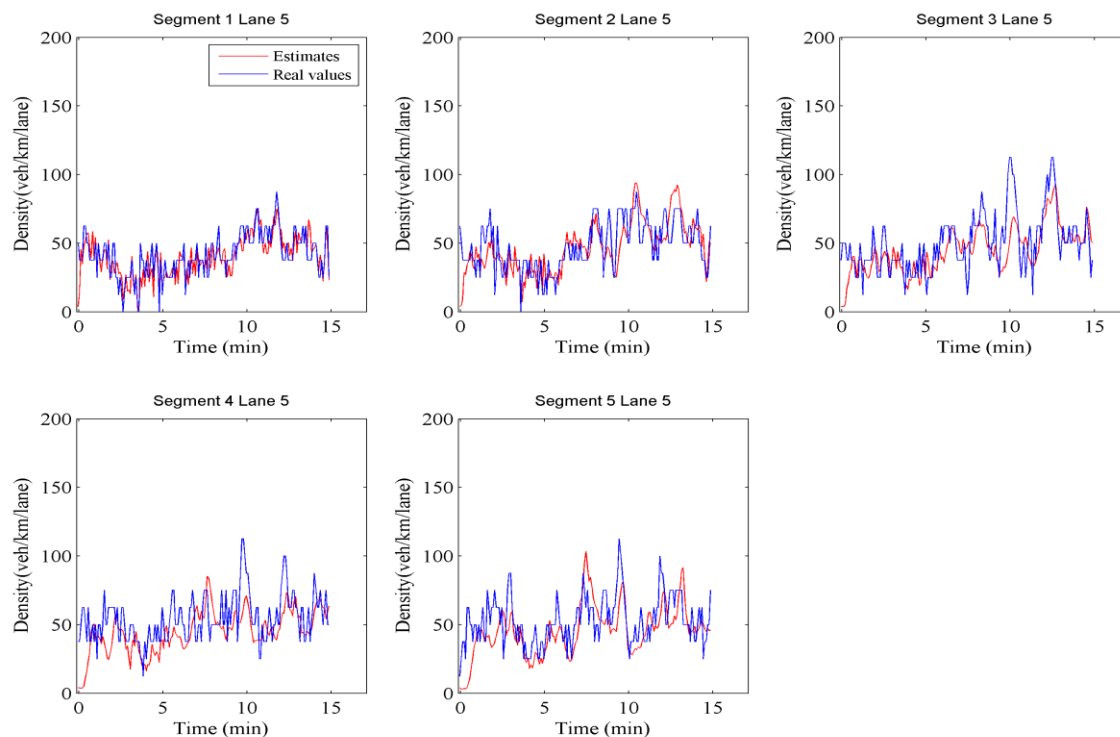
Σχήμα 5.2. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 2 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



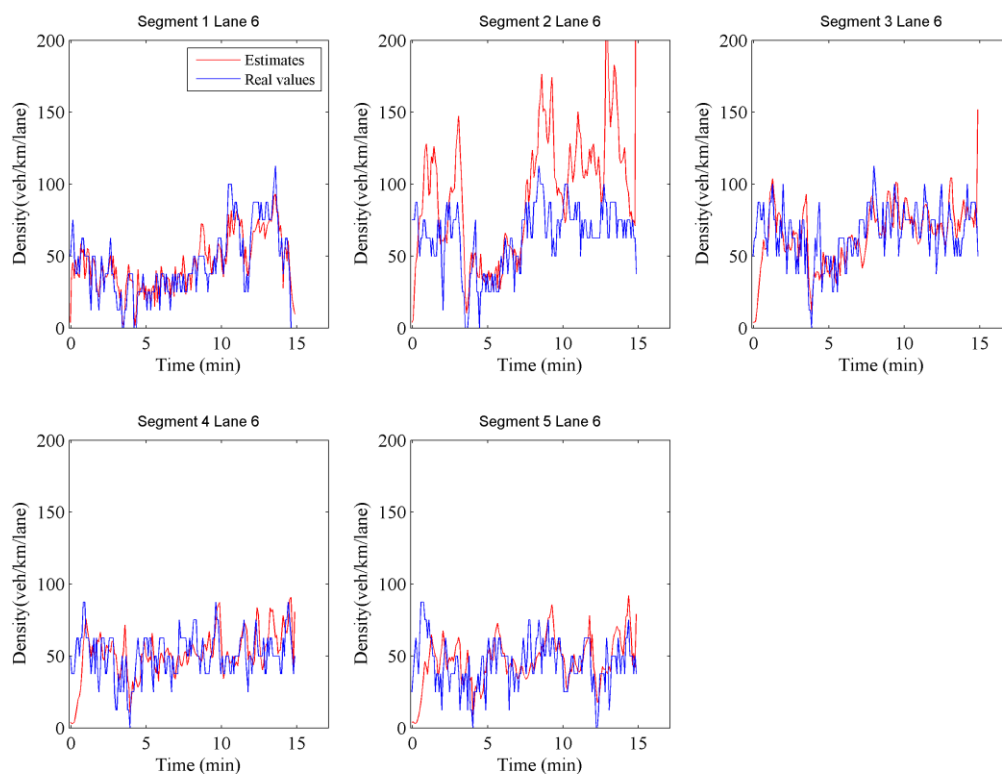
Σχήμα 5.3. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 3 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



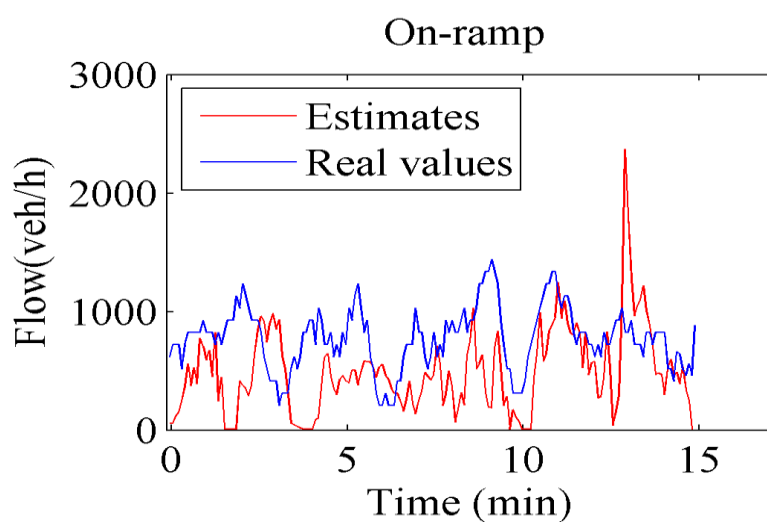
Σχήμα 5.4. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 4 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



Σχήμα 5.5. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 4 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



Σχήμα 5.6 : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 6 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση.



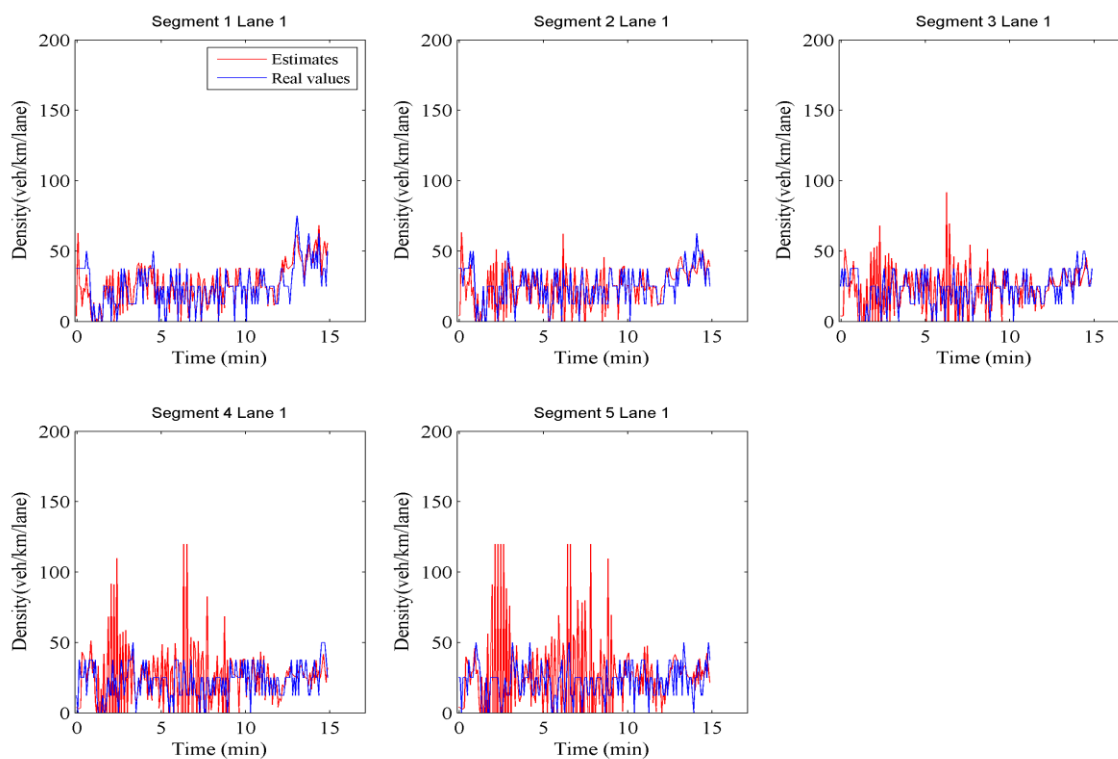
Σχήμα 5.7. : Η τροχιά των πραγματικών και εκτιμώμενων ροών με την χρήση NGSIM δεδομένων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που τα οχήματα είναι όλα σε σύνδεση

Στα σχήματα που παρουσιάστηκαν, στην λωρίδα 1 για τις εκτιμήσεις της πυκνότητας των οχημάτων παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις. Όπως προαναφέρθηκε η λωρίδα 1 είναι λωρίδα περιορισμένης πρόσβασης σε οχήματα. Με αποτέλεσμα οι ταχύτητες των οχημάτων στην λωρίδα αυτή να είναι αυξημένες. Στην περίπτωση αυτή, στο διάστημα των 5 δευτερολέπτων οχήματα θα έχουν προσπεράσει τη θέση καταμέτρησης και οι τιμές των ροών σε κάθε τμήμα του αυτοκινητόδρομου θα έχουν αποκλίσεις. Επομένως, όπως παρατηρείται και από το διάγραμμα των εκτιμήσεων, οι τιμές των εκτιμώμενων πυκνοτήτων των οχημάτων στη λωρίδα 1, σε κάθε τμήμα του αυτοκινητόδρομου δεν είναι οι απαιτούμενες.

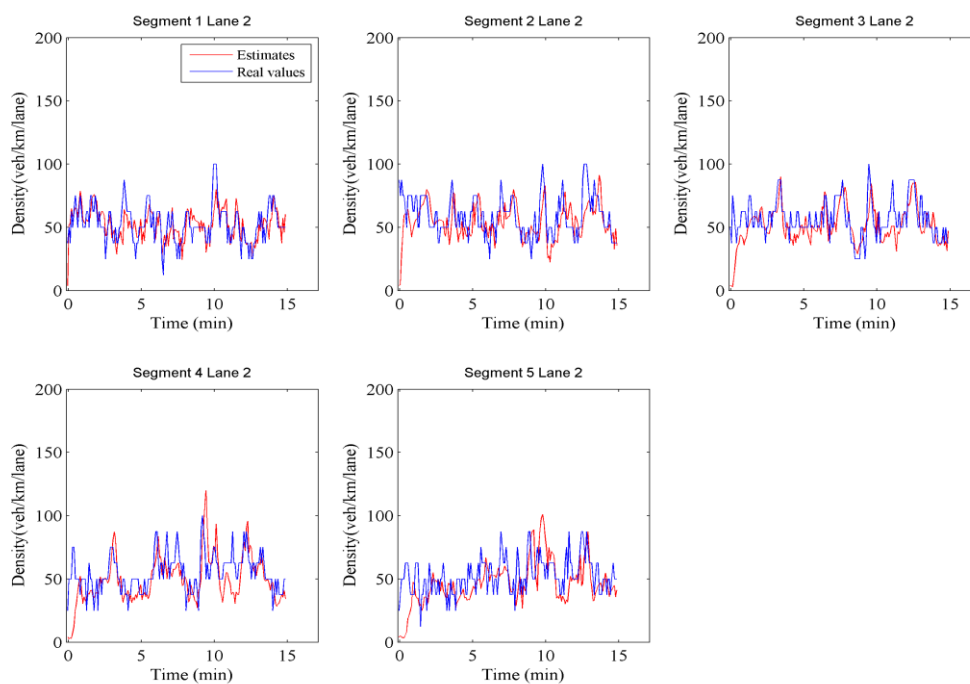
Οι αστοχίες που φαίνονται να υπάρχουν στο διάγραμμα ροής των οχημάτων στην ράμπα εισόδου, οφείλονται στο ότι δεν μπορεί να αναγνωρισθεί η θέση του <<τυχαίου περίπατου>>. Με άλλα λόγια δεν μπορεί να γίνει αντιληπτό σε ποια από τις δύο πλευρές της λωρίδας 6 εισέρχεται η ράμπα. Έτσι, δεν είναι γνωστό το σημείο εισροής των μη μετρήσιμων ροών των οχημάτων από την ράμπα.

5.2 Εκτίμηση της κυκλοφορίας στις λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου όπου το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι 50%.

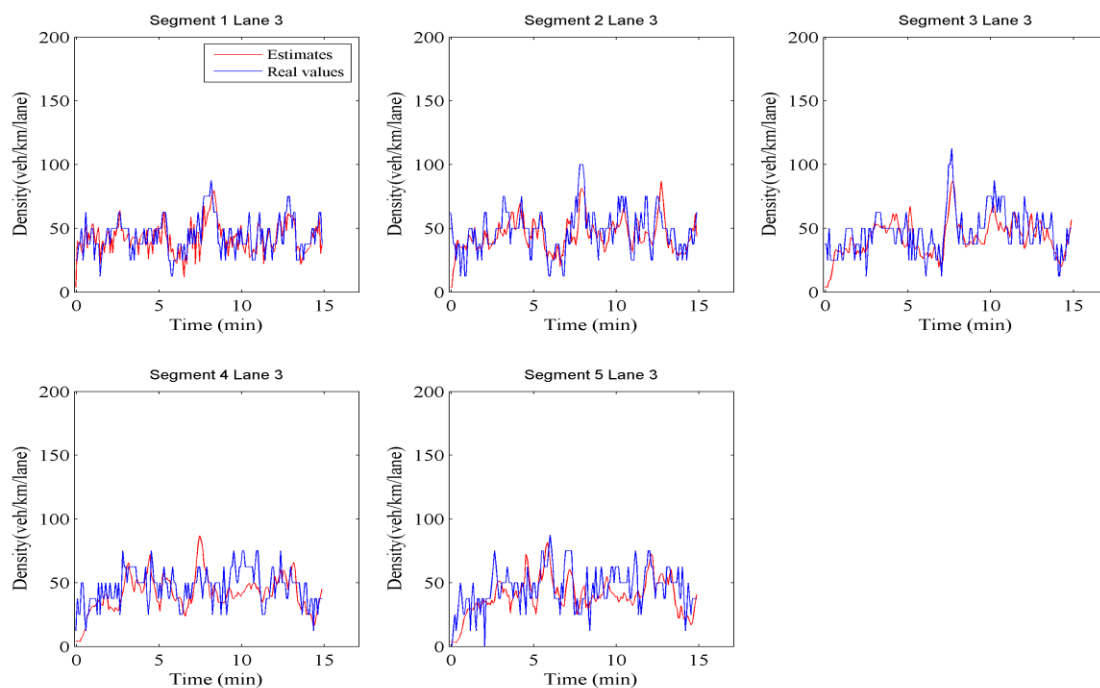
Στη παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εκτίμησης σε μορφή διαγράμματος. Η εκτίμηση εφαρμόστηκε για την περίπτωση στο τμήμα του αυτοκινητόδρομου το 50% των οχημάτων να είναι συνδεδεμένα οχήματα. Οι εκτιμήσεις θα παρουσιαστούν στα ακόλουθα διαγράμματα ανά λωρίδα κυκλοφορίας, για κάθε τμήμα, και για την ράμπα εισόδου του αυτοκινητόδρομου. Αυτό έχει ως στόχο, την αξιολόγηση της προσέγγισης των εκτιμήσεων σε λιγότερο ακριβείς μετρήσεις της ταχύτητας. Στην περίπτωση αυτή λόγω του περιορισμένου αριθμού των οχημάτων, η μέτρηση της ταχύτητας που ανακτώνται για ένα τμήμα του αυτοκινητόδρομου μπορεί να μην είναι πλήρως αντιπροσωπευτική για την πραγματική μέση ταχύτητα του τμήματος αυτού. Διότι για παράδειγμα στο τμήμα μπορεί να παρευρίσκεται ένα μόνο όχημα σε σύνδεση, όπου ο οδηγός αναγκάστηκε να επιβραδυνθεί λόγω επικίνδυνων ελιγμών κατά την αλλαγή λωρίδας από άλλο όχημα. Έντονο πρόβλημα παρουσιάζεται στην υπολογιζόμενη ταχύτητα του τμήματος και στο σενάριο όπου δεν υπάρχουν καθόλου συνδεδεμένα οχήματα στο τμήμα αυτό.



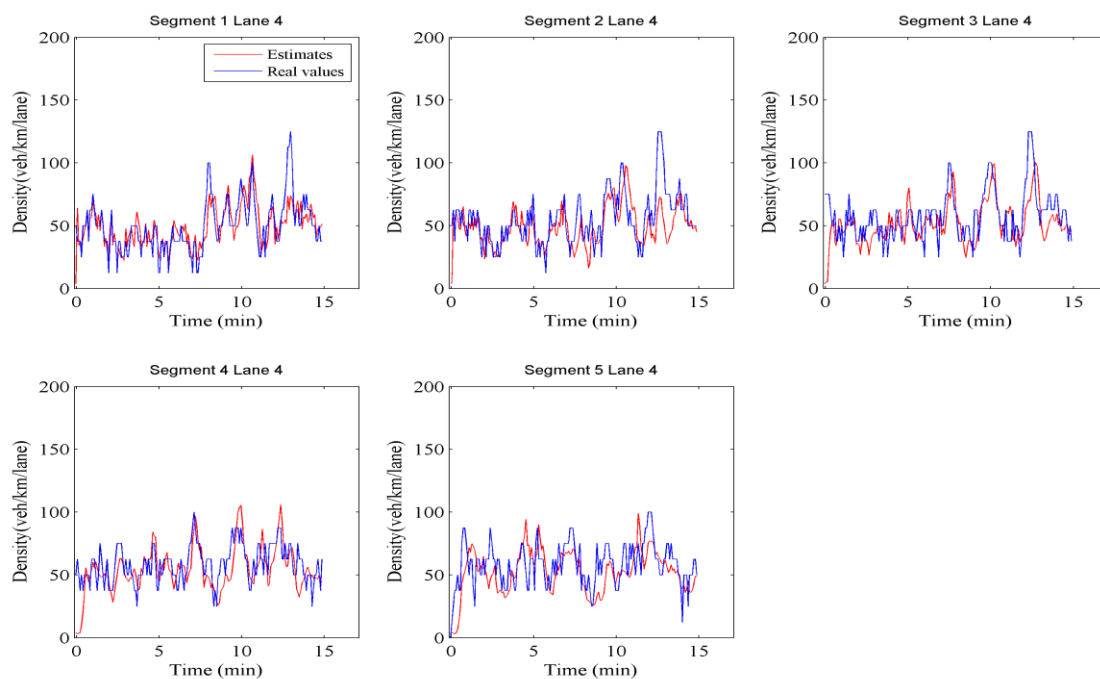
Σχήμα 5.8. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 1 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



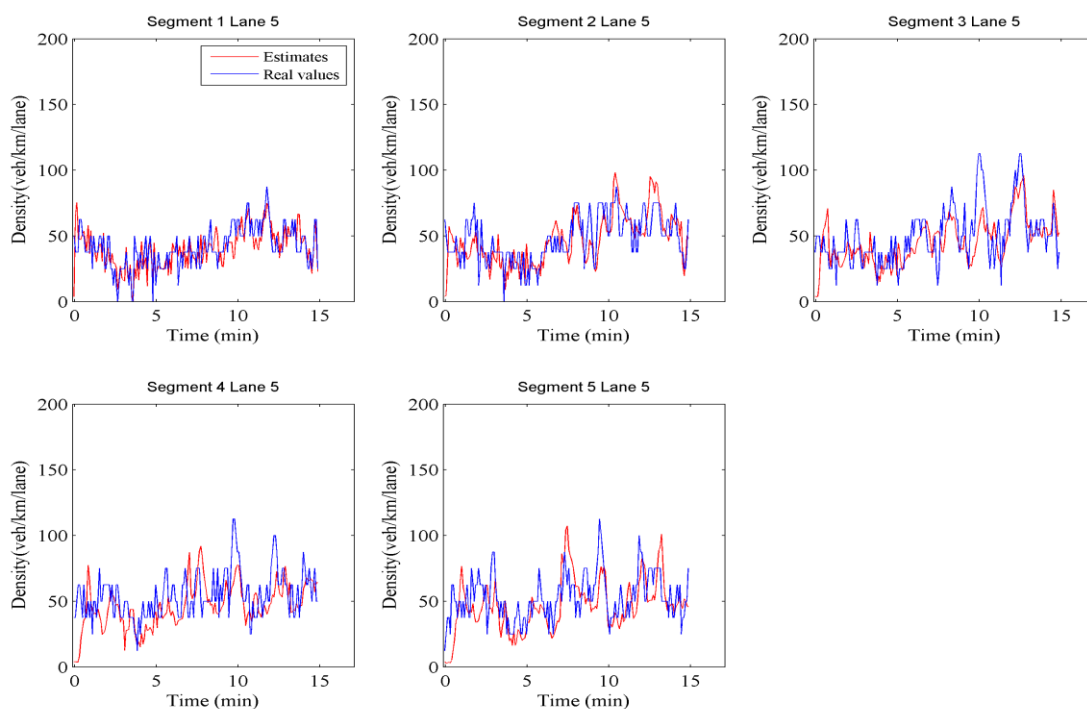
Σχήμα 5.9. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 2 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



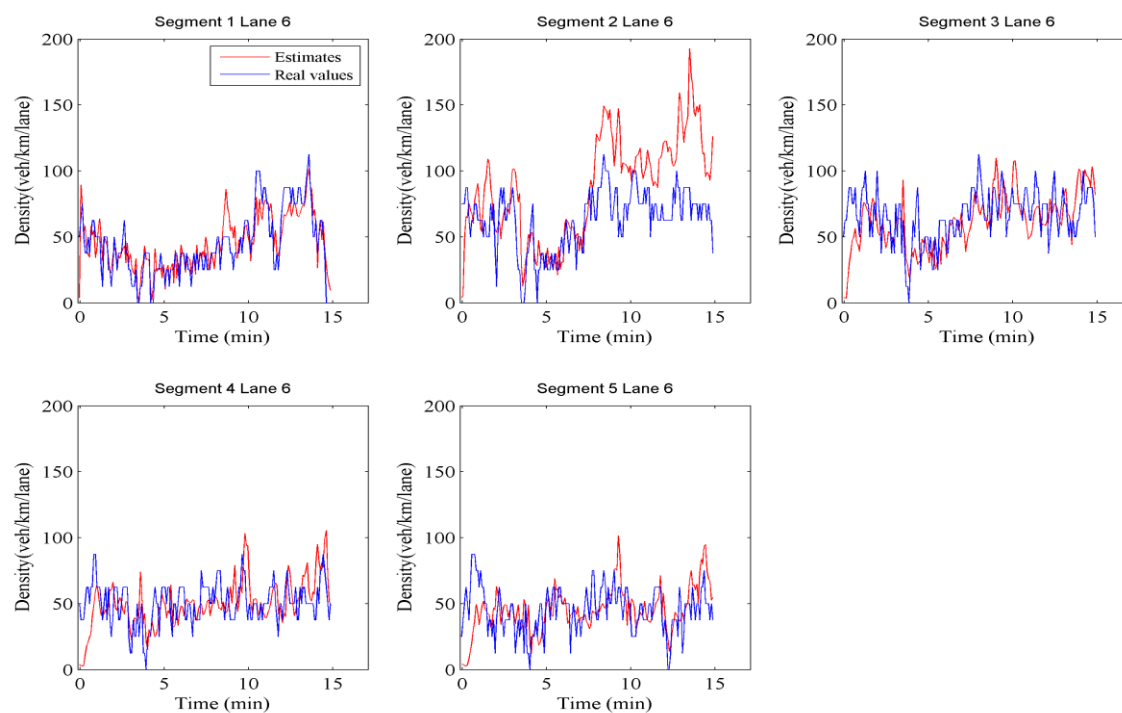
Σχήμα 5.10. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 3 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



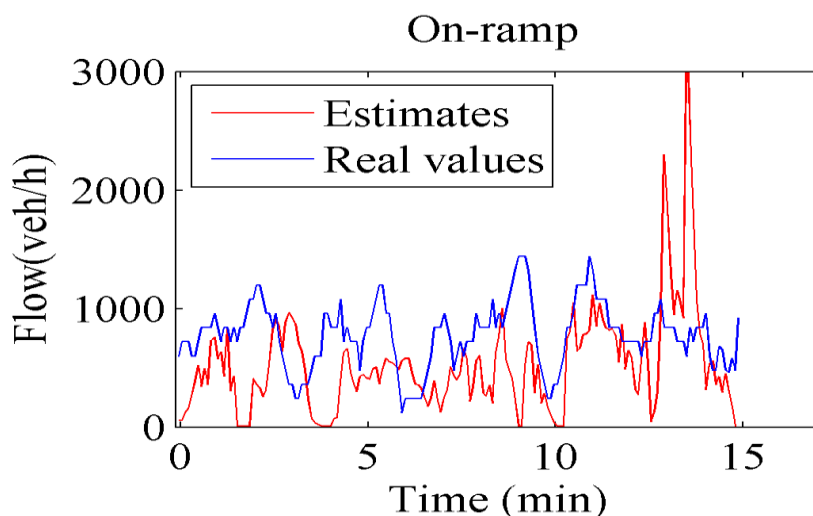
Σχήμα 5.11. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 4 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 5.12. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 5 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 5.13. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 6 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 5.14.: Η τροχιά των πραγματικών και εκτιμώμενων ροών με την χρήση NGSIM δεδομένων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.

Τα αποτελέσματα φαίνονται να διαφοροποιούνται στη περίπτωση αλλαγής του ποσοστού των συνδεδεμένων. Οι εκτιμήσεις της πυκνότητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας και της ροής στην ράμπα εισόδου σε κάθε χρονικό βήμα (5 sec), φαίνονται να προσεγγίζουν σε μικρότερο βαθμό τα επιθυμητά αποτελέσματα συγκριτικά με το προηγούμενο σενάριο. Κάτι απόλυτα λογικό, καθώς οι λιγότερες πληροφορίες από τα οχήματα για την ταχύτητα κίνησης τους, οδηγούν σε λιγότερο ακριβές αποτέλεσμα εκτίμησης.

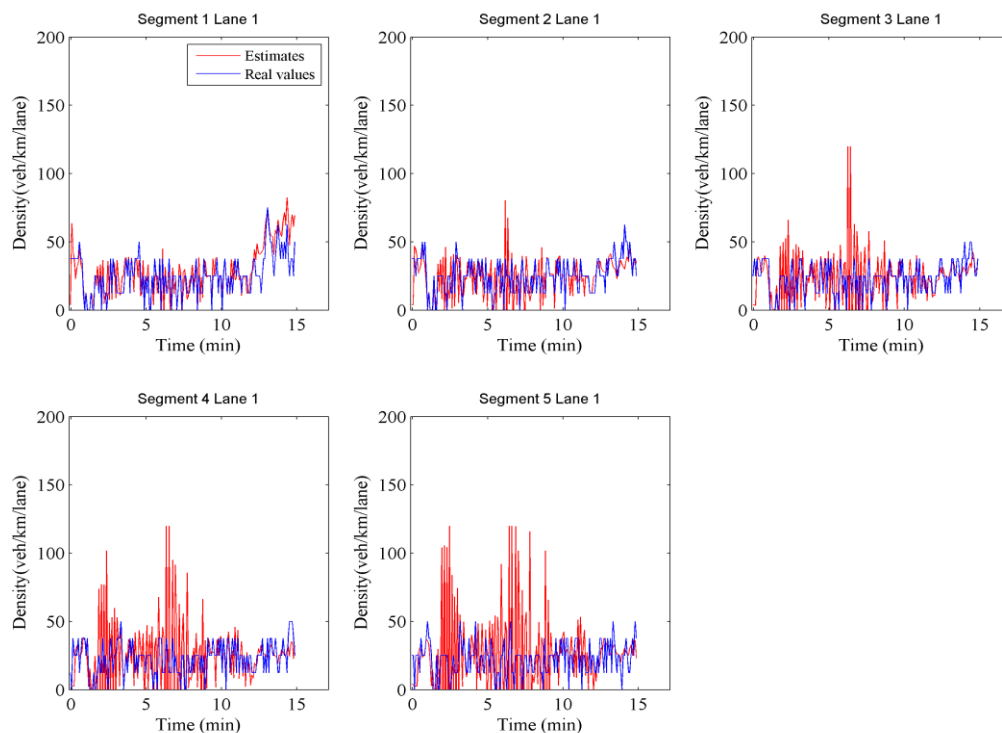
Επίσης και στο σενάριο αυτό, παρατηρούμε αστοχία στην εκτίμηση της πυκνότητας στην λωρίδα 1 λόγω της αυξημένης ταχύτητας των οχημάτων.

Τέλος, όσον αφορά την εκτιμώμενη ροή στην ράμπα εισόδου, το πρόβλημα με την αναγνώριση της θέσης του <<τυχαίου περιπάτου >> δεν παύει να υπάρχει.

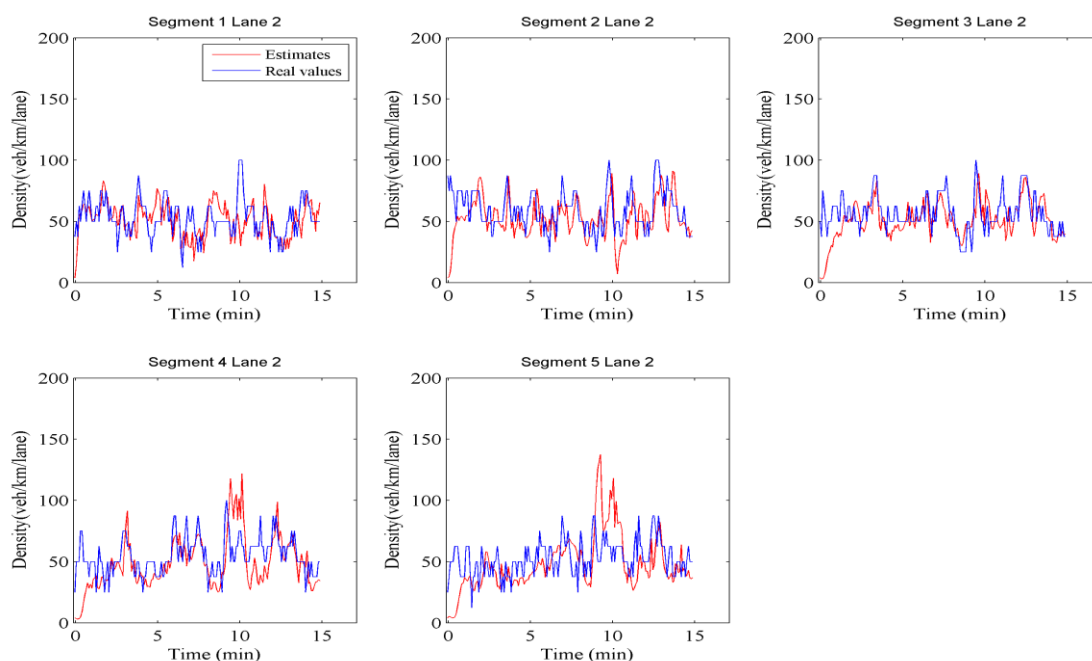
5.3 Εκτίμηση της κυκλοφορίας στις λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου όπου το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι 20%.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εκτίμησης σε διαγράμματα στην περίπτωση που το 20% των οχημάτων είναι συνδεδεμένα. Σε κάθε λωρίδα και σε κάθε τμήμα του αυτοκινητόδρομου οι εκτιμήσεις θα διαφέρουν. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να γίνει φανερό μέσω των διαγραμμάτων ότι, όσο το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο μικραίνει τόσο θα μεγαλώνει και η ανακρίβεια των αποτελεσμάτων εκτίμησης. Στην συνέχεια ακολουθούν

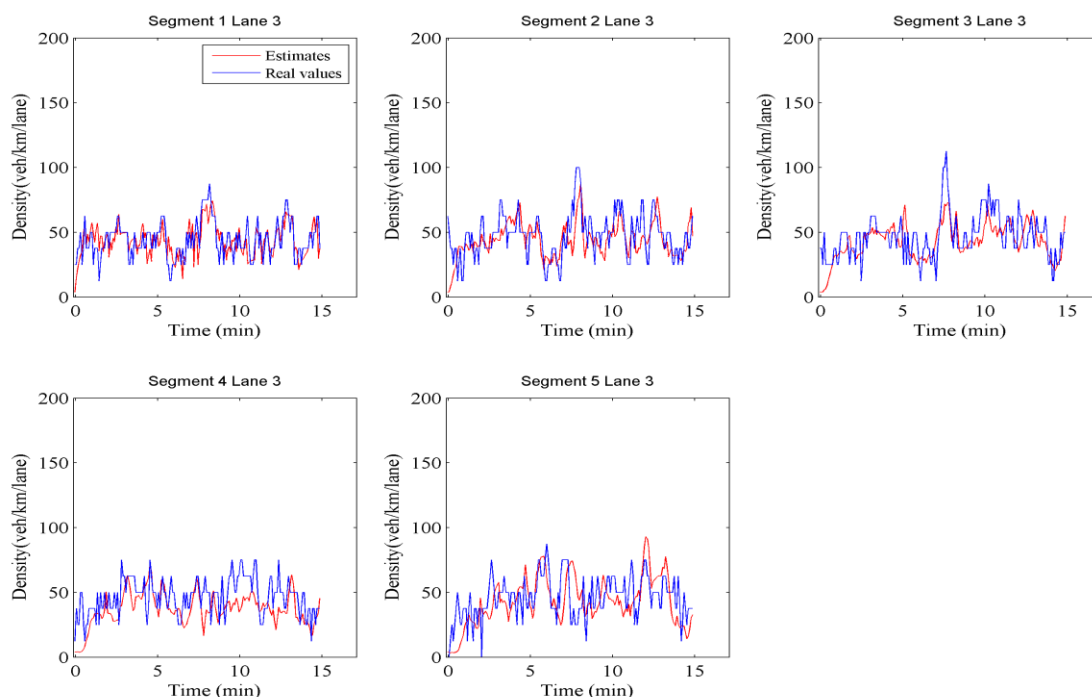
τα διαγράμματα της πυκνότητας των οχημάτων σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας συναρτήσει του χρόνου και της ροής του στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου.



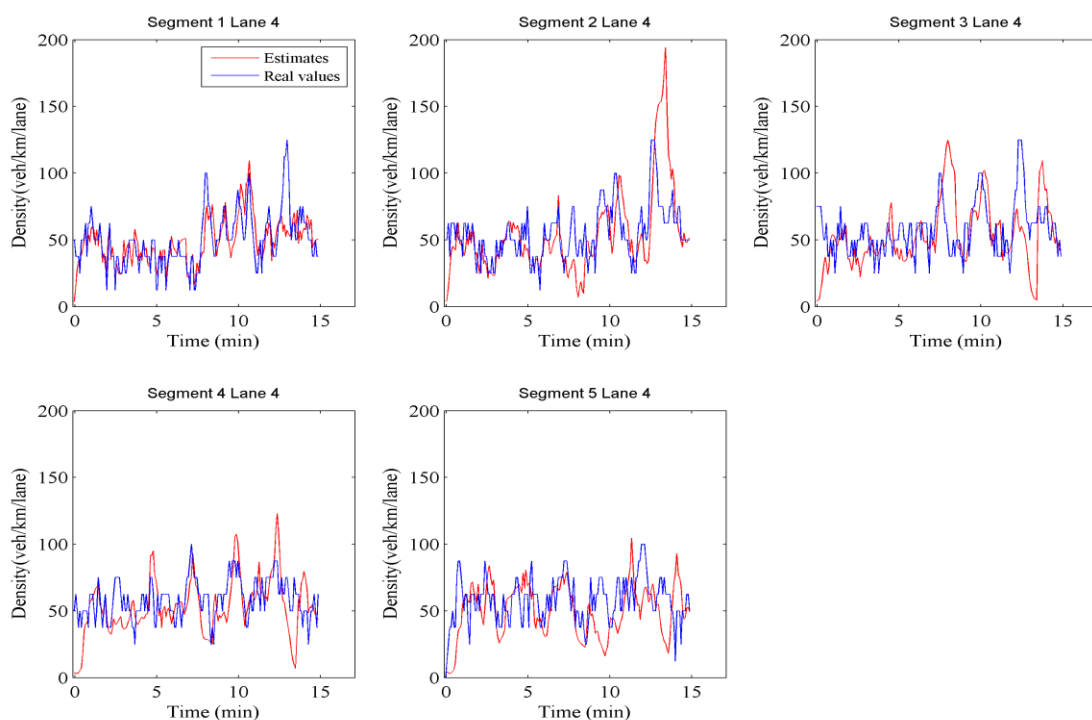
Σχήμα 5.15. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 1 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



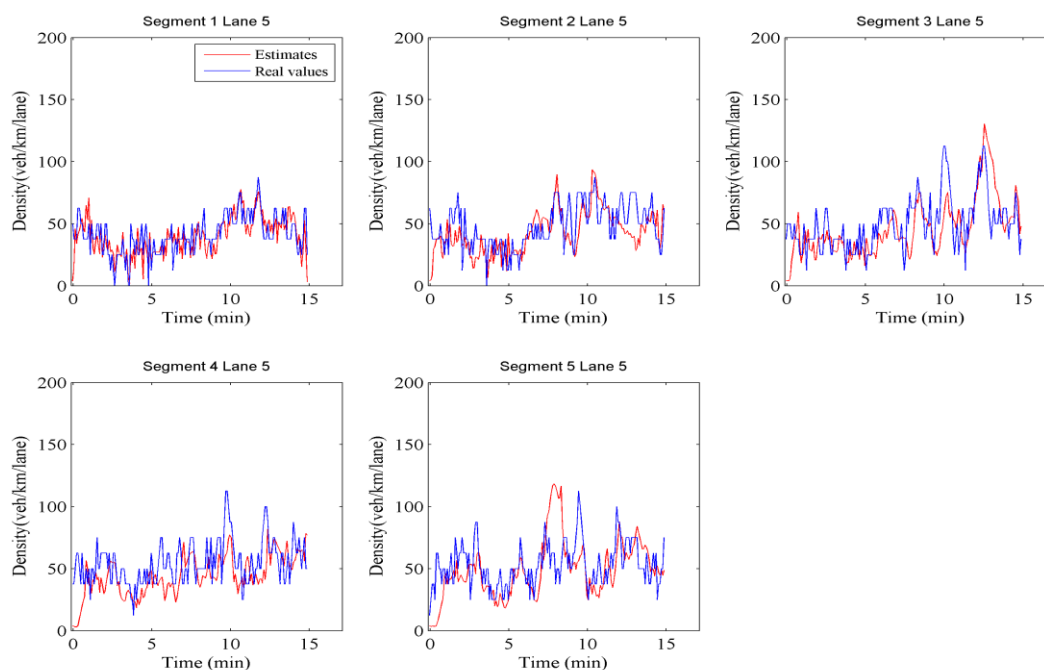
Σχήμα 5.16. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 2 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



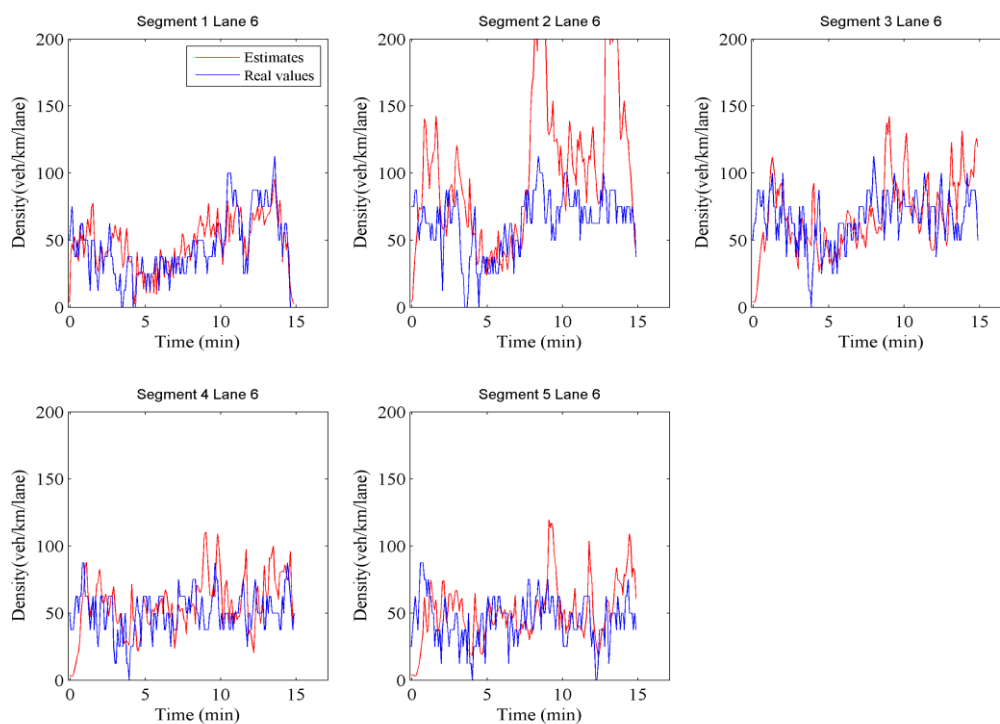
Σχήμα 5.17. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 3 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



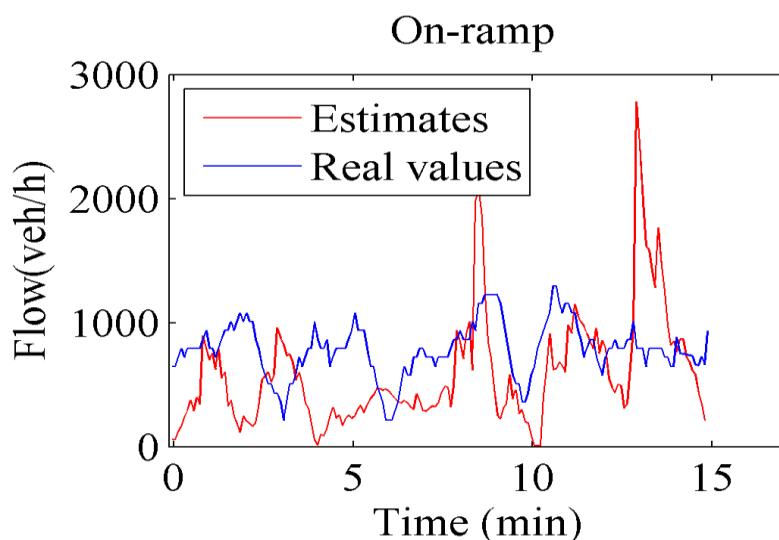
Σχήμα 5.18. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 4 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 5.19. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 5 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 5.20. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 6 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



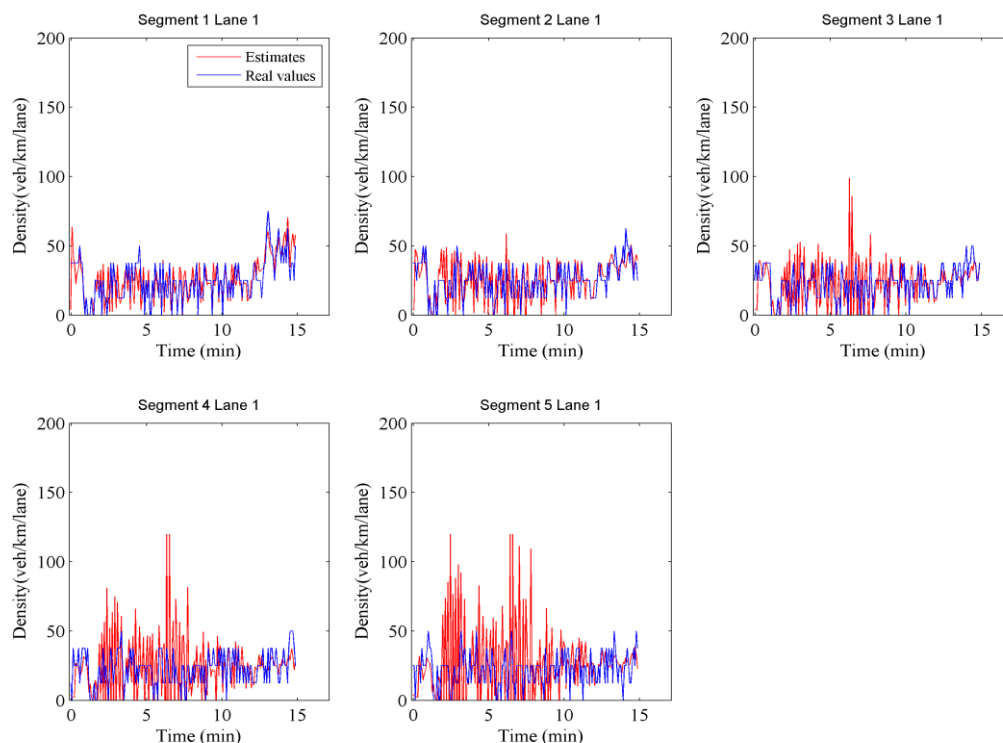
Σχήμα 5.21. : Η τροχιά των πραγματικών και εκτιμώμενων ροών με την χρήση NGSIM δεδομένων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.

Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων της πυκνότητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας στο σενάριο όπου τα συνδεδεμένα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο είναι πολύ λίγα σε σχέση με το σύνολο των οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο, φαίνονται να μην είναι τα επιθυμητά. Ο λόγος είναι, ότι οι πληροφορίες που είναι διαθέσιμες είναι πολύ λίγες καθώς λίγα είναι και τα οχήματα που είναι σε σύνδεση στον αυτοκινητόδρομο.

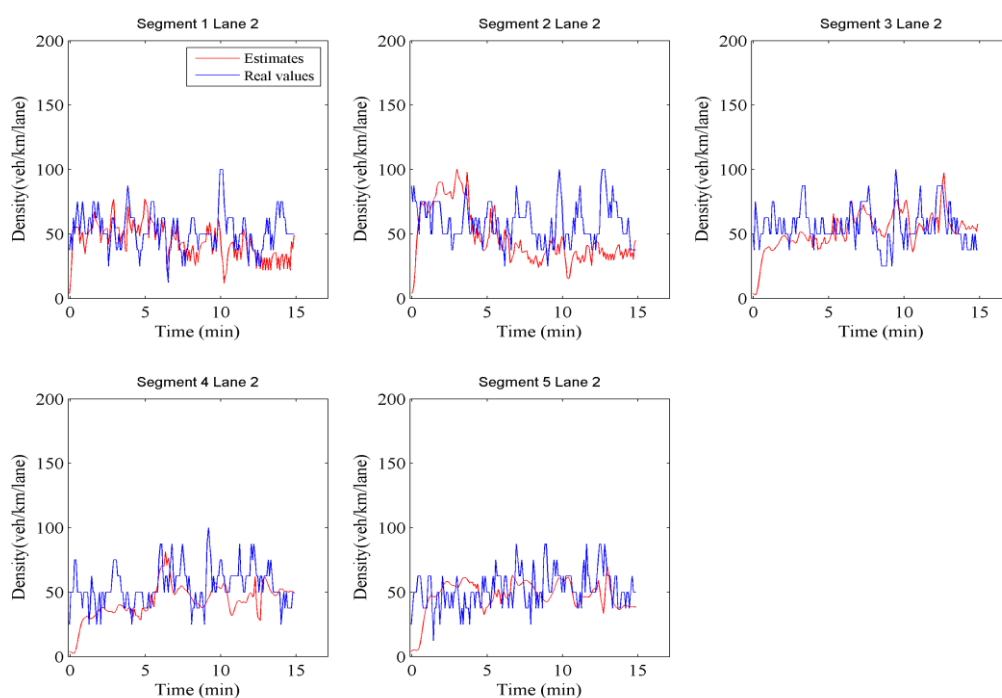
Επίσης και στο σενάριο αυτό, παρατηρούμε αποτυχία στην εκτίμηση της πυκνότητας στην λωρίδα 1 και στην εκτίμηση της ροής στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου.

5.4 Εκτίμηση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα του αυτοκινητοδρόμου όπου το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι 2%.

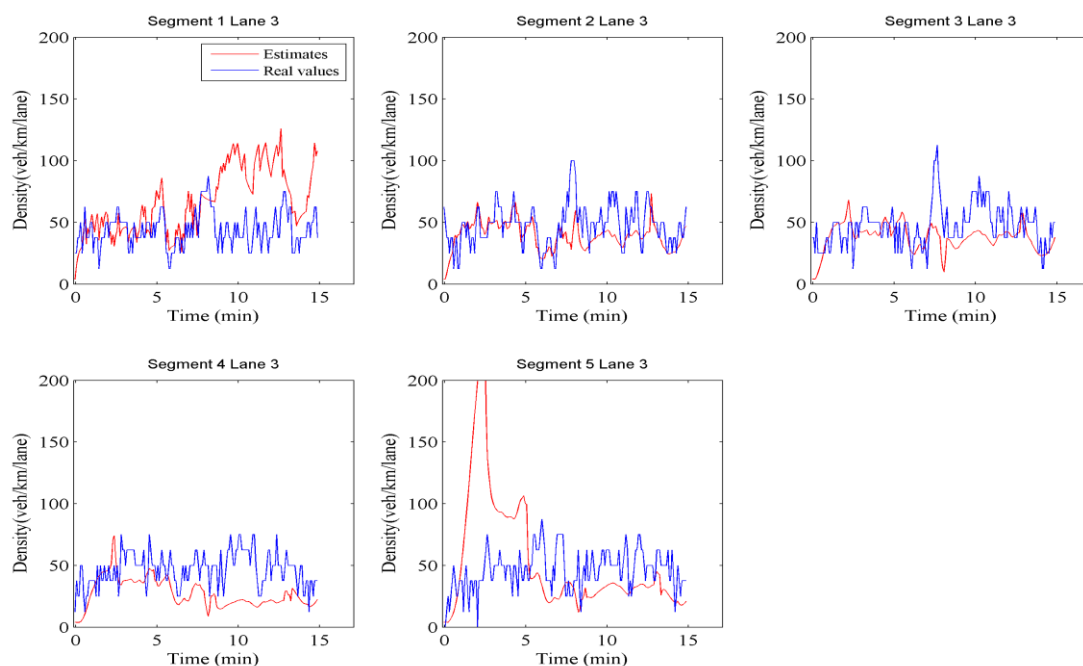
Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εκτίμησης από το μοντέλο σε διαγράμματα στην περίπτωση που το 2% των οχημάτων είναι συνδεδεμένα, για κάθε λωρίδα και σε κάθε τμήμα του αυτοκινητόδρομου. Στην παρούσα ενότητα θα γίνει ακόμη πιο φανερή η ανακρίβεια των αποτελεσμάτων εκτίμησης εφόσον τα οχήματα που πληροφορούν το σύστημα για την ταχύτητά τους στον αυτοκινητόδρομο, είναι πλέον ελάχιστα. Ακολουθούν, τα διαγράμματα πυκνότητας των οχημάτων σε κάθε λωρίδα και ροής τους στην ράμπα εισόδου.



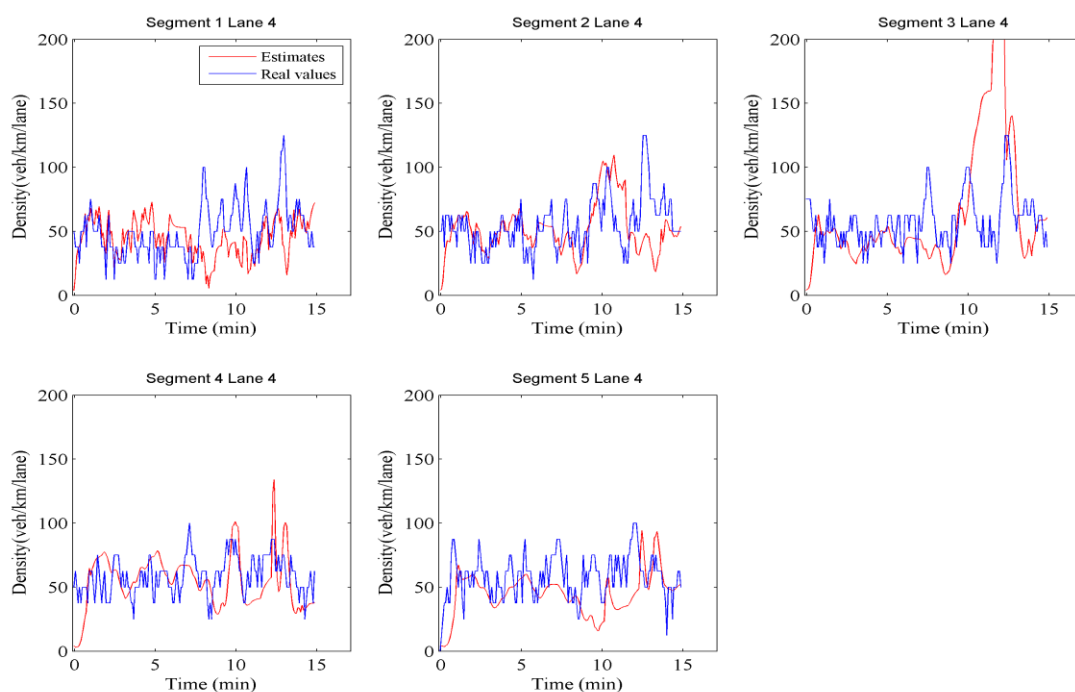
Σχήμα 5.22.: Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 1 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 2% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



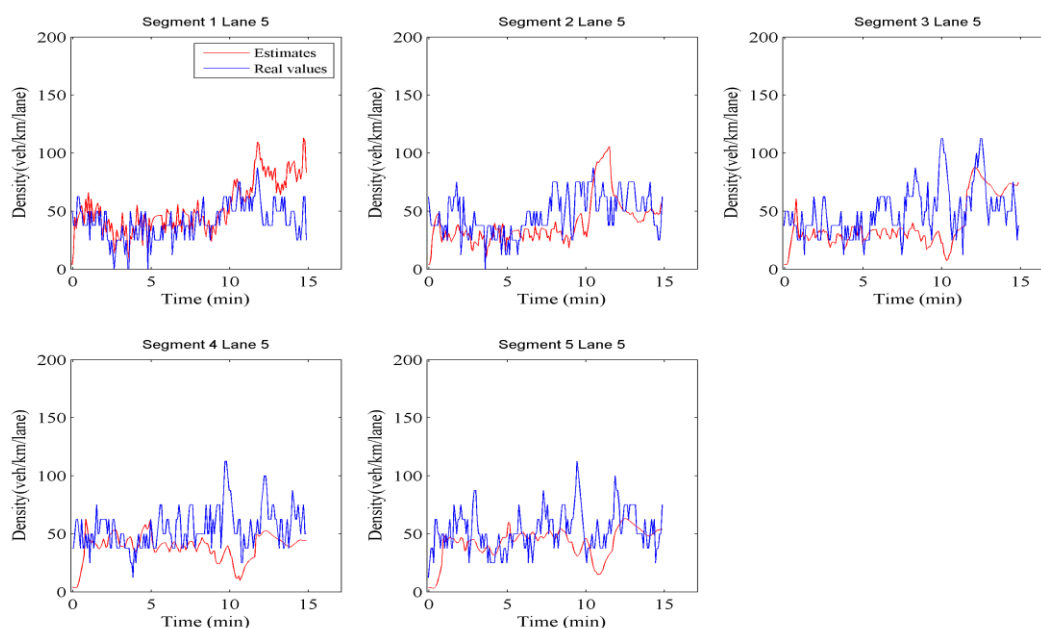
Σχήμα 5.23.: Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 2 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 2% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



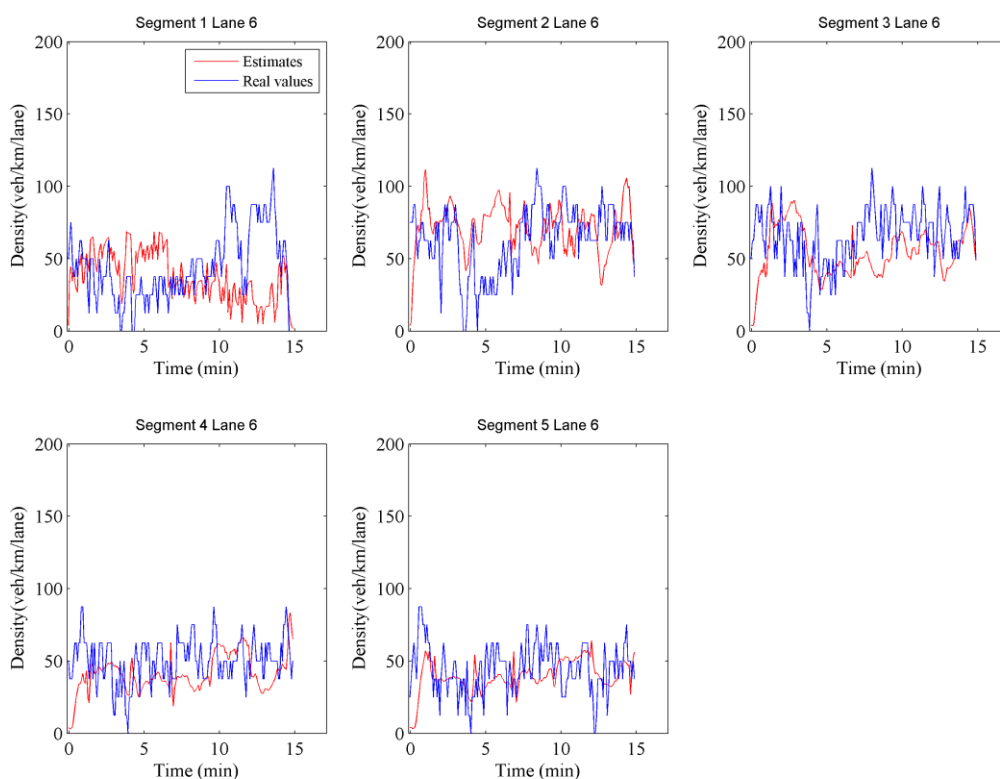
Σχήμα 5.24. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 3 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 2% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



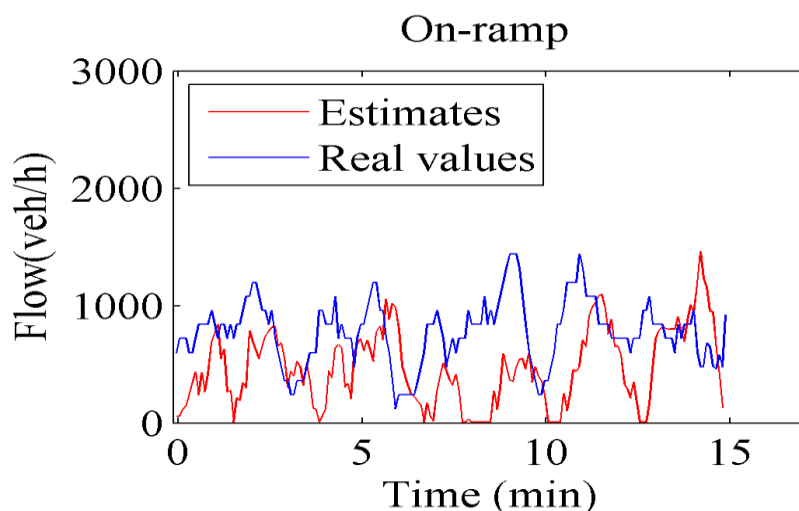
Σχήμα 5.25. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 4 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 2% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 5.26. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 5 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 2% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 5.27. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 6 του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 2% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 5.28. : Η τροχιά των πραγματικών και εκτιμώμενων ροών με την χρήση NGSIM δεδομένων στην ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου, για το σενάριο που το 2% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.

Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων της πυκνότητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας όσο το ποσοστό μικραίνει φαίνονται να χειροτερεύουν και να μην πλησιάζουν τις επιθυμητές τιμές. Η αστοχία αυτή είναι λογική εφόσον λίγες είναι οι πληροφορίες που δέχεται το φίλτρο από κάθε όχημα και με αυτόν τον τρόπο οι εκτιμήσεις του δεν μπορούν να έχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Στη λωρίδα 1 (λωρίδα περιορισμένης κυκλοφορίας) τα οχήματα είναι λίγα και έχουν την δυνατότητα να αυξήσουν την ταχύτητά τους. Για αυτό τον λόγο το μοντέλο (Kalman) δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά.

6 **Εκτίμηση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα του αυτοκινητόδρομου, με την προσθήκη μοντέλου ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα.**

Μετά από τον υπολογισμό της ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα με χρονικό βήμα 5 δευτερολέπτων για το σενάριο όπου όλα τα οχήματα είναι σε σύνδεση, ακολούθησε ο έλεγχος της ορθότητας αυτών με την εφαρμογή του νόμου της διατήρησης του πλήθους των οχημάτων. Από την άλλη για το σενάριο όπου τα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο δεν είναι στο σύνολό τους συνδεδεμένα εφαρμόστηκε μοντέλο για τον έλεγχο της ορθότητάς τους.

Στην ενότητα αυτή, οι πληροφορίες της ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα, τα δεδομένα ταχύτητας στα τμήματα και τα δεδομένα ροής των οχημάτων στη είσοδο θα εισαχθούν στο κατάλληλα διαμορφωμένο μοντέλο εκτίμησης Kalman, όπου και θα έχουμε νέες εκτιμήσεις πυκνότητας σε λωρίδες του αυτοκινητόδρομου. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για την λωρίδα 6 και 5 καθώς παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ροή από τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα, κάτι απόλυτα λογικό καθώς επηρεάζονται από ροή των οχημάτων που εισέρχονται από την ράμπα εισόδου. Στις υπόλοιπες λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου δεν υπήρχε λόγος να γίνουν νέες εκτιμήσεις, διότι τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα είναι ελάχιστα και τα προηγούμενα διαγράμματα είναι επαρκή. Με τον τρόπο αυτό, έχοντας εισάγει μια παραπάνω πληροφορία σχετικά με την κίνηση των οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο, στόχος είναι η βελτίωση των εκτιμήσεων της κυκλοφοριακής κατάστασης.

Στην περίπτωση που τα οχήματα δεν είναι όλα συνδεδεμένα οι εξισώσεις του μοντέλου για την εκτίμηση των δεδομένων πυκνότητας στην λωρίδα 6 και 5 αυτοκινητόδρομου θα έχουν την παρακάτω μορφή, δεδομένου ότι ισχύει η εξίσωση του μοντέλου των ροών που αλλάζουν λωρίδα (ενότητα 4.2):

$$x(k+1) = A(k) * x(k) + u(k) + A(k) * K(k) * (z(k) - C * x(k)),$$

$$\text{με } A(k) = \begin{cases} a_{ij} = \frac{T}{L} v_{i-1,j}(k), & \text{if } i - j = 1 \text{ και } i \geq 2 \\ a_{ij} = 1 - \frac{T}{L} \left(v_{i,j} + \frac{f_{i,j-1}(k)}{\rho_{i,j-1}(k)} - \frac{f_{i,j}(k)}{\rho_{i,j}(k)} - \frac{f_{i,j}(k)}{\rho_{i,j}(k)} + \frac{f_{i,j+1}(k)}{\rho_{i,j+1}(k)} \right), & \text{if } i = j \\ a_{nij} = 1, & \text{if } n_{i,j}, j \in L_r \text{ and } j = N + i \\ a_{nij} = 1, & \text{if } N < i < N1 \text{ and } j = i \\ a_{nij} = 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$I_{1i}(k-1)$, η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα στο τμήμα i κατευθυνόμενα προς τα αριστερά, φθάνοντας στην εξεταζόμενη λωρίδα ερχόμενα από την προηγούμενη λωρίδα $k-1$. Με άλλα λόγια η ροή των οχημάτων που φθάνουν στην 5 και στην 6 λωρίδα ερχόμενα από την 4 και 5 λωρίδα, αντίστοιχα. Οι τιμές των ροών διαφέρουν κάθε χρονικό βήμα 5 sec.

$I_{2i}(k)$, η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα στο τμήμα i κατευθυνόμενα προς τα δεξιά, φεύγοντας από την εξεταζόμενη λωρίδα k κινούμενα προς την προηγούμενη λωρίδα. Με άλλα λόγια η ροή των οχημάτων που φεύγουν από την 5 και στην 6 λωρίδα κινούμενα προς την 4 και 5 λωρίδα, αντίστοιχα.

$I_{3i}(k)$, η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα στο τμήμα i κατευθυνόμενα προς τα αριστερά, φεύγοντας από την εξεταζόμενη λωρίδα k κινούμενα προς την επόμενη λωρίδα. Με άλλα λόγια η ροή των οχημάτων που φεύγουν από την 5 κινούμενα προς την 6 λωρίδα.

$I_{4i}(k+1)$, η ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα στο τμήμα i κατευθυνόμενα προς τα δεξιά, φθάνοντας στην εξεταζόμενη λωρίδα ερχόμενα από την επόμενη λωρίδα $k+1$. Με άλλα λόγια η ροή των οχημάτων που φθάνουν στην 5 ερχόμενα από την 6 λωρίδα.

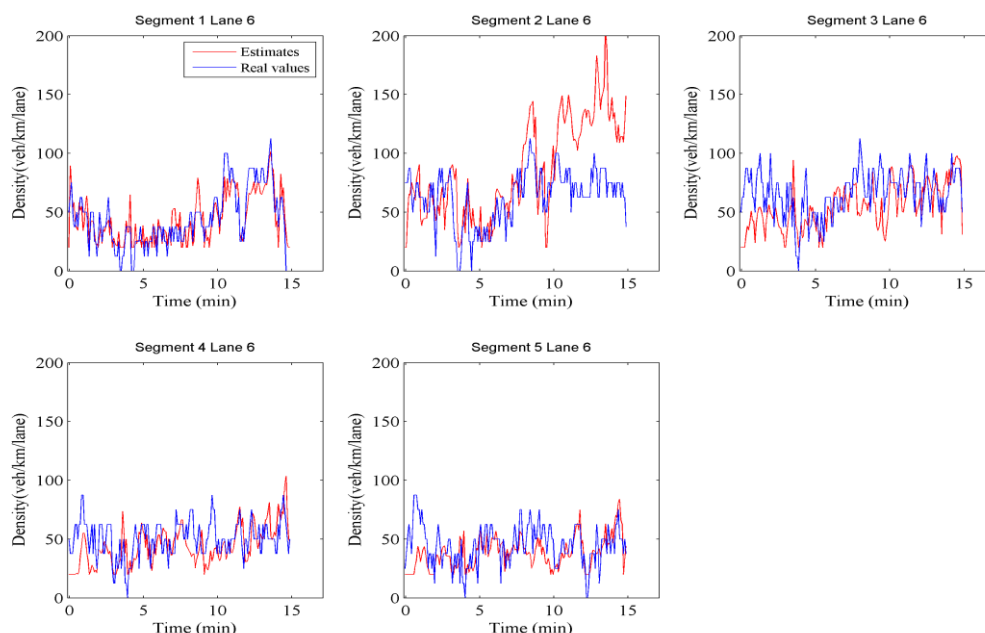
$d_{1i}(k-1)$, το πλήθος των συνδεδεμένων οχημάτων στη λωρίδα $k-1$ και στο τμήμα i του αυτοκινητόδρομου από την οποία φεύγουν αλλάζοντας λωρίδα. Οι τιμές των ροών διαφέρουν κάθε χρονικό βήμα 5 sec.

$d_{2i}(k)$, το πλήθος των συνδεδεμένων οχημάτων στην λωρίδα k και στο τμήμα i του αυτοκινητόδρομου από την οποία φεύγουν αλλάζοντας λωρίδα.

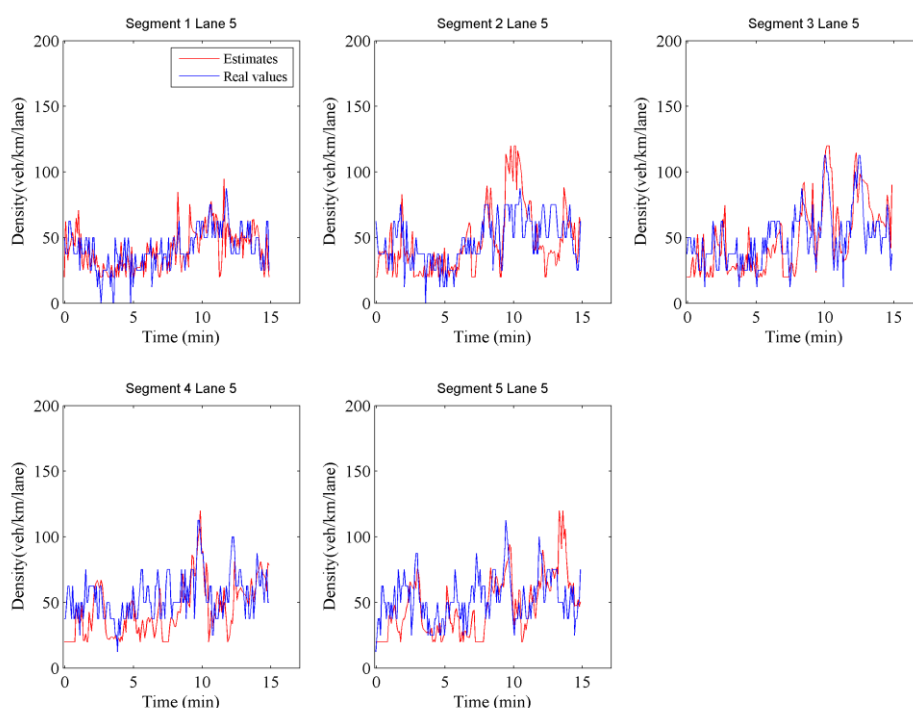
$d_{3i}(k)$, το πλήθος των συνδεδεμένων οχημάτων στην λωρίδα $k+1$ και στο τμήμα i του αυτοκινητόδρομου από την οποία φεύγουν αλλάζοντας λωρίδα.

Στη συνέχεια της ενότητας αυτής, θα απεικονιστούν διαγράμματα με τις νέες εκτιμήσεις πυκνότητας στην λωρίδα 6 του αυτοκινητοδρόμου. Τέλος, θα παρουσιαστούν σε διαγράμματα οι εκτιμήσεις του μοντέλου για τα ειδικά σενάρια όπου τα οχήματα δεν είναι συνολικά όλα σε σύνδεση. Στην ενότητα αυτή, επιλέχθηκαν να σχεδιαστούν τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων στις περιπτώσεις που το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι 50% και 20%. Για το σενάριο όπου τα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο είναι συνδεδεμένα με ποσοστό 2% δεν εκτιμήθηκαν οι νέες πυκνότητες. Για τον λόγο ότι, σαν ποσοστό ήταν πολύ μικρό και τα οχήματα που παρατηρήθηκαν να αλλάζουν λωρίδα πολύ λίγα.

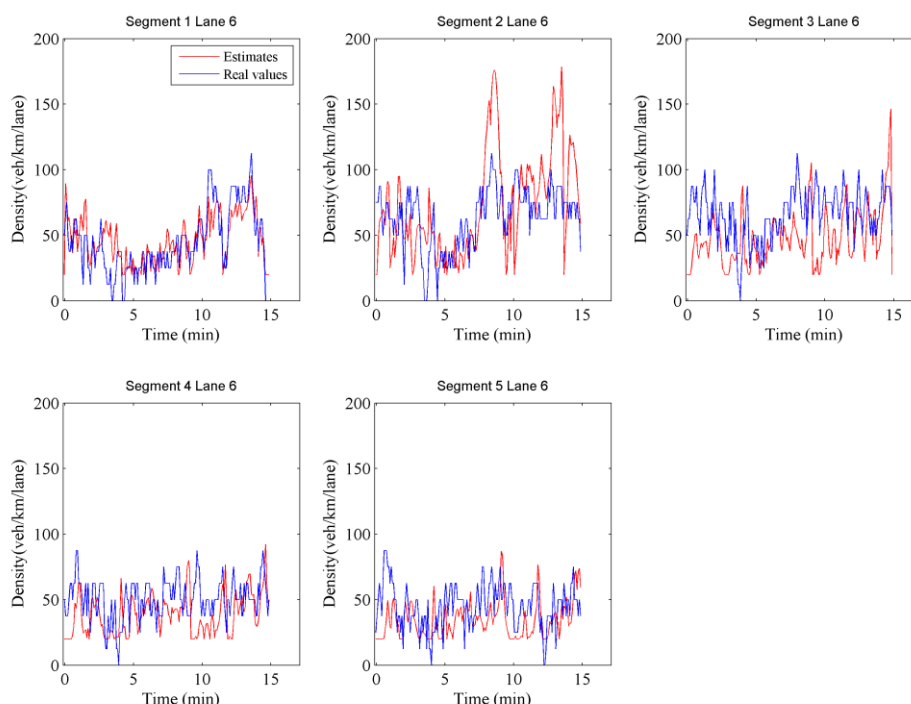
Τέλος στο κεφάλαιο αυτό της εργασίας, θα παρατηρηθούν τα αποτελέσματα των νέων εκτιμήσεων και θα παρατηρηθεί εάν υπήρχε βελτίωση στα αποτελέσματα μετά την προσθήκη των δεδομένων ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα.



Σχήμα 6.1. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 6 του αυτοκινητοδρόμου ,για το σενάριο που το 50% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 6.2. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 5 του αυτοκινητοδρόμου ,για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.



Σχήμα 6.3. : Οι τροχιές των πραγματικών και εκτιμώμενων πυκνοτήτων με την χρήση NGSIM δεδομένων στην λωρίδα 6 του αυτοκινητοδρόμου ,για το σενάριο που το 20% των οχημάτων είναι σε σύνδεση.

Βλέποντας τα τελικά αποτελέσματα της εκτίμησης από το μοντέλο Kalman μπορεί να γίνει αντιληπτό πως η βελτίωση των αποτελεσμάτων είναι εμφανής στην πλειονότητα των τμημάτων του αυτοκινητοδρόμου.

Από την άλλη μεριά, σε ορισμένες χρονικές στιγμές οι εκτιμήσεις του μοντέλου με την χρήση στοιχείων ροής για τα οχήματα που αλλάζουν λωρίδα φαίνονται να έχουν μεταβληθεί προς το χειρότερο. Αυτό, οφείλεται στην αστοχία που αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο και αφορά την μηδενική πυκνότητα των συνδεδεμένων οχημάτων που παρουσιάζουν τμήματα του αυτοκινητοδρόμου. Η αστοχία αυτή εμφανίζεται όταν ανάμεσα σε δυο χρονικές μετρήσεις (5 sec) όχημα φθάνει από προηγούμενο τμήμα στο υπό μελέτη τμήμα και από εκεί αλλάζει λωρίδα.

Όπως παρατηρήθηκε και στο κεφάλαιο 5, οι εκτιμήσεις για κάθε λωρίδα (χωρίς την πρόσθετη πληροφορία για την ροή των οχημάτων που αλλάζουν λωρίδα) προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις πραγματικές τιμές της πυκνότητας των οχημάτων του αυτοκινητοδρόμου. Η απόκλιση που φαίνεται στα αποτελέσματα προήλθε από το μικρό πλήθος των οχημάτων που παρατηρήθηκαν να φεύγουν από την λωρίδα και να έρχονται στην λωρίδα. Δηλαδή οι τιμές της ροής των οχημάτων αυτών ήταν κυρίως κανένα ή 1 όχημα σε κάθε χρονικό βήμα.

7 Συμπεράσματα

Το μακροσκοπικό μοντέλο εκτίμησης της κυκλοφοριακής κατάστασης (Kalman Filter) δοκιμάστηκε με την χρήση δεδομένων που προέρχονται από μικροσκοπικά δεδομένα NGSIM. Το μοντέλο εκτίμησης απέδειξε την ικανότητα του στην σωστή εκτίμηση της κυκλοφορίας σε κάθε λωρίδα και ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου, με συνδεδεμένα οχήματα και αισθητήρες. Επίσης το σύστημα εκτίμησης έδωσε αξιόπιστα αποτελέσματα σε όλα τα σενάρια μεταβολής των ποσοστών διείσδυσης των οχημάτων σε σύνδεση. Με άλλα λόγια εξήγαγε ικανοποιητικά αποτελέσματα και στις περιπτώσεις των σεναρίων που οι τιμές των ταχυτήτων για τα οχήματα σε κάθε λωρίδα, δεν είχαν μεγάλη ακρίβεια.

Αντιληπτή για κάθε σενάριο έγινε η αποτυχία στην εκτίμηση της πυκνότητας των οχημάτων στην λωρίδα 1 από το μοντέλο, λόγω της αυξημένης ταχύτητας των οχημάτων. Ακόμη, φανερή έγινε στα διάφορα σενάρια και η αστοχία στην εκτίμηση της ροής των οχημάτων από την ράμπα εισόδου. Αυτό οφείλεται στην ανικανότητα του φίλτρου στην αναγνώριση του σημείου εισροής των οχημάτων από την ράμπα του αυτοκινητοδρόμου.

Τέλος, σε γενικές γραμμές, οι εκτιμήσεις του φίλτρου εκτίμησης φάνηκε να βελτιώθηκαν με την εισαγωγή της επιπλέον πληροφορίας σχετικά με την ροή των οχημάτων που αποφασίζουν να αλλάξουν λωρίδα κυκλοφορίας στον αυτοκινητόδρομο.

Βιβλιογραφία

1. Highway traffic state estimation using speed measurements: Case studies on NGSIM data and highway A20 in Netherlands (Claudio Roncoli, Nikolaos Bekiaris- Liberis, Markos Papageorgiou), 2015.
2. Highway Traffic State Estimation With Mixed Connected and Conventional Vehicles (Nikolaos Bekiaris- Liberis , Claudio Roncoli, and Markos Papageorgiou), 2015.
3. Traffic flow optimization in presence of Vehiclesicle automation and communication system – Part I: A first –order multi – lane model for motorway traffic (Claudio Roncoli ,Markos Papageorgiou, Ioannis Papamichail), 2015.
4. US Department Of Transportation Federal Highway Administration, Next Generation SIMulation (NGSIM), 2005, www.ngsim-community.org.
5. Anderson, B. and J. Moore, Optimal Filtering. Prentice-Hall, 1979.
6. Munoz, L., X. Sun, R. Horowitz, and L. Alvarez, Traffic density estimation with the cell transmission model. In Proceedings of the American Control Conference, 2003, pp. 3750–3755.
7. Wang, Y. and M. Papageorgiou, Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: a general approach. Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 39, No. 2, 2005, pp. 141–167.
8. Mihaylova, L., R. Boel, and A. Hegyi, Freeway traffic estimation within particle filtering framework. Automatica, Vol. 43, No. 2, 2007, pp. 290–300.
9. Morbidi, F., L. Ojeda, C. de Wit, and I. Bellicot, A new robust approach for highway traffic density estimation. In Proceedings of the European Control Conference (ECC), 2014, pp. 2575–2580.
10. Diakaki, C., M. Papageorgiou, I. Papamichail, and I. Nikolos, Overview and analysis of Vehicle Automation and Communication Systems from a motorway traffic management perspective. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 75, 2015, pp. 147– 165.
11. Varaiya, P., Smart cars on smart roads: problems of control. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 38, No. 2, 1993, pp. 195–207.
12. Rao, B. and P. Varaiya, Roadside intelligence for flow control in an intelligent vehicle and highway system. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 2, No. 1, 1994, pp. 49–72.
13. Rajamani, R. and S. Shladover, An experimental comparative study of autonomous and co-operative vehicle-follower control systems. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 9, No. 1, 2001, pp. 15–31.