



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΡΑΜΠΩΝ
ΕΙΣΟΔΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για
την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπό

Σπηλιοπούλου Αναστασία

XANIA 2009

Η μεταπτυχιακή διατριβή της Αναστασίας Σπηλιοπούλου εγκρίνεται από την
εξεταστική επιτροπή:

Ευάγγελος Γρηγορούδης, Επίκουρος Καθηγητής _____

Μάρκος Παπαγεωργίου, Καθηγητής _____

Ιωάννης Παπαμιχαήλ, Λέκτορας _____

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Σχημάτων	8
Κατάλογος Πινάκων.....	11
Ευχαριστίες	12
Περίληψη.....	13
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Έλεγχος κυκλοφορίας αυτοκινητοδρόμων.....	14
1.2 Παρουσίαση Προβλήματος.....	17
1.3 Δομή εργασίας.....	18
2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΡΑΜΠΩΝ	
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ	20
2.1 Περιγραφή περιοχής δικτύου ράμπας αυτοκινητοδρόμου	20
2.2 Περιοχή συγχώνευσης.....	21
2.3 Συσκευές Ελέγχου	23
2.4 Μετρήσεις και εκτιμήσεις πραγματικού χρόνου.....	23
2.5 Αλγόριθμος ελέγχου.....	24
3 ΣΥΝΟΨΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΑΜΠΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ	
ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΦΩΤΕΙΝΩΝ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΩΝ	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Τοπικές Στρατηγικές ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου	26
3.2.1 Στρατηγική ελέγχου Ζήτησης – Ικανότητας (Demand-Capacity	
Strategy).....	27
3.2.2 Στρατηγική ελέγχου ποσοστού Κατάληψης (Occupancy Strategy)....	28
3.2.3 Στρατηγική ελέγχου ALINEA	29
3.2.4 Διαχείριση ουρών στις ράμπες αυτοκινητοδρόμου (Queue Control and	
Queue Override).....	31
3.2.5 Έλεγχος χρόνου αναμονής στη ράμπα (Waiting Time Control).....	32
3.3 Πολιτικές ρύθμισης φωτεινών σηματοδοτών	36
3.3.1 Ένα όχημα ανά πράσινο (One-Car-per-Green).....	37
3.3.2 n-οχήματα ανά πράσινο (n-Cars-per-Green).....	39

3.3.3	Σταθερή περίοδος φωτεινής σηματοδότησης (Full Traffic Cycle).....	40
3.3.4	Διακριτές ροές εξόδου (Discrete Release Rates).....	40
4	ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ AIMSUN.....	42
4.1	Εισαγωγή	42
4.2	Παράμετροι εισόδου	43
4.2.1	Διάταξη δικτύου	43
4.2.2	Σενάριο ζήτησης	44
4.2.3	Έλεγχος κυκλοφορίας.....	44
4.3	AIMSUN API	45
4.4	Παράμετροι προσομοίωσης.....	45
4.4.1	Σενάριο (AIMSUN Scenario).....	46
4.4.2	Πείραμα (AIMSUN Experiment)	46
4.4.3	Επανάληψη (AIMSUN Replication)	48
4.5	Έξοδοι προσομοίωσης.....	48
5	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ	50
5.1	Εισαγωγή	50
5.2	Δίκτυο προσομοίωσης	51
5.3	Σενάριο ζήτησης	52
5.4	Εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας.....	53
5.4.1	0 ^ο σενάριο: χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.....	54
5.4.2	1 ^ο σενάριο: εφαρμογή της στρατηγική ελέγχου ALINEA	54
5.4.3	2 ^ο σενάριο: εφαρμογή ALINEA και ελέγχου υπερχειλίσης ουράς (Queue Override).....	55
5.4.4	3 ^ο σενάριο: εφαρμογή ALINEA και ελέγχου ουράς ράμπας (Queue Control).....	56
5.4.5	4 ^ο σενάριο: εφαρμογή ALINEA και ελέγχου χρόνου αναμονής (Waiting Time Control)	59
5.4.6	Εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας μέσω φωτεινών σηματοδοτών	60
5.5	Μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN.....	61
5.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης και κριτήρια αξιολόγησης.....	62
6	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	64
6.1	Σενάριο 0: χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας (No Control Case).....	66
6.2	Σενάριο 1: εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA	71

6.3	Σενάριο 2: εφαρμογή ελέγχου υπερχειλίσσης της ουράς (Queue Override).	80
6.4	Σενάριο 3: εφαρμογή ελέγχου ουράς ράμπας (Queue Control).....	84
6.5	Σενάριο 4: εφαρμογή ελέγχου χρόνου αναμονής στη ράμπα (Waiting Time Control)	94
6.6	Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	100
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	103
7.1	Σύνοψη μεταπτυχιακής διατριβής.....	103
7.2	Συμπεράσματα	103
7.3	Μελλοντικές επεκτάσεις	104
	Βιβλιογραφία.....	105

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Έλεγχος ραμπών αυτοκινητοδρόμου (ramp metering).....	16
Σχήμα 1-2 Έλεγχος του κυρίως ρεύματος του αυτοκινητοδρόμου (mainline metering).	17
Σχήμα 2-1 Περιοχή ράμπας αυτοκινητοδρόμου.....	21
Σχήμα 2-2 Θεμελιώδες διάγραμμα.....	22
Σχήμα 2-3 Περιγραφή εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο.....	24
Σχήμα 3-1 Ταξινόμηση στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας.....	25
Σχήμα 3-2 Τοπική στρατηγική ελέγχου Ζήτησης-Ικανότητας.....	28
Σχήμα 3-3 Στρατηγική τοπικού ελέγχου ALINEA.....	30
Σχήμα 3-4 Υπολογισμός του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα.....	33
Σχήμα 4-1 Αναπαράσταση λειτουργία AIMSUN API.....	45
Σχήμα 4-2 Ζώνες αλλαγής λωρίδας.....	47
Σχήμα 5-1 Διαστάσεις εξεταζόμενου δικτύου.....	51
Σχήμα 5-2 Στοιχεία εξεταζόμενου δικτύου.....	52
Σχήμα 5-3 Σενάριο ζήτησης ράμπας εισόδου και αυτοκινητοδρόμου.....	53
Σχήμα 5-4 Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA.....	55
Σχήμα 5-5 Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου υπερχείλισης ουράς (queue override).	56
Σχήμα 5-6 Εφαρμογή ελέγχου μήκους της ουράς(queue control).....	58
Σχήμα 5-7 Εφαρμογή ελέγχου χρόνου αναμονής οχημάτων στη ράμπα.....	60
Σχήμα 6-1 Ροή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου.....	65
Σχήμα 6-2 Σενάριο 0, 28 ^ο λεπτό προσομοίωσης.....	66
Σχήμα 6-3 Σενάριο, 32 ^ο λεπτό προσομοίωσης.....	66
Σχήμα 6-4 Σενάριο 0, 45 ^ο λεπτό προσομοίωσης.....	67
Σχήμα 6-5 Σενάριο 0, 45 ^ο λεπτό προσομοίωσης, μεταφορά της συμφόρησης προς τα πίσω.....	67
Σχήμα 6-6 Συνολικός χρόνος παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο (TTS), χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.....	68
Σχήμα 6-7 Μέσος, μέγιστος και ελάχιστος συνολικός χρόνος παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο (TTS), χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.....	69
Σχήμα 6-8 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , χωρίς έλεγχος κυκλοφορίας..	70

Σχήμα 6-9 Ροή εξόδου q_{out} και αριθμός οχημάτων N , χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας. .	72
Σχήμα 6-10 Ταχύτητα στην περιοχή συγχώνευσης, χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.....	72
Σχήμα 6-11 Σενάριο 1, 28° λεπτό προσομοίωσης.....	73
Σχήμα 6-12 Σενάριο 1, 45° λεπτό προσομοίωσης.....	73
Σχήμα 6-13 TTS των οχημάτων για διάφορες τιμές $\hat{N} \in [17, 27]$ veh	74
Σχήμα 6-14 TTS των οχημάτων για διάφορες τιμές $\hat{N} \in [17, 27]$ veh	74
Σχήμα 6-15 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA.....	76
Σχήμα 6-16 Ταχύτητα στην περιοχή συγχώνευσης, με εφαρμογή ALINEA.....	77
Σχήμα 6-17 Ροή οχημάτων που υπολογίζει η ALINEA και	78
Σχήμα 6-18 Ευαισθησία της τιμής της ρυθμιστικής παραμέτρου K_R για διάφορες $\hat{N}$ τιμές.....	79
Σχήμα 6-19 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και QO.....	81
Σχήμα 6-20 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα, με εφαρμογή ALINEA και QO.....	82
Σχήμα 6-21 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και QO.....	83
Σχήμα 6-22 Ροή οχημάτων που υπολογίζει ο ελεγκτής και.....	83
Σχήμα 6-23 Χρόνος υπερχείλισης για διάφορες $\hat{w}$ -τιμές.....	85
Σχήμα 6-24 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 23$ veh	87
Σχήμα 6-25 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 23$ veh	88
Σχήμα 6-26 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και QC με $\hat{w} = 23$ veh ..	88
Σχήμα 6-27 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 24$ veh ..	90
Σχήμα 6-28 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 24$ veh ..	91
Σχήμα 6-29 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και QC με $\hat{w} = 24$ veh ..	91
Σχήμα 6-30 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 25$ veh ..	92
Σχήμα 6-31 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 25$ veh ..	93

Σχήμα 6-32 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και QC με $\hat{w} = 25\text{veh}$.	93
Σχήμα 6-33 Χρόνος αναμονής κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με εφαρμογή ALINEA.	95
Σχήμα 6-34 Χρόνος αναμονής κατά της διάρκεια της προσομοίωσης με εφαρμογή WTC.	95
Σχήμα 6-35 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και WTC.	97
Σχήμα 6-36 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με εφαρμογή ALINEA και WTC.	98
Σχήμα 6-37 Χρόνος αναμονής με εφαρμογή ελέγχου χρόνου αναμονής κατά της διάρκεια της προσομοίωσης με εφαρμογή ALINEA και WTC.	99
Σχήμα 6-38 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και WTC.	99
Σχήμα 6-39 Μέσοι χρόνοι παραμονής οχημάτων στο δίκτυο (TTS) για κάθε σενάριο ελέγχου.	101
Σχήμα 6-40 Μέσοι χρόνοι υπερχείλισης της ουράς (Acc. Time) για κάθε σενάριο ελέγχου.	101

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 6-1 Συνολικός χρόνος παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο (TTS) για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.....	68
Πίνακας 6-2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για $\hat{N} = 20\text{veh}$	75
Πίνακας 6-3 Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για ALINEA και ALINEA&QO.	80
Πίνακας 6-4 Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για ALINEA και ALINEA&QC.	86
Πίνακας 6-5 Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για ALINEA και ALINEA&WTC.	96

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της εργασίας μου, κ. Ιωάννη Παπαμιχαήλ και καθ. Μάρκο Παπαγεωργίου για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, από τον Τομέα Οργάνωσης και Διοίκησης, επίκ. καθ. Ευάγγελο Γρηγορούδη καθώς και τα μέλη του Εργαστηρίου Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης για τις γνώσεις και τη βοήθεια που μου παρείχαν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν ηθικά και ιδιαίτερα την οικογένεια μου.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία αύξηση του αριθμού των οχημάτων παγκοσμίως, έχει καταστήσει την κυκλοφοριακή συμφόρηση σύννηθες φαινόμενο. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση εμφανίζεται όχι μόνο στα αστικά δίκτυα αλλά και στα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας των υποδομών. Η διεύρυνση των υπάρχοντων υποδομών και η κατασκευή νέων δεν είναι πάντα δυνατή, επομένως η έρευνα έχει στραφεί στην καλύτερη αξιοποίηση της ικανότητας των οδικών υποδομών μέσω του ελέγχου της κυκλοφορίας.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διερευνά την εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή ράμπας εισόδου αυτοκινητοδρόμου. Οι περιοχές ραμπών εισόδου αποτελούν μία περίπτωση οδικής υποδομής όπου δύο κυκλοφοριακές ροές, της ράμπας και του αυτοκινητοδρόμου, πρέπει να συγχωνευθούν σε μία. Όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση του δικτύου είναι αυξημένη και υπερβαίνει την ικανότητα ροής του κατάντη αυτοκινητοδρόμου τότε δημιουργείται συμφόρηση στην περιοχή της συγχώνευσης και παρατηρείται μείωση της ροής στο σημείο αυτό. Η διατριβή αυτή μελετά την εφαρμογή τοπικού ελέγχου, με τοποθέτηση φωτεινών σηματοδοτών στη ράμπα εισόδου και χρήση της στρατηγικής ελέγχου ALINEA με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ροής και την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο. Ένα άλλο θέμα που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή είναι η εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης των σχηματιζόμενων ουρών στη ράμπα εισόδου ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες επιπτώσεις από την εμπλοκή των οχημάτων της ουράς της ράμπας με τη ροή ενός ανάντη δικτύου, δεδομένης της περιορισμένης χωρητικότητας των ραμπών σε οχήματα. Επίσης, εξετάζεται η περίπτωση εφαρμογής ελέγχου βάσει του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα. Τα αποτελέσματα μικροσκοπικής προσομοίωσης έδειξαν ότι η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή ράμπας αυτοκινητοδρόμου βελτιώνει τις κυκλοφοριακές συνθήκες, μειώνει το χρόνο παραμονής των οχημάτων μέσα στο δίκτυο, αυξάνει τη ροή οχημάτων και αξιοποιεί κατά το μέγιστο δυνατό την ικανότητα της υποδομής, τόσο του αυτοκινητοδρόμου όσο και του διαθέσιμου χώρου στη ράμπα εισόδου.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκοινωνία ήταν πάντα μία σημαντική πτυχή του ανθρώπινου πολιτισμού. Όμως μετά το δεύτερο μισό του τελευταίου αιώνα η ταχεία αύξηση του αριθμού των οχημάτων και της κυκλοφοριακής ζήτησης δημιούργησε το φαινόμενο της συμφόρησης. Στην καλύτερη περίπτωση η κυκλοφοριακή συμφόρηση οδηγεί στη δημιουργία ουρών που συνεπάγονται καθυστερήσεις. Στη χειρότερη και πιο συνηθισμένη περίπτωση, η κυκλοφοριακή συμφόρηση οδηγεί σε υποβάθμιση της διαθέσιμης υποδομής καθώς εξυπηρετούνται λιγότερα οχήματα, συνεισφέροντας σε μια επιταχυνόμενη αύξηση της συμφόρησης που προκαλεί περεταίρω υποβάθμιση της οδικής υποδομής κ.ο.κ. Η αποτελεσματική, ασφαλής και λιγότερο ρυπογόνα μεταφορά ανθρώπων και αγαθών επιβάλλει τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων υποδομών, μέσω της κατάλληλης εφαρμογής μίας ποικιλίας μέτρων κυκλοφοριακής ρύθμισης. Αυτή η τάση καθίσταται ικανή μέσω των ραγδαίων εξελίξεων στην τεχνολογία των επικοινωνιών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών (τηλεματική), αλλά είναι φανερό ότι η αποτελεσματικότητα του ελέγχου κυκλοφορίας εξαρτάται από την αποδοτικότητα και την καταλληλότητα της μεθοδολογίας ελέγχου που εφαρμόζεται. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ασχολείται με τον έλεγχο κυκλοφορίας των αυτοκινητοδρόμων.

1.1 Έλεγχος κυκλοφορίας αυτοκινητοδρόμων

Οι αυτοκινητόδρομοι είχαν αρχικά σχεδιαστεί με σκοπό να παρέχουν απεριόριστη κινητικότητα στους χρήστες. Η συνεχόμενη και ραγδαία αύξηση του αριθμού των οχημάτων οδήγησε σταδιακά στην εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης δημιουργείται όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να εξυπηρετήσει η υποδομή και μπορεί να είναι μεμονωμένη, λόγω τυχαίων περιστατικών, ή επαναλαμβανόμενη, καθημερινά στις ώρες αιχμής.

Η λύση στο πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης δεν μπορεί να είναι απλά η επέκταση της υπάρχουσας υποδομής ή η κατασκευή νέας. Το οικονομικό

κόστος, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η έλλειψη χώρου είναι μόνο μερικές από τις αιτίες. Αντίθετα, η καλύτερη χρήση και αξιοποίηση της ικανότητας των αυτοκινητοδρόμων μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή μέτρων ελέγχου των δικτύων αυτοκινητοδρόμων.

Τα μέτρα ελέγχου κυκλοφορίας που συνήθως εφαρμόζονται στα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων 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 από τη ράμπα στον κυρίως αυτοκινητόδρομο.
- **Έλεγχος του κυρίως ρεύματος του αυτοκινητοδρόμου (*mainline metering*):** τίθεται σε λειτουργία με τοποθέτηση φωτεινών σηματοδοτών στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου και βρίσκει εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις, για παράδειγμα γέφυρες, τούνελ, κτλ.
- **Έλεγχος συνδέσμων (*link control*):** εμπεριέχει έναν αριθμό δυνατοτήτων όπως έλεγχος λωρίδων, μεταβλητά όρια ταχύτητας, οδηγίες διατήρησης πορείας εντός λωρίδας κ.α.
- **Πληροφόρηση του οδηγού και συστήματα καθοδήγησης (*driver information and guidance systems*):** πραγματοποιείται είτε χρησιμοποιώντας πινακίδες στην άκρη του αυτοκινητοδρόμου, είτε μέσω αμφίδρομης επικοινωνίας με κατάλληλα εφοδιασμένα οχήματα, και χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, για την ενημέρωση των οδηγών για ύπαρξη κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Ο έλεγχος ραμπών, Σχήμα 1-1, είναι 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:

- Αύξηση της ροής οχημάτων στο κύριο ρεύμα, λόγω της αποφυγής ή της μείωσης της κυκλοφοριακής συμφόρησης.
- Αύξηση του αριθμού των οχημάτων που θα εξυπηρετούνται λόγω της αποφυγής φραγμένων ραμπών εξόδου ή κόμβων αυτοκινητοδρόμων.
- Χρήση εφεδρικών παράλληλων αρτηριών.
- Επαρκής απόκριση σε επείγοντα περιστατικά.

- Βελτιωμένη οδική ασφάλεια εξαιτίας της μειωμένης συμφόρησης και της ασφαλέστερης συγχώνευσης της λωρίδας επιτάχυνσης με το κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου.



Σχήμα 1-1 Έλεγχος ραμπών αυτοκινητοδρόμου (ramp metering).

Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι πρόσφατες μελέτες (Papamichail et al., 2009) καταδεικνύουν ότι αποδοτικές στρατηγικές ελέγχου ραμπών εισόδου, που χρησιμοποιούν αλγορίθμους βέλτιστου ελέγχου, μπορούν να επιφέρουν θεαματικές βελτιώσεις, ακόμα και σε μεγάλου μεγέθους δίκτυα αυτοκινητοδρόμων.

Παρόμοιος με τον έλεγχο των ραμπών αυτοκινητοδρόμων είναι και ο έλεγχος του κυρίως ρεύματος του αυτοκινητοδρόμου (mainline metering), με τον οποίο ρυθμίζεται η κυκλοφοριακή ροή από ένα τμήμα του αυτοκινητοδρόμου στο επόμενο ελέγχοντας απευθείας την κυκλοφορία του κυρίως ρεύματος του αυτοκινητοδρόμου. Μία τέτοια μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως σε ειδικές περιπτώσεις όπως σε γέφυρες, τούνελ, κυκλοφοριακούς κόμβους, περιοχές έργων οδοποιίας και άλλων περιστατικών. Για παράδειγμα, έλεγχος του κυρίως ρεύματος του αυτοκινητοδρόμου εγκαταστάθηκε στις αρχές της δεκαετίας 1970 στην περιοχή διοδίων στη γέφυρα Bay μεταξύ San-Francisco και Oakland, Σχήμα 1-2. Σχετικές διερευνήσεις εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή διοδίων και σε περιοχή έργων αυτοκινητοδρόμων υπάρχουν στα Σπηλιοπούλου 2007, Spiliopoulou et al. 2008, Papageorgiou et al. 2008.



Σχήμα 1-2 Έλεγχος του κυρίως ρεύματος του αυτοκινητοδρόμου (mainline metering).

1.2 Παρουσίαση Προβλήματος

Οι περιοχές ραμπών εισόδου αυτοκινητοδρόμων, αποτελούν μία περίπτωση συγχώνευσης κυκλοφοριακών ροών κατά την οποία όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση του δικτύου είναι αυξημένη παρατηρείται εμφάνιση συμφόρησης στην περιοχή συγχώνευσης και μείωσης της ικανότητας της υποδομής. Ο έλεγχος ραμπών εισόδου αυτοκινητοδρόμων αποσκοπεί στην ομαλή, ασφαλή και αποτελεσματική είσοδο των οχημάτων από τη ράμπα στον κυρίως αυτοκινητόδρομο.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετάται η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας, πραγματικού χρόνου, σε ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμου όπου υπάρχει ράμπα εισόδου, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ροής και την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο. Ένα άλλο θέμα που εξετάζεται σε αυτήν τη διατριβή και σχετίζεται με την εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε ράμπες αυτοκινητοδρόμων είναι ο αναπόφευκτος σχηματισμός ουρών στη ράμπα, καθώς δεν επιτρέπει σε όλα τα οχήματα που μπαίνουν στη ράμπα να εισέλθουν στον αυτοκινητόδρομο άμεσα. Εάν η ουρά στη ράμπα υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο μήκος, υπάρχει περίπτωση να εμπλακεί με την ανάντη κυκλοφοριακή ροή, για παράδειγμα κάποιου αστικού δικτύου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού δοκιμάζεται η εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης ουρών παράλληλα με τον έλεγχο κυκλοφορίας ράμπας αυτοκινητοδρόμου. Επίσης, ο χρόνος αναμονής των οχημάτων στη ράμπα είναι ένα επιπλέον θέμα που εξετάζεται στην

παρούσα διατριβή. Η εφαρμογή διαφόρων σεναρίων ελέγχου κυκλοφορίας στο εξεταζόμενο δίκτυο συγκρίνεται με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας για να καταδειχτεί εάν και κατά πόσο οι κυκλοφοριακές συνθήκες ενός δικτύου αυτοκινητοδρόμου, υπό συμφόρηση, μπορούν να βελτιωθούν με εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών.

1.3 Δομή εργασίας

Στο 2^ο Κεφάλαιο της εργασίας, πραγματοποιείται μία εισαγωγή σχετικά με τα στοιχεία που συνθέτουν τον έλεγχο κυκλοφορίας ραμπών αυτοκινητοδρόμου και στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύονται οι συνηθέστερες τοπικές στρατηγικές ελέγχου και οι διαθέσιμες πολιτικές ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών. Για τη μελέτη ενός φυσικού φαινομένου, όπως η κυκλοφοριακή ροή, χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί κάποιο μοντέλο. Τα μαθηματικά πρότυπα που περιγράφουν την κυκλοφοριακή ροή μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βαθμό ανάλυσης της περιγραφής. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα μικροσκοπικά μοντέλα τα οποία παρακολουθούν την ατομική κίνηση καθενός οχήματος ξεχωριστά καθώς ταξιδεύει μέσα στο δίκτυο. Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται τα μεσοσκοπικά μοντέλα τα οποία παρακολουθούν την κίνηση ομάδων οχημάτων που έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Η τρίτη κατηγορία, τα μακροσκοπικά μοντέλα, περιγράφουν την κυκλοφοριακή ροή σαν ένα ρευστό που χαρακτηρίζεται από μακροσκοπικές μεταβλητές. Στην παρούσα μελέτη, για την μοντελοποίηση της κυκλοφορίας χρησιμοποιείται το λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης AIMSUN, του οποίου η περιγραφή πραγματοποιείται στο 4^ο Κεφάλαιο. Το 5^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης του εξεταζόμενου δικτύου αυτοκινητοδρόμου δηλαδή την περιγραφή του δικτύου, το σενάριο ζήτησης, τα σενάρια ελέγχου κυκλοφορίας, τις παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης, τις παραμέτρους εξόδου της προσομοίωσης καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης των εφαρμοζόμενων στρατηγικών. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το δίκτυο που εξετάζεται, 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 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΡΑΜΠΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ

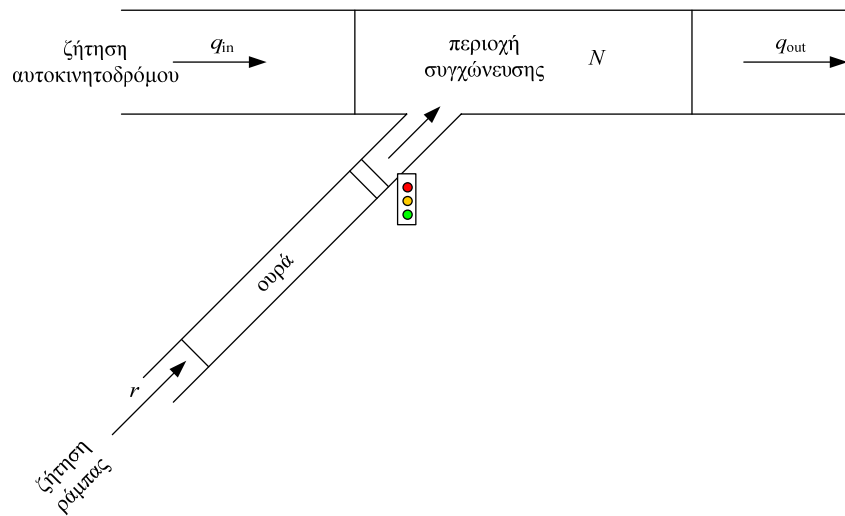
Ο έλεγχος των ραμπών αυτοκινητοδρόμου πραγματοποιείται με την τοποθέτηση φωτεινών σηματοδοτών στις ράμπες εισόδου των αυτοκινητοδρόμων, οι οποίοι ρυθμίζουν τη ροή οχημάτων από τη ράμπα στον κυρίως αυτοκινητόδρομο. Ο σκοπός του ελέγχου ραμπών είναι η μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης των αυτοκινητοδρόμων και η ευκολότερη και ασφαλέστερη συγχώνευση των δύο κυκλοφοριακών ροών, της ράμπας και του αυτοκινητοδρόμου. Ανάλογα με τη μορφολογία της ράμπας εισόδου μπορεί να υπάρχουν μία ή δύο λωρίδες στις οποίες εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας. Όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 αναλυτικά, υπάρχει πλήθος στρατηγικών ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου καθώς και πολιτικών ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που περιλαμβάνει ο έλεγχος κυκλοφορίας ραμπών αυτοκινητοδρόμου. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται η περιοχή δικτύου ράμπας-αυτοκινητοδρόμου και η περιοχή συγχώνευσης, παρουσιάζονται οι συσκευές ελέγχου, ο τρόπος λήψης μετρήσεων και εκτιμήσεων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και η μέθοδος εφαρμογής των αλγορίθμων-στρατηγικών ελέγχου των ραμπών αυτοκινητοδρόμου.

2.1 Περιγραφή περιοχής δικτύου ράμπας αυτοκινητοδρόμου

Το Σχήμα 2-1 παρουσιάζει μία ράμπα εισόδου μέσω της οποίας εισέρχεται κυκλοφοριακή ροή στον αυτοκινητόδρομο. Ο αυτοκινητόδρομος χωρίζεται σε δύο τμήματα, ένα ανάντη της ράμπας και ένα κατάντη της ράμπας όπου πραγματοποιείται η συγχώνευση των δύο κυκλοφοριακών ροών. Η κυκλοφοριακή ζήτηση που εμφανίζεται στην αρχή της ράμπας εισόδου, η οποία προέρχεται είτε από κάποιο αστικό δίκτυο είτε από κάποιον άλλο αυτοκινητόδρομο, αναμιγνύεται με τη ροή του κυρίως αυτοκινητοδρόμου. Όταν η συνολική ροή ράμπας και αυτοκινητοδρόμου ξεπεράσει την ικανότητα του κατάντη αυτοκινητοδρόμου τότε η δημιουργία κυκλοφοριακής συμφόρησης στην περιοχή συγχώνευσης των δύο κυκλοφοριακών ροών είναι αναπόφευκτη. Η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας στις ράμπες εισόδου

οδηγεί σε βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου και σχηματισμό ουρών στις ράμπες εισόδου.

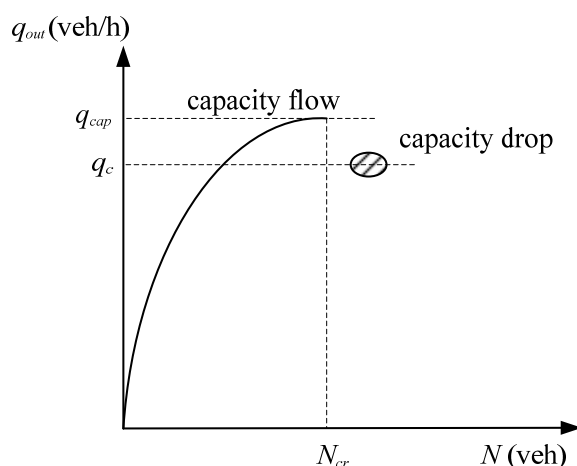


Σχήμα 2-1 Περιοχή ράμπας αυτοκινητοδρόμου.

2.2 Περιοχή συγχώνευσης

Το Σχήμα 2-2, δείχνει ένα συνηθισμένο διάγραμμα (θεμελιώδες διάγραμμα) ροής οχημάτων-πυκνότητας, που ισχύει στις περιοχές συγχώνευσης των αυτοκινητοδρόμων, όπου q_{out} είναι η ροή που εξέρχεται από την περιοχή συγχώνευσης και N είναι ο αριθμός των οχημάτων που περιλαμβάνονται στην περιοχή συγχώνευσης. Όταν το N είναι μικρό, οι διαμάχες κατά τη συγχώνευση των οχημάτων είναι σπάνιες και σύντομες, ενώ η εξερχόμενη ροή q_{out} είναι αντίστοιχα χαμηλή. Όταν το N αυξάνεται, οι διαμάχες συγχώνευσης αυξάνονται, καθώς επίσης και η ροή εξόδου q_{out} . Η αύξηση της ροής εξόδου q_{out} συνεχίζεται μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή N_{cr} , στην οποία λαμβάνει μία μέγιστη τιμή ίση με την ικανότητα του κατάντη αυτοκινητοδρόμου q_{cap} . Περαιτέρω αύξηση του N πέρα από το N_{cr} , έχει ως αποτέλεσμα οι διαμάχες συγχώνευσης να γίνονται πιο έντονες, οδηγώντας σε σημαντικές επιβραδύνσεις των οχημάτων και αντίστοιχες επιταχύνσεις οι οποίες οδηγούν στη μείωση της ροής εξόδου σε μικρότερες τιμές q_c , όπου $q_{cap} - q_c$ είναι η μείωση της ικανότητας της υποδομής λόγω της συμφόρησης. Σημειώνεται ότι οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν και στην περίπτωση που αντί για τον αριθμό

οχημάτων N στην περιοχή συγχώνευσης χρησιμοποιηθεί το ποσοστό κατάληψης o στο σημείο της περιοχής συγχώνευσης που εμφανίζεται συμφόρηση για πρώτη φορά, καθώς τα ποσά αυτά είναι ανάλογα.



Σχήμα 2-2 Θεμελιώδες διάγραμμα.

Πραγματικές μετρήσεις πεδίου από περιοχές συγχώνευσης ραμπών εισόδου-αυτοκινητοδρόμων έδειξαν ότι η κυκλοφοριακή συμφόρηση μπορεί να εμφανιστεί για διάφορες τιμές q_{cap} σε διαφορετικές ημέρες, ακόμα και κάτω από παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες (Eleftheriadou, et al., 1995; Lorenz and Eleftheriadou, 2001; Cassidy and Rudjanakanoknad, 2005). Οι διαφορές των τιμών q_{cap} είναι ακόμα πιο μεγάλη όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι διαφορετικές (Keen et al., 1986). Αντίθετα, η κρίσιμη τιμή της πυκνότητας N_{cr} έχει αποδειχθεί αρκετά σταθερή (Cassidy and Rudjanakanoknad, 2005) ακόμα και κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Keen, et al., 1986; Papageorgiou, et al., 2006). Τα ευρήματα αυτά οδηγούν στην εισαγωγή ενός σχεδίου ελέγχου το οποίο θα ενεργεί στην εισερχόμενη ροή της ράμπας με σκοπό να διατηρεί (όταν αυτό είναι απαραίτητο) τον αριθμό οχημάτων στη περιοχή συγχώνευσης, N , κοντά στην κρίσιμη τιμή, N_{cr} , μεγιστοποιώντας έτσι τη ροή εξόδου, q_{out} , και βελτιστοποιώντας την αποδοτικότητα της υποδομής. Αυτή είναι μία συνηθισμένη πρακτική ελέγχου ραμπών, με εφαρμογή της τοπικής στρατηγικής ελέγχου ALINEA (Papageorgiou et al., 1991;1997).

Πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο της μείωσης της ικανότητας της υποδομής είναι σημαντικό για την αύξηση της ροής εξόδου μέσω της εφαρμοζόμενης στρατηγικής ελέγχου. Εάν δεν εμφανίζεται το φαινόμενο μείωσης της ικανότητας της υποδομής κατάντη της περιοχής συγχώνευσης, ο μόνος λόγος για να εφαρμοστεί έλεγχος ραμπών εισόδου μπορεί να είναι η βελτίωση της ασφάλειας εξαιτίας της πιο ομαλής συγχώνευσης των δύο κυκλοφοριακών ροών.

2.3 *Συσκευές Ελέγχου*

Η ρύθμιση της κυκλοφοριακής ροής που εισέρχεται από τη ράμπα εισόδου στον αυτοκινητόδρομο μπορεί να γίνει μέσω συσκευών ελέγχου, δηλαδή τους φωτεινούς σηματοδότες. Οι φωτεινοί σηματοδότες τοποθετούνται, συνήθως, σε όλες τις λωρίδες της ράμπας και θα πρέπει να βρίσκονται αρκετά μέτρα πριν από την περιοχή συγχώνευσης ώστε τα οχήματα να μπορούν να επιταχύνουν ικανοποιητικά για την ομαλή είσοδο τους στον αυτοκινητόδρομο. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι φωτεινοί σηματοδότες τοποθετούνται μόνο σε ένα μέρος των λωρίδων της ράμπας ενώ η ροή οχημάτων στις άλλες λωρίδες είναι ελεύθερη (π.χ. λωρίδες για λεωφορεία, οχήματα με πολλούς επιβάτες (HOV) κ.α.).

2.4 *Μετρήσεις και εκτιμήσεις πραγματικού χρόνου*

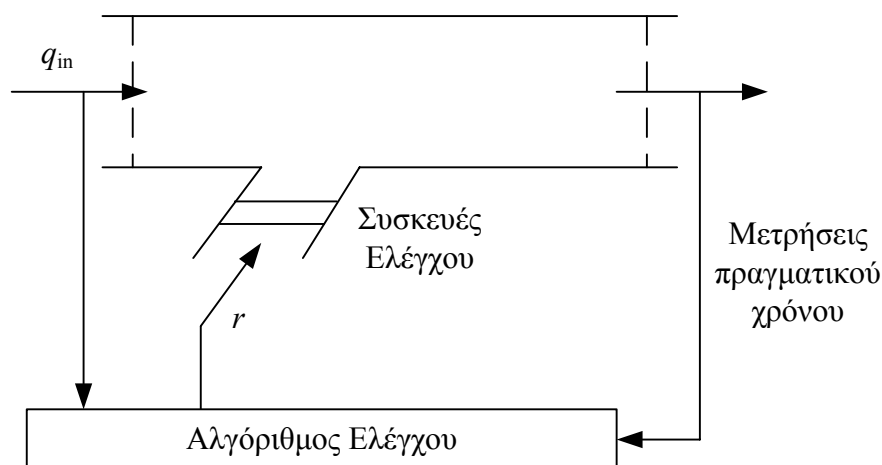
Η εφαρμογή μίας στρατηγικής ελέγχου με σκοπό τη διατήρηση του αριθμού οχημάτων N κοντά στην κρίσιμή τιμή N_{cr} , όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, απαιτεί τη διαθεσιμότητα μετρήσεων ή εκτιμήσεων του αριθμού οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης σε πραγματικό χρόνο. Αν και η ποσότητα αυτή μπορεί να ληφθεί απευθείας από video-αισθητήρες, σε πραγματικές εφαρμογές πεδίου, αυτός ο τρόπος μπορεί να είναι δαπανηρός ή δύσκολος. Μία εναλλακτική επιλογή είναι η εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο της τιμής N με χρήση περιορισμένου αριθμού φωρατών (Vigos et al.. 2008).

Οι φωρατές αποτελούνται από ένα ορθογώνιο πλαίσιο, τοποθετούνται σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας και με τη χρήση του φαινομένου της επαγωγής, προσδιορίζεται η παρουσία ενός οχήματος καθώς αυτό περνά πάνω από το φωρατή. Ο αριθμός των

οχημάτων που περνούν από ένα συγκεκριμένο φωρατή, κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, δίνει την κυκλοφοριακή ροή της συγκεκριμένης λωρίδας. Μετρώντας το ποσοστό του χρόνου που ο φωρατής είναι κατειλημένος λαμβάνεται το ποσοστό κατάληψης του δρόμου. Επίσης με την τοποθέτηση δύο φωρατών σε σειρά είναι δυνατή η μέτρηση της ταχύτητας των διερχόμενων οχημάτων.

2.5 Αλγόριθμος ελέγχου

Ο αλγόριθμος ελέγχου λαμβάνει μετρήσεις ή εκτιμήσεις πραγματικού χρόνου του αριθμού οχημάτων, N , ή του ποσοστού κατάληψης, o , του αυτοκινητοδρόμου και οδηγεί τις συσκευές ελέγχου με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρήσει $N \approx N_{cr}$ ή $o \approx o_{cr}$ τα οποία μεγιστοποιούν την εξερχόμενη από την περιοχή συγχώνευσης ροή. Την πρακτική αυτή ακολουθεί η στρατηγική ελέγχου ALINEA, Σχήμα 2-3. Γενικά, οι στρατηγικές ελέγχου ενεργοποιούνται κάθε περίοδο ελέγχου T (όπου $T \in [20s, 60s]$) και υπολογίζουν την τιμή της ροής $r(k)$ (σε veh/h) που πρέπει να εφαρμοστεί την επόμενη περίοδο ελέγχου. Στη συνέχεια, η εφαρμογή της ροής $r(k)$ που θα εξέλθει από τη ράμπα εισόδου πραγματοποιείται μέσω της κατάλληλης ενεργοποίησης των συσκευών ελέγχου (φωτεινών σηματοδοτών), με χρήση διαφόρων πολιτικών. Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφονται οι διάφορες στρατηγικές ελέγχου και οι πιο συνηθισμένες πολιτικές ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών.



Σχήμα 2-3 Περιγραφή εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο.

3 ΣΥΝΟΨΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΑΜΠΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΦΩΤΕΙΝΩΝ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Οι στρατηγικές ελέγχου ραμπών διακρίνονται στις στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου, που περιλαμβάνουν τις συντονισμένες στρατηγικές, και στις στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου, οι οποίες περιλαμβάνουν αντίστοιχα τις τοπικές στρατηγικές και τις στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1 Ταξινόμηση στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας.

Οι στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου (fixed-time ramp metering strategies), χρησιμοποιούν ιστορικά δεδομένα ζήτησης, τα επεξεργάζονται με απλά στατιστικά μοντέλα και προσδιορίζουν το σταθερό τρόπο λειτουργίας των φωτεινών σηματοδοτών κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων της ημέρας. Τα ιστορικά δεδομένα μπορεί να δώσουν μια ιδέα της ζήτησης που αναμένεται αλλά δεν είναι πάντα ακριβή. Η κυκλοφοριακή ζήτηση μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της ημέρας ή μπορεί να μεταβάλλεται από ημέρα σε ημέρα. Η ζήτηση μπορεί επίσης να αλλάξει μακροπρόθεσμα. Τέλος, οι στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν σε απρόβλεπτες καταστάσεις και άλλες διαταραχές που

μπορεί να συμβούν στο δίκτυο (ατυχήματα, καιρικές συνθήκες κ.α.), με αποτέλεσμα είτε την υπερφόρτωση του αυτοκινητοδρόμου είτε τη δημιουργία μεγάλων ουρών στις ράμπες.

Οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου (real-time ramp metering strategies), χρησιμοποιούν μετρήσεις κυκλοφορίας πραγματικού χρόνου για να υπολογίσουν κατάλληλες ροές οχημάτων στις ράμπες. Οι μετρήσεις λαμβάνονται από φωρατές. Οι φωρατές είναι μαγνητικοί ανιχνευτές που τοποθετούνται σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας στο επιθυμητό σημείο του δικτύου και μπορούν να πάρουν μετρήσεις του αριθμού διερχόμενων οχημάτων, του ποσοστού κατάληψης του οδοστρώματος και της ταχύτητας των οχημάτων. Οι στρατηγικές ελέγχου ενεργοποιούνται σε κάθε χρονικό διάστημα T , η τιμή του οποίου κυμαίνεται από 20 έως 60 sec. Πιο αναλυτικά, στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές των μετρήσεων ποσοστού κατάληψης ή ροής οχημάτων για την περίοδο που πέρασε, ώστε να υπολογιστεί, μέσω της κατάλληλης στρατηγικής ελέγχου, η ροή οχημάτων που θα εφαρμοστεί την επόμενη χρονική περίοδο.

Οι στρατηγικές ελέγχου της ροής ραμπών που χρησιμοποιούν μετρήσεις πραγματικού χρόνου διακρίνονται σε **τοπικές στρατηγικές** και σε **στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου**. Οι πρώτες χρησιμοποιούν μετρήσεις που λαμβάνονται από τη γύρω περιοχή της ράμπας εισόδου, ενώ οι δεύτερες χρησιμοποιούν μετρήσεις από φωρατές που είναι τοποθετημένοι σε μια πιο ευρεία περιοχή του αυτοκινητοδρόμου προκειμένου να αποφασίσουν για τον έλεγχο πολλαπλών ραμπών εντός της ίδιας περιοχής. Οι στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου μπορεί να είναι πιο αποδοτικές από τις τοπικές στρατηγικές όταν υπάρχουν πολλαπλά σημεία με κυκλοφοριακή συμφόρηση στον αυτοκινητόδρομο ή περιορισμένη ικανότητα ‘αποθήκευσης’ οχημάτων στις ράμπες. Στο δίκτυο που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5, εφαρμόζεται τοπικός έλεγχος.

3.2 Τοπικές Στρατηγικές ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου

Οι πιο συνηθισμένες τοπικές στρατηγικές ελέγχου ραμπών, που χρησιμοποιούν μετρήσεις πραγματικού χρόνου, είναι η στρατηγική Ζήτησης – Ικανότητας, η στρατηγική ποσοστού κατάληψης και η στρατηγική ελέγχου ALINEA. Η στρατηγική Ζήτησης – Ικανότητας και η στρατηγική ποσοστού κατάληψης είναι στρατηγικές

απόρριψης διαταραχών που βασίζονται σε μετρήσεις ροής οχημάτων και ποσοστού κατάληψης στο κύριο ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου ανάντη της ράμπας. Αντιθέτως η στρατηγική ALINEA είναι ένας ελεγκτής με ανατροφοδότηση (τύπου I), που βασίζεται σε μετρήσεις ποσοστού κατάληψης στο κύριο ρεύμα κατάντη της ράμπας. Αναλυτικές πληροφορίες για τις κυριότερες τοπικές στρατηγικές ελέγχου ραμπών βρίσκονται στο Papageorgiou and Papamichail, 2008.

3.2.1 Στρατηγική ελέγχου Ζήτησης – Ικανότητας (Demand-Capacity Strategy)

Η στρατηγική ελέγχου Ζήτησης – Ικανότητας (DC) (Masher et al. 1975) δίνεται από τη σχέση

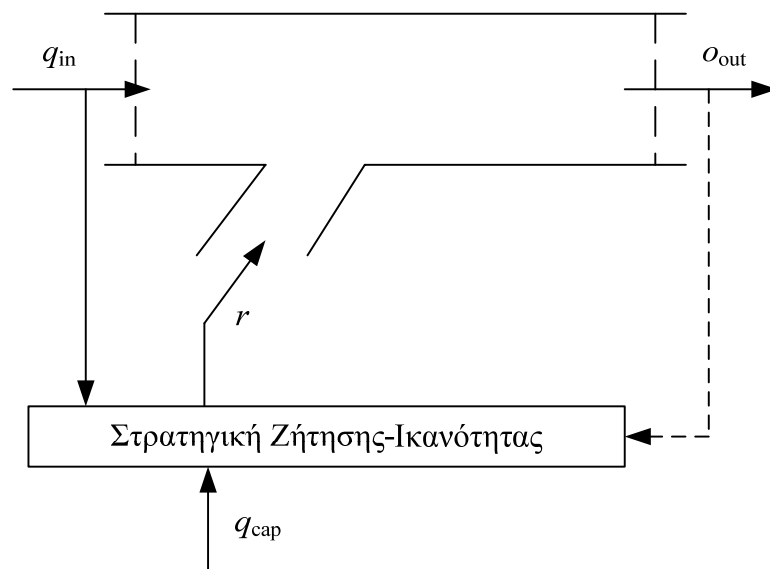
$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k-1) & \text{αν } o_{in}(k-1) \leq o_{cr} \\ r_{min} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.1)$$

όπου $k = 1, 2, \dots$ είναι η διακριτή χρονική περίοδος, $r(k)$ είναι η ροή οχημάτων στη ράμπα που θα εφαρμοστεί στην επόμενη χρονική περίοδο k , $q_{in}(k-1)$ είναι η τελευταία μέτρηση της ροής οχημάτων του ανάντη αυτοκινητοδρόμου, $o_{in}(k-1)$ είναι η τελευταία μέτρηση του ποσοστού κατάληψης του ανάντη αυτοκινητοδρόμου, q_{cap} είναι η ικανότητα ροής του κατάντη αυτοκινητόδρομου, r_{min} είναι η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή ροής οχημάτων στη ράμπα, o_{cr} είναι η κατάντη κρίσιμη τιμή του ποσοστού κατάληψης για την οποία η ροή οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο γίνεται μέγιστη.

Η στρατηγική DC (Σχήμα 3-2) ουσιαστικά προσθέτει στην ανάντη ροή $q_{in}(k-1)$ τόση ροή οχημάτων που προέρχονται από τη ράμπα, όση χρειάζεται για να επιτευχθεί η υποτιθέμενα γνωστή κατάντη ικανότητα του αυτοκινητοδρόμου. Αν εντούτοις, για κάποιο λόγο η τελευταία ανάντη μέτρηση του ποσοστού κατάληψης $o_{in}(k-1)$ υπερβεί την κρίσιμη τιμή, για παράδειγμα λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης, η ροή οχημάτων στη ράμπα $r(k)$ μειώνεται στην ελάχιστη επιτρεπτή

τιμή της ροής οχημάτων $r_{\min}$, έτσι ώστε να αποφευχθεί ή να αντιμετωπιστεί η συμφόρηση που έχει δημιουργηθεί.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η στρατηγική ελέγχου DC είναι μία πολιτική απόρριψης διαταραχών ανοιχτού βρόχου και είναι γενικά γνωστό ότι είναι αρκετά ευαίσθητη σε διάφορες μη-μετρήσιμες διαταραχές (για παράδειγμα αργά οχήματα, δυσκολίες συγχώνευσης κ.α.).



Σχήμα 3-2 Τοπική στρατηγική ελέγχου Ζήτησης-Ικανότητας.

3.2.2 Στρατηγική ελέγχου ποσοστού Κατάληψης (Occupancy Strategy)

Η στρατηγική ελέγχου ποσοστού κατάληψης (OS) (Masher et al. 1975) βασίζεται στην ίδια φιλοσοφία με την στρατηγική DC αλλά στηρίζεται στην εκτίμηση του q_{in} με βάση το ποσοστό κατάληψης, γεγονός που μπορεί να επιφέρει μείωση του κόστους εφαρμογής της στρατηγικής κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Πιο αναλυτικά, αν η αριστερή πλευρά του θεμελιώδους διαγράμματος (Σχήμα 2-2) προσεγγιστεί με μία ευθεία γραμμή, έχουμε

$$q_{in} = \frac{v_f \cdot o_{in}}{g} \quad (3.2)$$

όπου v_f είναι η ελεύθερη ταχύτητα στον αυτοκινητόδρομο. Αντικαθιστώντας την Εξίσωση 3.2 στο πάνω μέρος της Εξίσωσης 3.1, προκύπτει

$$r(k) = K_1 - K_2 \cdot o_{in}(k-1) \quad (3.3)$$

όπου $K_1 = q_{cap}$, $K_2 = v_f / g$ και το $r(k)$ περικόπτεται αν ξεπερνά το εύρος $[r_{min}, r_{max}]$, όπου r_{max} είναι η εκτιμώμενη ικανότητα της ράμπας. Συνεπώς η στρατηγική OS (Εξίσωση 3.3) είναι μία στρατηγική ανοιχτού βρόχου που βασίζεται στο ποσοστό κατάληψης και είναι ακόμα πιο ανακριβής από την στρατηγική DC λόγω της γραμμικής υπόθεσης για το θεμελιώδες διάγραμμα και της αβεβαιότητας για την ακριβή τιμή των v_f και g .

3.2.3 Στρατηγική ελέγχου ALINEA

Η ALINEA (Papageorgiou et al. 1991) είναι μία στρατηγική ελέγχου ραμπών εισόδου με ανατροφοδότηση (Σχήμα 3-3) και δίνεται από τη σχέση

$$r(k) = r(k-1) + K_R [\hat{o} - o_{out}(k-1)] \quad (3.4)$$

όπου $k = 1, 2, \dots$ είναι η διακριτή χρονική περίοδος, $r(k)$ είναι η ροή οχημάτων στη ράμπα που θα εφαρμοστεί τη νέα χρονική περίοδο k , $K_R > 0$ είναι η παράμετρος κέρδους και $\hat{o}$ είναι μία σταθερή επιθυμητή τιμή για το κατάντη ποσοστό κατάληψης του αυτοκινητοδρόμου. Συνήθως, αλλά όχι απαραίτητα, αυτή η επιθυμητή τιμή ορίζεται ίση με την κρίσιμη τιμή της κατάληψης o_{cr} για την οποία ο κατάντη αυτοκινητόδρομος αποκτά τη μέγιστη ροή οχημάτων q_{cap} (βλέπε Σχήμα 2-2). Πρέπει να σημειωθεί ότι η ίδια ακριβώς εξίσωση ισχύει εάν αντί για το ποσοστό κατάληψης o χρησιμοποιηθεί ο αριθμός οχημάτων στην αντίστοιχη περιοχή του αυτοκινητοδρόμου N , καθώς τα ποσά αυτά είναι ανάλογα.

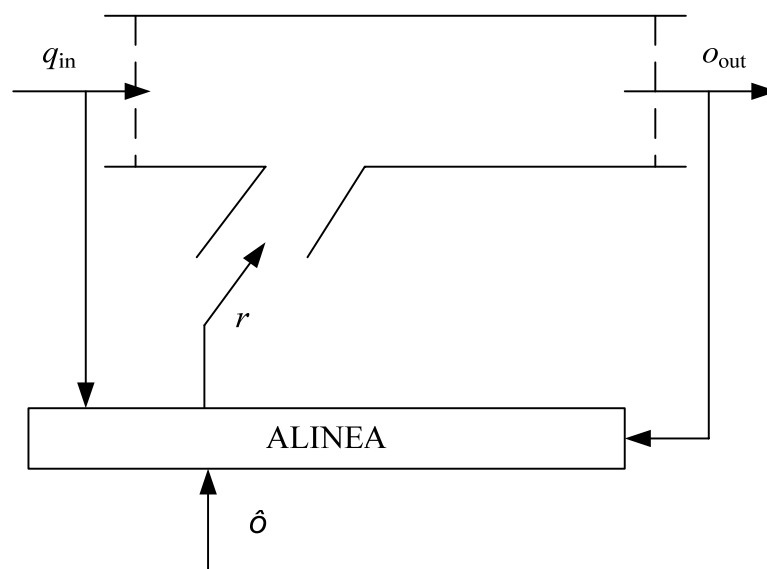
Η στρατηγική ελέγχου ALINEA είναι ένας ελεγκτής τύπου I, και ως εκ τούτου, σε μια στάσιμη κατάσταση, δηλαδή όταν η ροή q_{in} ανάντη του αυτοκινητοδρόμου παραμένει σταθερή, έχουμε $\hat{o} = o_{out}(k-1)$, το οποίο προκύπτει από την Εξίσωση 3.4,

ανεξάρτητα από την τιμή της ανάντη ροής q_{in} η οποία δεν χρησιμοποιείται από τη στρατηγική. Επίσης η στρατηγική ALINEA δεν είναι ευαίσθητη σε αλλαγές της τιμής της ρυθμιστικής παραμέτρου K_R , όπως έχουν δείξει μετρήσεις πεδίου και προσομοίωσης, που σημαίνει ότι η ανάγκη ρύθμισης της τιμής της παραμέτρου αυτής είναι χαμηλή.

Η τιμή της ροής οχημάτων $r(k)$ που προκύπτει από την Εξίσωση 3.4 περικλύπεται εάν ξεπερνάει ένα εύρος τιμών $[r_{min}, r_{max}]$, όπου r_{max} είναι η ικανότητα ροής της ράμπας. Στην επόμενη χρονική περίοδο η ροή αυτή χρησιμοποιείται ως $r(k-1)$ στην Εξίσωση 3.3, έτσι ώστε να αποφευχθεί το γνωστό ‘wind up effect’ των ελεγκτών τύπου I.

Η ALINEA ενεργεί ομαλά, ακόμα και σε μικρές αποκλίσεις $\hat{o} - o_{out}(k-1)$, με αποτέλεσμα την τελική σταθεροποίηση τη κυκλοφοριακής ροής κοντά στην επιθυμητή τιμή. Σχετικές αξιολογήσεις, σε πολλές χώρες του κόσμου, της επίδοσης της ALINEA σε σύγκριση με τις στρατηγικές ελέγχου DC και OCC έδειξαν την καθαρή υπεροχή της ALINEA αναφορικά με την αποτελεσματικότητα ελέγχου κυκλοφορίας (Papageorgiou et al., 1997).

Εκτός από την βασική μορφή, υπάρχει ένας αριθμός επεκτάσεων και τροποποιήσεων της ALINEA (Smaragdis and Papageorgiou, 2003).



Σχήμα 3-3 Στρατηγική τοπικού ελέγχου ALINEA.

3.2.4 Διαχείριση ουρών στις ράμπες αυτοκινητοδρόμου (Queue Control and Queue Override)

Η εφαρμογή ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου είναι ένα αξιόλογο εργαλείο για τον έλεγχο κυκλοφορίας σε αυτοκινητοδρόμους και δίκτυα αυτοκινητοδρόμων. Εντούτοις, ο έλεγχος των ραμπών έχει ως αποτέλεσμα την προσωρινή δημιουργία ουρών οχημάτων στις ράμπες εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας συνεπάγεται ότι κάποια οχήματα που πλησιάζουν τον αυτοκινητόδρομο μέσω των ραμπών εισόδου πιθανόν να μην μπορέσουν να εισέλθουν στον αυτοκινητόδρομο άμεσα. Εάν η προσωρινή ουρά οχημάτων που έχει δημιουργηθεί υπερβεί ένα συγκεκριμένο μήκος, μπορεί να εμπλακεί με την ανάντη κυκλοφοριακή ροή.

Ένα γνωστό μέτρο αντιμετώπισης της υπερχειλίσης της ουράς είναι η εφαρμογή της *στρατηγικής ελέγχου υπερχειλίσης ουράς* (queue override), όπου ένας φωρατής τοποθετείται στην είσοδο της ράμπας και όταν η μέτρηση του ποσοστού κατάληψης ξεπεράσει ένα καθορισμένο κατώφλι (π.χ. 50%) ο έλεγχος της ράμπας (π.χ. μέσω της στρατηγικής ελέγχου ALINEA) καταργείται ή τίθεται ίσος με μία υψηλή ροή στη ράμπα $r'_{\max}$, δηλαδή

$$r'(k) = \begin{cases} r'_{\max} & \text{εάν } o \geq 50\% \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.5)$$

Η τακτική αυτή αποτελεί μία μάλλον απότομη λογική για τη διαχείριση της ουράς των ραμπών, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μία ταλάντωση του μήκους της ουράς και επομένως σε μικρή αξιοποίηση του αποθηκευτικού χώρου της ράμπας.

Ένα εναλλακτικό ή συμπληρωματικό μέτρο για την διαχείριση των ουρών είναι η απευθείας εφαρμογή *ελέγχου του μήκους της ουράς στη ράμπα* (queue control). Η βασική ιδέα του ελέγχου ραμπών είναι ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή πραγματικού χρόνου, ο οποίος επιτρέπει τη μέγιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου της ράμπας εισόδου, ενώ ταυτόχρονα εμποδίζει την εμπλοκή της ουράς της ράμπας με το ανάντη δίκτυο κυκλοφορίας. Ο ελεγκτής αυτός έχει την ακόλουθη μορφή

$$r'(k) = d(k-1) - \frac{1}{T} [\hat{w} - w(k)] \quad (3.6)$$

όπου $w(k)$ είναι το μήκος της ουράς στη ράμπα τη χρονική στιγμή $k \cdot T$, $\hat{w}(k)$ είναι η επιθυμητή τιμή του μήκους της ουράς, $d(k-1)$ είναι η ζήτηση στην είσοδο της ράμπας, και $r'(k)$ είναι η υπολογιζόμενη ροή οχημάτων που θα εισέλθει στον αυτοκινητόδρομο την επόμενη χρονική περίοδο. Η τιμή της ροής οχημάτων $r'(k)$ που προκύπτει από την Εξίσωση 3.6 περικλύπεται εάν ξεπερνάει ένα εύρος τιμών $[r'_{\min}, r'_{\max}]$

Η εφαρμογή τέτοιου είδους ελέγχου ράμπας, απαιτεί τη διαθεσιμότητα μετρήσεων του αριθμού οχημάτων $w(k)$ που περιέχονται στην ράμπα και της ζήτησης $d(k)$ στην είσοδο της ράμπας σε πραγματικό χρόνο.

Είναι προφανές, ότι η εφαρμογή ελέγχου ουράς στη ράμπα εισόδου δεν έχει νόημα εάν η ζήτηση στη ράμπα είναι χαμηλή, καθώς θα προκαλούσε τη δημιουργία ουράς χωρίς λόγο. Στην πραγματικότητα, η τελική ροή οχημάτων $R(k)$ που θα εφαρμοστεί τελικά δίνεται από τη σχέση

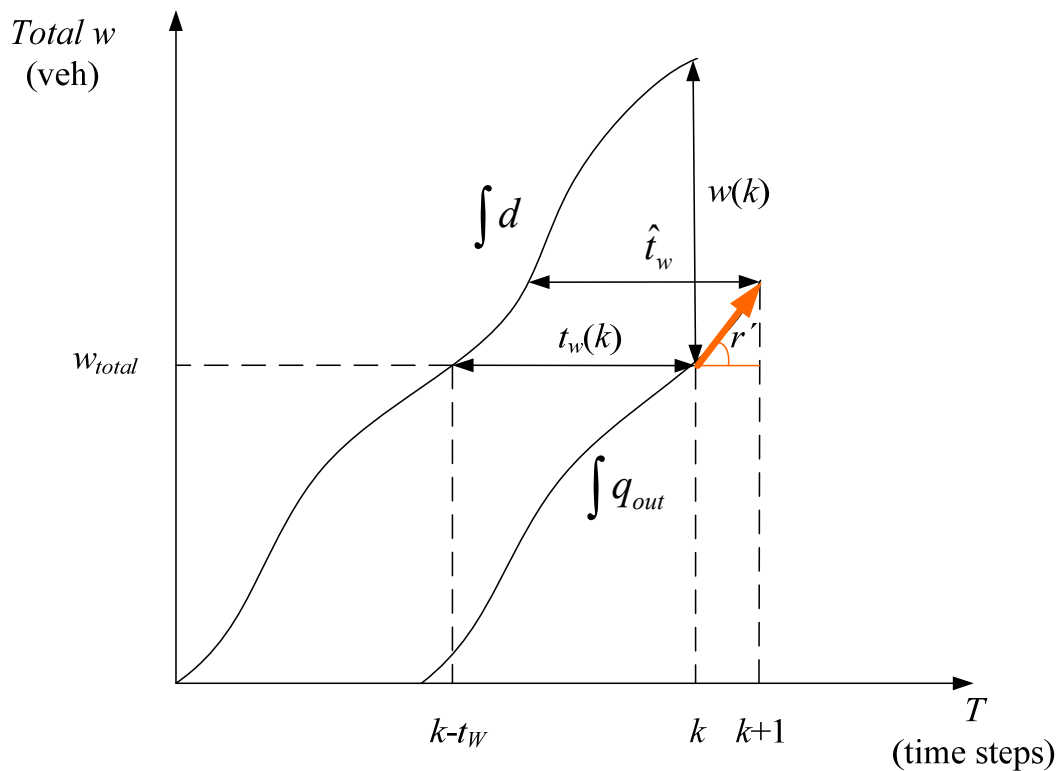
$$R(k) = \max \{r(k), r'(k)\} \quad (3.7)$$

όπου $r(k)$ είναι η ροή που υπολογίζει η στρατηγική ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου που χρησιμοποιείται και $r'(k)$ είναι η ροή οχημάτων που εκτιμάται είτε μέσω του ελέγχου υπερχειλίσσης ουράς (queue override) είτε μέσω του ελέγχου του μήκους της ουράς στη ράμπα (queue control). Επιλέγοντας τη μέγιστη μεταξύ των δύο τιμών εξασφαλίζεται ότι ο έλεγχος της ουράς στη ράμπα ενεργοποιείται μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο και μόνο στο βαθμό που χρειάζεται εγγυώντας πλήρη εκμετάλλευση του αποθηκευτικού χώρου οχημάτων και βέλτιστη διαχείριση αυτού.

3.2.5 Έλεγχος χρόνου αναμονής στη ράμπα (Waiting Time Control)

Η εφαρμογή στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας στις ράμπες εισόδου αυτοκινητοδρόμων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ουρών οχημάτων στη ράμπα εισόδου, όπως αναφέρθηκε ήδη, που πιθανόν να ξεπερνούν τη διαθέσιμη χωρητικότητα των ραμπών. Ένα άλλο αποτέλεσμα της εφαρμογής των στρατηγικών ελέγχου ραμπών είναι η αναπόφευκτη αναμονή των οχημάτων στις σχηματιζόμενες

ουρές. Η αναμονή μεγάλης διάρκειας στις ουρές των ραμπών, μπορεί να προκαλέσει εκνευρισμό στους οδηγούς των οχημάτων, και να οδηγήσει σε παραβατικές συμπεριφορές, το οποίο είναι κάθε άλλο παρά επιθυμητό. Ένα μέτρο για την αποφυγή του μεγάλου χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα είναι η εφαρμογή του *ελέγχου χρόνου αναμονής* (Waiting Time Control), που υπολογίζει το χρόνο αναμονής των οχημάτων t_w , κάθε χρονική περίοδο T , και όταν ο χρόνος αναμονής ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο μέγιστο επιθυμητό χρόνο αναμονής $\hat{t}_w$ τότε ο έλεγχος της ράμπας (π.χ. μέσω της στρατηγικής ελέγχου ALINEA) καταργείται και τίθεται ίσος με τη ροή που μπορεί οδηγήσει σε χρόνο αναμονής μικρότερο ή ίσο με το μέγιστο επιθυμητό χρόνο αναμονής $\hat{t}_w$.



Σχήμα 3-4 Υπολογισμός του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα.

Συγκεκριμένα, κάθε περίοδο T υπολογίζεται αθροιστικά ο αριθμός των οχημάτων που έχουν εισέλθει στη ράμπα $\int d$ και ο αριθμός των οχημάτων που έχουν εξέλθει από τους φωτεινούς σηματοδότες της ράμπας $\int q_{out}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4. Σε μία χρονική στιγμή k , η διαφορά $\int d - \int q_{out}$ δίνει τον αριθμό οχημάτων που βρίσκονται πάνω στην ράμπα αυτή τη χρονική στιγμή, δηλαδή το

μέγεθος της ουράς $w(k)$, ενώ το σύνολο των οχημάτων w_{total} που βρίσκονται τη χρονική στιγμή k στην έξοδο της ράμπας χρειάστηκαν $t_w(k)$ χρόνο για να διέλθουν από την είσοδο της ράμπας στην έξοδο, όπως δείχνει το Σχήμα 3-4. Το χρονικό διάστημα $t_w(k)$ αντιστοιχεί στο χρόνο αναμονής στην ουράς της ράμπας. Σύμφωνα με αυτή τη στρατηγική, την επόμενη χρονική στιγμή $k+1$, ο χρόνος αναμονής δεν πρέπει να ξεπεράσει το μέγιστο επιθυμητό χρόνο αναμονής $\hat{t}_w$, δηλαδή θα πρέπει

$$t_w(k) + T < \hat{t}_w \quad (3.8)$$

Εάν η Εξίσωση 3.8 ικανοποιείται, τότε η ροή $r_l'(k)$, που ορίζει η στρατηγική για την επόμενη χρονική περίοδο, τίθεται ίση με μία χαμηλή τιμή, $r'_{\min}$ ώστε να μην τεθεί σε λειτουργία εφόσον ο χρόνος αναμονής $t_w(k)$ είναι μικρός. Αντίθετα, εάν η Εξίσωση 3.8 δεν ικανοποιείται, τότε η ροή που θα πρέπει να διέλθει από τους φωτεινούς σηματοδότες, την επόμενη χρονική περίοδο, ώστε ο χρόνος αναμονής t_w να μην υπερβεί τον επιθυμητό $\hat{t}_w$, δίνεται από τη σχέση

$$r_l'(k) \geq \sum_{k=k+1-t_w(k)}^{k+1-\hat{t}_w/T} d(k) \quad (3.9)$$

όπου $d(k)$ είναι η ροή οχημάτων που εισέρχεται στη ράμπα τη χρονική στιγμή k . Η ροή $r_l'(k)$ που ορίζει η στρατηγική ελέγχου του χρόνου αναμονής στη ράμπα περικόπτεται εάν υπερβαίνει μία μέγιστη τιμή $r'_{\max}$.

Ένας επιπλέον έλεγχος που πραγματοποιείται αφορά το μέγεθος της ουράς w τη χρονική στιγμή k . Εάν το μέγεθος της ουράς είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τη μέγιστη τιμή ροής $r'_{\max}$ που μπορεί να ορίσει η στρατηγική, με αποτέλεσμα ο χρόνος αναμονής των οχημάτων στη ράμπα να αναμένεται πολύ μεγαλύτερος από τον επιθυμητό όταν αυτά εξέλθουν από τη ράμπα, τότε η ροή $r'(k)$ τίθεται ίση με τη μέγιστη ροή $r'_{\max}$, για την επόμενη περίοδο ελέγχου. Η εξίσωση που περιγράφει τα παραπάνω είναι

$$r'(k) = r'_{\max} \quad \text{εάν} \quad \frac{w(k)}{r'_{\max}} > \hat{t}_w \quad (3.10)$$

Συνοπτικά, η ροή $r'(k)$ που ορίζει η στρατηγική ελέγχου του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$r'_l(k) = \begin{cases} r'_{\min} & \text{εάν } t_w(k) + T < \hat{t}_w \\ \sum_{k=k+1-t_w(k)}^{k+1-\hat{t}_w/T} d(k) & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

και (3.11)

$$r'(k) = \begin{cases} r'_{\max} & \text{εάν } \frac{w(k)}{r'_{\max}} > \hat{t}_w \\ r'_l(k) & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Είναι προφανές, ότι η εφαρμογή του ελέγχου χρόνου αναμονής στη ράμπα εισόδου δεν έχει νόημα εάν το μήκος της ουράς στη ράμπα είναι αρκετά μικρό και οι χρόνοι αναμονής μικροί. Για το λόγο αυτό, η τελική ροή οχημάτων $R(k)$ που θα εφαρμοστεί τελικά στους φωτεινούς σηματοδότες δίνεται από τη σχέση

$$R(k) = \max \{r(k), r'(k)\} \quad (3.12)$$

όπου $r(k)$ είναι η ροή που υπολογίζει η στρατηγική ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου που χρησιμοποιείται και $r'(k)$ είναι η ροή οχημάτων που εκτιμάται μέσω του ελέγχου χρόνου αναμονής (Waiting Time Control). Επιλέγοντας τη μέγιστη μεταξύ των δύο τιμών εξασφαλίζεται ότι ο έλεγχος του χρόνου αναμονής εφαρμόζεται μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο, δηλαδή όταν ο χρόνος αναμονής των οχημάτων στη ράμπα ξεπερνάει το μέγιστο επιθυμητό χρόνο αναμονής.

Σημειώνεται ότι, η στρατηγική του χρόνου αναμονής μπορεί να λειτουργεί παράλληλα με ένα συνδυασμό εφαρμογής στη ράμπα μίας στρατηγικής ελέγχου ραμπών και μίας στρατηγικής διαχείρισης του μήκους των ουρών. Σε αυτήν την περίπτωση η τελική ροή που θα διέλθει από του φωτεινούς σηματοδότες, δίνεται από τη σχέση

$$R(k) = \max \{r(k), r'(k), r''(k)\} \quad (3.13)$$

όπου $r''(k)$ είναι η ροή που υπολογίζει η στρατηγική διαχείρισης ουρών.

3.3 Πολιτικές ρύθμισης φωτεινών σηματοδοτών

Οι στρατηγικές ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου συνήθως παραδίδουν την τιμή της ροής $r(k)$ (σε veh/h) που πρόκειται να εφαρμοστεί κατά την επόμενη περίοδο ελέγχου k , όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το επόμενο βήμα της εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας στη ράμπα είναι η κατάλληλη ρύθμιση των φωτεινών σηματοδοτών έτσι ώστε να επιτρέπεται σε $T \cdot r(k)/3,600$ οχήματα να διέλθουν από τη ράμπα στον αυτοκινητόδρομο στα επόμενα T s, όπου T είναι η περίοδος ελέγχου. Στην πράξη, υπάρχει ένας αριθμός εναλλακτικών μεθόδων με σκοπό την εφαρμογή της ροής $r(k)$, σε κάθε μία από τις οποίες απαντώνται θετικά και αρνητικά σημεία, όπως παρουσιάζεται στην συνέχεια.

Οι φωτεινοί σηματοδότες λειτουργούν με βάση ένα κυκλοφοριακό κύκλο c (σε δευτερόλεπτα) ο οποίος αποτελείται από τις επόμενες επακόλουθες φάσεις:

1. Πράσινη φάση $G(s)$,
2. Κίτρινη φάση $A(s)$,
3. Κόκκινη φάση $R(s)$, και
4. Κόκκινη-κίτρινη φάση $A'(s)$ (αυτή η φάση εφαρμόζεται σε ορισμένες χώρες ενώ η αλλαγή γίνεται από την κόκκινη στην πράσινη φάση) και ισχύει ότι

$$c = G + A + R + A' \quad (3.14)$$

Οι φάσεις κίτρινη A και κόκκινη-κίτρινη A' , έχουν μία σταθερή διάρκεια (ανεξάρτητα της τιμής της ροής οχημάτων που πρόκειται να εφαρμοστεί). Σε κάποιες εφαρμογές, μία ή και οι δύο φάσεις δεν εφαρμόζονται (δηλαδή, $A = 0$ ή $A' = 0$).

Για δεδομένα $G(s)$, c η εφαρμοζόμενη ροή στην ράμπα μπορεί να εκτιμηθεί ως

$$r = S \cdot G / c \quad (3.15)$$

όπου S (σε οχήματα ανά ώρα) είναι η ικανότητα ροής της ράμπας, συνήθως ίση με $\lambda_r \cdot 1,800 \text{ veh/h}$ και λ_r είναι ο αριθμός των λωρίδων της ράμπας που εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας.

Οι διάφορες πολιτικές ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών χρησιμοποιούν διαφορετικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των $G(s)$, c που είναι απαραίτητος για την εφαρμογή της καθορισμένης, από την στρατηγική ελέγχου, ροής $r(k)$.

Κάθε στρατηγική ελέγχου ορίζει μία ελάχιστη επιτρεπτή τιμή της ροής $r_{\min}$, τέτοια ώστε $r(k) \geq r_{\min}$. Εάν επιλεγεί $r_{\min} = 0$, τότε μπορεί να οδηγήσει στο κλείσιμο της ράμπας, το οποίο συνήθως δεν είναι επιθυμητό. Συνηθισμένες $r_{\min}$ τιμές είναι 200...400 veh/h. Αναλυτικές πληροφορίες για τις κυριότερες πολιτικές ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών βρίσκονται στο Papageorgiou and Papamichail, 2008.

3.3.1 Ένα όχημα ανά πράσινο (One-Car-per-Green)

Στην πολιτική *ένα όχημα ανά πράσινο*, η πράσινη φάση G είναι σταθερή, για παράδειγμα σε μία τιμή ίση με 2 s, έτσι ώστε να επιτρέπεται ακριβώς σε ένα όχημα να περνάει σε κάθε κύκλο. Συνήθως, η πολιτική σηματοδότησης ανακοινώνεται στους οδηγούς μέσω μία σταθερής πινακίδας η οποία παρουσιάζει το μήνυμα 'ένα όχημα ανά πράσινο' ή παρόμοιο μήνυμα.

Σύμφωνα με την πολιτική αυτή, μόνο ο κύκλος c χρειάζεται να υπολογιστεί, και η διάρκεια της κόκκινης φάσης προκύπτει απευθείας από την Εξίσωση 3.14 Πρέπει να σημειωθεί ότι ακριβώς ένα όχημα εξέρχεται της ράμπας από κάθε λωρίδα σε κάθε κύκλο c . Για ένα ορισμένο $r_{\min}$, ο μέγιστος επιτρεπτός κύκλος προκύπτει από την εξίσωση

$$c_{\max} = \frac{3,600 \cdot \lambda_r}{r_{\min}} \quad (3.16)$$

ο οποίος μπορεί να στρογγυλοποιηθεί ώστε να προκύψει μία ακέραια τιμή (σε s).

Εντούτοις, η κόκκινη φάση δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από μία προεπιλεγμένη τιμή έτσι ώστε να αποφευχθεί η όποια σύγχυση των οδηγών. Υποθέτοντας ότι η σχέση $G + A + R + A' \geq R_{\min}$ θα πρέπει να ισχύει πάντα, προκύπτει

μία αντίστοιχη, ελάχιστη, επιτρεπόμενη τιμή μέσω της Εξίσωσης 3.14 (με $G = 2\text{ s}$ και $A = A' = 0$),

$$c_{\min} = 2 + R_{\min} \quad (3.17)$$

Μία συγκεκριμένη τιμή ροής στη ράμπα r , λαμβάνεται από την στρατηγική ελέγχου, και μετατρέπεται, σε πραγματικό χρόνο, σε κύκλο c ως εξής,

$$c = \frac{3,600 \cdot \lambda_r}{r} \quad (3.18)$$

Πριν την τελική εφαρμογή, ο υπολογισμένος κύκλος c

- Μπορεί να στρογγυλοποιηθεί στην επόμενη ακέραια τιμή (εάν απαιτείται), και
- Πρέπει να περικοπεί εάν υπερβαίνει ένα διάστημα τιμών $[c_{\min}, c_{\max}]$.

Το βασικό πλεονέκτημα της πολιτικής ένα όχημα ανά πράσινο είναι ότι απελευθερώνει ένα (ή λ_r) οχήματα κάθε φορά και όχι ομάδες οχημάτων το οποίο μπορεί να διαταράξει την κυρίως κυκλοφορία καθώς συγχωνεύονται με αυτή. Το βασικό μειονέκτημα της πολιτικής αυτής είναι ότι περιορίζει σημαντικά το διαθέσιμο εύρος ροών της ράμπας εξαιτίας του περιορισμού $R_{\min}$. Συγκεκριμένα, η μέγιστη εφαρμόσιμη ροή στη ράμπα $r_{\max}$ προκύπτει από

$$r_{\max} = \frac{3,600 \cdot \lambda_r}{(2n + R_{\min})} \quad (3.19)$$

Πιθανοί τρόποι να απαλειφθεί το μειονέκτημα αυτό είναι:

- Η χρήση περισσότερων λωρίδων ελέγχου στη ράμπα. Στην περίπτωση αυτή το λ_r , και επομένως το $r_{\max}$ θα έχουν ανάλογα μεγαλύτερες τιμές.
- Η αποφυγή όλων των μη-πράσινων φάσεων όταν η οριζόμενη ροή $r(k)$ ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο κατώφλι.

3.3.2 n-οχήματα ανά πράσινο (n-Cars-per-Green)

Το αναφερόμενο μειονέκτημα της πολιτικής *ένα όχημα ανά πράσινο* μπορεί εν μέρει να αντιμετωπιστεί επιτρέποντας ένα προκαθορισμένο αριθμό οχημάτων n , π.χ. $n=2$, οχημάτων να εξέλθουν ανά πράσινη φάση, το οποίο μπορεί να ανακοινωθεί με χρήση μίας πινακίδας που να ενημερώνει τους οδηγούς (π.χ. ‘*δύο οχήματα ανά πράσινο*’). Σε αυτή την περίπτωση έχουμε $G = 2n(s)$, και, παρόμοια με πριν, προκύπτουν τα όρια του κύκλου

$$c_{\max} = \frac{n \cdot 3,600 \cdot \lambda_r}{r_{\min}} \quad (3.20)$$

$$c_{\min} = 2n + R_{\min} \quad (3.21)$$

Η μετατροπή, σε πραγματικό χρόνο της προς εφαρμογή τιμής ροής r σε κύκλο c πραγματοποιείται μέσω

$$c = \frac{n \cdot 3,600 \cdot \lambda_r}{r} \quad (3.22)$$

με εφαρμογή στρογγυλοποίησης προς τα πάνω και περικοπής όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

Επομένως, με την πολιτική αυτή ελευθερώνονται n (ή $n \lambda_r$) οχήματα κάθε φορά, δηλαδή μία μικρή ομάδα οχημάτων. Από την άλλη πλευρά, η μέγιστη εφαρμόσιμη τιμή ροής στη ράμπα τώρα γίνεται

$$r_{\max} = \frac{n \cdot 3,600 \cdot \lambda_r}{(2n + R_{\min})} \quad (3.23)$$

Παρόλα αυτά, ίσως είναι ωφέλιμο ακόμα και στην περίπτωση αυτή να αποφευχθούν οι μη πράσινες φάσεις, όπως προτάθηκε προηγουμένως, ώστε να μειωθούν ακόμα περισσότερο οι περιττές καθυστερήσεις ελέγχου.

3.3.3 Σταθερή περίοδος φωτεινής σηματοδότησης (Full Traffic Cycle)

Σύμφωνα με την πολιτική αυτή, ο κυκλοφοριακό κύκλος c είναι πάντα ίσος με την περίοδο ελέγχου T , επομένως μόνο η πράσινη φάση G χρειάζεται να υπολογιστεί, ενώ η κόκκινη φάση R προκύπτει απευθείας από την Εξίσωση 3.15. Για μία δεδομένη τιμή $r_{\min}$ έχουμε

$$G_{\min} = \frac{r_{\min} \cdot T}{S} \quad (3.24)$$

το οποίο θα πρέπει να στρογγυλοποιηθεί στην κοντινότερη ακέραια τιμή. Από την άλλη πλευρά, ο περιορισμός ελάχιστου κοκκίνου $R_{\min}$ οδηγεί σε μέγιστο πράσινο

$$G_{\max} = T - R_{\min} \quad (3.25)$$

Η μετατροπή, σε πραγματικό χρόνο, της οριζόμενης ροής r στη ράμπα σε αντίστοιχη πράσινη φάση G γίνεται ως εξής

$$G = \frac{r \cdot T}{S} \quad (3.26)$$

το οποίο τελικά θα στρογγυλοποιηθεί στον κοντινότερο ακέραιο και θα περικοπεί εάν υπερβαίνει ένα διάστημα τιμών $[G_{\min}, G_{\max}]$.

Το πλεονέκτημα της πολιτικής αυτής είναι ότι συνήθως η μέγιστη εφαρμόσιμη τιμή ροής στη ράμπα $r_{\max}$ είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες πολιτικές. Από την άλλη πλευρά, αυτή η πολιτική απελευθερώνει όλα τα οχήματα σε μία και μόνο πράσινη φάση το οποίο μπορεί να διαταράξει τη ροή στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου.

3.3.4 Διακριτές ροές εξόδου (Discrete Release Rates)

Αυτή η πολιτική ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών είναι ένα είδος ‘συμβιβασμού’ μεταξύ των πολιτικών *ένα όχημα ανά πράσινο* και *σταθερής περιόδου σηματοδότησης*, σε μια προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν τα μειονεκτήματα και των

δύο. Ένα διάστημα τιμών $[r_{\min}, r_{\max}]$ επιτρεπόμενης ροής στη ράμπα ορίζεται, όπου το $r_{\max}$ μπορεί να επιλεγθεί κοντά στην ικανότητα ροής της ράμπας S για μέγιστο εύρος ελέγχου. Ένας αριθμός N διακριτών ροών εξόδου $r_p \in [r_{\min}, r_{\max}]$, $p = 1, \dots, N$, ορίζεται, π.χ. κατά ένα ισαπέχοντα τρόπο

$$r_p = r_{\min} + \frac{p-1}{N-1}(r_{\max} - r_{\min}), \quad p = 1, \dots, N \quad (3.27)$$

και οι οριζόμενες από τη στρατηγική ελέγχου ροές r στη ράμπα στρογγυλοποιούνται στην κοντινότερη διαθέσιμη τιμή ροής r_p . Για κάθε διακριτή τιμή ροής r_p , ορίζεται ένα αντίστοιχο ζεύγος τιμών (πλάνο) $\Pi_p = \{c_p, G_p\}$, το οποίο αποτελείται από ένα συγκεκριμένο κύκλο c_p και μία πράσινη φάση G_p , τα οποία προκαθορίζονται.

4 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ AIMSUN

4.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), περιλαμβάνει τον μικροσκοπικό προσομοιωτή κυκλοφορίας οδικών δικτύων AIMSUN και το περιβάλλον προσομοίωσης AIMSUN NG. Ο προσομοιωτής αυτός αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο σχεδιασμού και αξιολόγησης κυκλοφοριακών συστημάτων και στρατηγικών ελέγχου, καθώς έχει τη δυνατότητα της δοκιμής νέων συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας που βασίζονται είτε σε παραδοσιακές τεχνολογίες, είτε στην εφαρμογή ευφυών συστημάτων συγκοινωνίας.

Ο προσομοιωτής AIMSUN ακολουθεί μία μικροσκοπική προσέγγιση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στο περιβάλλον AIMSUN NG. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά κάθε οχήματος στο δίκτυο μοντελοποιείται ενώ αυτό ταξιδεύει μέσα στο δίκτυο, σύμφωνα με διάφορα μοντέλα συμπεριφοράς οχημάτων. Το AIMSUN είναι ένας προσομοιωτής που συνδυάζει διακριτές και συνεχείς καταστάσεις. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν κάποια στοιχεία του συστήματος (οχήματα, φωρατές κ.α.) των οποίων η κατάσταση αλλάζει περιοδικά ανά καθορισμένα χρονικά διαστήματα και υπάρχουν επίσης στοιχεία (φωτεινοί σηματοδότες, σημεία εισόδου κ.α.) που η κατάσταση τους αλλάζει σε συγκεκριμένες στιγμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Γενικά το AIMSUN μπορεί να απεικονίσει με λεπτομέρεια ένα οδικό δίκτυο και έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσει τα περισσότερα από τα στοιχεία που υπάρχουν σε πραγματικά οδικά δίκτυα όπως φωτεινούς σηματοδότες, φωρατές, πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων (VMS) κ.α.

Τα στοιχεία εισόδου που χρειάζεται ο προσομοιωτής είναι ένα σενάριο προσομοίωσης (Aimsun Scenario) και ένα σύνολο παραμέτρων που ορίζουν το πείραμα (Aimsun Experiment). Το σενάριο αποτελείται από την περιγραφή του δικτύου, τα σχέδια ρύθμισης της κυκλοφορίας και τη ζήτηση στις εισόδους του δικτύου. Οι παράμετροι προσομοίωσης είναι κάποιες σταθερές τιμές (χρόνος προσομοίωσης, περίοδοι συλλογής στατιστικών κ.α.) που περιγράφουν το πείραμα, και κάποιες μεταβλητές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση των

μοντέλων (χρόνοι αντίδρασης, ζώνες αλλαγής λωρίδας κτλ.). Οι έξοδοι που παρέχει το AIMSUN είναι μια συνεχής γραφική αναπαράσταση της επίδοσης του οδικού δικτύου, στατιστικά στοιχεία που αφορούν όλο το δίκτυο ή μέρος αυτού (ροή οχημάτων, ταχύτητα, χρόνοι ταξιδιού, καθυστερήσεις κ.α.) και δεδομένα που συλλέγονται από φωρατές σε διάφορα σημεία του δικτύου (αριθμός οχημάτων, ποσοστό κατάληψης, ταχύτητα κ.α.). Αναλυτικές πληροφορίες για τη λειτουργία του μικροσκοπικού προσομοιωτή AIMSUN, βρίσκονται στο TTS-Transport Simulation Systems, 2006.

4.2 Παράμετροι εισόδου

Η μικροσκοπική προσομοίωση χαρακτηρίζεται από το υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας με το οποίο μοντελοποιείται το σύστημα. Η ποιότητα του μοντέλου εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα και την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου, δηλαδή της διάταξης του δικτύου, του σεναρίου ζήτησης και του ελέγχου κυκλοφορίας.

4.2.1 Διάταξη δικτύου

Ένα μοντέλο οδικού δικτύου αποτελείται από έναν αριθμό τμημάτων δρόμου, μίας κατεύθυνσης, με συγκεκριμένες ιδιότητες που επηρεάζουν τον τρόπο κίνησης των οχημάτων. Τα τμήματα δρόμου συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους (διασταυρώσεις), οι οποίοι μπορεί να περιλαμβάνουν διαφορετικά χαρακτηριστικά κυκλοφορίας. Επίσης στο μοντέλο μπορεί να περιέχονται φωρατές, τοποθετημένοι στο επιθυμητό σημείο του δικτύου και με ικανότητα λήψης διάφορων μετρήσεων (αριθμός οχημάτων, ποσοστό κατάληψης, ταχύτητα, πυκνότητα κ.α.), ενώ το μοντέλο μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα στοιχεία που απαντώνται σε οδικά δίκτυα. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει στις περισσότερες ιδιότητες των στοιχείων που συνθέτουν το δίκτυο.

4.2.2 Σενάριο ζήτησης

Η πληροφορία που περιλαμβάνει ένα σενάριο ζήτησης αφορά τη ροή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου και τα ποσοστά αλλαγής κατεύθυνσης σε κάθε κόμβο. Οι τιμές αυτές ορίζονται από το χρήστη για κάθε διαφορετικό τύπο οχήματος, βάσει μιας πειραματικής υπόθεσης. Τα οχήματα παράγονται και εισάγονται στο δίκτυο από τα τμήματα εισόδου, ακολουθώντας μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιεί ως μέση τιμή τη ροή οχημάτων στα τμήματα εισόδου που έχει ήδη οριστεί. Η κατανομή που χρησιμοποιεί εξορισμού το AIMSUN είναι η εκθετική κατανομή. Ο χρήστης όμως μπορεί να επέμβει και εδώ.

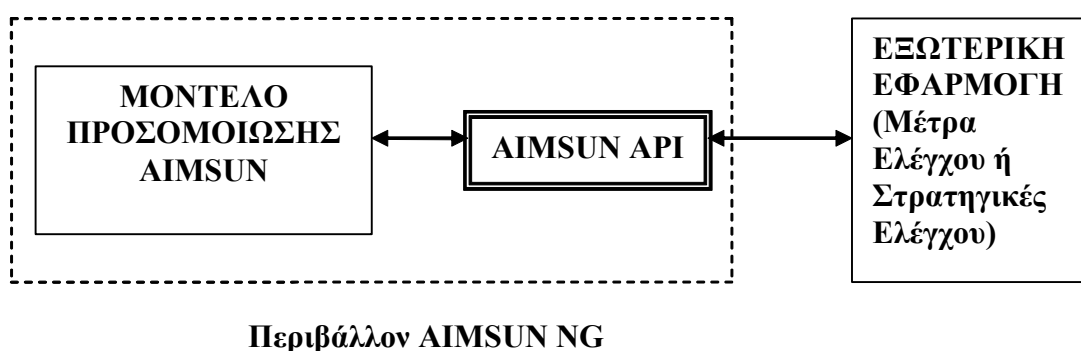
4.2.3 Έλεγχος κυκλοφορίας

Ο προσομοιωτής AIMSUN διαθέτει διάφορους τρόπους ελέγχου κυκλοφορίας. Ο έλεγχος κυκλοφορίας σε κόμβους του δικτύου εφαρμόζεται μέσω μίας προσέγγισης που βασίζεται σε κυκλοφοριακές φάσεις όπου ο κύκλος σε κάθε κόμβο χωρίζεται σε φάσεις, όπου κάθε φάση περιέχει ένα συγκεκριμένο σύνολο φωτεινών σηματοδοτών που λειτουργούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, έχουν δηλαδή κυκλοφοριακή προτεραιότητα ταυτόχρονα. Οι μονάδες για τον καθορισμό των φάσεων σε ένα σχέδιο ελέγχου είναι τα δευτερόλεπτα. Η διάρκεια κάθε φάσης καθορίζει τη διάρκεια του πρασίνου του συνόλου των φωτεινών σηματοδοτών που έχουν αντιστοιχιστεί με τη φάση αυτή.

Η ρύθμιση του τρόπου λειτουργίας των ομάδων σημάτων γίνεται με βάση κάποιο σχέδιο ελέγχου. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει παραπάνω από ένα σταθερά σχέδια ελέγχου κυκλοφορίας και να τα ενεργοποιεί σε διαφορετικές στιγμές της προσομοίωσης ή να χρησιμοποιεί ένα εξωτερικό σχέδιο ελέγχου, επεμβαίνοντας στον τρόπο λειτουργίας των φωτεινών σηματοδοτών σε πραγματικό χρόνο προσομοίωσης. Αυτό είναι εφικτό μέσω του λογισμικού AIMSUN API του οποίου η περιγραφή θα γίνει στη συνέχεια.

4.3 AIMSUN API

Το AIMSUN API (Application Programming Interface) επεκτείνει τις λειτουργίες του προσομοιωτή καθώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με τον προσομοιωτή AIMSUN κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να δοκιμάσει και να αξιολογήσει οποιαδήποτε εξωτερική εφαρμογή, για παράδειγμα κάποια στρατηγική ελέγχου, που χρειάζεται πρόσβαση σε εσωτερικά δεδομένα του AIMSUN ή/και που απαιτεί τη δυναμική αλλαγή της κατάστασης τους.



Σχήμα 4-1 Αναπαράσταση λειτουργία AIMSUN API.

Το AIMSUN API (Σχήμα 4-1) τοποθετείται, από λειτουργική άποψη, ανάμεσα στο μοντέλο προσομοίωσης AIMSUN και την εξωτερική εφαρμογή που ορίζεται από το χρήστη. Υπάρχουν δηλαδή δύο τύποι επικοινωνίας. Από τη μια μεριά υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του AIMSUN και του AIMSUN API, που πραγματοποιείται μέσα από το περιβάλλον AIMSUN NG, και από την άλλη μεριά μεταξύ του AIMSUN API και της εξωτερικής εφαρμογής, που καθορίζεται από το χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

4.4 Παράμετροι προσομοίωσης

Οι πληροφορίες που απαιτούνται για την προετοιμασία και την εκτέλεση της προσομοίωσης βρίσκονται μέσα στο Σενάριο (AIMSUN Scenario), το Πείραμα (AIMSUN Experiment) και την Επανάληψη (AIMSUN Replication).

4.4.1 Σενάριο (AIMSUN Scenario)

Το Σενάριο περιλαμβάνει δεδομένα για το σενάριο ζήτησης στις εισόδους του δικτύου, τις κυκλοφοριακές ρυθμίσεις και τα σχέδια ελέγχου, για τις στατιστικές πληροφορίες που θα συλλέγονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, και εδώ καθορίζεται το αρχείο του AIMSUN API που χρησιμοποιείται, και μέσω του οποίου πραγματοποιείται η επικοινωνία του χρήστη με τον προσομοιωτή σε πραγματικό χρόνο προσομοίωσης.

4.4.2 Πείραμα (AIMSUN Experiment)

Το Πείραμα περιέχει κυρίως πληροφορίες για την μοντελοποίηση της κίνησης των οχημάτων. Τα βασικά μοντέλα κίνησης των οχημάτων είναι το *μοντέλο ακολουθίας οχημάτων* (Car-Following model) και το *μοντέλο αλλαγής λωρίδας* (Lane-Changing model), τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια. Επίσης στο Πείραμα ορίζεται το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, οι χρόνοι αντίδρασης των οχημάτων, η κατανομή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου κ.α.

4.4.2.1 Μοντέλο ακολουθίας οχημάτων (Car-Following model)

Το *μοντέλο ακολουθίας οχημάτων* δεν περιλαμβάνει γενικές παραμέτρους, που να ισχύουν για όλο το σύστημα, αλλά περιλαμβάνει παραμέτρους των οποίων η τιμή επηρεάζεται από τοπικές παραμέτρους ανάλογα με τον 'τύπο του οδηγού' (π.χ. αποδεκτά όρια ταχύτητας του οχήματος), τη γεωμετρία του τμήματος του δικτύου (όριο ταχύτητας στο συγκεκριμένο τμήμα, όριο ταχύτητας στις στροφές, κ.α.), την επιρροή των οχημάτων στις γειτονικές λωρίδες κ.α.

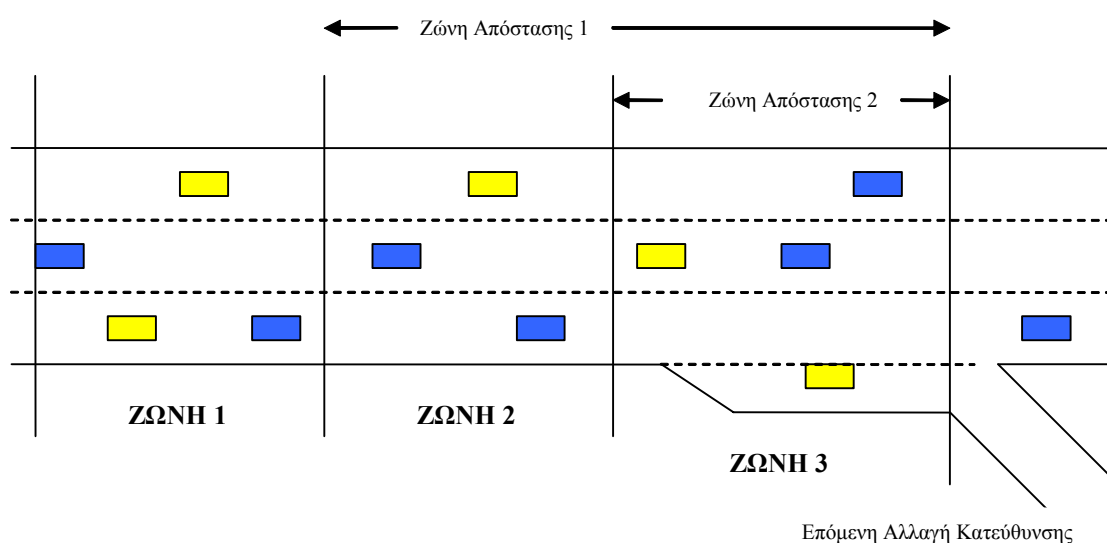
Βασικά, το *μοντέλο ακολουθίας οχημάτων* αποτελείται από δύο στοιχεία, την επιτάχυνση και την επιβράδυνση. Το πρώτο αντιπροσωπεύει την πρόθεση του οχήματος να επιτύχει μία συγκεκριμένη επιθυμητή ταχύτητα, ενώ το δεύτερο αναπαράγει τους περιορισμούς που τίθενται από οχήματα που προηγούνται τα οποία προσπαθούν να οδηγούν κοντά στην επιθυμητή ταχύτητα. Για να μοντελοποιηθεί η επιρροή των γειτονικών λωρίδων στο μοντέλο ακολουθίας οχημάτων προστίθεται το *μοντέλο ακολουθίας οχημάτων 2 λωρίδων* (2-Lanes Car-Following model), το οποίο

λαμβάνει υπόψη την επιρροή ενός ορισμένου αριθμού οχημάτων που οδηγούν πιο αργά στη διπλανή δεξιά λωρίδα.

4.4.2.2 Μοντέλο αλλαγής λωρίδας (Lane-Changing model)

Το μοντέλο αλλαγής λωρίδας μοντελοποιείται σαν μια διαδικασία απόφασης αλλαγής λωρίδας ενός οχήματος, το οποίο αναλύει το πόσο αναγκαία είναι η αλλαγή λωρίδας (για παράδειγμα λόγω ύπαρξης στροφής), το πόσο επιθυμητή είναι η αλλαγή λωρίδας (απόκτηση επιθυμητής ταχύτητας όταν το προπορευόμενο όχημα κινείται πιο αργά), και το πόσο εφικτή είναι η αλλαγή λωρίδας, που εξαρτάται από τη θέση του οχήματος στο οδικό δίκτυο. Για να επιτευχθεί μία πιο ακριβής αναπαράσταση της συμπεριφοράς των οδηγών, ορίζονται τρεις διαφορετικές ζώνες μέσα σε ένα τμήμα δρόμου που κάθε μία ανταποκρίνεται σε διαφορετικό κίνητρο αλλαγής λωρίδας. Οι ζώνες αυτές, Σχήμα 4-2, χαρακτηρίζονται από την απόστασή τους από το τέλος του τμήματος δρόμου που αντιστοιχεί στο σημείο αλλαγής κατεύθυνσης και ορίζονται ως εξής:

Ζώνη 1: Αυτή είναι η μεγαλύτερη απόσταση από την επόμενη αλλαγή κατεύθυνσης. Οι αποφάσεις αλλαγής λωρίδας βασίζονται κυρίως στις κυκλοφοριακές συνθήκες των λωρίδων που περιλαμβάνει η ζώνη αυτή. Για να υπολογιστεί η βελτίωση που θα λάβει ο οδηγός από την αλλαγή λωρίδας, λαμβάνονται υπόψη διάφορες παράμετροι: επιθυμητή ταχύτητα του οχήματος, ταχύτητα και απόσταση των προπορευόμενων οχημάτων και ταχύτητα και απόσταση των μελλοντικά προπορευόμενων οχημάτων.



Σχήμα 4-2 Ζώνες αλλαγής λωρίδας.

Ζώνη 2: Αυτή είναι η ενδιάμεση ζώνη. Η απόφαση αλλαγής λωρίδας επηρεάζεται από το επόμενο σημείο αλλαγής κατεύθυνσης. Τα οχήματα που δεν οδηγούν σε έγκυρες λωρίδες (δηλαδή λωρίδες που μπορεί να γίνει η επιθυμητή αλλαγή κατεύθυνσης), τείνουν να προσεγγίσουν τη μεριά του δρόμου όπου η αλλαγή κατεύθυνσης επιτρέπεται. Τα οχήματα αναζητούν κάποιο κενό και μπορεί να προσπαθήσουν να αλλάξουν λωρίδα, αν δεν επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οχημάτων στις γειτονικές λωρίδες.

Ζώνη 3: Αυτή είναι η μικρότερη απόσταση από το επόμενο σημείο αλλαγής κατεύθυνσης. Τα οχήματα εξαναγκάζονται να φτάσουν στις επιθυμητές λωρίδες για την αλλαγή κατεύθυνσης, μειώνοντας την ταχύτητα αν είναι απαραίτητο ή ακόμα σταματώντας για να γίνει η αλλαγή εφικτή. Ακόμα, τα οχήματα στις διπλανές λωρίδες μπορεί να αλλάξουν τη συμπεριφορά τους ώστε να δημιουργηθεί ένα επαρκές κενό για την αλλαγή λωρίδας του οχήματος.

Οι ζώνες αλλαγής λωρίδας καθορίζονται από δύο παραμέτρους, τη *ζώνη απόστασης 1* και τη *ζώνη απόστασης 2* όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-2. Οι παράμετροι αυτές είναι αρκετά σημαντικές και αποτελούν ιδιότητα του κάθε τμήματος δρόμου.

4.4.3 Επανάληψη (AIMSUN Replication)

Τέλος, μέσω της Επανάληψης πραγματοποιείται η εκτέλεση της προσομοίωσης. Κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί διαφορετικό σπόρο για τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούν τα μοντέλα του προσομοιωτή. Για το λόγο αυτό κάθε επανάληψη μπορεί να δώσει κάπως διαφορετικά αποτελέσματα.

4.5 Έξοδοι προσομοίωσης

Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN παρέχει στο χρήστη διάφορες εξόδους, οι βασικότερες εκ των οποίων είναι οι εξής: δυσδιάστατη και τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της προσομοίωσης, πληροφορίες για τον αριθμό οχημάτων κάθε τύπου που διασχίζουν το δίκτυο κάθε στιγμή της προσομοίωσης, λεπτομερής περιγραφή των χαρακτηριστικών μεμονωμένων οχημάτων, απεικόνιση της κατάστασης των φωτεινών σηματοδοτών κάθε χρονική στιγμή και στατιστικές

μετρήσεις της κυκλοφορίας μέσα στο δίκτυο. Οι στατιστικές μετρήσεις, όπως η ροή οχημάτων, η ταχύτητα, ο χρόνος διαδρομής και ο χρόνος καθυστέρησης, μπορεί να αφορούν όλο το σύστημα, κάποια τμήματα δρόμου ή και σημεία αλλαγής κατεύθυνσης. Στατιστικές μετρήσεις όπως ο αριθμός οχημάτων, τα ποσοστά κατάληψης και η ταχύτητα σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου, λαμβάνονται επίσης από φωρατές, που είναι τοποθετημένοι στα επιθυμητά σημεία.

5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Οι περιοχές ραμπών εισόδου αυτοκινητοδρόμων, αποτελούν μία περίπτωση συγχώνευσης κυκλοφοριακών ροών κατά την οποία όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση του δικτύου είναι αυξημένη παρατηρείται εμφάνιση συμφόρησης στην περιοχή συγχώνευσης λόγω της μείωσης της ικανότητας του δικτύου. Ο έλεγχος ραμπών εισόδου αυτοκινητοδρόμων αποσκοπεί στην ομαλή, ασφαλή και αποτελεσματική είσοδο των οχημάτων από τη ράμπα στον κυρίως αυτοκινητόδρομο.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετάται η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο σε ένα δίκτυο ράμπας-αυτοκινητοδρόμου με στόχο τη μεγιστοποίηση της ροής και την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο. Ένα άλλο θέμα που εξετάζεται σε αυτήν τη διατριβή και σχετίζεται με την εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε ράμπες αυτοκινητοδρόμων είναι ο αναπόφευκτος σχηματισμός ουρών στη ράμπα, καθώς δεν επιτρέπει σε όλα τα οχήματα που μπαίνουν στη ράμπα να εισέλθουν στον αυτοκινητόδρομο άμεσα. Εάν η ουρά στη ράμπα υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο μήκος, υπάρχει περίπτωση να εμπλακεί με την ανάντη κυκλοφοριακή ροή, για παράδειγμα κάποιου αστικού δικτύου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού θα δοκιμαστεί η εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης ουρών παράλληλα με τον έλεγχο κυκλοφορίας ράμπας αυτοκινητοδρόμου. Επίσης, επειδή ο μεγάλος χρόνος αναμονής των οχημάτων στις ράμπες εισόδου είναι ανεπιθύμητος, θα εξεταστεί η εφαρμογή ελέγχου του χρόνου αναμονής σε συνδυασμό με τον έλεγχο κυκλοφορίας της ράμπας.

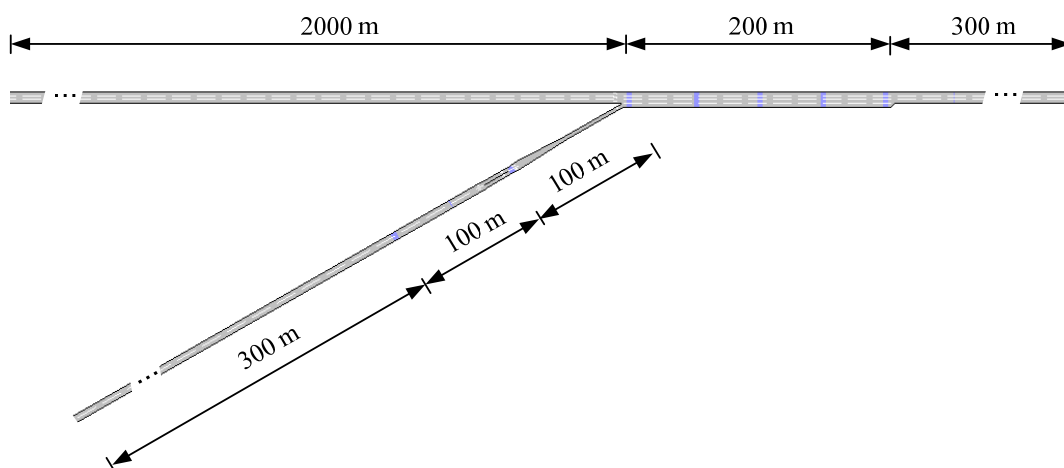
Η διερεύνηση των θεμάτων αυτών πραγματοποιείται μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης ενός δικτύου ράμπας αυτοκινητοδρόμου. Ο προσομοιωτής που χρησιμοποιείται είναι ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN Simulator v5.1.9, οι βασικές λειτουργίες του οποίου παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 4.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται όλα τα στοιχεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης του δικτύου ράμπας αυτοκινητοδρόμου που εξετάζεται. Τα στοιχεία αυτά είναι η γεωμετρία και οι διαστάσεις του δικτύου, το σενάριο

κυκλοφοριακής ζήτησης που εφαρμόζεται, οι στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας, ο έλεγχος ουρών στη ράμπα, ο έλεγχος του χρόνου αναμονής και η πολιτική ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών. Τέλος αναφέρονται οι ρυθμίσεις που έγιναν στο μοντέλο προσομοίωσης και παρουσιάζονται τα κριτήρια που θα ληφθούν μέσω της μικροσκοπικής προσομοίωσης και θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο ράμπας αυτοκινητοδρόμου.

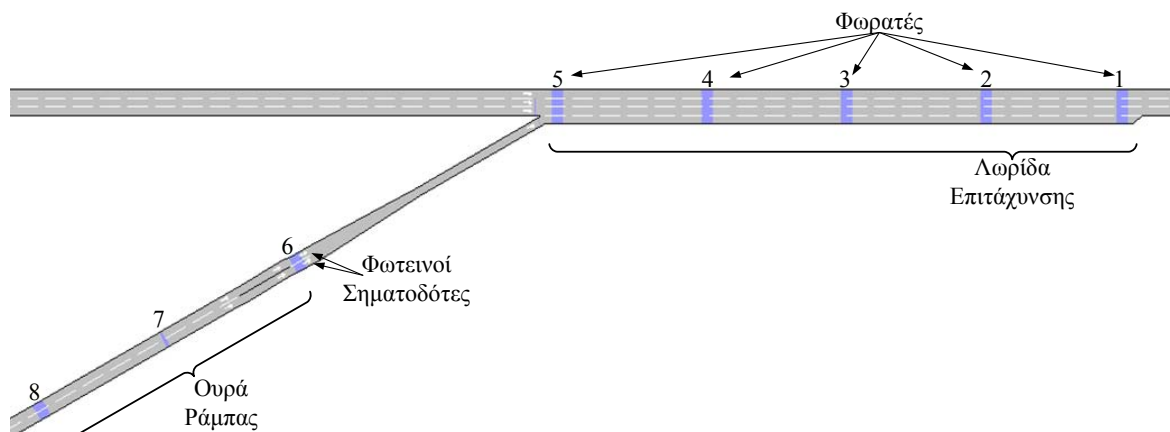
5.2 Δίκτυο προσομοίωσης

Το υποθετικό δίκτυο που προσομοιώνεται με σκοπό να διερευνηθούν, μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης, τα οφέλη εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας ράμπας αυτοκινητοδρόμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1. Το δίκτυο αποτελείται αρχικά από ένα αυτοκινητόδρομο τριών λωρίδων, μίας κατεύθυνσης, ο οποίος συνδέεται με μία ράμπα εισόδου δύο λωρίδων συνολικού μήκους 500m.



Σχήμα 5-1 Διαστάσεις εξεταζόμενου δικτύου

Η κυκλοφοριακή ροή του αυτοκινητοδρόμου αφού διανύσει 2000m ενώνεται με την κυκλοφοριακή ροή που εξέρχεται από τη ράμπα εισόδου. Η συγχώνευση των δύο κυκλοφοριακών ροών πραγματοποιείται σε μία περιοχή μήκους 200m, δηλαδή όσο είναι το μήκος της λωρίδας επιτάχυνσης.



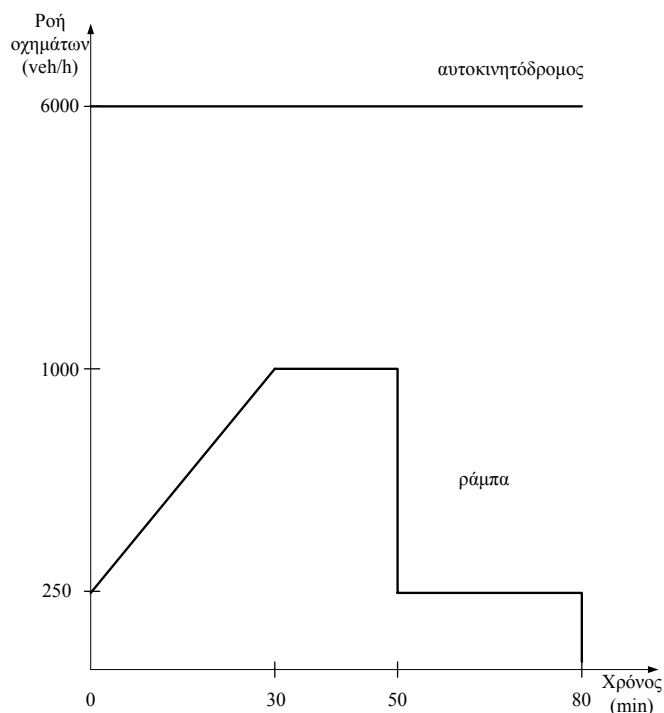
Σχήμα 5-2 Στοιχεία εξεταζόμενου δικτύου.

Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζονται τα κυριότερα στοιχεία του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η ράμπα εισόδου αποτελείται από δύο λωρίδες, οι οποίες 100m πριν τη σύνδεση τους με τον αυτοκινητόδρομο (ramp nose), συγχωνεύονται σε μία λωρίδα. Στο σημείο αυτό γίνεται και η τοποθέτηση ενός φωτεινού σηματοδότη σε κάθε λωρίδα της ράμπας. Επίσης στο δίκτυο έχουν τοποθετηθεί φωρατές, μήκους 4m, σε διάφορα, αριθμημένα (βλέπε Σχήμα 5-2) και άλλα, σημεία για τη λήψη μετρήσεων και πραγματοποίηση εκτιμήσεων πραγματικού χρόνου.

5.3 Σενάριο ζήτησης

Το σενάριο ζήτησης που εφαρμόζεται στο δίκτυο είναι στοχαστικό με μέση ζήτηση που φαίνεται στο Σχήμα 5-3. Η συνολική διάρκεια προσομοίωσης ορίζεται στα 80min. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5-3, η ζήτηση του κυρίως αυτοκινητοδρόμου είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και ίση με 6000veh/h. Αντίθετα η ζήτηση στη ράμπα εισόδου διαφοροποιείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή της προσομοίωσης η ροή που εισέρχεται στη ράμπα είναι της τάξης των 250veh/h ενώ στη συνέχεια αυξάνεται σταδιακά και μετά από 30min η ροή λαμβάνει μία μέγιστη τιμή ίση με 1000veh/h. Η ζήτηση στη ράμπα διατηρεί τη μέγιστη τιμή της μέχρι το 50^ο λεπτό και στη συνέχεια, πέφτει σε μία πολύ χαμηλή τιμή, 250veh/h, ίδια με αυτή στην αρχή της

προσομοίωσης. Η χαμηλή αυτή ζήτηση διατηρείται για 30min, μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.



Σχήμα 5-3 Σενάριο ζήτησης ράμπας εισόδου και αυτοκινητοδρόμου.

Η επιλογή του σεναρίου αυτού έγινε έτσι ώστε στην αρχή και στο τέλος της προσομοίωσης η ζήτηση του δικτύου να είναι χαμηλή, χωρίς να εμφανίζονται προβλήματα συμφόρησης και συγχώνευσης των δύο κυκλοφοριακών ροών, ενώ για ένα χρονικό διάστημα [30s, 50s] η κυκλοφοριακή ζήτηση είναι αρκετά υψηλή (ώρα αιχμής) και ξεπερνάει την ικανότητα της υποδομής. Την περίοδο αυτή οι ‘διαμάχες’ των οχημάτων κατά την συγχώνευση των δύο κυκλοφοριακών ροών είναι πιο έντονες, οδηγώντας σε κυκλοφοριακή συμφόρηση και μείωση της ικανότητας της υποδομής.

5.4 Εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας

Στο δίκτυο ράμπας αυτοκινητοδρόμου που μελετάται στη μεταπτυχιακή αυτή διατριβή, θεωρείται αρχικά ότι δεν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας. Έπειτα εξετάζεται η εφαρμογή τεσσάρων σεναρίων ελέγχου. Το πρώτο σενάριο αφορά την εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας με χρήση της στρατηγικής ALINEA. Το δεύτερο σενάριο εξετάζει την παράλληλη εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA και

του ελέγχου υπερχειρίσεως ουράς (Queue Override), ενώ το τρίτο σενάριο μελετά την παράλληλη εφαρμογή της ALINEA και της στρατηγικής ελέγχου ουράς της ράμπας (Queue Control). Τέλος, το τέταρτο σενάριο εξετάζει την εφαρμογή της ALINEA σε συνδυασμό με τον έλεγχο του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα (Waiting Time Control). Τα παραπάνω σενάρια καθώς και η πολιτική ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

5.4.1 0^ο σενάριο: χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας

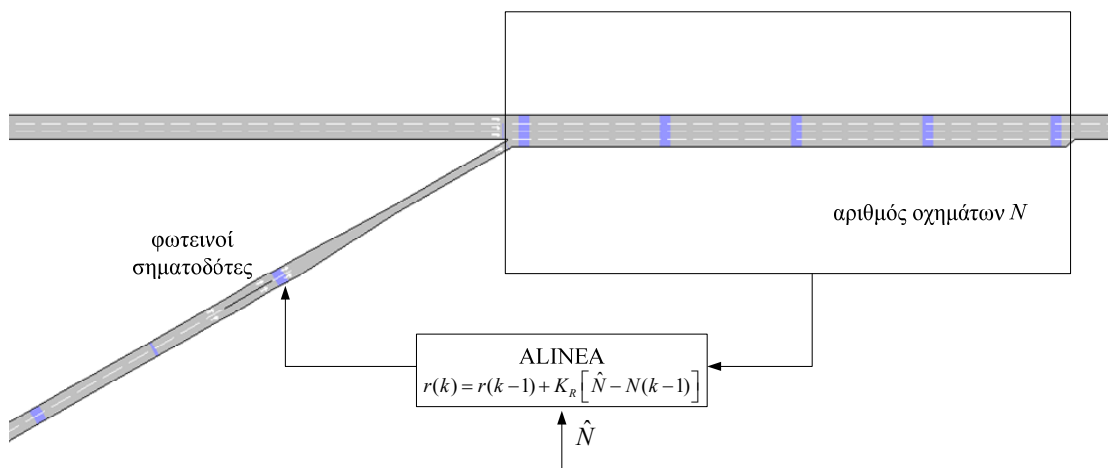
Το πρώτο σενάριο που εξετάζεται αφορά την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας στο δίκτυο. Τα οχήματα που εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο μέσω της ράμπας εισόδου συγχωνεύονται με τη ροή οχημάτων του κυρίως αυτοκινητοδρόμου. Όταν η κυκλοφοριακή είναι αυξημένη, η συγχώνευση των δύο κυκλοφοριακών ροών δεν είναι ομαλή, αλλά συνοδεύεται από απότομες επιβραδύνσεις και στην συνέχεια απότομες επιταχύνσεις των οχημάτων, που οδηγούν σε κυκλοφοριακή συμφόρηση και σε μη βέλτιστη αξιοποίηση της ικανότητας της υποδομής. Το σενάριο αυτό θα συγκριθεί με τα τρία σενάρια που περιγράφονται στη συνέχεια.

5.4.2 1^ο σενάριο: εφαρμογή της στρατηγική ελέγχου ALINEA

Ο έλεγχος κυκλοφορίας στο εξεταζόμενο δίκτυο πραγματοποιείται, αρχικά, με χρήση της τοπικής στρατηγικής ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου ALINEA, λόγω της κλειστού βρόχου κατασκευής της και της υπεροχής της συγκριτικά με τις άλλες γνωστές στρατηγικές τοπικού ελέγχου κυκλοφορίας. Η ALINEA εφαρμόζεται κάθε χρονική περίοδο $T=15\text{sec}$ και λαμβάνει μετρήσεις αριθμού οχημάτων N στην περιοχή συγχώνευσης των δύο κυκλοφοριακών ροών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4, ελέγχει την απόκλιση από την επιθυμητή τιμή $\hat{N}$ και υπολογίζει τη νέα ροή οχημάτων που μπορεί να εισέλθει στον αυτοκινητόδρομο μέσω της ράμπας, κατά την επόμενη περίοδο ελέγχου.

Πριν εφαρμοστεί, η νέα ροή οχημάτων περικόπτεται εάν υπερβαίνει ένα διάστημα τιμών $[400\text{veh/h}, 1300\text{veh/h}]$ που είναι η ελάχιστη και η μέγιστη

επιτρεπτή ροή, αντίστοιχα. Κατά την έναρξη της προσομοίωσης η ροή οχημάτων που εισήλθε στην περιοχή ελέγχου την προηγούμενη περίοδο $r(k-1)$ τίθεται ίση με $r_{\max}$. Η παράμετρος K_R παίρνει την τιμή $200h^{-1}$, ενώ η επιθυμητή τιμή οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης $\hat{N}$ προσδιορίζεται μέσω μίας συγκεκριμένης διαδικασίας που παρουσιάζεται στο επόμενο Κεφάλαιο. Επίσης, στο επόμενο Κεφάλαιο εξετάζεται η ευαισθησία της στρατηγικής στην επιλογή τη τιμής της παραμέτρου K_R .



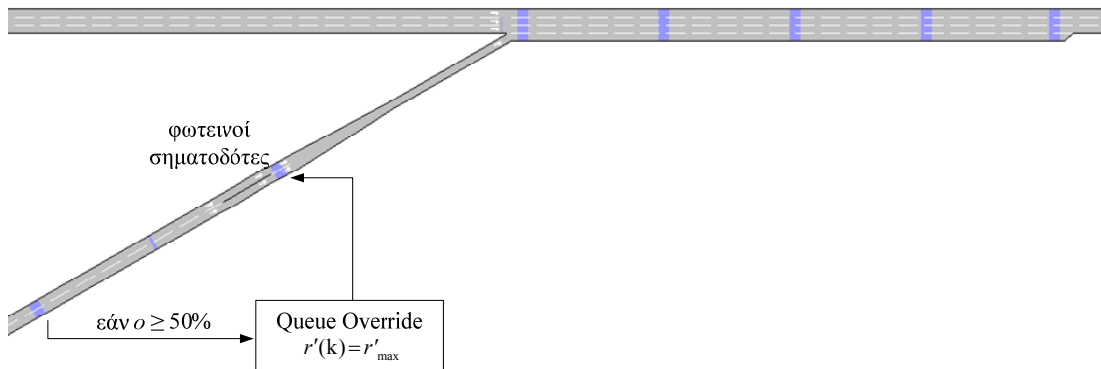
Σχήμα 5-4 Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA.

Η νέα ροή οχημάτων που υπολογίζει η ALINEA μετατρέπεται σε κύκλο (χρόνο πρασίνου και κόκκινου), που θα εφαρμοστεί στους φωτεινούς σηματοδότες κατά την επόμενη χρονική περίοδο (Παράγραφος 5.4.5).

5.4.3 2^ο σενάριο: εφαρμογή ALINEA και ελέγχου υπερχειλίσης ουράς (Queue Override)

Η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA δίνει λύση, όπως παρουσιάζεται στο Κεφ. 6, στο πρόβλημα της κυκλοφοριακής συγχώνευσης όμως παράλληλα οδηγεί στην αναπόφευκτη συσσώρευση οχημάτων κατά μήκος της ράμπας εισόδου. Εάν όμως, η ουρά στη ράμπα υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο μήκος, υπάρχει περίπτωση να εμπλακεί με την ανάντη κυκλοφοριακή ροή, για παράδειγμα κάποιου αστικού δικτύου. Στο δίκτυο που εξετάζεται το μέγιστο επιτρεπτό μήκος ουράς στη ράμπα είναι τα 100m (βλέπε Σχήμα 5-2). Για το λόγο αυτό, στο δεύτερο σενάριο που εξετάζεται εκτός της στρατηγικής ελέγχου κυκλοφορίας ALINEA,

εφαρμόζεται και έλεγχος υπερχειλίσσης ουράς (Queue Override), ο τρόπος λειτουργίας του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 5-5. Η μέτρηση του ποσοστού κατάληψης λαμβάνεται από φωρατή που είναι τοποθετημένος στο σημείο 8 του Σχήματος 5-2 και η τιμή του ποσοστού κατάληψης που σηματοδοτεί την υπερχειλίση της ουράς ορίζεται ίση με 50%.



Σχήμα 5-5 Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου υπερχειλίσσης ουράς (queue override).

Όταν η μέτρηση του ποσοστού κατάληψης, στο σημείο αυτό, ξεπεράσει το προκαθορισμένο κατώφλι, ο έλεγχος της ράμπας μέσω της στρατηγικής ελέγχου ALINEA καταργείται και τίθεται ίσος με μία υψηλή ροή στη ράμπα $R(k) = r'_{\max} = 1300 \text{ veh/h}$.

$$R(k) = r'_{\max} = 1300 \text{ veh/h} \quad (5.1)$$

5.4.4 3^ο σενάριο: εφαρμογή ALINEA και ελέγχου ουράς ράμπας (Queue Control)

Επειδή η εφαρμογή ελέγχου υπερχειλίσσης ουράς αποτελεί μία απότομη λογική για τη διαχείριση της ουράς των ραμπών, η οποία οδηγεί σε μικρή αξιοποίηση της αποθηκευτικού χώρου της ράμπας, στο 3^ο σενάριο θα εξεταστεί η εφαρμογή ελέγχου του μήκους της ουράς της ράμπας (queue control) σε συνδυασμό με την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA.

Στη περίπτωση αυτή ο ελεγκτής μήκους της ουράς της ράμπας λαμβάνει μετρήσεις και εκτιμήσεις πραγματικού χρόνου της ροής $q_{in}^m(k)$ στην είσοδο της

ράμπας και του αριθμού $w(k)$ οχημάτων κατά μήκος της ράμπας, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-6. Στην πραγματικότητα, οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου που λαμβάνονται από τους φωρατές περιλαμβάνουν κάποιο σφάλμα, για παράδειγμα εξαιτίας προσωρινής αστοχίας ενός φωρατή. Για το λόγο αυτό, στις μετρήσεις ροής οχημάτων q_{in}^m και q_{out}^m που λαμβάνονται από το φωρατή (στα σημεία 8 και 6 του Σχήματος 5-2) μέσω του AIMSUN API, προστίθεται ένας θόρυβος της τάξης του $\pm 20\%$, με χρήση μίας γεννήτριας τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής. Αναφορικά με την εκτίμηση του αριθμού οχημάτων που βρίσκονται κατά μήκος της ράμπας, χρησιμοποιείται ένα φίλτρο Kalman (Vigos et al., 2008) το οποίο βασίζεται σε μετρήσεις ροής στα σημεία 6 και 8 του Σχήματος 5-2 και ποσοστού κατάληψης στο σημείο 7. Η εξίσωση αυτή είναι

$$w(k) = w(k-1) + T \cdot [q_{in}^m(k-1) - q_{out}^m(k-1)] + K [w^m(k-1) - w(k-1)] \quad (5.2)$$

όπου $w(k)$ είναι η εκτιμώμενη ουρά, K είναι η παράμετρος κέρδους του φίλτρου, q_{in}^m , q_{out}^m είναι οι μετρήσεις ροής στις θέσεις 8, 6 που προαναφέραμε και w^m είναι ο ‘μετρήσιμος’ αριθμός οχημάτων που προκύπτει από την εξίσωση

$$w^m = \frac{\Delta \cdot \lambda}{L_{ph} + e} o_t^m \quad (5.3)$$

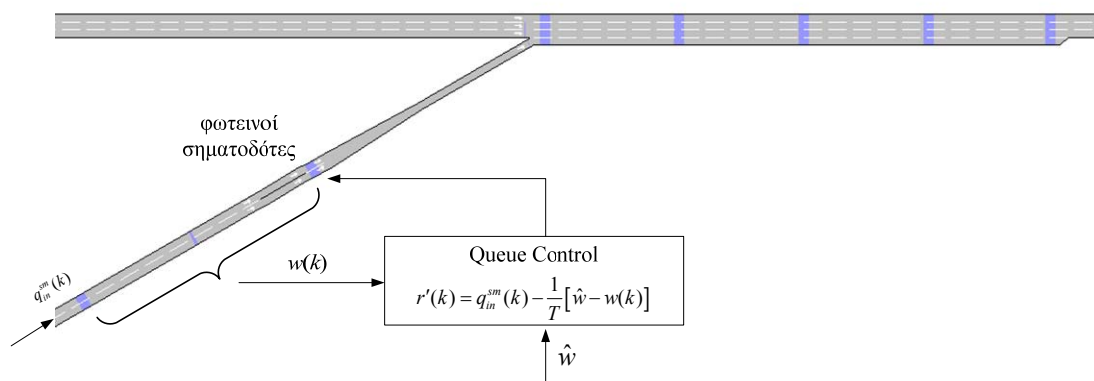
όπου Δ είναι το μήκος της επιτρεπτής ουράς στη ράμπα, λ είναι ο αριθμός το λωρίδων, L_{ph} είναι το φυσικό μήκος των οχημάτων, e είναι το ηλεκτρικό μήκος του φωρατή και o_t^m είναι η μέτρηση του ποσοστού κατάληψης από το φωρατή στο σημείο 6 του Σχήματος 5-2. Στην περίπτωση που εξετάζεται, οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι $K=0.05$, $\Delta=100m$, $\lambda=2$, $L_{ph}=4m$, $e=1m$ (όσο και το μήκος του φωρατή αυτού).

Σημειώνεται ότι η εκτιμώμενη τιμή της ουράς οχημάτων στη ράμπα $w(k)$ περικυκλώνεται εάν ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο διάστημα τιμών $[0, w_{max}]$, όπου w_{max} είναι ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορεί να αποθηκευτεί στη ράμπα, συμπεριλαμβάνοντας μία απόσταση ασφαλείας D μεταξύ των οχημάτων, για

παράδειγμα 1m. Ο μέγιστος αυτός αριθμός οχημάτων μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση

$$w_{\max} = \frac{\Delta \cdot \lambda}{L_{ph} + D} \quad (5.4)$$

Επομένως, σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματος που εξετάζεται η μέγιστη ουρά που μπορεί να σχηματιστεί στη ράμπα είναι 40 οχήματα.



Σχήμα 5-6 Εφαρμογή ελέγχου μήκους της ουράς(queue control).

Η στρατηγική ελέγχου του μήκους της ουράς (queue control), ενεργοποιείται κάθε χρονική περίοδο $T=15\text{sec}$, όπως και η ALINEA, και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$r'(k) = f \cdot q_{in}^{sm}(k) - \frac{1}{T} [\hat{w} - w(k)] \quad (5.5)$$

όπου $w(k)$ είναι η εκτίμηση του μήκους της ουράς σε πραγματικό χρόνο, $\hat{w}$ είναι η επιθυμητή τιμή του μήκους της ουράς που οδηγεί στην καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου μήκους της ράμπας, όπως περιγράφεται στο Κεφ. 6, $q_{in}^{sm}(k)$ είναι η ομαλοποιημένη, μέσω εκθετικού φίλτρου, μέτρηση της ροής οχημάτων στην είσοδο της ράμπας που στην περίπτωση αυτή ταυτίζεται με τη ροή στο σημείο 8 του δικτύου και f είναι ένας συντελεστής που ανάλογα με την τιμή του υπερεκτιμάται ή υποεκτιμάται η ζήτηση στη ράμπα που λαμβάνεται από το φωρατή. Στη μελέτη αυτή η τιμή του συντελεστή αυτού είναι $f=1.2$. Σημειώνεται ότι η τιμή της ροής $r'(k)$

περικόπτεται εάν υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο διάστημα τιμών, που στη μελέτη αυτή είναι το $[0, 1300]$ veh/h.

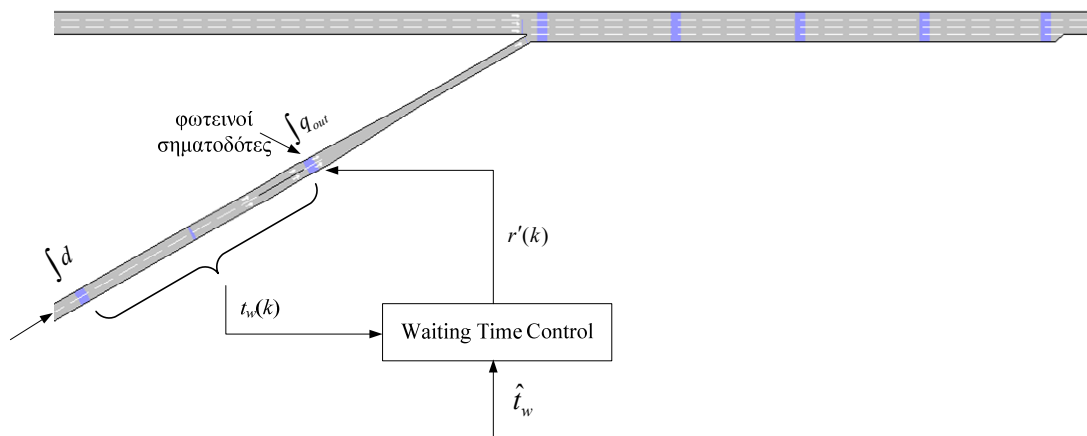
Σύμφωνα με το σενάριο αυτό, η τελική ροή οχημάτων $R(k)$ που θα εφαρμοστεί μέσω των φωτεινών σηματοδοτών, στη ράμπα δίνεται από τη σχέση

$$R(k) = \max \{r(k), r'(k)\} \quad (5.6)$$

όπου $r(k)$ είναι η ροή που έχει υπολογίσει η στρατηγική ελέγχου ραμπών ALINEA και $r'(k)$ είναι η ροή οχημάτων που έχει εκτιμηθεί μέσω του ελέγχου του μήκους της ουράς στη ράμπα (queue control).

5.4.5 4^ο σενάριο: εφαρμογή ALINEA και ελέγχου χρόνου αναμονής (Waiting Time Control)

Η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA, εκτός από τη δημιουργία ουρών μεγάλου μήκους, οδηγεί πολλές φορές και σε μεγάλους χρόνους αναμονής των οχημάτων στην ουρά της ράμπας εισόδου. Στο σενάριο αυτό θα εξεταστεί η παράλληλη εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA και της στρατηγικής ελέγχου χρόνου αναμονής (Waiting Time Control). Ο τρόπος λειτουργίας του ελέγχου του χρόνου αναμονής φαίνεται στο Σχήμα 5-7, σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 3.2.5. Στο δίκτυο που εξετάζεται το επιτρεπόμενο μήκος ουράς στη ράμπα είναι 100 m (Σχήμα 5-2) και ο υπολογιζόμενος χρόνος αναμονής t_w αφορά το χρόνο αναμονής των οχημάτων σε αυτή την περιοχή. Κάθε χρονική περίοδο $T = 15s$, η στρατηγική υπολογίζει το χρόνο αναμονής των οχημάτων στη ράμπα $t_w(k)$ και υπολογίζει τη ροή που πρέπει να διέλθει από του φωτεινούς σηματοδότες, την επόμενη χρονική περίοδο, μέσω της Εξίσωσης 3.11. Ο μέγιστος επιθυμητός χρόνος αναμονής, που χρησιμοποιείται σε αυτό σενάριο, ορίζεται ίσος με $\hat{t}_w = 90s$ και τα απαραίτητα όρια της υπολογιζόμενης ροής είναι $r'_{\min} = 400veh/h$ και $r'_{\max} = 1300veh/h$.



Σχήμα 5-7 Εφαρμογή ελέγχου χρόνου αναμονής οχημάτων στη ράμπα.

Η τελική ροή οχημάτων $R(k)$ που θα εφαρμοστεί μέσω των φωτεινών σηματοδοτών, στη ράμπα δίνεται από τη σχέση

$$R(k) = \max \{r(k), r'(k)\} \quad (5.7)$$

όπου $r(k)$ είναι η ροή που έχει υπολογίσει η στρατηγική ελέγχου ραμπών ALINEA και $r'(k)$ είναι η ροή οχημάτων που έχει εκτιμηθεί μέσω του ελέγχου του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα (Waiting Time Control).

5.4.6 Εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας μέσω φωτεινών σηματοδοτών

Η ρύθμιση της κυκλοφορίας γίνεται μέσω δύο φωτεινών σηματοδοτών που είναι τοποθετημένοι στο σημείο 6 του δίκτυο (Σχήμα 5-2). Η τελική ροή οχημάτων που υπολογίζεται, με τον τρόπο που περιγράφηκε προηγουμένως, και πρόκειται να εφαρμοστεί κατά την επόμενη περίοδο ελέγχου T , διανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των δύο φωτεινών σηματοδοτών. Η πολιτική ρύθμισης φωτεινών σηματοδοτών που χρησιμοποιείται είναι η 2 οχήματα ανά πράσινο. Κάθε φωτεινός σηματοδότης έχει μία σταθερή πράσινη φάση διάρκειας 4.5 sec, που επιτρέπει δύο οχήματα, κατά μέσο όρο, να περνάνε τη φορά, ενώ η διάρκεια της κόκκινης φάσης κυμαίνεται. Η εφαρμογή

μίας ροής οχημάτων R , μεταφράζεται σε διάρκεια κύκλου c , δηλαδή αθροίσματος πράσινης και κόκκινης φάσης μέσω της παρακάτω εξίσωσης

$$R = \left(\frac{2 \text{ veh} \cdot 2 \text{ lanes}}{c} \right) \cdot 3600 \Rightarrow c = \frac{14400}{R} \quad (5.8)$$

Ο κύκλος c είναι ίδιος και για τις δύο λωρίδες. Επίσης σημειώνεται ότι η διάρκεια της κόκκινης φάσης δεν μπορεί να οριστεί μικρότερη από 2sec, για λόγους ασφαλείας. Επομένως προκύπτει μία ελάχιστη διάρκεια κύκλου $c_{\min} = 6.5 \text{ sec}$. Από τα δεδομένα φαίνεται ότι η ελάχιστη αυτή διάρκεια κύκλου δεν πραγματοποιείται ποτέ καθώς η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ροής στη ράμπα, όταν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας, είναι 1300veh/h που αντιστοιχεί σε $c_{\min} = 11 \text{ sec}$. Επειδή η περίοδος ελέγχου T δεν είναι απαραίτητα πολλαπλάσιο της διάρκειας του κύκλου c , δημιουργείται ένα πρόβλημα συγχρονισμού το οποίο επιλύεται με τον ακόλουθο τρόπο. Κάθε περίοδο ελέγχου T υπολογίζεται η νέα ροή R που θα εφαρμοστεί στη ράμπα, και μεταφράζεται σε κύκλο c . Αυτός ο κύκλος θα εφαρμοστεί αφού ολοκληρωθεί ο κύκλος της προηγούμενης περιόδου ελέγχου.

5.5 Μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN

Το δίκτυο που περιγράφηκε προσομοιώνεται μέσω του μικροσκοπικού προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN v.5.1.9 χρησιμοποιώντας τις προκαθορισμένες από τον προσομοιωτή τιμές των παραμέτρων και βήμα προσομοίωσης 0.75s. Η μόνη αλλαγή που πραγματοποιήθηκε αφορά τις τιμές των παραμέτρων Ζώνη Απόστασης 1 και Ζώνη Απόστασης 2 (βλέπε Σχήμα 4.2). Αυτές οι παράμετροι αποτελούν χαρακτηριστικά του αυτοκινητοδρόμου και λαμβάνοντας τιμή μηδέν επιτυγχάνεται η διατήρηση της λωρίδας στην οποία τα οχήματα κινούνται κατά το μέγιστο δυνατό.

Η εφαρμογή των στρατηγικών ελέγχου πραγματοποιείται μέσω του AIMSUN API, το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να επικοινωνεί με τον προσομοιωτή σε πραγματικό χρόνο προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε περίοδο ελέγχου το AIMSUN API λαμβάνει μετρήσεις αριθμού οχημάτων, ροής και ποσοστού κατάληψης σε ορισμένα σημεία του δικτύου βάσει των οποίων υπολογίζει τις νέες

ρυθμίσεις των φωτεινών σηματοδοτών, τις οποίες εν συνεχεία στέλνει πίσω στον προσομοιωτή για εφαρμογή.

Η αναπαράσταση της συμπεριφοράς των οχημάτων κατά τη συγχώνευση δύο ή περισσότερων κυκλοφοριακών ροών αποτελεί ένα γνωστό, αδύναμο σημείο των μικροσκοπικών προσομοιωτών. Κατά την μικροσκοπική προσομοίωση η εμφάνιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων με περιοχές συγχώνευσης λωρίδων εντοπίζεται ακριβώς στην περιοχή συγχώνευσης και όχι δεκάδες μέτρα κατάντη όπως παρατηρείται στην πραγματικότητα. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής θα πρέπει να ληφθούν ως τα ποιοτικά οφέλη που μπορούν να επιτευχθούν με εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε ράμπες αυτοκινητοδρόμου και όχι σαν ποσοτική εκτίμηση των επιτεύξιμων αυτών στόχων.

Επειδή το AIMSUN είναι ένας στοχαστικός προσομοιωτής κάθε προσομοίωση χρησιμοποιεί διαφορετικό σπόρο για τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούν τα μοντέλα του. Επομένως, κάθε διαφορετική προσομοίωση δίνει κάπως διαφορετικά αποτελέσματα. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, στη μελέτη αυτή χρησιμοποιούνται δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις.

5.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης και κριτήρια αξιολόγησης

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του οδικού δικτύου, εκτός από τη γραφική αναπαράσταση της κίνησης των οχημάτων και της λειτουργίας των φωτεινών σηματοδοτών λαμβάνονται και μετρήσεις πραγματικού χρόνου προσομοίωσης, για παράδειγμα ροής οχημάτων και ταχύτητας από διάφορα σημεία του δικτύου μέσω των φωρατών.

Το βασικό κριτήριο αξιολόγησης των εφαρμοζόμενων στρατηγικών ελέγχου καθώς και της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας είναι ο χρόνος παραμονής των οχημάτων μέσα στο δίκτυο (Total Time Spent) σε veh·h. Το συνολικό TTS του δικτύου στο τέλος της προσομοίωσης υπολογίζεται από την εξίσωση

$$TTS = T_{sim} \cdot \sum_{k=0}^K N_{system}(k) \quad (5.9)$$

όπου T_{sim} το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, K ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης και N_{system} το σύνολο των οχημάτων που βρίσκονται μέσα στο δίκτυο σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης από την αρχή έως το τέλος της προσομοίωσης.

Επίσης για την αξιολόγηση των στρατηγικών ελέγχου ουράς queue override και queue control χρησιμοποιείται η συνολική χρονική περίοδος (Accumulated Time) σε time steps κατά την οποία το μήκος της ουράς της ράμπας ξεπερνάει το επιτρεπόμενο μήκος ουράς. Ο χρόνος υπερχείλισης της ουράς (Acc. Time) υπολογίζεται σε κάθε βήμα προσομοίωσης από την εξίσωση

$$Acc.Time(k) = \begin{cases} Acc.Time(k-1) + 1 & \text{εάν } o_8 > 50\% \\ Acc.Time(k-1) & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (5.10)$$

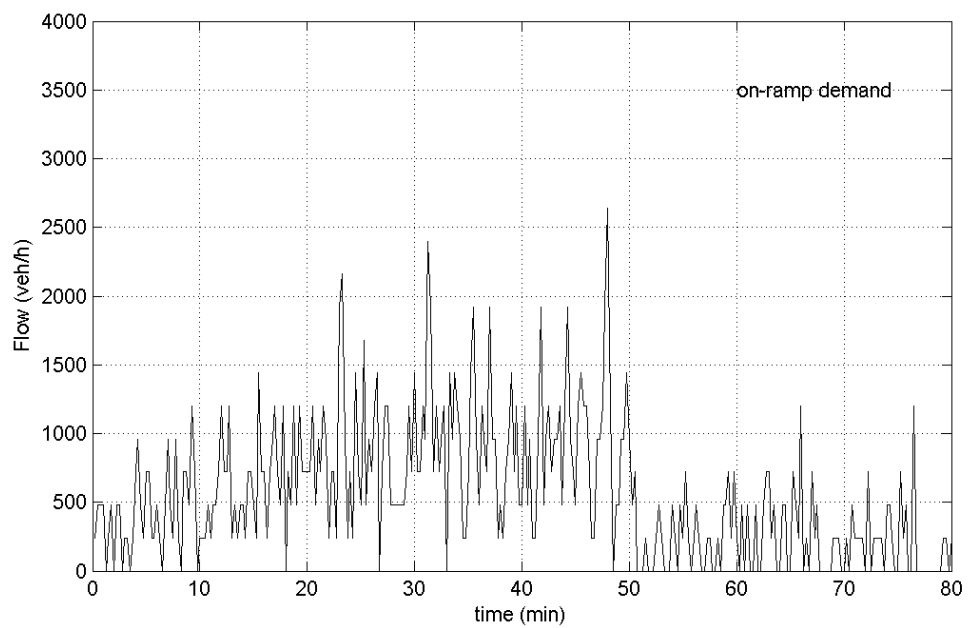
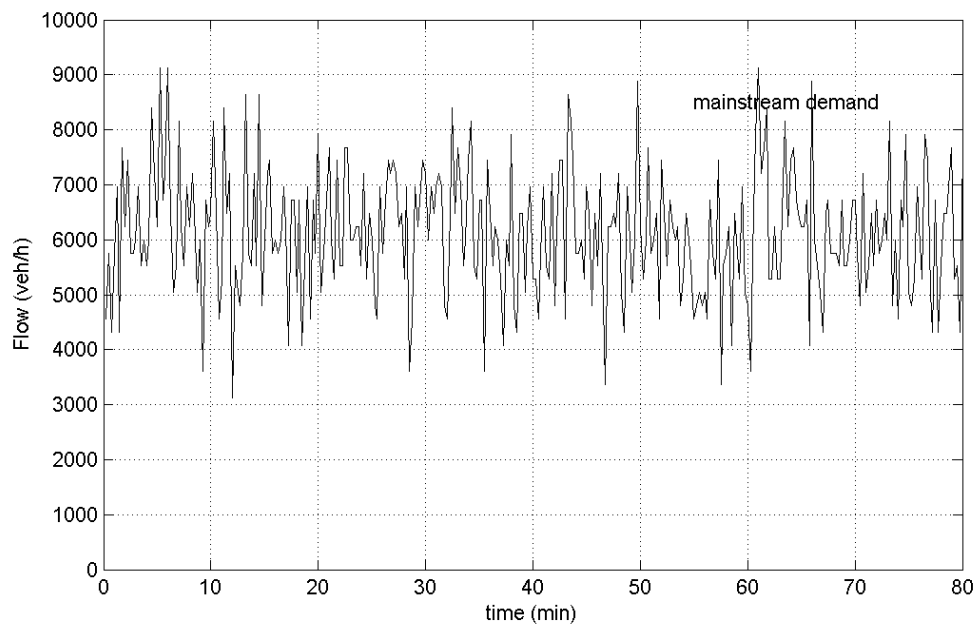
όπου o_8 είναι η μέτρηση του ποσοστού κατάληψης στο σημείο 8 του δικτύου (βλέπε Σχήμα 5-2). Στο τέλος της προσομοίωσης λαμβάνεται το συνολικό Acc. Time σε βήματα προσομοίωσης (time steps).

6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διερευνήσεων εφαρμογής διαφόρων σεναρίων ελέγχου κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο ράμπας αυτοκινητοδρόμου με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ροής και την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο. Οι διερευνήσεις έγιναν με χρήση του μικροσκοπικού προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN (βλέπε Κεφάλαιο 4), προσομοιώνοντας το δίκτυο που περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας (σενάριο 0), με εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA (σενάριο 1), συνδυασμού εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου ALINEA και της στρατηγικής υπερχειλίσσης ουράς (σενάριο 2), συνδυασμού εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου ALINEA και της στρατηγικής ελέγχου ουράς ράμπας (σενάριο 3) και παράλληλης εφαρμογής της στρατηγικής ALINEA και του ελέγχου του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα (σενάριο 4). Στην τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου περιλαμβάνεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων καθώς και η σύγκριση των διαφόρων σεναρίων με βάση τα διάφορα κριτήρια αξιολόγησης.

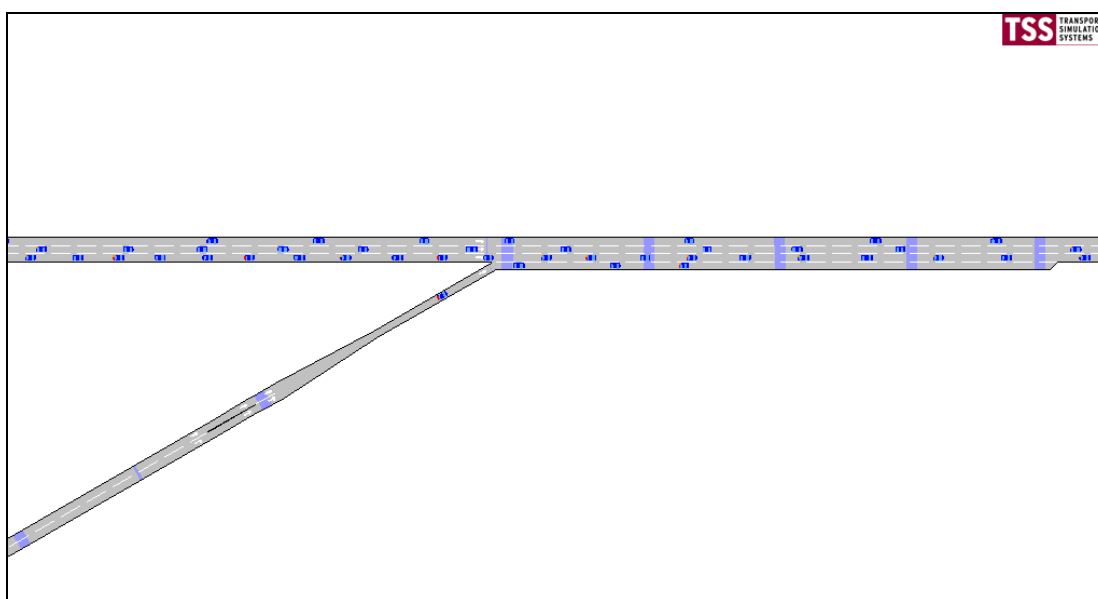
Υπενθυμίζεται ότι ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN, χρησιμοποιεί σε κάθε προσομοίωση διαφορετικούς σπόρους για τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούνται από τα διάφορα μοντέλα του προσομοιωτή. Για παράδειγμα στο Σχήμα 6-1 φαίνεται το σενάριο ζήτησης που εφαρμόζεται στην είσοδο του αυτοκινητοδρόμου και στην είσοδο της ράμπας αντίστοιχα, σε μία συγκεκριμένη προσομοίωση. Η ζήτηση αυτή είναι στοχαστική με μέση τιμή τη ζήτηση που έχει ορίσει ο χρήστης. Επομένως, κάθε προσομοίωση μπορεί να δώσει κάπως διαφορετικά αποτελέσματα. Για την αποφυγή της στοχαστικότητας των αποτελεσμάτων για κάθε εξεταζόμενο σενάριο πραγματοποιούνται δέκα προσομοιώσεις και τελικά υπολογίζεται η μέση τιμή των κριτηρίων αξιολόγησης προκειμένου να συγκριθούν τα σενάρια μεταξύ τους.



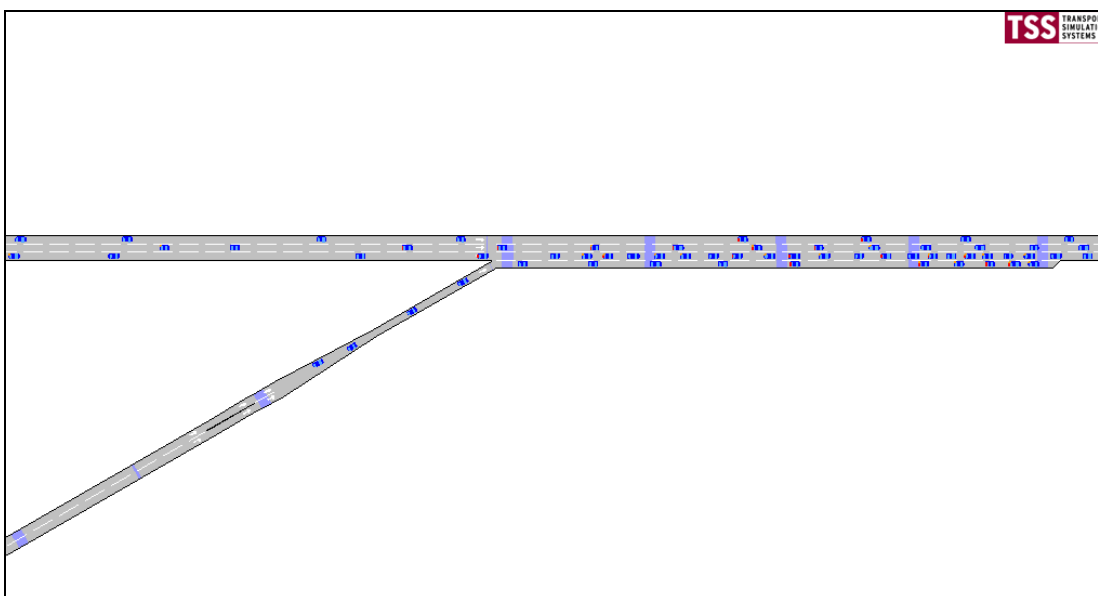
Σχήμα 6-1 Ροή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου.

6.1 Σενάριο 0: χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας (No Control Case)

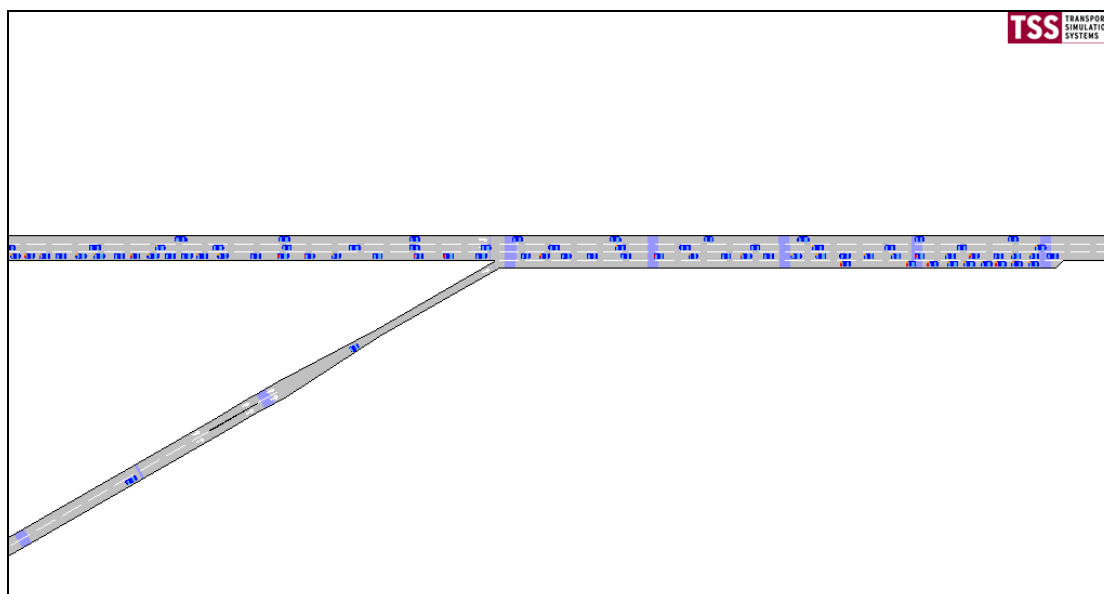
Στο πρώτο σενάριο, χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας, τα οχήματα που βρίσκονται στη ράμπα εισόδου εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο άμεσα χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες όσο η ζήτηση ράμπας και αυτοκινητοδρόμου είναι χαμηλή (Σχήμα 6-2). Όταν η ζήτηση αυξηθεί (ώρες αιχμής), οι διαμάχες κατά τη συγχώνευση των δύο κυκλοφοριακών ροών είναι έντονες οδηγώντας σε επιβραδύνσεις των οχημάτων και δημιουργία συμφόρησης (Σχήμα 6-3). Η συμφόρηση μεταφέρεται σταδιακά προς τα πίσω (Σχήματα 6-4 και 6-5) χωρίς να φτάνει την είσοδο του δικτύου προσομοίωσης.



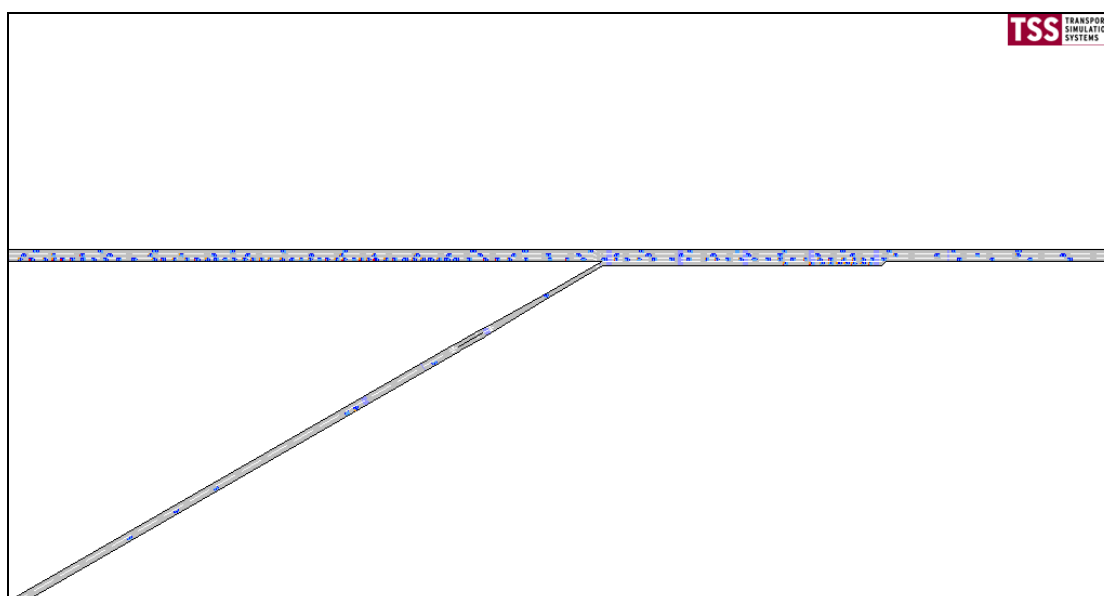
Σχήμα 6-2 Σενάριο 0, 28^ο λεπτό προσομοίωσης.



Σχήμα 6-3 Σενάριο, 32^ο λεπτό προσομοίωσης.



Σχήμα 6-4 Σενάριο 0, 45^ο λεπτό προσομοίωσης.

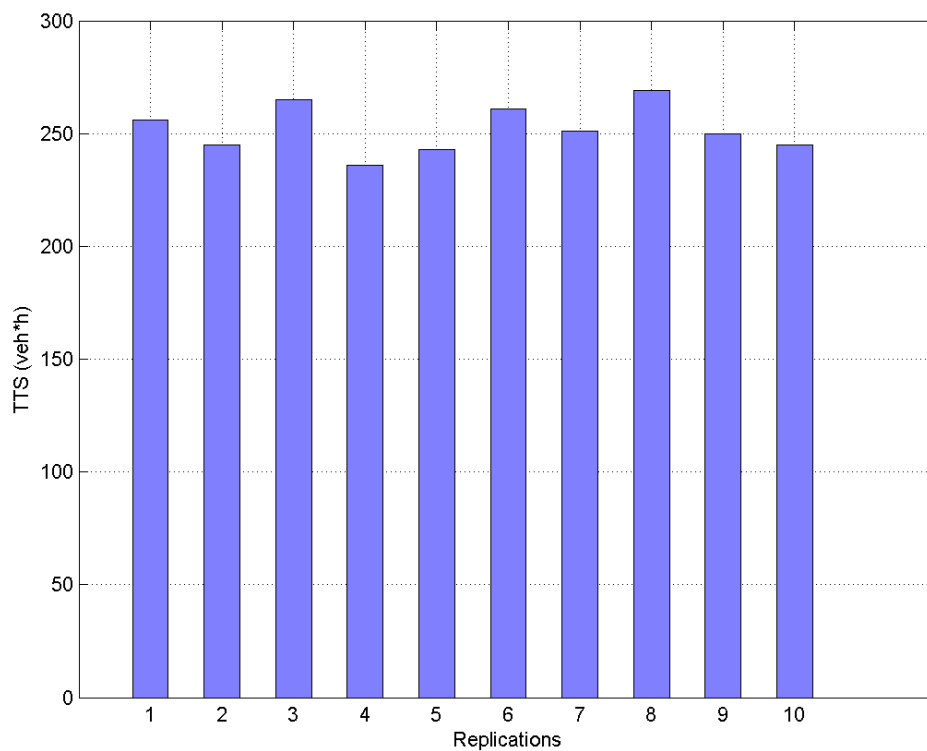


Σχήμα 6-5 Σενάριο 0, 45^ο λεπτό προσομοίωσης, μεταφορά της συμφόρησης προς τα πίσω.

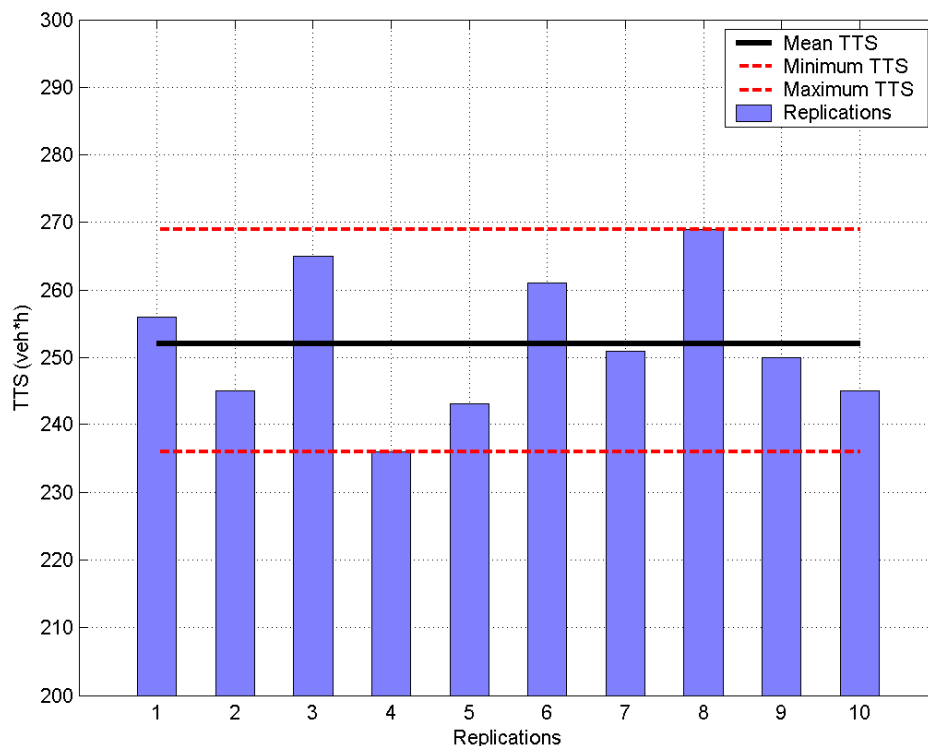
Τα αποτελέσματα του συνολικού χρόνου παραμονής των οχημάτων μέσα στο δίκτυο (TTS) των δέκα προσομοιώσεων για το σενάριο χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας φαίνονται στον Πίνακα 6-1 και στο Σχήμα 6-6. Παρατηρείται ότι οι δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, όπως άλλωστε αναμενόταν. Η μέση τιμή του TTS είναι 252.1 veh·h ενώ η μέγιστη και ελάχιστη τιμή είναι 269veh·h και 236veh·h, αντίστοιχα (Πίνακας 6-1 και Σχήμα 6-7). Οι τιμές αυτές θα συγκριθούν στη συνέχεια με τα αποτελέσματα των υπόλοιπων σεναρίων.

Πίνακας 6-1 Συνολικός χρόνος παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο (TTS) για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.

Αριθμός Προσομοίωσης- Replication No	TTS (veh·h)
1	256
2	245
3	265
4	236
5	243
6	261
7	251
8	269
9	250
10	245
Μέση Τιμή	252.1
Μέγιστη Τιμή	269
Ελάχιστη Τιμή	236

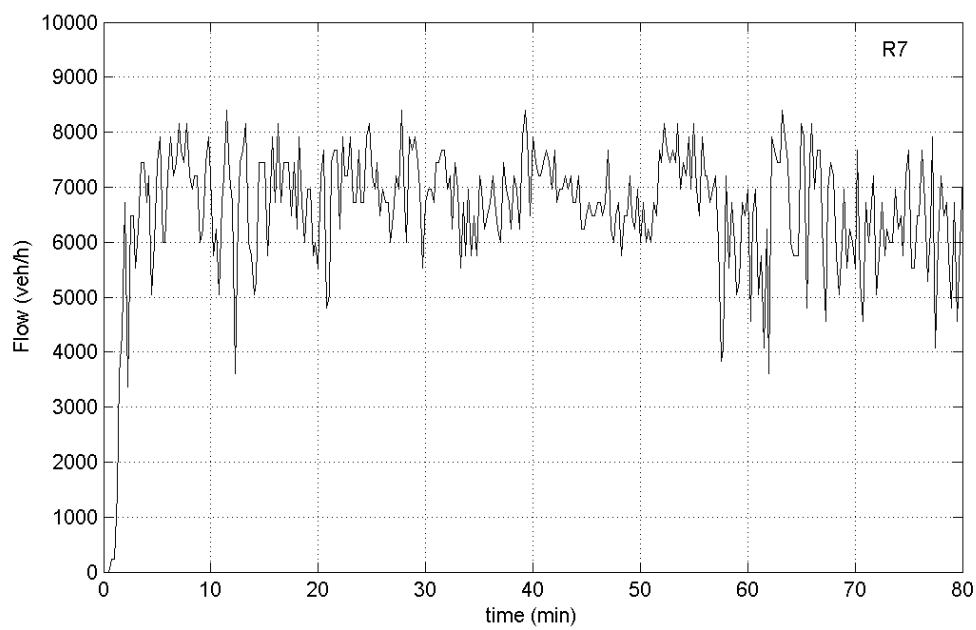
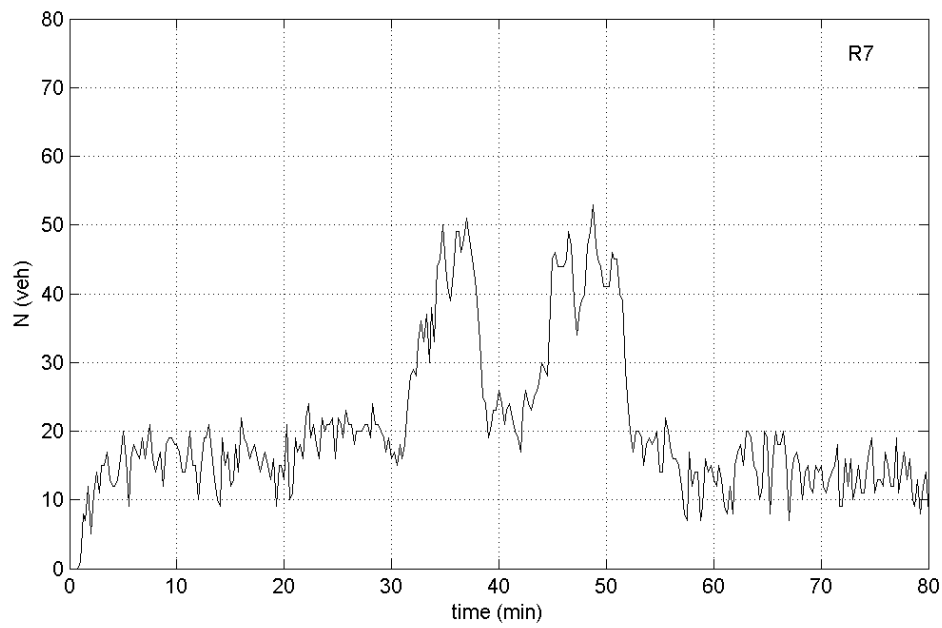


Σχήμα 6-6 Συνολικός χρόνος παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο (TTS), χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.



Σχήμα 6-7 Μέσος, μέγιστος και ελάχιστος συνολικός χρόνος παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο (TTS), χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.

Το Σχήμα 6-8 παρουσιάζει, για μια συγκεκριμένη προσομοίωση, τον αριθμό οχημάτων στην περιοχή συγκώνευσης (ανάμεσα στα σημεία 1-5, Σχήμα 5-2) και της ροής οχημάτων στην έξοδο της περιοχής συγκώνευσης (στο σημείο 1 Σχήμα 5-2) ως προς το χρόνο προσομοίωσης. Η προσομοίωση αυτή έχει $TTS=251veh \cdot h$, το οποίο είναι αρκετά κοντά στο μέσο TTS των δέκα προσομοιώσεων. Στο Σχήμα 6-8, παρατηρείται ότι ο αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγκώνευσης αυξάνεται αργά, κατά τη διάρκεια των πρώτων 30 λεπτών της προσομοίωσης, ενώ η ροή εξόδου από την περιοχή συγκώνευσης ακολουθεί τη συνολική ζήτηση που εφαρμόζεται στο δίκτυο φτάνοντας τα $7000veh/h$ κατά μέσο όρο. Μετά τα 30 λεπτά, και κατά τη διάρκεια της μέγιστης ζήτησης, ο αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγκώνευσης αυξάνεται απότομα φτάνοντας, για κάποια διαστήματα, τα $50veh$. Η ροή οχημάτων στην έξοδο, κατά το διάστημα αυτό, μειώνεται περίπου στα $6500veh/h$, λόγω της συμφόρησης που δημιουργείται στην περιοχή της συγκώνευσης των δύο κυκλοφοριακών ροών. Όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση του δικτύου μειώνεται, μετά το 50^ο λεπτό, ο αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγκώνευσης μειώνεται, ενώ παράλληλα η ροή εξόδου q_{out} λαμβάνει κατά μέσο όρο μικρές τιμές λόγω της μειωμένης ζήτησης.



Σχήμα 6-8 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.

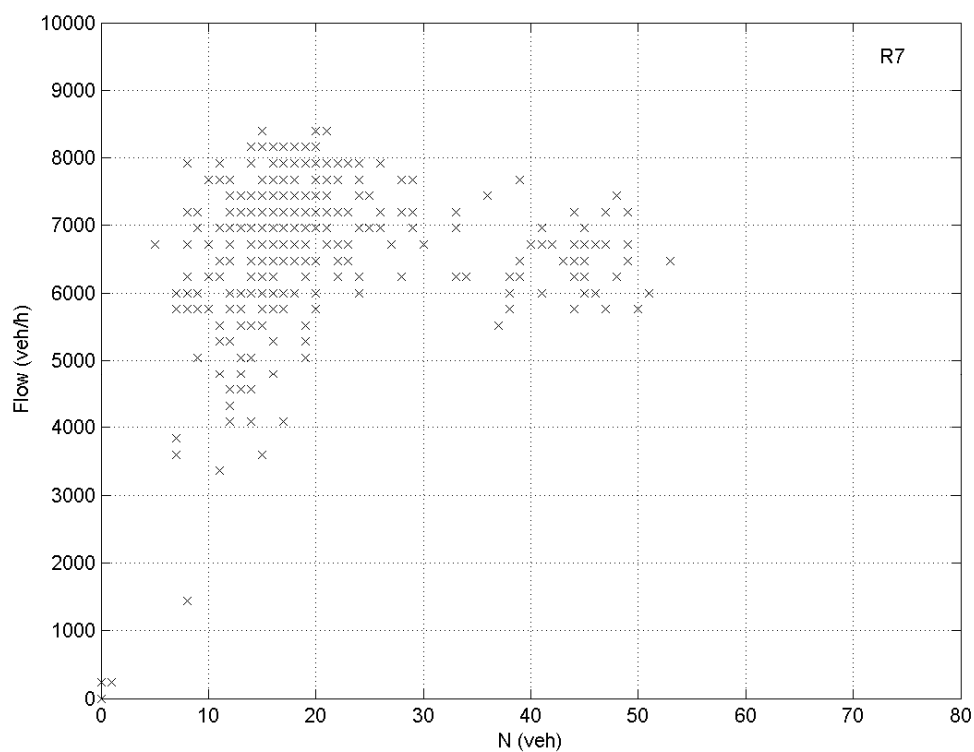
Το Σχήμα 6-9 δείχνει τη ροή οχημάτων στην έξοδο της περιοχής συγχώνευσης συναρτήσει του αριθμού οχημάτων N . Παρατηρείται ότι για αριθμό οχημάτων N κοντά στην τιμή 20 η ροή εξόδου q_{out} λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, περίπου 7000veh/h κατά μέσο όρο. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ικανότητα ροής q_{cap} του αυτοκινητοδρόμου (βλέπε Σχήμα 2-2), ενώ μεγαλύτερες τιμές αριθμού οχημάτων N οδηγούν σε μικρότερες ροές εξόδου q_c λόγω της συμφόρησης. Αντίστοιχα, το Σχήμα 6-10 δείχνει την ταχύτητα των οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης, στο σημείο 3 του Σχήματος 5-2, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της μέγιστης ζήτησης του δικτύου (ώρες αιχμής) η ταχύτητα των οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης μειώνεται στα 50km/h, ενώ το υπόλοιπο διάστημα η μέση ταχύτητα κυμαίνεται στα 90-100km/h.

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα των υπόλοιπων προσομοιώσεων είναι παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

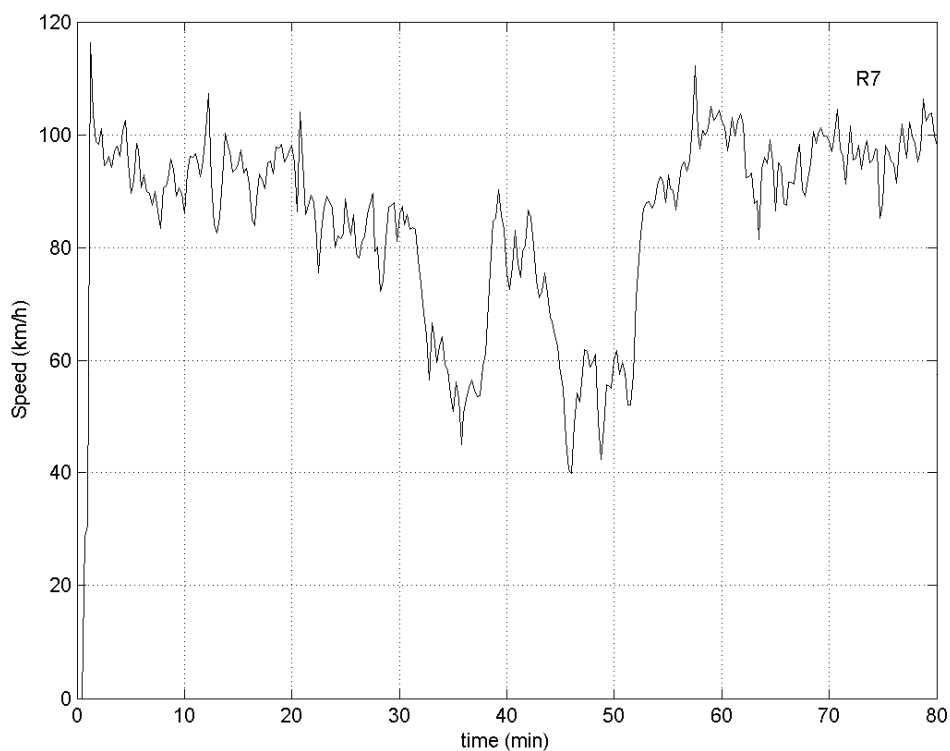
6.2 Σενάριο 1: εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου *ALINEA*

Όταν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας στη ράμπα εισόδου, οι φωτεινοί σηματοδότες λειτουργούν με μία σύντομη φάση (που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροή $r_{max}=1300veh/h$), όσο ο αριθμός οχημάτων N στην περιοχή συγχώνευσης είναι μικρότερος από την προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή $\hat{N}$ στη Εξίσωση 3.4 της *ALINEA*. Η ελάχιστη αυτή κόκκινη φάση, μπορεί να προκαλεί μικρές καθυστερήσεις στα οχήματα, χωρίς όμως να δημιουργείται ουρά πριν του φωτεινούς σηματοδότες. Καθώς η ζήτηση αυξάνεται, το N αυξάνεται και όταν το $N(k) > \hat{N}$, ο ελεγκτής αρχίζει ουσιαστικά να λειτουργεί στοχεύοντας να διατηρήσει το $N(k)$ κοντά στο $\hat{N}$. Τη στιγμή αυτή, ουρά αρχίζει να σχηματίζεται πριν από του φωτεινούς σηματοδότες, η οποία αυξάνεται χωρίς να ξεπερνάει τα όρια του δικτύου (Σχήματα 6-11 και 6-12).

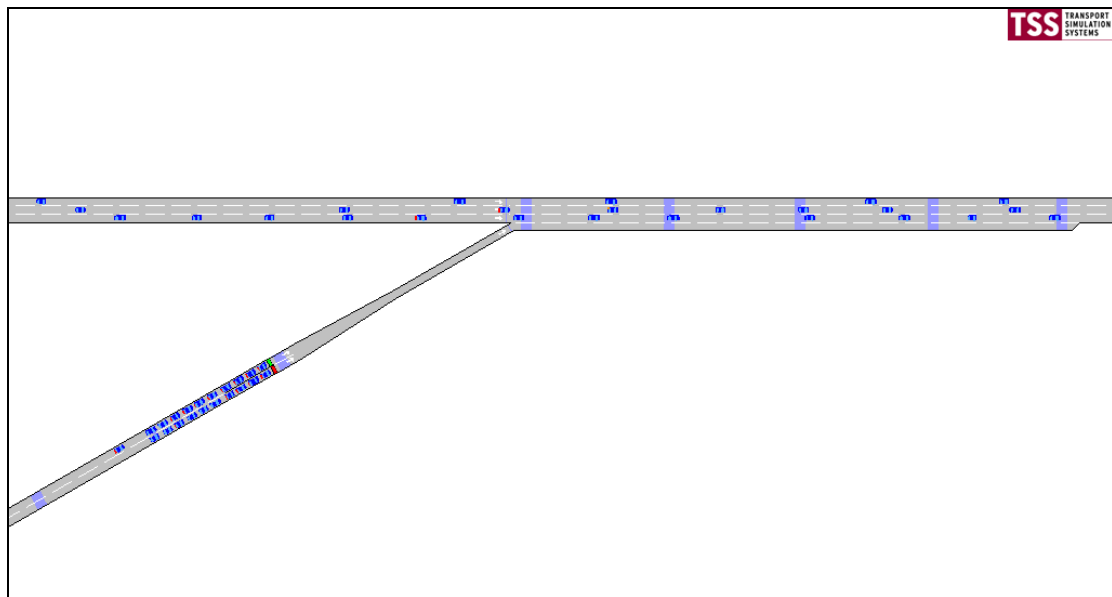
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός του ελέγχου κυκλοφορίας ραμπών αυτοκινητοδρόμου είναι η μεγιστοποίηση της ροής εξόδου και ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων και επομένως του συνολικού χρόνου που τα οχήματα παραμένουν μέσα στο δίκτυο. Η μεγιστοποίηση της ροής εξόδου επιτυγχάνεται με κατάλληλο προσδιορισμό της επιθυμητής τιμή $\hat{N}$ στην Εξίσωση 3.4



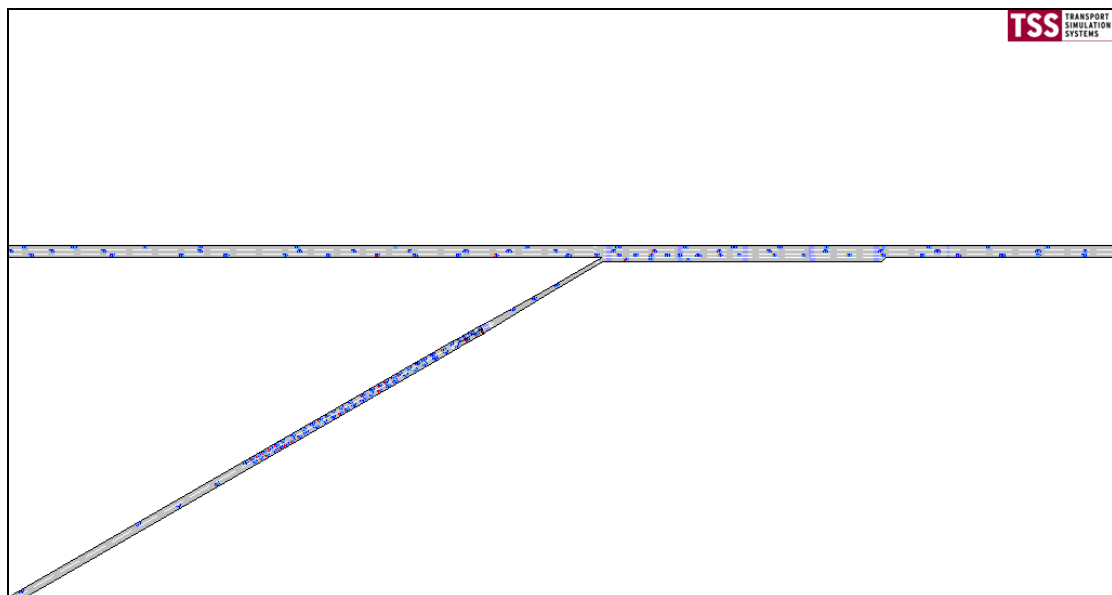
Σχήμα 6-9 Ροή εξόδου q_{out} και αριθμός οχημάτων N , χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.



Σχήμα 6-10 Ταχύτητα στην περιοχή συγχώνευσης, χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.

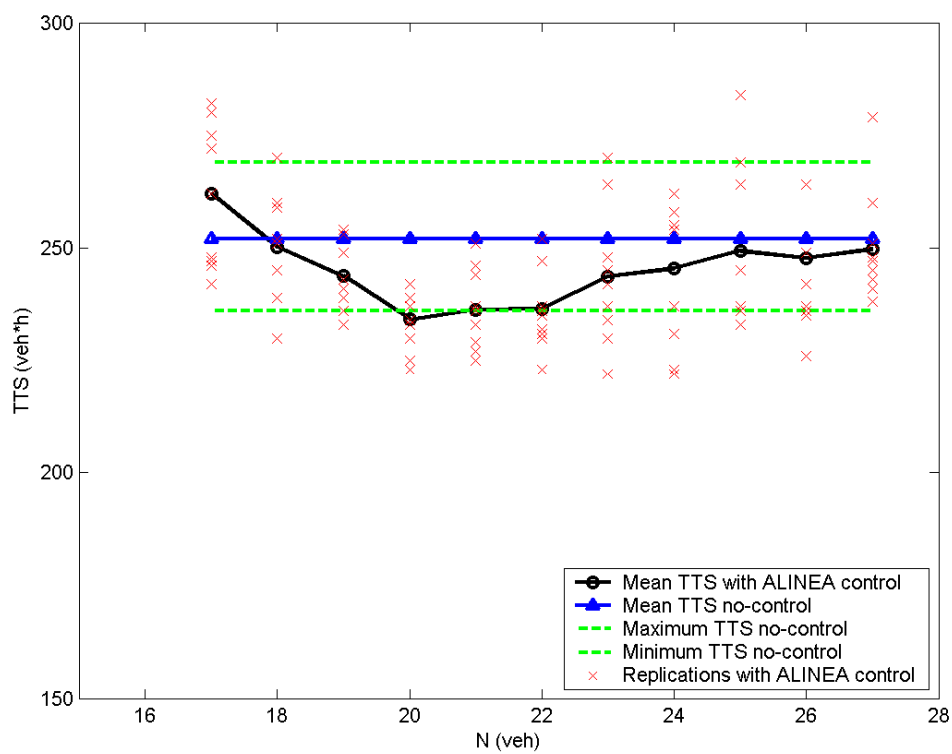


Σχήμα 6-11 Σενάριο 1, 28^ο λεπτό προσομοίωσης.

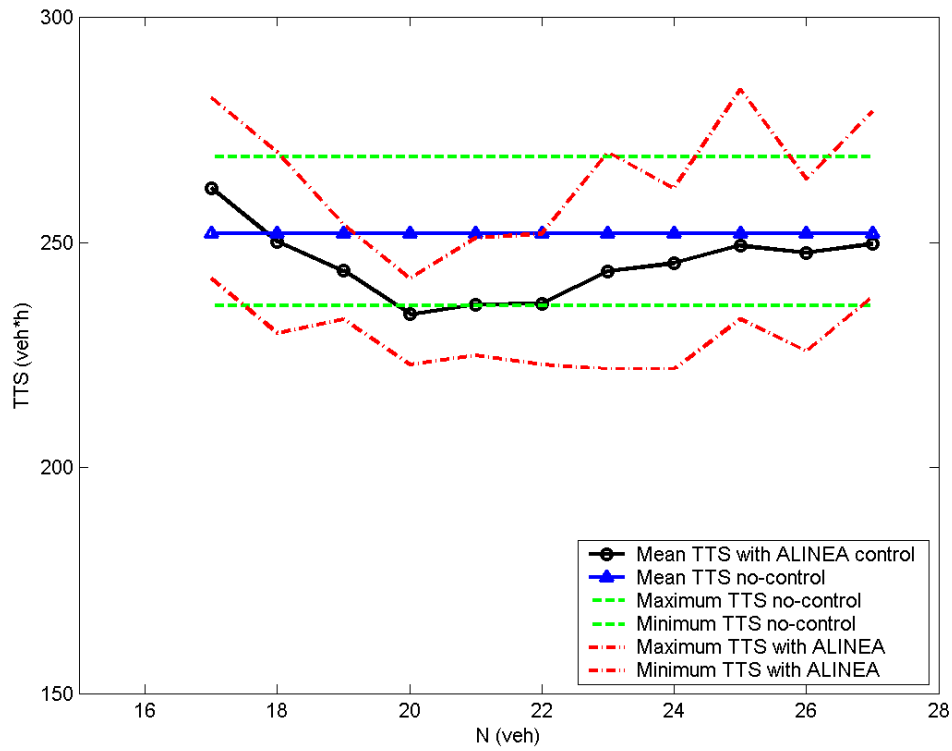


Σχήμα 6-12 Σενάριο 1, 45^ο λεπτό προσομοίωσης.

Η διερεύνηση του ζητήματος αυτού γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο. Για ένα διάστημα τιμών $\hat{N} \in [17, 27]$ veh και δέκα προσομοιώσεις για κάθε τέτοια τιμή, λαμβάνεται το TTS των οχημάτων μέσα στο δίκτυο. Υπενθυμίζεται ότι η τιμή της παραμέτρου K_R είναι $200h^{-1}$. Τα Σχήματα 6-13 και 6-14 δείχνουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 6-13 δείχνει για κάθε εξεταζόμενη $\hat{N}$ -τιμή, τα TTS για κάθε μία από τις δέκα προσομοιώσεις καθώς και τη μέση τιμή του TTS όλων των προσομοιώσεων. Για σύγκριση στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται το μέσο TTS, των δέκα προσομοιώσεων, για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας καθώς και η μέγιστη και ελάχιστη τιμή για την ίδια περίπτωση.



Σχήμα 6-13 TTS των οχημάτων για διάφορες τιμές $\hat{N} \in [17, 27]$ veh.



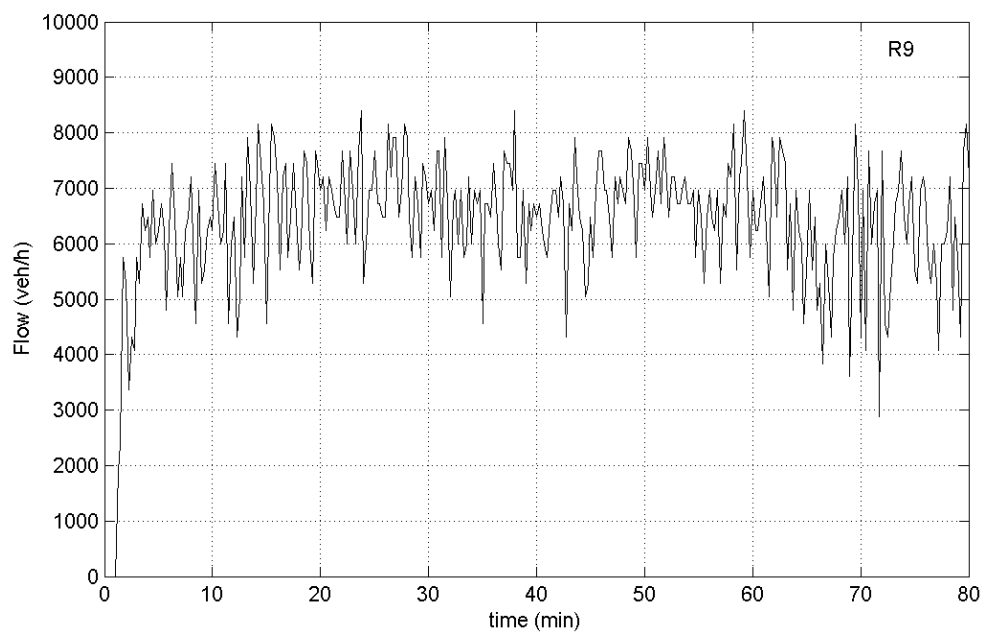
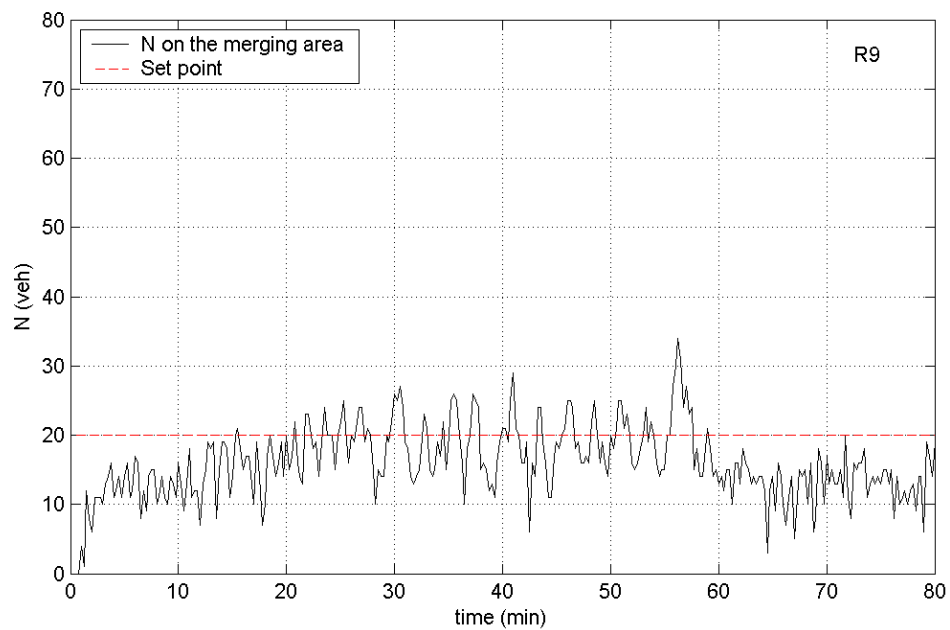
Σχήμα 6-14 TTS των οχημάτων για διάφορες τιμές $\hat{N} \in [17, 27]$ veh.

Το Σχήμα 6-13 δείχνει ότι για $\hat{N}$ τιμές κοντά στα 20 οχήματα το μέσο TTS ελαχιστοποιείται, προφανώς λόγω της μεγιστοποίησης της ροής εξόδου. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στην κρίσιμη τιμή N_{cr} που αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους. Για $\hat{N}$ μικρότερο του $N_{cr} = 20\text{veh}$, το μέσο TTS αυξάνεται επειδή η ροή εξόδου που αντιστοιχεί σε αυτό το $\hat{N}$, είναι μικρότερη από την ικανότητα του κατάντη αυτοκινητοδρόμου και επομένως η υποδομή δεν αξιοποιείται πλήρως. Αντίθετα, για τιμές $\hat{N}$ μεγαλύτερες του $N_{cr} = 20\text{veh}$, το μέσο TTS είναι μεγάλο λόγω της μικρής ροής εξόδου από την περιοχή συγχώνευσης εξαιτίας της συμφόρησης που εμφανίζεται στην περιοχή. Για το διάστημα τιμών $\hat{N} \in [18, 25]\text{veh}$ παρατηρείται ότι το μέσο TTS με εφαρμογή της ALINEA είναι μικρότερο από το μέσο TTS όταν δεν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας, ενώ για το διάστημα τιμών $\hat{N} \in [19, 22]\text{veh}$ τα TTS όλων των προσομοιώσεων είναι μικρότερα ή ίσα με το μέσο TTS της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας. Συμπερασματικά, για $\hat{N} = N_{cr} = 20\text{veh}$ το μέσο TTS είναι 7% μικρότερο από το μέσο TTS της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας. Επίσης, για $\hat{N} = 20\text{veh}$, η διακύμανση των TTS των δέκα προσομοιώσεων από τη μέση τιμή είναι αρκετά μικρή όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-14.

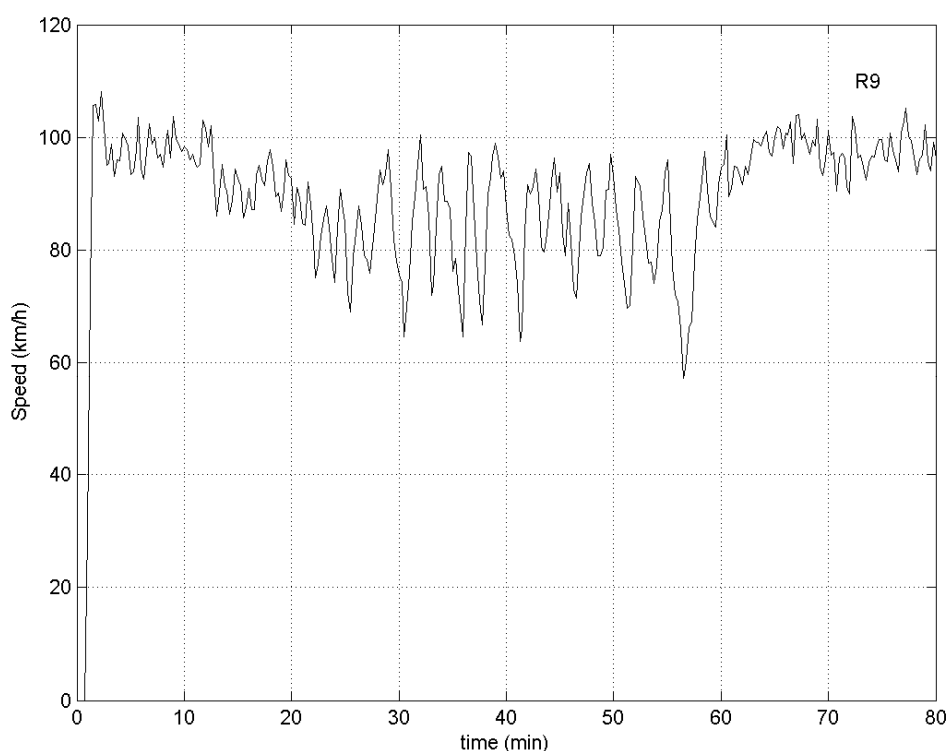
Στον Πίνακα 6-2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης με $\hat{N} = 20\text{veh}$, για κάθε προσομοίωση ξεχωριστά, καθώς και η μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή των TTS.

Πίνακας 6-2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για $\hat{N} = 20\text{veh}$.

Αριθμός Προσομοίωσης-Replication No	TTS (veh·h)
1	240
2	223
3	242
4	237
5	225
6	239
7	230
8	239
9	234
10	233
Μέση Τιμή	234.2
Μέγιστη Τιμή	242
Ελάχιστη Τιμή	223



Σχήμα 6-15 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA.



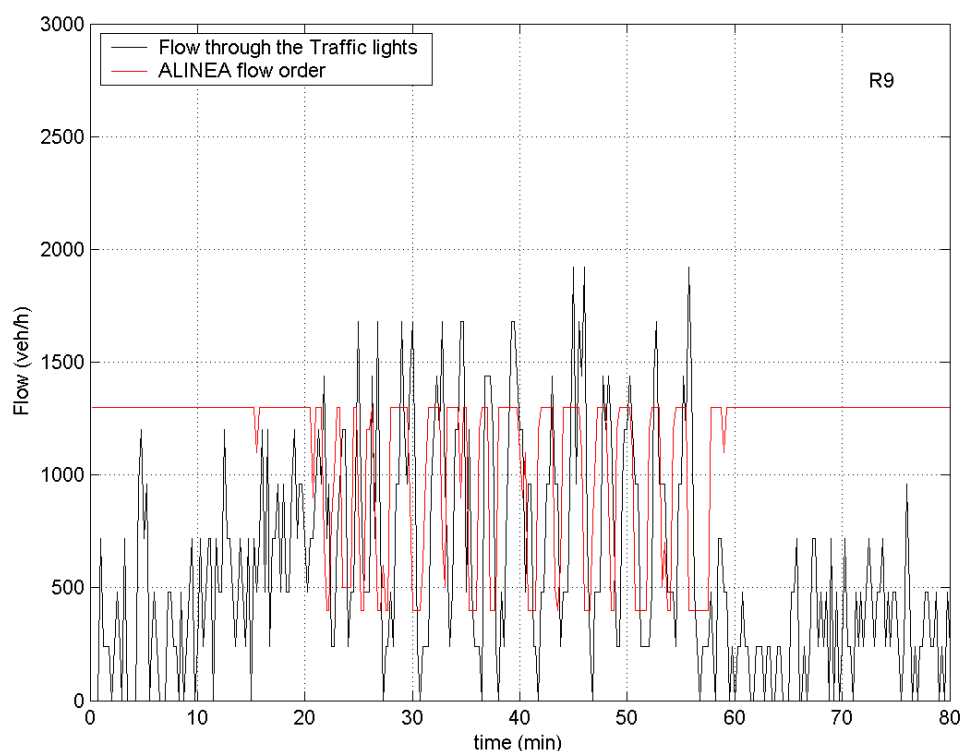
Σχήμα 6-16 Ταχύτητα στην περιοχή συγχώνευσης, με εφαρμογή ALINEA.

Το Σχήμα 6-15 δείχνει τον αριθμό οχημάτων N στην περιοχή συγχώνευσης και τη ροή εξόδου από την περιοχή συγχώνευσης, για μία συγκεκριμένη προσομοίωση με $\hat{N} = 20\text{veh}$ και TTS που είναι κοντά στην τιμή του μέσου TTS (Πίνακας 6-2). Στο Σχήμα 6-15 παρατηρείται ότι ο αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης διατηρείται κατά μέσο όρο κοντά στην επιθυμητή τιμή $\hat{N} = 20\text{veh}$ σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας της ALINEA, μεταξύ του 20^{ου} και 60^{ου} λεπτού της προσομοίωσης. Αντίστοιχα, οι μετρήσεις ροής οχημάτων στην έξοδο της περιοχής συγχώνευσης κατά τη διάρκεια της μέγιστης ζήτησης λαμβάνουν τιμές κοντά στα 6700veh/h κατά μέσο όρο. Η βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών γίνεται περισσότερο εμφανής παρατηρώντας τη μέση ταχύτητα των οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης με μέση τιμή τα 85km/h (Σχήμα 6-16).

Τέλος το Σχήμα 6-17 δείχνει τη ροή οχημάτων που υπολογίζει η ALINEA, βάσει του αριθμού οχημάτων μέσα στην περιοχή συγχώνευσης και του επιθυμητού αριθμού οχημάτων $\hat{N}$, και τη ροή οχημάτων που διέρχεται τελικά από τους φωτεινούς σηματοδότες. Παρατηρείται ότι οι δύο αυτές ροές, σχεδόν, ταυτίζονται όσο η ALINEA είναι ενεργή. Οι μικρές αποκλίσεις της ροής που διέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες οφείλονται στο γεγονός ότι κάποια από τα οχήματα μπορεί

είτε να παραβιάσουν την πολιτική 2 οχήματα ανά πράσινο και επομένως το κόκκινο, είτε λόγω κάποιας αργής εκκίνησης του προπορευόμενου οχήματος δεν προλαβαίνουν να περάσουν από του φωτεινούς σηματοδότες στον ίδιο κύκλο, οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερες ή μικρότερες ροές, από την υπολογισμένη τιμή, αντίστοιχα.

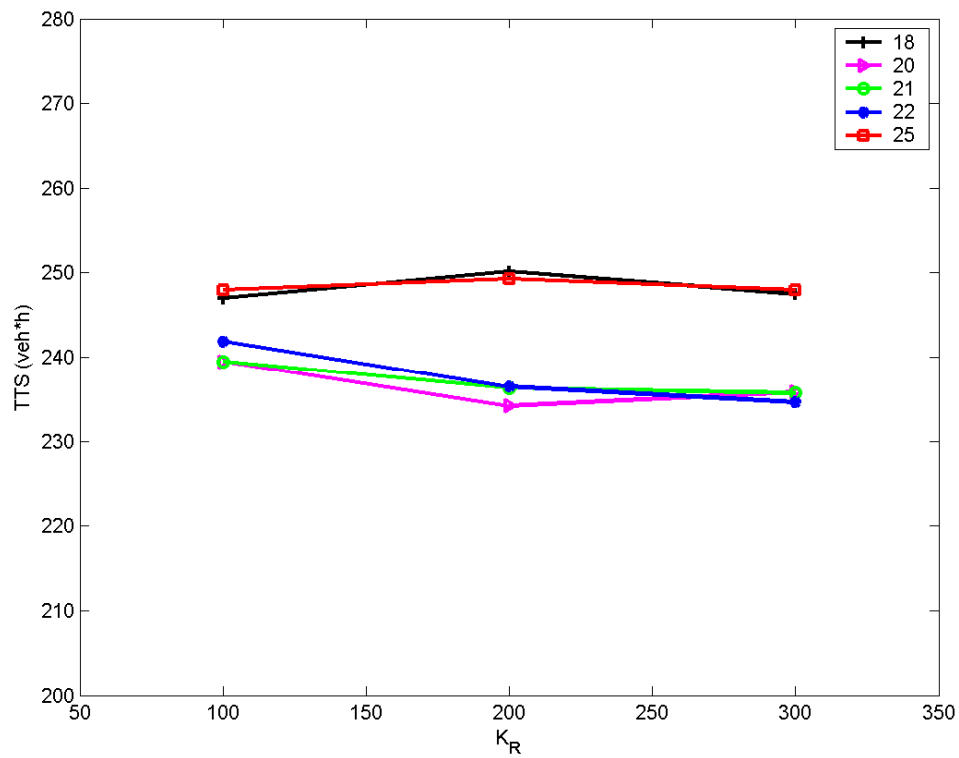
Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα των υπόλοιπων προσομοιώσεων είναι παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 6-17 Ροή οχημάτων που υπολογίζει η ALINEA και ροή που διέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προαναφέρθηκαν πραγματοποιήθηκαν με τιμή της παραμέτρου K_R , στην εξίσωση της ALINEA, ίση με $200h^{-1}$. Είναι, όμως, σημαντικό να διερευνηθεί η ευαισθησία της στρατηγικής ελέγχου, και συνεπώς των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, στην τιμή της παραμέτρου αυτής καθώς μεγάλη ευαισθησία υποδηλώνει μεγάλη προσπάθεια για σωστή ρύθμιση της τιμής αυτής σε πραγματικές εφαρμογές πεδίου. Το Σχήμα 6-18 παρουσιάζει το μέσο TTS που προκύπτει από την εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας για διάφορες $\hat{N}$ τιμές, στο διάστημα $[18, 25]veh$, με χρήση τριών K_R τιμών $(100, 200, 300)h^{-1}$. Σημειώνεται ότι κάθε σημείο του Σχήματος 6-18 αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο

ζευγάρι $\hat{N}, K_R$ τιμών και για κάθε τέτοιο ζευγάρι πραγματοποιήθηκαν δέκα προσομοιώσεις.



Σχήμα 6-18 Ευαισθησία της τιμής της ρυθμιστικής παραμέτρου K_R για διάφορες $\hat{N}$ τιμές.

Παρατηρώντας το Σχήμα 6-18 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα, όσον αφορά το TTS, για κάθε $\hat{N}$ τιμή ξεχωριστά είναι παρόμοια ανεξάρτητα από την τιμή της παραμέτρου K_R . Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα διάστημα τιμών της παραμέτρου K_R για το οποίο η συμπεριφορά του ελεγκτή είναι εξίσου αποτελεσματική και αποδοτική και επομένως η ανάγκη επακριβούς ρύθμισης της τιμής αυτής σε πραγματικές εφαρμογές αναμένεται να είναι μικρή. Επίσης στο Σχήμα 6-18 παρατηρείται ότι για $\hat{N}$ τιμές στο διάστημα $[19, 22]$ veh το TTS των οχημάτων του συστήματος ελαχιστοποιείται ενώ για τιμές εκτός του διαστήματος αυτού το TTS λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές.

Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων εφαρμογής του σεναρίου 2 και του σεναρίου 3. Σημειώνεται ότι για τη σύγκριση του σεναρίου 1 με τα υπόλοιπα σενάρια χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων με $\hat{N} = 20$ veh και $K_R = 200h^{-1}$.

6.3 Σενάριο 2: εφαρμογή ελέγχου υπερχείλισης της ουράς (Queue Override)

Η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA στο δίκτυο που εξετάζεται, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ουρών στη ράμπα εισόδου που μπορεί να φτάσουν και τα 300m. Στο σενάριο αυτό ορίζεται ένα μέγιστο επιτρεπτό μήκος ουράς, ίσο με 100m, και όταν η εκτιμώμενη ουρά στη ράμπα υπερβεί το όριο αυτό, τότε καταργείται ο έλεγχος με ALINEA και εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου υπερχείλισης ουράς (Queue Override).

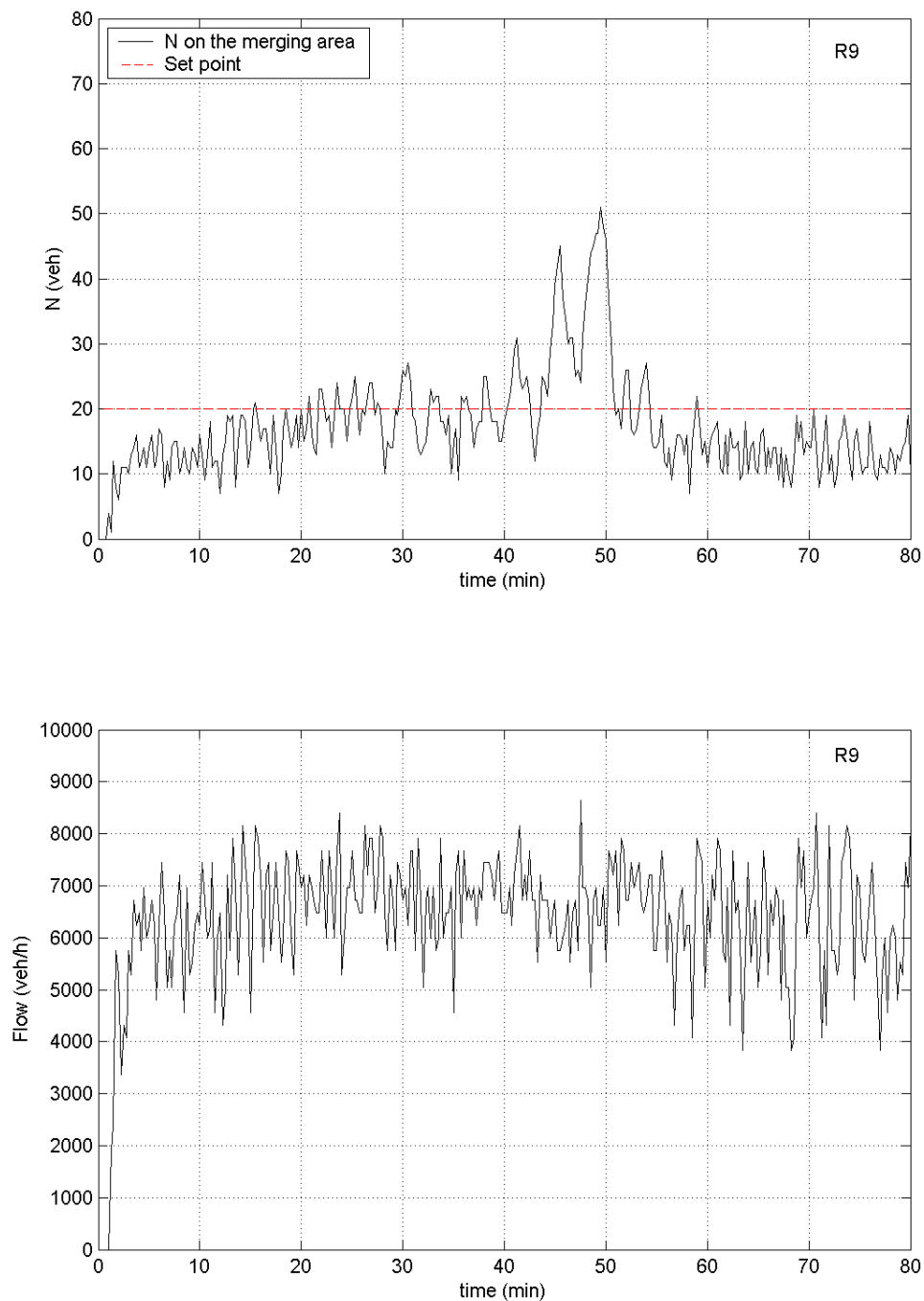
Στο σενάριο αυτό το σημαντικότερο κριτήριο αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο συνολικός χρόνος που η πραγματική ουρά στη ράμπα ξεπερνάει το επιτρεπτό μήκος ουράς (Accumulated Time), το οποίο υπολογίζεται σε βήματα προσομοίωσης (time steps). Σκοπός της στρατηγικής υπερχείλισης ουράς (QO) είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής της παραμέτρου αυτής.

Πίνακας 6-3 Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για ALINEA και ALINEA&QO.

Replication No	Acc. Time (time steps) ALINEA	Acc. Time (time steps) ALINEA & QO
1	1680	840
2	380	180
3	1640	900
4	1360	720
5	500	300
6	1480	840
7	600	720
8	920	400
9	1360	680
10	1200	720
Μέση Τιμή	1112	630

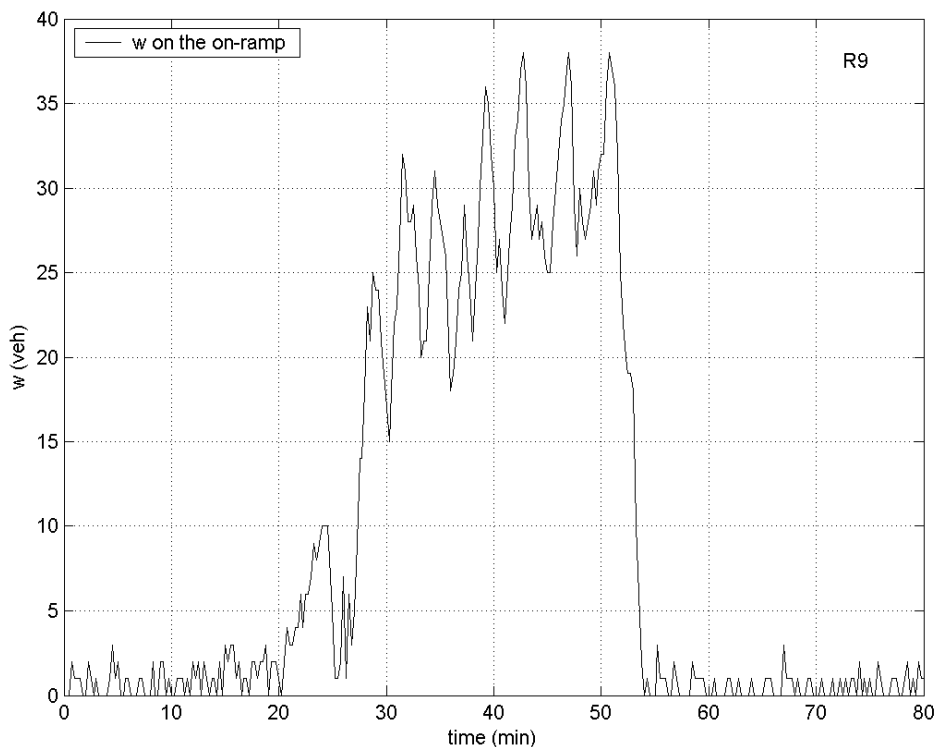
Στον Πίνακα 6-3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου ALINEA σε συνδυασμό με την στρατηγική QO, σενάριο 2, και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα με χρήση μόνο της στρατηγικής ALINEA, σενάριο 1, ως προς το κριτήριο της χρόνου υπερχείλισης της ουράς (Acc. Time). Παρατηρώντας τη μέση τιμή των δέκα προσομοιώσεων, διαπιστώνεται ότι το σενάριο 2 επιτυγχάνει μεγάλη μείωση στην τιμή του κριτηρίου αυτού σε σχέση με το σενάριο 1, επιφέροντας 43% βελτίωση στο χρόνο υπερχείλισης ουράς (Acc. Time), κατά μέσο όρο. Σημειώνεται

ότι, ο χρόνος υπερχείλισης της ουράς είναι μηδενικός για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας, σενάριο 0, καθώς τα οχήματα που εισέρχονται στη ράμπα εισόδου εισχωρούν άμεσα στον κυρίως αυτοκινητόδρομο χωρίς σχηματισμό ουρών στη ράμπα.

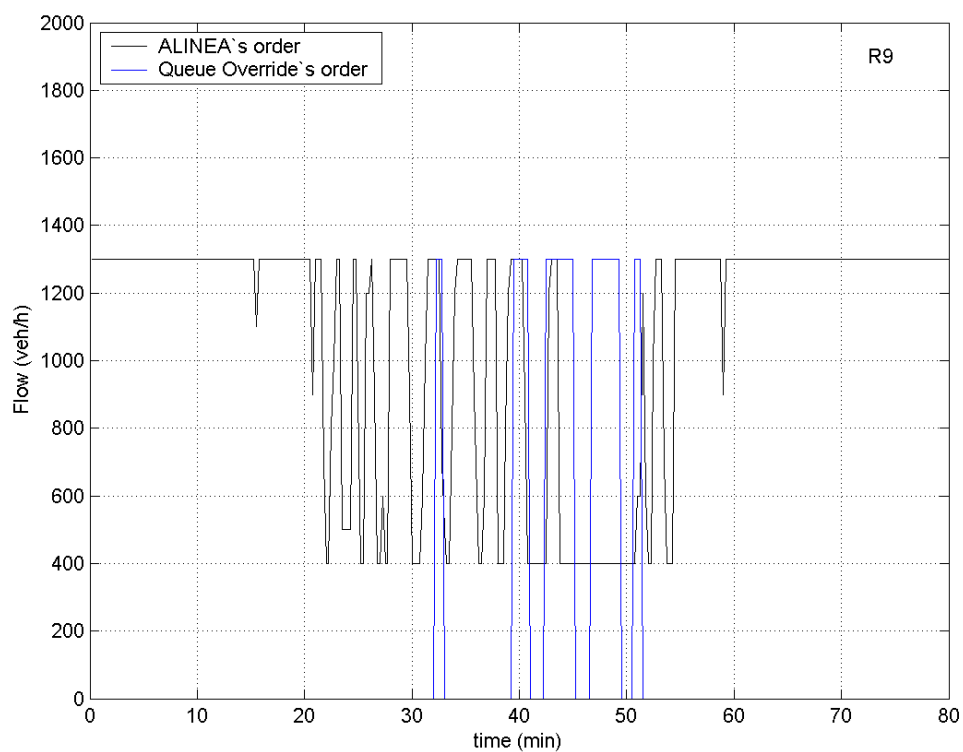


Σχήμα 6-19 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και QO.

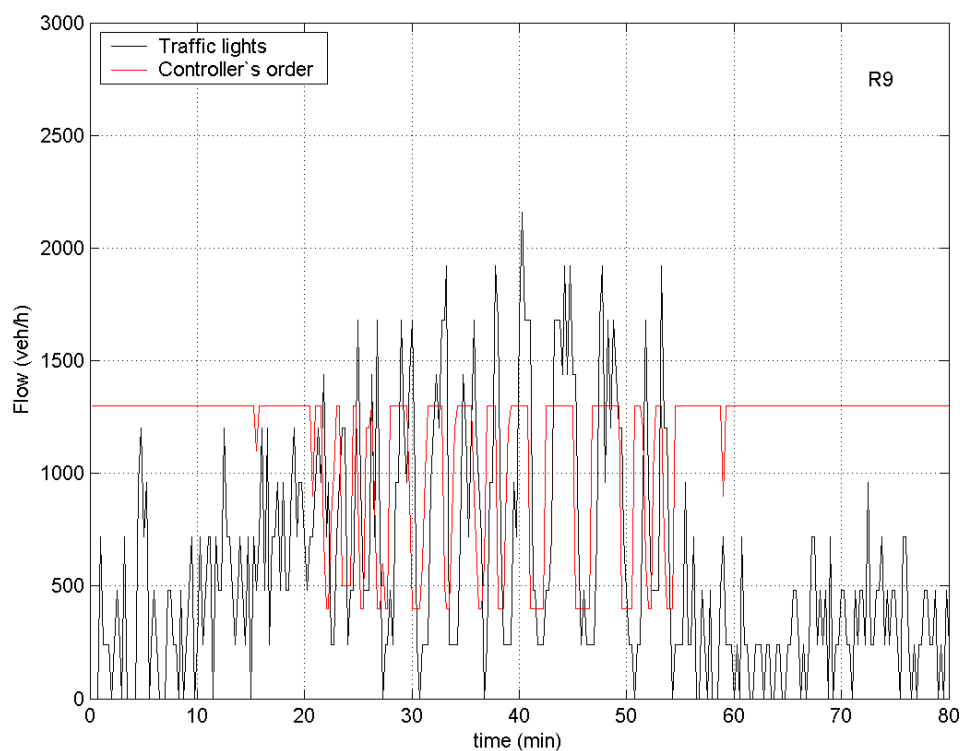
Το Σχήμα 6-19 δείχνει τον αριθμό οχημάτων στην περιοχή συγκώνευσης, και τη ροή εξόδου από την περιοχή συγκώνευσης για μία συγκεκριμένη προσομοίωση, με χρόνο υπερχειλίσσης (Acc. Time) κοντά στο μέσο χρόνο υπερχειλίσσης των δέκα προσομοιώσεων. Παρατηρείται ότι ο αριθμός οχημάτων N διατηρείται κατά μέσο όρο κοντά στην επιθυμητή τιμή και η ροή οχημάτων στην έξοδο q_{out} είναι αρκετά υψηλή, περίπου 7000veh/h, εκτός από το διάστημα $[45, 50]$ min για το οποίο η ροή εξόδου μειώνεται στα 6200veh/h και ο αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγκώνευσης αυξάνεται έως 50veh. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-20, ο αριθμός οχημάτων w στη ράμπα έχει, προς στιγμήν, ξεπεράσει το επιτρεπτό μήκος ουράς με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της στρατηγικής QO στη θέση της ALINEA. Στο Σχήμα 6-21 φαίνεται η ροή που υπολογίζει η στρατηγική ελέγχου ALINEA και η στρατηγική QO αντίστοιχα. Η τελική ροή που εφαρμόζεται στη ράμπα μέσω των φωτεινών σηματοδοτών είναι η μέγιστη από τις δύο αυτές ροές όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-22.



Σχήμα 6-20 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα, με εφαρμογή ALINEA και QO.



Σχήμα 6-21 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και QO.



Σχήμα 6-22 Ροή οχημάτων που υπολογίζει ο ελεγκτής και ροή που διέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες, με εφαρμογή ALINEA και QO.

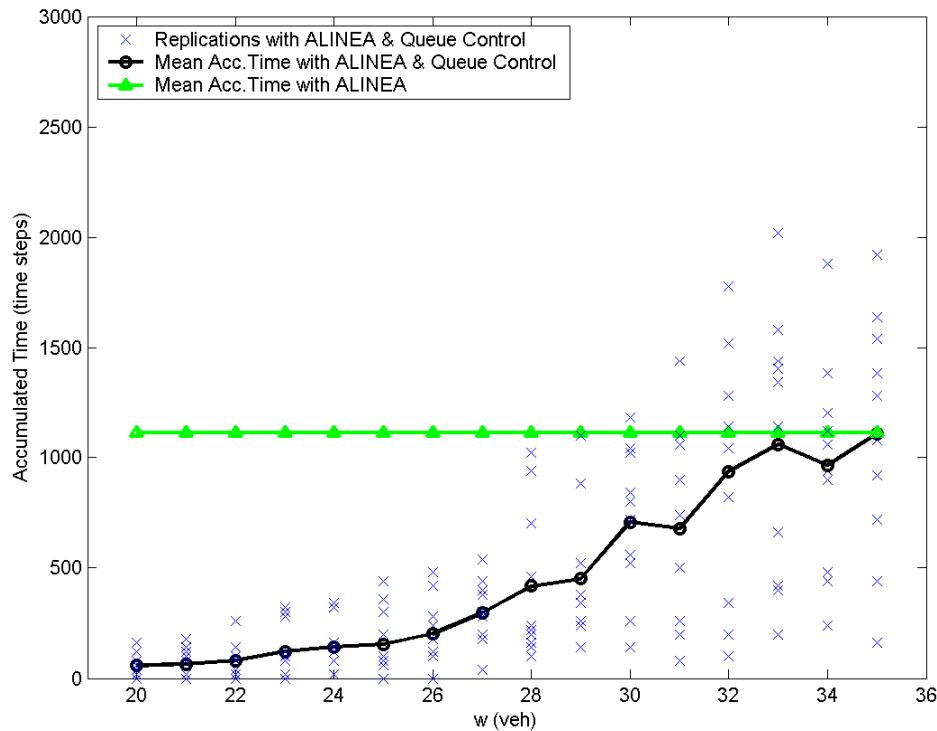
Σημειώνεται ότι το μέσο TTS για το σενάριο αυτό είναι 237.8 veh/h, δηλαδή λίγο μεγαλύτερο από το μέσο TTS του σεναρίου 1. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων προσομοιώσεων είναι, και σε αυτήν την περίπτωση, παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

6.4 Σενάριο 3: εφαρμογή ελέγχου ουράς ράμπας (Queue Control)

Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο η εφαρμογή του σεναρίου 2 επιφέρει βελτίωση έως και 43%, αναφορικά με το κριτήριο του χρόνου υπερχείλισης (Acc.Time) της ουράς στη ράμπα, σε σύγκριση με το σενάριο 1 που δεν εφαρμόζεται καμία στρατηγική διαχείρισης της ουράς στη ράμπα. Κάποιες φορές όμως υπάρχει επιτακτική ανάγκη για ελαχιστοποίηση του χρόνου αυτού και βέλτιστη διαχείριση της ουράς στη ράμπα, εξαιτίας των σοβαρών επιπτώσεων μίας πιθανής εμπλοκής των σταματημένων οχημάτων της ουράς της ράμπας με τη ροή ενός ανάντη δικτύου. Στο σενάριο αυτό εξετάζεται η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας στη ράμπα εισόδου με ALINEA σε συνδυασμό με τη χρήση ενός ελεγκτή ουράς (Queue Control), όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, με κατάλληλο προσδιορισμό της επιθυμητής τιμής $\hat{w}$ στην Εξίσωση 3.6.

Η διερεύνηση του ζητήματος αυτού γίνεται με τον εξής τρόπο. Για ένα διάστημα τιμών $\hat{w} \in [20, 35]$ veh και δέκα προσομοιώσεις για κάθε τέτοια τιμή, λαμβάνεται ο χρόνος υπερχείλισης (Acc. Time) της ουράς πέρα από το επιτρεπτό μήκος. Το Σχήμα 6-23 δείχνει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, για κάθε εξεταζόμενη $\hat{w}$ -τιμή, φαίνεται ο χρόνος υπερχείλισης (Acc. Time) για κάθε μία από τις δέκα προσομοιώσεις καθώς και για τη μέση τιμή του χρόνου υπερχείλισης όλων των προσομοιώσεων. Για σύγκριση στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται ο μέσος χρόνος υπερχείλισης, των δέκα προσομοιώσεων, για τη περίπτωση εφαρμογής ελέγχου ράμπας μόνο με ALINEA και $\hat{N} = 20$ veh, σενάριο 1. Από το Σχήμα 6-23 παρατηρείται ότι για μεγάλες $\hat{w}$ -τιμές στο διάστημα $[32, 40]$ veh, ο χρόνος υπερχείλισης (Acc. Time) είναι μεγάλος, πλησιάζοντας το μέσο χρόνο υπερχείλισης του σεναρίου 1. Αντίθετα, όσο η $\hat{w}$ -τιμή μικραίνει ο χρόνος υπερχείλισης γίνεται μικρότερος, όπως άλλωστε αναμένεται. Επειδή όμως, πολύ μικρή τιμή του

επιθυμητού αριθμού οχημάτων της ουράς της ράμπας αντιστοιχεί σε μικρή αξιοποίηση του διαθέσιμου μήκους της, η $\hat{w}$ - τιμή επιλέγεται στο διάστημα $[23, 25]$ veh καθώς για τις τιμές αυτές ο χρόνος υπερχείλισης (Acc. Time) είναι αρκετά μικρός ενώ παράλληλα η διακύμανση των αποτελεσμάτων, των δέκα προσομοιώσεων, από τη μέση τιμή είναι σχετικά μικρή.



Σχήμα 6-23 Χρόνος υπερχείλισης για διάφορες $\hat{w}$ -τιμές.

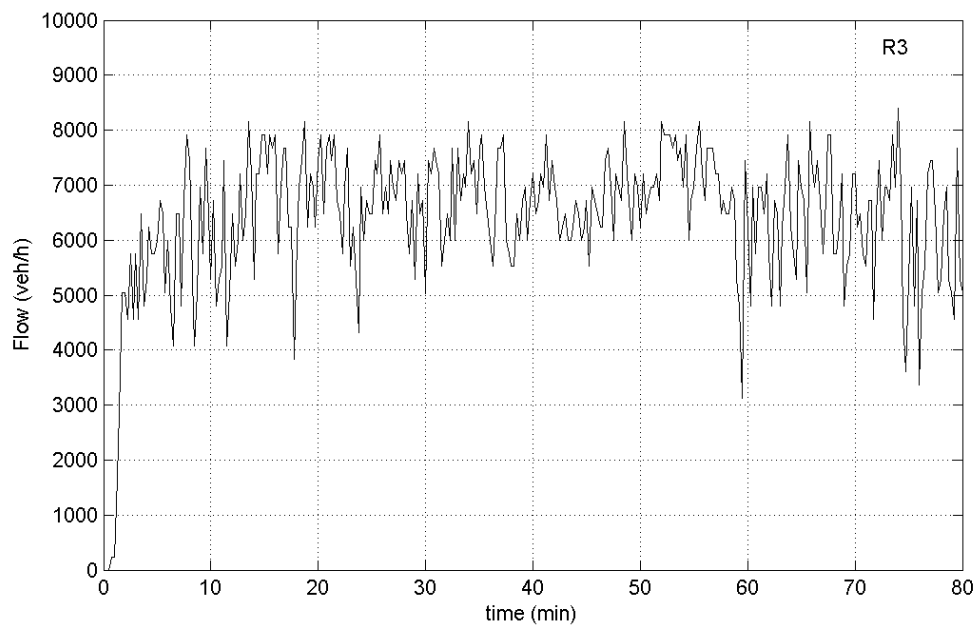
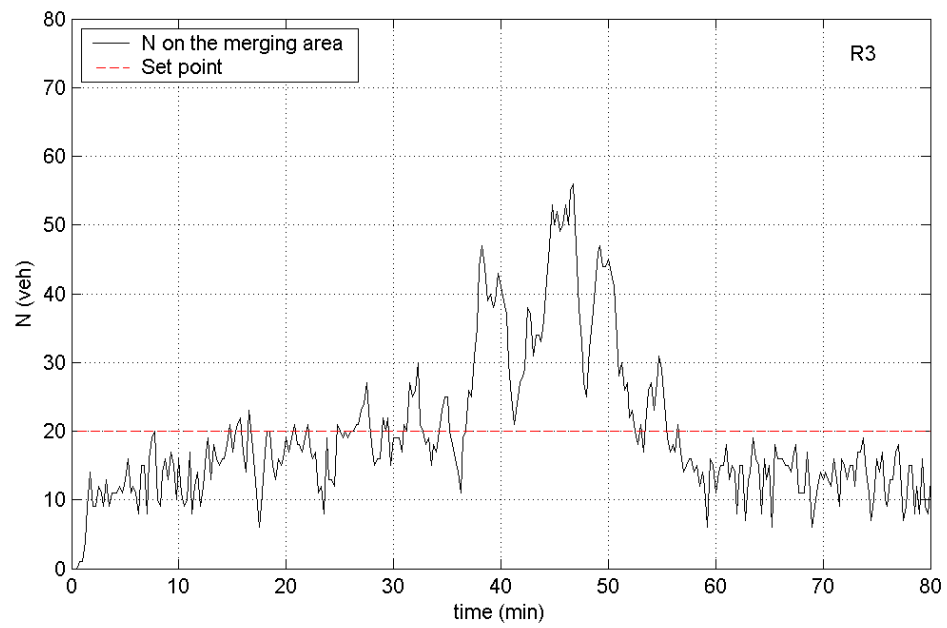
Στον Πίνακα 6-4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του σεναρίου 3, ως προς το χρόνο υπερχείλισης, για $\hat{w} = (23, 24, 25)$ veh, για κάθε προσομοίωση ξεχωριστά. Επίσης περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του σεναρίου 1, ως προς το ίδιο κριτήριο, για σύγκριση. Το ποσοστό βελτίωσης του μέσου χρόνου υπερχείλισης με εφαρμογή του σεναρίου 3 και $\hat{w} = (23, 24, 25)$ veh είναι 89%, 87% και 86% αντίστοιχα, συγκριτικά με το σενάριο 1. που δεν εφαρμόζεται καμία στρατηγική διαχείρισης ουρών.

Πίνακας 6-4 Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για ALINEA και ALINEA&QC.

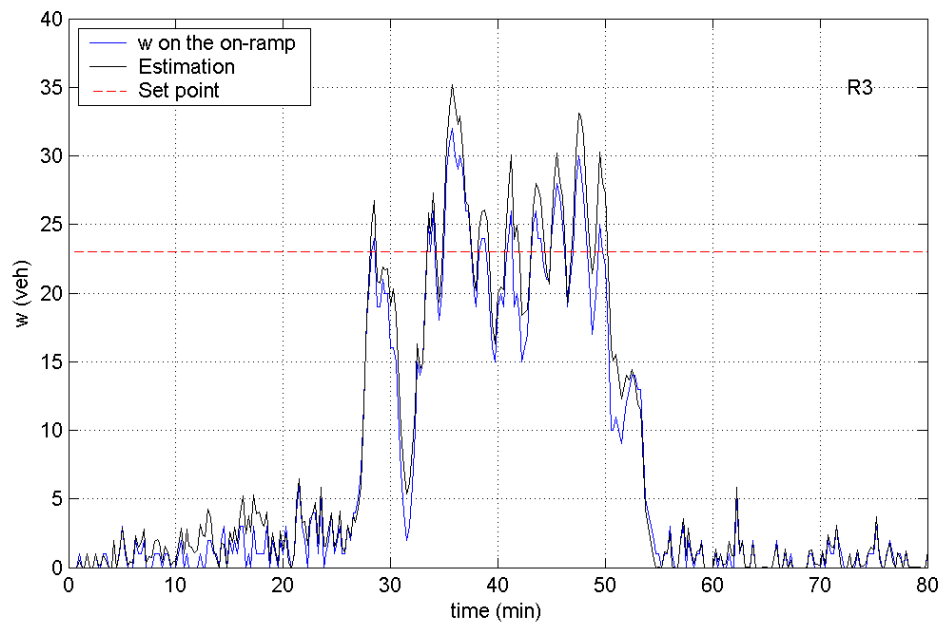
Replication No	Acc. Time ALINEA (time steps)	Acc. Time (time steps) ALINEA&QC $\hat{w} = 23\text{veh}$	Acc. Time (time steps) ALINEA&QC $\hat{w} = 24\text{veh}$	Acc. Time (time steps) ALINEA&QC $\hat{w} = 25\text{veh}$
1	1680	20	80	300
2	380	0	20	0
3	1640	120	20	0
4	1360	280	320	440
5	500	100	140	80
6	1480	320	120	60
7	600	300	340	360
8	920	80	140	200
9	1360	0	160	100
10	1200	0	80	0
Μέση Τιμή	1112	122	142	154

Τα επόμενα σχήματα δείχνουν τα διαγράμματα αριθμού οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης, ροής εξόδου από την περιοχή συγχώνευσης, αριθμού οχημάτων στη ράμπα, και ροής οχημάτων που υπολογίζεται από την ALINEA και τον QC αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα διαγράμματα αφορούν συγκεκριμένες προσομοιώσεις, με $\hat{w} = (23, 24, 25) \text{ veh}$, και χρόνο υπερχείλισης που είναι κοντά στην μέση τιμή των αντίστοιχων δέκα προσομοιώσεων.

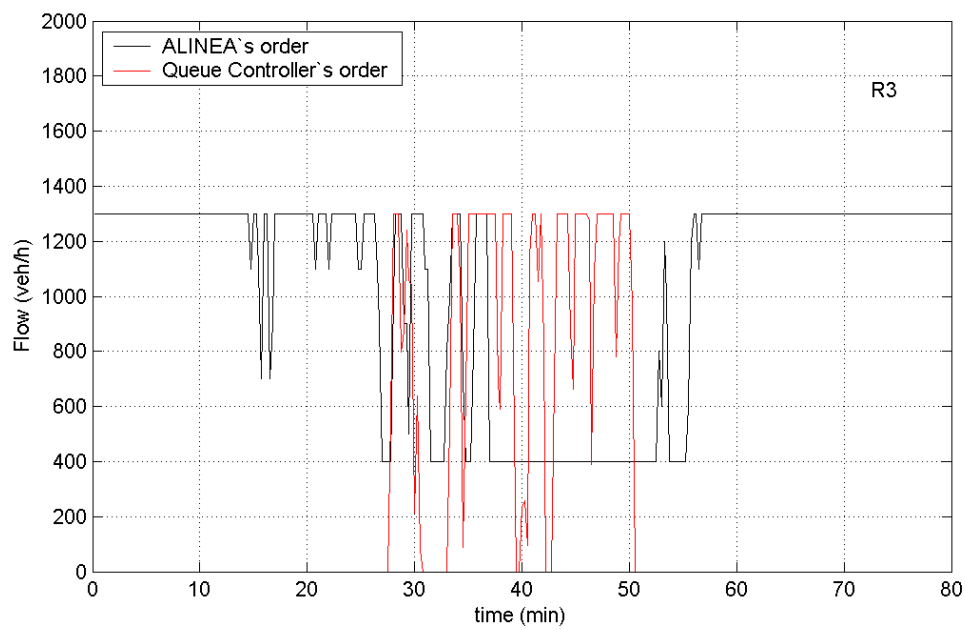
Τα Σχήματα 6-24, 6-25 και 6-26 αφορούν την εφαρμογή του σεναρίου 3 με $\hat{w} = 23\text{veh}$. Παρατηρείται ότι όταν ο QC ενεργοποιείται, έτσι ώστε να διατηρήσει τον αριθμό οχημάτων στη ράμπα κοντά στην επιθυμητή τιμή, τότε ο αριθμός οχημάτων N στην περιοχή συγχώνευσης αυξάνεται λόγω της προσωρινής κατάργησης του ελέγχου κυκλοφορίας με ALINEA με αντίστοιχες μειώσεις στη ροή εξόδου από την περιοχή συγχώνευσης q_{out} , Σχήμα 6-24. Το Σχήμα 6-25 δείχνει ότι ο QC διατηρεί, κατά μέσο όρο, τον αριθμό οχημάτων στη ράμπα w κοντά στην επιθυμητή τιμή, ενώ παράλληλα η εκτίμηση του αριθμού οχημάτων στη ράμπα σε πραγματικό χρόνο μέσω του φίλτρου Kalman, ακολουθεί την πραγματική τιμή αριθμού οχημάτων στη ράμπα. Το γεγονός αυτό είναι αρκετά σημαντικό για τις πραγματικές εφαρμογές πεδίου. Τέλος, το Σχήμα 6-26 δείχνει τη ροή οχημάτων που υπολογίζουν η ALINEA και ο QC αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Υπενθυμίζεται ότι η ροή που τελικά εφαρμόζεται στους φωτεινούς σηματοδότες είναι η μέγιστη από τις δύο αυτές ροές.



Σχήμα 6-24 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 23 \text{ veh}$.



Σχήμα 6-25 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 23 \text{ veh}$.

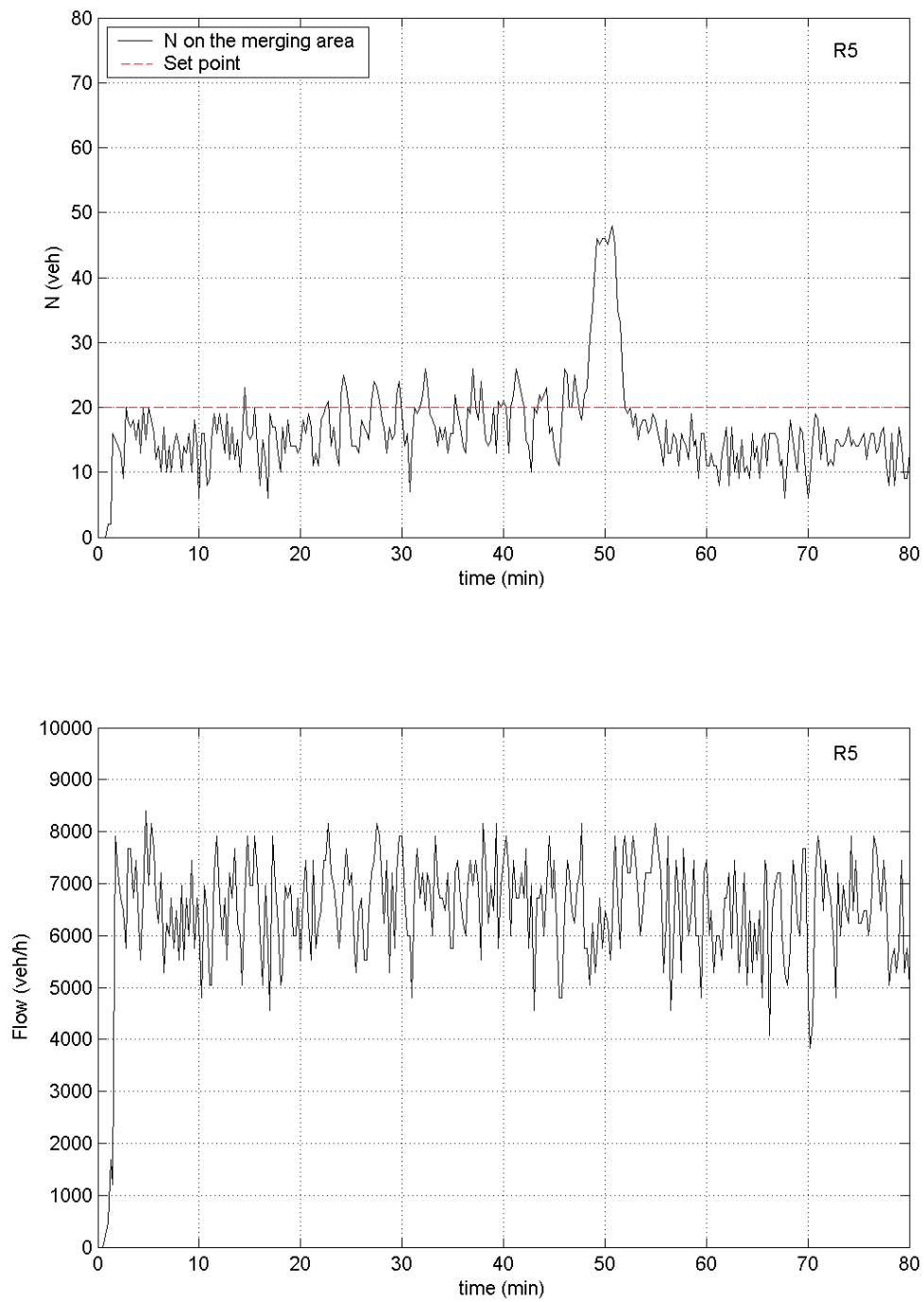


Σχήμα 6-26 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και QC με $\hat{w} = 23 \text{ veh}$.

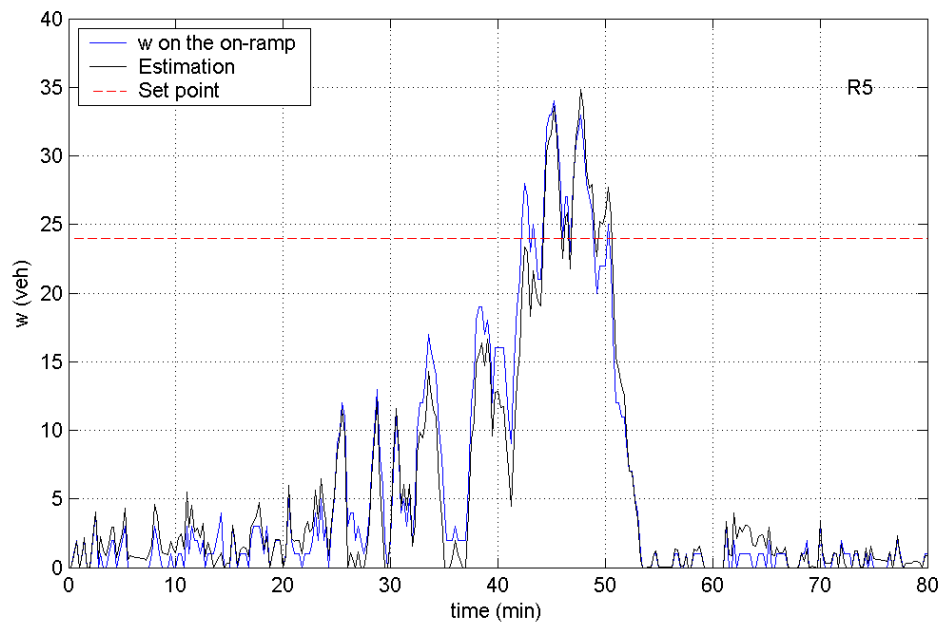
Τα Σχήματα 6-27, 6-28 και 6-29 αφορούν την εφαρμογή του σεναρίου 3 με $\hat{w} = 24 \text{ veh}$. Στα Σχήματα 6-27 και 6-29 παρατηρείται ότι, στην περίπτωση αυτή και για τη συγκεκριμένη προσομοίωση, ο QC ενεργοποιείται για ένα μικρό μόνο διάστημα $[48, 52] \text{ min}$ με αποτέλεσμα τη σύντομη αλλά απότομη αύξηση του αριθμού οχημάτων N στην περιοχή συγχώνευσης. Αντίστοιχα παρατηρείται πτώση της ροής εξόδου από την περιοχή συγχώνευσης q_{out} κατά τη διάρκεια του σύντομου αυτού διαστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο υπόλοιπο διάστημα η στρατηγική ελέγχου ALINEA διατηρεί τον αριθμό οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης κοντά στην επιθυμητή τιμή ενώ η ροή εξόδου από την περιοχή συγχώνευσης είναι αρκετά υψηλή, φτάνοντας τα 7000 veh/h κατά μέσο όρο. Το Σχήμα 6-28 δείχνει ότι ο QC καταφέρνει και πάλι να διατηρήσει τον αριθμό οχημάτων w στη ράμπα κοντά στην επιθυμητή τιμή, ενώ η εκτίμηση του αριθμού οχημάτων, μέσω του φίλτρου Kalman, είναι και σε αυτή την περίπτωση αρκετά κοντά στην πραγματική τιμή. Η ροή οχημάτων που υπολογίζουν η ALINEA και ο QC κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης φαίνεται στο Σχήμα 6-29.

Τέλος, τα Σχήματα 6-30, 6-31 και 6-32 αφορούν την εφαρμογή του σεναρίου 3 με $\hat{w} = 25 \text{ veh}$. Παρόμοια με τα προηγούμενα διαγράμματα, στο Σχήμα 6-30 παρατηρείται ότι κατά το διάστημα ενεργοποίησης του QC ο αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης N αυξάνεται, με αντίστοιχη μείωση της ροής εξόδου q_{out} . Επίσης, και στην περίπτωση αυτή ο QC καταφέρνει και πάλι να διατηρήσει τον αριθμό οχημάτων w στη ράμπα κοντά στην επιθυμητή τιμή, ενώ η εκτίμηση του αριθμού οχημάτων είναι και πάλι αρκετά κοντά στην πραγματική τιμή, Σχήμα 6-31. Η ροή οχημάτων που υπολογίζουν η ALINEA και ο QC κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης φαίνεται στο Σχήμα 6-32.

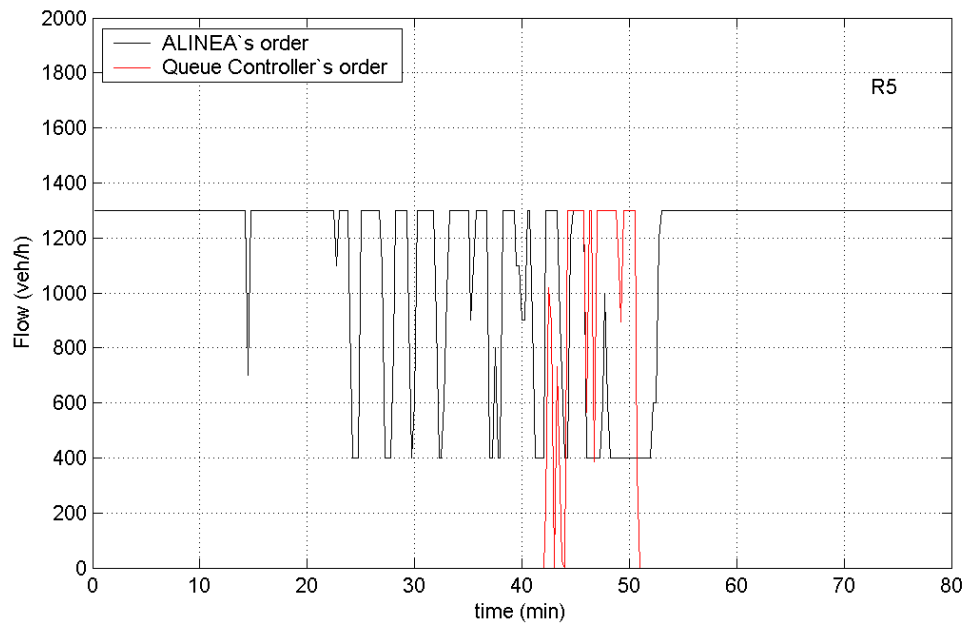
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπόλοιπων προσομοιώσεων, για κάθε διαφορετικό $\hat{w}$, είναι παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Σημειώνεται επίσης ότι το μέσο TTS για το σενάριο αυτό και με $\hat{w} = 24 \text{ veh}$ είναι 241.2 veh/h , δηλαδή λίγο μεγαλύτερο από το μέσο TTS του σεναρίου 2 καθώς και του σεναρίου 1.



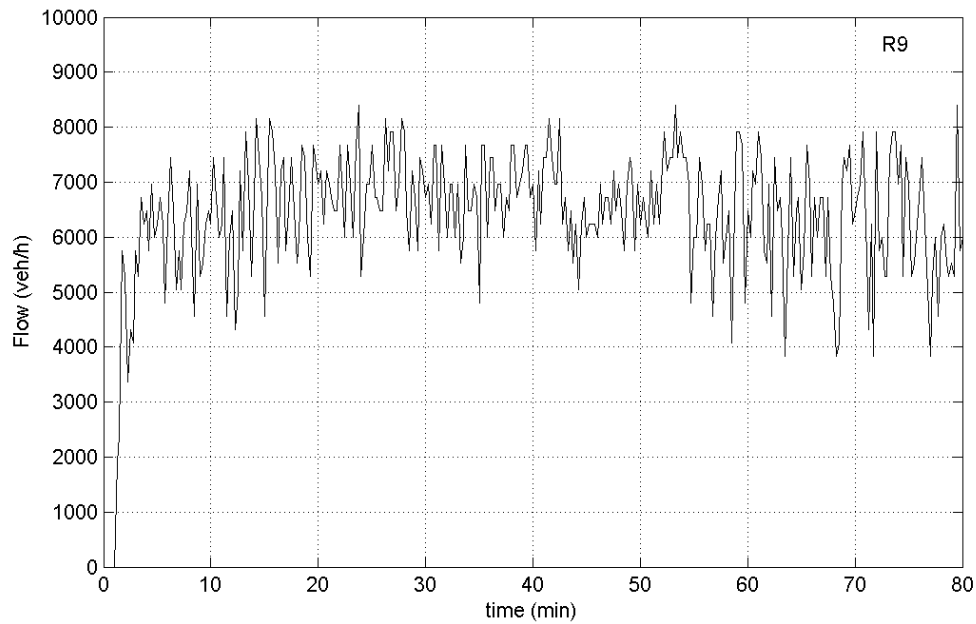
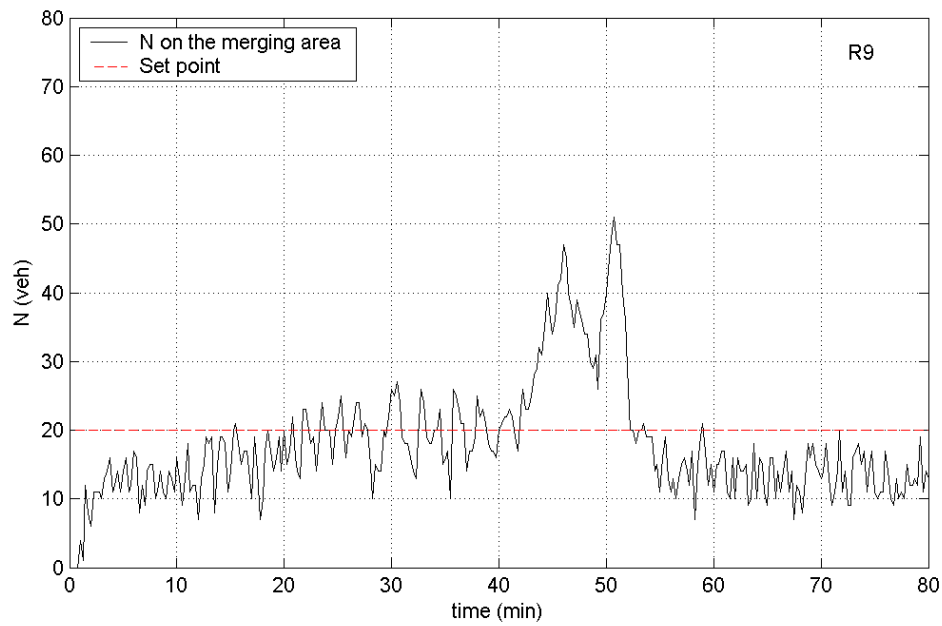
Σχήμα 6-27 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 24 \text{ veh}$.



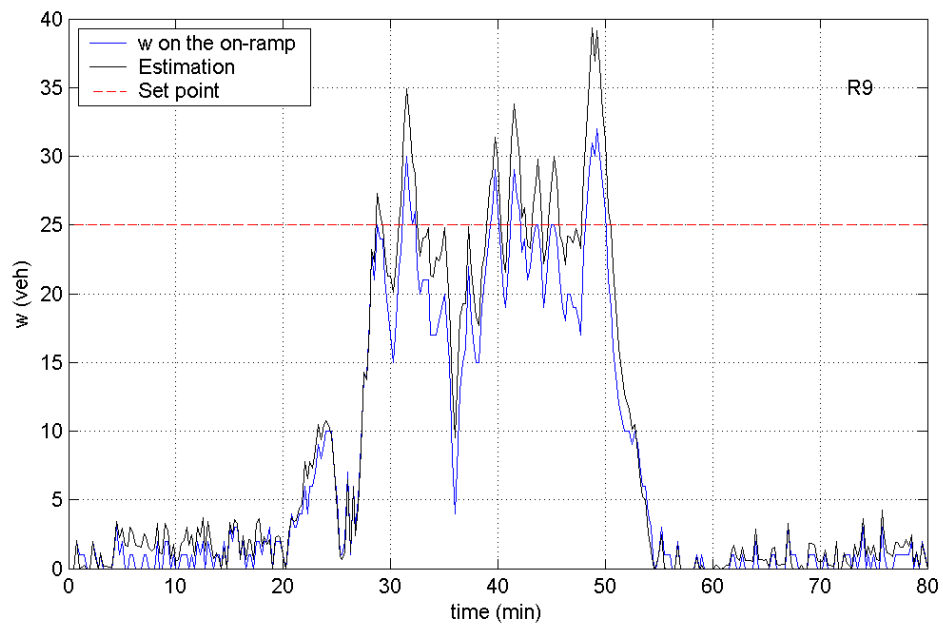
Σχήμα 6-28 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα, με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 24\text{veh}$.



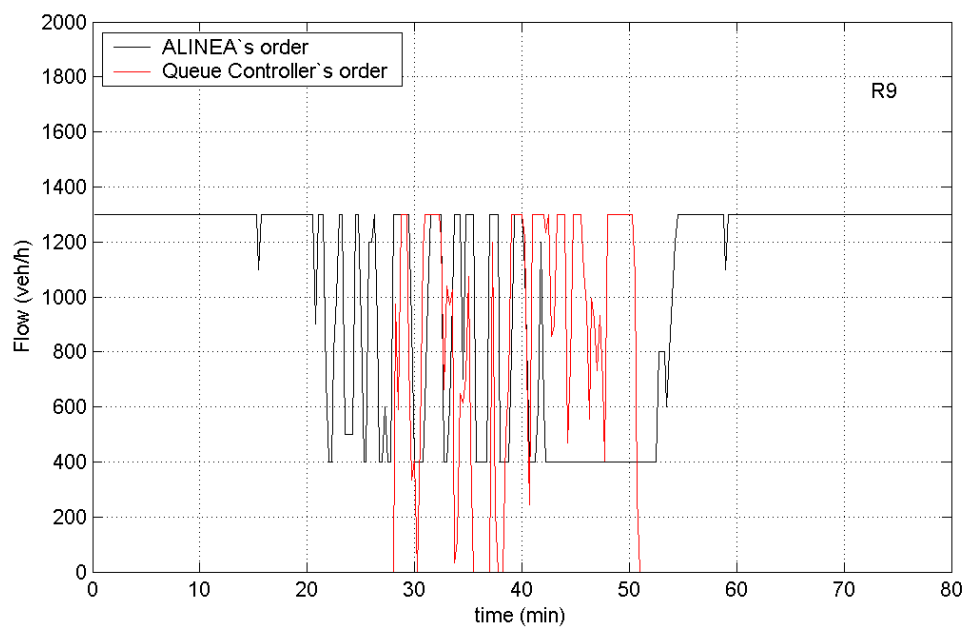
Σχήμα 6-29 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και QC με $\hat{w} = 24\text{veh}$.



Σχήμα 6-30 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 25\text{veh}$.



Σχήμα 6-31 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα, με εφαρμογή ALINEA και QC με $\hat{w} = 25\text{veh}$.



Σχήμα 6-32 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και QC με $\hat{w} = 25\text{veh}$.

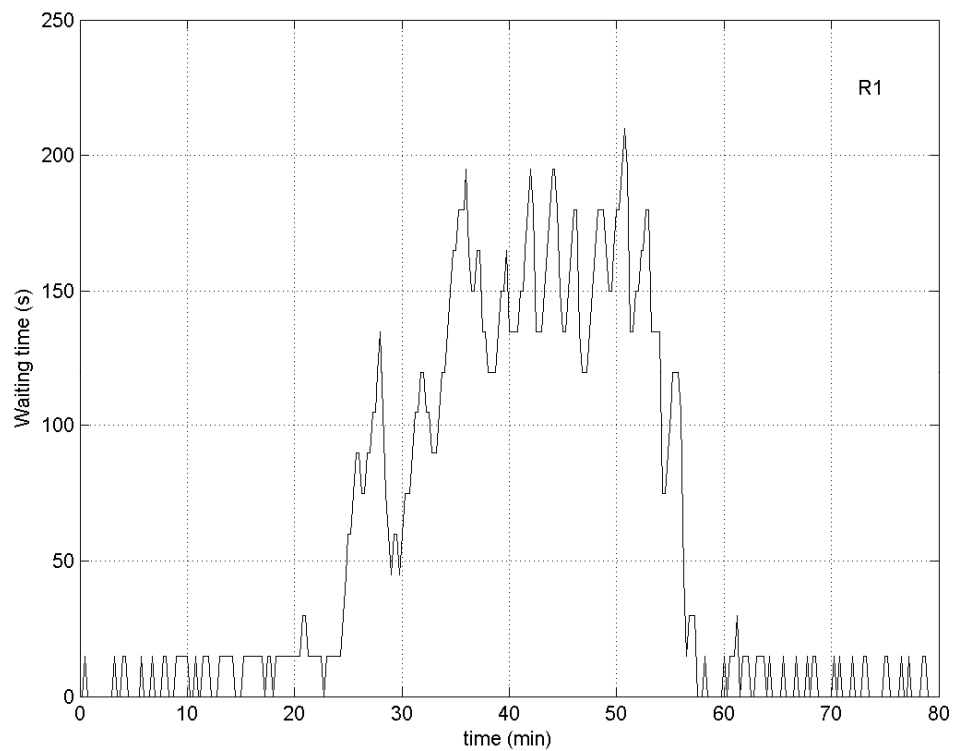
Συμπερασματικά, η επιλογή της επιθυμητής τιμής του αριθμού οχημάτων στην ράμπα $\hat{w}$ που θα χρησιμοποιηθεί στην Εξίσωση 3.6, θα γίνει μέσα από ένα διάστημα τιμών ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, όπως παρουσιάστηκε σε αυτήν την παράγραφο.

6.5 *Σενάριο 4: εφαρμογή ελέγχου χρόνου αναμονής στη ράμπα (Waiting Time Control)*

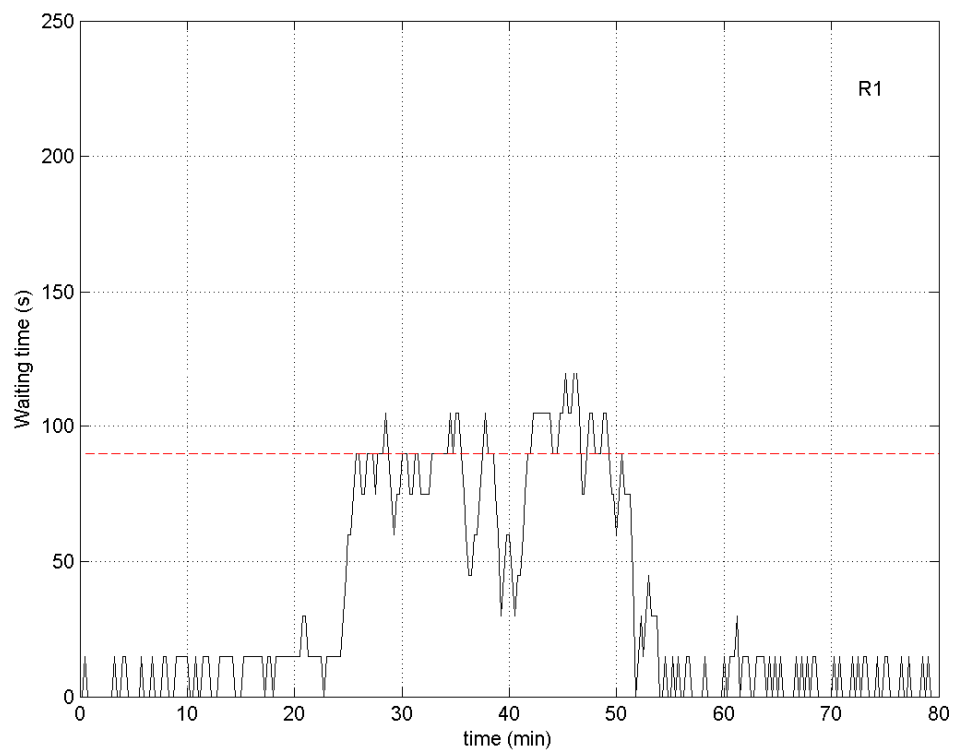
Εκτός από τη δημιουργία ουρών μεγάλου μήκους, ο έλεγχος ραμπών αυτοκινητοδρόμου είναι πιθανό να οδηγήσει σε μεγάλους χρόνους αναμονής των οχημάτων στη ράμπα εισόδου του αυτοκινητοδρόμου όπως έχει ήδη αναφερθεί. Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται η εφαρμογή *ελέγχου χρόνου αναμονής* (Waiting Time Control).

Στο Σχήμα 6-33 παρουσιάζεται, για μία συγκεκριμένη προσομοίωση, ο χρόνος αναμονής t_w των οχημάτων στη ράμπα εισόδου του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όταν εφαρμόζεται έλεγχος στη ράμπα μόνο μέσω της στρατηγικής ελέγχου ALINEA. Παρατηρείται ότι, κατά τη διάρκεια της μέγιστης ζήτησης, ο χρόνος αναμονής των οχημάτων στη ράμπα είναι αρκετά μεγάλος, φτάνοντας στιγμιαία τα 200s. Αυτό συμβαίνει λόγω της λειτουργίας της στρατηγικής ελέγχου ALINEA, η οποία προκειμένου να ελέγξει τον αριθμό των οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης του κυρίως αυτοκινητοδρόμου προκαλεί συσσώρευση των οχημάτων στη ράμπα εισόδου.

Η εφαρμογή του ελέγχου του χρόνου αναμονής (Waiting Time Control), σε συνδυασμό με τη στρατηγική ελέγχου ALINEA, με μέγιστο, επιθυμητό χρόνο αναμονής $\hat{t}_w = 90s$, μπορεί να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις αναφορικά με το χρόνο αναμονής των οχημάτων στη ράμπα. Το Σχήμα 6-34 δείχνει ότι ο ελεγκτής διατηρεί το χρόνο αναμονής των οχημάτων στη ράμπα κοντά στην επιθυμητή τιμή, αποτρέποντας τους μεγάλους χρόνους παραμονής των οχημάτων στη ράμπα. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ελέγχου χρόνου αναμονής (Waiting Time Control) παράλληλα με την εφαρμογή ελέγχου ALINEA είναι παρόμοια και για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις, με σημαντικές βελτιώσεις του χρόνου αναμονής συγκριτικά με την περίπτωση που εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας μόνο μέσω της στρατηγικής ελέγχου ALINEA.



Σχήμα 6-33 Χρόνος αναμονής κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με εφαρμογή ALINEA.



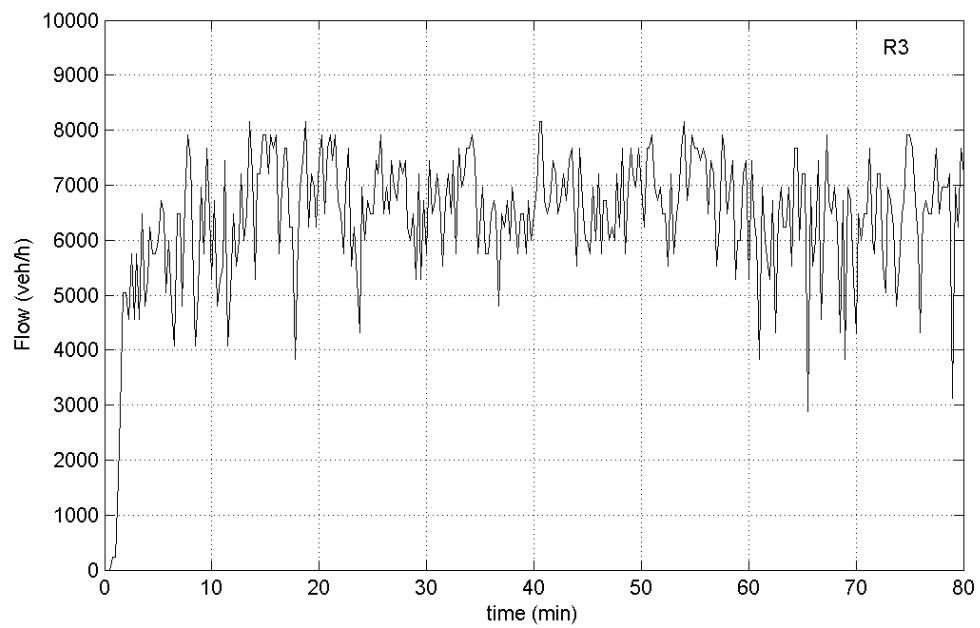
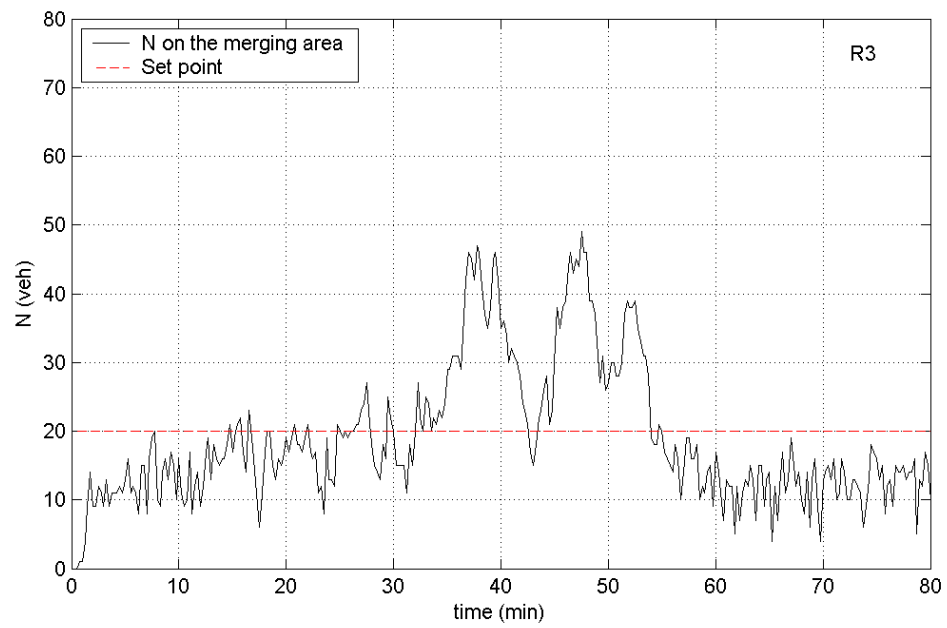
Σχήμα 6-34 Χρόνος αναμονής κατά της διάρκεια της προσομοίωσης, με εφαρμογή WTC.

Πίνακας 6-5 Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων για ALINEA και ALINEA&WTC.

Replication No	TTS (veh·h) ALINEA	TTS (veh·h) ALINEA&WTC	Acc. Time (time steps) ALINEA	Acc. Time (time steps) ALINEA & WTC
1	240	236	1680	80
2	223	224	380	0
3	242	238	1640	140
4	237	241	1360	640
5	225	229	500	20
6	239	256	1480	600
7	230	229	600	80
8	239	254	920	320
9	234	260	1360	160
10	233	233	1200	60
Μέση Τιμή	234.2	240	1112	210

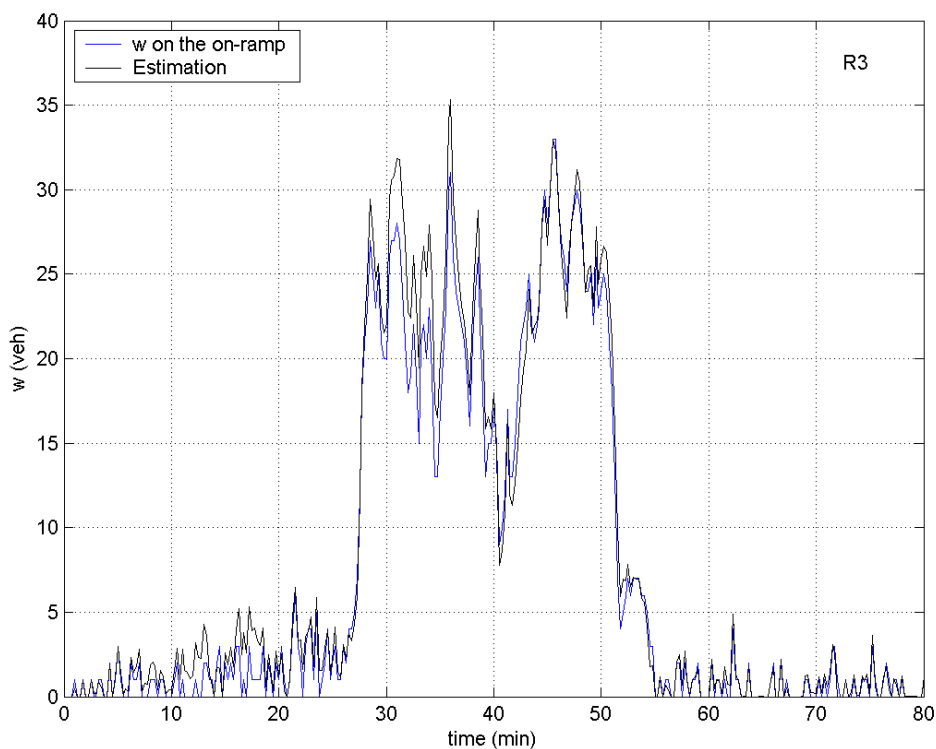
Ο Πίνακας 6-5 δείχνει τα συγκριτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων των σεναρίων 1 και 4, αναφορικά με τα κριτήρια του χρόνου παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο (TTS) και του χρόνου υπερχείλισης της ουράς (Acc. Time). Παρατηρείται ότι η εφαρμογή ελέγχου χρόνου αναμονής (WTC) σε συνδυασμό με την ALINEA, οδηγεί σε 2.5%, κατά μέσο όρο, μεγαλύτερο TTS σε σχέση με την εφαρμογή μόνο της στρατηγικής ελέγχου ALINEA, ενώ οδηγεί σε πολύ μικρότερο Acc. Time, περίπου 81% κατά μέσο όρο, γεγονός που σημαίνει ότι η στρατηγική αυτή οδηγεί σε καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου χώρου της ράμπας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μία συγκεκριμένη προσομοίωση με TTS και Acc. Time κοντά στη μέση τιμή των δέκα προσομοιώσεων, του εξεταζόμενου σεναρίου, Πίνακας 6-5. Το Σχήμα 6-35 παρουσιάζει τον αριθμό οχημάτων N στην περιοχή συγχώνευσης και τη ροή εξόδου q_{out} από την περιοχή συγχώνευσης. Παρατηρείται ότι η ροή εξόδου διατηρεί γενικά υψηλές τιμές εκτός από τα διαστήματα που ο αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης αυξάνει λόγω της κατάργησης του ελέγχου της ράμπας μέσω ALINEA και εφαρμογή του WTC.

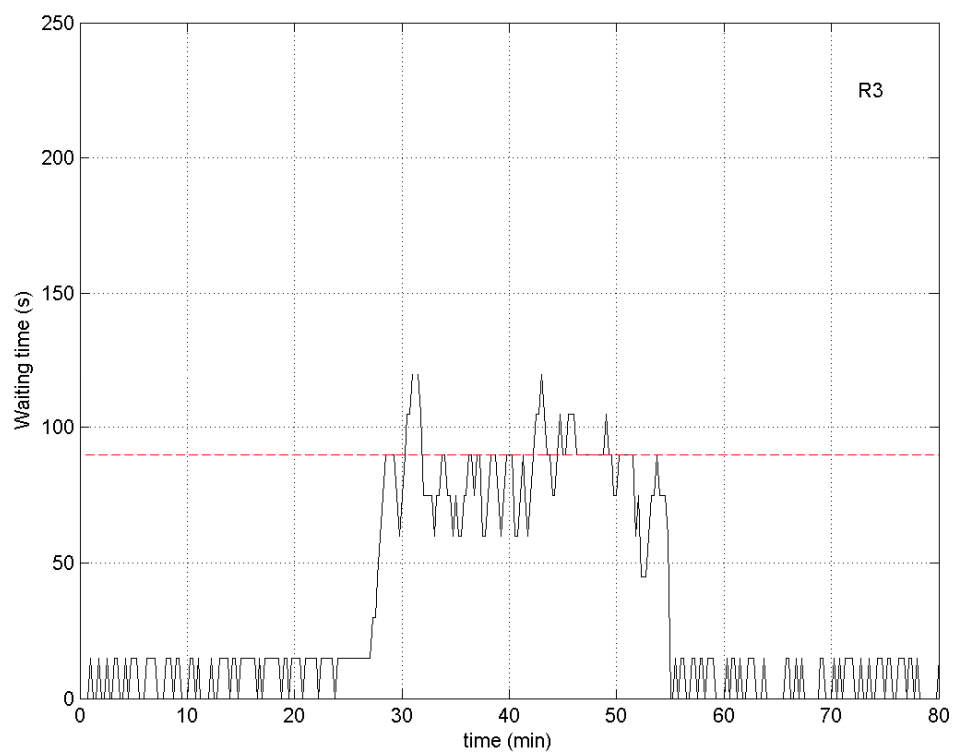


Σχήμα 6-35 Αριθμός οχημάτων N και ροή εξόδου q_{out} , με εφαρμογή ALINEA και WTC.

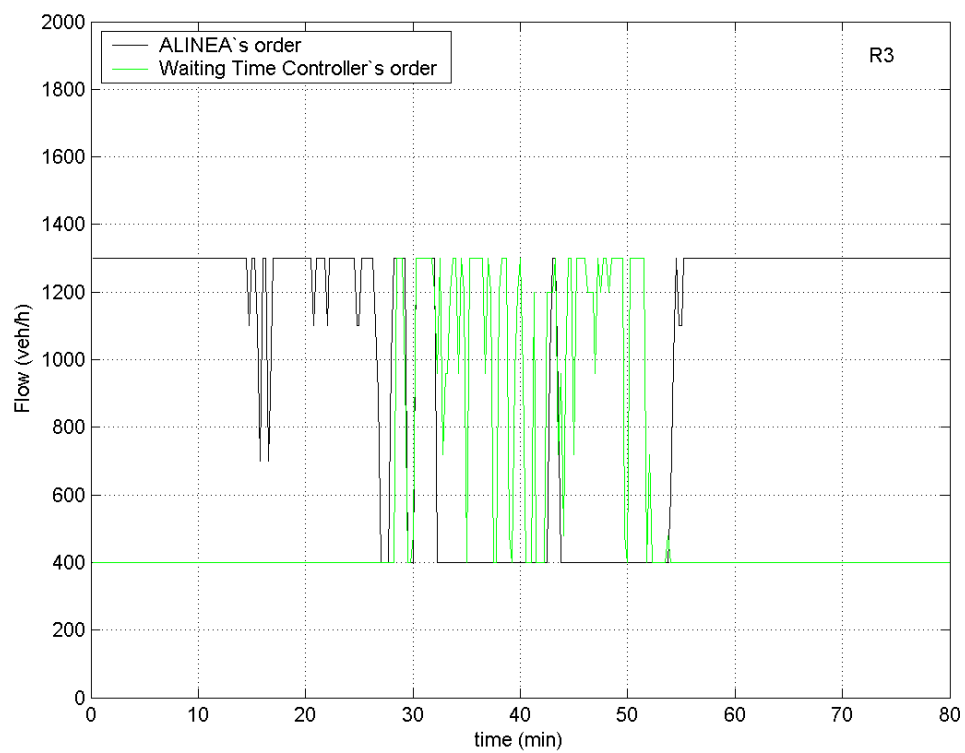
Το Σχήμα 6-36 δείχνει τον αριθμό οχημάτων στην ουρά της ράμπας και την εκτίμηση του αριθμού οχημάτων μέσω του φίλτρου Kalman, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα γίνεται με βάση την εκτιμώμενη τιμή του αριθμού οχημάτων, η οποία όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα είναι αρκετά κοντά στην πραγματική τιμή. Ο αντίστοιχος χρόνος αναμονής των οχημάτων στη ράμπα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, φαίνεται στο Σχήμα 6-37. Παρατηρείται ότι η στρατηγική του χρόνου αναμονής (WTC) διατηρεί το χρόνο αναμονής κοντά στην προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή. Τέλος, στο Σχήμα 6-38 παρουσιάζεται η ροή οχημάτων που υπολογίζεται από την ALINEA και τον WTC κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Και σε αυτή την περίπτωση η ροή οχημάτων που εφαρμόζεται τελικά στους φωτεινούς σηματοδότες είναι η μεγαλύτερη από τις δύο υπολογιζόμενες ροές.



Σχήμα 6-36 Αριθμός οχημάτων w στη ράμπα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με εφαρμογή ALINEA και WTC.



Σχήμα 6-37 Χρόνος αναμονής με εφαρμογή ελέγχου χρόνου αναμονής κατά της διάρκειας της προσομοίωσης με εφαρμογή ALINEA και WTC.



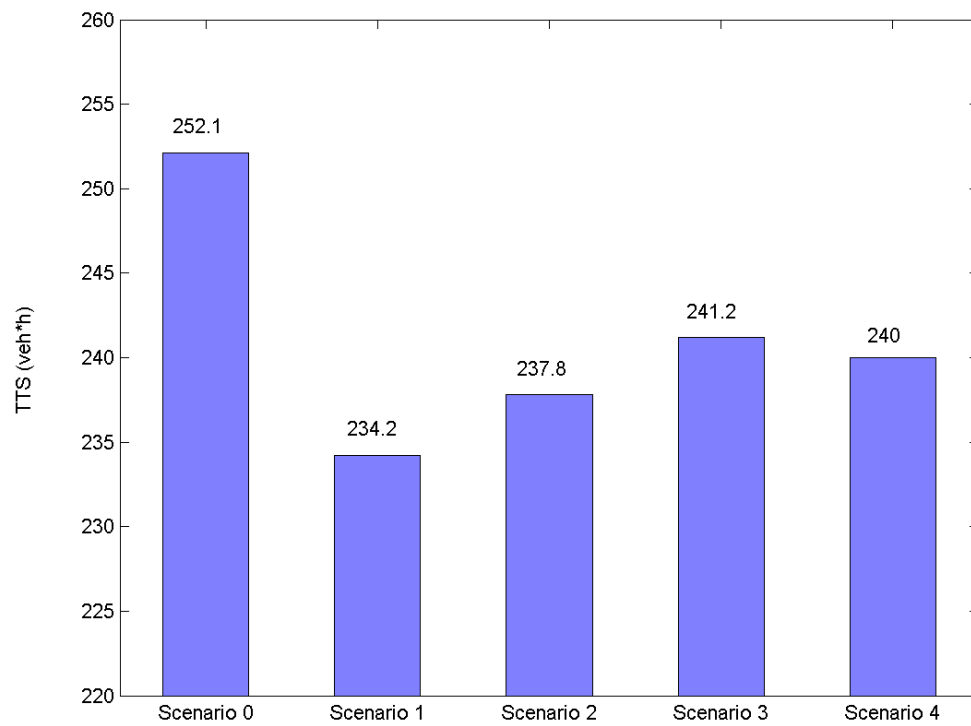
Σχήμα 6-38 Ροή οχημάτων που υπολογίζεται από ALINEA και WTC.

6.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων

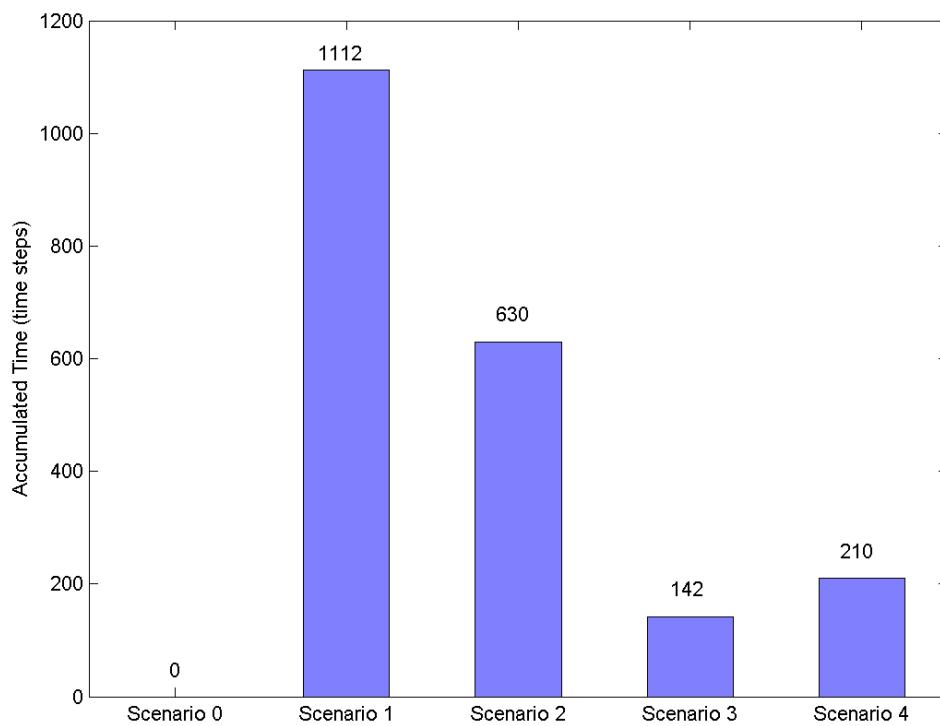
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εφαρμογής διαφόρων σεναρίων ελέγχου κυκλοφορίας σε μία περιοχή ράμπας αυτοκινητοδρόμου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας με χρήση της στρατηγικής ελέγχου ALINEA, μετά τον κατάλληλο προσδιορισμό της τιμής $\hat{N}$ στην Εξίσωση 3.4, οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες στην περιοχή συγχώνευσης, μεγαλύτερες τιμές ροών εξόδου από την περιοχή συγχώνευσης και μικρότερο χρόνο που δαπανούν τα οχήματα (TTS) μέσα στο δίκτυο, συγκριτικά με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας. Επίσης αποδείχτηκε ότι οι ανάγκες για σωστή ρύθμιση των παραμέτρων της στρατηγικής, σε πραγματικές εφαρμογές πεδίου, είναι μικρές λόγω χαμηλού βαθμού ευαισθησίας.

Το μειονέκτημα της στρατηγικής ελέγχου ALINEA είναι η αναπόφευκτη δημιουργία ουρών στη ράμπα εισόδου. Η εφαρμογή ελέγχου υπερχειλίσσης ουράς (Queue Override) σε συνδυασμό με την στρατηγική ελέγχου ALINEA οδηγεί σε σχηματισμό ουρών μικρότερου μήκους και μικρότερους χρόνους υπερχειλίσσης της ουράς (Acc. Time). Για ακόμα καλύτερη διαχείριση του μήκους της σχηματιζόμενης ουράς στη ράμπα, ενδείκνυται η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ουράς (Queue Control) η οποία μετά από κατάλληλο προσδιορισμό τη τιμής του $\hat{w}$ στην Εξίσωση 3.6, οδηγεί σε ελαχιστοποίηση του χρόνου υπερχειλίσσης της ουράς. Επίσης, η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα (Waiting Time Control), σε συνδυασμό με την στρατηγική ελέγχου ALINEA, επιτυγχάνει τη διατήρηση του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα, κοντά σε μία προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή.

Στα Σχήματα 6-39 και 6-40 φαίνονται συνοπτικά οι μέσοι χρόνοι παραμονής στο δίκτυο (TTS) και οι μέσοι χρόνοι υπερχειλίσσης ουράς (Acc. Time), αντίστοιχα, για κάθε σενάριο. Παρατηρείται ότι η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας με ALINEA έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση κατά 7%, του μέσου TTS των οχημάτων συγκριτικά με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας (Σχήμα 6-39). Η εφαρμογή του ελέγχου υπερχειλίσσης ουράς (QO), του ελέγχου ουράς (QC) και του ελέγχου χρόνου αναμονής (WTC), σε συνδυασμό με την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA, οδηγούν σε μικρότερες βελτιώσεις του μέσου TTS της τάξης του



Σχήμα 6-39 Μέσοι χρόνοι παραμονής οχημάτων στο δίκτυο (TTS) για κάθε σενάριο ελέγχου.



Σχήμα 6-40 Μέσοι χρόνοι υπερχείλισης της ουράς (Acc. Time) για κάθε σενάριο ελέγχου.

5.7%, 4.3% και 4.8% αντίστοιχα, σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6-40 παρατηρείται ότι η περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας έχει μηδενική τιμή στο κριτήριο του μέσου χρόνου υπερχείλισης καθώς τα οχήματα που διασχίζουν τη ράμπα εισόδου εισέρχονται άμεσα στον κυρίως αυτοκινητόδρομο με αποτέλεσμα να μη σχηματίζονται ουρές στη ράμπα αλλά να δημιουργούνται προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης κατά τις ώρες αυξημένης ζήτησης. Αντίθετα, η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας με ALINEA έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ουρών μεγάλου μήκους και μεγάλη τιμή του μέσου χρόνου υπερχείλισης της ουράς για την περίπτωση περιορισμένης χωρητικότητας οχημάτων στη ράμπα. Η εφαρμογή του ελέγχου υπερχείλισης ουράς (QO), παράλληλα με την ALINEA, οδηγεί σε 43% βελτίωση του χρόνου υπερχείλισης της ουράς (Acc. Time), ενώ η εφαρμογή του ελέγχου ουράς (QC), σε συνδυασμό με την ALINEA, διαχειρίζεται ακόμα καλύτερα το διαθέσιμο χώρο στη ράμπα επιφέροντας κατά μέσο όρο 87% βελτίωση του χρόνου υπερχείλισης (Acc. Time), συγκριτικά με την περίπτωση ελέγχου μόνο με ALINEA. Τέλος, η εφαρμογή του ελέγχου του χρόνου αναμονής στη ράμπα (WTC), παράλληλα με τη στρατηγική ελέγχου ALINEA, οδηγεί σε 81% βελτίωση του μέσου χρόνου υπερχείλισης σε σχέση με εφαρμογή του σεναρίου 1.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή δε θα πρέπει να ληφθούν ως ποσοτικές εκτιμήσεις της βελτίωσης των κριτηρίων αξιολόγησης, σε περίπτωση εφαρμογής των διαφόρων σεναρίων ελέγχου σε πραγματικές εφαρμογές πεδίου, αλλά πρέπει να ληφθούν ως ποιοτικές εκτιμήσεις των αναμενόμενων βελτιώσεων από την εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε μία περιοχή ράμπας αυτοκινητοδρόμου.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Σύνοψη μεταπτυχιακής διατριβής

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διερευνήθηκε η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή αυτοκινητοδρόμου όπου υπάρχει ράμπα εισόδου. Ο έλεγχος κυκλοφορίας πραγματοποιήθηκε με τοποθέτηση φωτεινών σηματοδοτών στη ράμπα εισόδου και εφαρμογή της τοπικής στρατηγικής ελέγχου ALINEA. Παράλληλα με τον τοπικό έλεγχο, εφαρμόστηκαν στρατηγικές διαχείρισης ουράς, ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός ουρών μεγάλου μήκους στη ράμπα δεδομένου της περιορισμένης χωρητικότητας σε οχήματα των ραμπών εισόδου, και έλεγχος του χρόνου αναμονής των οχημάτων στη ράμπα. 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 μικροσκοπικό προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN.

7.2 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή ράμπας αυτοκινητοδρόμου βελτιώνει τις κυκλοφοριακές συνθήκες, μειώνει το χρόνο παραμονής των οχημάτων μέσα στο δίκτυο και αξιοποιεί κατά το μέγιστο δυνατό την ικανότητα της υποδομής, τόσο του αυτοκινητοδρόμου όσο και του διαθέσιμου χώρου στη ράμπα εισόδου. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA, οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες στην περιοχή συγχώνευσης, μεγαλύτερες τιμές ροών εξόδου από την περιοχή συγχώνευσης και μικρότερο χρόνο που δαπανούν τα οχήματα μέσα στο δίκτυο συγκριτικά με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας. Επίσης, η στρατηγική ελέγχου ALINEA δεν είναι ευαίσθητη ως προς τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων της, γεγονός πολύ σημαντικό για τις πραγματικές εφαρμογές πεδίου. Το μειονέκτημα της στρατηγικής ελέγχου ALINEA είναι η αναπόφευκτη δημιουργία ουρών στη ράμπα

εισόδου και είναι αρκετά σοβαρό δεδομένου της περιορισμένης χωρητικότητας οχημάτων των ραμπών εισόδου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων η εφαρμογή ελέγχου υπερχείλισης ουράς (Queue Override) σε συνδυασμό με τη στρατηγική ελέγχου ALINEA οδηγεί σε σχηματισμό ουρών μικρότερου μήκους στη ράμπα και μικρότερους χρόνους υπερχείλισης της επιτρεπόμενης ουράς. Επίσης, η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ουράς (Queue Control) οδηγεί σε ελαχιστοποίηση του χρόνου υπερχείλισης της ουράς και καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου μήκους της ράμπας, ενώ η εφαρμογή του ελέγχου του χρόνου αναμονής (Waiting Time Control), παράλληλα με την στρατηγική ALINEA, επιτυγχάνει να διατηρήσει το χρόνο αναμονής των οχημάτων στη ράμπα κοντά σε μία μέγιστη επιθυμητή τιμή.

7.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Μία περαιτέρω εφαρμογή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή είναι ο συνδυασμός του ελέγχου ραμπών εισόδου με τον έλεγχο του κυρίως ρεύματος του αυτοκινητοδρόμου. Όπως παρουσιάστηκε, επειδή η χωρητικότητα των ραμπών εισόδου σε οχήματα είναι περιορισμένη, ο έλεγχος κυκλοφορίας με ALINEA καταργείται όταν το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς ξεπερνάει το επιτρεπόμενο με αποτέλεσμα να δημιουργείται συμφόρηση στην περιοχή συγχώνευσης και η ταχύτητα των οχημάτων στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου να λαμβάνει αρκετά χαμηλές τιμές. Η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου, δεδομένου των ήδη χαμηλών ταχυτήτων των οχημάτων λόγω της συμφόρησης, σε συνδυασμό με τον έλεγχο κυκλοφορίας στη ράμπα εισόδου μπορεί να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στις χαοτικές κυκλοφοριακές συνθήκες που παρατηρούνται στους περισσότερους μητροπολιτικούς αυτοκινητοδρόμους σε όλο τον κόσμο.

Βιβλιογραφία

Cassidy M.J. and Rudjanakanoknad J., 2005. 'Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp'. *Transportation Research Part B*, 39, 896–913.

Keen K.G., Schoffield M.J. and Hay G.C., 1986. 'Ramp metering access control on M6 motorway'. *Proc. 2nd IEE International Conference on Road Traffic Control*, London, UK.

Lorenz M. and Elefteriadou L., 2001. 'Defining highway capacity as a function of the breakdown probability'. *Transportation Research Record*, 1776, 43–51.

Masher D. P., Ross D. W., Wong P. J., Tuan P. L., Zeidler H. M. and Petracek S., 1975. 'Guidelines for Design and Operation of Ramp Control Systems', Stanford Research Institute, Menlo Park, California.

Papageorgiou M., Haj-Salem H. and Blosseville J-M., 1991. 'ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering', *Transportation Research Record* 1320, TRB, National Research Council, Washington D.C., 58-64.

Papageorgiou, M., H. Hadj-Salem, and F. Middelham, 1991. 'ALINEA Local Ramp Metering – Summary of Field Results', In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1603, 90-98.

Papageorgiou, M., Haj-Salem, H., Middelham, F., 1997. 'ALINEA Local Ramp Metering: Summary of Field Results', *Transportation Research Record*, 1603, 90-98.

Papageorgiou M. and Kotsialos A., 2002. 'Freeway Ramp Metering: An Overview', *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3, 271-281.

Papageorgiou, M., Papamichail, I., Spiliopoulou, A.D., Lentzakis, A.F., 2008. 'Realtime Merging Traffic Control with Applications to Toll Plaza and Work Zone Management', Transportation Research 16 C, 535-553.

Papageorgiou, M., Papamichail, I., 2008. 'Overview of Traffic Signal Operation Policies for Ramp Metering', Transportation Research Record, 2047, 28-36.

Papamichail, I., Kotsialos, A., Margonis, I., Papageorgiou, M., 2009. 'Coordinated Ramp-Metering for Freeway Networks – A Model-Predictive Hierarchical Control Approach', Transportation Research Part C, in press.

Smaragdis E. and Papageorgiou M., 2003. 'Series of New Local Ramp Metering Strategies', Transportation Research Record 1856, 74-86.

Spiliopoulou, A.D., Papamichail, I., Papageorgiou, M., 2008. 'Real-Time Toll Plaza Management for Throughput Maximization', 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 08-0771.

TTS-Transport Simulation Systems, 2006. 'Aimsun 5.1 Microsimulator User's Manual'.

Vigos, G., Papageorgiou, M., Wang, Y., 2008. 'Real-time Estimation of Vehicle-Count within Signalized Links', Transportation Research 16 C, 18-35.

Σπηλιοπούλου, Α.Δ., 2007. 'Έλεγχος ροής οχημάτων σε περιοχή διοδίων αυτοκινητοδρόμου', Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάδα.