



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ &
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΑΜΠΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΗ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των
απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπό:

ΜΠΑΡΟΛΑ ΣΩΤΗΡΙΑ

ΧΑΝΙΑ 2009

Η μεταπτυχιακή διατριβή της Σωτηρίας Μπαρόλα εγκρίνεται από την εξεταστική επιτροπή:

Ιωάννης Παπαμιχαήλ, Λέκτορας _____

Μάρκος Παπαγεωργίου, Καθηγητής _____

Ηλίας Κοσματόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής _____

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον κ. Ιωάννη Παπαμιχαήλ για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και για τη τεράστια υπομονή που επέδειξε και τον καθηγητή Μάρκο Παπαγεωργίου για την συνεισφορά του στην ανάπτυξη των θεωρητικών τμημάτων της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου που με στήριξαν και με στηρίζουν σε ότι κάνω στη ζωή μου. Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου για την ψυχική υποστήριξη που μου προσέφεραν.

Στους γονείς μου Γιάννη και Βαγγελιώ
και στην αδερφή μου Μαρία

Περιεχόμενα

Περίληψη	13
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	15
Κεφάλαιο 2 Στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας	17
2.1. Γενική μορφή ενός οδικού δικτύου	17
2.2. Έλεγχος ραμπών εισόδου	19
2.2.1. Στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου.....	19
2.2.2. Στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου	19
2.3. Τοπικές στρατηγικές ελέγχου	20
2.3.1. Η στρατηγική ζήτησης – ικανότητας	20
2.3.2. Η στρατηγική ελέγχου ποσοστού κατάληψης.....	21
2.3.3. Η στρατηγική ελέγχου ALINEA	22
Κεφάλαιο 3 Ο προσομοιωτής AIMSUN	23
3.1. Τι είναι το AIMSUN;	23
3.2. Δεδομένα εισόδου.....	24
3.2.1. Διάταξη του δικτύου.....	24
3.2.2. Σενάριο ζήτησης.....	24
3.2.3. Έλεγχος κυκλοφορίας.....	24
3.2.4. AIMSUN API.....	25
3.3. Παράμετροι προσομοίωσης.....	25
3.3.1. Το σενάριο (AIMSUN Scenario)	25
3.3.2. Η επανάληψη (AIMSUN Replication)	25
3.3.3. Το πείραμα (AIMSUN Experiment)	26
Κεφάλαιο 4 Ανάπτυξη αλγορίθμου	27
4.1. Περιοχή συγχώνευσης.....	27

4.2.	Ο εκτιμητής Kalman Filter	28
4.3.	Έλεγχος με την ALINEA	30
4.4.	Εξισορρόπηση του σχετικού μήκους των ουρών στις δυο ράμπες εισόδου	30
4.5.	Εξισορρόπηση του χρόνου αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες εισόδου	32
4.6.	Έλεγχος αποφυγής μεγάλων ουρών	34
4.6.1.	Queue Control	34
4.6.2.	Queue Override	35
4.7.	Τελική ροή.....	35
4.8.	Υπολογισμός νέου κύκλου των φωτεινών σηματοδοτών	36
4.9.	Υπολογισμός του Total Time Spent.....	37
Κεφάλαιο 5	Εφαρμογή	39
5.1.	Περιγραφή του προβλήματος	39
5.2.	Εφαρμογή του προβλήματος στον προσομοιωτή AIMSUN	39
5.2.1.	Παράμετροι σεναρίου.....	40
5.2.2.	Τοποθέτηση φωρατών	41
5.3.	Δεδομένα εισόδου	41
5.4.	Σενάριο 1: Προσομοίωση χωρίς έλεγχο	42
5.5.	Σενάριο 2: Προσομοίωση με έλεγχο ALINEA	44
5.6.	Σενάριο 3: Προσομοίωση με εξισορρόπηση του σχετικού μήκους των ουρών	51
5.7.	Σενάριο 4: Προσομοίωση με έλεγχο εξισορρόπησης του χρόνου αναμονής..	59
5.8.	Σενάριο 5: Προσομοίωση με έλεγχο εξισορρόπησης του χρόνου αναμονής με τη χρήση ελεγκτή τύπου P	62
Κεφάλαιο 6	Συμπεράσματα.....	69
Κεφάλαιο 7	Βιβλιογραφία.....	71

Σχήματα

Σχήμα 1: Γενική μορφή ενός οδικού δικτύου.....	17
Σχήμα 2: Η στρατηγική ελέγχου ζήτησης – ικανότητας	21
Σχήμα 3: Το θεμελιώδες διάγραμμα στην περιοχή της συγχώνευσης	27
Σχήμα 4: Περιοχή εφαρμογής Kalman Filter	29
Σχήμα 5: Διάγραμμα εύρεσης του χρονικού βήματος που μπήκε το όχημα στη ράμπα	33
Σχήμα 6: Ο κύκλος c για χρονική περίοδο T	37
Σχήμα 7: Γενική μορφή του δικτύου στον προσομοιωτή AIMSUN	40
Σχήμα 8: Ροή εισόδου των οχημάτων στις δυο ράμπες	41
Σχήμα 9: Αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης (Επανάληψη 9)	42
Σχήμα 10: Αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης (Επανάληψη 1)	43
Σχήμα 11: Αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης (Επανάληψη 10)	43
Σχήμα 12: Ροή στην έξοδο της περιοχής συγχώνευσης του δικτύου χωρίς έλεγχο (επανάληψη 3)	44
Σχήμα 13: Διάγραμμα εύρεσης του \hat{N}_{AL}	45
Σχήμα 14: Εφαρμογή ελέγχου ALINEA (επανάληψη 6)	48
Σχήμα 15: Εφαρμογή ελέγχου ALINEA (επανάληψη 8)	49
Σχήμα 16: Εφαρμογή ελέγχου ALINEA (επανάληψη 2)	50
Σχήμα 17: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο ALINEA (επανάληψη 6)	51
Σχήμα 18: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 6)	53
Σχήμα 19: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 1)	54
Σχήμα 20: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 8)	54
Σχήμα 21: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 9)	55
Σχήμα 22: Εφαρμογή έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 9)	56

Σχήμα 23: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 1).....	57
Σχήμα 24: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 8).....	58
Σχήμα 25: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης χρόνου αναμονής για $e=0.2$ (επανάληψη 6).....	60
Σχήμα 26: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης χρόνου αναμονής για $e=0.05$ (επανάληψη 6).....	60
Σχήμα 27: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης χρόνου αναμονής για $e=0.2$ (επανάληψη 8).....	60
Σχήμα 28: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης χρόνου αναμονής για $e=0.05$ (επανάληψη 8).....	60
Σχήμα 29: Εφαρμογή σεναρίου 5 (επανάληψη 8).....	65
Σχήμα 30: Εφαρμογή σεναρίου 5 (επανάληψη 6).....	66
Σχήμα 31: Εφαρμογή σεναρίου 5 (επανάληψη 6).....	67
Σχήμα 32: Εφαρμογή σεναρίου 5 (επανάληψη 8).....	67

Πίνακες

Πίνακας 1: Τιμές παραμέτρων για τον εκτιμητή Kalman Filter	29
Πίνακας 2: Τιμές παραμέτρων για τον έλεγχο ALINEA	30
Πίνακας 3: Τιμές παραμέτρων για το Queue Control	35
Πίνακας 4: Τιμές παραμέτρων για Queue Override	35
Πίνακας 5: Τιμές παραμέτρων για την εφαρμογή του κύκλου	36
Πίνακας 6: Τιμές του TTS των οχημάτων χωρίς έλεγχο και με ALINEA	46
Πίνακας 7: Τιμές του TTS των οχημάτων χωρίς έλεγχο, ALINEA και εξισορρόπηση ουρών	52
Πίνακας 8: Υπολογισμός συσσώρευσης για ALINEA και εξισορρόπηση ουρών	53
Πίνακας 9: Τιμές του TTS των οχημάτων χωρίς έλεγχο, ALINEA και εξισορρόπηση ουρών και χρόνου αναμονής	59
Πίνακας 10: Υπολογισμός συσσώρευσης για ALINEA και εξισορρόπηση χρόνου αναμονής για $e=0.2$	61
Πίνακας 11: Υπολογισμός συσσώρευσης για ALINEA και εξισορρόπηση χρόνου αναμονής για $e=0.05$	62
Πίνακας 12: Υπολογισμός συσσώρευσης για ALINEA και εξισορρόπηση χρόνου αναμονής για σενάριο 5	63
Πίνακας 13: Τιμές του TTS των οχημάτων για όλους τους ελέγχους	64

Περίληψη

Οι πολίτες κάθε αστικής περιοχής αντιμετωπίζουν καθημερινά εδώ και δεκαετίες, σημαντικές δυσκολίες στη διέλευση τους από κεντρικές οδούς, αρτηρίες αλλά και αστικούς και περιαστικούς αυτοκινητόδρομους. Η αύξηση της χρήσης του αυτοκίνητου επηρεάζει σε μεγάλο ποσοστό την κυκλοφοριακή συμφόρηση, η οποία πλέον αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας πολλών ανθρώπων. Αν και γίνονται προσπάθειες για την βελτίωση των υποδομών των δρόμων, παρόλα αυτά δεν είναι αρκετές και γι' αυτό σε πολλές περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή διαφόρων ελέγχων της κυκλοφορίας.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εξετάζεται η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε αυτοκινητοδρόμους με ράμπες εισόδου, οι οποίες έχουν σύνθετη γεωμετρία. Αρχικά εφαρμόζεται τοπικός έλεγχος της κυκλοφορίας και τοποθετούνται φωτεινοί σηματοδότες στις ράμπες εισόδου. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος του μήκους των ουρών με την ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων, οι οποίοι έχουν σαν κύριο στόχο τους είτε την εξισορρόπηση των ουρών των αυτοκινήτων είτε την εξισορρόπηση του χρόνου αναμονής στους φωτεινούς σηματοδότες. Οι διάφοροι έλεγχοι εξαιτίας του γεγονότος ότι οι ράμπες έχουν συγκεκριμένη χωρητικότητα, υπόκεινται και στους ανάλογους περιορισμούς έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερχείλιση των ραμπών.

Η εφαρμογή των παραπάνω ελέγχων κυκλοφορίας πραγματοποιείται με τη χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορεί να μειωθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση του συγκεκριμένου οδικού δικτύου και να γίνει γρηγορότερη και ασφαλέστερη η διέλευση των αυτοκινήτων.

Πραγματοποιούνται διάφορες επαναλήψεις προσομοίωσης, από τις οποίες προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την εφαρμογή των ελέγχων κυκλοφορίας. Γίνεται σύγκριση των τιμών της συσσώρευση της απόλυτης διαφοράς και της απόλυτη συσσώρευση της διαφοράς των σχηματιζόμενων ουρών ή των χρόνων

αναμονής, αλλά και του συνολικού χρόνου διαμονής στο δίκτυο. Παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα των επαναλήψεων, με τη βοήθεια των οποίων διαπιστώνεται η επιτυχημένη εφαρμογή των ελέγχων κυκλοφορίας.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Το πλέον δημοφιλές μέσο μεταφοράς αποδεικνύεται στη σύγχρονη εποχή των τρομερών ταχυτήτων και των τεράστιων αποστάσεων, ίσως ένα από τα πλέον βραδύτερα. Το αυτοκίνητο, μια από τις σημαντικότερες καινοτόμες ιδέες του 19^{ου} αιώνα, τερματίζει τελευταίο στον «αγώνα» που επιβάλλουν οι σύγχρονοι ρυθμοί και ο υπερπληθυσμός των μεγάλων ή και των μικρότερων αστικών κέντρων. Τα τελευταία χρόνια οι πολίτες των μεγάλων αστικών κέντρων αντιμετωπίζουν καθημερινά τον «εφιάλτη» της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η τρομερή αύξηση της αγοράς αυτοκινήτων αλλά και η συχνή χρήση τους προξενεί πολλά κυκλοφοριακά προβλήματα. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο όταν δεν υπάρχει σωστή υποδομή στους δρόμους και είναι ελλιπής και μερικές φορές ανύπαρκτος ο κυκλοφοριακός έλεγχος. Η αναμονή των πολιτών σε ατέλειωτες ουρές, κυρίως σε ώρες αιχμής, είναι πλέον κομμάτι της καθημερινότητας τους. Οι αστικοί και περιαστικοί αυτοκινητόδρομοι έχουν μετατραπεί σε αστικούς δρόμους εξαιτίας της έντονης συμφόρησης, με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας και τη δυσκολία να φτάσουν οι οδηγοί γρήγορα στον προορισμό τους.

Προκειμένου να επιτευχθεί κάποια βελτίωση του συγκεκριμένου προβλήματος κρίνεται αναγκαίο, πέρα από τη συστηματική επίβλεψη και καλυτέρευση των υποδομών, η εφαρμογή μέτρων κυκλοφοριακού ελέγχου. Με τη βοήθεια της τεχνολογίας και με τη χρήση των υπολογιστών έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφοροι αλγόριθμοι, οι όποιοι έχουν βασικό τους σκοπό τη ρύθμιση της κυκλοφορίας σε αυτοκινητοδρόμους με έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Πολλές μεγάλες πόλεις έχουν εφαρμόσει επιτυχώς κυκλοφοριακούς ελέγχους στους δρόμους τους με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της συμφόρησης.

Ένα τέτοιου είδους πρόβλημα εξετάζει και η παρούσα εργασία. Γίνεται εφαρμογή τοπικού ελέγχου κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομο με ράμπες εισόδου σύνθετης γεωμετρίας. Δύο ανεξάρτητες ράμπες εισόδου συγχωνεύονται σε μία λίγα μέτρα πριν από τον αυτοκινητόδρομο. Τόσο ο αυτοκινητόδρομος όσο και οι ράμπες εισόδου έχουν συγκεκριμένη ικανότητα, η οποία δεν μπορεί να ξεπεραστεί. Για διάφορες τιμές της κυκλοφοριακής ζήτησης εντοπίζεται η κυκλοφοριακή συμφόρηση και γίνεται στη συνέχεια τοποθέτηση σε κατάλληλα σημεία του δρόμου φωρατών και εφαρμογή του κυκλοφοριακού ελέγχου. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με κύριο στόχο την ελάττωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης αλλά και την καλύτερη διαχείριση των ουρών που δημιουργούνται στις δυο ράμπες εισόδου.

Αναλυτικότερα, στο κεφάλαιο 2 θα γίνει περιγραφή των αλγορίθμων ελέγχου κυκλοφορίας και αναλυτική παρουσίαση και σύγκριση των στρατηγικών «ζήτησης – ικανότητας», «ποσοστού κατάληψης» και «ALINEA». Στο κεφάλαιο 3 θα γίνει αναφορά στο μικροσκοπικό προσομοιωτή AIMSUN, στον τρόπο που λειτουργεί, ποιες παραμέτρους χρησιμοποιεί όπως επίσης και στον τρόπο που εφαρμόζει τους εκάστοτε αλγορίθμους με τη βοήθεια του AIMSUN API (Application Programming Interface). Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική περιγραφή του προβλήματος που εξετάζει η παρούσα μελέτη, πως εφαρμόζεται στο AIMSUN, με ποιους αλγορίθμους επιτυγχάνεται η καλύτερη εφαρμογή του προβλήματος και ποια δεδομένα και ποιοι παράμετροι εισάγονται στο πρόβλημα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου εξετάζονται οι δυο περιπτώσεις διαχείρισης των ουρών, η εξισορρόπηση του σχετικού μήκους τους αλλά και η εξισορρόπηση του χρόνου αναμονής των αυτοκινήτων. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων μεθόδων. Τέλος, ακολουθεί το κεφάλαιο 6, όπου περιγράφονται τα συμπεράσματα της παρούσας ερευνητικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση ως αποτέλεσμα του αυξανόμενου αριθμού οχημάτων, της μη εφαρμογής κυκλοφοριακού ελέγχου και των κακών υποδομών, εμποδίζει την γρήγορη και την ασφαλή διέλευση των οδηγών από τους αυτοκινητοδρόμους. Η ανάγκη εύρεσης κάποιας λύσης γίνεται καθημερινά όλο και επιτακτική. Για λόγους κυρίως οικονομικούς αλλά και περιβαλλοντικούς έχει στραφεί η προσοχή στην εύρεση κάποιας λύσης με την βοήθεια της τεχνολογίας και των υπολογιστών και πιο συγκεκριμένα με την εφαρμογή κυκλοφοριακών ελέγχων στα οδικά δίκτυα.

2.1. Γενική μορφή ενός οδικού δικτύου

Οι αυτοκινητόδρομοι και οι αστικοί δρόμοι πρέπει να παρέχουν στους οδηγούς άμεση, γρήγορη και ασφαλή προσπέλαση. Είναι απαραίτητη, έτσι η εφαρμογή κατάλληλων ελέγχων ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτωση του οδικού δικτύου αλλά και ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται η διατήρηση της ικανότητας σε επιτρεπτά επίπεδα. (Papageorgiou and Kotsialos, 2002).



Σχήμα 1: Γενική μορφή ενός οδικού δικτύου

Σε μια γενική μορφή ενός οδικού δικτύου, όπως στο Σχήμα 1, φαίνεται να υπάρχει ζήτηση (demand) από διαφορετικές κατευθύνσεις, οι οποίες μέσω του δικτύου

μεταφράζονται σε ροές εξόδου (exit flows) πάλι σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Γίνεται αρχικά η υπόθεση ότι δεν εφαρμόζεται κανένα μέτρο ελέγχου κυκλοφορίας και πραγματοποιείται στη συνέχεια προσπάθεια εύρεσης της αποτελεσματικότητας του δικτύου, δηλαδή του συνολικού χρόνου που χρειάστηκαν οι οδηγοί να φτάσουν στον προορισμό τους. Είναι προφανές ότι ο χρόνος αυτός θα είναι σαφώς μικρότερος από ότι εάν υπήρχε καθυστέρηση λόγω κάποιας χαμηλής ροής στην έξοδο. Συνεπάγεται, λοιπόν, ότι η εφαρμογή κάποιου ελέγχου ίσως καταφέρει να αυξήσει την ροή εξόδου και παράλληλα να μειώσει τον χρόνο προσπέλασης.

Μεταφράζοντας τις παραπάνω υποθέσεις μαθηματικά, ορίζεται αρχικά μια διακριτή μεταβλητή χρόνου T , η ροή αυτοκινήτων ως ο αριθμός των οχημάτων που περνούν μια συγκεκριμένη περιοχή σε ένα χρονικό διάστημα $[kT, (k+1)T]$, όπου $k = 0, 1, 2, \dots$ δηλαδή οχήματα/ώρα (veh/h). Έστω ότι το δίκτυο του Σχήματος 1 δέχεται ζήτηση οχημάτων $d_i(k)$ σε (veh/h) με $i = 1, 2, 3, \dots$, και ότι η ροή εξόδου είναι $s_i(k)$ με $i = 1, 2, 3, \dots$. Ο στόχος της εφαρμογής μέτρων ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο σε ένα χρονικό ορίζοντα K ,

$$T_s = T \sum_{k=1}^K N(k) \quad (2.1)$$

οπού $N(k)$ ο συνολικός αριθμός αυτοκινήτων του δικτύου την χρονική στιγμή k . Εξαιτίας της διατήρησης του αριθμού αυτοκινήτων προκύπτει:

$$\begin{aligned} N(k) &= N(k-1) + T[d(k-1) - s(k-1)] \\ &= N(0) + T \sum_{\kappa=0}^{k-1} [d(\kappa) - s(\kappa)] \end{aligned} \quad (2.2)$$

Από την σχέση (2.1) με αντικατάσταση της (2.2) προκύπτει ότι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου που ξοδεύτηκε ισοδυναμεί με την μεγιστοποίηση της ποσότητας που δίνεται από την σχέση (2.3), δηλαδή μεγιστοποίηση της χρονικά εξαρτώμενης ροής εξόδου.

$$S = T^2 \sum_{k=1}^K \sum_{\kappa=0}^{k-1} s(\kappa) = T^2 \sum_{k=0}^K (K-k)s(k) \quad (2.3)$$

2.2. Έλεγχος ραμπών εισόδου

Ένα από πιο αποτελεσματικά μέτρα ελέγχου κυκλοφορίας είναι ο έλεγχος ραμπών εισόδου (Smaragdis and Papageorgiou, 2003), η τοποθέτηση, δηλαδή, φωτεινών σηματοδοτών στις ράμπες εισόδου ή στους κόμβους των αυτοκινητόδρομων. Ο έλεγχος ραμπών εισόδου διακρίνεται σε δυο βασικές κατηγορίες στρατηγικών, στις στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου και στις στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου.

2.2.1. Στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου

Οι στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου παράγουν αποτελέσματα στηριζόμενες σε παλαιότερες τιμές της ζήτησης χωρίς να χρησιμοποιούν μετρήσεις πραγματικού χρόνου και χρησιμοποιούν απλά στατικά μοντέλα. Πιο αναλυτικά, χωρίζουν τον αυτοκινητόδρομο σε τομείς, οι όποιοι εμπεριέχουν τουλάχιστον μια ράμπα εισόδου. Σκοπός τους είναι χρησιμοποιώντας τη ροή των οχημάτων και τον αριθμό αυτών που εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο, να ελαχιστοποιήσουν τον χρόνο προσπέλασης ή να ισορροπήσουν τις ουρές που μπορεί να δημιουργηθούν στις ράμπες. Με την βοήθεια γραμμικού προγραμματισμού και υπολογιστικών αλγορίθμων τα παραπάνω μπορούν να λυθούν.

Παρόλο που οι στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου μπορούν μερικές φορές να αξιοποιήσουν σωστά την χωρητικότητα ενός δρόμου, παρουσιάζουν συχνά αρκετά προβλήματα, εξαιτίας του γεγονότος ότι κάνουν χρήση δεδομένων από παλαιότερες μετρήσεις και μπορούν πολύ εύκολα να οδηγήσουν σε συμφόρηση. Το πρόβλημα εντοπίζεται, κυρίως, στις τιμές της ζήτησης, οι οποίες αλλάζουν από μέρα σε μέρα και δε μένουν σταθερές, έτσι κάνοντας χρήση παλαιότερων τιμών σίγουρα η εφαρμογή του ελέγχου δε θα είναι αποτελεσματική.

2.2.2. Στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου

Οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου βασίζονται σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου και όχι σε παλαιότερες. Οι μετρήσεις γίνονται με την χρήση φωρατών, μαγνητικών ανιχνευτών που τοποθετούνται στις λωρίδες του δρόμου οπου κρίνεται απαραίτητο και μετρούν τον αριθμό των διερχόμενων οχημάτων, την ταχύτητα τους, το ποσοστό κατάληψης του δρόμου και αλλά. Οι μετρήσεις γίνονται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (από 20 έως 60 δευτερόλεπτα) και χρησιμοποιούνται

από τις στρατηγικές ελέγχου ώστε να υπολογιστούν τα μέτρα που θα εφαρμοστούν στο επόμενο χρονικό διάστημα.

Οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου που εφαρμόζονται σε ράμπες εισόδου διακρίνονται σε τοπικές και συντονισμένες. Οι τοπικές στρατηγικές για να υπολογίσουν τις κατάλληλες τιμές των ροών εισόδου, χρησιμοποιούν μετρήσεις σε περιοχές πολύ κοντά στη ράμπα. Η στρατηγική εφαρμόζεται για ένα χρονικό διάστημα από 20 έως 60 δευτερόλεπτα, μετρώντας στο τέλος του χρονικού διαστήματος την ροή των οχημάτων και το ποσοστό κατάληψης του δρόμου έτσι ώστε να μπορεί να δώσει τιμές για την επόμενη χρονική περίοδο. Οι συντονισμένες στρατηγικές εφαρμόζονται κυρίως σε σημεία των δικτύων όπου υπάρχει έντονη συμφόρηση ή περιορισμένη χωρητικότητα στις ράμπες.

2.3. Τοπικές στρατηγικές ελέγχου

Οι πιο γνωστές στρατηγικές τοπικού ελέγχου είναι η στρατηγική ζήτησης-ικανότητας, η στρατηγική ποσοστού κατάληψης και η ALINEA. Οι δυο πρώτες είναι στρατηγικές που στηρίζονται σε μετρήσεις της ροής και του ποσοστού κατάληψης στο κύριο ρεύμα του αυτοκινητόδρομου ανάντη της ράμπας. Η στρατηγική ALINEA είναι ένας ανατροφοδοτικός ελεγκτής, ο οποίος χρησιμοποιεί τις μετρήσεις του ποσοστού κατάληψης στο κύριο ρεύμα του αυτοκινητόδρομου κατάντη της ράμπας.

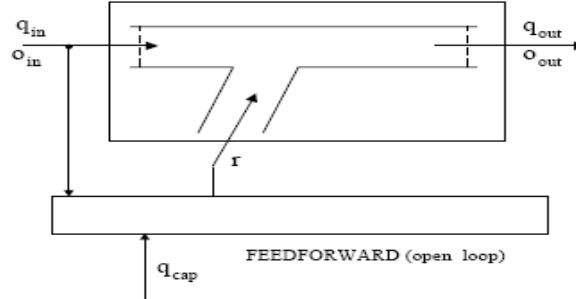
2.3.1. Η στρατηγική ζήτησης – ικανότητας

Η στρατηγική ζήτησης – ικανότητας (Σχήμα 15) προσπαθεί να προσθέσει στην ανάντη ροή $q_{in}(k-1)$ τόση ροή από τα οχήματα της ράμπας έως ότου να φτάσει την τιμή της ικανότητας του κύριου αυτοκινητόδρομου όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση,

$$q(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k-1) & \text{εάν } o_{in}(k-1) \leq o_{cr} \\ q_{min} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.4)$$

Όπου $k=1,2,3...$ η διακριτή χρονική περίοδος, $q(k)$ η ροή των οχημάτων στην ράμπα (veh/h) που θα εφαρμοστεί στην επόμενη χρονική περίοδο k , $o_{in}(k-1)$ η τελευταία μέτρηση του ποσοστού κατάληψης ανάντη της ράμπας, q_{cap} η κατάντη

ικανότητα του αυτοκινητόδρομου, q_{\min} η ελάχιστη αποδεκτή τιμή ροής της ράμπας και o_{cr} η κατάντη κρίσιμη τιμή του ποσοστού κατάληψης όταν η ροή στον αυτοκινητόδρομο παίρνει τη μέγιστη τιμή.



Σχήμα 2: Η στρατηγική ελέγχου ζήτησης – ικανότητας

Εάν σε κάποια περίπτωση παρατηρηθεί φαινόμενο συμφόρησης και η τιμή του ανάντη ποσοστού κατάληψης υπερβεί την κρίσιμη τιμή o_{cr} τότε η ροή στον κύριο αυτοκινητόδρομο μειώνεται στην ελάχιστη επιτρεπόμενη ώστε να μειωθεί η συμφόρηση και να αποφευχθεί η περαιτέρω δημιουργία προβλήματος.

2.3.2. Η στρατηγική ελέγχου ποσοστού κατάληψης

Η συγκεκριμένη στρατηγική στηρίζεται στην ίδια φιλοσοφία με την στρατηγική ζήτησης – ικανότητας, αλλά η εκτίμηση της ανάντη ροής της ράμπας q_{in} γίνεται με βάση το ποσοστό κατάληψης. Εάν γίνει προσέγγιση της αριστερής πλευράς του θεμελιώδους διαγράμματος (βλέπε Σχήμα 3, σελ. 27) με μια ευθεία γραμμή τότε θα ισχύει:

$$q_{in} = \frac{v_f \cdot o_{in}}{g} \quad (2.5)$$

Οπού, v_f η ελεύθερη ταχύτητα στο δρόμο και εάν γίνει αντικατάσταση της (2.5) στην (2.4) τότε προκύπτει:

$$q(k) = K_1 - K_2 \cdot o_{in}(k-1) \quad (2.6)$$

Οπού $K_1 = q_{cap}$ και $K_2 = v_f / g$ και $q(k)$ μεταξύ του εύρους $[q_{\min}, q_{\max}]$ με q_{\max} η εκτιμώμενη ικανότητα της ράμπας. Συμπερασματικά η στρατηγική ελέγχου του ποσοστού κατάληψης είναι αρκετά ανακριβής επειδή κάνει χρήση του ποσοστού κατάληψης και εξαιτίας της γραμμικής υπόθεσης για το θεμελιώδες διάγραμμα.

2.3.3. Η στρατηγική ελέγχου ALINEA

Η ALINEA είναι στρατηγική ελέγχου ραμπών εισόδου με ανατροφοδότηση (τύπου I) και δίνεται από τη σχέση:

$$q(k) = q(k-1) + K_R[\hat{o} - o_{out}(k-1)] \quad (2.7)$$

Όπου $K_R > 0$ είναι η παράμετρος κέρδους και \hat{o} είναι η επιθυμητή τιμή του κατάντη ποσοστού κατάληψης, η οποία τίθεται ίση με o_{cr} για μέγιστη ροή εξόδου. Το κομμάτι $\hat{o} - o_{out}(k-1)$ είναι ουσιαστικά η συσσώρευση του σφάλματος της εξίσωσης (2.7) από βήμα σε βήμα. Η ALINEA είναι ένας ελεγκτής τύπου I και για αυτό εξαιτίας του φαινομένου “wind-up” που παρατηρείται συχνά σε τέτοιου είδους ελεγκτές μπορεί το αποτέλεσμα της παραπάνω εξίσωσης να αυξηθεί ή να μειωθεί κάτω από καθορισμένες συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, εάν για παράδειγμα, $\hat{o} > o_{out}$ τότε για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα το σφάλμα $\hat{o} - o_{out}(k-1)$ θα είναι θετικό και θα δίνει μεγάλες τιμές ροής $q(k)$ ενώ η πραγματική εισερχόμενη ροή θα είναι πολύ μικρότερη λόγω έλλειψης ζήτησης. Εάν από την άλλη $\hat{o} < o_{out}$ τότε το σφάλμα θα είναι αρνητικό πράγμα το οποίο συνεπάγεται μείωση της ροής $q(k)$. Στην πραγματικότητα μείωση της εισερχόμενης ροής επιτυγχάνεται όταν η ροή $q(k)$ γίνει μικρότερη από την τρέχουσα τιμή της εισερχόμενης ροής.

Προκειμένου να αποφευχθεί το παραπάνω φαινόμενο, το αποτέλεσμα $q(k)$ της εξίσωσης τροποποιείται κατάλληλα εάν οι τιμές του βρίσκονται εκτός του προκαθορισμένου διαστήματος $[q_{min}, q_{max}]$ και η τροποποιημένη τιμή χρησιμοποιείται εκ νέου ως $q(k-1)$ στο επόμενο χρονικό βήμα. Κύριος στόχος του ελέγχου, γενικότερα είναι η μεγιστοποίηση της εξερχόμενης ροής, η οποία επιτυγχάνεται όταν $\hat{o} = o_{out}$.

Κεφάλαιο 3

Ο προσομοιωτής AIMSUN

3.1. Τι είναι το AIMSUN;

Το AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Nonurban Networks) είναι ένα λογισμικό εργαλείο ικανό να αναπαράγει πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας σε ένα οδικό δίκτυο. Βασίζεται σε μια μικροσκοπική προσέγγιση. Προσομοιώνει με αρκετά ρεαλιστικό τρόπο την ροή των οχημάτων σε ένα οδικό δίκτυο. Δέχεται τριών τύπων δεδομένα: την περιγραφή του δικτύου, τις συνθήκες του κυκλοφοριακού συστήματος και το είδος του κυκλοφοριακού ελέγχου. Η περιγραφή του δικτύου εμπεριέχει πληροφορίες όσον αφορά τη γεωμετρία των δρόμων. Ο κυκλοφοριακός έλεγχος καθορίζει εάν θα γίνει χρήση φωτεινών σηματοδοτών, τις φάσεις που χρησιμοποιούν και τη χρονική διάρκεια που εφαρμόζονται για τον έλεγχο διασταυρώσεων, την προτεραιότητα των οχημάτων σε περίπτωση διασταύρωσης χωρίς έλεγχο και εάν θα εφαρμοστούν στρατηγικές ελέγχου στις ράμπες. Τα πιο ουσιαστικά δεδομένα που χρειάζεται ο προσομοιωτής είναι αυτά της τιμής της ροής για κάθε κομμάτι του δικτύου, το ποσοστό στροφής των οχημάτων στις διασταυρώσεις και μια αρχική δήλωση της κατάστασης του δικτύου που θα ερευνηθεί.

Ο προσομοιωτής πραγματοποιεί, επίσης, λεπτομερή μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των οδηγών κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και κατ' επέκταση των αυτοκινήτων κυρίως για τις αντιδράσεις τους στην αλλαγή λωρίδας, στο πως ακολουθούν το ένα το άλλο, την απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους αλλά και ποια θα ήταν η αντίδραση τους σε περίπτωση ξαφνικών αλλαγών (π.χ. ατύχημα).

Η έξοδος του λογισμικού AIMSUN συμπεριλαμβάνει γραφικές αναπαραστάσεις του δικτύου, εκτυπώσιμη μορφή δεδομένων όπως, η ροή, η ταχύτητα, η καθυστέρηση, η

κατανάλωση καυσίμων αλλά και η εκπομπή καυσαερίων. Παρέχει επίσης στοιχεία που συλλέγονται από την τοποθέτηση φωρατών όπως, ο αριθμός οχημάτων, το ποσοστό κατάληψης, η ταχύτητα και το μήκος των ουρών που δημιουργούνται.

3.2. Δεδομένα εισόδου

Όπως ήδη προαναφέρθηκε ο προσομοιωτής δέχεται τριών ειδών δεδομένα, την διάταξη του δικτύου, το σενάριο ζήτησης και τον κυκλοφοριακό έλεγχο, που θα εφαρμοστεί.

3.2.1. Διάταξη του δικτύου

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά τη διάταξη του δικτύου το AIMSUN προσφέρει τη δυνατότητα σε χρήστη να φτιάξει οποιοδήποτε δίκτυο και με οποιαδήποτε γεωμετρία επιθυμεί. Για παράδειγμα ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να αποτελείται από έναν αριθμό διαφορετικών τμημάτων, τα οποία μπορούν να συνδέονται απλά μεταξύ τους ή με διασταυρώσεις. Σε κάθε τμήμα του δικτύου παρέχεται η δυνατότητα τοποθέτησης φωρατών, για την συλλογή απαραίτητων μετρήσεων, όπως, ο αριθμός οχημάτων, το ποσοστό κατάληψης, η ταχύτητα, η πυκνότητα και το μήκος των ουρών που δημιουργούνται κ.τ.λ. Ο προσομοιωτής δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να επέμβει οποιαδήποτε στιγμή στο δίκτυο και να πραγματοποιήσει αλλαγές που ίσως χρειάζονται.

3.2.2. Σενάριο ζήτησης

Το σενάριο ζήτησης είναι οι τιμές που επιθυμεί ο εκάστοτε χρήστης για την ροή των οχημάτων στις εισόδους του δικτύου αλλά και το ποσοστό αλλαγής κατεύθυνσης που επιτρέπει στα οχήματα όταν βρίσκονται σε διασταύρωση. Ο αριθμός των οχημάτων που εισάγονται στο δίκτυο παράγονται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών, που χρησιμοποιεί ως μέση τιμή τη ροή των οχημάτων στις εισόδους του δικτύου. Το AIMSUN χρησιμοποιεί κατανομή εκθετικής μορφής, παρόλα αυτά ο χρήστης μπορεί να επέμβει και να αλλάξει ότι θεωρεί απαραίτητο για την καλύτερη λειτουργία του δικτύου.

3.2.3. Έλεγχος κυκλοφορίας

Από τους πιο συνηθισμένους ελέγχους κυκλοφορίας που εφαρμόζει το AIMSUN είναι οι φωτεινοί σηματοδότες. Εφαρμόζονται κατάλληλα σε κόμβους, διασταυρώσεις

ή σε τμήματα του δρόμου όπου κρίνεται απαραίτητο. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν εμπεριέχεται σε κάποιο σενάριο ελέγχου, που είτε δίνεται εξωτερικά από τον χρήστη είτε εσωτερικά στο AIMSUN επεμβαίνοντας στον τρόπο λειτουργίας τους. Σε κάθε δίκτυο μπορούν να υπάρχουν περισσότεροι του ενός φωτεινοί σηματοδότες, οι όποιοι λειτουργούν παράλληλα ή τελείως ανεξάρτητα ανάλογα με τι επιθυμεί ο χρήστης. Η δυνατότητα του χρήστη να επέμβει εξωτερικά στην λειτουργία των φωτεινών σηματοδοτών δίνεται μέσω του AIMSUN API.

3.2.4. AIMSUN API

Το AIMSUN API (Application Programming Interface) είναι η δυνατότητα που παρέχει ο προσομοιωτής στον χρήστη ώστε να επέμβει δυναμικά στο μοντελοποιημένο πρόβλημα. Είναι ουσιαστικά ένας τρόπος επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη και του λογισμικού AIMSUN κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Με το AIMSUN API μπορεί ο χρήστης να δημιουργήσει και να εφαρμόσει ένα δικό του έλεγχο κυκλοφορίας προκειμένου να βελτιστοποιήσει το πρόβλημα του. Μπορεί να έχει πρόσβαση και να επεξεργάζεται τις μετρήσεις, που προκύπτουν από την προσομοίωση. Το AIMSUN API λαμβάνει τις μετρήσεις, τις επεξεργάζεται και τις τροποποιεί και στη συνέχεια εφαρμόζει τις εντολές που του έχουν δοθεί.

3.3. Παράμετροι προσομοίωσης

Πέρα από τα δεδομένα εισόδου το AIMSUN χρειάζεται και τρεις ακόμα παραμέτρους ώστε να εξομοιωθεί αποτελεσματικά το μοντελοποιημένο πρόβλημα, το σενάριο (AIMSUN Scenario), την επανάληψη (AIMSUN Replication) και το πείραμα (AIMSUN Experiment).

3.3.1. Το σενάριο (AIMSUN Scenario)

Μέσω του σεναρίου γίνεται η επιλογή της ζήτησης, του είδους των κυκλοφοριακών ρυθμίσεων και ο καθορισμός του αρχείου API που θα εφαρμοστούν στο κυκλοφοριακό πρόβλημα.

3.3.2. Η επανάληψη (AIMSUN Replication)

Στη συνέχεια επιλέγεται ο αριθμός των επαναλήψεων που θα πραγματοποιηθούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα καθορίζοντας έτσι τους σπόρους που θα χρησιμοποιήσει ο προσομοιωτής για παράγει τυχαίους αριθμούς με τη βοήθεια της γεννήτριας.

3.3.3. Το πείραμα (AIMSUN Experiment)

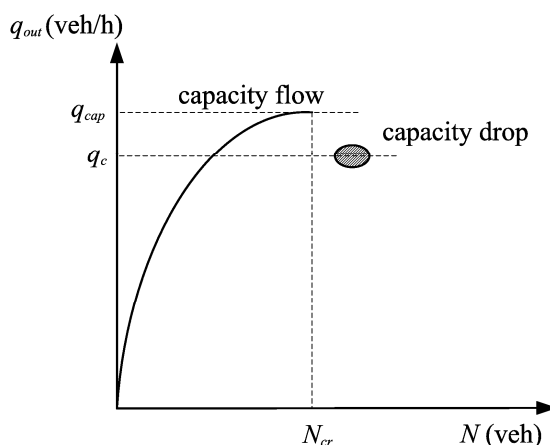
Μέσω του πειράματος δίνονται οι πληροφορίες όσον αφορά την κίνηση των οχημάτων, καθορίζονται τα δυο βασικά μοντέλα κίνησης, το μοντέλο ακολουθίας των οχημάτων (Car-Following Model) και το μοντέλο αλλαγής λωρίδας (Lane-Changing Model). Σύμφωνα με το μοντέλο ακολουθίας των οχημάτων ορίζονται οι παράμετροι που αφορούν τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος κίνησης των οχημάτων. Ποιο είναι για παράδειγμα το αποδεκτό όριο ταχύτητας, το όριο ταχύτητας σε κάθε τμήμα του δικτύου, η ταχύτητα στις διασταυρώσεις αλλά και η επιτάχυνση και η επιβράδυνση.

Κεφάλαιο 4

Ανάπτυξη αλγορίθμου

4.1. Περιοχή συγχώνευσης

Γενικότερα σε μια περιοχή συγχώνευσης εισέρχεται ένας αριθμός M λωρίδων οι οποίες συγχωνεύονται σε ένα αριθμό μ λωρίδων εξόδου, όπου $M > \mu$. Η διαδικασία αυτή δεν είναι αρκετά εύκολη και επηρεάζεται από πολλούς λόγους. Για παράδειγμα, η γεωμετρία των δρόμων, οι λωρίδες που έχουν προτεραιότητα σε σχέση με τις άλλες, το μέγεθος της περιοχής συγχώνευσης είναι μερικοί από αυτούς. Το φαινόμενο της συγχώνευσης μπορεί να γίνει εντονότερο και πολυπλοκότερο όσο παραμένει απρόβλεπτη η συμπεριφορά των οδηγών στην αλλαγή λωρίδας. Η γενικότερη πολυπλοκότητα και η ύπαρξη διάφορων μικροσκοπικών συμπεριφορών συγχώνευσης, παρόλο που δεν αντικατοπτρίζουν τα φαινόμενα συγχώνευσης πραγματικού-χρόνου, μπορούν να ξεπεραστούν διότι οι υποθέσεις και προσεγγίσεις για εφαρμογή ελέγχου σε πραγματικό-χρόνο σε κάθε είδος συγχώνευσης, είναι μακροσκοπικής φύσεως και μπορούν εύκολα να συσχετιστούν με «το θεμελιώδες διάγραμμα» (Σχήμα 3) στην περιοχή της συγχώνευσης (Papageorgiou et al, 2008).



Σχήμα 3: Το θεμελιώδες διάγραμμα στην περιοχή της συγχώνευσης

Το διάγραμμα αυτό ουσιαστικά παρουσιάζει το πώς μπορεί η πυκνότητα των αυτοκινήτων να επηρεάσει τη ροή στην περιοχή όπου γίνεται η συγχώνευση. Ως q_{out} ορίζεται η ροή εξόδου και N ο αριθμός των οχημάτων στην περιοχή που εξετάζεται. Εάν το N είναι μικρό τότε δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα και η ροή εξόδου είναι αρκετά χαμηλή. Εάν το N αυξηθεί τότε μεγαλώνει και το πρόβλημα, αλλά το q_{out} αυξάνεται μέχρι το N να φτάσει την κρίσιμη τιμή N_{cr} και η ροή εξόδου να φτάσει την κατάντη τιμή της ικανότητας q_{cap} . Όταν το N ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή του τότε το πρόβλημα γίνεται εντονότερο, πράγμα το οποίο συνεπάγεται μείωση της επιτάχυνσης και της ταχύτητας των οχημάτων έτσι που η τιμή της ροής εξόδου να φτάσει την χαμηλότερη τιμή της q_c . Όπου $q_c - q_{cap}$ είναι η απότομη πτώση της ικανότητας εξαιτίας της συμφόρησης που προκλήθηκε. Για το φαινόμενο της απότομης πτώσης της ικανότητας του δρόμου λόγω συμφόρησης έχουν γίνει διάφορες αναφορές κατά καιρούς (Cassidy and Rudjanakanoknad, 2005), σύμφωνα με τις οποίες παρατηρείται ότι η ροή στην περιοχή της συγχώνευσης αυξάνεται σχετικά γρήγορα μέχρι το σημείο q_{cap} και εάν συνεχιστεί περαιτέρω η αύξηση της τιμής αυτής τότε προκαλείται έντονο κυκλοφοριακό πρόβλημα με μείωση ταχυτήτων και αύξηση ποσοστού κατάληψης του δρόμου.

4.2. Ο εκτιμητής Kalman Filter

Στην εφαρμογή των παρακάτω κυκλοφοριακών ελέγχων τόσο της εξισορρόπησης του σχετικού μήκους των ουρών όσο και του χρόνου αναμονής, είναι απαραίτητη η εκτίμηση της ουράς των οχημάτων στις δύο ράμπες. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται με τη χρήση του εκτιμητή Kalman Filter (Vigos et al, 2008), ο οποίος δίνεται από την εξίσωση:

$$\hat{N}_i(k) = \hat{N}_i(k-1) + T[q_{i,in}^m(k-1) - q_{i,out}^m(k-1)] + K[N_i^m(k-1) - \hat{N}_i(k-1)] \quad (4.1)$$

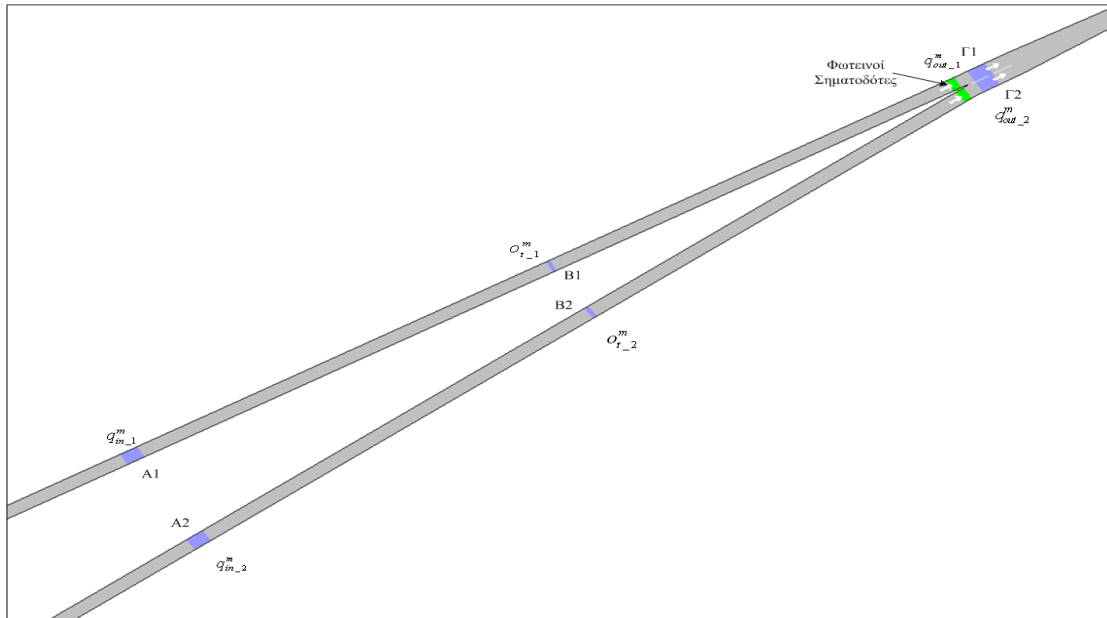
για $i=1,2$, όπου $\hat{N}_i(k)$ είναι ο εκτιμώμενος αριθμός των οχημάτων στη ράμπα i και K μια παράμετρος κέρδους του εκτιμητή. Όπου $q_{i,in}^m$ και $q_{i,out}^m$ οι ροές που μετρούνται από τους φωρατές Α και Γ αντίστοιχα (Σχήμα 17). Η εκτιμώμενη τιμή των οχημάτων $\hat{N}_i(k)$ βρίσκεται σε ένα διαστήματος $[0, N_{i,max}]$, όπου $N_{i,max}$ ο

μέγιστος αριθμός σταματημένων οχημάτων, Πίνακας 1, με μια απόσταση μεταξύ τους περίπου $D = 1m$, στο κομμάτι του δικτύου που γίνεται η εκτίμηση, Σχήμα 4.

Όπου $N_i^m = \frac{\lambda_i}{L_i^{Ph}} o_i$ ο αριθμός των οχημάτων σύμφωνα με το ποσοστό κατάληψης $o_i(k-1) = o_s(k-1) + \zeta_o(k-1)$ που υπολογίζει ο φωρατής B (Σχήμα 4). Γνωρίζοντας ότι $o_s = \frac{(N \cdot L_i^{Ph})}{\lambda_i}$, με λ_i ο αριθμός των λωρίδων του δικτύου που εξετάζεται και L_i^{Ph} το μήκος των οχημάτων (Πίνακας 1) και ζ_0 τυχαία μεταβλητή λάθους.

Πίνακας 1: Τιμές παραμέτρων για τον εκτιμητή Kalman Filter

K	Η μεταβλητή κέρδους	0.05
L^{Ph}	Φυσικό μέσο μήκος οχημάτων	4
$N_{i,max}$	Μέγιστος αριθμός οχημάτων	30
λ_i	Αριθμός των λωρίδων στις ράμπες	1



Σχήμα 4: Περιοχή εφαρμογής Kalman Filter

4.3. Έλεγχος με την ALINEA

Ο πρώτος τοπικός έλεγχος που εφαρμόζεται στο δίκτυο, της παρούσας έρευνας, είναι αυτός της ALINEA. Τα δεδομένα που θα επεξεργάζεται καθώς και τα αποτελέσματα που θα δίνει ο ελεγκτής θα αναφέρονται στον αριθμό των οχημάτων N . Η αλλαγή των μεταβλητών είναι εφικτή χάρη στην αναλογία που υπάρχει μεταξύ του ποσοστού κατάληψης ρ και του N . Έτσι η εξίσωση της ALINEA μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$q_{AL}(k) = q_{AL}(k-1) + K_R [\hat{N}_{AL} - N_{AL}(k-1)] \quad (4.2)$$

Οπού K_R η παράμετρος του κέρδους.

Η παραπάνω στρατηγική θα εφαρμόζεται κάθε $T = 15$ sec και θα λαμβάνει τον αριθμό των οχημάτων N_{AL} , της προηγούμενης χρονικής περιόδου της περιοχής που εξετάζεται, θα ελέγχει την απόκλιση του από την επιθυμητή τιμή \hat{N}_{AL} και θα δίνει την νέα τιμή της ροής των οχημάτων q_{AL} (veh/h), που θα εισέρθει την επόμενη χρονική στιγμή στην περιοχή ελέγχου. Η νέα τιμή εξετάζεται στη συνέχεια εάν ξεπερνά τις οριακές τιμές (Πίνακας 2) ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στη λειτουργία του ελεγκτή. Όταν εφαρμόζεται μόνο ο έλεγχος ALINEA τότε για κάθε ράμπα ξεχωριστά θεωρείται ότι γίνεται ισόποση κατανομή της ροής ίση με $q_{AL}/2$.

Πίνακας 2: Τιμές παραμέτρων για τον έλεγχο ALINEA

K_R	Παράμετρος κέρδους	100 h^{-1}
$q_{AL,max}$	Μέγιστη τιμή της ροής	1800 (veh/h)
$q_{AL,min}$	Ελάχιστη τιμή της ροής	400 (veh/h)
\hat{N}_{AL}	Επιθυμητή τιμή του αριθμού των οχημάτων	22 veh

4.4. Εξισορρόπηση του σχετικού μήκους των ουρών στις δυο ράμπες εισόδου

Ο επόμενος έλεγχος που πραγματοποιείται σε συνδυασμό με αυτόν της ALINEA είναι αυτός της εξισορρόπησης του σχετικού μήκους των ουρών. Στόχος είναι οι νέες

τιμές της ροής των οχημάτων για την επόμενη χρονική περίοδο να δημιουργούν ίσο ποσοστό κατάληψης στις δυο ράμπες αντίστοιχα. Θα πρέπει, δηλαδή, ο σχετικός αριθμός των οχημάτων που περιμένουν στους φωτεινούς σηματοδότες να είναι ίδιος και στις δυο ράμπες στο επόμενο βήμα. Εάν $N_{1,\max}$ και $N_{2,\max}$ ο μέγιστος αριθμός οχημάτων στις δυο ράμπες, τότε θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{\hat{N}_1(k) + \hat{d}_1(k) \cdot T - q_1(k) \cdot T}{N_{1,\max}} = \frac{\hat{N}_2(k) + \hat{d}_2(k) \cdot T - q_2(k) \cdot T}{N_{2,\max}} \quad (4.3)$$

Όπου \hat{d}_1 και \hat{d}_2 οι τιμές της εκτίμησης της ζήτησης, οι οποίες προσεγγίζονται με τη βοήθεια της εκθετικής εξομάλυνσης της μετρούμενης ροής στην είσοδο της ράμπας i :

$$\hat{d}_i(k) = q_{i,in}^{sm}(k) = e \cdot q_{i,in}^m(k) + (1-e) \cdot q_{i,in}^{sm}(k-1) \quad i=1,2 \quad (4.4)$$

Παράλληλα όμως θα πρέπει να ισχύει ότι το άθροισμα της ροής για την ράμπα 1 και για την ράμπα 2 είναι ίσο με τη ροή που αποφάσισε η ALINEA.

$$q_{AL}(k) = q_1(k) + q_2(k) \quad (4.5)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.3), (4.4) και (4.5) και λύνοντας ως προς q_1 και q_2 προκύπτει ότι :

$$q_1(k) = \frac{a_1 - b \cdot a_2 + b \cdot q_{AL}(k)}{1+b} \quad (4.6)$$

$$q_2(k) = \frac{q_{AL}(k) - a_1 + b \cdot a_2}{1+b} \quad (4.7)$$

όπου, $a_1 = \frac{\hat{N}_1(k)}{T} + q_{1,in}^{sm}$, $a_2 = \frac{\hat{N}_2(k)}{T} + q_{2,in}^{sm}$ και $b = \frac{N_{1,\max}}{N_{2,\max}}$. Στη συνέχεια οι τιμές της

ροής $q_1(k)$ και $q_2(k)$ που προκύπτουν από τις εξισώσεις (4.6) και (4.7) πριν εφαρμοστούν εξομαλύνονται εκθετικά με $e = 0.5$ και ελέγχονται εάν είναι μικρότερες από το κατώτατο όριο $q_{AL,\min}$ (Πίνακας 2). Έτσι, εάν για παράδειγμα η ροή $q_1(k)$ είναι μικρότερη από $q_{AL,\min}$ τότε γίνεται ίση με την τιμή αυτή και η ροή $q_2(k)$ γίνεται ίση με τη διαφορά $q_{AL}(k) - q_1(k)$. Όμοια και εάν η ροή $q_2(k)$ είναι μικρότερη από $q_{AL,\min}$.

4.5. Εξισορρόπηση του χρόνου αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες εισόδου

Ένας απλοποιημένος τρόπος εύρεσης του χρόνου αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες είναι ο υπολογισμός του λόγου της ουράς των οχημάτων στο επόμενο βήμα προς τη ροή εισόδου. Θα πρέπει, δηλαδή, να ισχύει ότι:

$$\frac{\hat{N}_1(k) + q_{1,in}^{sm}(k) \cdot T - q_1(k) \cdot T}{q_{1,in}^{sm}(k)} = \frac{\hat{N}_2(k) + q_{2,in}^{sm}(k) \cdot T - q_2(k) \cdot T}{q_{2,in}^{sm}(k)} \quad (4.8)$$

με q_{in1}^{sm} και q_{in2}^{sm} οι τιμές της εκθετικής εξομάλυνσης της ροής εισόδου που δίνονται από την εξίσωση (4.4) και εφόσον $q_{AL}(k) = q_1(k) + q_2(k)$ προκύπτει ότι :

$$q_1(k) = \frac{a_1 \cdot q_{1,in}^{sm} - a_2 \cdot q_{2,in}^{sm} + q_{AL}(k) \cdot q_{1,in}^{sm}}{q_{1,in}^{sm} + q_{2,in}^{sm}} \quad (4.9)$$

$$q_2(k) = \frac{a_2 \cdot q_{1,in}^{sm} - a_1 \cdot q_{2,in}^{sm} + q_{AL}(k) \cdot q_{2,in}^{sm}}{q_{1,in}^{sm} + q_{2,in}^{sm}} \quad (4.10)$$

όπου τα a_1 και a_2 δίδονται στην παράγραφο 4.4.

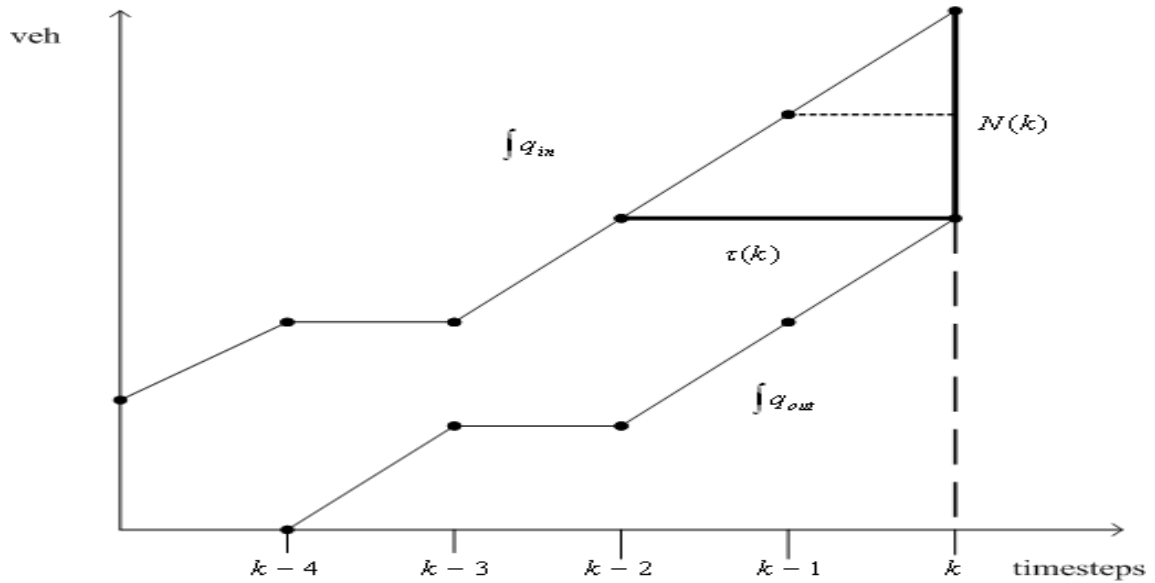
Ο παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα της εκθετικής εξομάλυνσης είναι ο e , όσο πιο μικρή είναι η τιμή του τόσο πιο ισχυρή είναι και η εξομάλυνση. Έτσι για μικρές τιμές του e συλλέγονται περισσότερες τιμές από το παρελθόν του q_{in1}^{sm} και του q_{in2}^{sm} . Για τη συγκεκριμένη περίπτωση της εξισορρόπησης του χρόνου αναμονής θα εξεταστούν δυο περιπτώσεις, για e ίσο με 0.2 και ίσο με 0.05.

Η τρίτη περίπτωση που θα ερευνηθεί βασίζεται στο Σχήμα 5. Έστω k χρονικά βήματα για τα οποία συλλέγονται οι τιμές του q_{in} και του q_{out} με τη μορφή συσσώρευσης. Εάν τη συγκεκριμένη στιγμή k είναι γνωστή η τιμή της συσσώρευσης q_{out} τότε θα υπάρχει κάποια στιγμή στο παρελθόν που η τιμή της συσσώρευσης q_{in} είναι ίση με αυτήν. Αν $\tau(k)$ τα χρονικά βήματα αναμονής τότε θα πρέπει να ισχύει:

$$N(k) - T \cdot \sum_{\kappa=k-\tau(k)}^{k-1} q_{in}^m(\kappa) \leq 0 \quad (4.11)$$

Επομένως, για διάφορες τιμές του $\tau(k) = 1, 2, 3, \dots$ θα πρέπει να υπολογιστεί το άθροισμα που υπάρχει στο αριστερό μέρος της σχέσης (4.11) έως ότου ικανοποιηθεί

η σχέση (4.11). Τότε εντοπίζεται το χρονικό βήμα που μπήκε το όχημα στη ράμπα και κατ' επέκταση ο χρόνος που περίμενε μέχρι να εξέρθει από αυτήν.



Σχήμα 5: Διάγραμμα εύρεσης του χρονικού βήματος που μπήκε το όχημα στη ράμπα

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής τύπου P, έτσι ώστε τιμή της διαφοράς της εξίσωσης (4.12) να πάρει την τιμή μηδέν, δηλαδή, οι χρόνοι αναμονής των οχημάτων να είναι ίσοι.

$$\Delta \tau(k) = (\tau_1(k) - \tau_2(k)) \cdot T \quad (4.12)$$

Έχοντας ορίσει ως σημείο αναφοράς για τη ροή το $q_{AL}/2$, τότε:

$$q_1(k) = \frac{q_{AL}(k)}{2} + K_p \cdot \Delta \tau(k) \quad (4.13)$$

$$q_2(k) = q_{AL}(k) - q_1(k) \quad (4.14)$$

όπου K_p η σταθερά του ελεγκτή.

Όπως και στη περίπτωση του σεναρίου 2 πραγματοποιούνται περαιτέρω έλεγχοι για το κατά πόσο οι ροές $q_1(k)$ και $q_2(k)$ είναι μικρότερες από το κατώτατο όριο $q_{AL,min}$ (Πίνακας 2). Έτσι, εάν για παράδειγμα η ροή $q_1(k)$ είναι μικρότερη από $q_{AL,min}$ τότε γίνεται ίση με την τιμή αυτή και η ροή $q_2(k)$ γίνεται ίση με τη διαφορά $q_{AL}(k) - q_1(k)$. Όμοια και εάν η ροή $q_2(k)$ είναι μικρότερη από $q_{AL,min}$.

4.6. Έλεγχος αποφυγής μεγάλων ουρών

Για την αποφυγή μεγάλων ουρών στις δυο ράμπες θα εφαρμοστούν δυο έλεγχοι Queue Override και Queue Control. Στόχος και των δυο είναι να μην ξεπεράσουν οι ουρές το όριο του φωρατή. Έτσι στην περίπτωση που λόγω των στρατηγικών της ALINEA και της εξισορρόπησης των ουρών δοθεί ροή που να ξεπερνά το συγκεκριμένο φωρατή, τότε επεμβαίνουν οι δυο παραπάνω έλεγχοι, ενεργοποιούν τους φωτεινούς σηματοδότες και αφήνουν τα οχήματα να περάσουν.

4.6.1. Queue Control

Στην περίπτωση του Queue Control ο έλεγχος πραγματοποιείται με την παρακάτω εξίσωση:

$$q_i^{QC}(k) = -\frac{1}{T}[N_{i,\max} - \hat{N}_i(k)] + f \cdot q_{i,jn}^{sm}(k-1) \quad (4.15)$$

για $i = 1, 2$

οπού, $q_i^{QC}(k)$ είναι η εξερχόμενη ροή για το επόμενο βήμα ελέγχου, $N_{i,\max}$ ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορεί να έχει η ουρά σε κάθε ράμπα, $\hat{N}_i(k)$ είναι η τελευταία εκτιμώμενη τιμή του αριθμού των οχημάτων στην ουρά, $q_{i,jn}^{sm}(k-1)$ είναι η τιμή της ροής στην είσοδο της ράμπας, η οποία έχει εξομαλυνθεί εκθετικά και βασίζεται σε προηγούμενες μετρήσεις της ροής (4.15) και τέλος $f \geq 1$ είναι ένας παράγοντας που χρησιμοποιείται ώστε να διατηρεί την πρόβλεψη της τιμής της ζήτησης που θα έρθει στο επόμενο βήμα. Στη συνέχεια οι τιμές $q_i^{QC}(k)$ για κάθε ράμπα υπόκεινται σε περαιτέρω περιορισμό σύμφωνα με ένα νέο άνω φράγμα $q_{i,\max}^{QC}(k)$ (Πίνακας 3) και κάτω ίσο με μηδέν, από όπου επιλέγεται και η τελική τιμή της ροής $q_i^{QC}(k)$ για κάθε ράμπα.

Πίνακας 3: Τιμές παραμέτρων για το Queue Control

$N_{1,max}$	Μέγιστη τιμή οχημάτων στην ουρά για τη ράμπα 1	30 veh
$N_{2,max}$	Μέγιστη τιμή οχημάτων στην ουρά για τη ράμπα 1	30 veh
f	Παράγοντας για τον έλεγχο Queue Control	1.2
$q_{1,max}^{QC}$	Μέγιστη τιμή ροής για τη ράμπα 1	900 (veh/h)
$q_{2,max}^{QC}$	Μέγιστη τιμή ροής για τη ράμπα 1	900 (veh/h)

4.6.2. Queue Override

Ο επόμενος έλεγχος του μήκους της ουράς γίνεται με την εφαρμογή Queue Override. Σύμφωνα με τον οποίο γίνονται μετρήσεις του ποσοστού κατάληψης στην είσοδο κάθε ράμπας αλλά και πιθανώς σε μερικά σημεία του κατάντη δικτύου. Εφόσον η τιμή αυτή υπερβαίνει ενός ορίου o_{thres} (Πίνακας 4) τότε ο Queue Override μειώνει τη ροή εξόδου μέχρι ένα προκαθορισμένο αριθμό ροής σύμφωνα με την εξίσωση (4.16), διαφορετικά η τιμή της ροής γίνεται ίση με την ελάχιστη τιμή της.

$$q_i^{OO}(k) = \begin{cases} q_{ovd,i} & \text{εάν } o > o_{thres} \\ q_{min} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.16)$$

Πίνακας 4: Τιμές παραμέτρων για Queue Override

o_{thres}	Κατώφλι ποσοστού κατάληψης	50%
q_{min}	Ελάχιστη τιμή ροής	400 (veh/h)

4.7. Τελική ροή

Αφού πραγματοποιηθούν όλοι οι παραπάνω έλεγχοι τότε επιλέγεται η τελική τιμή της ροής για κάθε ράμπα $q_{1,Final}$ και $q_{2,Final}$. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ των τιμών της που προκύπτουν από τους ελέγχους, ALINEA, εξισορρόπηση των ουρών ή εξισορρόπηση του χρόνου αναμονής, με εκείνες που προκύπτουν από Queue Control και Queue Override. Η τελική τιμή θα είναι η μέγιστη μεταξύ αυτών.

Αφού επιλεγεί η τελική τιμή της ροής πραγματοποιείται ένας ακόμα έλεγχος, σύμφωνα με τον οποίο εάν η τιμή αυτή $q_{1,Final}$ είναι μεγαλύτερη του q_1 και $q_{2,Final}$ είναι μικρότερο ή ίσο από q_2 αλλά και $q_{AL} - q_{1,Final}$ είναι μεγαλύτερο από q_{min} τότε $q_{2,Final} = q_{AL} - q_{1,Final}$, διαφορετικά $q_{2,Final} = q_{min}$. Όμοια γίνεται και ο έλεγχος για $q_{1,Final}$. Σκοπός του ελέγχου αυτού είναι όταν ενεργοποιούνται τα Queue Control και Queue Override, με αποτέλεσμα να απενεργοποιούνται οι υπόλοιποι έλεγχοι, να γίνεται προσπάθεια ώστε οι ροές στις δυο ράμπες να αθροίζουν στη ροή που δίνει η ALINEA.

4.8. Υπολογισμός νέου κύκλου των φωτεινών σηματοδοτών

Κάθε ράμπα του δικτύου έχει ένα φωτεινό σηματοδότη, ο οποίος εφαρμόζει κάθε περίοδο $T = 15 \text{ sec}$ ένα νέο κύκλο c_i . Ο κύκλος αυτός δεν είναι παρά το άθροισμα μιας τιμής του πράσινου G και του κόκκινου R . Γενικότερα υπάρχουν πολλές στρατηγικές υπολογισμού του κύκλου (Papageorgiou and Papamichail, 2008). Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα εφαρμοστεί η στρατηγική δυο αυτοκίνητα για κάθε πράσινο. Έτσι κάθε τιμή της ροής που θα υπολογίζεται από τις προηγούμενες στρατηγικές ελέγχου, θα μεταφράζεται σε ένα νέο κύκλο σύμφωνα με:

$$c_i(k) = \frac{2 \cdot 3600 \cdot \lambda_{r,i}}{q_{i,Final}(k)} \quad (4.17)$$

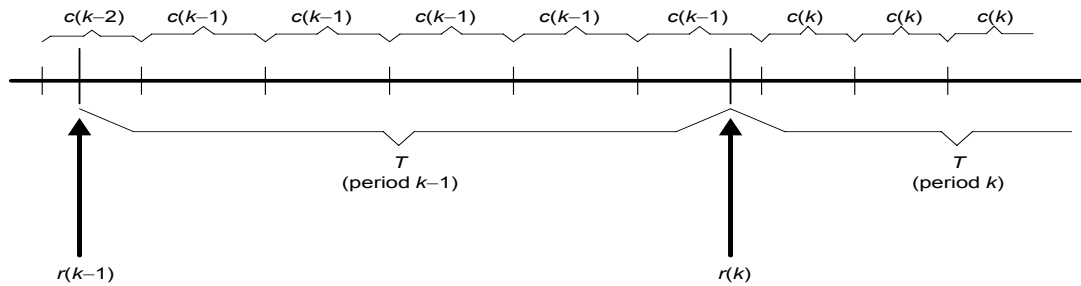
Όπου $\lambda_{r,i}$ ο αριθμός των λωρίδων της ράμπας (Πίνακας 5) και $q_{i,Final}(k)$ η τιμή της ροής.

Πίνακας 5: Τιμές παραμέτρων για την εφαρμογή του κύκλου

G	Διάρκεια πράσινου	4 sec
R	Ελάχιστος χρόνος που διαρκεί το κόκκινο	2 sec
$\lambda_{r,i}$	Αριθμός λωρίδων στις ράμπες	1

Πριν την τελική εφαρμογή του νέου κύκλου γίνεται στρογγυλοποίηση στο προηγούμενο ακέραιο πολλαπλάσιο του χρονικού βήματος του προσομοιωτή $T_{simulation} = 0.75 \text{ sec}$. Αρκετές φορές όταν ο νέος κύκλος δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του T , δημιουργείται το πρόβλημα του συγχρονισμού (Papageorgiou

and Paramichail, 2008), δηλαδή εφαρμογής του νέου κύκλου πριν ακόμα τελειώσει ο προηγούμενος, γεγονός που μπορεί να μην οδηγήσει στα επιθυμητά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό στη συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται χρήση ασύγχρονης λειτουργίας, εφαρμογή, δηλαδή, του νέου κύκλου όταν τελειώσει ο προηγούμενος.



Σχήμα 6: Ο κύκλος c για χρονική περίοδο T

4.9. Υπολογισμός του Total Time Spent

Το βασικό κριτήριο που θα εξεταστεί με την εφαρμογή όλων των παραπάνω ελέγχων είναι αυτό του Total Time Spent (TTS), δηλαδή του συνολικού χρόνου που παρέμειναν τα οχήματα στο δίκτυο. Ο υπολογισμός του στηρίζεται στο συνολικό αριθμό των οχημάτων του δικτύου, ο οποίος ισούται με το άθροισμα των οχημάτων που μπήκαν στο δίκτυο τόσο από τις δυο ράμπες όσο και στον κεντρικό αυτοκινητόδρομο μείον τον αριθμό των οχημάτων που βγήκαν από αυτό. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με τη βοήθεια φωρατών που είναι τοποθετημένοι στις εισόδους και στην έξοδο του δικτύου. Αφού υπολογισθεί ο συνολικός αριθμός των οχημάτων τότε αυτός πολλαπλασιάζεται με το χρονικό βήμα του προσομοιωτή και έτσι προκύπτει το TTS σε (vehicles · hours), σε οχηματοώρες.

$$TTS = \sum N_{Total}(k) \cdot T_{simulation} \quad (4.18)$$

Όπου $N_{Total}(k)$ ο συνολικός αριθμός των οχημάτων που υπάρχουν στο δίκτυο για κάθε βήμα της προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 5

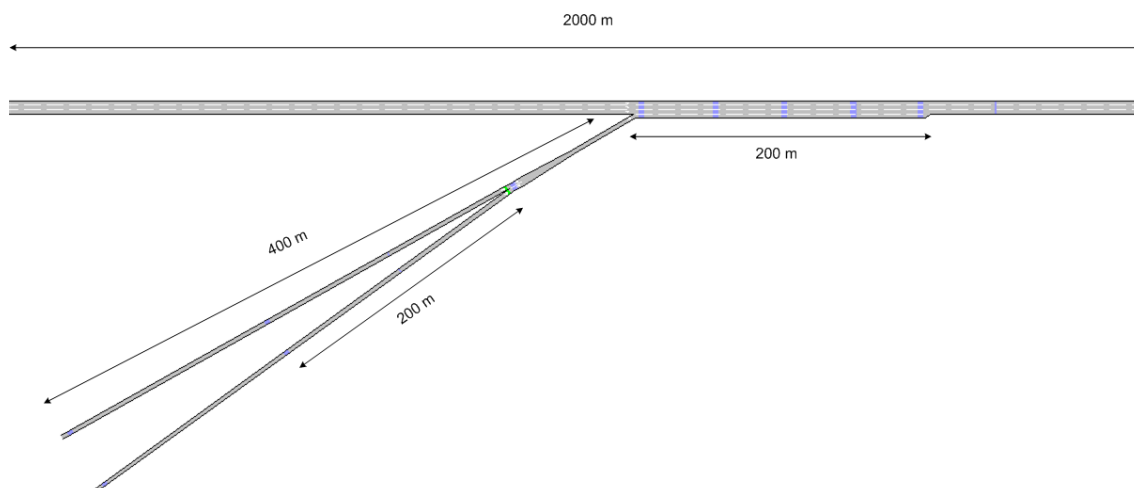
Εφαρμογή

5.1. Περιγραφή του προβλήματος

Το οδικό δίκτυο που θα εξεταστεί αποτελείται από τον κεντρικό αυτοκινητόδρομο, ο οποίος έχει τρεις λωρίδες κυκλοφορίας, τη λωρίδα επιτάχυνσης και τη ράμπα εισόδου. Η ιδιαιτερότητα του δικτύου έγκειται στη γεωμετρία της ράμπας εισόδου, η οποία διαθέτει δυο ανεξάρτητες λωρίδες που συγχωνεύονται σε ένα κόμβο 50 μέτρα πριν τον αυτοκινητόδρομο. Τα οχήματα που εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο μέσω της ράμπας, σε περιπτώσεις που η κυκλοφοριακή ζήτηση είναι αυξημένη, συσσωρεύονται στη λωρίδα επιτάχυνσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία κυκλοφοριακής συμφόρησης.

5.2. Εφαρμογή του προβλήματος στον προσομοιωτή AIMSUN

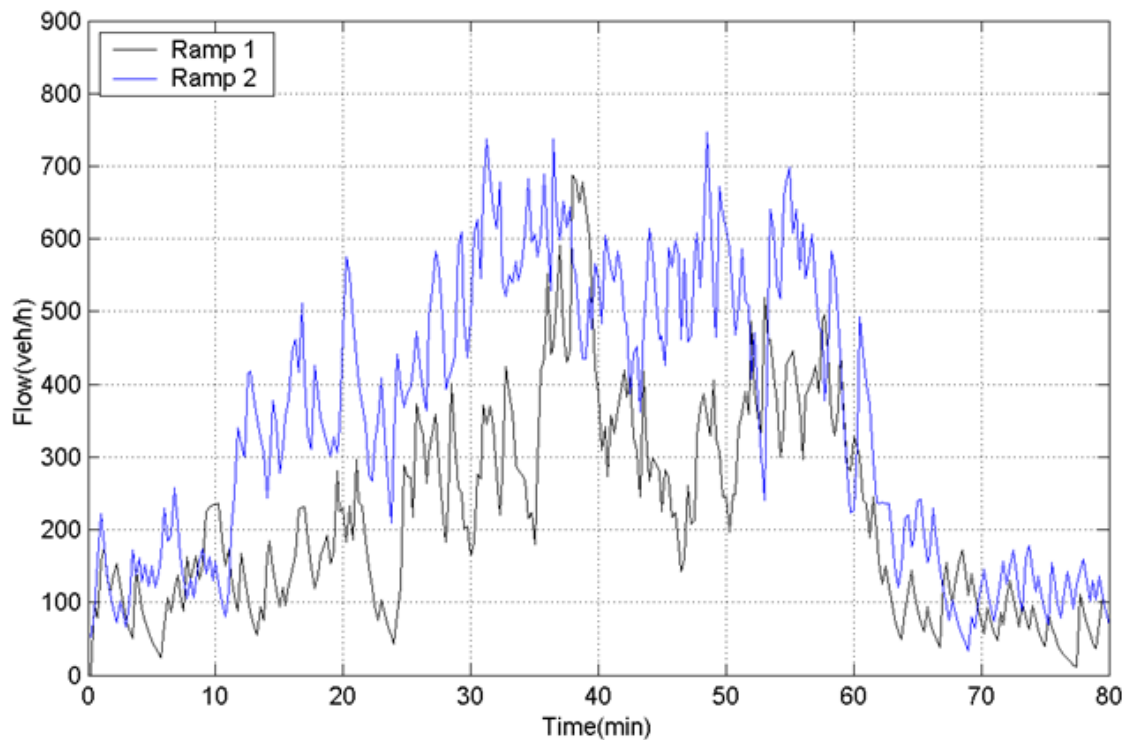
Το μοντέλο του προσομοιωτή που θα χρησιμοποιηθεί στη παρούσα έρευνα είναι AIMSUN NG 5.1.9. Για την μοντελοποίηση του προβλήματος θα χρειαστεί αρχικά να σχεδιαστεί λεπτομερώς η μορφή του δικτύου, να δοθούν οι κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους του σεναρίου όπως και η μορφή του AIMSUN API, δηλαδή το είδος του κυκλοφοριακού ελέγχου που θα εφαρμοστεί. Πιο συγκεκριμένα ο κεντρικός αυτοκινητόδρομος είναι 2000 μέτρα, η λωρίδα επιτάχυνσης 200 μέτρα και οι δυο λωρίδες της ράμπας εισόδου είναι 400 μέτρα (Σχήμα 7), θεωρώντας ότι μπορεί να δημιουργηθούν ουρές στα 200 μέτρα κάθε ράμπας. Για την συλλογή πληροφοριών και στατιστικών στοιχείων έχουν τοποθετηθεί φωρατές σε αρκετά σημεία του δικτύου.



Σχήμα 7: Γενική μορφή του δικτύου στον προσομοιωτή AIMSUN

5.2.1. Παράμετροι σεναρίου

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των παραμέτρων του σεναρίου, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η προσομοίωση. Το βασικότερο κομμάτι του σεναρίου αφορά την ζήτηση, τη ροή δηλαδή των αυτοκινήτων που θα εισέρχονται στο δίκτυο. Η ζήτηση επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται σταδιακά συμφόρηση, η οποία να διατηρείται για ένα χρονικό διάστημα και στα τελευταία λεπτά να καταφέρνει αδειάζει το δίκτυο (Σχήμα 8). Ο χρόνος που θα διαρκεί κάθε προσομοίωση ορίζεται στα 80 λεπτά. Στα πρώτα 20 υπάρχει σταδιακή αύξηση της ροής, στα επόμενα 30 η μέγιστη τιμή της και στα τελευταία 30 γίνεται αποσυμφόρηση του δικτύου. Αρχικά ορίζεται ο αριθμός των καταστάσεων (states) της ζήτησης, κάθε κατάσταση έχει συγκεκριμένο χρόνο διάρκειας και συγκεκριμένη ροή. Επιλέγεται επίσης ο τύπος των οχημάτων που θα εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο, στη συγκεκριμένη έρευνα εξετάζεται η περίπτωση μόνο αυτοκινήτων. Στη συνέχεια επιλέγεται ο αριθμός των επαναλήψεων που θα προσομοιωθούν, έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολα και πιο αξιόπιστα η εξαγωγή συμπερασμάτων. Συνολικά θα πραγματοποιηθούν 10 επαναλήψεις, κάθε μια εκ των οποίων έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Μέσω των διαφορετικών επαναλήψεων και εξαιτίας του διαφορετικού «σπόρου» κάθε μιας, αλλάζει και η τυχαιότητα με την οποία εισέρχονται τα αυτοκίνητα τόσο στις δυο ράμπες εισόδου όσο και στον κεντρικό αυτοκινητόδρομο αλλά επίσης περιορίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο η στοχαστικότητα των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 8: Ροή εισόδου των οχημάτων στις δυο ράμπες

5.2.2. Τοποθέτηση φωρατών

Κατά μήκος του δικτύου, όπως προαναφέρθηκε, θα τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία φωρατές. Οι φωρατές θα βοηθήσουν στη συλλογή πληροφοριών και στατιστικών στοιχείων ώστε να εντοπιστεί αρχικά το τμήμα του δικτύου με την εντονότερη συμφόρηση. Γενικότερα οι φωρατές συλλέγουν δεδομένα τα οποία στη συνέχεια επεξεργάζονται κατάλληλα.

Πιο αναλυτικά κατά μήκος του κεντρικού αυτοκινητόδρομου υπάρχουν 7 φωρατές, ένας στην είσοδο του αυτοκινητόδρομου, ένας στην έξοδο του και οι υπόλοιποι στο τμήμα της λωρίδας επιτάχυνσης. Στις δυο ράμπες εισόδου υπάρχουν συνολικά 8, 4 φωρατές στην κάθε μια, ένας στην είσοδο τους, ένας στην ένωση τους και 2 σε απόσταση 200 και 100 μέτρων από την ένωση τους. Τέλος, έχει τοποθετηθεί ακόμα ένας στην κοινή λωρίδα εισόδου στον αυτοκινητόδρομο.

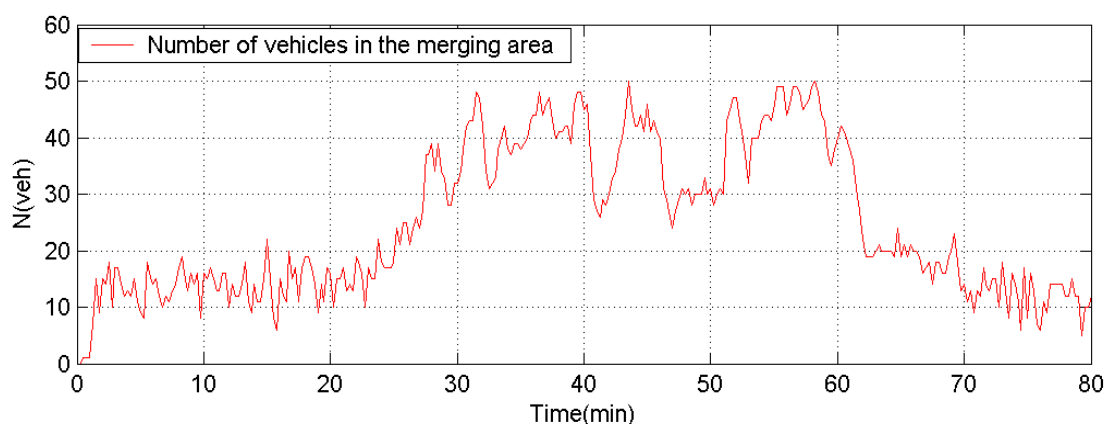
5.3. Δεδομένα εισόδου

Το AIMSUN API για να εφαρμόσει τους κυκλοφοριακούς ελέγχους χρειάζεται δυο τύπους δεδομένων. Εκείνα που λαμβάνει ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από τον προσομοιωτή, με την βοήθεια των φωρατών αλλά και εκείνα που εισάγονται από

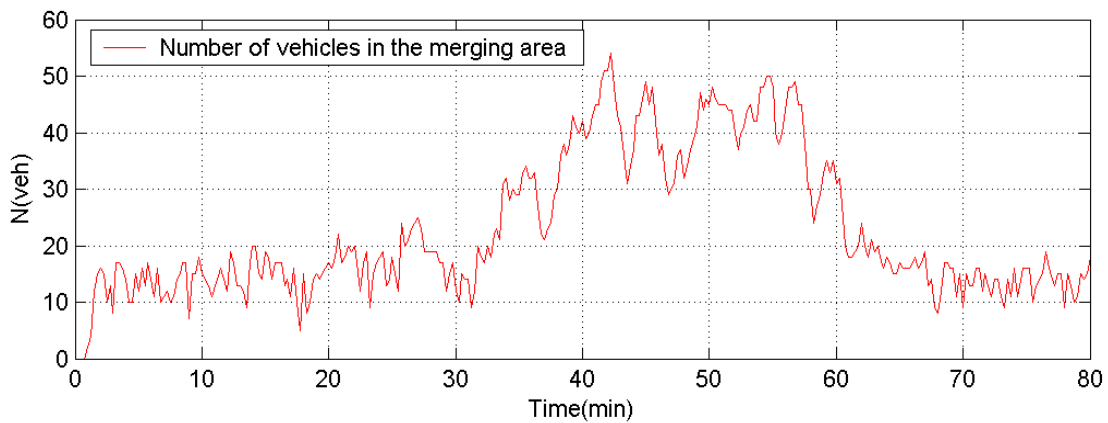
τον χρήστη. Οι τιμές των δεδομένων αυτών είναι κάποιες σταθερές, όπως και οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές κάποιων μεταβλητών, που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από την ALINEA και από τους υπόλοιπους αλγορίθμους.

5.4. Σενάριο 1: Προσομοίωση χωρίς έλεγχο

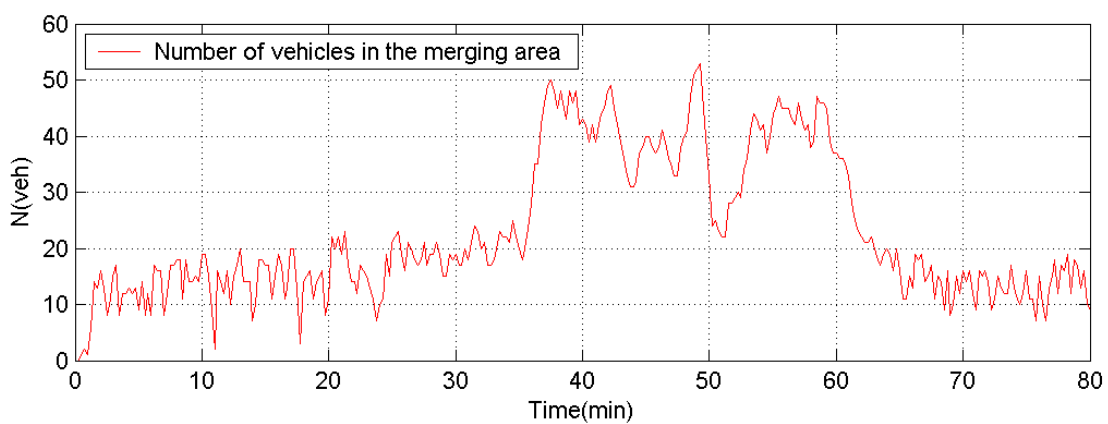
Τα αρχικά στάδια της έρευνας αφορούν τον εντοπισμό του προβλήματος και πιο συγκεκριμένα τον εντοπισμό της συμφόρησης. Υπάρχουν πολλά δίκτυα όπου το πρόβλημα της συμφόρησης δεν είναι εύκολα ευδιάκριτο, παρόλα αυτά μπορεί να εντοπιστεί με άλλους τρόπους όπως είναι η μέτρηση του αριθμού των οχημάτων για το χρονικό διάστημα που γίνεται η προσομοίωση. Έτσι εάν εφαρμοστούν σταδιακά και οι 10 επαναλήψεις χωρίς κανένα έλεγχο στο δίκτυο και επιλέγοντας τυχαία μερικές από τις επαναλήψεις αυτές παρατηρείται ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης που εξετάζεται, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 9, 10, 11. Για ένα χρονικό διάστημα περίπου 40 λεπτών, για την επανάληψη 9 (Σχήμα 9), ο αριθμός των οχημάτων αυξάνεται διαρκώς σε τιμές κοντά στα 50 οχήματα, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει έντονο πρόβλημα κυκλοφορίας στην περιοχή ελέγχου. Το ίδιο συμβαίνει και στις άλλες δυο επαναλήψεις 1 (Σχήμα 10) και 10 (Σχήμα 11), λίγο πιο έντονα αφού στις δυο αυτές περιπτώσεις ο αριθμός των οχημάτων φτάνει ακόμα και τα 50 οχήματα.



Σχήμα 9: Αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης (Επανάληψη 9)

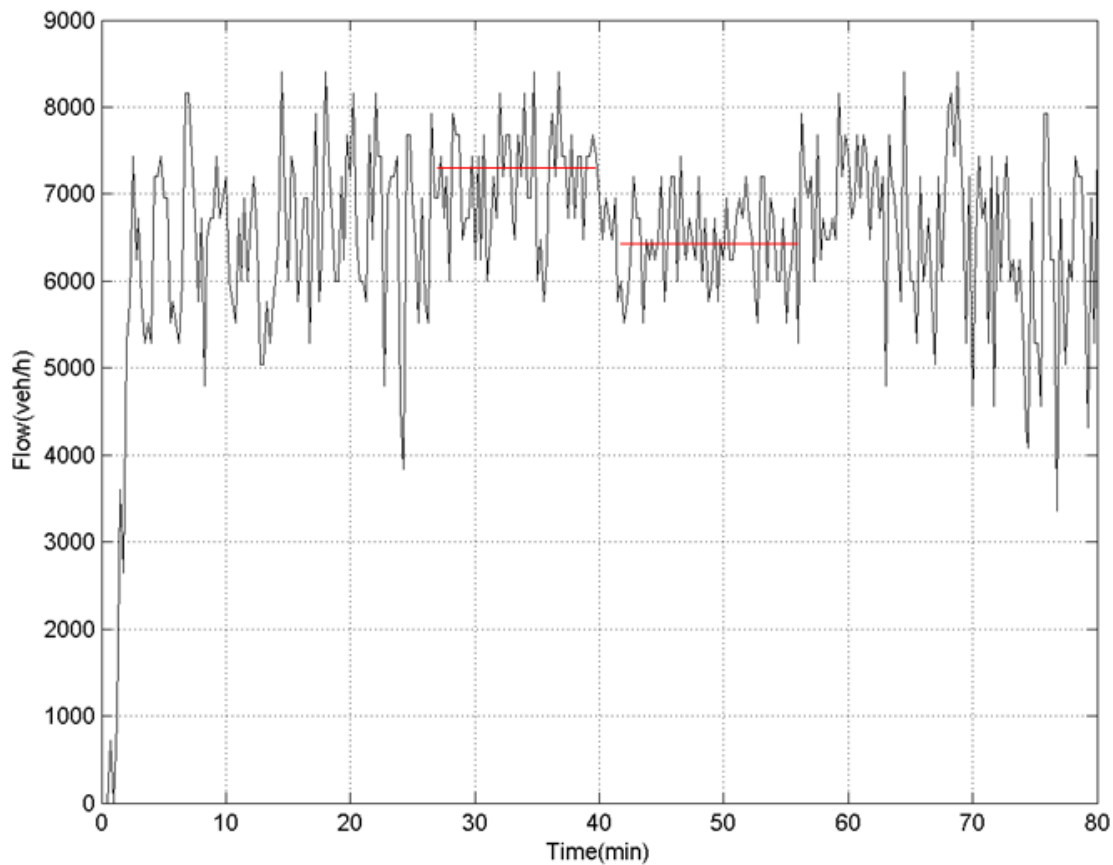


Σχήμα 10: Αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης (Επανάληψη 1)



Σχήμα 11: Αριθμός οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης (Επανάληψη 10)

Το πρόβλημα της συμφόρησης στο δίκτυο γίνεται επίσης αντιληπτό από το Σχήμα 12, όπου παρουσιάζεται η ροή στην είσοδο της περιοχής συγχώνευσης του δικτύου σε σχέση με τον χρόνο. Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα το φαινόμενο της απότομης πτώσης της ικανότητας, που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Για το χρονικό διάστημα 38 έως 55 λεπτό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12, η ικανότητα του δικτύου από περίπου 7200 veh/h οχήματα ανά ώρα πέφτει σε 6400 veh/h, γεγονός που τονίζει τη δημιουργία κυκλοφοριακού προβλήματος στο δίκτυο. Το δίκτυο δεν μπορεί να δεχτεί επιπλέον οχήματα λόγω της συμφόρησης που προκλήθηκε γι' αυτό και παραμένει σε χαμηλές τιμές η ικανότητα, ενώ προς το τέλος της προσομοίωσης επανέρχεται σε μεγαλύτερες τιμές.



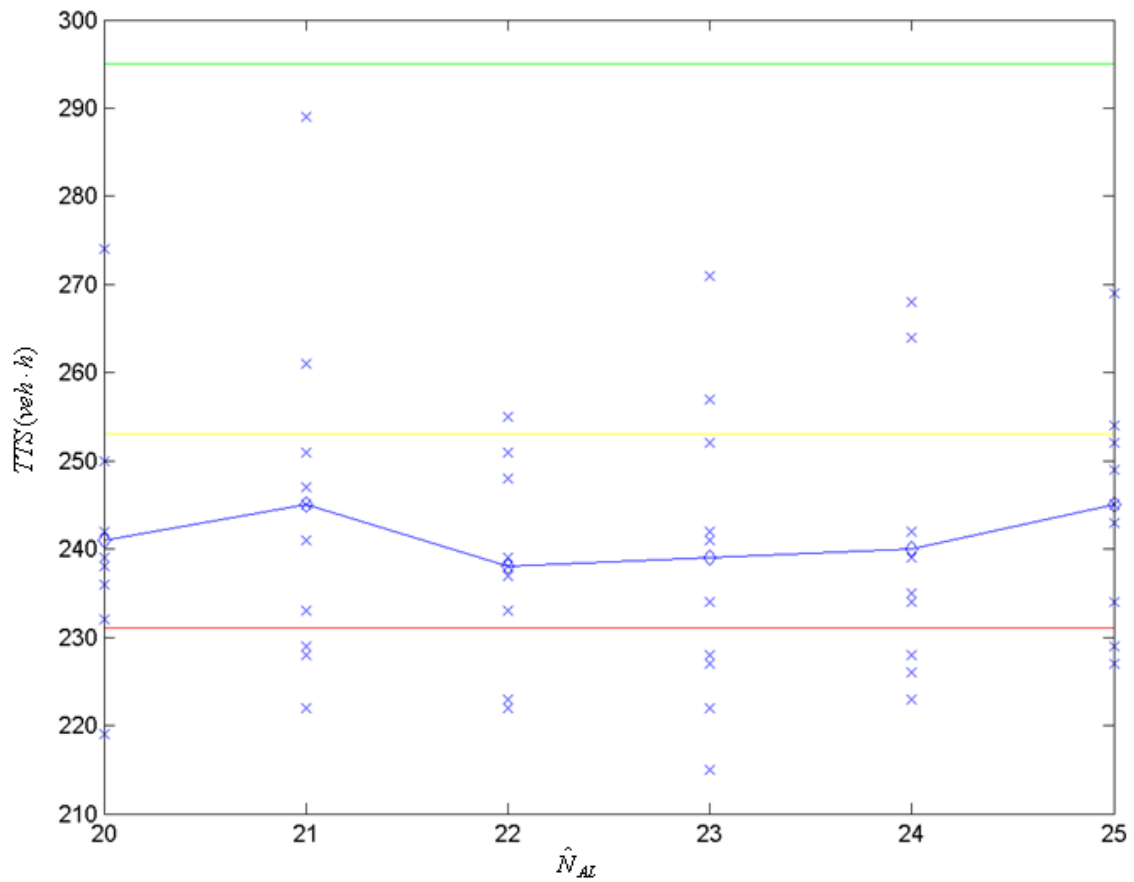
Σχήμα 12: Ροή στην έξοδο της περιοχής συγχώνευσης του δικτύου χωρίς έλεγχο (επανάληψη 3)

5.5. Σενάριο 2: Προσομοίωση με έλεγχο ALINEA

Στο δεύτερο σενάριο γίνεται εφαρμογή του κυκλοφοριακού ελέγχου ALINEA, με χρήση της μεταβλητής του αριθμού των οχημάτων N_{AL} , όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για την εύρεση της τιμής \hat{N}_{AL} θα γίνουν αρχικά κάποιες δοκιμές για τυχαίες τιμές του \hat{N}_{AL} , και θα συλλεχθούν οι τιμές του TTS τόσο για το σενάριο χωρίς έλεγχο όσο και για το σενάριο της ALINEA χωρίς έλεγχο ουρών. Θα υπολογιστεί ο μέσος όρος των τιμών αυτών αλλά και η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του TTS στο σενάριο χωρίς έλεγχο και με τη βοήθεια κατάλληλου γραφήματος θα επιλεγεί η τιμή του \hat{N}_{AL} που θα χρησιμοποιείται στην εφαρμογή των κυκλοφοριακών ελέγχων.

Στο Σχήμα 13 τα σημεία -x- δηλώνουν τις τιμές του TTS για διάφορες τιμές του \hat{N}_{AL} από 20 έως 25. Η πράσινη γραμμή είναι η μέγιστη τιμή του TTS στις τιμές χωρίς έλεγχο και η κόκκινη η ελάχιστη τιμή του. Η κίτρινη γραμμή είναι ο μέσος όρος των τιμών του TTS χωρίς έλεγχο και η μπλε γραμμή είναι ο μέσος όρος όλων των TTS

για την περίπτωση της ALINEA. Το \hat{N}_{AL} που επιλέγεται είναι εκείνο που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της μπλε γραμμής, δηλαδή 22.



Σχήμα 13: Διάγραμμα εύρεσης του \hat{N}_{AL}

Αφού γίνει η επιλογή του \hat{N}_{AL} μπορεί να εφαρμοστεί ο έλεγχος της ALINEA με έλεγχο ουρών και για τις 10 επαναλήψεις του προσομοιωτή και να υπολογιστεί σαν πρώτο βήμα το TTS των οχημάτων και να συγκριθεί με αυτόν του σεναρίου χωρίς έλεγχο.

Πίνακας 6: Τιμές του TTS των οχημάτων χωρίς έλεγχο και με ALINEA

Επαναλήψεις	Σενάριο 1 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά
1	257	236	-8%
2	252	260	3%
3	240	222	-8%
4	247	256	4%
5	256	228	-11%
6	231	223	-4%
7	239	235	-2%
8	267	238	-11%
9	295	252	-15%
10	251	243	-3%
<i>Μέσος Όρος</i>	<i>254</i>	<i>239</i>	<i>-6%</i>

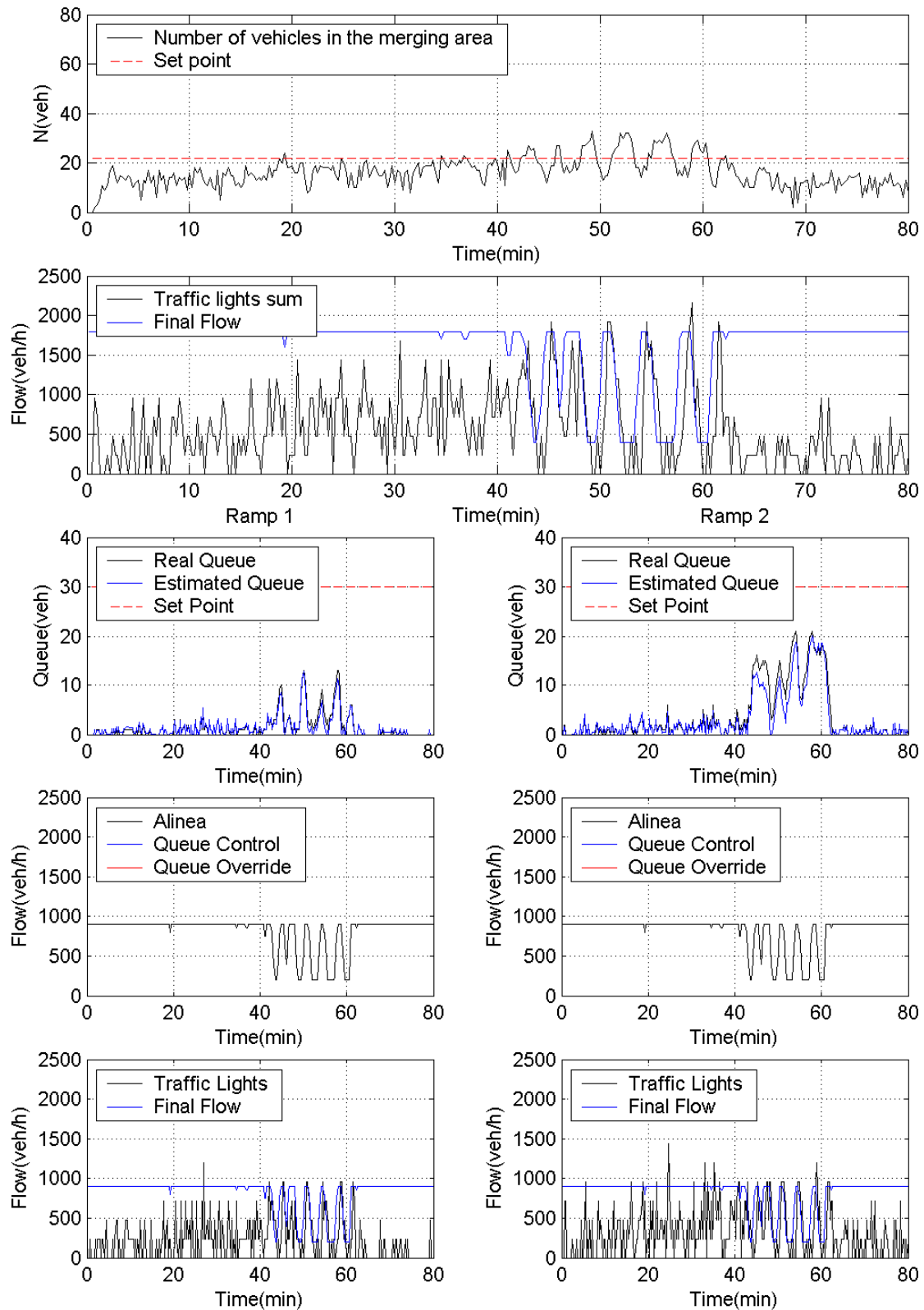
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6 με την εφαρμογή του ελέγχου της ALINEA παρατηρείται σημαντική μείωση του χρόνου ταξιδιού των οχημάτων. Από 254 (veh·h) ο μέσος όρος χωρίς έλεγχο μειώνεται σε 239 (veh·h) με την ALINEA, με ποσοστό μείωσης 6%. Γίνεται έτσι εύκολα κατανοητό ότι η εφαρμογή ενός τέτοιου ελέγχου ήταν απαραίτητη και αποτελεσματική. Παρόλα αυτά οι διάφορες του TTS μεταξύ των δυο ελέγχων θα μπορούσαν να είναι πολύ μεγαλύτερες, γεγονός που οφείλεται στα δυο χρονικά διαστήματα της αρχής και του τέλους της προσομοίωσης. Τα διαστήματα αυτά ουσιαστικά είναι «νεκρά» διότι η ροή των οχημάτων είναι πολύ μικρή και ο οποιοσδήποτε κυκλοφοριακός έλεγχος είναι περιττός. Έτσι εάν η περίοδος της προσομοίωσης περιοριζόταν στο διάστημα που παρατηρείται η μεγαλύτερη ροή οχημάτων (από το 40^ο έως το 60^ο λεπτό) τα αποτελέσματα του TTS θα ήταν πολύ διαφορετικά, με εκείνα της ALINEA ή των άλλων ελέγχων να είναι σαφώς πολύ καλύτερα από ότι του σεναρίου χωρίς έλεγχο.

Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση ελέγχου με εφαρμογή της ALINEA για τρεις τυχαίες επαναλήψεις, την 2, την 6 και την 8. Τα σχήματα που παρουσιάζονται για κάθε επανάληψη έχουν την εξής διάταξη, στην πρώτη γραμμή παρουσιάζεται το σχήμα, το οποίο περιγράφει τον αριθμό των οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης και το σημείο αναφοράς. Στη δεύτερη γραμμή παρουσιάζεται η συνολική ροή και το άθροισμα της ροής σύμφωνα με τις μετρήσεις των φωρατών που είναι τοποθετημένοι μετά τους φωτεινούς σηματοδότες. Στην τρίτη γραμμή παρουσιάζονται για κάθε ράμπα το μήκος της πραγματικής ουράς, της εκτιμωμένης και του μέγιστου

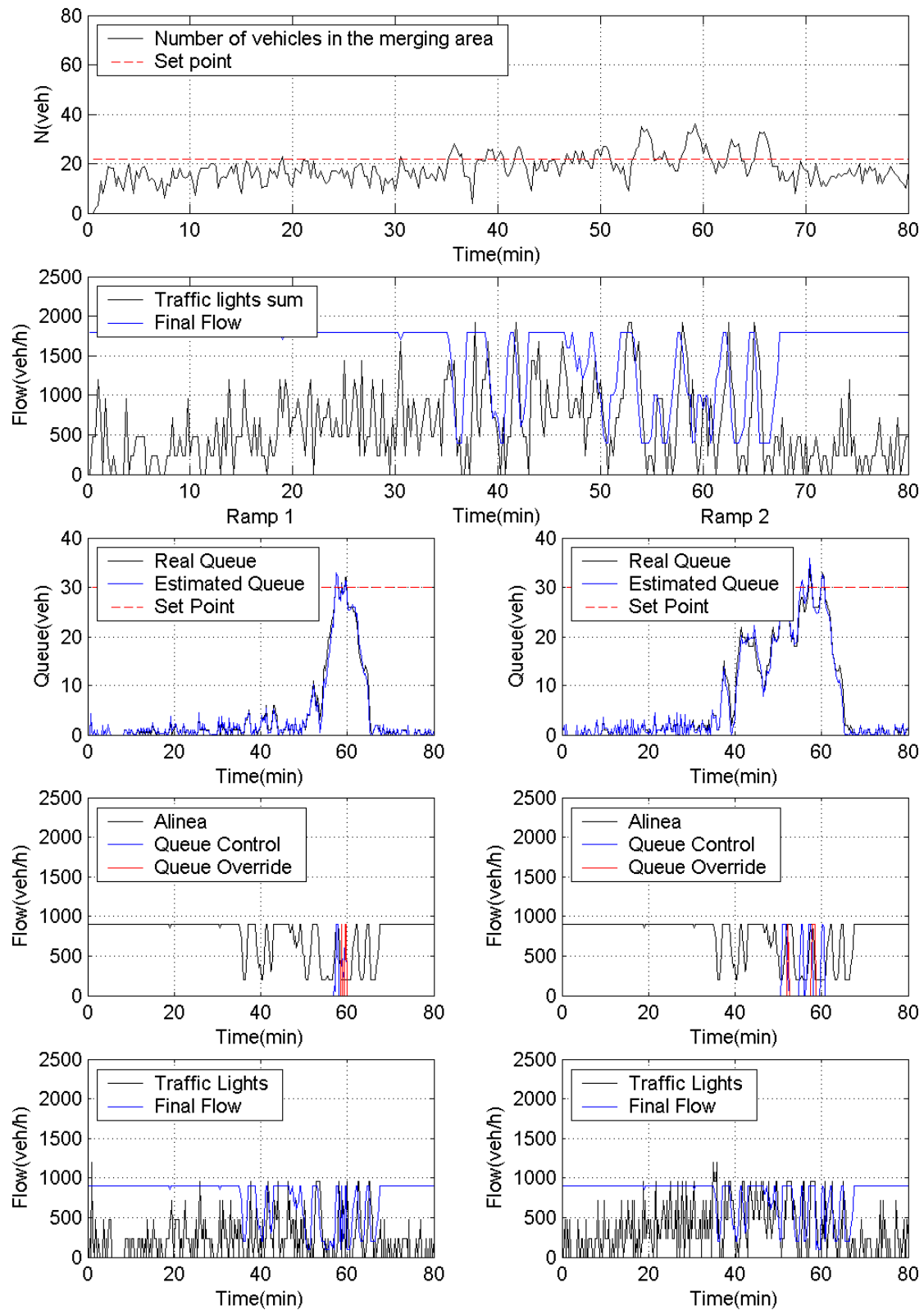
επιτρεπτού μήκους ουράς που χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για το Queue Control. Στην τέταρτη γραμμή παρουσιάζονται οι τιμές της ροής για τους ελέγχους ALINEA, Queue Control και Queue Override για κάθε ράμπα. Τέλος, στην πέμπτη γραμμή παρουσιάζονται οι τιμές της τελικής ροής και η τιμή της μετρούμενης ροής μετά τους φωτεινούς σηματοδότες, για κάθε ράμπα.

Για την επανάληψη 6, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 14, η ALINEA εφαρμόζεται από το 40^ο έως 60^ο λεπτό. Στο χρονικό διάστημα αυτό παρατηρείται μια μικρή αύξηση των οχημάτων στη ράμπα 2, η οποία ξεκινά περίπου στο 40^ο λεπτό, όπου και ξεκινά η εφαρμογή της ALINEA. Το κυκλοφοριακό πρόβλημα στην συγκεκριμένη επανάληψη είναι σχετικά μικρό και επιλύεται γρήγορα, χωρίς τη δημιουργία μεγάλης ουράς σε καμιά από τις δυο ράμπες. Ο αριθμός των οχημάτων στην περιοχή της συγχώνευσης παραμένει γύρω από το $\hat{N}_{AL} = 22 \text{ veh}$. Η καλή λειτουργία της ALINEA φαίνεται επίσης και από τον Πίνακα 6, όπου για την επανάληψη 6 υπάρχει μείωση του TTS σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο σε ποσοστό 4%.

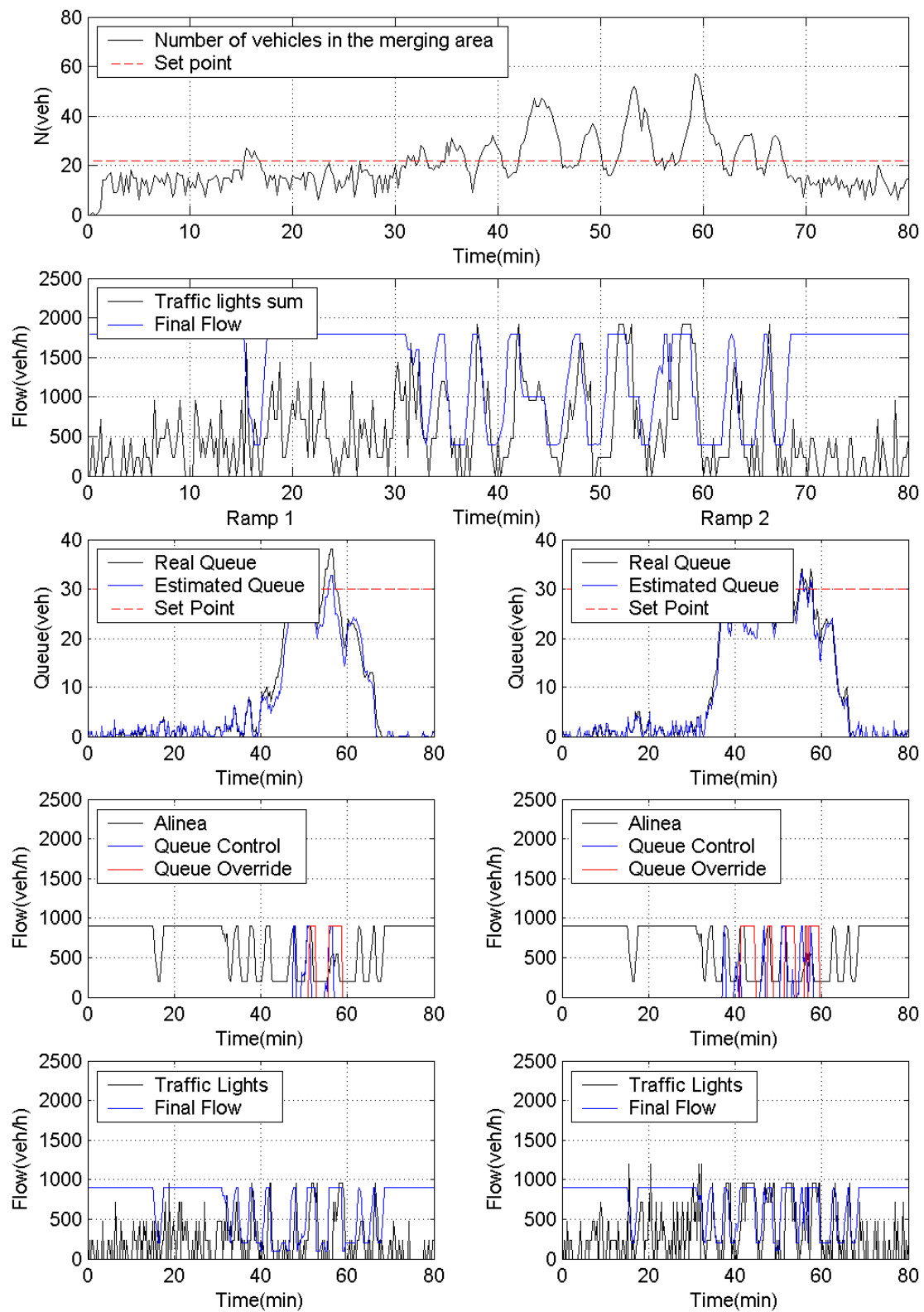
Το ίδιο περίπου συμβαίνει και για την επανάληψη 8, Σχήμα 15, όπου η ALINEA εφαρμόζεται για ένα χρονικό διάστημα 25 λεπτών περίπου. Όμως κοντά στο 60^ο λεπτό παρατηρείται μια απότομη αύξηση της ουράς των οχημάτων στις δυο ράμπες και κυρίως στην δεύτερη, γεγονός που θέτει σε εφαρμογή τους δυο ελεγκτές ουρών, Queue Control και Queue Override. Έτσι μέχρι την μείωση της ουράς σε επιτρεπτά επίπεδα (κάτω από 30 οχήματα) η ALINEA δεν λειτουργεί παρά μόνο οι δυο ελεγκτές. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ακόμα πιο έντονο στην περίπτωση της επανάληψης 2, Σχήμα 16, όπου εδώ οι ουρές δημιουργούνται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και στις δυο ράμπες. Γι' αυτό και ο έλεγχος πραγματοποιείται από τους δυο ελεγκτές ουρών, για 20 λεπτά στην ράμπα 2 και για περίπου 10 στη ράμπα 1. Πριν και μετά τις απότομες αυξήσεις των ουρών η ALINEA εφαρμόζεται κανονικά, αφήνοντας να περάσουν τους φωτεινούς σηματοδότες οχήματα κοντά στο \hat{N}_{AL} . Η δυσκολία της ALINEA στην περίπτωση της επανάληψης 2 φαίνεται επίσης και από TTS, όπου είναι χειρότερο σε σχέση με το σενάριο χωρίς έλεγχο, όμως για την επανάληψη 8 υπάρχει σχετική βελτίωση με ποσοστό 11%. Γεγονός που οφείλεται στο μεγάλο χρονικό διάστημα που εφαρμόστηκε η ALINEA, περίπου 30 λεπτά στη ράμπα 1 και 25 στη ράμπα 2.



Σχήμα 14: Εφαρμογή ελέγχου ALINEA (επανάληψη 6)



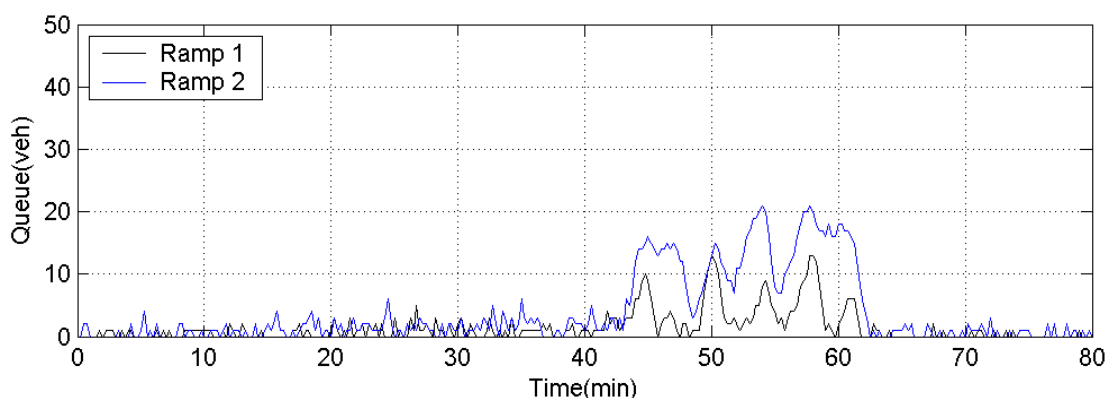
Σχήμα 15: Εφαρμογή ελέγχου ALINEA (επανάληψη 8)



Σχήμα 16: Εφαρμογή ελέγχου ALINEA (επανάληψη 2)

5.6. Σενάριο 3: Προσομοίωση με εξισορρόπηση του σχετικού μήκους των ουρών

Εάν εφαρμοστεί το σενάριο ελέγχου της ALINEA για μια τυχαία επανάληψη, παραδείγματος χάριν την 6 και συγκριθούν οι σχηματιζόμενες ουρές στις δυο ράμπες (Σχήμα 17), παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική διαφορά. Στην ράμπα 2 φαίνεται ότι το μήκος της ουράς που δημιουργείται είναι αρκετά μεγαλύτερο από εκείνο στη ράμπα 1 για το χρονικό διάστημα από το 40^ο έως το 60^ο λεπτό. Παρόλο που η ALINEA καταφέρνει να μειώσει το TTS δεν καταφέρνει να δημιουργεί ίσες ουρές στις δυο ράμπες. Έτσι δίνοντας νέες τιμές της ροής σε κάθε βήμα της προσομοίωσης και συνεπώς νέο κύκλο στους φωτεινούς σηματοδότες, ελέγχει την ροή στην περιοχή της συγχώνευσης χωρίς όμως να ελέγχει το μήκος των σχηματιζόμενων ουρών.



Σχήμα 17: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο ALINEA (επανάληψη 6)

Ο έλεγχος και η εξισορρόπηση των ουρών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή του ελέγχου εξισορρόπησης ουρών που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.4. Εφαρμόζοντας το συγκεκριμένο έλεγχο και για τις 10 επαναλήψεις του προσομοιωτή προκύπτουν κάποια αρχικά αποτελέσματα όσον αφορά το TTS, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7. Ο έλεγχος της εξισορρόπησης των ουρών δίνει μικρές τιμές TTS σε σχέση με το σενάριο χωρίς έλεγχο σε ποσοστό 3%, και όσον αφορά σε σύγκριση με τις τιμές TTS που δίνει η ALINEA φαίνεται η τελευταία να είναι καλύτερη κατά μέσο όρο. Πράγμα το οποίο μπορεί να σημαίνει ότι ενεργοποιούνται πιο συχνά οι Queue Control και Queue Override στην περίπτωση του ελέγχου εξισορρόπησης των ουρών.

Πίνακας 7: Τιμές του TTS των οχημάτων χωρίς έλεγχο, ALINEA και εξισορρόπησης ουρών

Επαναλήψεις	Σενάριο 1 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 3 (veh h)	Σχετική Διαφορά
1	257	236	-8%	246	-4%
2	252	260	3%	237	-6%
3	240	222	-8%	243	1%
4	247	256	4%	259	5%
5	256	228	-11%	245	-4%
6	231	223	-4%	225	-3%
7	239	235	-2%	234	-2%
8	267	238	-11%	232	-13%
9	295	252	-15%	283	-4%
10	251	243	-3%	245	-2%
<i>Μέσος Όρος</i>	<i>254</i>	<i>239</i>	<i>-6%</i>	<i>245</i>	<i>-3%</i>

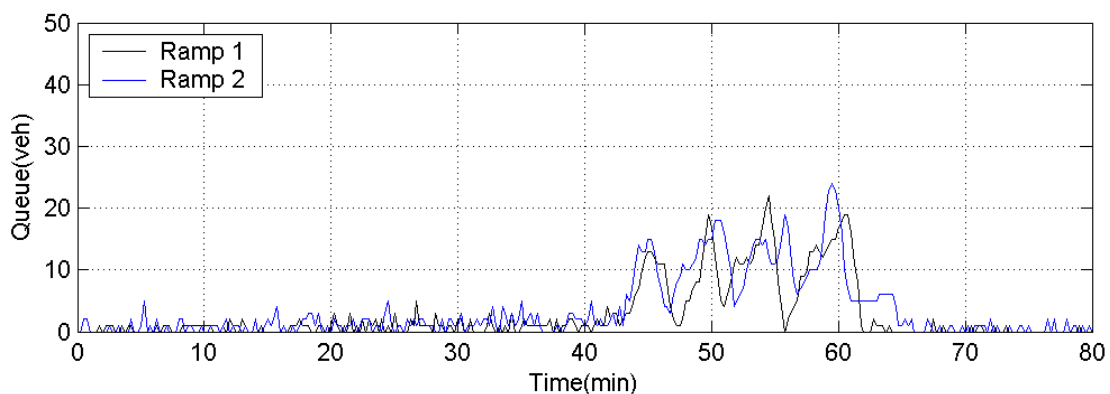
Ένα ακόμα κριτήριο που θα εξεταστεί στο συγκεκριμένο σενάριο είναι η σύγκριση των ουρών, όσον αφορά την διαφορά τους για τις δυο ράμπες. Ο υπολογισμός του κριτήριο αυτού στηρίζεται στη συσσώρευση της ουράς σε κάθε ράμπα και χωρίζεται σε δυο περιπτώσεις, στη συσσώρευση της απόλυτης διαφοράς και στην απόλυτη συσσώρευση της διαφοράς των ουρών. Η συσσώρευση της απόλυτης διαφοράς των γραμμών 1 και 2 του Σχήματος 17 αντιπροσωπεύει το εμβαδόν ανάμεσα στις γραμμές αυτές και η απόλυτη συσσώρευση της διαφοράς τους αντιπροσωπεύει την διαφορά των εμβαδόν των δυο γραμμών.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 8 συγκρίνοντας τις τιμές της συσσώρευσης της απόλυτης διαφοράς για τους δυο ελέγχους παρατηρείται σημαντική βελτίωση στο σχηματισμό των ουρών με τον έλεγχο εξισορρόπησης των ουρών, σχεδόν σε όλες τις επαναλήψεις εκτός της 3, κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 23%. Το ίδιο συμβαίνει και για την απόλυτη συσσώρευση της διαφοράς όπου η εφαρμογή της εξισορρόπησης των ουρών είναι πολύ καλύτερη σε όλες τις επαναλήψεις κατά μέσο όρο 85% από την εφαρμογή του ελέγχου της ALINEA.

Πίνακας 8: Υπολογισμός συσσώρευσης για ALINEA και εξισορρόπηση ουρών

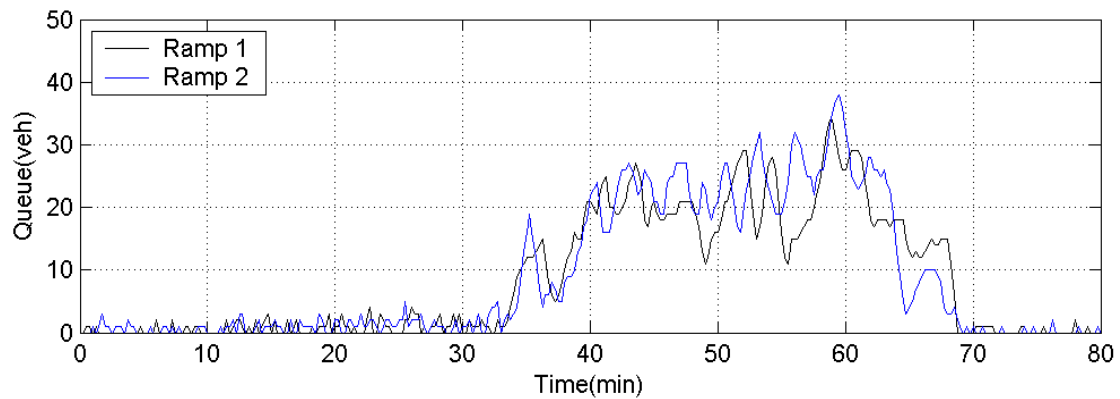
Επαναλήψεις	Συσσώρευση της Απόλυτης Διαφοράς			Απόλυτη Συσσώρευση της Διαφοράς		
	Σενάριο 3 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 3 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά
1	3.56	5.11	-30%	0.86	4.32	-80%
2	3.49	5.04	-31%	0.19	3.24	-94%
3	3.02	2.41	25%	0.64	1.44	-55%
4	3.61	4.11	-12%	0.08	2.34	-96%
5	4.01	4.50	-11%	0.24	3.79	-94%
6	2.36	3.27	-28%	0.20	2.47	-92%
7	3.60	7.61	-53%	0.83	6.99	-88%
8	2.68	5.89	-55%	0.80	4.66	-83%
9	4.39	5.87	-25%	0.66	3.25	-80%
10	4.02	4.56	-12%	0.24	1.94	-87%
Μέσος Όρος της Σχετικής Διαφοράς			-23%			
						-85%

Το φαινόμενο αυτό φαίνεται και γραφικά εάν για παράδειγμα για την επανάληψη 6 συγκριθούν τα Σχήματα 17 και 18 , παρατηρείται ότι για την περίπτωση της ALINEA οι δυο ουρές είναι αρκετά μακριά η μια από την άλλη σε σχέση με την εξισορρόπηση των ουρών. Πράγμα το οποίο μεταφράζεται σε καλυτέρευση της συσσώρευσης της απόλυτης διαφοράς κατά 28% και της απόλυτης συσσώρευσης της διαφοράς κατά 92% με την εφαρμογή εξισορρόπησης των ουρών (Πίνακας 8). Πιο απλά, οι σχηματιζόμενες ουρές στις δυο ράμπες τείνουν να είναι ίσες περισσότερο με τον έλεγχο της εξισορρόπησης ουρών παρά με την ALINEA.

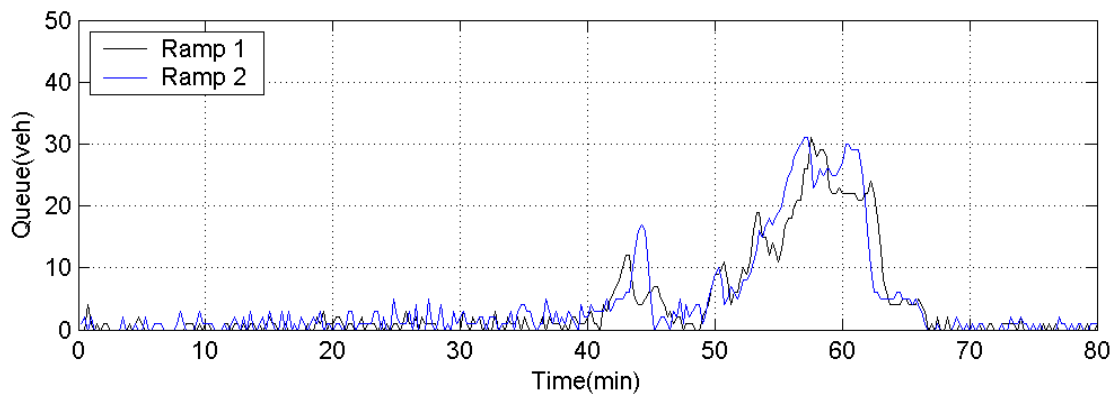
**Σχήμα 18: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 6)**

Παρατηρώντας πιο αναλυτικά και γραφικά τα αποτελέσματα του ελέγχου εξισορρόπησης ουρών για κάποιες επαναλήψεις, φαίνεται ότι επιτυγχάνεται μια πολύ

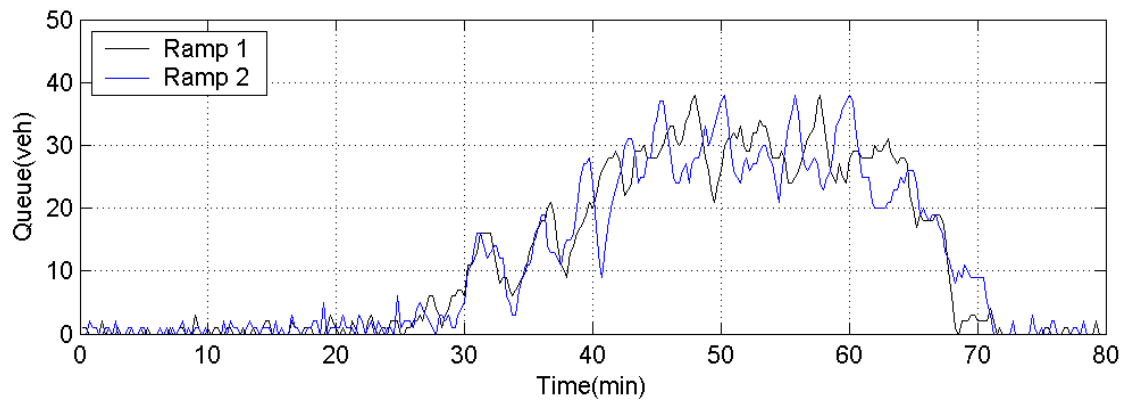
καλή εξισορρόπηση των ουρών αυτών. Οι επαναλήψεις που εξετάζονται είναι οι 1 (Σχήμα 19), η 8 (Σχήμα 20) και η 9 (Σχήμα 21). Για τα χρονικά διαστήματα όπου γίνεται το κυκλοφοριακό πρόβλημα πολύ έντονο και δημιουργούνται ουρές στις δυο ράμπες, η εφαρμογή της εξισορρόπησης των ουρών καταφέρνει, κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής, να αφήνει περίπου τον ίδιο αριθμό οχημάτων και στις δυο ράμπες. Οι νέες τιμές της ροής που δίνει για κάθε ράμπα ο συγκεκριμένος έλεγχος, δίνουν ένα νέο κύκλο στους φωτεινούς σηματοδότες έτσι ώστε να περνάνε τα οχήματα με ρυθμό που να δημιουργούνται περίπου ίδιες ουρές και δυο ράμπες.



Σχήμα 19: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 1)

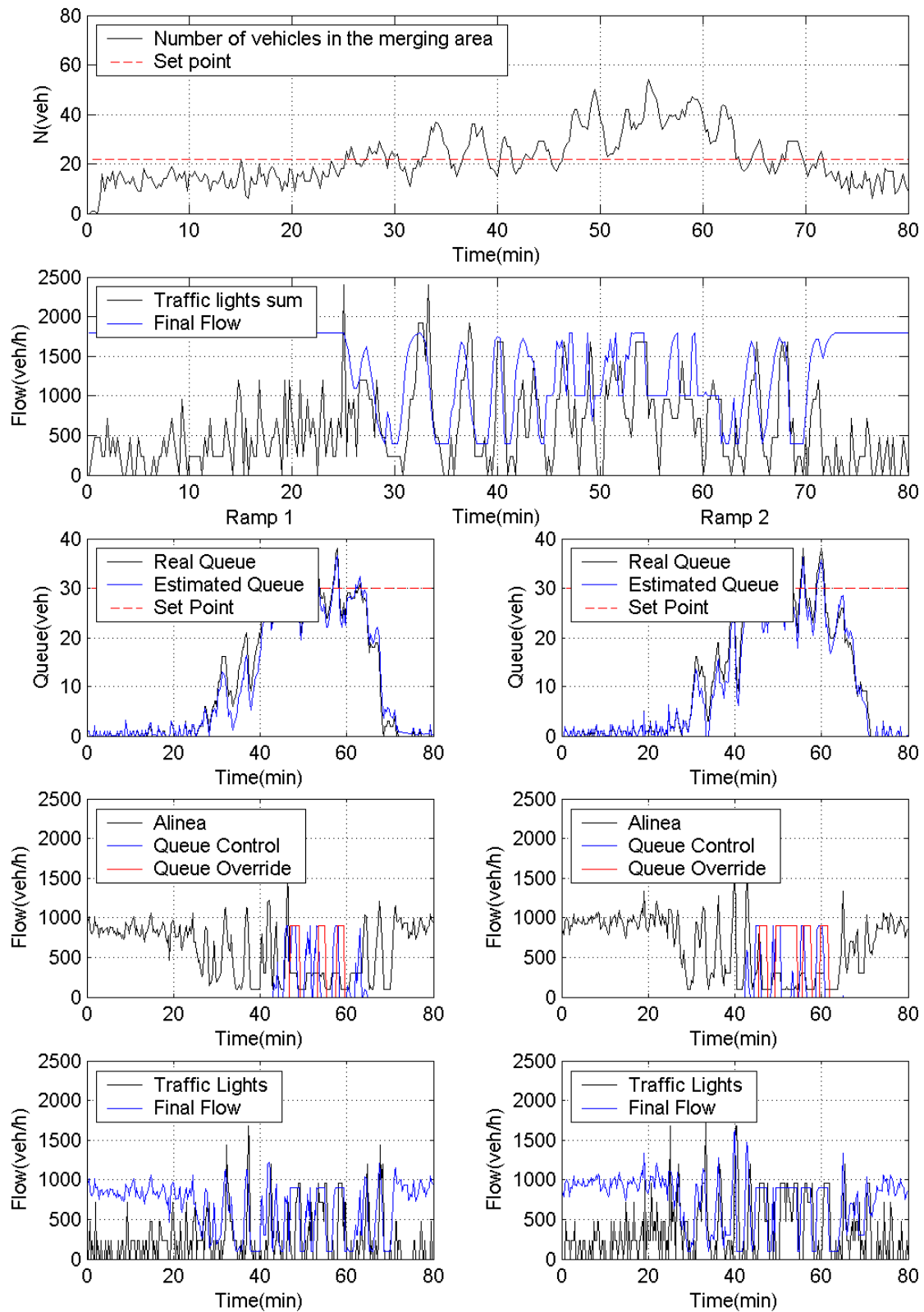


Σχήμα 20: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 8)

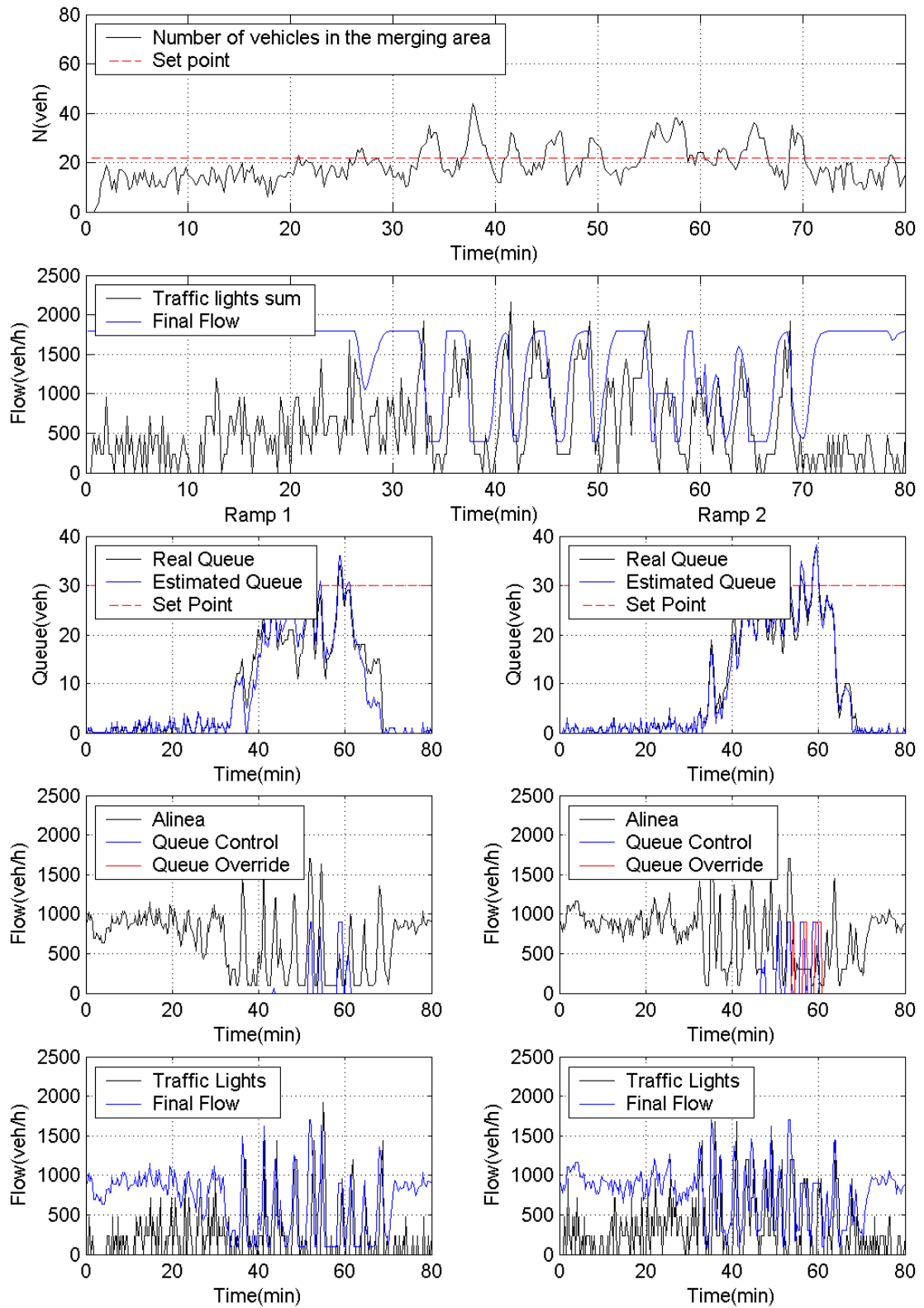


Σχήμα 21: Ουρές στις δυο ράμπες με έλεγχο εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 9)

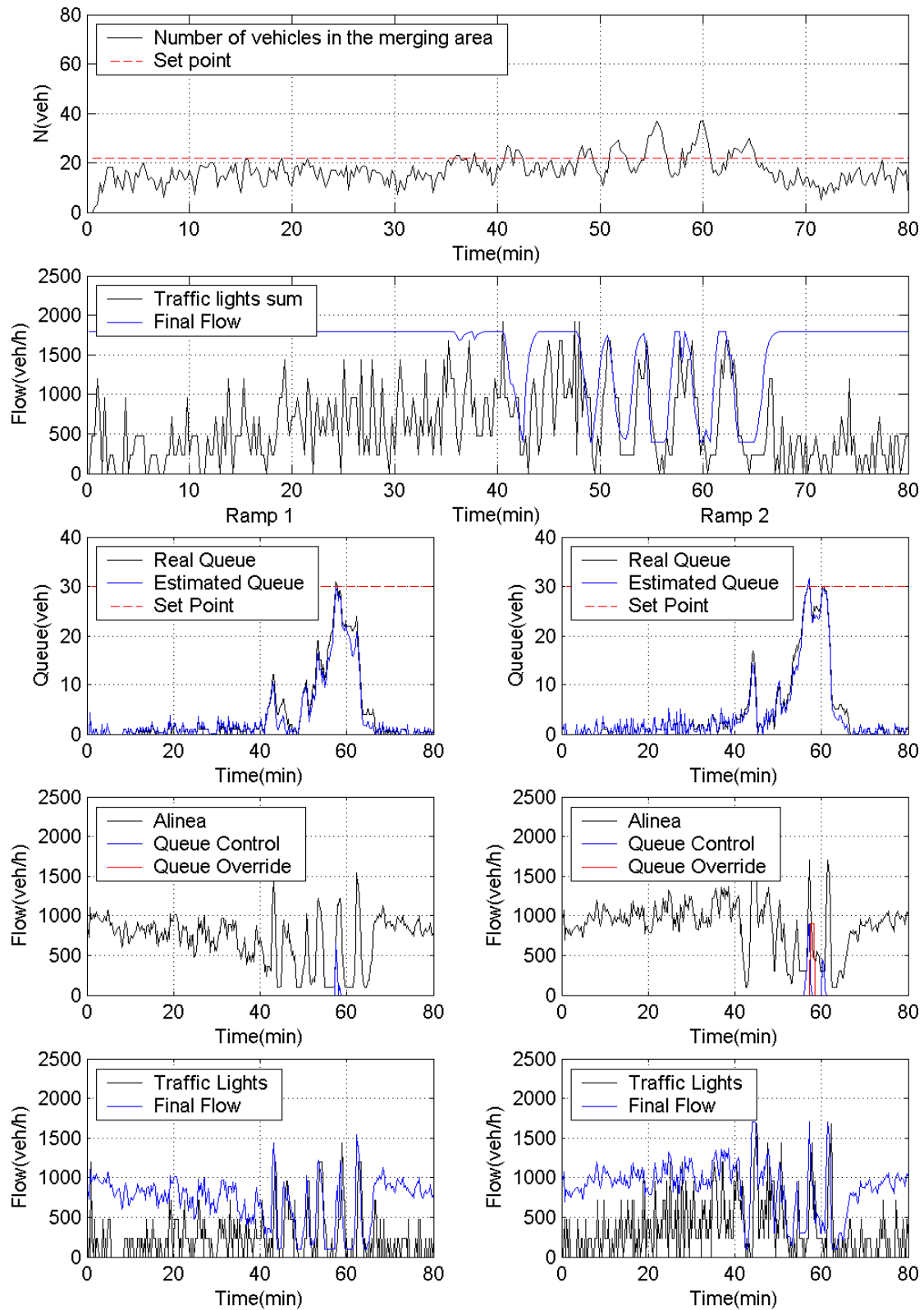
Το μήκος των ουρών αυτών παρόλα αυτά δεν μπορεί να είναι ανεξέλεγκτο, γι' αυτό όταν ο αριθμός των οχημάτων ξεπεράσει κάποια δοσμένα όρια εφαρμόζεται είτε ο Queue Override είτε ο Queue Control, όπως φαίνεται αρκετά έντονα από το Σχήμα 22 και την επανάληψη 9. Από το 40ο λεπτό έως το 60ο εξαιτίας του γεγονότος της μεγάλης τιμής του αριθμού των οχημάτων που δίνει ο εκτιμητής, εφαρμόζονται οι παραπάνω δυο έλεγχοι προκειμένου να αποφευχθεί η οποιαδήποτε πιθανότητα υπερχείλισης των δυο ραμπών. Το φαινόμενο αυτό δεν εμφανίζεται τόσο έντονα για τις άλλες δυο επαναλήψεις 1 και 8 των Σχημάτων 23 και 24 αντίστοιχα. Για την επανάληψη 8 (Σχήμα 24) τα πράγματα είναι πολύ ομαλά και η εκτίμηση του αριθμού των οχημάτων είναι σε χαμηλά επίπεδα έτσι που δεν ενεργοποιούνται οι Queue Override και Queue Control για μεγάλο διάστημα.



Σχήμα 22: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 9)



Σχήμα 23: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 1)



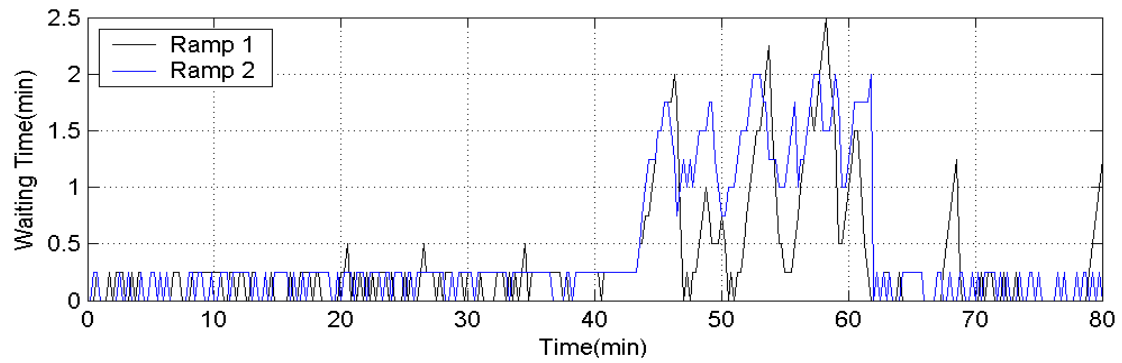
Σχήμα 24: Εφαρμογή ελέγχου εξισορρόπησης ουρών (επανάληψη 8)

5.7. Σενάριο 4: Προσομοίωση με έλεγχο εξισορρόπησης του χρόνου αναμονής

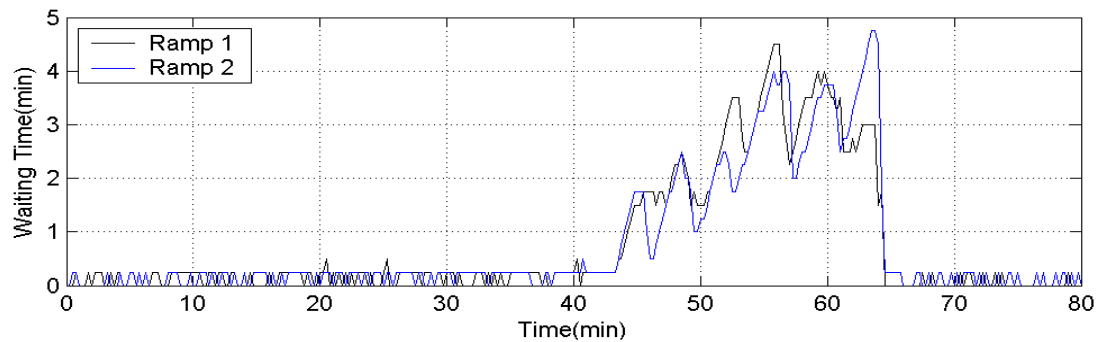
Στο τρίτο σενάριο πραγματοποιείται εφαρμογή ελέγχου για την εξισορρόπηση του χρόνου αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες. Ο νέος κύκλος των φωτεινών σηματοδοτών και κατά συνεπεία η νέα ροή στις δυο ράμπες υπολογίζεται από τις εξισώσεις που περιγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, σύμφωνα με τις οποίες σκοπός είναι να εξισορροπηθούν οι χρόνοι αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες. Το συγκεκριμένο σενάριο εξετάζει δυο περιπτώσεις, οι οποίες αναφέρονται σε διαφορετικές τιμές του e , της παραμέτρου που χρησιμοποιείται στην εκθετική εξομάλυνση της ροής εισόδου στις δυο ράμπες. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, μικρές τιμές της παραμέτρου αυτής προσεγγίζουν περισσότερες τιμές της ροής σε προηγούμενα βήματα. Έτσι η εκθετική εξομάλυνση δίνει ένα καλύτερο μέσο όρο της ροής, η οποία χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του ελέγχου εξισορρόπησης του χρόνου αναμονής. Οι τιμές του e που εξετάζονται είναι 0.2 και 0.05. Εξετάζοντας αρχικά το κριτήριο του TTS, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9, παρατηρείται μια σχετική βελτίωση και για τις δυο περιπτώσεις σε σχέση με το σενάριο χωρίς έλεγχο. Η περίπτωση όπου το e είναι ίσο με 0.05 δίνει καλύτερο μέσο όρο TTS από όταν το e είναι ίσο με 0.2.

Πίνακας 9: Τιμές του TTS των οχημάτων χωρίς έλεγχο, ALINEA και εξισορρόπησης ουρών και χρόνου αναμονής

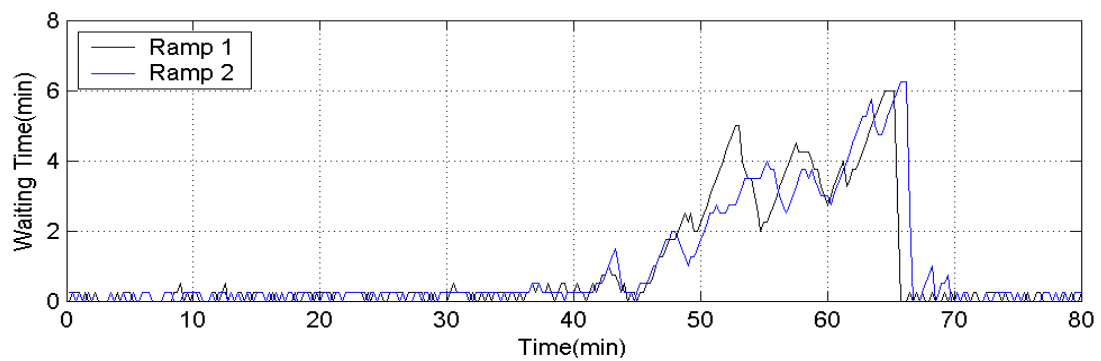
Επαναλήψεις	Σενάριο 1 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 4 $e=0.2$ (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 4 $e=0.05$ (veh h)	Σχετική Διαφορά
1	257	236	-8%	238	-7%	258	0%
2	252	260	3%	254	1%	251	0%
3	240	222	-8%	249	4%	232	-3%
4	247	256	4%	248	0%	243	-2%
5	256	228	-11%	244	-5%	232	-10%
6	231	223	-4%	221	-4%	223	-4%
7	239	235	-2%	241	1%	236	-1%
8	267	238	-11%	249	-7%	245	-8%
9	295	252	-15%	269	-9%	267	-10%
10	251	243	-3%	238	-5%	241	-4%
Μέσος Όρος	254	239	-6%	245	-3%	243	-4%



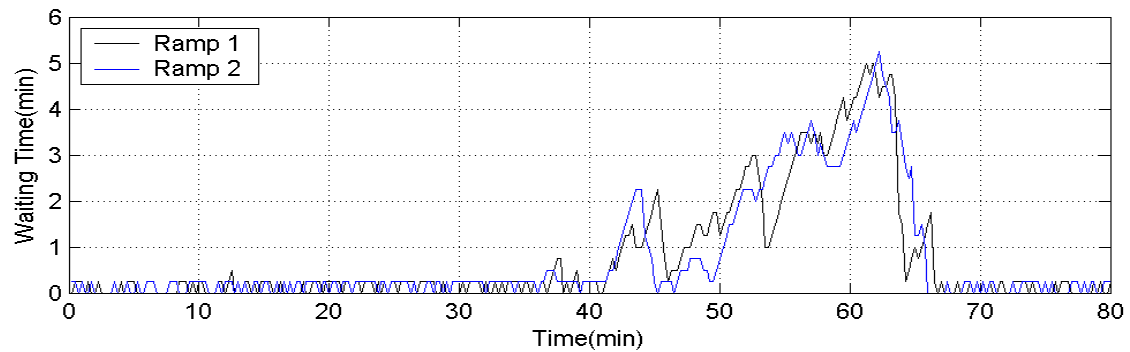
Σχήμα 25: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης χρόνου αναμονής για $\epsilon=0.2$ (επανάληψη 6)



Σχήμα 26: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης χρόνου αναμονής για $\epsilon=0.05$ (επανάληψη 6)



Σχήμα 27: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης χρόνου αναμονής για $\epsilon=0.2$ (επανάληψη 8)



Σχήμα 28: Εφαρμογή έλεγχου εξισορρόπησης χρόνου αναμονής για $\epsilon=0.05$ (επανάληψη 8)

Η βελτίωση του χρόνου αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες με μικρότερη τιμή στην παράμετρο e φαίνεται και γραφικά για τυχαίες επαναλήψεις (6 και 8) στα Σχήματα 25, 26, 27 και 28. Η απόσταση μεταξύ των δυο γραφημάτων που αντιστοιχούν στους χρόνους αναμονής των οχημάτων στις ράμπες φαίνεται να μειώνεται όταν αλλάζει η τιμή του e . Ιδιαίτερα για την επανάληψη 6 και το Σχήμα 25 υπάρχει σημαντική απόκλιση των δυο γραφημάτων, η οποία μειώνεται αισθητά αλλάζοντας το e (Σχήμα 26).

Πίνακας 10: Υπολογισμός συσσώρευσης για ALINEA και εξισορρόπηση χρόνου αναμονής για $e=0.2$

e=0.2	Συσσώρευση της Απόλυτης Διαφοράς			Απόλυτη Συσσώρευση της Διαφοράς		
Επαναλήψεις	Σενάριο 4 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 4 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά
1	37.50	30.94	21%	18.25	19.69	-7%
2	48.19	55.81	-14%	18.56	11.19	66%
3	45.81	17.75	158%	17.06	12.88	33%
4	43.13	41.44	4%	34.38	9.31	269%
5	41.44	20.31	104%	2.31	15.44	-85%
6	19.50	28.94	-33%	8.38	24.56	-66%
7	37.31	50.19	-26%	5.06	44.31	-89%
8	28.31	38.38	-26%	3.19	22.25	-86%
9	49.63	42.13	18%	31.25	0.63	4900%
10	37.06	32.13	15%	17.69	11.38	55%
Μέσος Όρος της Σχετικής Διαφοράς			22%	499%		

Όσον αφορά την συσσώρευση της απόλυτης διαφοράς και την απόλυτη συσσώρευση της διαφοράς των χρόνων αναμονής υπάρχει γενικότερα μια καλύτερευση με τη νέα τιμή του e , με εξαίρεση την απόλυτη συσσώρευση όπου δεν βελτιώνεται καθόλου. Σε μερικές επαναλήψεις παρατηρείται ότι η ALINEA είναι πολύ καλύτερη από τον έλεγχο εξισορρόπησης του χρόνου αναμονής, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της 9 και της 4 (Πίνακας 11).

Πίνακας 11: Υπολογισμός συσσώρευσης για ALINEA και εξισορρόπηση χρόνου αναμονής για $e=0.05$

$e=0.05$		Συσσώρευση της Απόλυτης Διαφοράς		Απόλυτη Συσσώρευση της Διαφοράς		
Επαναλήψεις	Σενάριο 4 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 4 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά
1	47.56	30.94	54%	37.31	19.69	90%
2	60.31	55.81	8%	46.31	11.19	314%
3	31.81	17.75	79%	11.69	12.88	-9%
4	50.00	41.44	21%	30.50	9.31	228%
5	32.94	20.31	62%	5.19	15.44	-66%
6	16.94	28.94	-41%	3.94	24.56	-84%
7	30.88	50.19	-38%	2.25	44.31	-95%
8	46.06	38.38	20%	8.81	22.25	-60%
9	49.44	42.13	17%	36.31	0.63	5710%
10	33.56	32.13	4%	11.44	11.38	1%
Μέσος Όρος της Σχετικής Διαφοράς			19%	603%		

5.8. Σενάριο 5: Προσομοίωση με έλεγχο εξισορρόπησης του χρόνου αναμονής με τη χρήση ελεγκτή τύπου P

Μια άλλη μέθοδος εξισορρόπησης του χρόνου αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες είναι η χρήση του ελεγκτή τύπου P. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου βελτιώνει σημαντικά τις τιμές της συσσώρευσης της απόλυτης διαφοράς (Πίνακας 12) σε σχέση με το σενάριο 4. Φαίνεται ότι στις περισσότερες επαναλήψεις η συσσώρευση της απόλυτης διαφοράς είναι μικρότερη σε σχέση με το σενάριο της ALINEA.

Πίνακας 12: Υπολογισμός συσσώρευσης για ALINEA και εξισορρόπηση χρόνου αναμονής για σενάριο 5

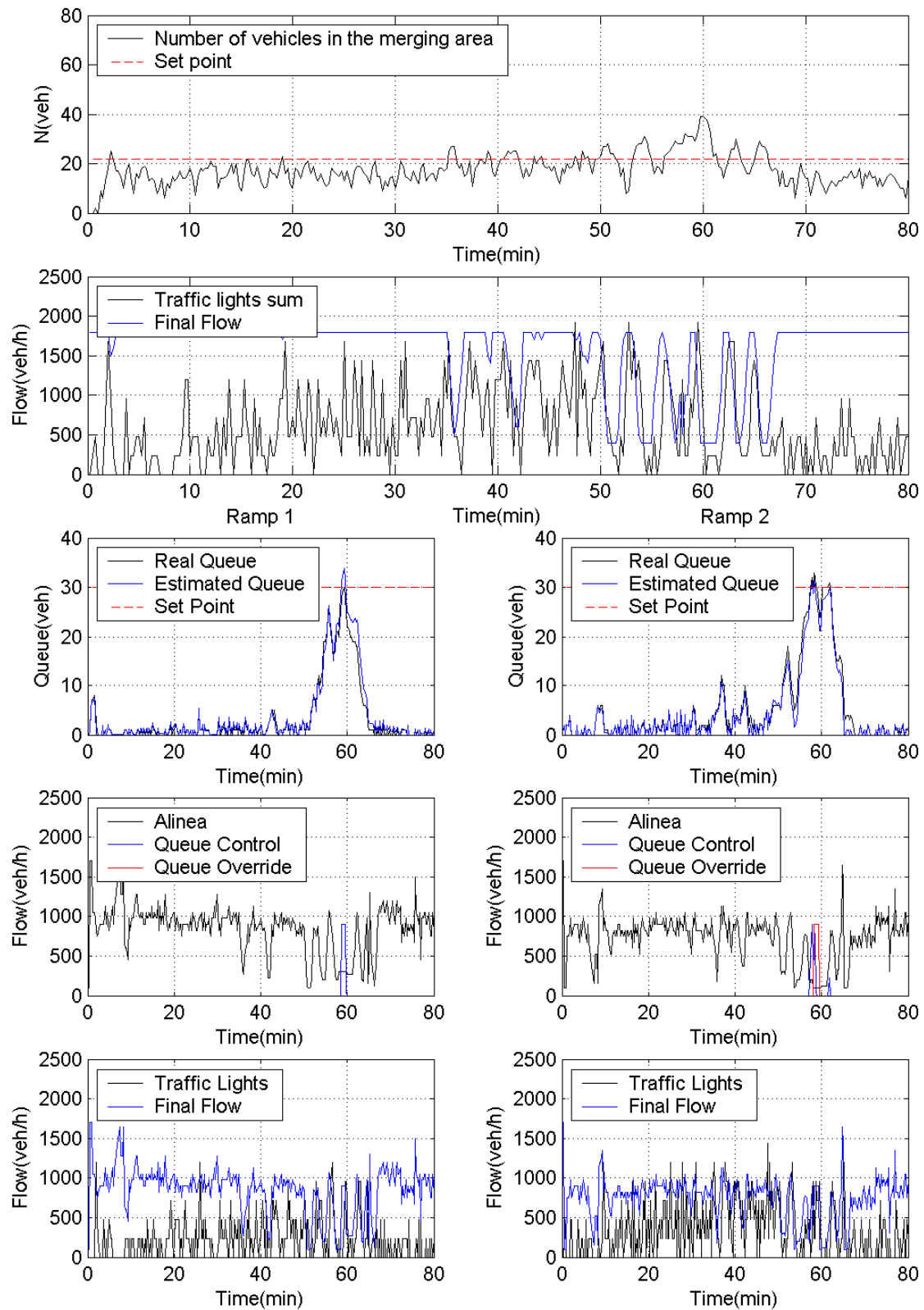
Επαναλήψεις	Συσσώρευση της Απόλυτης Διαφοράς			Απόλυτη Συσσώρευση της Διαφοράς		
	Σενάριο 4 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 4 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά
1	44.81	30.94	45%	22.81	19.69	16%
2	13.31	55.81	-76%	2.31	11.19	-79%
3	33.06	17.75	86%	7.81	12.88	-39%
4	26.63	41.44	-36%	5.38	9.31	-42%
5	36.25	20.31	78%	14.50	15.44	-6%
6	27.88	28.94	-4%	5.88	24.56	-76%
7	19.13	50.19	-62%	5.63	44.31	-87%
8	25.44	38.38	-34%	17.81	22.25	-20%
9	44.38	42.13	5%	23.88	0.63	3720%
10	30.88	32.13	-4%	0.25	11.38	-98%
Μέσος Όρος της Σχετικής Διαφοράς			0%	329%		

Τα αποτελέσματα του TTS παρουσιάζονται συνολικά για όλα τα σενάρια στον Πίνακα 13. Σε γενικές γραμμές όλα τα σενάρια έχουν καλύτερο TTS από εκείνο του σεναρίου χωρίς έλεγχο. Η περίπτωση της ALINEA δίνει κατά μέσο όρο καλύτερο TTS από όλες τις άλλες περιπτώσεις. Παρόλα αυτά η εφαρμογή ενός ελέγχου εξισορρόπησης είτε των ουρών είτε του χρόνου αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες μειώνουν και αυτά σημαντικά το μέσο όρο του TTS με ποσοστό της τάξεως του 3% περίπου.

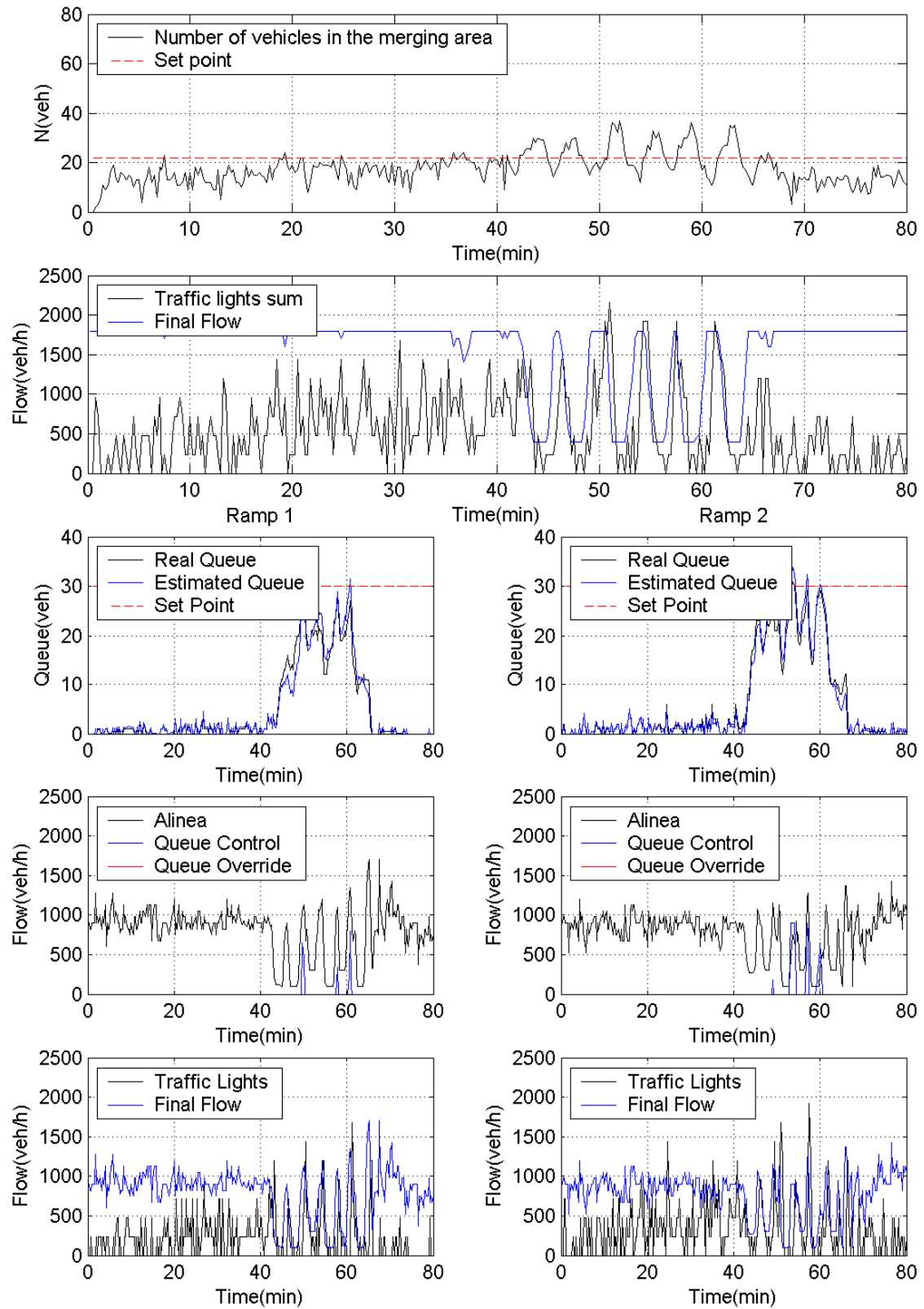
Πίνακας 13: Τιμές του TTS των οχημάτων για όλους τους ελέγχους

Επαναλήψεις	Σενάριο 1 (veh h)	Σενάριο 2 (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 3 (veh h)	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 4 (veh h) $e=0.2$	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 4 (veh h) $e=0.05$	Σχετική Διαφορά	Σενάριο 5 (veh h)	Σχετική Διαφορά
1	257	236	-8%	246	-4%	238	-7%	258	0%	265	3%
2	252	260	3%	237	-6%	254	1%	251	0%	221	-12%
3	240	222	-8%	243	1%	249	4%	232	-3%	238	-1%
4	247	256	4%	259	5%	248	0%	243	-2%	239	-3%
5	256	228	-11%	245	-4%	244	-5%	232	-10%	269	5%
6	231	223	-4%	225	-3%	221	-4%	223	-4%	233	1%
7	239	235	-2%	234	-2%	241	1%	236	-1%	231	-3%
8	267	238	-11%	232	-13%	249	-7%	245	-8%	235	-12%
9	295	252	-15%	283	-4%	269	-9%	267	-10%	286	-3%
10	251	243	-3%	245	-2%	238	-5%	241	-4%	236	-6%
Μέσος Όρος	254	239	-6%	245	-3%	245	-3%	243	-4%	245	-3%

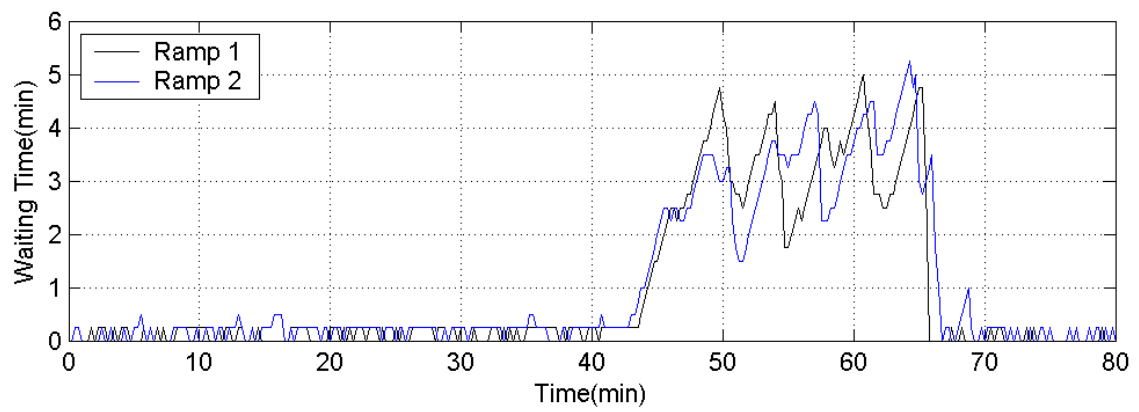
Το σενάριο 5 αν εξεταστεί και γραφικά για τυχαίες επαναλήψεις φαίνεται να λειτουργεί αρκετά καλά δίνοντας ροή σε κάθε βήμα που αντιστοιχεί σε περίπου ίσους χρόνους αναμονής των οχημάτων στους δυο φωτεινούς σηματοδότες. Συγκεντρωτικά το σενάριο 5 είναι αρκετά καλύτερο από το σενάριο 4 σε όλα τα κριτήρια που εξετάζονται. Από τα Σχήματα 29 και 30 διακρίνεται η καλή εφαρμογή του σεναρίου 5, όπου συνολικά η τιμή του αριθμού των οχημάτων παραμένει κοντά στο σημείο αναφοράς (22 οχήματα) έτσι ώστε να μην δημιουργείται μεγάλο πρόβλημα ουρών στις ράμπες και να μην χρειάζεται η ενεργοποίηση των Queue Override και Queue Control για μεγάλο διάστημα. Σύμφωνα με τα Σχήματα 31 και 32 φαίνεται κατά ποσό μπόρεσε ο συγκεκριμένος έλεγχος να εξισορροπήσει τους χρόνους αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες.



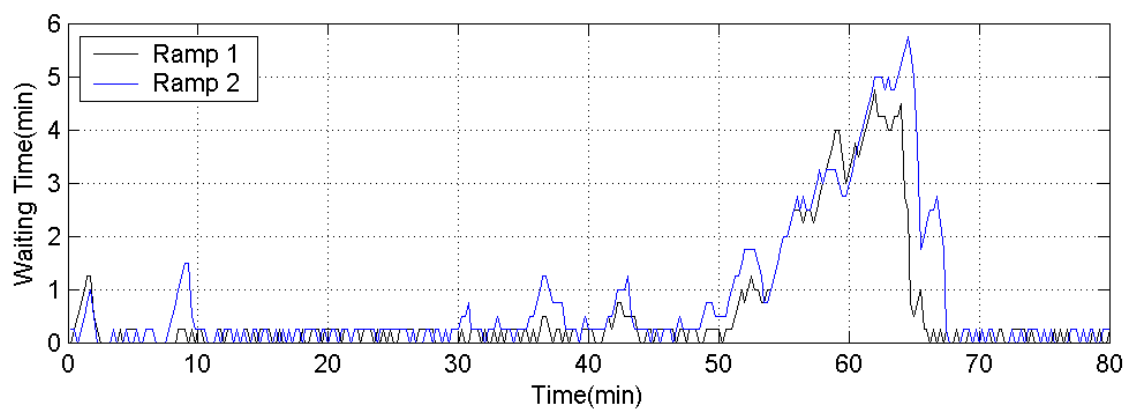
Σχήμα 29: Εφαρμογή σεναρίου 5 (επανάληψη 8)



Σχήμα 30: Εφαρμογή σεναρίου 5 (επανάληψη 6)



Σχήμα 31: Εφαρμογή σεναρίου 5 (επανάληψη 6)



Σχήμα 32: Εφαρμογή σεναρίου 5 (επανάληψη 8)

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Στην παρούσα έρευνα εξετάσθηκε η εφαρμογή κυκλοφοριακού ελέγχου σε αυτοκινητόδρομο με ράμπες εισόδου συνθέτης γεωμετρίας. Το πρόβλημα ουσιαστικά ήταν η ελαχιστοποίηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης στην περιοχή του δικτύου, όπου οι δυο ράμπες εισόδου συγχωνεύονταν σε μια. Κύριος σκοπός της έρευνας ήταν η εφαρμογή και η σύγκριση τριών κυκλοφοριακών ελέγχων:

- ALINEA με ισόποση εφαρμογή
- ALINEA και εξισορρόπηση του σχετικού μήκους των ουρών στις δυο ράμπες
- ALINEA και εξισορρόπηση του χρόνου αναμονής των οχημάτων στις δυο ράμπες

Με τη χρήση του προσομοίωσης AIMSUN και κατ' επέκταση του AIMSUN API πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή των παραπάνω κυκλοφοριακών ελέγχων. Αρχικά εξετάσθηκε η συμπεριφορά του δικτύου όταν δεν υπάρχει κυκλοφοριακός έλεγχος, στη συνέχεια εντοπίσθηκε η περιοχή όπου δημιουργείται η κυκλοφοριακή συμφόρηση, τοποθετηθήκαν στις δυο ράμπες εισόδου φωτεινοί σηματοδότες, οι οποίοι με την εφαρμογή των τριών κυκλοφοριακών ελέγχων έδιναν σε κάθε βήμα της προσομοίωσης ένα νέο κύκλο.

Κάθε ένας κυκλοφοριακός έλεγχος εφαρμόστηκε ξεχωριστά και με τη βοήθεια καταλλήλων γραφημάτων και πινάκων έγινε η εξαγωγή συμπερασμάτων. Για κάθε κυκλοφοριακό έλεγχο υπολογισθήκαν:

- Η συσσώρευση της απόλυτης διαφοράς των σχηματιζόμενων ουρών ή των χρόνων αναμονής

- Η απόλυτη συσσώρευση της διαφοράς των σχηματιζόμενων ουρών ή των χρόνων αναμονής
- Ο συνολικός χρόνος διαμονής στο δίκτυο, Total Time Spend (TTS)

Από τα γραφήματα που προέκυψαν από κάθε έλεγχο μπορούσε να διερευνηθεί εάν κατά της διάρκειας της προσομοίωσης, υπήρχε μεγάλος αριθμός οχημάτων στις δυο ράμπες, πράγμα το οποίο ενεργοποιούσε τους ελέγχους Queue Override και Queue Control, έτσι ώστε οι ουρές στις δυο ράμπες να μην ξεπερνούσαν τα προκαθορισμένα όρια. Παρουσιάστηκαν συγκεκριμένες επαναλήψεις για τα σενάρια που εξεταστήκαν, με τη βοήθεια των όποιων βγήκαν χρήσιμα συμπεράσματα για την εφαρμογή των ελέγχων κυκλοφορίας. Συγκριθήκαν για κάθε επανάληψη οι τιμές τόσο της συσσώρευση της απόλυτης διαφοράς όσο και της απόλυτη συσσώρευση της διαφοράς των σχηματιζόμενων ουρών ή των χρόνων αναμονής, αλλά και του TTS. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι με τη βοήθεια της ALINEA τόσο η εξισορρόπηση του σχετικού μήκους των ουρών στις δυο ράμπες όσο και η εξισορρόπηση του χρόνου αναμονής των οχημάτων εφαρμόστηκαν με επιτυχία και με την παράλληλη εφαρμογή του Queue Override και Queue Control έγινε αποφυγή του κινδύνου υπερχείλισης τους.

Κεφάλαιο 7

Βιβλιογραφία

Aimsun 5.0 Microsimulator User's Manual.

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.

Lentzakis A. F., Spiliopoulou A. D., Papamichail I., Papageorgiou M. and Wng Y., 2007. "Real-time work zone management for throughput maximization". In: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA, paper 08-0772.

Papageorgiou M. and Kotsialos A., 2002. "Freeway ramp metering: An overview". *IEEE Transactions on Intelligent Transportations Systems*, 3, 271-281.

Papageorgiou M. and Papamichail I., 2008. "Overview of traffic signal operation policies for ramp metering". In: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA, paper 08-0777.

Papageorgiou M., Papamichail I., Spiliopoulou A. D. and Lentzakis A. F. 2008, "Real-time merging traffic control with applications to toll plaza and work zone management". *Transportation Research Part C* 16, 535-553.

Smaragdis E. and Papageorgiou M., 2003. "Series of new local ramp metering strategies". *Transportation Research Record* 1856, 74-86.

Spiliopoulou A. D., Papamichail I. and Papageorgiou M., 2008. "Real-time toll plaza management for throughput maximization". In: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA, paper 08-0771.

TSS- Transport Simulation System, “Aimsun microscopic traffic simulator: A tool for the analysis and assessment of its systems”, <http://www.tss-bcn.com>.

Vigos G., Papageorgiou M. and Wang Y., 2008. “Real-time estimation of vehicle-count within signalized links”. Transportation Research Part C 16, 18-35.

Σπηλιοπούλου Αναστασία, 2007. «Έλεγχος ροής οχημάτων σε περιοχή διόδων αυτοκινητόδρομου». Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.