



Πολυτεχνείο  
Κρήτης

Σχολή  
Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ  
ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥΣ, ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ  
ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΕΞΟΔΟΥΣ

ΚΟΝΤΟΡΙΝΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, στη κατεύθυνση «Επιχειρησιακή Έρευνα».

ΧΑΝΙΑ 2013



Η μεταπτυχιακή διατριβή της Μαρίας Κοντορινάκη εγκρίνεται από την εξεταστική επιτροπή:

Μάρκος Παπαγεωργίου, Καθηγητής

\_\_\_\_\_

Ιωάννης Παπαμιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής

\_\_\_\_\_

Ιωάννης Νικολός, Επίκουρος Καθηγητής

\_\_\_\_\_

## Περιεχόμενα

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Περιεχόμενα.....                                                    | 4  |
| Κατάλογος Σχημάτων .....                                            | 6  |
| Κατάλογος Πινάκων .....                                             | 9  |
| Ευχαριστίες.....                                                    | 10 |
| Περίληψη.....                                                       | 11 |
| 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                                     | 12 |
| 1.1 Παρουσίαση Προβλήματος.....                                     | 12 |
| 1.2 Δομή Εργασίας.....                                              | 14 |
| 2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ.....                         | 15 |
| 2.1 Αιτίες Δημιουργίας Συμφόρησης.....                              | 15 |
| 2.2 Μέτρα Αντιμετώπισης της Συμφόρησης.....                         | 16 |
| 2.3 Περίπτωση Δημιουργίας Συμφόρησης σε Περιοχές Ραμπών Εξόδου ...  | 17 |
| 3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ.....                         | 19 |
| 3.1 Βασικές Έννοιες – Μεταβλητές των Μοντέλων.....                  | 19 |
| 3.2 Θεμελιώδες Διάγραμμα.....                                       | 21 |
| 3.3 METANET.....                                                    | 22 |
| 4 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ.....                      | 26 |
| 4.1 Περιγραφή του Προβλήματος.....                                  | 26 |
| 4.2 Καθοδήγηση Πορείας με Βάση τον Στιγμιαίο Χρόνο Διαδρομής.....   | 28 |
| 4.3 Καθοδήγηση Πορείας με Βάση το Εκτιμώμενο Μήκος Ουράς.....       | 30 |
| 4.4 Επίπεδο Υπακοής των Οδηγών.....                                 | 31 |
| 4.5 Δείκτες Απόδοσης.....                                           | 32 |
| 5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....                                                     | 35 |
| 5.1 Υποθετικό Δίκτυο.....                                           | 35 |
| 5.2 Υποθετικό Σενάριο Κυκλοφορίας.....                              | 36 |
| 5.3 Σχετικές Ρυθμίσεις για το METANET και των Στρατηγικών Ανάδρασης | 37 |
| 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....                                                 | 40 |
| 6.1 Περίπτωση Μη Καθοδήγησης Πορείας.....                           | 40 |

|     |                                                                |    |
|-----|----------------------------------------------------------------|----|
| 6.2 | Καθοδήγηση Πορείας με Βάση τον Στιγμιαίο Χρόνο Διαδρομής ..... | 43 |
| 6.3 | Καθοδήγηση Πορείας με Βάση το Εκτιμώμενο Μήκος Ουράς .....     | 52 |
| 7   | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....                                             | 61 |
| 7.1 | Σύνοψη.....                                                    | 61 |
| 7.2 | Συμπεράσματα.....                                              | 61 |
| 7.3 | Μελλοντικές Επεκτάσεις .....                                   | 62 |
|     | Βιβλιογραφία.....                                              | 63 |

## Κατάλογος Σχημάτων

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 1.1: Υπερχείλιση της ουράς από ράμπα εξόδου αυτοκινητοδρόμου. ....                                                                                   | 13 |
| Σχήμα 3.1: Διάγραμμα Ταχύτητας-Πυκνότητας. ....                                                                                                            | 21 |
| Σχήμα 3.2: Θεμελιώδες Διάγραμμα Κυκλοφοριακής Ροής. ....                                                                                                   | 22 |
| Σχήμα 3.3: Διακριτοποίηση του αυτοκινητοδρόμου.....                                                                                                        | 23 |
| Σχήμα 5.1: Υποθετικό Δίκτυο. ....                                                                                                                          | 36 |
| Σχήμα 5.2: Ζήτηση στους Συνδέσμους Προέλευσης. ....                                                                                                        | 37 |
| Σχήμα 5.3: Ποσοστά Ροής από Κάθε Προέλευση σε Κάθε Προορισμό. ....                                                                                         | 38 |
| Σχήμα 6.1: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας Χωρίς Εφαρμογή Ελέγχου.....                                                                                        | 41 |
| Σχήμα 6.2: (a) Μήκος Ουράς στη Ράμπα Εξόδου Χωρίς την Εφαρμογή Ελέγχου και (b) Διαφορά στου Χρόνους Διαδρομής Χωρίς την Εφαρμογή Ελέγχου.....              | 42 |
| Σχήμα 6.3: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου $T_c = 2 \text{ min}$ . ....                     | 43 |
| Σχήμα 6.4: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου $T_c = 5 \text{ min}$ . ....                     | 44 |
| Σχήμα 6.5: Μήκος Ουράς στη Ράμπα Εξόδου L5 κάτω από τη λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή. ....                                                              | 45 |
| Σχήμα 6.6: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή..... | 45 |
| Σχήμα 6.7: Ποσοστά Διαχωρισμού για την Κύρια Διαδρομή κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.....                                                    | 45 |
| Σχήμα 6.8: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου $T_c = 2 \text{ min}$ .....                             | 47 |
| Σχήμα 6.9: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου $T_c = 5 \text{ min}$ .....                             | 47 |
| Σχήμα 6.10: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή.....       | 48 |
| Σχήμα 6.11: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή.....       | 48 |

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 6.12: Ποσοστά Διαχωρισμού για την Κύρια Διαδρομή κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή. ....                                                                                                        | 48 |
| Σχήμα 6.13: (a) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (b) Ποσοστά Διαχωρισμού Όπως τα Υπολογίζει η Bang-Bang Στρατηγική (c) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου $T_c = 2 \text{ min}$ . .... | 50 |
| Σχήμα 6.14: (a) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (b) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η Bang-Bang Στρατηγική (c) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου $T_c = 5 \text{ min}$ . .... | 50 |
| Σχήμα 6.15: (a) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (b) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η PI Στρατηγική (c) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου $T_c = 2 \text{ min}$ . ....        | 51 |
| Σχήμα 6.16: (a) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (b) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η PI Στρατηγική (c) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου $T_c = 5 \text{ min}$ . ....        | 51 |
| Σχήμα 6.17: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου $T_c = 2 \text{ min}$ . ....                                                                   | 53 |
| Σχήμα 6.18: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου $T_c = 5 \text{ min}$ . ....                                                                   | 53 |
| Σχήμα 6.19: Μήκος Ουράς στη Ράμπα Εξόδου L5 κάτω από τη λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.....                                                                                                             | 54 |
| Σχήμα 6.20: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.....                                               | 54 |
| Σχήμα 6.21: Ποσοστά Διαχωρισμού για την Κύρια Διαδρομή κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.....                                                                                                  | 54 |
| Σχήμα 6.22: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου $T_c = 2 \text{ min}$ . ....                                                                          | 56 |
| Σχήμα 6.23: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου $T_c = 5 \text{ min}$ . ....                                                                          | 56 |
| Σχήμα 6.24: Μήκος Ουράς στη Ράμπα Εξόδου L5 κάτω από τη λειτουργία του PI Ελεγκτή. ....                                                                                                                   | 57 |
| Σχήμα 6.25: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή. ....                                                     | 57 |

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 6.26: Ποσοστά Διαχωρισμού για την Κύρια Διαδρομή κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή.....                                                                                                         | 57 |
| Σχήμα 6.27: (a) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (b) Ποσοστά Διαχωρισμού Όπως τα Υπολογίζει η Bang-Bang Στρατηγική (c) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου $T_c = 2 \text{ min}$ . .... | 59 |
| Σχήμα 6.28: (a) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (b) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η Bang-Bang Στρατηγική (c) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου $T_c = 5 \text{ min}$ . .... | 59 |
| Σχήμα 6.29: (a) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (b) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η PI Στρατηγική (c) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου $T_c = 2 \text{ min}$ . ....        | 60 |
| Σχήμα 6.30: (a) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (b) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η PI Στρατηγική (c) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου $T_c = 5 \text{ min}$ . ....        | 60 |



## Κατάλογος Πινάκων

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Πίνακας 5.1: Τιμές Παραμέτρων .....        | 39 |
| Πίνακας 6.1: Τιμές Κριτηρίων Απόδοσης..... | 42 |

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της εργασίας μου Καθηγητή Μάρκο Παπαγεωργίου και Επικ. Καθηγητή Ιωάννη Παπαμιχαήλ για τη σημαντική καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης και ιδιαίτερα την υποψήφια διδάκτορα Αναστασία Σπηλιοπούλου για τη βοήθεια και τις γνώσεις που μου παρείχαν.

## Περίληψη

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση αποτελεί, στις μέρες μας, σύνηθες φαινόμενο που αντιμετωπίζουν εκατομμύρια χρήστες οδικών δικτύων στον πλανήτη. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται σε μεγάλα αστικά κέντρα αλλά και σε αυτοκινητοδρόμους και συνοδεύεται από αρκετές αρνητικές επιπτώσεις τόσο για τους ίδιους τους χρήστες όσο και για την οικονομία και το περιβάλλον. Ο πιο αποτελεσματικός και οικονομικός τρόπος για την αντιμετώπιση του φαινομένου της συμφόρησης, έχει αποδειχθεί ότι είναι η εφαρμογή μέτρων ελέγχου κυκλοφορίας.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή αφορά την εφαρμογή ελέγχου κυκλοφοριακής ροής σε αυτοκινητοδρόμους στην περίπτωση όπου η συμφόρηση δημιουργείται λόγω της υπερχειλίσσης της ουράς, ράμπας εξόδου αυτοκινητοδρόμου. Συγκεκριμένα, τα προτεινόμενα μέτρα ελέγχου περιλαμβάνουν την εφαρμογή δύο πολιτικών καθοδήγησης πορείας που σκοπό έχουν να καθοδηγούν τα οχήματα μέσω εναλλακτικών διαδρομών, όταν αυτό χρειάζεται, ώστε να αποτρέπεται η υπερχειλίση της ράμπας και η δημιουργία συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου. Τα προτεινόμενα μέτρα ελέγχου δοκιμάστηκαν σε ένα υποθετικό δίκτυο αυτοκινητοδρόμου, με εφαρμογή ενός υποθετικού σεναρίου ζήτησης. Οι διερευνήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση του μακροσκοπικού προσομοιωτή κυκλοφοριακής ροής METANET. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι τα προτεινόμενα μέτρα μπορούν να επιφέρουν σημαντική βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου, μείωση του χρόνου παραμονής των οχημάτων μέσα στο δίκτυο, αύξηση της ροής των οχημάτων και επομένως, καλύτερη αξιοποίηση της ικανότητας της υποδομής.

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

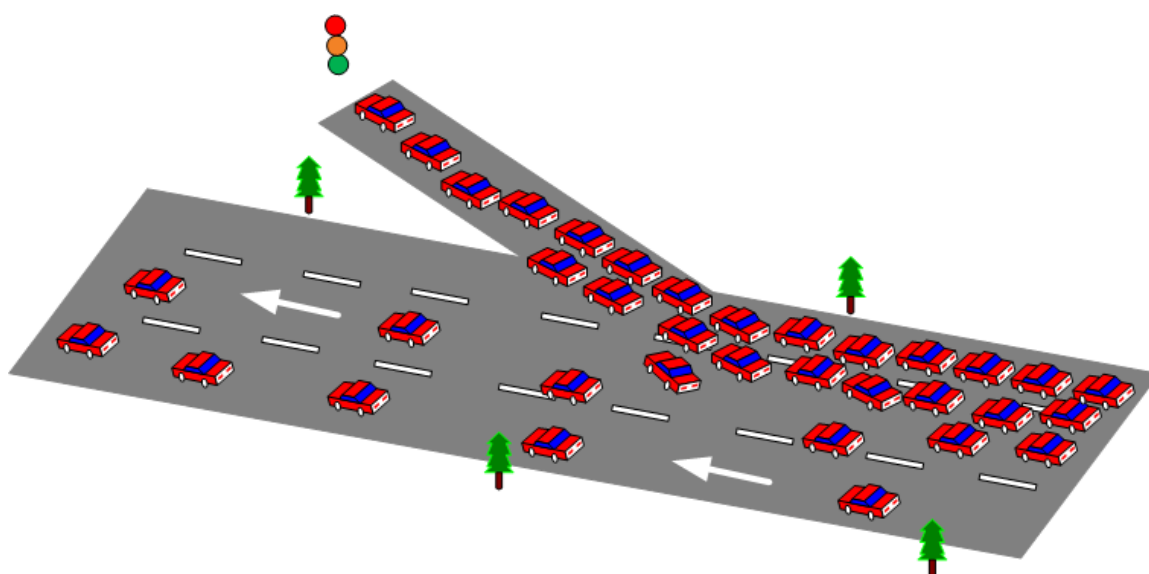
Τις τελευταίες δεκαετίες, η κυκλοφοριακή συμφόρηση έχει καταστεί σύνηθες φαινόμενο κυρίως μέσα στις μεγαλουπόλεις αλλά και στις γύρω περιοχές. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση δημιουργείται όταν οι διαθέσιμες οδικές υποδομές, αδυνατούν να εξυπηρετήσουν τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό οχημάτων και η εμφάνισή της, έχει πολυάριθμες συνέπειες τόσο στους ίδιους τους οδηγούς όσο και στην οικονομία και το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, οι οδηγοί επιβαρύνονται με παρατεταμένες καθυστερήσεις, που έχουν ως αποτέλεσμα την αδυναμία πρόβλεψης του χρόνου διαδρομής προς τον επιθυμητό προορισμό και την ψυχολογική επιβάρυνσή τους λόγω του επαναλαμβανόμενου στρες. Σε οικονομικό και σε περιβαλλοντικό επίπεδο, οι συνέπειες της συμφόρησης αφορούν την υψηλότερη κατανάλωση καυσίμων, τη συντομότερη φθορά των οχημάτων, την μειωμένη οδική ασφάλεια και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Ωστόσο, για την κάλυψη της υψηλότερης ζήτησης δεν είναι πάντα δυνατή η επέκταση των ήδη υπαρχόντων υποδομών ή η δημιουργία νέων, είτε λόγω της έλλειψης διαθέσιμου χώρου είτε λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής. Ως εκ τούτου, ο πιο αποτελεσματικός και οικονομικός τρόπος αντιμετώπισης τους προβλήματος της κυκλοφοριακής συμφόρησης, αποτελεί η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων ελέγχου κυκλοφορίας. Η ραγδαία και συνεχόμενη εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας, έχει ευνοήσει την ανάπτυξη ποικίλων μεθοδολογιών ελέγχου κυκλοφορίας που έχουν σκοπό την μείωση, ή ακόμα, και την εξάλειψη της συμφόρησης σε αστικά δίκτυα και σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ασχολείται με τη λήψη μέτρων ελέγχου κυκλοφορίας σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων.

## 1.1 Παρουσίαση Προβλήματος

Η παρούσα εργασία, αφορά την εφαρμογή μέτρων ελέγχου κυκλοφορίας σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων στα οποία εμφανίζεται επαναλαμβανόμενη συμφόρηση κοντά σε περιοχές ραμπών εξόδου. Η συμφόρηση στις περιοχές αυτές δημιουργείται, συνήθως, είτε λόγω της μεγάλης ροής εξόδου από τον κυρίως αυτοκινητόδρομο προς τη ράμπα, μεγαλύτερης από αυτή που μπορεί να παραλάβει η ράμπα εξόδου, είτε λόγω της

υπερχείλισης της ουράς της ράμπας και εισόδου αυτής στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου, για παράδειγμα εξ' αιτίας ενός κατάντη αστικού φωτεινού σηματοδότη, κατά τη διασταύρωση της ράμπας με ένα παράπλευρο δίκτυο (βλέπε για παράδειγμα το Σχήμα 1.1).

Το φαινόμενο της συμφόρησης σε περιοχές ραμπών εξόδου αυτοκινητοδρόμου αποτελεί ιδιαίτερη αλλά συχνά εμφανιζόμενη περίπτωση, κυρίως σε αστικούς ή περιαστικούς αυτοκινητοδρόμους και είναι δύσκολο να αντιμετωπιστεί, καθώς δεν υπάρχει κάποιος άμεσος τρόπος ελέγχου της ροής που εξέρχεται από τον αυτοκινητόδρομο προς τις ράμπες εξόδου. Για το λόγο αυτό, η βιβλιογραφία σχετικά με τις στρατηγικές ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιου είδους περιπτώσεις είναι περιορισμένη. Οι μεθοδολογίες που προτείνονται σ' αυτή την εργασία, σκοπό έχουν να εξαλείψουν την συμφόρηση που δημιουργείται στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου, με το να καθοδηγούν τα οχήματα που θέλουν να χρησιμοποιήσουν την κορεσμένη ράμπα εξόδου, μέσω γειτονικών ραμπών που μπορούν να οδηγήσουν προς τον ίδιο προορισμό. Η διερεύνηση των προτεινόμενων μέτρων ελέγχου κυκλοφορίας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένα υποθετικό δίκτυο το οποίο προσομοιώνεται στον μακροσκοπικό προσομοιωτή κυκλοφοριακής ροής METANET.



**Σχήμα 1.1: Υπερχείλιση της ουράς από ράμπα εξόδου αυτοκινητοδρόμου.**

## ***1.2 Δομή Εργασίας***

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της εργασίας, πραγματοποιείται μία εισαγωγή σχετικά με τον έλεγχο κυκλοφορίας σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι αιτίες δημιουργίας κυκλοφοριακής συμφόρησης σε αυτοκινητοδρόμους, καθώς και τα ήδη υπάρχοντα μέτρα ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η συμφόρηση εμφανίζεται σε περιοχές ραμπών εξόδου αυτοκινητοδρόμων. Προκειμένου να διερευνηθούν τα οφέλη εφαρμογής διαφορετικών μέτρων κυκλοφορίας ενδείκνυται η χρήση μαθηματικών μοντέλων που μπορούν να αναπαραστήσουν την κυκλοφοριακή ροή. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση του προσομοιωτή κυκλοφορίας METANET ο οποίος περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των προτεινόμενων μέτρων κυκλοφορίας για την αντιμετώπιση της συμφόρησης που οφείλεται σε κορεσμένες ράμπες εξόδου. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται δύο πολιτικές καθοδήγησης πορείας, που έχουν ως στόχο να καθοδηγήσουν τους οδηγούς μέσω εναλλακτικών, γειτονικών ραμπών εξόδου έτσι ώστε να αποτρέψουν την υπερχείλιση της κορεσμένης ράμπας εξόδου και την είσοδο της ουράς της ράμπας στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου. Το 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης του εξεταζόμενου υποθετικού δικτύου αυτοκινητοδρόμου, δηλαδή την περιγραφή του δικτύου, το σενάριο ζήτησης, τα σενάρια καθοδήγησης πορείας, τις παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης, τις παραμέτρους των στρατηγικών ελέγχου καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης των εφαρμοζόμενων στρατηγικών. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας και ακολουθεί σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 γίνεται σύνοψη της παρούσας εργασίας, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και οι μελλοντικές επεκτάσεις που προκύπτουν από την παρούσα ερευνητική διατριβή.

## 2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

Ο έλεγχος της κυκλοφοριακής ροής, αποτελεί έναν σχετικά σύγχρονο κλάδο της επιστήμης ο οποίος αποσκοπεί στην εξάλειψη του φαινομένου της κυκλοφοριακής συμφόρησης και επομένως στην καλύτερη αξιοποίηση της ικανότητας των διαθέσιμων οδικών υποδομών και στην ασφαλέστερη μετακίνηση των χρηστών εντός των οδικών δικτύων. Ωστόσο, η δημιουργία της κυκλοφοριακής συμφόρησης μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικά αίτια και επομένως να κρίνονται αναγκαία διαφορετικά μέτρα αντιμετώπισης. Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά περιγράφονται οι διαφορετικές αιτίες δημιουργίας συμφόρησης σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων και έπειτα γίνεται αναφορά στα ήδη υπάρχοντα μέτρα αντιμετώπισης της συμφόρησης, τα οποία εφαρμόζονται στο πεδίο. Τέλος, παρουσιάζονται τα ήδη προτεινόμενα, στη βιβλιογραφία, μέτρα για την περίπτωση που η συμφόρηση δημιουργείται σε περιοχές ραμπών εξόδου αυτοκινητοδρόμων, η οποία εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

### *2.1 Αιτίες Δημιουργίας Συμφόρησης*

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση δημιουργείται όταν ο όγκος των οχημάτων που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν μία υποδομή είναι μεγαλύτερος από την ικανότητα της υποδομής. Η συμφόρηση μπορεί να εμφανίζεται σε κάποια δίκτυα καθημερινά, για παράδειγμα κατά τις ώρες αιχμής, λόγω της υψηλής ζήτησης σε συνδυασμό με την περιορισμένη ικανότητα της υποδομής, είτε περιστασιακά λόγω περιστατικών που μειώνουν την ικανότητα του δικτύου. Συγκεκριμένα σε περιοχές αυτοκινητοδρόμων, που εξετάζονται στην εργασία αυτή, επαναλαμβανόμενη συμφόρηση μπορεί να εμφανίζεται λόγω της υψηλής ροής οχημάτων στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου σε συνδυασμό με την υψηλή ροή εισόδου από ράμπες εισόδου ή/και την υψηλή ροή εξόδου από ράμπες εξόδου με περιορισμένη χωρητικότητα. Επίσης περιστασιακή συμφόρηση μπορεί να δημιουργείται λόγω περιστατικών, όπως εργασίες συντήρησης του δικτύου, ατυχήματα, μηχανικές βλάβες κ.α. και επίσης λόγω δυσμενών καιρικών φαινομένων που μπορεί να επηρεάζουν την συμπεριφορά των οδηγών. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται

κάποια προτεινόμενα μέτρα αντιμετώπισης της συμφόρησης βάσει των αιτιών που την προκαλούν.

## 2.2 Μέτρα Αντιμετώπισης της Συμφόρησης

Κάποια από τα υπάρχοντα μέτρα ελέγχου κυκλοφορίας σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων, ανάλογα με την αιτία δημιουργίας της συμφόρησης είναι τα παρακάτω:

- *Έλεγχος ραμπών εισόδου (ramp metering)*: τίθεται σε λειτουργία μέσω της τοποθέτησης φωτεινών σηματοδοτών στις ράμπες εισόδου αυτοκινητοδρόμων με σκοπό τη ρύθμιση της ροής οχημάτων που εισέρχεται από τη ράμπα στον κυρίως αυτοκινητόδρομο. Θεωρείται ο πιο άμεσος και αποδοτικός τρόπος για τη ρύθμιση και βελτίωση της κυκλοφορίας του αυτοκινητοδρόμου, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης οχημάτων στις ράμπες. Αν ο έλεγχος των ραμπών εφαρμοστεί κατάλληλα μπορούν να επιτευχθούν πολλά θετικά αποτελέσματα.
- *Έλεγχος του κυρίως ρεύματος του αυτοκινητοδρόμου (mainline metering)*: τίθεται σε λειτουργία με τοποθέτηση φωτεινών σηματοδοτών στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου ή με εφαρμογή μεταβαλλόμενων ορίων ταχύτητας (variable speed limits) και έχει σκοπό να ρυθμίσει τη ροή στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου και μπορεί να εφαρμοστεί σε ειδικές περιπτώσεις, για παράδειγμα σε περιοχές μείωσης λωρίδων όπως γέφυρες, τούνελ, κτλ.
- *Πληροφόρηση του οδηγού και συστήματα καθοδήγησης (driver information and guidance systems)*: πραγματοποιείται είτε χρησιμοποιώντας πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων (variable message signs), είτε μέσω αμφίδρομης επικοινωνίας των οχημάτων με κατάλληλα εφοδιασμένα οχήματα ή και με την υποδομή, και χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, για την ενημέρωση των οδηγών για την ύπαρξη κυκλοφοριακής συμφόρησης, ή κάποιου περιστατικού καθώς και για την καθοδήγηση των οχημάτων μέσω εναλλακτικών, ενδεχομένως συντομότερων, διαδρομών.



Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται τα μέτρα ελέγχου κυκλοφορίας που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση της συμφόρησης που δημιουργείται σε περιοχές ραμπών εξόδου αυτοκινητοδρόμων.

### ***2.3 Περίπτωση Δημιουργίας Συμφόρησης σε Περιοχές Ραμπών Εξόδου***

Οι ράμπες εξόδου αυτοκινητοδρόμων ουσιαστικά παραλαμβάνουν την ροή που επιθυμεί να εξέλθει από τον αυτοκινητόδρομο και να κατευθυνθεί προς κάποιο άλλο αυτοκινητόδρομο ή προς κάποιο αστικό δίκτυο. Όπως συμβαίνει και με τις ράμπες εισόδου, οι ράμπες εξόδου έχουν περιορισμένη χωρητικότητα σε οχήματα και πολλές φορές κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση ενός φωτεινού σηματοδότη στην έξοδο της ράμπας έτσι ώστε η εξερχόμενη ροή να διοχετεύεται με ασφάλεια στο παράπλευρο δίκτυο. Δεδομένης της περιορισμένης ικανότητας των ραμπών εξόδου είναι πιθανή η δημιουργία επαναλαμβανόμενης συμφόρησης, π.χ. κατά τις ώρες αιχμής, όταν η ροή που επιθυμεί να εξέλθει από τον αυτοκινητόδρομο μέσω μίας συγκεκριμένης ράμπας είναι μεγαλύτερη από την ικανότητα της ράμπας με αποτέλεσμα την υπερχειλίση της ράμπας και τη δημιουργία συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου.

Παρόλο που ποικίλα μέτρα ελέγχου κυκλοφορίας έχουν προταθεί στην περίπτωση που η συμφόρηση δημιουργείται σε περιοχές ραμπών εισόδου αυτοκινητοδρόμων, η βιβλιογραφία που αφορά μέτρα ελέγχου για περιπτώσεις που η συμφόρηση οφείλεται σε υπερχειλισμένες ράμπες εξόδου είναι αρκετά περιορισμένη. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι ουσιαστικά δεν υπάρχει κάποιος άμεσος τρόπος, από πλευράς αυτοκινητοδρόμου, για να ελεγχθεί η ροή που εξέρχεται από τον αυτοκινητόδρομο έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερχειλίση των ραμπών και η δημιουργία συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου.

Οι μεθοδολογίες που έχουν προταθεί μέχρι στιγμής είτε επικεντρώνονται στο πως θα επηρεάσουν την συμπεριφορά των οδηγών στον αυτοκινητόδρομο (π.χ. απαγορεύοντας την αλλαγή λωρίδων στις περιοχές ανάντη των ραμπών εξόδου) είτε προτείνουν την αύξηση της ροής που εξέρχεται από τη ράμπα εξόδου, όταν αυτό χρειάζεται, (π.χ. επεμβαίνοντας στις ρυθμίσεις του φωτεινού σηματοδότη που είναι, ενδεχομένως, τοποθετημένος στην έξοδο της ράμπας), είτε προτείνουν κάποιο συνδυασμό των παραπάνω.

Στο [1], εκφράζονται κάποιες σκέψεις για το πώς θα αυξηθεί η ικανότητα στις περιοχές ραμπών εξόδου, όπως για παράδειγμα μέσω, σταθερού ή δυναμικού χρόνου, ανάθεσης λωρίδων, στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου, με χρήση πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων, βάσει των διαφορετικών προορισμών των οδηγών. Επίσης, το ενδεχόμενο κλείσιμο μιας κορεσμένης ράμπας εξόδου και η καθοδήγηση των οδηγών μέσω γειτονικών ραμπών προτείνεται στην ίδια εργασία. Το [2] και το [3], συνιστούν την απαγόρευση της αλλαγής λωρίδων κοντά σε περιοχές ραμπών εξόδου μέσω ειδικής σήμανσης στο οδόστρωμα, σε συνδυασμό με την αύξηση της ικανότητας της ράμπας όποτε αυτό χρειάζεται, χωρίς όμως να εξετάζεται ο αντίκτυπος που έχει κάτι τέτοιο στο παράπλευρο δίκτυο. Όπως σημειώνεται στο [2], κάποιες φορές η απαγόρευση της αλλαγής λωρίδων μπορεί απλά να έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά της συμφόρησης σε κάποια ανάντη περιοχή όπου αυτή επιτρέπεται. Στο [4], επίσης προτείνεται να αυξάνεται απότομα η ικανότητα της ράμπας εξόδου όταν η ουρά της ράμπας είναι έτοιμη να υπερχειλίσει προς τον αυτοκινητόδρομο αναγνωρίζοντας, όμως, ότι αυτή η ενέργεια ίσως να δημιουργήσει προβλήματα στο παράπλευρο δίκτυο. Τέλος, στο [5] προτείνεται η εκτροπή ενός μέρους των οχημάτων που κινούνται στο παράπλευρο δίκτυο ώστε να γίνει εφικτή η αύξηση της εκροής των οχημάτων από τη ράμπα εξόδου ωφελώντας τους χρήστες του αυτοκινητόδρομου σε βάρος των χρηστών του παράπλευρου δικτύου.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στην εργασία αυτή προτείνεται η καθοδήγηση των οχημάτων, που σκοπό έχουν να χρησιμοποιήσουν μια δεδομένη ράμπα εξόδου που εμφανίζει πρόβλημα υπερχειλίσας ουράς, μέσω μιας άλλης διαδρομής που έχει τον ίδιο προορισμό και που κατά τις ώρες αιχμής γίνεται χρονικά μικρότερη. Οι προτεινόμενες πολιτικές καθοδήγησης πορείας, λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες όπως είναι οι χρόνοι διαδρομής των εναλλακτικών διαδρομών και το μήκος της ουράς οχημάτων στην κορεσμένη ράμπα εξόδου.

Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία της μοντελοποίησης ενός δικτύου αυτοκινητοδρόμου και αναλύονται οι σχετικές έννοιες που χρειάζονται για τη βαθύτερη κατανόηση της διαδικασίας αυτής.

### 3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

Η μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής αποτελεί χρήσιμο εργαλείο κατά το σχεδιασμό και την αξιολόγηση νέων οδικών υποδομών και επίσης για την ανάπτυξη και δοκιμή νέων στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας. Τα μοντέλα κυκλοφορίας διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες βάσει του επιπέδου λεπτομέρειας της απεικόνισης που χρησιμοποιούν: τη μικροσκοπική, τη μακροσκοπική και τη μεσοσκοπική. Η μικροσκοπική προσέγγιση επιχειρεί να αναπαραγάγει την συμπεριφορά των οχημάτων-οδηγών σαν μονάδες και πώς αυτές οι μονάδες ανταποκρίνονται στο περιβάλλον τους προσαρμόζοντας αντίστοιχα την ταχύτητά τους. Τα μικροσκοπικά μοντέλα χρησιμοποιούν μεταβλητές όπως η θέση του οχήματος, η ταχύτητά του και η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων (headway). Η μακροσκοπική προσέγγιση αγνοεί τα δυναμικά χαρακτηριστικά κάθε οχήματος ως μονάδας και επιχειρεί να αναπαραγάγει την συνολική ανταπόκριση που έχει ένας μεγάλος αριθμός από οχήματα. Αυτά τα μοντέλα θεωρούν την κυκλοφορία σαν συμπιεστό ρευστό και την αναπαριστούν με όρους ροής, πυκνότητας και μέσης ταχύτητας. Η τρίτη προσέγγιση είναι τα μεσοσκοπικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν ένα ενδιάμεσο επίπεδο απεικόνισης θεωρώντας τα οχήματα-οδηγούς όχι σαν μονάδες αλλά σαν ομάδες οχημάτων προσδιορίζοντας τον τρόπο αλληλεπίδρασης των ομάδων αυτών.

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά θα παρουσιαστούν κάποιες βασικές έννοιες που συσχετίζονται με τη μακροσκοπική μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής και στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το μακροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης METANET, το οποίο χρησιμοποιείται για τις διερευνήσεις της παρούσας εργασίας.

#### 3.1 Βασικές Έννοιες – Μεταβλητές των Μοντέλων

Το Highway Capacity Manual [6] παρέχει τους ακόλουθους ορισμούς. Τα σύμβολα  $x$  και  $t$  αναπαριστούν την θέση (μετρούμενη στην κατεύθυνση της κυκλοφοριακής ροής) και τον χρόνο αντίστοιχα.

- Η ροή (flow)  $q(x, t)$  είναι ο συνολικός αριθμός των οχημάτων που περνά από τη θέση  $x$  κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος που

περιλαμβάνει το  $t$ , διαιρεμένος με το μήκος του χρονικού διαστήματος. Εκφράζεται συνήθως σε οχήματα ανά ώρα και μπορεί εύκολα να μετρηθεί από ειδικές συσκευές μέτρησης.

- Η (μέση) ταχύτητα (speed)  $v(x, t)$  της κίνησης εκφράζεται ως απόσταση ανά μονάδα χρόνου. Ανάλογα με το πώς έχει μετρηθεί, αναφέρεται είτε ως χωρική μέση ταχύτητα (space mean speed), είτε ως χρονική μέση ταχύτητα (time mean speed). Η χωρική μέση ταχύτητα υπολογίζεται διαιρώντας κάποιο τμήμα του αυτοκινητοδρόμου με τον μέσο συνολικό χρόνο που χρειάζονται τα οχήματα για να το διασχίσουν. Η χρονική μέση ταχύτητα είναι η μέση ταχύτητα των οχημάτων που παρατηρείται σε ένα συγκεκριμένο σημείο του αυτοκινητοδρόμου. Η τελευταία είναι ευκολότερο να μετρηθεί καθώς μπορεί να συλλεχθεί από ειδικές συσκευές μέτρησης. Η ταχύτητα ελεύθερης ροής (free-flow speed) είναι η μέση ταχύτητα των οχημάτων που μετράται σε κυκλοφοριακές συνθήκες χαμηλής ροής, όπου τα οχήματα μπορούν να κινηθούν ελεύθερα με την επιθυμητή τους ταχύτητα.
- Η πυκνότητα (density)  $\rho(x, t)$  είναι ο αριθμός των οχημάτων που έχουν καταλάβει ένα μήκος του αυτοκινητοδρόμου γύρω από το σημείο  $x$  σε χρόνο  $t$ . Η μέτρησή της είναι δύσκολη καθώς απαιτεί την παρατήρηση μιας έκτασης του αυτοκινητοδρόμου. Παρόλα αυτά, συχνά προσεγγίζεται βάσει των μετρήσεων της ροής και της ταχύτητας με χρήση της ακόλουθης σχέσης:

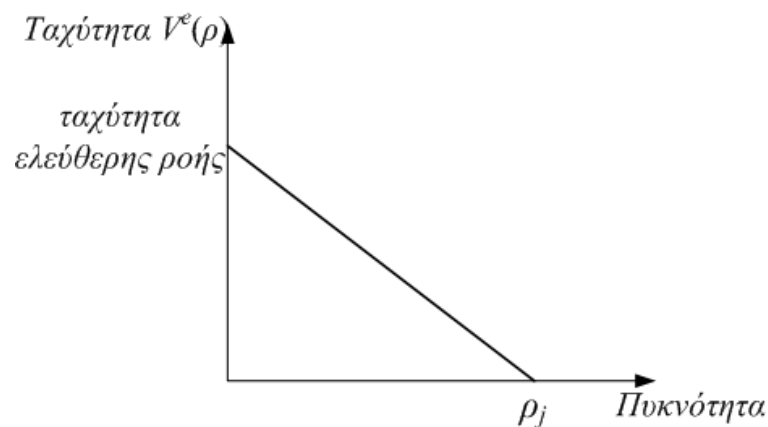
$$\rho(x, t) = \frac{q(x, t)}{v(x, t)} \quad (1)$$

- Η ζήτηση (demand) είναι ο αριθμός των οχημάτων που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν μια συγκεκριμένη υποδομή κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.
- Η ικανότητα (capacity) είναι ο μέγιστος αριθμός οχημάτων ανά ώρα που αναμένεται ότι μπορεί να διασχίσει ένα ομοιόμορφο τμήμα ενός αυτοκινητοδρόμου.
- Το σημείο συμφόρησης (bottleneck) είναι οποιοδήποτε σημείο ενός αυτοκινητοδρόμου, στο οποίο η ζήτηση ξεπερνάει την ικανότητα. Τα σημεία συμφόρησης σε έναν αυτοκινητόδρομο μερικές φορές εμφανίζονται κοντά σε

ράμπες εισόδου με υψηλή ζήτηση, όπου υπάρχει τοπικά αύξηση της ζήτησης σε συνδυασμό με μείωση της ικανότητας λόγω της αλλαγής λωρίδας των οχημάτων.

### 3.2 Θεμελιώδες Διάγραμμα

Μία από τις πρώτες, αν όχι η πρώτη, προσπάθεια να συσχετιστούν η ελεύθερη ταχύτητα, η πυκνότητα και η ροή έγινε από τον Greenshields [7]. Ο ίδιος χρησιμοποίησε έναν περιορισμένο αριθμό εικόνων και φωτογραφιών για να εκτιμήσει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας των οχημάτων και της πυκνότητας σε έναν ευθύ αυτοκινητόδρομο, και βρήκε ότι μπορούν συσχετιστούν ικανοποιητικά με μία ευθεία γραμμή (Σχήμα 3.1).



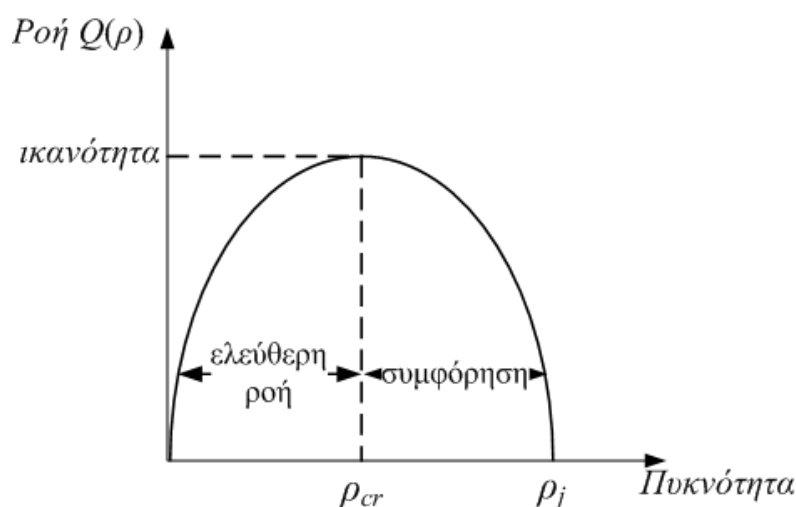
**Σχήμα 3.1: Διάγραμμα Ταχύτητας-Πυκνότητας.**

Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1), πήρε μια παραβολική σχέση μεταξύ πυκνότητας και ροής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

Η συνάρτηση  $v = V^e(\rho)$  ή  $q = Q(\rho)$  είναι γνωστή ως το θεμελιώδες διάγραμμα (fundamental diagram). Πολλοί μεταγενέστεροι ερευνητές πρότειναν εναλλακτικές συναρτήσεις, που προσεγγίζουν καλύτερα τα μετρήσιμα δεδομένα. Τα διαγράμματα αυτά μοιράζονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1.  $Q(\rho) = Q(\rho_j) = 0$ , όπου  $\rho_j$  είναι η μέγιστη πυκνότητα (jam density)
2. Η  $Q(\rho)$  είναι κοίλη (Σχήμα 3.2).

3. Τη στιγμή που επιτυγχάνεται η μέγιστη ροή, ορίζεται η  $\rho_{cr}$ , δηλαδή η κρίσιμη πυκνότητα (critical density). Έτσι,  $Q'(\rho) \geq 0$  για  $\rho < \rho_{cr}$  και  $Q'(\rho) \leq 0$  για  $\rho > \rho_{cr}$ .



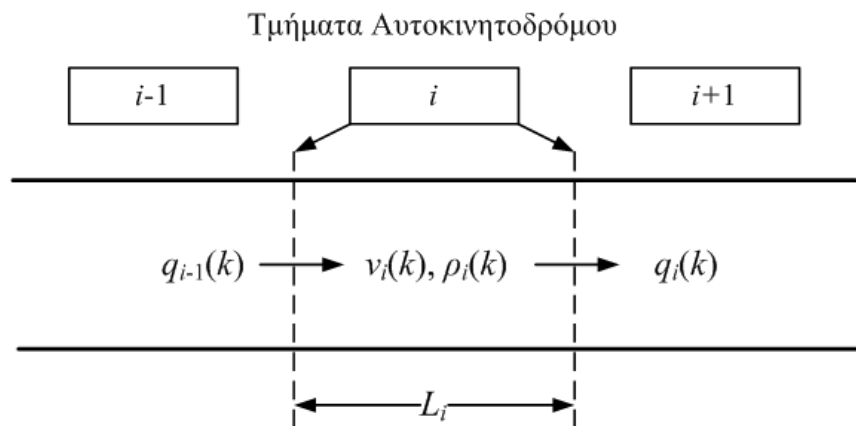
**Σχήμα 3.2: Θεμελιώδες Διάγραμμα Κυκλοφοριακής Ροής.**

Η κρίσιμη πυκνότητα  $\rho_{cr}$  χωρίζει το θεμελιώδες γράφημα σε δύο περιοχές: την περιοχή της ελεύθερης ροής ( $\rho < \rho_{cr}$ ) και την περιοχή της συμφόρησης ( $\rho > \rho_{cr}$ ). Οι μετρήσεις στη μεριά της ελεύθερης ροής συνήθως αναπαριστώνται καλά με μία ευθεία γραμμή, σε αντίθεση με τις μετρήσεις στην μεριά συμφόρησης, που τείνουν να είναι πιο διάσπαρτες. Όπως έχει διαπιστωθεί από κάποιους ερευνητές, υπάρχει μία διαφορά στη μέγιστη μετρήσιμη ροή  $Q(\rho_{cr})$ , που εξαρτάται από το αν ο αυτοκινητόδρομος είναι σε κατάσταση ελεύθερης ροής ή σε συμφόρηση, κάτι που υποδηλώνει μια ασυνέχεια στο  $\rho = \rho_{cr}$ . Αυτό περιγράφεται σαν πτώση της ικανότητας (capacity drop), της τάξης του 5-25 % της μέγιστης ροής, καθώς ο αυτοκινητόδρομος μεταφέρεται σε συμφόρηση. Στόχος επομένως των περισσότερων στρατηγικών ελέγχου είναι να αποτρέψουν τη δημιουργία συμφόρησης έτσι ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί η ικανότητα του αυτοκινητοδρόμου στο πλήρες.

### 3.3 METANET

Το METANET [8] είναι ένας μακροσκοπικός προσομοιωτής κυκλοφοριακής ροής ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για την αναπαράσταση δικτύων αυτοκινητοδρόμων. Στο METANET ο αυτοκινητόδρομος διακριτοποιείται σε ομοιογενή τμήματα, μήκους  $L_i$

και αριθμού λωρίδων  $\lambda_i$  και ο χρόνος σε ομοιόμορφα διαστήματα διάρκειας  $T$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



**Σχήμα 3.3: Διακριτοποίηση του αυτοκινητοδρόμου.**

Το μοντέλο κυκλοφοριακής ροής, που περιλαμβάνει ο προσομοιωτής, υπολογίζει σε κάθε τμήμα του κυρίως αυτοκινητοδρόμου και σε κάθε χρονική περίοδο την πυκνότητα, τη ροή και την ταχύτητα βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k)] \quad (7)$$

$$q_i(k) = v_i(k) \rho_i(k) \lambda_i \quad (8)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{L_i} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] + \frac{T}{\tau} [V^e(\rho_i(k)) - v_i(k)] - \frac{\nu T [\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)]}{\tau L_i [\rho_i(k) + \kappa]} \quad (9)$$

$$V^e(\rho_i(k)) = v_{f,i} \exp \left[ -\frac{1}{a_i} \left( \frac{\rho_i(k)}{\rho_{cr,i}} \right)^{a_i} \right] \quad (10)$$

όπου  $v_{f,i}$  είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής,  $\rho_{cr,i}$  η κρίσιμη πυκνότητα και  $a_i$  είναι μία επιπλέον παράμετρος του τμήματος  $i$ . Επίσης,  $\tau$  (χρόνος χαλάρωσης),  $\nu$  (σταθερά

πρόβλεψης) και  $\kappa$  είναι επιπλέον παράμετροι του μοντέλου. Επίσης, η μέση ταχύτητα που υπολογίζει το μοντέλο δεν πρέπει να είναι μικρότερη από ένα κάτω όριο  $v_{min}$ . Όπως πρότειναν στο [9], τα φαινόμενα που δημιουργούνται κατά τη συγχώνευση των ροών, για παράδειγμα σε περιοχές ραμπών εισόδου αυτοκινητοδρόμου, λαμβάνονται υπόψη προσθέτοντας στην εξίσωση (9) τον όρο,

$$-\left(\frac{\delta T}{L_i \lambda_i}\right) \frac{q_\mu(k) v_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa} \quad (11)$$

όπου  $\delta$  είναι μία σταθερή παράμετρος και  $q_\mu(k)$  είναι η ροή που εισέρχεται από τη ράμπα εισόδου. Ο όρος αυτός προστίθεται στην εξίσωση της ταχύτητας στα αντίστοιχα τμήματα του αυτοκινητοδρόμου στα οποία εισέρχονται ράμπες εισόδου. Αντίστοιχα, προκειμένου να περιγραφούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα φαινόμενα που δημιουργούνται λόγω της μείωσης του αριθμού λωρίδων στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου, ο όρος

$$-\left(\frac{\varphi T}{L_i \lambda_i}\right) \frac{\Delta \lambda \rho_i(k)}{\rho_{cr,i}(k)} v_i(k)^2 \quad (12)$$

προτίθεται στην εξίσωση (9), όπου  $\varphi$  είναι μία σταθερή παράμετρος και  $\Delta \lambda$  είναι ο αριθμός των λωρίδων που μειώνονται. Ο όρος αυτός προστίθεται στην εξίσωση της ταχύτητας στα αντίστοιχα τμήματα του αυτοκινητοδρόμου πριν τη μείωση των λωρίδων.

Σημειώνεται εδώ ότι για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας προκειμένου να μοντελοποιηθεί η ύπαρξη ενός φωτεινού σηματοδότη στην έξοδο μίας ράμπας εξόδου, εκτός από συνδέσμους αυτοκινητοδρόμου, χρησιμοποιείται και ένας σύνδεσμος αποθήκευσης και προώθησης (store-and-forward). Οι σύνδεσμοι store-and-forward περιγράφονται από ένα σταθερό χρόνο διαδρομής και επίσης από τη ροή εξόδου η οποία μπορεί να είναι περιορισμένη π.χ. λόγω ενός φωτεινού σηματοδότη τοποθετημένου στην έξοδο του συνδέσμου. Περισσότερες πληροφορίες για τις εξισώσεις που εφαρμόζονται στους store-and-forward συνδέσμους περιλαμβάνονται στο [10]



Όπως έγινε φανερό, το παραπάνω μοντέλο, όπως και όλα τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής, περιλαμβάνει έναν αριθμό σταθερών παραμέτρων των οποίων οι τιμές δεν είναι ίδιες για όλους τους αυτοκινητοδρόμους, αλλά εξαρτώνται από παράγοντες όπως η τοπολογία του δικτύου, η συμπεριφορά των οδηγών στο εκάστοτε δίκτυο, οι καιρικές συνθήκες κ.α. Μάλιστα, η αξιοπιστία και η ακρίβεια των μοντέλων βασίζεται στην κατάλληλη ρύθμιση των τιμών των σταθερών παραμέτρων τους. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαίος ο κατάλληλος προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων πριν από την χρήση των μοντέλων σε πραγματικές εφαρμογές.

## 4 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ

Τα συστήματα καθοδήγησης πορείας σκοπό έχουν να παρέχουν στους οδηγούς πληροφορίες σχετικά με τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσουν, για παράδειγμα στην περίπτωση μη επαναλαμβανόμενων γεγονότων όπως περιστατικά, ή στην περίπτωση επαναλαμβανόμενης, αλλά όχι πλήρως προβλεπόμενης, συμφόρησης. Για παράδειγμα, το σύστημα μπορεί να οδηγεί σε πραγματικό χρόνο τους οδηγούς μέσω εναλλακτικών διαδρομών, κατά τη διάρκεια εργασιών συντήρησης όπως προτείνεται στο [11], ή σε περίπτωση διαφόρων περιστατικών όπως προτείνεται στο [12]. Η εργασία αυτή διερευνά την εφαρμογή ενός συστήματος καθοδήγησης που έχει ως στόχο την αντιμετώπιση της συμφόρησης που δημιουργείται στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου λόγω μιας υπερχειλισμένης ράμπας εξόδου αυτοκινητοδρόμου. Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά θα γίνει περιγραφή του προβλήματος που εξετάζεται και στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι πολιτικές δυναμικής καθοδήγησης πορείας (dynamic route guidance policies) που θα χρησιμοποιηθούν στις διερευνήσεις που ακολουθούν.

### 4.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Στην παρούσα εργασία, θεωρείται μια έκταση αυτοκινητόδρομου και ένα σημείο διασταύρωσης (για παράδειγμα ο κόμβος N1, στο Σχήμα 5.1) με δύο εναλλακτικές διαδρομές που περιλαμβάνουν διαφορετικές ράμπες εξόδου (L5 και L4) προς τον ίδιο προορισμό (D3 ή D4 στο Σχήμα 5.1). Η μία διαδρομή ( $N1 \rightarrow L2 \rightarrow L5 \rightarrow D3/D4$ , Σχήμα 5.1) θεωρείται κύρια καθώς είναι η κοντινότερη σε απόσταση ενώ η άλλη διαδρομή ( $N1 \rightarrow L4 \rightarrow L6 \rightarrow D3/D4$ , Σχήμα 5.1) θεωρείται δευτερεύουσα.

Θεωρώντας ότι η ράμπα εξόδου της κύριας διαδρομής έχει περιορισμένη χωρητικότητα, η οποία δεν είναι δυνατόν να αυξηθεί, είναι πιθανή η δημιουργία επαναλαμβανόμενης συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα, κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής, λόγω της υπερχειλίσης της ουράς της ράμπας εξόδου. Αυτό που προτείνεται σ' αυτή την εργασία είναι η εκτροπή μιας μερίδας οχημάτων, μέσω της δευτερεύουσας διαδρομής, όταν και στον βαθμό που απαιτείται, ώστε να αποφευχθεί ο κορεσμός της ράμπας εξόδου, της

κύριας διαδρομής, και επομένως η συμφόρηση στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου.

Ωστόσο, καθώς οι οδηγοί είναι ελεύθεροι να αγνοήσουν τα μηνύματα που λαμβάνουν αν αυτά δεν είναι συμβατά με τα δικά τους κριτήρια, ο αντικειμενικός σκοπός του συστήματος καθοδήγησης πορείας δεν μπορεί απλά να είναι οι βέλτιστες συνθήκες του οδικού δικτύου στο οποίο εφαρμόζεται, αλλά πρέπει κυρίως να εστιάζει στις βέλτιστες συνθήκες των χρηστών του δικτύου, για παράδειγμα, να προτείνει στους οδηγούς μια εναλλακτική διαδρομή μόνο αν αυτή είναι χρονικά ισοδύναμη ή μικρότερη σε σχέση με την κύρια διαδρομή.

Επομένως, δύο περιπτώσεις μπορεί να συμβούν, βάσει της τοπολογίας του δικτύου και των κυκλοφοριακών συνθηκών που επικρατούν. Στην πρώτη περίπτωση, η οποία εξετάζεται στην παρούσα διατριβή, οι βέλτιστες συνθήκες για τους οδηγούς επιτυγχάνονται χωρίς την υπερχειλίση της ουράς της ράμπας στον κυρίως αυτοκινητόδρομο, και επομένως το σύστημα καθοδήγησης μπορεί να προτείνει την εναλλακτική διαδρομή χωρίς να αδικεί του χρήστες που υπακούουν [13]. Στη δεύτερη περίπτωση, η οποία εξετάστηκε στο [14], οι βέλτιστες συνθήκες για τους οδηγούς επιτυγχάνονται μόνο αφότου η ουρά της ράμπας εισχωρήσει στο κυρίως ρεύμα, οδηγώντας σε συμφόρηση και υποβάθμιση της ικανότητας του αυτοκινητοδρόμου. Το σύστημα καθοδήγησης στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να λάβει υπόψη του την αναμενόμενη υπακοή των οδηγών στις αποφάσεις του συστήματος και ίσως θα πρέπει να εφαρμόσει πιο υποχρεωτικά μέτρα, για παράδειγμα προσωρινό κλείσιμο της υπερφορτωμένης ράμπας εξόδου.

Όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση που εξετάζεται στην εργασία αυτή, η δευτερεύουσα διαδρομή γίνεται χρονικά μικρότερη, κατά τις ώρες αιχμής, πριν η ουρά εισχωρήσει στον αυτοκινητόδρομο. Ωστόσο, λόγω της στοχαστικότητας της κυκλοφοριακής ζήτησης και των συνθηκών κυκλοφορίας, το φαινόμενο της υπερχειλίσης σε μία συγκεκριμένη ράμπα εξόδου ίσως είναι δύσκολο να προβλεφτεί από τους οδηγούς. Για παράδειγμα, μπορεί να συμβαίνει κάθε ημέρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και ίσως να μη συμβαίνει καθόλου κάποιες ημέρες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι οδηγοί δεν μπορούν να πάρουν τις καλύτερες αποφάσεις για τη διαδρομή που θα πρέπει ακολουθήσουν βασιζόμενοι μόνο στη εμπειρία τους από το παρελθόν,

αλλά χρειάζονται πληροφορίες πραγματικού χρόνου, για παράδειγμα από το σύστημα καθοδήγησης πορείας.

Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις, η εργασία αυτή προτείνει δύο εναλλακτικές πολιτικές τις οποίες ένα σύστημα καθοδήγησης πορείας μπορεί να χρησιμοποιήσει προκειμένου να καθοδηγήσει τα οχήματα μέσω εναλλακτικών, ανταγωνιστικών διαδρομών. Η πρώτη πολιτική βασίζεται τις αποφάσεις της σε εκτιμήσεις, πραγματικού χρόνου, του στιγμιαίου χρόνου διαδρομής (instantaneous travel time) και για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές. Η δεύτερη πολιτική χρησιμοποιεί το εκτιμώμενο μήκος της ουράς της ράμπας της κύριας διαδρομής ως αντικείμενο απόφασης, πραγματικού χρόνου, για την καθοδήγηση των οδηγών. Οι δύο προτεινόμενες στρατηγικές ελέγχου, ουσιαστικά, αποφασίζουν για το ποσοστό των οχημάτων που πρέπει να καθοδηγηθούν μέσω της εναλλακτικής διαδρομής, και μπορούν να ενημερώσουν τους οδηγούς είτε μέσω των VMS (οθόνες μετάδοσης μηνυμάτων – Variable Message Signs), είτε μέσω συστημάτων επικοινωνίας Οχήματος-Υποδομής. Οι δύο πολιτικές καθώς και τα κριτήρια απόδοσης που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πολιτική περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

#### ***4.2 Καθοδήγηση Πορείας με Βάση τον Στιγμιαίο Χρόνο Διαδρομής***

Η καθοδήγηση πορείας που βασίζεται στον στιγμιαίο χρόνο διαδρομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι διαθέσιμες ακριβείς εκτιμήσεις του στιγμιαίου χρόνου διαδρομής κατά μήκος των εναλλακτικών διαδρομών. Αυτό με τη σειρά του, προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς αριθμού ανιχνευτών (φωρατών). Ο στιγμιαίος χρόνος διαδρομής  $\tau(k)$ , σε ένα χρονικό διάστημα  $k$ , είναι, ουσιαστικά, ο χρόνος που χρειάζεται ένα όχημα για να διασχίζει μία διαδρομή, αν οι μέσες ταχύτητες, κατά μήκος αυτής της διαδρομής, παγώσουν στις τιμές που έχουν τη χρονική στιγμή  $kT$ .

Για την παρούσα εφαρμογή, το ποσοστό διαχωρισμού  $\beta$ , δηλαδή το ποσοστό των οδηγών που θα πρέπει να ακολουθήσει την κύρια διαδρομή, μπορεί να υπολογιστεί μέσω διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου κλειστού βρόχου. Αυτή η, πραγματικού χρόνου, απόφαση λαμβάνεται κάθε χρονική περίοδο (ή διάστημα ελέγχου)  $T_c$  (τυπικά ίσο με 1-6 min) και το  $\beta(k)$  δηλώνει το ποσοστό διαχωρισμού που εφαρμόζεται τη χρονική περίοδο  $[kT_c, (k+1)T_c]$ . Οι στρατηγικές κλειστού βρόχου, ουσιαστικά,

προσπαθούν να κρατήσουν τη διαφορά των χρόνων διαδρομής για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές  $\Delta\tau(k)$  κοντά στο μηδέν, όπου  $\Delta\tau(k) = \tau_s(k) - \tau_p(k)$  με  $\tau_s(k)$  να είναι ο στιγμιαίος χρόνος διαδρομής για την δευτερεύουσα διαδρομή και  $\tau_p(k)$  να είναι ο στιγμιαίος χρόνος διαδρομής για την κύρια διαδρομή. Καθώς σ' αυτή την εργασία εξετάζονται μόνο δύο εναλλακτικές διαδρομές, το ποσοστό των οχημάτων που θα πρέπει να ακολουθήσουν την δευτερεύουσα διαδρομή είναι απλά  $1 - \beta$ .

Στην πράξη, υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την υλοποίηση των επιθυμητών ποσοστών διαχωρισμού  $\beta(k)$ . Ένας τρόπος θα ήταν απλά η απεικόνιση και των δύο εκτιμώμενων χρόνων διαδρομής σε κάποια οθόνη VMS, ακριβώς ανάντη από το σημείο διασταύρωσης, θεωρώντας ότι οι οδηγοί θα λάβουν την σωστή απόφαση βάσει της πληροφορίας που τους δίνεται, με αποτέλεσμα την εξισορρόπηση των χρόνων διαδρομής για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές, χωρίς κάποια επιπρόσθετη ενέργεια. Προτέρημα της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι δεν απαιτείται η εφαρμογή κάποιας στρατηγικής ελέγχου. Ένας δεύτερος πιθανός τρόπος εφαρμογής, είναι τα ποσοστά διαχωρισμού  $\beta(k)$  να παίρνουν μόνο τις τιμές 0 και 1 (όπως με χρήση του ελεγκτή Bang-Bang που θα δούμε παρακάτω). Και πάλι τότε, μια οθόνη VMS μπορεί να προτείνει ρητώς την αντίστοιχη κατεύθυνση στους οδηγούς. Μπορεί επίσης, τα ποσοστά διαχωρισμού  $\beta(k)$  να παίρνουν οποιαδήποτε τιμή μέσα στο διάστημα  $[0,1]$  (όπως με χρήση του ελεγκτή PI). Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να εφαρμοστεί μία παλμικής μορφής τεχνική η οποία θα προτείνει μέσω των VMS την κύρια διαδρομή για μία χρονική διάρκεια ίση με  $\beta(k)T_c$  της αντίστοιχης περιόδου, και την εναλλακτική διαδρομή για την υπόλοιπη χρονική περίοδο  $[1 - \beta(k)]T_c$ . Τέλος, εάν είναι διαθέσιμο ένα σύστημα επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων και της υποδομής, είναι εφικτός ο διαχωρισμός των οχημάτων, κατά βούληση, μέσω αντίστοιχων ατομικών μηνυμάτων. Οι στρατηγικές ελέγχου κλειστού βρόχου που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία είναι ο ελεγκτής Bang-Bang και ο PI ελεγκτής.

- Στην περίπτωση λειτουργίας ενός ελεγκτή Bang-Bang, το ποσοστό διαχωρισμού σε κάθε χρονικό διάστημα  $k$  υπολογίζεται ως:

$$\beta(k) = \begin{cases} 1 & \text{αν } \Delta\tau(k) \geq 0 \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (13)$$

Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του ελεγκτή είναι η απλότητά του, καθώς δεν περιλαμβάνει παραμέτρους των οποίων οι τιμές πρέπει να προσδιοριστούν κατάλληλα. Εντούτοις, λόγω της φύσης του, μπορεί να δημιουργήσει ταλαντώσεις στις τιμές της διαφοράς των χρόνων διαδρομής  $\Delta\tau(k)$ .

- Στην περίπτωση εφαρμογής ενός PI-ελεγκτή, σε κάθε διάστημα ελέγχου  $k$ , τα ποσοστά διαχωρισμού υπολογίζονται ως:

$$\beta(k) = \beta(k-1) + K_p[\Delta\tau(k) - \Delta\tau(k-1)] + K_i\Delta\tau(k) \quad (14)$$

Σημειώνεται ότι, οι τιμές των  $\beta$  που υπολογίζονται περιορίζονται στο διάστημα  $[0,1]$ . Η PI στρατηγική περιλαμβάνει δύο παραμέτρους,  $K_p$  και  $K_i$ , των οποίων οι τιμές πρέπει να προσδιοριστούν κατάλληλα. Τέλος, η στρατηγική αυτή οδηγεί σε ομαλότερες τροχιές για τους ρυθμούς διαχωρισμού  $\beta$  και τις διαφορές στους χρόνους διαδρομής  $\Delta\tau$  συγκριτικά με την στρατηγική Bang-Bang.

#### 4.3 Καθοδήγηση Πορείας με Βάση το Εκτιμώμενο Μήκος Ουράς

Η πολιτική καθοδήγησης πορείας που εξετάζεται σ' αυτή την ενότητα, βασίζεται στην, πραγματικού χρόνου, εκτίμηση του μήκους της ουράς στη ράμπα εξόδου της κύριας διαδρομής. Σε αντίθεση με την προηγούμενη πολιτική καθοδήγησης πορείας, η πολιτική αυτή είναι πιο εύκολο να εφαρμοστεί στην πράξη καθώς απαιτεί λιγότερες μετρήσεις και επομένως φωρατές. Επίσης, και σ' αυτή τη περίπτωση, το ποσοστό διαχωρισμού  $\beta$  για την κύρια διαδρομή, μπορεί να υπολογιστεί μέσω διαφόρων στρατηγικών κλειστού βρόχου, οι οποίες προσπαθούν να διατηρήσουν το εκτιμώμενο μήκος ουράς της ράμπας εξόδου της κύριας διαδρομής, σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Όπως και στην προηγούμενη πολιτική, το ποσοστό διαχωρισμού για τη δευτερεύουσα διαδρομή, υπολογίζεται απλά ως  $1 - \beta$ . Οι στρατηγικές ελέγχου που θα εφαρμοστούν και σε αυτή την πολιτική είναι οι Bang-Bang και PI στρατηγικές.

- Στην περίπτωση εφαρμογής της στρατηγικής Bang-Bang, τότε σε κάθε περίοδο ελέγχου  $k$ , το ποσοστό διαχωρισμού  $\beta$ , για την κύρια διαδρομή υπολογίζεται ως:

$$\beta(k) = \begin{cases} 1 & \text{αν } w(k) < \hat{w} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (15)$$

όπου  $w$  είναι η εκτίμηση του μήκους της ουράς και  $\hat{w}$  είναι η επιθυμητή τιμή της ουράς στην κύρια ράμπα εξόδου. Εκτός από την απλότητά της (δεν εμπεριέχει παραμέτρους) η ενδεχόμενη εφαρμογή της στρατηγικής στο πεδίο, απαιτεί μόνο έναν φωρατή, κατάλληλα τοποθετημένο στη ράμπα εξόδου του ενδιαφέροντός μας, ώστε να αντανακλά την τιμή της επιθυμητής ουράς  $\hat{w}$ . Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, η λειτουργία της στρατηγικής αυτής μπορεί να δημιουργήσει ταλαντώσεις στις τροχιές των ποσοστών διαχωρισμού  $\beta$  και στο μήκος της ουράς της ράμπας εξόδου  $w$ .

- Στην περίπτωση εφαρμογής της στρατηγικής PI, το ποσοστό διαχωρισμού  $\beta$  κατά μήκος της κύριας διαδρομής υπολογίζεται σε κάθε διάστημα ελέγχου  $k$ , σύμφωνα με τη ακόλουθη εξίσωση:

$$\beta(k) = \beta(k-1) + K_p[w(k-1) - w(k)] + K_i[\hat{w} - w(k)]. \quad (16)$$

Και εδώ, το ποσοστό διαχωρισμού  $\beta$  που υπολογίζεται, περικόπτεται αν η τιμή του είναι εκτός του διαστήματος  $[0,1]$ . Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η PI στρατηγική περιλαμβάνει δύο παραμέτρους  $K_p$  και  $K_i$  οι οποίες πρέπει να προσδιοριστούν και επίσης απαιτεί μία πιο ακριβή εκτίμηση του μήκους της ουράς της ράμπας εξόδου, σε πραγματικό χρόνο, η οποία μπορεί να ληφθεί με κατάλληλη τοποθέτηση τριών φωρατών σύμφωνα με το [15]. Τέλος, η στρατηγική αυτή, οδηγεί σε ομαλότερες τροχιές για τα υπολογισμένα ποσοστά διαχωρισμού  $\beta$  συγκριτικά με τη στρατηγική Bang-Bang.

#### 4.4 Επίπεδο Υπακοής των Οδηγών

Τα παραπάνω προτεινόμενα μέτρα καθοδήγησης πορείας δεν συνιστούν υποχρεωτική ενέργεια για τους οδηγούς. Αντίθετα, οι οδηγοί είναι ελεύθεροι να αποφασίσουν για το ποια διαδρομή θα ακολουθήσουν ακόμα και στην περίπτωση που είναι απόλυτα σαφές,

ότι η εναλλακτική διαδρομή που τους προτείνεται είναι κατά πολύ χρονικά μικρότερη. Έτσι, κάποιοι οδηγοί ίσως να μην υπακούσουν στο σύστημα καθοδήγησης και να επιμείνουν στην απόφασή τους να ακολουθήσουν την κύρια διαδρομή. Για τον λόγο αυτό, κατά τη διερεύνηση εφαρμογής των διαφόρων πολιτικών καθοδήγησης πορείας που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, λαμβάνεται υπόψη το επίπεδο υπακοής των οδηγών εισάγοντας την παράμετρο  $\varepsilon$  (Compliance Rate – CR) που αντιστοιχεί στο ποσοστό των οδηγών που υπακούουν στις αποφάσεις του συστήματος καθοδήγησης και λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[0, 1]$ , όπου η τιμή 1 αντιστοιχεί σε πλήρη συμμόρφωση των οδηγών ενώ η τιμή 0 υποδηλώνει ότι οι οδηγοί αγνοούν τις αποφάσεις του συστήματος καθοδήγησης. Το ποσοστό διαχωρισμού  $\beta'(k)$  που θα υλοποιηθεί τελικά στο κόμβο N1 (βλέπε Σχήμα 5.1), ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου  $\varepsilon$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta'(k) = \beta^N + \varepsilon(\beta(k) - \beta^N). \quad (17)$$

όπου  $\beta(k)$  είναι το ποσοστό διαχωρισμού προς την κύρια διαδρομή που υπολόγισε η στρατηγική ελέγχου και  $\beta^N$  είναι το ποσοστό διαχωρισμού που ανακλά το ποσοστό των οδηγών που θα διάλεγαν την κύρια διαδρομή αν δεν εφαρμοζόταν κανένας έλεγχος. Για παράδειγμα, στη περίπτωση που εξετάζεται εδώ το  $\beta^N$  ισούται με 1, δηλαδή όλα τα οχήματα που βρίσκονται στον κόμβο N1 και επιθυμούν να κατευθυνθούν στους προορισμούς D3/D4, επιλέγουν την κύρια διαδρομή.

#### 4.5 Δείκτες Απόδοσης

Τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση και αξιολόγηση των διαφόρων πολιτικών καθοδήγησης είναι το κριτήριο Συνολικού Χρόνου Παραμονής στο δίκτυο (Total Time Spent) που στο εξής θα αναφέρεται ως ΣΧΠ και το κριτήριο Συνολικής Απώλειας Χρόνου (Total Disbenefit) που στο εξής θα αναφέρεται ως ΣΑΧ.

- ΣΧΠ (σε veh·h): το κριτήριο αυτό υπολογίζεται ως το άθροισμα του συνολικού χρόνου διαδρομής στους συνδέσμους του δικτύου και του συνολικού χρόνου



παραμονής σε ουρές στις εισόδους του δικτύου και στους store-and-forward συνδέσμους από τον τύπο:

$$\Sigma X\Pi = \tau_{G,N} + \tau_{G,saf} + \tau_{W,saf} + \tau_{W,o} \quad (18)$$

όπου  $\tau_{G,N} = T \sum_k \sum_m L_m \lambda_m \sum_i \rho_{m,i}(k)$  αντιστοιχεί στο συνολικό χρόνο διαδρομής των οχημάτων στους συνδέσμους του δικτύου και  $\tau_{G,saf} = T \sum_k \sum_{saf} n_{d,saf}$  είναι ο συνολικός χρόνος διαδρομής των οχημάτων στους store-and-forward (saf) συνδέσμους όπου το  $n_{d,saf}$  αναπαριστά τον αριθμό των οχημάτων που έχουν εισέλθει σε κάποιο store-and-forward σύνδεσμο αλλά δεν έχουν φτάσει ακόμα στην ουρά που ίσως έχει δημιουργηθεί. Αυτοί οι δύο πρώτοι όροι, ουσιαστικά αναπαριστούν τον συνολικό χρόνο διαδρομής όλων των οχημάτων στο δίκτυο, που όμως δεν βρίσκονται σε ουρά για όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Επίσης, ο όρος  $\tau_{W,o} = T \sum_k \sum_o w_o(k)$  με  $o = 1, 2, \dots, O$  (όπου  $O$  είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων εισόδου του δικτύου) υπολογίζει το συνολικό χρόνο αναμονής των οχημάτων σε ουρές που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί στις εισόδους του δικτύου και τέλος ο όρος  $\tau_{W,saf} = T \sum_k \sum_{saf} w_{saf}(k)$  με  $saf = 1, 2, \dots, SAF$ , (όπου  $SAF$  είναι ο συνολικός αριθμός των store-and-forward συνδέσμων) μετράει το συνολικό χρόνο αναμονής των οχημάτων σε ουρές που πιθανόν έχουν δημιουργηθεί σε store-and-forward συνδέσμους. Οι δύο τελευταίοι ουσιαστικά υπολογίζουν το συνολικό χρόνο αναμονής των οχημάτων σε ουρές στο δίκτυο καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

- $\Sigma AX$  (σε veh·h): το κριτήριο αυτό, ουσιαστικά αντανακλά τις οχηματοώρες που σπαταλήθηκαν σε χρονικά μακρύτερες διαδρομές και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Sigma AX = \sum_{(n,j) \in B} \sum_{k=0}^K \sum_{m \in (R_n \cap \sigma)} [q_{n,j}(k) \beta_{n,j}^m(k) (\tau_{n,j}^{P,m}(k) - \tau_{n,j}^{P,\sigma}(k))] \cdot T \quad (19)$$

όπου  $B$  είναι το σύνολο όλων των ζευγαριών κόμβων προέλευσης-προορισμού  $(n, j)$ ,  $K$  είναι ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης,  $\sigma$  είναι ο δείκτης του συνδέσμου που εξέρχεται από τον κόμβο  $n$  μέσω του οποίου ο χρόνος διαδρομής είναι ελάχιστος προς τον προορισμό  $j$  και  $R_n$  είναι το σύνολο των συνδέσμων που εξέρχονται από τον κόμβο  $n$  μέσω των οποίων μπορεί να προσεγγιστεί ο κόμβος προορισμού  $j$  ( $R_n \cap \sigma$  είναι το ίδιο σύνολο χωρίς το σύνδεσμο  $\sigma$ ). Ουσιαστικά το ΣΑΧ υπολογίζεται ως το γινόμενο του αριθμού των οχημάτων σε κάθε κόμβο  $n$ , που κατευθύνονται προς χρονικά-μεγαλύτερες διαδρομές, επί τη διαφορά του πραγματικού χρόνου διαδρομής  $\tau_{n,j}^{P,m}$  μείον τον συντομότερο χρόνο διαδρομής για όλα τα ζεύγη  $(n, j)$ , για όλους τις εναλλακτικές διαδρομές από κάθε κόμβο  $n$  και για όλο το χρονικό ορίζοντα. Σημειώνεται ότι, στην περίπτωση που επιτυγχάνεται εξισορρόπηση του χρόνου διαδρομής μέσω των εναλλακτικών διαδρομών καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης τότε το κριτήριο ΣΑΧ είναι μηδέν.

## 5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

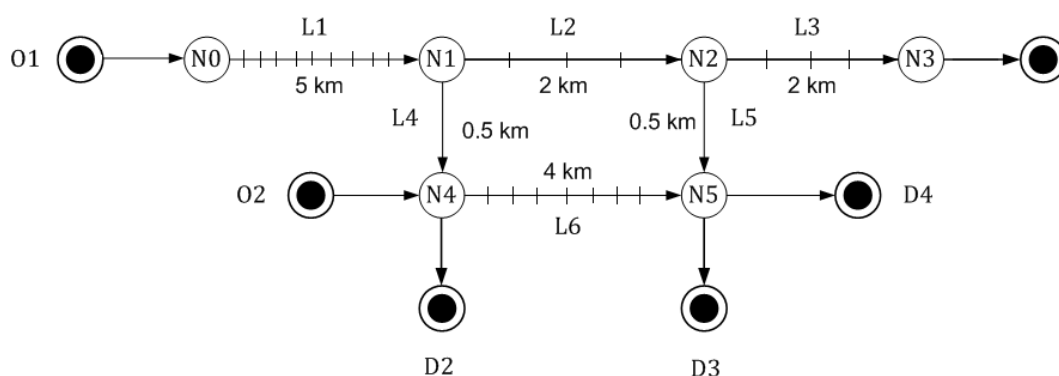
Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την περιγραφή του υποθετικού δικτύου αυτοκινητοδρόμου στο οποίο θα εφαρμοστούν οι δύο πολιτικές καθοδήγησης πορείας που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4. Επίσης, παρουσιάζονται οι κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, συγκεκριμένα, η ζήτηση στις εισόδους του δικτύου και τα ποσοστά ροής από κάθε είσοδο του δικτύου προς κάθε έξοδο (προορισμό). Τέλος, στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου, ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο του METANET, οι τιμές των παραμέτρων των στρατηγικών ελέγχου και οι τιμές των ποσοστών υπακοής που λήφθηκαν υπόψη κατά τις διερευνήσεις εφαρμογής των πολιτικών καθοδήγησης πορείας.

### 5.1 Υποθετικό Δίκτυο

Το Σχήμα 5.1, παρουσιάζει το υποθετικό δίκτυο αυτοκινητοδρόμου το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή. Το δίκτυο μοντελοποιήθηκε κάνοντας χρήση του επικυρωμένου μακροσκοπικού προσομοιωτή κυκλοφοριακής ροής, METANET [9], ο οποίος για την αναπαράσταση ενός αυτοκινητόδρομου χρησιμοποιεί κόμβους και συνδέσμους. Κάθε κόμβος αναπαριστά μία διασταύρωση ή οποιαδήποτε άλλη αλλαγή στη γεωμετρία του δικτύου και κάθε σύνδεσμος είναι το τμήμα του αυτοκινητόδρομου μεταξύ δύο κόμβων. Επιπλέον, στα σύνορα του δικτύου, εισάγονται σύνδεσμοι προέλευσης και προορισμού (origin – destination) μέσω των οποίων η κυκλοφοριακή ροή εισέρχεται ή εξέρχεται, αντίστοιχα, στο προς προσομοίωση δίκτυο.

Το, εν λόγω, υποθετικό δίκτυο περιλαμβάνει 6 κόμβους (N0-N5) και 6 συνδέσμους (L1-L6) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Πιο συγκεκριμένα, το δίκτυο περιλαμβάνει έναν αυτοκινητόδρομο (L1-L3), 3 λωρίδων και μήκους 9 χιλιομέτρων, δύο ράμπες εξόδου (L4, L5), μίας λωρίδας και μήκους 0,5 km, και έναν παράπλευρο δρόμο (L6) μίας λωρίδας και μήκους 4 km. Σημειώνεται ότι, προκειμένου να αναπαρασταθεί η περιορισμένη ροή εξόδου από τη ράμπα εξόδου L5, ο σύνδεσμος αυτός μοντελοποιείται ως store-and-forward σύνδεσμος, ενώ οι υπόλοιποι σύνδεσμοι αντιστοιχούν σε κανονικούς

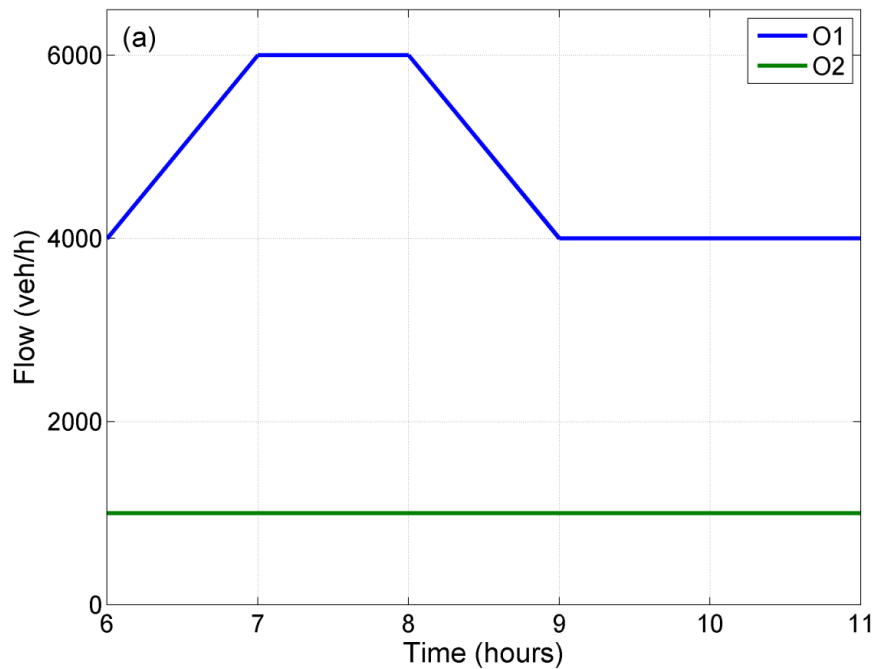
συνδέσμους αυτοκινητοδρόμου. Κάθε ένας από τους συνδέσμους L1, L2, L3, L6, λόγω του μεγάλου τους μήκους, διαιρείται σε επιμέρους τμήματα μήκους 0.5km, όπως φαίνεται στο ίδιο Σχήμα, όπου οι κάθετες γραμμές καθορίζουν τα όρια των επιμέρους τμημάτων. Επιπλέον, η ροή των οχημάτων εισέρχεται στο προς προσομοίωση δίκτυο μέσω δύο συνδέσμων προέλευσης O1, O2 και εξέρχεται μέσω τεσσάρων συνδέσμων προορισμού D1-D4, όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα. Παρατηρώντας το δίκτυο, διαπιστώνεται ότι οι οδηγοί που βρίσκονται στον κόμβο N1 και επιθυμούν να προσεγγίσουν τον προορισμό D3 ή D4 έχουν δύο εναλλακτικές επιλογές. Είτε να εξέλθουν από τον αυτοκινητόδρομο μέσω της ράμπας L4 είτε μέσω της ράμπας L5. Καθώς η δεύτερη διαδρομή είναι συντομότερη σε απόσταση θεωρείται ότι όλοι οι οδηγοί που κατευθύνονται προς τους προορισμούς D3/D4 θα εξέλθουν από τη ράμπα L5 εκτός εάν λάβουν διαφορετική πληροφορία από το σύστημα καθοδήγησης.



**Σχήμα 5.1: Υποθετικό Δίκτυο.**

## 5.2 Υποθετικό Σενάριο Κυκλοφορίας

Στο δεδομένο σενάριο κυκλοφορίας, η ζήτηση (σε οχήματα ανά ώρα), από τα δύο σημεία προέλευσης φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Το συνολικό διάστημα της προσομοίωσης είναι 5 ώρες (από τις 6π.μ έως τις 11π.μ) με το διάστημα από τις 7π.μ. έως τις 8π.μ. να αντιστοιχεί στις ώρες αιχμής, με μέγιστη τιμή ζήτησης, στον κυρίως αυτοκινητόδρομο, τα 6000veh/h, ενώ η ζήτηση στον παράπλευρο δρόμο παραμένει σταθερά ίση με 1000veh/h καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επιπλέον, θεωρείται ότι η ροή που μπορεί να εξέλθει από τη ράμπα L5 είναι ίση με 520 veh/h (π.χ. λόγω κάποιου κατάντη

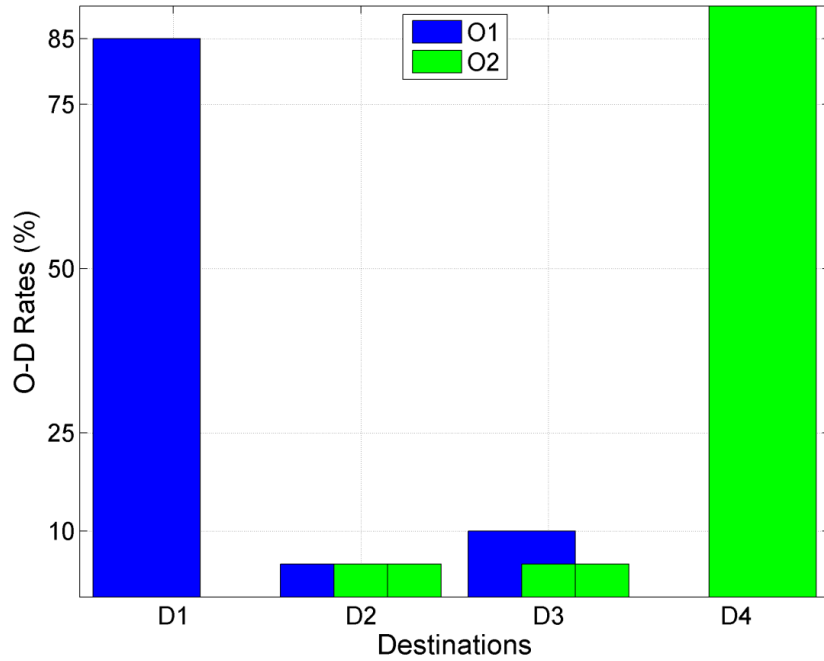


**Σχήμα 5.2: Ζήτηση στους Συνδέσμους Προέλευσης.**

φωτεινού σηματοδότη) για όλον τον χρονικό ορίζοντα της προσομοίωσης. Επίσης, βάσει των χαρακτηριστικών του δικτύου και των κυκλοφοριακών συνθηκών που επικρατούν σε αυτό, παρατηρείται η δημιουργία ουράς στη ράμπα εξόδου L5, κατά τις ώρες αιχμής (7-8 π.μ.), η οποία τελικά υπερχειλίζει προς τον αυτοκινητόδρομο δημιουργώντας συμφόρηση που μεταδίδεται ανάντη για μερικά χιλιόμετρα, χωρίς όμως να φτάνει στην είσοδο O1 του δικτύου. Αυτό το απλό σενάριο κυκλοφορίας ευνοεί τη δοκιμή διαφορετικών πολιτικών καθοδήγησης πορείας, που σκοπό έχουν να οδηγήσουν τους οδηγούς μέσω χρονικά βραχύτερων διαδρομών, κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής, και την ίδια στιγμή να αποτρέψουν τον σχηματισμό συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητόδρομου.

### ***5.3 Σχετικές Ρυθμίσεις για το METANET και των Στρατηγικών Ανάδρασης***

Το μοντέλο του METANET περιλαμβάνει έναν αριθμό παραμέτρων οι οποίες πρέπει να προσδιοριστούν κατάλληλα, μέσω της διαδικασίας της επικύρωσης, έτσι ώστε να αντανακλώνται τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε δικτύου εφαρμογής. Στο [16]



**Σχήμα 5.3: Ποσοστά Ροής από Κάθε Προέλευση σε Κάθε Προορισμό.**

πραγματοποιήθηκε επικύρωση του METANET για ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμου, παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, στο οποίο εμφανίζεται επαναλαμβανόμενη συμφόρηση λόγω της υπερχείλισης μίας ράμπας εξόδου. Οι παράμετροι που προέκυψαν κατά την επικύρωση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, οι τιμές των παραμέτρων του METANET είναι οι εξής:  $\tau = 17 \text{ (sec)}$ ,  $\nu = 23 \text{ (km}^2/\text{h)}$ ,  $\delta = 1.7 \text{ (h/km)}$ ,  $\varphi = 1.9 \text{ (h/km)}$   $\kappa = 10 \text{ veh/km/lane}$  και  $\nu_{min} = 7 \text{ km/h}$ . Επίσης για τους συνδέσμους του κυρίως αυτοκινητοδρόμου (L1-L3) χρησιμοποιήθηκε ένα θεμελιώδες διάγραμμα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά  $\rho_{cr} = 36 \text{ (veh/km/lane)}$ ,  $\nu_f = 116 \text{ (km/h)}$ ,  $Q_{cap} = 2200 \text{ (veh/h)}$ , ενώ για τον παράπλευρο δρόμο L6 χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $\rho_{cr} = 36 \text{ (veh/km/lane)}$ ,  $\nu_f = 90 \text{ (km/h)}$ ,  $Q_{cap} = 1800 \text{ (veh/h)}$ .

Και οι δύο πολιτικές καθοδήγησης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιούν στρατηγικές ελέγχου κλειστού βρόχου και συγκεκριμένα τον Bang-Bang και τον PI ελεγκτή. Οι ελεγκτές εφαρμόζονται για δύο διαφορετικά διαστήματα ελέγχου,  $T_c = 2 \text{ min}$  και  $T_c = 5 \text{ min}$ , έτσι ώστε να παρατηρηθεί η λειτουργία των στρατηγικών για διαφορετική συχνότητα αποφάσεων του συστήματος καθοδήγησης. Τα διαστήματα ελέγχου επιλέχθηκαν έτσι ώστε αφενός μεν να μην είναι πολύ μικρά, για παράδειγμα ένα

όχημα που βρίσκεται στον κόμβο διασταύρωσης N1 να προλάβει να εξέλθει, π.χ. από τη ράμπα εξόδου L5 πριν αλλάξει η απόφαση του συστήματος και αφετέρου να μην είναι πολύ μεγάλα, γεγονός που θα εμποδίζει τη σωστή λειτουργία του ελεγκτή.

Ο ελεγκτής Bang-Bang δεν περιλαμβάνει παραμέτρους σε αντίθεση με τον ελεγκτή PI ο οποίος περιλαμβάνει δύο παραμέτρους, το  $K_p$  και το  $K_i$  οι οποίες πρέπει να προσδιοριστούν κατάλληλα για τη σωστή λειτουργία του ελεγκτή. Ο προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων αυτών πραγματοποιήθηκε μέσω της διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις τιμές των παραμέτρων για τα διαστήματα ελέγχου 2 και 5 λεπτών για κάθε πολιτική καθοδήγησης πορείας.

**Πίνακας 5.1: Τιμές Παραμέτρων**

|       | Καθοδήγηση Πορείας με βάση τον Στιγμιαίο Χρόνο Διαδρομής |                       | Καθοδήγηση Πορείας με βάση το Εκτιμώμενο Μήκος Ουράς |                       |
|-------|----------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|
|       | $T_c = 2 \text{ min}$                                    | $T_c = 5 \text{ min}$ | $T_c = 2 \text{ min}$                                | $T_c = 5 \text{ min}$ |
| $K_p$ | 18                                                       | 15                    | 0.02                                                 | 0.008                 |
| $K_i$ | 6                                                        | 6                     | 0.005                                                | 0.0008                |

Τέλος, καθώς όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, θα διερευνηθεί η επιρροή του ποσοστού υπακοής των οδηγών στη λειτουργία των στρατηγικών ελέγχου, τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εξετάζονται. Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται πλήρης υπακοή των οδηγών ( $CR=1$ ) στο σύστημα καθοδήγησης, στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι το 80% των οδηγών ( $CR=0.8$ ) υπακούουν στο σύστημα καθοδήγησης, ενώ οι υπόλοιποι διατηρούν την αρχική τους απόφαση πορείας και τέλος εξετάζεται και η περίπτωση όπου μόλις το 60% των οδηγών ( $CR=0.6$ ) υπακούουν στις αποφάσεις του συστήματος καθοδήγησης.

Το επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζει τα αποτελέσματα εφαρμογής των δύο πολιτικών καθοδήγησης πορείας στο δίκτυο που περιγράφηκε στο παρόν κεφάλαιο με χρήση των προαναφερόμενων τιμών για τις εμπλεκόμενες παραμέτρους.

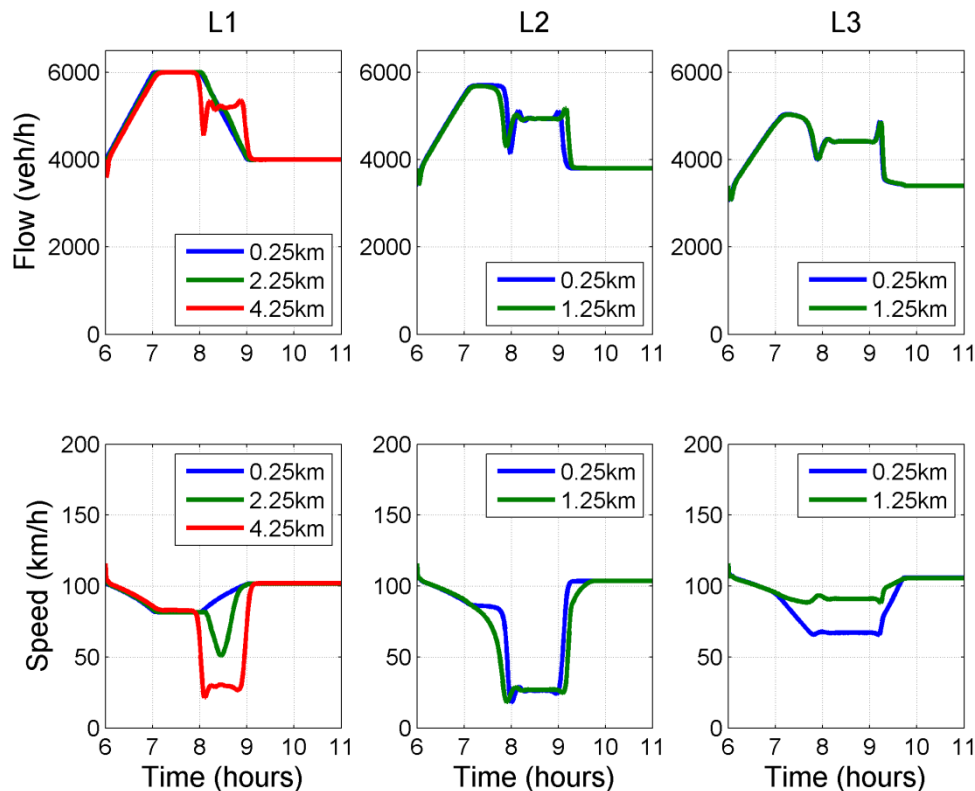
## 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα προσομοίωσης του υποθετικού δικτύου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην πρώτη ενότητα γίνεται περιγραφή και σχολιασμός των αποτελεσμάτων για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος. Έπειτα, στην δεύτερη ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της πρώτης πολιτικής καθοδήγησης πορείας η οποία λαμβάνει υπόψη της τον στιγμιαίο χρόνο διαδρομής των οχημάτων για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές και στην τελευταία ενότητα τα αντίστοιχα αποτελέσματα εφαρμογής της δεύτερης πολιτικής καθοδήγησης πορείας η οποία λαμβάνει τις αποφάσεις της βάσει της εκτίμησης του μήκους της ουράς στην κορεσμένη ράμπα εξόδου L5.

### 6.1 Περίπτωση Μη Καθοδήγησης Πορείας

Στην περίπτωση, μη καθοδήγησης πορείας, όλοι οι οδηγοί στον αυτοκινητόδρομο, που επιθυμούν να φτάσουν στους προορισμούς D3 και D4 (βλέπε Σχήμα 5.1), εξέρχονται από την ράμπα εξόδου L5, η οποία ανήκει στη συντομότερη σε μήκος διαδρομή. Το Σχήμα 6.1, δείχνει για κάθε σύνδεσμο του κυρίως αυτοκινητόδρομου, τις μετρήσεις ροής και ταχύτητας, κατά τη διάρκειας της προσομοίωσης, σε διάφορα σημεία των συνδέσμων του δικτύου. Για παράδειγμα, στον σύνδεσμο L2, ο οποίος έχει μήκος 2km, υπάρχουν δύο σημεία μέτρησης, στο 0.25 km (κοντά στην είσοδο του συνδέσμου) και στο 1.25km (κοντά στο τέλος του συνδέσμου). Παρατηρείται ότι, γύρω στις 7:45 π.μ., η ροή στο κυρίως ρεύμα, και συγκεκριμένα στον σύνδεσμο L2, μειώνεται αιφνιδίως, ενώ την ίδια στιγμή εμφανίζεται μία απότομη πτώση στην ταχύτητα στον ίδιο σύνδεσμο και η οποία διαδίδεται ανάντη στον σύνδεσμο L1, χωρίς να φτάνει στην είσοδο του αυτοκινητόδρομου. Η συμφόρηση στο κυρίως ρεύμα διαρκεί περίπου μέχρι τις 9:15 π.μ., και μετά διαλύεται λόγω χαμηλής ζήτησης, στην είσοδο O1 του δικτύου (βλ. Σχήμα 5.2). Το Σχήμα 6.2(a) αναπαριστά το μήκος της ουράς στην ράμπα εξόδου L5 ως προς τον χρόνο, και επιβεβαιώνει ότι σχηματίζεται ουρά γύρω στις 6:50 π.μ., η οποία σταδιακά αυξάνεται και τελικά φτάνει γύρω στις 7:45 π.μ., τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα σε οχήματα της ράμπας, που είναι περίπου 55 οχήματα. Από εκείνη τη χρονική στιγμή και

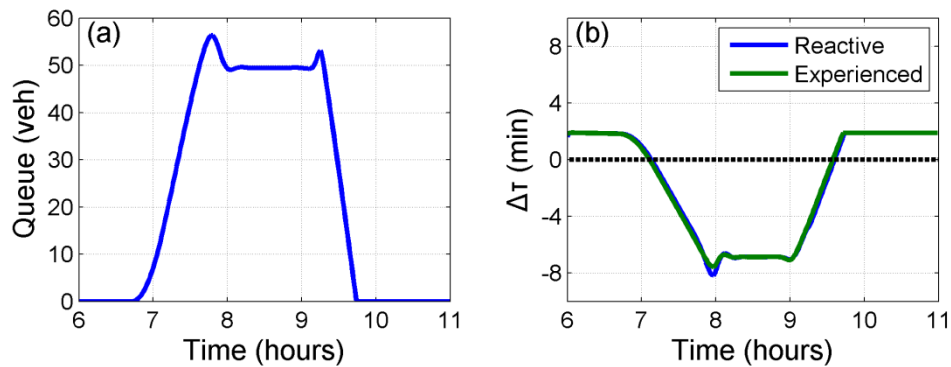




**Σχήμα 6.1: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας Χωρίς Εφαρμογή Ελέγχου.**

έπειτα, η ουρά εισέρχεται στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητόδρομου δημιουργώντας συμφόρηση. Στο ίδιο σχήμα επίσης φαίνεται, ότι γύρω στις 9:15 π.μ., η ουρά αρχίζει να μειώνεται πάλι, το οποίο έχει, άμεσα, θετικό αντίκτυπο στις συνθήκες κυκλοφορίας του αυτοκινητόδρομου (βλ. Σχήμα 6.1).

Το Σχήμα 6.2(b) απεικονίζει την διαφορά στους χρόνους ταξιδιού  $\Delta t$  κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης και για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές, όπως αυτές ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Στο σχήμα απεικονίζονται οι χρονικές διαφορές για τον στιγμιαίο και τον πραγματικό χρόνο διαδρομής. Παρατηρείται ότι και οι δύο γραμμές είναι παρόμοιες σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ειδικότερα, το σχήμα αυτό δείχνει ότι στην αρχή της προσομοίωσης, η κύρια διαδρομή είναι και η πιο σύντομη χρονικά μέχρι τις 7:10 π.μ. Από εκείνη τη χρονική στιγμή και έπειτα, η δευτερεύουσα διαδρομή γίνεται χρονικά συντομότερη, λόγω της αυξανόμενης ουράς στην κύρια ράμπα εξόδου. Συγκεκριμένα, η δευτερεύουσα διαδρομή είναι 7 λεπτά συντομότερη από την κύρια ενώ στην αρχή της προσομοίωσης η κύρια διαδρομή ήταν μόλις 2 λεπτά πιο



**Σχήμα 6.2: (α) Μήκος Ουράς στη Ράμπα Εξόδου Χωρίς την Εφαρμογή Ελέγχου και (β) Διαφορά στο Χρόνο Διαδρομής Χωρίς την Εφαρμογή Ελέγχου.**

σύντομη από τη δεύτερη διαδρομή. Το γεγονός αυτό, δείχνει πως η δευτερεύουσα διαδρομή είναι κατά πολύ συμφέρουσα για τους οδηγούς, την περίοδο των ωρών αιχμής, και επομένως θα ωφελούνταν από ενδεχόμενη αλλαγή πορείας. Τελικά, η κατάσταση αλλάζει ξανά γύρω στις 9:40 π.μ., όταν η ουρά που είχε σχηματιστεί στη ράμπα, σταδιακά μειώνεται και η κύρια διαδρομή γίνεται ξανά η πιο σύντομη.

Ο Πίνακας 6.1, παρουσιάζει τις τιμές των κριτηρίων απόδοσης για την περίπτωση που

**Πίνακας 6.1: Τιμές Κριτηρίων Απόδοσης**

| Πολιτική Καθοδήγησης Πορείας                  | Στρατηγική Ανάδρασης | ΣΧΠ (veh*h)         |                     | ΣΑΧ (veh*h)         |                     |
|-----------------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Καμία Καθοδήγηση                              | -                    | 3228                |                     | 110                 |                     |
|                                               |                      | $T_c = 2\text{min}$ | $T_c = 5\text{min}$ | $T_c = 2\text{min}$ | $T_c = 5\text{min}$ |
| Καθοδήγηση Πορείας με Βάση το Χρόνο Διαδρομής | Bang-Bang            | 2462                | 2458                | 1.6                 | 5.9                 |
|                                               | PI                   | 2473                | 2472                | 0.1                 | 0.1                 |
| Καθοδήγηση Πορείας με Βάση το Μήκος Ουράς     | Bang-Bang            | 2478                | 2473                | 6.1                 | 8.3                 |
|                                               | PI                   | 2500                | 2492                | 13.7                | 11.1                |

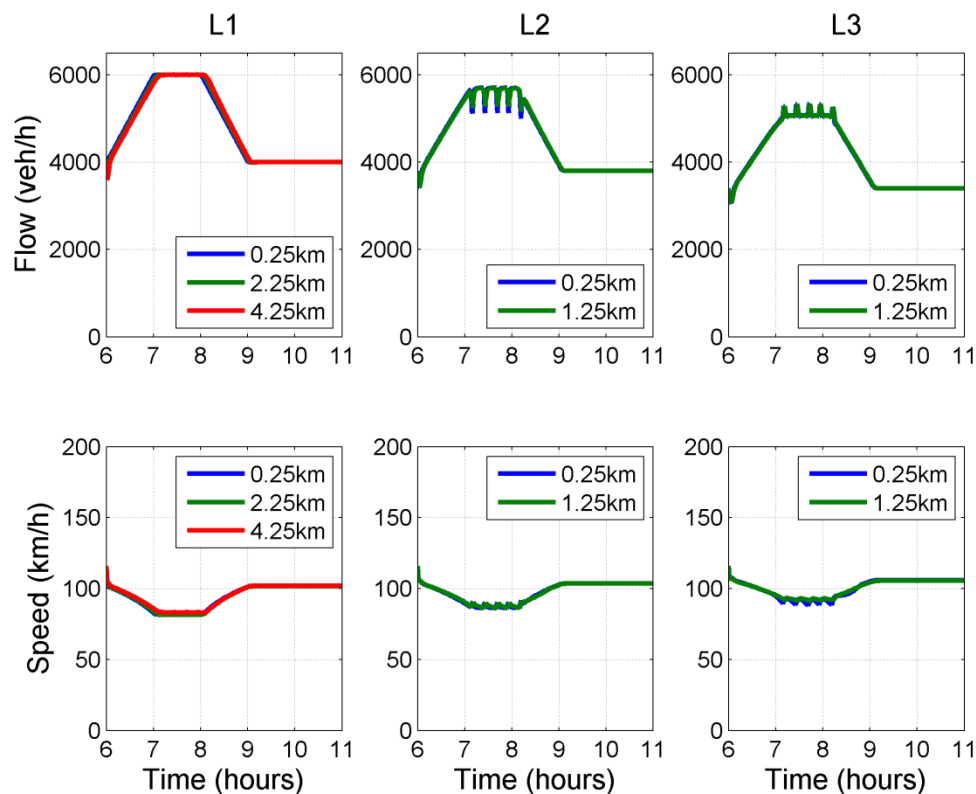
δεν εφαρμόζεται καμία πολιτική καθοδήγησης πορείας. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει τον συνολικό χρόνο παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο (ΣΧΠ) και τη συνολική απώλεια χρόνου σε χρονικά μεγαλύτερες διαδρομές (ΣΑΧ) σε veh·h. Αυτές οι τιμές θα συγκριθούν αργότερα με την περίπτωση που εφαρμόζονται πολιτικές καθοδήγησης πορείας.

## 6.2 Καθοδήγηση Πορείας με Βάση τον Στιγμιαίο Χρόνο Διαδρομής

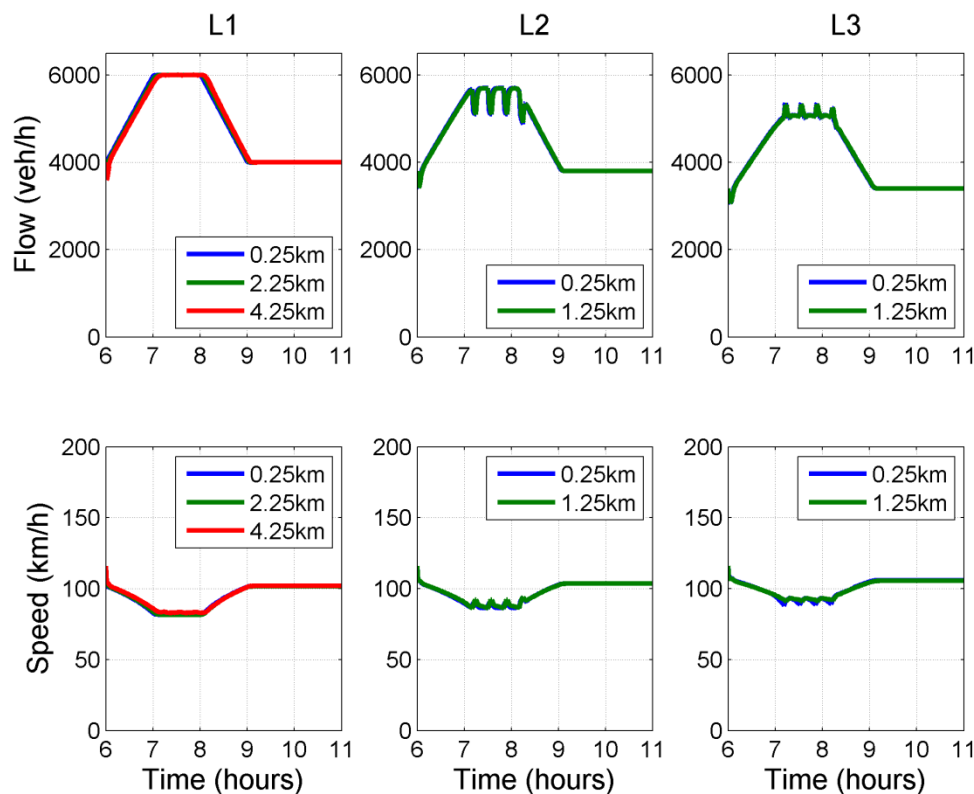
Σύμφωνα με αυτήν την πολιτική, το σύστημα καθοδήγησης πορείας, υπολογίζει τα ποσοστά διαχωρισμού  $\beta$  χρησιμοποιώντας τις στρατηγικές Bang-Bang και PI, οι οποίες προσπαθούν να κρατήσουν την διαφορά στους χρόνους διαδρομής  $\Delta\tau(k)$ , για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές, κοντά στο μηδέν. Δηλαδή, σκοπός τους είναι να εξισορροπήσουν χρονικά την κύρια με την δευτερεύουσα διαδρομή.

### 1) Bang-Bang στρατηγική

Η στρατηγική Bang-Bang εφαρμόστηκε με διαστήματα ελέγχου  $T_c = 2$  και  $T_c = 5$  min. Τα



**Σχήμα 6.3: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου  $T_c = 2$  min.**

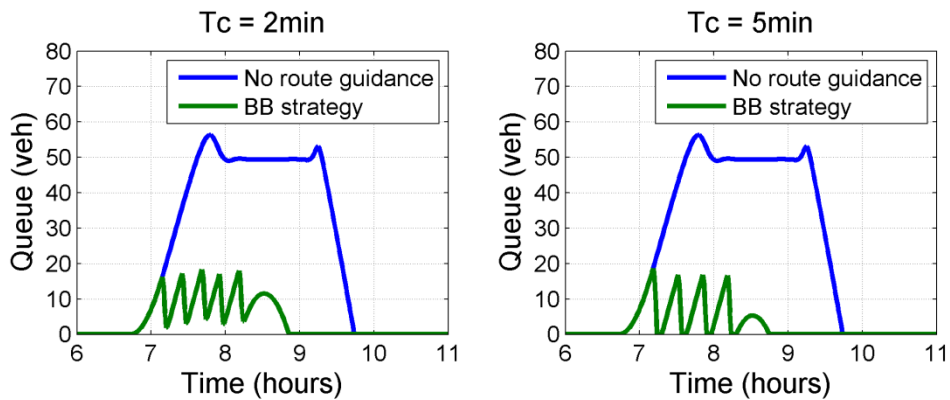


**Σχήμα 6.4: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου  $T_c = 5$  min.**

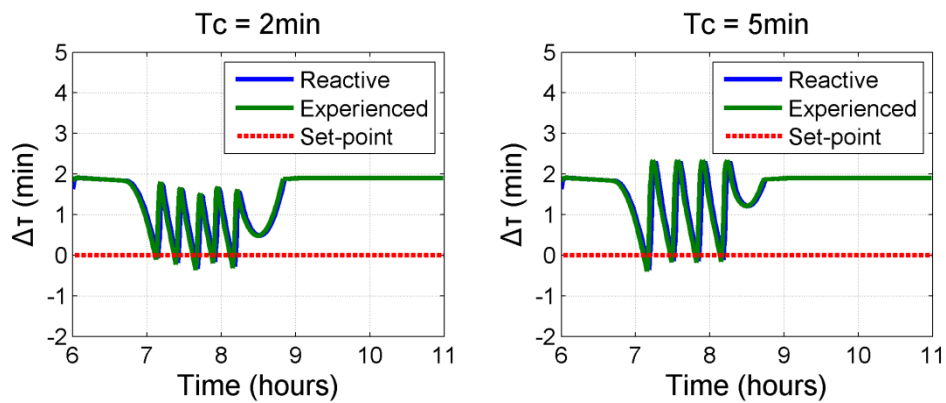
Σχήματα 6.3 και 6.4 δείχνουν τη ροή και την ταχύτητα σε όλους τους συνδέσμους του δικτύου, για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, αντίστοιχα και για τα δύο διαστήματα ελέγχου. Παρατηρείται ότι, και στις δύο περιπτώσεις η στρατηγική επιτυγχάνει να αποτρέψει την δημιουργία συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου διατηρώντας τη ροή και την ταχύτητα σε υψηλά επίπεδα.

Το Σχήμα 6.5 απεικονίζει το μήκος της ουράς στην ράμπα εξόδου L5 καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης κάτω από τη λειτουργία του Bang-Bang ελεγκτή και για τα δύο διαστήματα ελέγχου. Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στο μήκος της ουράς για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται καθοδήγηση πορείας ενώ η πράσινη δείχνει τη διακύμανση του μήκους της ουράς όταν εφαρμόζεται η στρατηγική Bang-Bang.

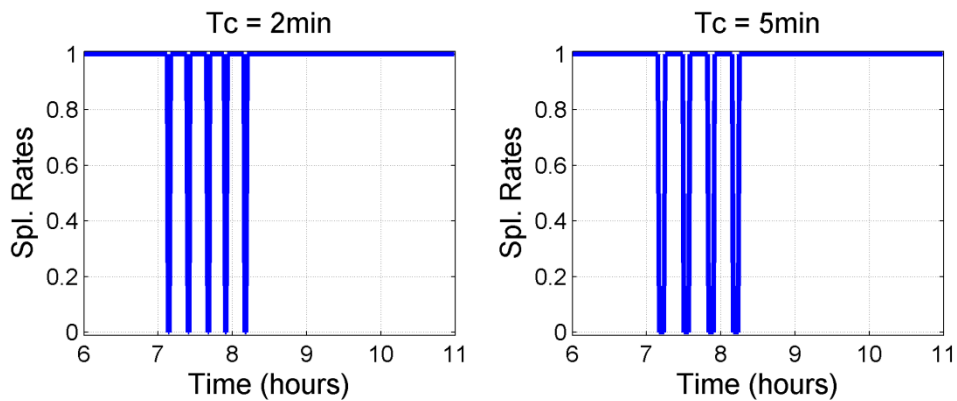
Επίσης, το Σχήμα 6.6 δείχνει τη διαφορά των χρόνων διαδρομής για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές. Παρατηρείται ότι, η στρατηγική καταφέρνει να κρατήσει την διαφορά στους χρόνους διαδρομής κοντά στο μηδέν (βλ. Σχήμα 6.6) και, κάνοντάς το



Σχήμα 6.5: Μήκος Ουράς στη Ράμπα Εξόδου L5 κάτω από τη λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.



Σχήμα 6.6: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.



Σχήμα 6.7: Ποσοστά Διαχωρισμού για την Κύρια Διαδρομή κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.

αυτό, διατηρεί το μήκος της ουράς στη ράμπα L5 κάτω από τα 55 οχήματα, το οποίο είναι η μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα της ράμπας σε οχήματα και επομένως, δεν δημιουργείται συμφόρηση στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου. Όμως, όπως παρατηρείται, η στρατηγική αυτή δημιουργεί ταλαντώσεις στις τροχιές του μήκους της ουράς αλλά και στις διαφορές των χρόνων διαδρομής  $\Delta\tau(k)$  οι οποίες είναι πιο έντονες όσο μεγαλώνει το διάστημα ελέγχου.

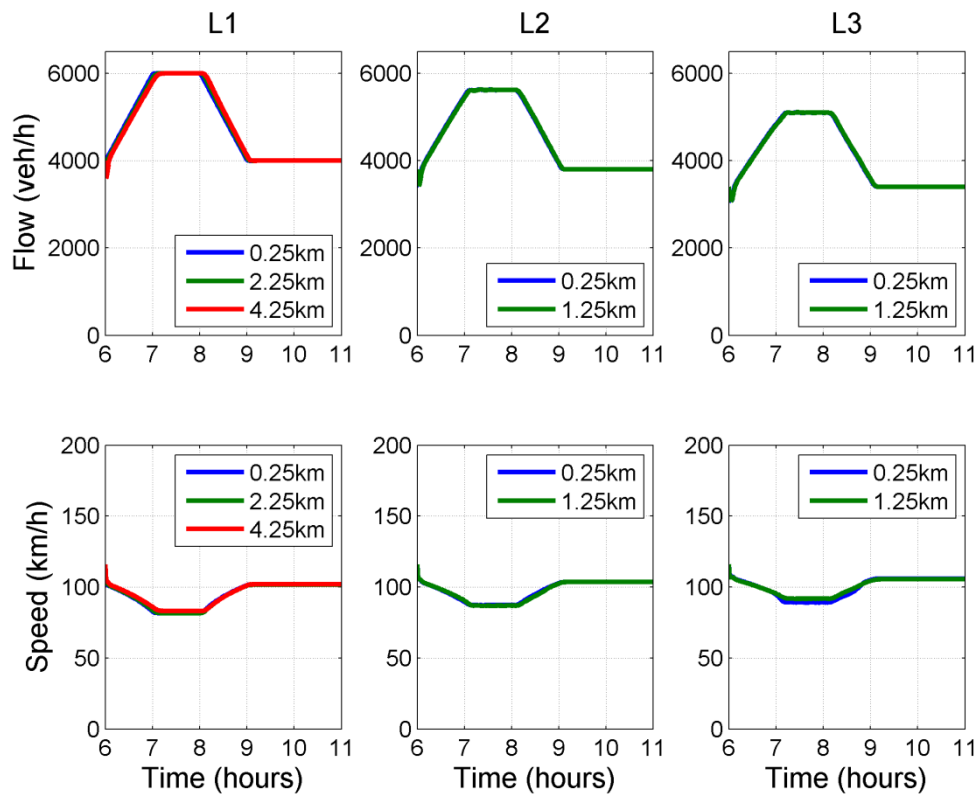
Το Σχήμα 6.7, παρουσιάζει τα ποσοστά διαχωρισμού  $\beta$  όπως αυτά υπολογίζονται από την στρατηγική για την κύρια διαδρομή. Όπως φαίνεται σ' αυτό το σχήμα, ο ελεγκτής αποφασίζει να στείλει όλο το μέρος της κυκλοφορίας μέσω της δευτερεύουσας διαδρομής σε πέντε χρονικές στιγμές για την περίπτωση  $Tc = 2 \text{ min}$  και σε τέσσερις χρονικές στιγμές για την περίπτωση  $Tc = 5 \text{ min}$ .

Ο Πίνακας 6.1, παρουσιάζει την επίδοση της στρατηγικής σε όρους ΣΧΠ και ΣΑΧ. Στον πίνακα φαίνεται ότι η στρατηγική ελέγχου Bang-Bang πετυχαίνει 24% μείωση του ΣΧΠ και για τα δύο διαστήματα ελέγχου και 98% και 95% μείωση στο ΣΑΧ για διάστημα ελέγχου 2 και 5 λεπτών, αντίστοιχα, συγκριτικά με τη περίπτωση μη καθοδήγησης πορείας.

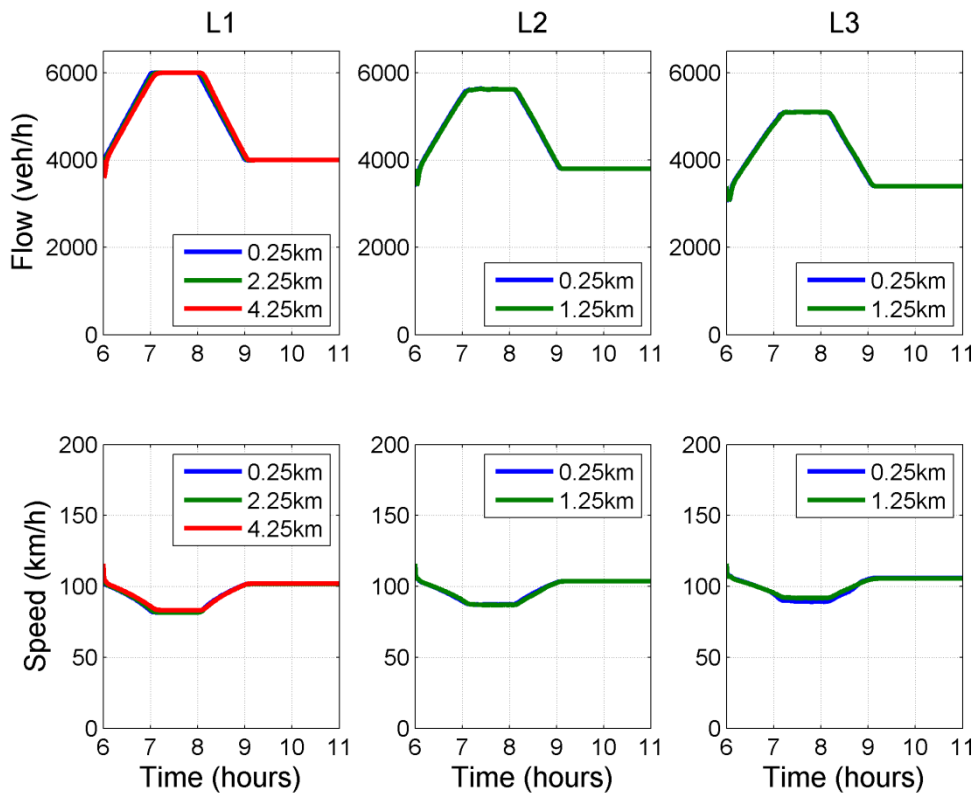
## 2) PI στρατηγική

Η στρατηγική PI εφαρμόστηκε, επίσης, με διάστημα ελέγχου ίσο με 2 και 5 λεπτά. Το Σχήμα 6.8 και 6.9 δίνει τις μετρήσεις ροής και ταχύτητας στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου για τα δύο διαστήματα ελέγχου αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η εφαρμογή καθοδήγησης πορείας με χρήση του ελεγκτή PI αποτρέπει την δημιουργία συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου.

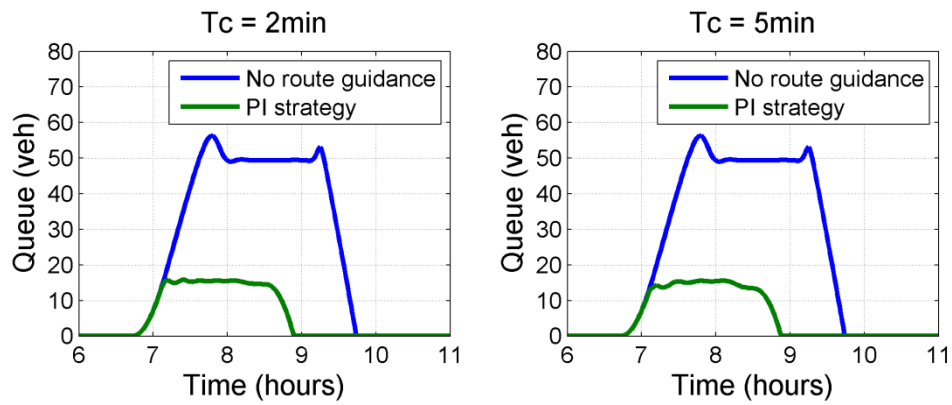
Το Σχήμα 6.11 δείχνει ότι η στρατηγική επιτυγχάνει να εξισορροπήσει τους χρόνους διαδρομής και για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές και την ίδια στιγμή διατηρεί την ουρά στην κύρια ράμπα εξόδου σε χαμηλά επίπεδα (βλ. Σχήμα 6.10). Όπως αναμενόταν, η εφαρμογή της PI στρατηγικής, συγκριτικά με την Bang-Bang στρατηγική, έχει ως αποτέλεσμα ομαλότερες τροχιές για τις διαφορές στους χρόνους διαδρομής όπως επίσης και ομαλότερες τροχιές για το μήκος της ουράς της ράμπας. Το Σχήμα 6.12 παρουσιάζει



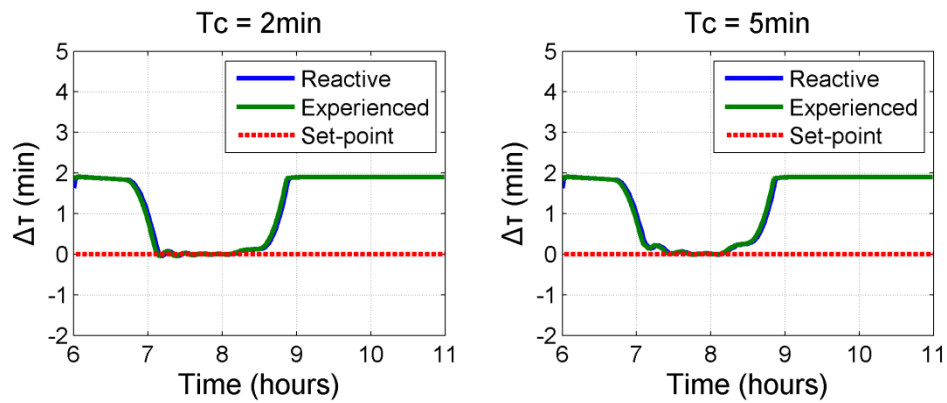
Σχήμα 6.8: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου  $T_c = 2$  min.



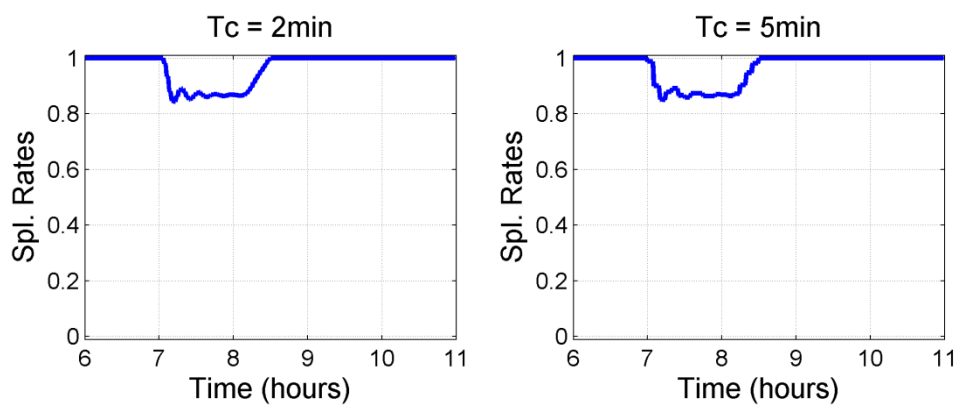
Σχήμα 6.9: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου  $T_c = 5$  min.



Σχήμα 6.10: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή.



Σχήμα 6.11: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή.



Σχήμα 6.12: Ποσοστά Διαχωρισμού για την Κύρια Διαδρομή κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή.

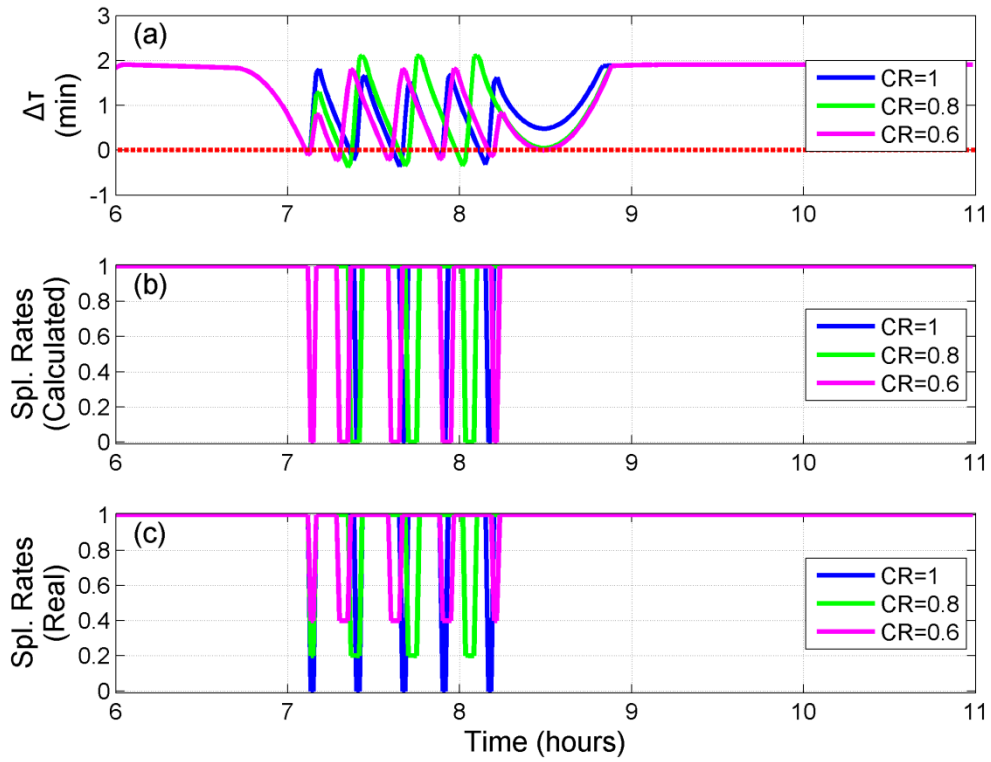


τα ακριβή ποσοστά διαχωρισμού, όπως υπολογίζονται από την PI στρατηγική. Η στρατηγική, κατά τις ώρες αιχμής, αποφασίζει σταθερά να εκτρέψει περίπου το 15% της μεγάλων ουρών στη ράμπα εξόδου.

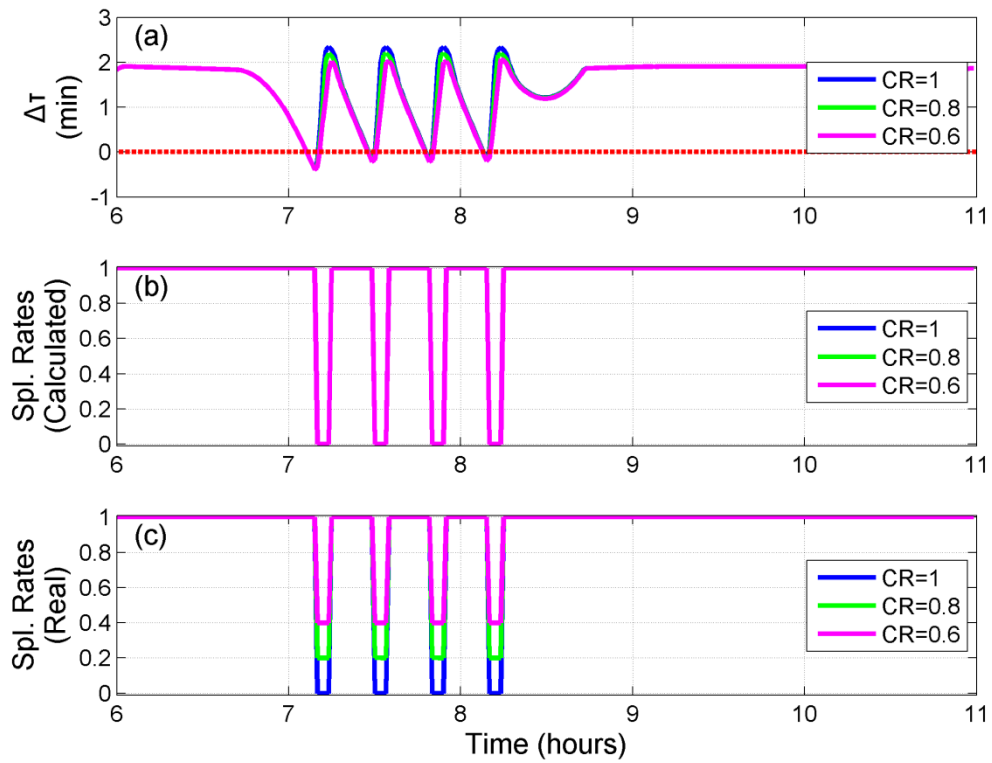
Ο Πίνακας 6.1 δείχνει ότι η PI στρατηγική πετυχαίνει 23% μείωση στον ΣΧΠ και σχεδόν 100% βελτίωση στο ΣΑΧ και για τα δύο διαστήματα ελέγχου, το οποίο στην πραγματικότητα αντιστοιχεί στις συνθήκες βέλτιστου ως προς τον χρήστη.

### 3) Διερεύνηση ποσοστού υπακοής

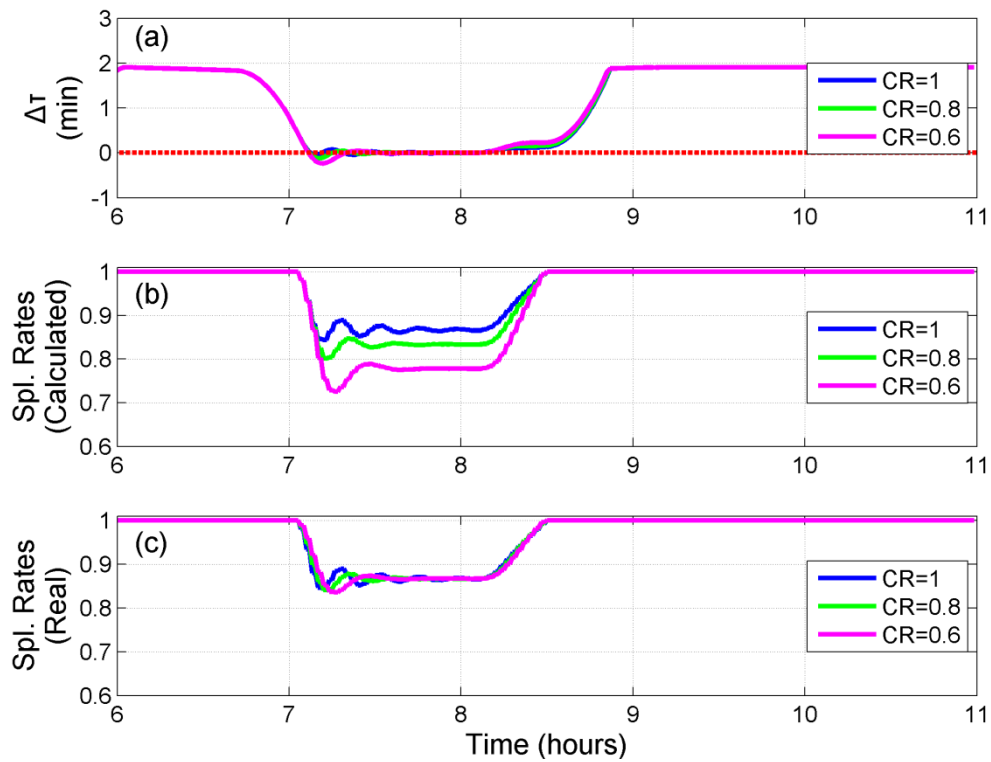
Ένα ερώτημα που προκύπτει είναι το πώς το ποσοστό υπακοής των οδηγών στις αποφάσεις του συστήματος καθοδήγησης μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία των ελεγκτών. Για την απάντηση αυτού του ερωτήματος, τα Σχήματα 6.13, 6.14, 6.15 και 6.16 ανακλούν την λειτουργία των στρατηγικών ελέγχου Bang-Bang και PI, αντίστοιχα, θεωρώντας διαφορετικά ποσοστά υπακοής και για τα δύο διαστήματα ελέγχου  $T_c = 2$  min και  $T_c = 5$  min. Πιο συγκεκριμένα, τα Σχήματα 6.13(a), 6.14(a), 6.15(a) και 6.16(a) αναπαριστούν, για κάθε στρατηγική ελέγχου, την διαφορά στον στιγμιαίο χρόνο διαδρομής για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές. Τα Σχήματα 6.13(b), 6.14(b), 6.15(b) και 6.16(b) απεικονίζουν τα ποσοστά διαχωρισμού  $\beta$  που υπολογίστηκαν από κάθε στρατηγική ελέγχου για την κύρια διαδρομή και τα Σχήματα 6.13(c), 6.14(c), 6.15(c) και 6.16(c) δείχνουν τα ποσοστά διαχωρισμού που εφαρμόζονται, στην κύρια διαδρομή, σύμφωνα με το επίπεδο της υπακοής των οδηγών, σ' όλη τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι, για την περίπτωση που εξετάζεται εδώ τα ποσοστά διαχωρισμού για την δευτερεύουσα διαδρομή υπολογίζονται απλά ως  $1 - \beta$ . Επίσης, τα αποτελέσματα με ποσοστό υπακοής ίσο με 1 αντιστοιχούν στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Παρατηρείται ότι, επειδή οι δύο στρατηγικές ελέγχου λειτουργούν αναδραστικά, επιτυγχάνουν να διατηρήσουν την διαφορά στους χρόνους διαδρομής κοντά στο μηδέν, προσαρμόζοντας αυτόματα τις αποφάσεις ελέγχου τους στο (άγνωστο) επίπεδο της υπακοής των οδηγών και για τα δύο διαστήματα ελέγχου. Ειδικότερα για τη στρατηγική PI, σημειώνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το διάστημα ελέγχου τόσο πιο απότομες είναι οι αποφάσεις της στρατηγικής οδηγώντας, όμως, στο ίδιο αποτέλεσμα.



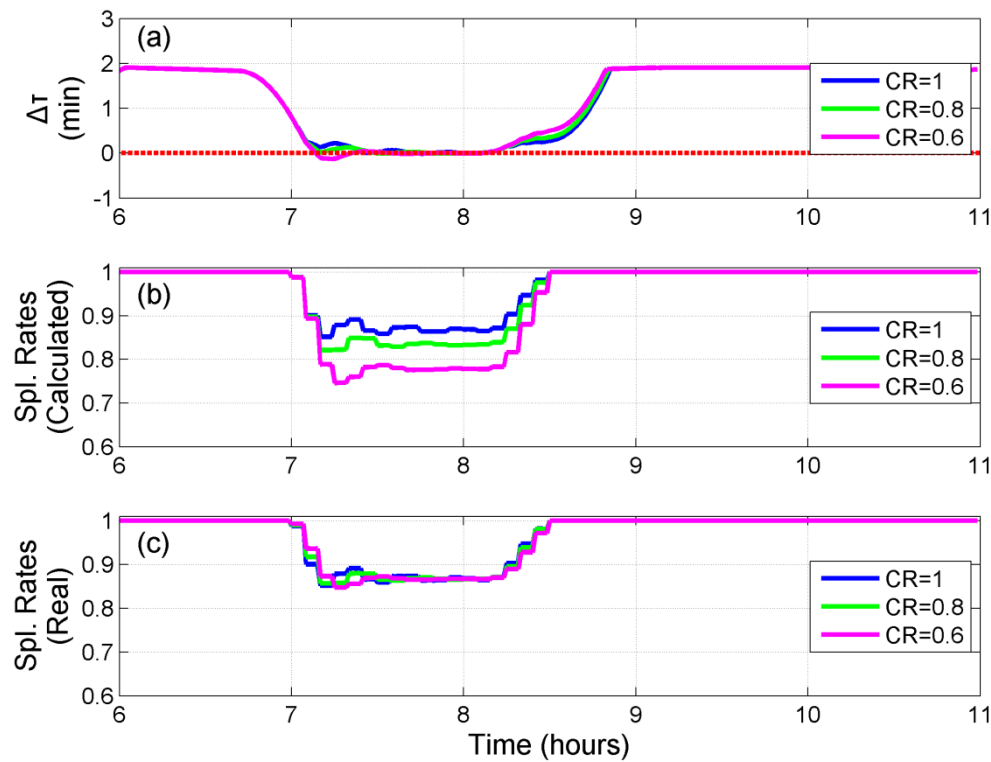
**Σχήμα 6.13: (α) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (β) Ποσοστά Διαχωρισμού Όπως τα Υπολογίζει η Bang-Bang Στρατηγική (γ) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου  $T_c = 2$  min.**



**Σχήμα 6.14: (α) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (β) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η Bang-Bang Στρατηγική (γ) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου  $T_c = 5$  min.**



Σχήμα 6.15: (α) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (β) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η PI Στρατηγική (γ) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου  $T_c = 2$  min.



Σχήμα 6.16: (α) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (β) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η PI Στρατηγική (γ) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου  $T_c = 5$  min.

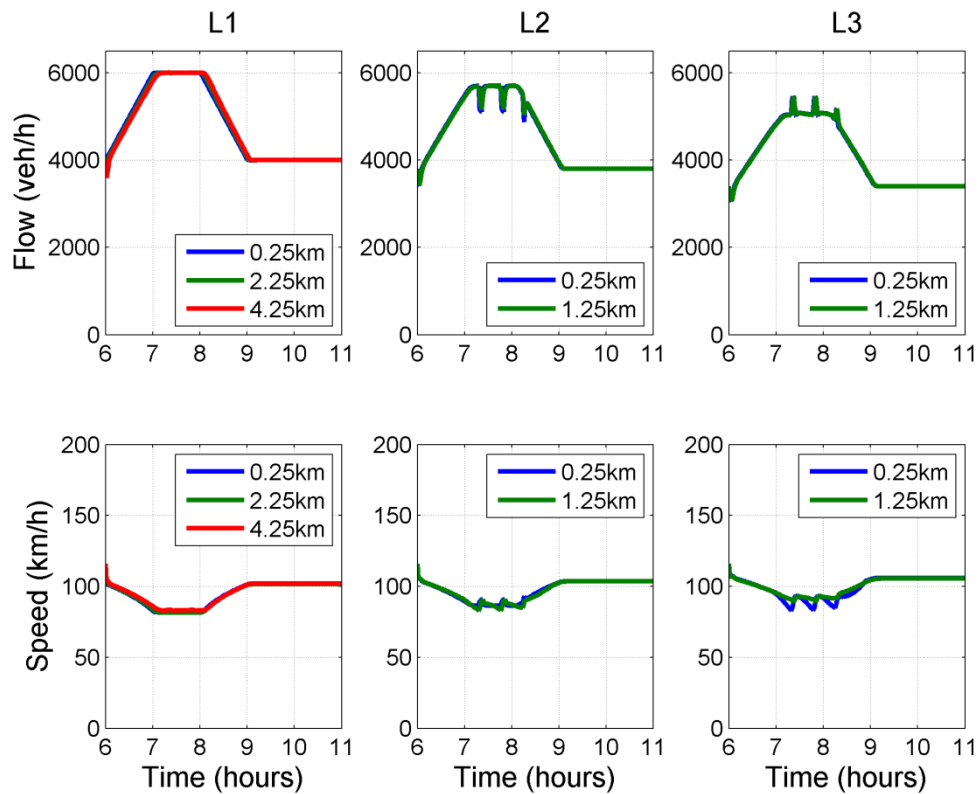
### **6.3 Καθοδήγηση Πορείας με Βάση το Εκτιμώμενο Μήκος Ουράς**

Σύμφωνα με αυτήν τη πολιτική, το σύστημα καθοδήγησης πορείας υπολογίζει τα ποσοστά διαχωρισμού κάνοντας χρήση των δύο στρατηγικών ανάδρασης ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν και παραπάνω, της Bang-Bang και της PI στρατηγικής, με σκοπό αυτή τη φορά να διατηρήσουν το μήκος της ουράς στην κύρια ράμπα εξόδου σε ένα προκαθορισμένο επιθυμητό επίπεδο, έτσι ώστε να μην εισχωρήσει η ουρά στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητόδρομου. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής, στην περίπτωση που εφαρμόζονται η Bang-Bang στρατηγική και η PI στρατηγική για δύο διαστήματα ελέγχου.

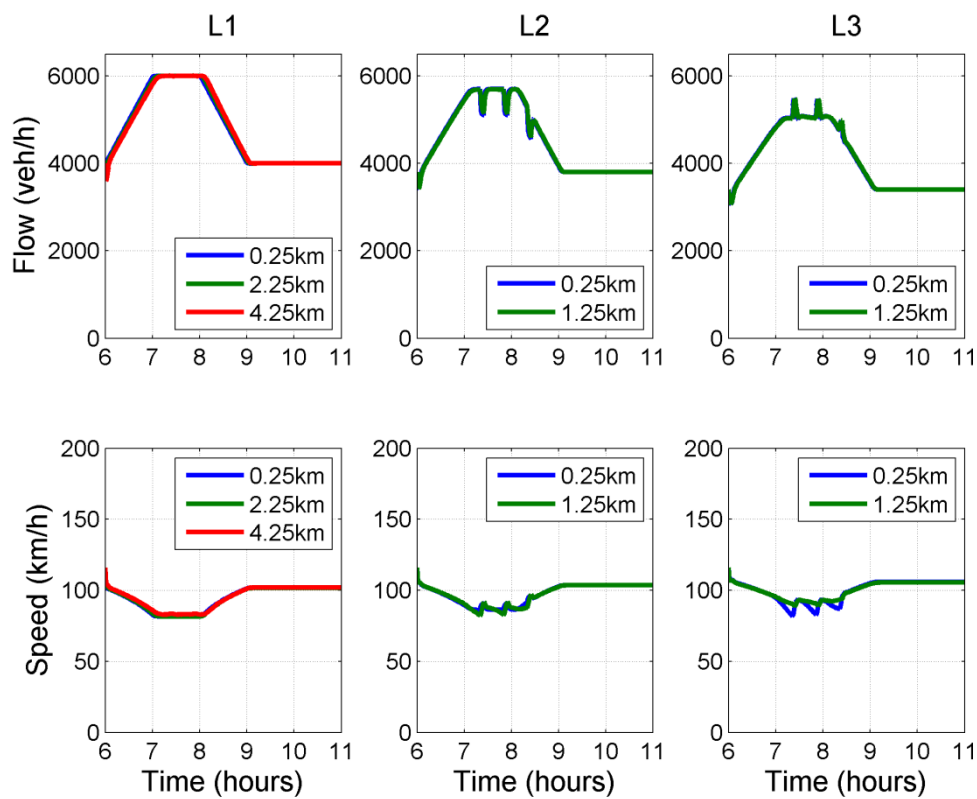
#### **1) Bang-Bang στρατηγική**

Η στρατηγική Bang-Bang εφαρμόστηκε με διάστημα ελέγχου ίσο με 2 και 5 λεπτά, αντίστοιχα, και επιθυμητή τιμή ουράς ίση με  $\hat{w} = 25$  οχήματα. Βασιζόμενοι σε προηγούμενες παρατηρήσεις, αυτό το επίπεδο ουράς είναι κατάλληλο για να επιτευχθούν, κατά προσέγγιση, οι συνθήκες βέλτιστου ως προς τον χρήστη και είναι αρκετά χαμηλό για να αποφευχθεί η υπερχειλίση της ουράς της ράμπας. Το Σχήμα 6.17 αφορά εφαρμογή της στρατηγικής για διάστημα ελέγχου 2 λεπτών ενώ το Σχήμα 6.18 για διάστημα ελέγχου 5 λεπτών. Όπως και στην προηγούμενη πολιτική καθοδήγησης με εφαρμογή του ελεγκτή Bang-Bang, παρατηρείται ότι η ροή και η ταχύτητα στους συνδέσμους του κυρίως αυτοκινητόδρομου παραμένουν σε υψηλά επίπεδα, και για τα δύο διαστήματα ελέγχου.

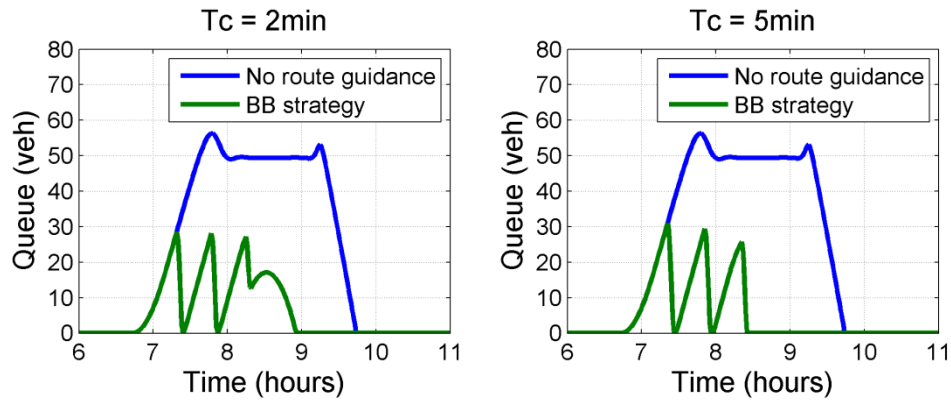
Το Σχήμα 6.19 απεικονίζει το μήκος της ουράς στην ράμπα εξόδου L5 σ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης κάτω από τη λειτουργία του Bang-Bang ελεγκτή και για τα δύο διαστήματα ελέγχου. Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής καταφέρνει να διατηρήσει την ουρά στην ράμπα κοντά στο επιθυμητό επίπεδο και επομένως η ουρά δεν υπερβαίνει την μέγιστη χωρητικότητα της ράμπας και αποφεύγεται η δημιουργία συμφόρησης στον αυτοκινητόδρομο. Επιπλέον, στο Σχήμα 6.20 παρουσιάζονται οι διαφορές στους χρόνους διαδρομής για τα δύο διαστήματα ελέγχου. Όπως φαίνεται, όταν ο ελεγκτής



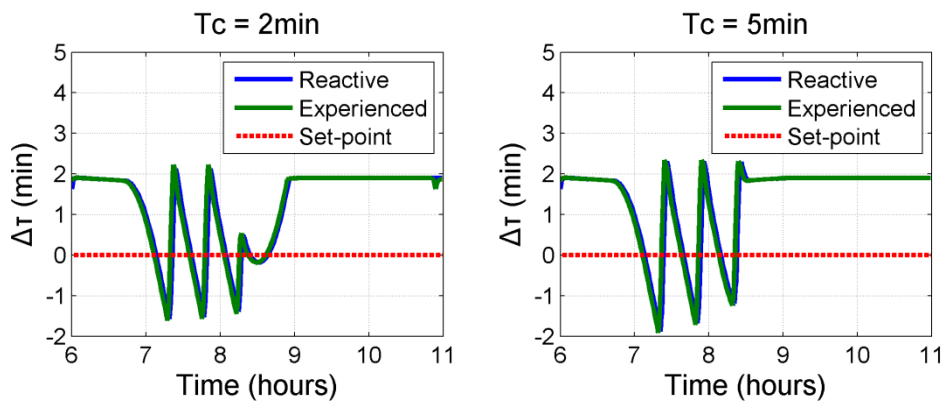
**Σχήμα 6.17: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου  $T_c = 2$  min.**



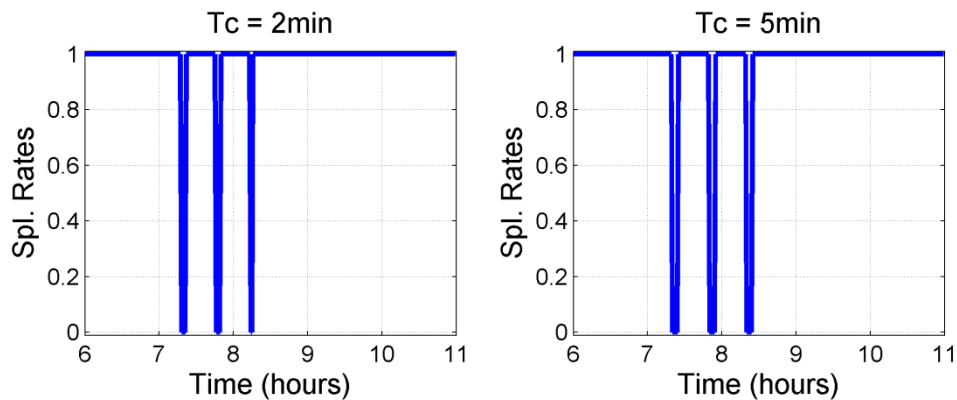
**Σχήμα 6.18: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου  $T_c = 5$  min.**



Σχήμα 6.19: Μήκος Ουράς στη Ράμπα Εξόδου L5 κάτω από τη λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.



Σχήμα 6.20: Διαφορές στον Στιγμιαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.



Σχήμα 6.21: Ποσοστά Διαχωρισμού για την Κύρια Διαδρομή κάτω από τη Λειτουργία του Bang-Bang Ελεγκτή.

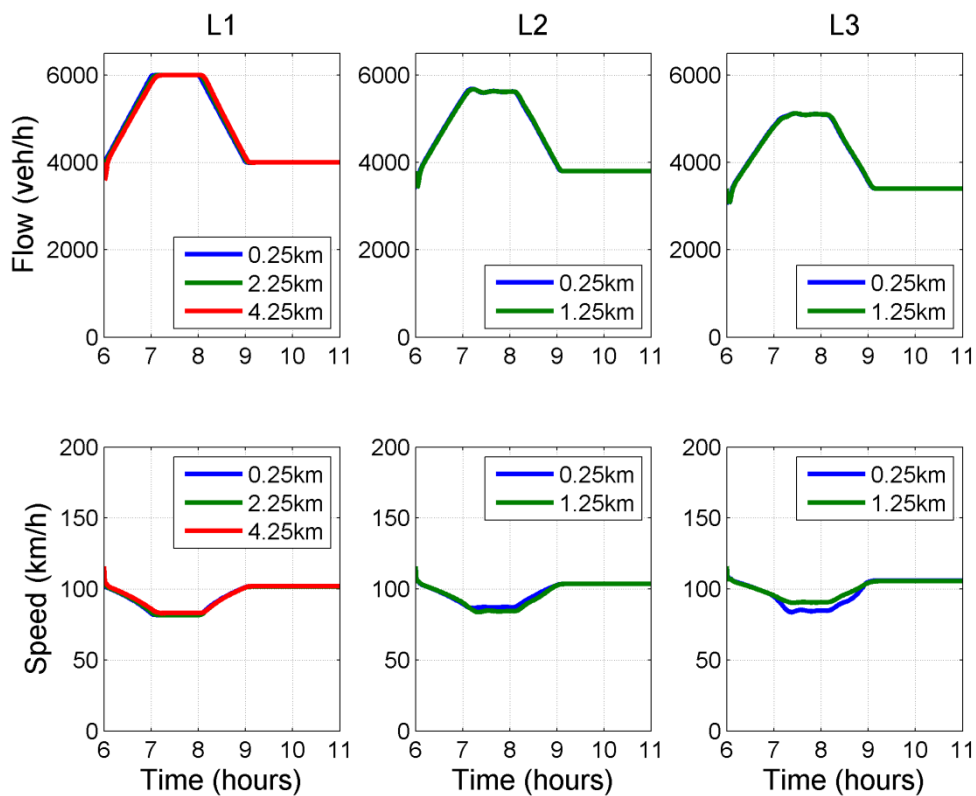
παίρνει απόφαση για αλλαγή πορείας, η δευτερεύουσα διαδρομή είναι χρονικά συντομότερη και επομένως οι οδηγοί που θα υπακούσουν στις αποφάσεις της στρατηγικής θα ωφεληθούν. Το Σχήμα 6.21 παρουσιάζει τα ακριβή ποσοστά διαχωρισμού που υπολογίζει η Bang-Bang στρατηγική. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η στρατηγική επιλέγει για τρία χρονικά διαστήματα κατά τις ώρες αιχμής, να εκτρέψει όλο το μέρος της κυκλοφορίας προς τη δευτερεύουσα διαδρομή και για τα δύο διαστήματα ελέγχου.

Η στρατηγική επιτυγχάνει 23% μείωση και για τα δύο διαστήματα ελέγχου στον ΣΧΠ ενώ πετυχαίνει 94% μείωση στο ΣΑΧ για διάστημα ελέγχου 2 λεπτών και 92% μείωση στον ίδιο δείκτη για διάστημα ελέγχου 5 λεπτών, σε σύγκριση με την περίπτωση μη καθοδήγησης (Πίνακας 6.1). Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να αποκτηθούν για διάφορες επιθυμητές τιμές ουράς, από ένα λογικά ευρύ φάσμα τιμών, δεδομένου ότι η ουρά στη ράμπα εξόδου δεν θα επηρεάζει την κατάσταση στον αυτοκινητόδρομο, ενδεχομένως σε βάρος μιας μικρής αύξησης στο ΣΑΧ στον Πίνακα 6.1.

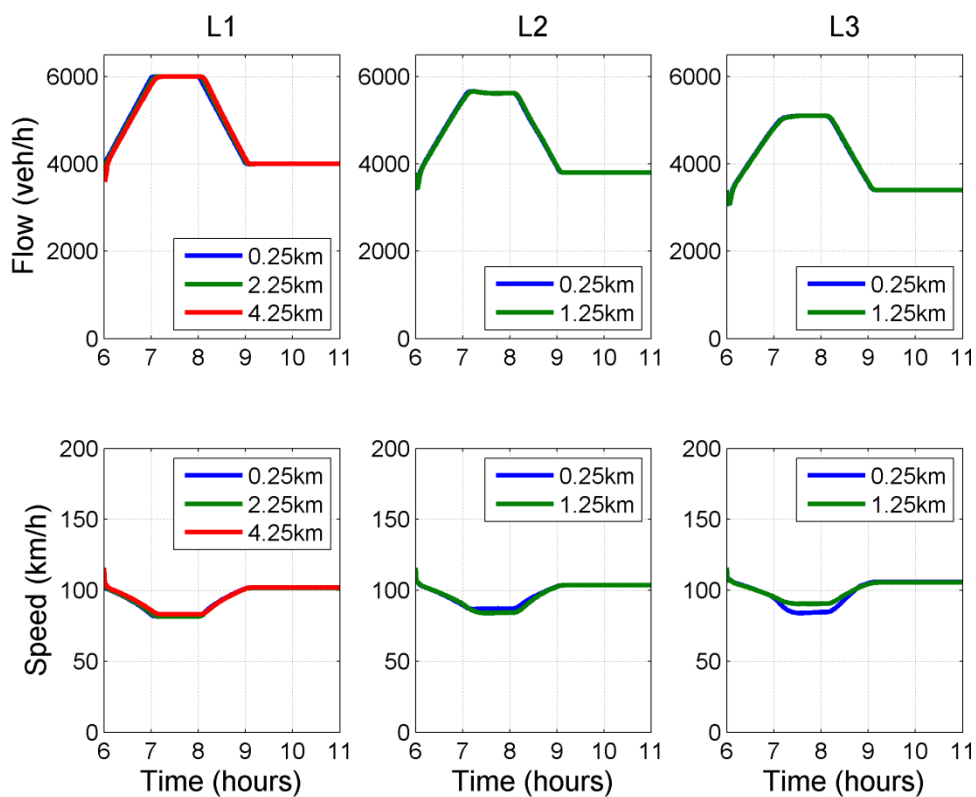
## 2) PI στρατηγική

Η PI στρατηγική εφαρμόστηκε για διάστημα ελέγχου ίσο με 2 λεπτά (Σχήμα 6.22) και 5 λεπτά (Σχήμα 6.23), αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι και αυτή η στρατηγική αποτρέπει τη δημιουργία συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου διατηρώντας τη ροή και την ταχύτητα σε υψηλά επίπεδα, και για τα δύο διαστήματα ελέγχου.

Στο Σχήμα 6.24, φαίνεται το μήκος της ουράς στην κύρια ράμπα εξόδου. Όπως παρατηρείται, η στρατηγική καταφέρνει να διατηρήσει τον αριθμό των οχημάτων στη ράμπα κοντά στην επιθυμητή τιμή, σε όλο το διάστημα των ωρών αιχμής. Επιπρόσθετα, και σ' αυτή την περίπτωση, οι οδηγοί που επανακαθοδηγούνται μέσω της δευτερεύουσας διαδρομής, βιώνουν μικρότερο χρόνο διαδρομής όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.25, και έτσι το ποσοστό υπακοής αναμένεται να είναι υψηλό. Πάλι, από τα σχήματα φαίνεται ότι η εφαρμογή της PI στρατηγικής, έχει ως αποτέλεσμα ομαλότερες τροχιές για τις διαφορές στους χρόνους ταξιδιού όπως επίσης και ομαλότερες τροχιές για το μήκος της ουράς της ράμπας, συγκριτικά με την Bang-Bang στρατηγική.

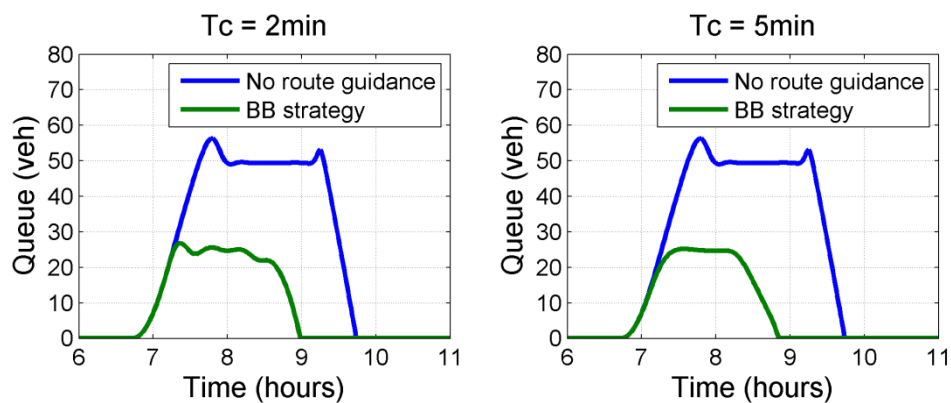


Σχήμα 6.22: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου  $T_c = 2$  min.

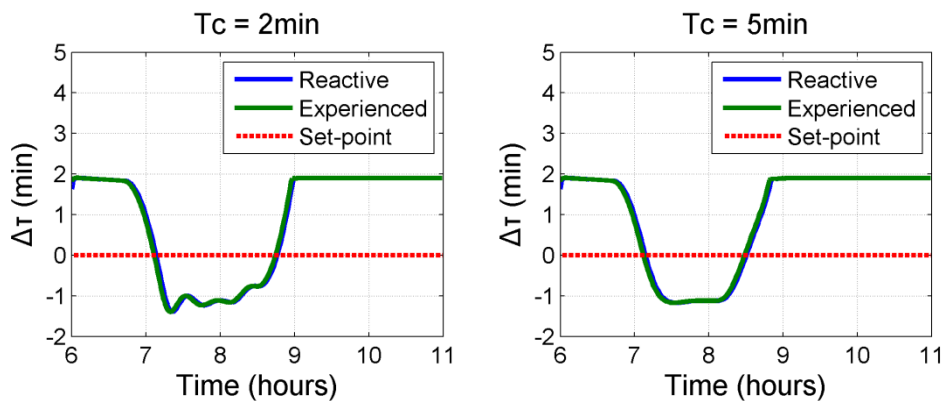


Σχήμα 6.23: Μετρήσεις Ροής και Ταχύτητας κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή για διάστημα ελέγχου  $T_c = 5$  min.

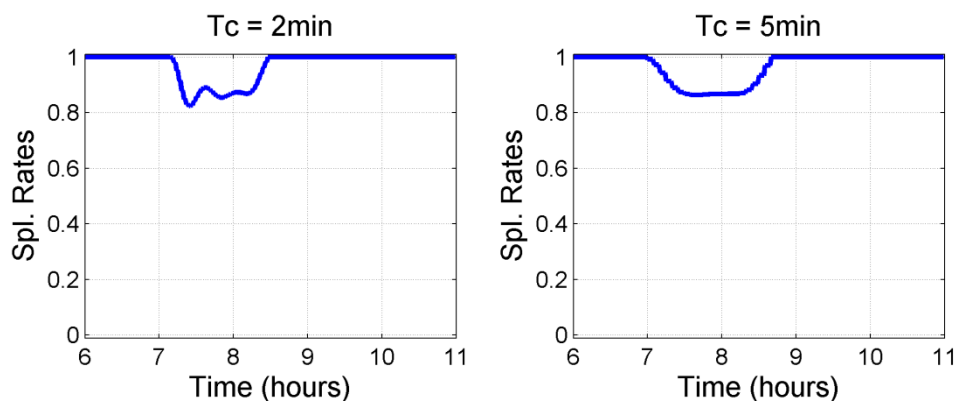




Σχήμα 6.24: Μήκος Ουράς στη Ράμπα Εξόδου L5 κάτω από τη λειτουργία του PI Ελεγκτή.



Σχήμα 6.25: Διαφορές στον Στιγμαίο και Πραγματικό Χρόνο Διαδρομής και για τις δύο Εναλλακτικές Διαδρομές κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή.



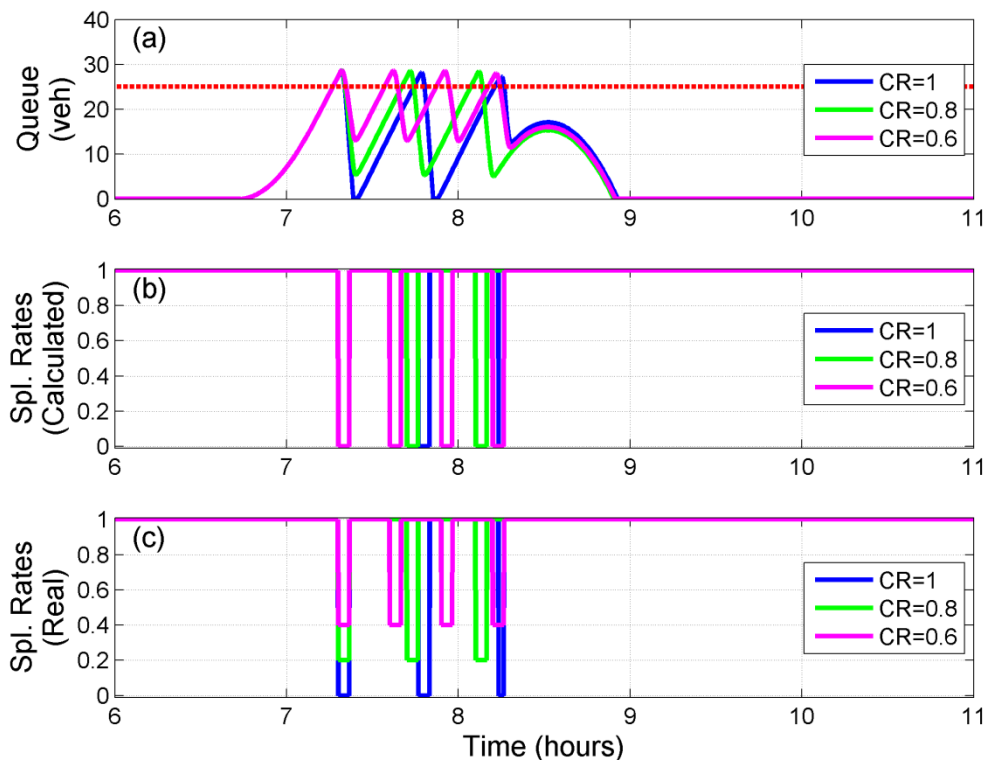
Σχήμα 6.26: Ποσοστά Διαχωρισμού για την Κύρια Διαδρομή κάτω από τη Λειτουργία του PI Ελεγκτή.

Το Σχήμα 6.26 παρουσιάζει τα ακριβή ποσοστά διαχωρισμού, όπως υπολογίζονται από την PI στρατηγική. Καθώς φαίνεται από αυτό το σχήμα, η στρατηγική, κατά τις ώρες αιχμής, αποφασίζει σταθερά να εκτρέψει περίπου το 15% της κυκλοφορίας προς την δευτερεύουσα διαδρομή όπως και στην πρώτη πολιτική καθοδήγησης πορείας με αποτέλεσμα να μη δημιουργείται συμφόρηση στον αυτοκινητόδρομο.

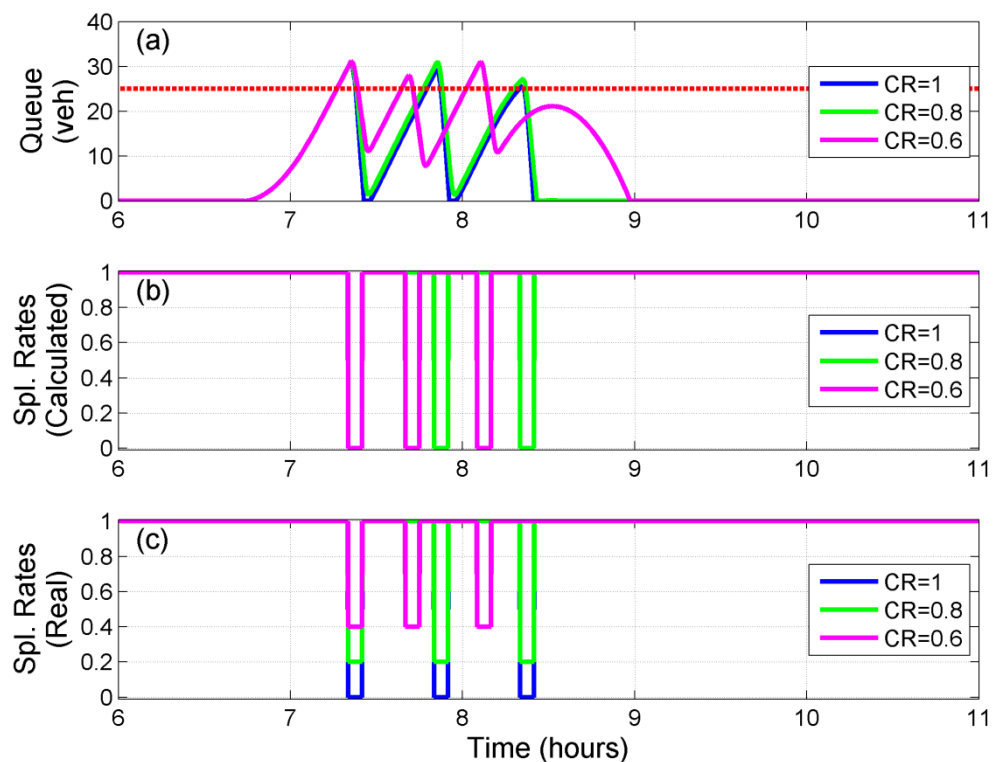
Ο Πίνακας 6.1 δείχνει μείωση του ΣΧΠ κατά 25% περίπου για το διάστημα ελέγχου 2 λεπτών και 23% για το διάστημα ελέγχου των 5 λεπτών ενώ δείχνει μείωση του ΣΑΧ κατά 88% περίπου για το διάστημα ελέγχου 2 λεπτών και 90% για το διάστημα ελέγχου των 5 λεπτών.

### 3) Διερεύνηση ποσοστού υπακοής

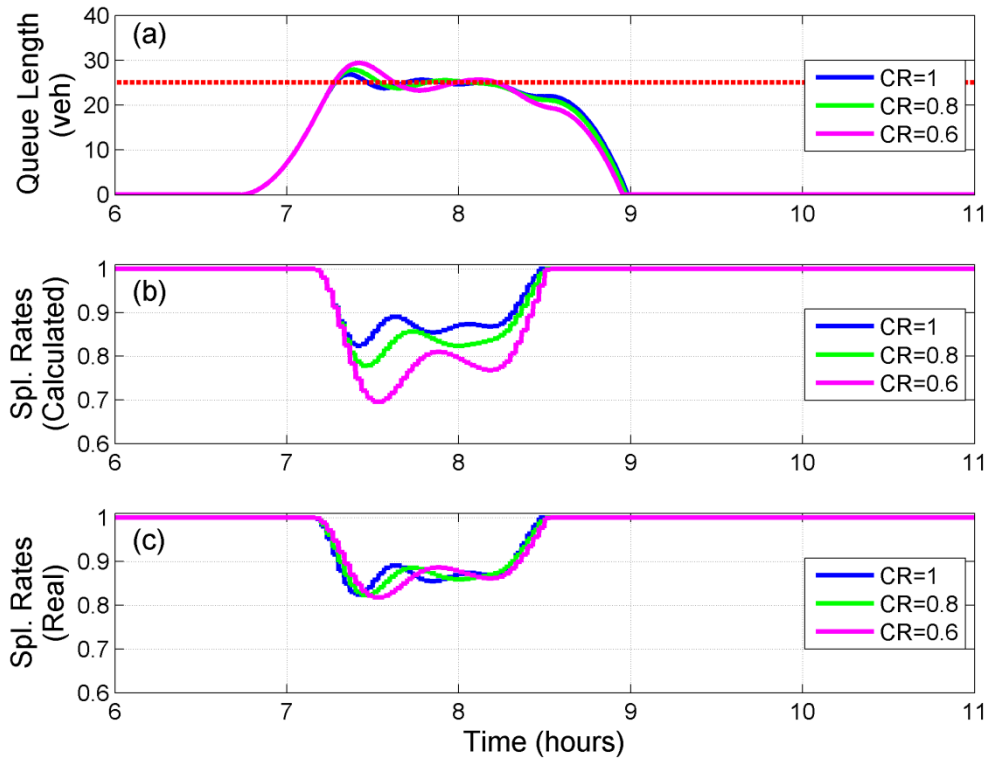
Όπως και προηγουμένως, τα Σχήματα 6.27, 6.28, 6.29 και 6.30 παρουσιάζουν τη λειτουργία των ελεγκτών, θεωρώντας διαφορετικά επίπεδα υπακοής των οδηγών στο σύστημα καθοδήγησης πορείας. Πιο συγκεκριμένα, τα Σχήματα 6.27(a), 6.28(a), 6.29(a) και 6.30(a) αναπαριστούν, για κάθε στρατηγική ελέγχου, την διαφορά στον στιγμιαίο χρόνο διαδρομής για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές. Τα Σχήματα 6.27(b), 6.28(b), 6.29(b) και 6.30(b) απεικονίζουν τα ποσοστά διαχωρισμού  $\beta$  που υπολογίστηκαν από κάθε στρατηγική ελέγχου για την κύρια διαδρομή και τα Σχήματα 6.27(c), 6.28(c), 6.29(c) και 6.30(c) δείχνουν τα ποσοστά διαχωρισμού που εφαρμόζονται σύμφωνα με το επίπεδο της υπακοής των οδηγών σ' όλη τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης. Και εδώ οι δύο στρατηγικές καταφέρνουν να διατηρήσουν το μήκος της ουράς στη ράμπα κοντά στην επιθυμητή τιμή, χάρις την κλειστού βρόχου λειτουργία τους, καθώς προσαρμόζουν κατάλληλα τις αποφάσεις τους στο (άγνωστο) ποσοστό υπακοής των οδηγών. Σημειώνεται ότι για την στρατηγική PI και διάστημα ελέγχου  $T_c = 5 \text{ min}$ , όσο μικραίνει το ποσοστό υπακοής ο ελεγκτής δεν καταφέρνει να διατηρήσει τον επιθυμητό αριθμό οχημάτων, γεγονός που σημαίνει ότι οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή, πρέπει να επαναπροσδιοριστούν.



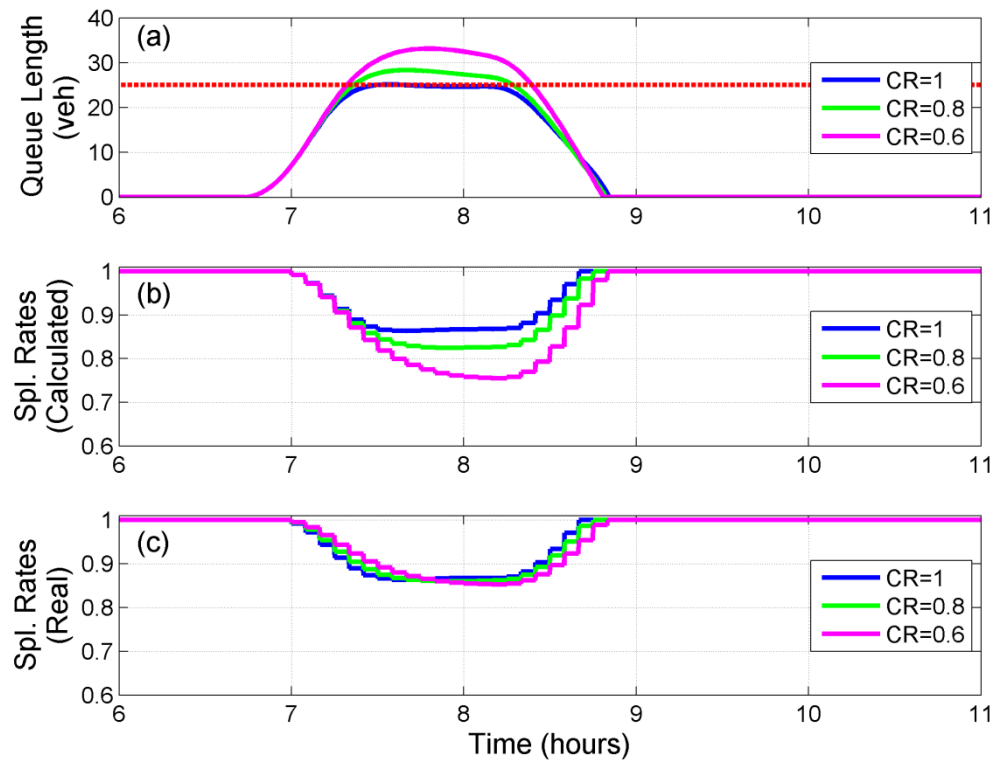
Σχήμα 6.27: (α) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (β) Ποσοστά Διαχωρισμού Όπως τα Υπολογίζει η Bang-Bang Στρατηγική (γ) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου  $T_c = 2 \text{ min}$ .



Σχήμα 6.28: (α) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (β) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η Bang-Bang Στρατηγική (γ) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου  $T_c = 5 \text{ min}$ .



Σχήμα 6.29: (α) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (β) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η PI Στρατηγική (γ) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου  $T_c = 2$  min.



Σχήμα 6.30: (α) Διαφορά στους Χρόνους Διαδρομής (β) Ποσοστά Διαχωρισμού όπως τα Υπολογίζει η PI Στρατηγική (γ) Ποσοστά Διαχωρισμού που Εφαρμόζονται. Διάστημα Ελέγχου  $T_c = 5$  min.

## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 Σύνοψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διερευνήθηκε η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή αυτοκινητοδρόμου όπου εμφανίζεται επαναλαμβανόμενη συμφόρηση λόγω της υπερχειλίσης μίας ράμπας εξόδου. Ο έλεγχος κυκλοφορίας πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή δύο πολιτικών καθοδήγησης πορείας που σκοπό έχουν να καθοδηγούν τα οχήματα μέσω εναλλακτικών διαδρομών, όταν αυτό χρειάζεται, ώστε να αποτρέπεται η υπερχειλίση της ράμπας και η δημιουργία συμφόρησης στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου. Η πρώτη πολιτική καθοδήγησης πορείας στοχεύει στην εξίσωση των χρόνων διαδρομής για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές ενώ η δεύτερη στη διατήρηση του μήκους της ουράς στη ράμπα εξόδου σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Για την επίτευξη των ανωτέρω στόχων χρησιμοποιήθηκαν δύο στρατηγικές ελέγχου, η στρατηγική Bang-Bang και η στρατηγική PI. Τα παραπάνω σενάρια ελέγχου συγκρίθηκαν με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται στο δίκτυο έλεγχος κυκλοφορίας. Η προσομοίωση του δικτύου, των κυκλοφοριακών συνθηκών και των σεναρίων ελέγχου κυκλοφορίας πραγματοποιήθηκε στο μακροσκοπικό προσομοιωτή δικτύων αυτοκινητοδρόμων METANET.

### 7.2 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η εφαρμογή των δύο προτεινόμενων πολιτικών καθοδήγησης πορείας, μπορεί να βελτιώσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου που εξετάστηκε, καθώς αποτρέπουν τη δημιουργία συμφόρησης στον κυρίως αυτοκινητόδρομο καθοδηγώντας τα οχήματα μέσω χρονικά συντομότερων διαδρομών. Σημειώνεται ότι η γεωμετρία του δικτύου που εξετάστηκε καθώς και οι κυκλοφοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν καθιστούν την εναλλακτική διαδρομή ανταγωνιστική, δηλαδή χρονικά συντομότερη, πριν η ουρά που σχηματίζεται στη ράμπα εξόδου υπερχειλίσει. Διαφορετικές τοπολογίες δικτύων με διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες μπορεί να απαιτούν την εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών καθοδήγησης, για

παράδειγμα στην περίπτωση που η εναλλακτική διαδρομή γίνεται ανταγωνιστική μόνο μετά την υπερχείλιση της ουράς της ράμπας και εισόδου αυτής στο κυρίως ρεύμα. Τέτοιες περιπτώσεις εξετάζονται στο [14].

### ***7.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις***

Ως μελλοντική επέκταση της παρούσας διατριβής θα ήταν ενδιαφέρον να εξεταστεί η υλοποίηση των πολιτικών καθοδήγησης πορείας, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, σε δίκτυα που διαθέτουν περισσότερες από μία εναλλακτικές διαδρομές.

## Βιβλιογραφία

- [1] Daganzo, C. F., Laval, J., & Muñoz, J. C. (2002). Ten strategies for freeway congestion mitigation with advanced technologies. California PATH Working Paper, UCB-ITS-PRR-2002-3, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- [2] Rudjanakanoknad, J. (2012). Capacity change mechanism of a diverge bottleneck. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2278, 21-30.
- [3] Di, X., Zhang, X., Zhang, H. M., & Liu, H. X. (2013). Application of pavement marker to avoid queue-jumping and traffic spillback at off-ramp of expressways. In Transportation Research Board 92nd Annual Meeting (paper No. 13-3298).
- [4] Tian, Z. Z., Balke, K., Engelbrecht, R., & Rilett, L. (2002). Integrated control strategies for surface street and freeway systems. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1811, 92-99.
- [5] Günther, G., Coeymans, J. E., Muñoz, J. C., & Herrera, J. C. (2012). Mitigating freeway off-ramp congestion: A surface streets coordinated approach. Transportation Research-Part C, 20 (1), 112-125.
- [6] Highway Capacity Manual (2000). TRB, National Research Council, Washington, DC, 3(4), 2.
- [7] Greenshields B. (1934). A study of traffic capacity. *Proceedings of the 14th annual meeting of the Highway Research Board*.
- [8] Messmer, A. & Papageorgiou, M. (1990). METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. Traffic Engineering & Control, 31(8-9), 466-470.
- [9] Papageorgiou, M., Blossville, J.M., & Hadj-Salem, H. (1990). Modelling and real traffic control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris: Part I: Modelling. Transportation Research A: General, 24(5), 345-359.
- [10] A. Messmer. A simulation program for motorway networks. Documentation, Dynamic System and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2006

- [11] Heutinck, B. H., van den Berg, M., Hellendoorn, J., & Immers, L. H. (2006). Dynamic route guidance during maintenance works: A case study. 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems 11 (1), 380-385).
- [12] Wang, Y., Papageorgiou, M., Sarros, G., Knibbe, W.J. (2006). Feedback route guidance applied to a large-scale express ring road. *Transportation Research Record* 1965, 79-88.
- [13] Spiliopoulou A., Kontorinaki, M., Papamichail, I. & Papageorgiou, M. (2013). Real-time route diversion control at congested motorway off-ramp areas - Part I: User-optimum route guidance. *16th International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems*, The Hague, The Netherlands. Accepted.
- [14] Spiliopoulou A., Kontorinaki, M., Papamichail, I. & Papageorgiou, M. (2013). Real-time route diversion control at congested motorway off-ramp areas - Part II: Route guidance versus off-ramp closure. *16th Euro Working Group on Transportation*, Porto, Portugal. Accepted.
- [15] Vigos, G., Papageorgiou, M., Wang, Y. (2008). Real-time estimation of vehicle-count within signalized links. *Transportation Research C*, 16, 18-35.
- [16] Spiliopoulou A., Kontorinaki, M. Papageorgiou, M. & Kopelias, P. (2014). Macroscopic traffic flow model validation at congested freeway off-ramp areas. In *Transportation Research Board 93<sup>rd</sup> Annual Meeting*. Submitted.