



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου TUC στο αστικό δίκτυο
Κηφισίας-Αττικής Οδού μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης

ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΛΟΥΤΟΣ

A.M. 2004010099

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΜΑΡΚΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2010

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Διπλωματική Εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθ. Μάρκο Παπαγεωργίου, επιβλέποντα της εργασίας μου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωσή της.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τους κα. Αναστασία Σπηλιοπούλου και κ. Αναστάσιο Κουβελά, υποψήφιους διδάκτορες του Πολυτεχνείου Κρήτης για την υπομονή, τις γνώσεις και τη συμπαράστασή τους.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για όσους μου συμπαραστάθηκαν και ιδιαίτερα την οικογένεια μου.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων.....	6
Κατάλογος Πινάκων.....	9
Πρόλογος.....	10
1 Εισαγωγή.....	11
1.1 Έλεγχος Κυκλοφορίας.....	11
1.2 Παρουσίαση Προβλήματος.....	11
1.3 Δομή της Εργασίας.....	12
2 Έλεγχος Κυκλοφορίας Αστικών Δικτύων.....	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Στρατηγική Ελέγχου Πραγματικού Χρόνου TUC.....	14
2.2.1 Ορισμοί Και Περιορισμοί.....	14
2.2.2 Στρατηγική TUC.....	15
2.3 Επενέργεια.....	17
2.4 Επέκταση Πρασίνου.....	17
3 Μικροσκοπικός Προσομοιωτής Οδικών Δικτύων AIMSUN.....	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2 Παράμετροι εισόδου.....	19
3.2.1 Διάταξη δικτύου.....	20
3.2.2 Σενάριο ζήτησης.....	20
3.2.3 Έλεγχος Κυκλοφορίας.....	20
3.3 AIMSUN API.....	21
3.4 Παράμετροι προσομοίωσης.....	21
3.4.1 Σενάριο (AIMSUN Scenario).....	21
3.4.2 Πείραμα (AIMSUN Experiment).....	21
3.4.3 Επανάληψη (AIMSUN Replication).....	22
3.5 Έξοδοι προσομοίωσης.....	22
4 Μοντελοποίηση και προσομοίωση του δικτύου.....	23
4.1 Το Δίκτυο.....	23
4.1.1 Μοντελοποίηση του δικτύου στο AIMSUN.....	23
4.2 Σενάρια Ζήτησης.....	23
4.3 Σενάρια Ελέγχου.....	27
4.3.1 Σενάριο 1 ^ο : Σταθερό Πλάνο Σηματοδότησης.....	28

4.3.2	Σενάριο 2 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC	30
4.3.3	Σενάριο 3 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC και Επενέργεια	34
4.3.4	Σενάριο 4 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου Ι	35
4.3.5	Σενάριο 5 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου ΙΙ	36
4.4	Κριτήρια Αξιολόγησης	38
5	Αποτελέσματα	39
5.1	Αποτελέσματα 1ου σεναρίου ζήτησης	40
5.1.1	Σενάριο 1 ^ο : Σταθερό Πλάνο Σηματοδότησης	40
5.1.2	Σενάριο 2 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC	40
5.1.3	Σενάριο 3 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC και Επενέργεια	44
5.1.3.1	Επενέργεια 1 δευτερολέπτου	44
5.1.3.2	Επενέργεια 2 δευτερολέπτων	44
5.1.3.3	Επενέργεια 3 δευτερολέπτων	47
5.1.3.4	Διερευνήσεις αποτελεσματικότητας της επενέργειας	50
5.1.4	Σενάριο 4 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου Ι	51
5.1.4.1	Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου Ι – 2 δευτερόλεπτα	54
5.1.4.2	Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου Ι – 3 δευτερόλεπτα	59
5.1.5	Σενάριο 5 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου ΙΙ	60
5.1.5.1	Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου ΙΙ	60
5.2	Αποτελέσματα 2ου σεναρίου ζήτησης	62
5.2.1	Σενάριο 1 ^ο : Σταθερό Πλάνο Σηματοδότησης	65
5.2.2	Σενάριο 2 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC	65
5.2.3	Σενάριο 3 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC και Επενέργεια	66
5.2.3.1	Επενέργεια 2 δευτερολέπτων	69
5.2.4	Σενάριο 4 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου Ι	71
5.2.4.1	Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου Ι – 2 δευτερόλεπτα	71
5.2.5	Σενάριο 5 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου ΙΙ	76

5.2.5.1	Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου II.....	76
5.3	Σύνοψη αποτελεσμάτων	84
5.4	Αποτελέσματα για σταθερό πλάνο σηματοδότησης	84
6	Διερευνήσεις με χρήση του αλγορίθμου των Nelder And Mead	86
6.1	Εισαγωγή	86
6.2	Αλγόριθμος.....	86
6.3	Χαρακτηριστικά.....	88
6.4	Εφαρμογή.....	90
6.5	Αποτελέσματα	92
7	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις	98
7.1	Σύνοψη της εργασίας	98
7.2	Συμπεράσματα	98
7.2.1	Μέθοδοι Επενέργειας και Επέκτασης Πρασίνου	98
7.2.2	Αλγόριθμος Nelder-Mead	99
7.3	Μελλοντικές Επεκτάσεις	99
7.3.1	Μέθοδοι Επενέργειας και Επέκτασης Πρασίνου	99
7.3.2	Αλγόριθμος Nelder-Mead	100
8	Βιβλιογραφία.....	101

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3-1: Περιβάλλον AIMSUN NG.....	21
Σχήμα 4-1: Υπό εξέταση δίκτυο.....	24
Σχήμα 4-2: Κόμβος Κηφισίας-Παραδείσου.	25
Σχήμα 4-3: Κόμβος Κηφισίας-Αττικής Οδού.	25
Σχήμα 4-4: Κόμβος Κηφισίας-Αγ. Κων/νου.	25
Σχήμα 4-5: Μοντελοποίηση του δικτύου στον προσομοιωτή AIMSUN.	26
Σχήμα 4-6: Ροή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου.	28
Σχήμα 4-7: Θέση συμβάντος 2 ^{ου} Σεναρίου Ζήτησης.	28
Σχήμα 4-8: Φωτεινή Σηματοδότηση κόμβου Κηφισίας-Παραδείσου.	29
Σχήμα 4-9: Πλάνο Σηματοδότησης κόμβου Κηφισίας-Παραδείσου.	29
Σχήμα 4-10: Κύρια στάδια σταθερού πλάνου σηματοδότησης κόμβου Κηφισίας-Αττικής Οδού.	30
Σχήμα 4-11: Σταθερό πλάνο σηματοδότησης κόμβου Κηφισίας-Αττικής Οδού με επιπλέον χρόνου πρασίνου.	30
Σχήμα 4-12: Μοντελοποίηση των κόμβων του δικτύου στην TUC χωρίς συνδέσμους εξόδου.	31
Σχήμα 4-13: Θέση φωρατών στο υπό εξέταση δίκτυο.	31
Σχήμα 4-14: Μοντελοποίηση των κόμβων του δικτύου στην TUC (με συνδέσμους εξόδου).	33
Σχήμα 4-15: Θέση φωρατών επενέργειας στο υπό εξέταση δίκτυο.	34
Σχήμα 4-16: Θέση φωρατών μεθόδου επέκτασης πρασίνου I στο δακτύλιο.	35
Σχήμα 4-17: Φωτεινή σηματοδότηση δακτυλίου στη φάση λειτουργίας της μεθόδου επέκτασης πρασίνου I.	36
Σχήμα 4-18: Θέση φωρατών μεθόδου επέκτασης πρασίνου II στο δακτύλιο.	37
Σχήμα 4-19: Φωτεινή σηματοδότηση δακτυλίου στη φάση λειτουργίας της μεθόδου επέκτασης πρασίνου II.	37
Σχήμα 5-1: Ουρές οχημάτων 1 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 8) - στρατηγική TUC.	42
Σχήμα 5-2: Ουρές οχημάτων 2 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 8) - στρατηγική TUC.	42
Σχήμα 5-3: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 8 & 5) - στρατηγική TUC.....	43
Σχήμα 5-4: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 8 & 5) - στρατηγική TUC.....	43
Σχήμα 5-5: Διάρκειες περιόδων στον 1 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 3 & 5) – Επενέργεια 2 sec. ...	46
Σχήμα 5-6: Διάρκειες περιόδων στον 2 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 3 & 5) – Επενέργεια 2 sec. ...	46
Σχήμα 5-7: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 3 & 5) – Επενέργεια 2 sec.	48
Σχήμα 5-8: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 3 & 5) – Επενέργεια 2 sec.	48
Σχήμα 5-9: Ουρές οχημάτων 1 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 3) – Επενέργεια 2 sec.	49
Σχήμα 5-10: Ουρές οχημάτων 2 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 3) – Επενέργεια 2 sec.	49
Σχήμα 5-11: Νέα Μοντελοποίηση του δικτύου στον προσομοιωτή AIMSUN.....	52
Σχήμα 5-12: Διάρκειες περιόδων στον 1 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 6 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου I, 2 sec.	55
Σχήμα 5-13: Διάρκειες περιόδων και πράσινη επέκταση στον 2 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 6 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου I, 2 sec.	55

Σχήμα 5-14: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 6 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.....	57
Σχήμα 5-15: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 6 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.....	57
Σχήμα 5-16: Ουρές οχημάτων 1 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.....	58
Σχήμα 5-17: Ουρές οχημάτων 2 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.....	58
Σχήμα 5-18: Διάρκειες περιόδων στον 1 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 2 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου ΙΙ.....	61
Σχήμα 5-19: Διάρκειες περιόδων και πράσινη επέκταση στον 2 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 2 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου ΙΙ.....	61
Σχήμα 5-20: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 2 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου ΙΙ.....	63
Σχήμα 5-21: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 2 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου ΙΙ.....	63
Σχήμα 5-22: Ουρές οχημάτων 1 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου ΙΙ.....	64
Σχήμα 5-23: Ουρές οχημάτων 2 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου ΙΙ.....	64
Σχήμα 5-24: Ουρές οχημάτων 1 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 4) – στρατηγική ΤUC.....	67
Σχήμα 5-25: Ουρές οχημάτων 2 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 4) – στρατηγική ΤUC.....	67
Σχήμα 5-26: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 4 & 8) – στρατηγική ΤUC.....	68
Σχήμα 5-27: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 4 & 8) – στρατηγική ΤUC.....	68
Σχήμα 5-28: Διάρκειες περιόδων στον 1 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 3 & 6) – Επενέργεια 2 sec. .	70
Σχήμα 5-29: Διάρκειες περιόδων στον 2 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 3 & 6) – Επενέργεια 2 sec. .	70
Σχήμα 5-30: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 3 & 6) – Επενέργεια 2 sec.	72
Σχήμα 5-31: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 3 & 6) – Επενέργεια 2 sec.....	72
Σχήμα 5-32: Ουρές οχημάτων 1 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 3) – Επενέργεια 2 sec.....	73
Σχήμα 5-33: Ουρές οχημάτων 2 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 3) – Επενέργεια 2 sec.....	73
Σχήμα 5-34: Διάρκειες περιόδων στον 1 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 9 & 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.	75
Σχήμα 5-35: Διάρκειες περιόδων και πράσινη επέκταση στον 2 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 9 & 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.....	75
Σχήμα 5-36: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 9 & 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.....	77
Σχήμα 5-37: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 9 & 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.	77
Σχήμα 5-38: Ουρές οχημάτων 1 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 9) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι, 2 sec.....	78

Σχήμα 5-39: Ουρές οχημάτων 2 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 9) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου I, 2 sec.....	78
Σχήμα 5-40: Διάρκειες περιόδων στον 1 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 5 & 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.....	80
Σχήμα 5-41: Διάρκειες περιόδων και πράσινη επέκταση στον 2 ^ο κόμβο (Επαναλήψεις 5 & 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.....	80
Σχήμα 5-42: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 5 & 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.....	82
Σχήμα 5-43: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 5 & 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.....	82
Σχήμα 5-44: Ουρές οχημάτων 1 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.....	83
Σχήμα 5-45: Ουρές οχημάτων 2 ^{ου} κόμβου (Επανάληψη 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.....	83
Σχήμα 6-1: Δυνατές κινήσεις του συμπλέγματος για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης στον χώρο των τριών διαστάσεων: (a) αρχικό σχήμα, (b) ανάκλαση της χειρότερης κορυφής x_{n+1} περί το κέντρο βάρους των υπολοίπων κορυφών του συμπλέγματος, (c) επέκταση κατά μήκος της διεύθυνσης ανάκλασης, (d) εσωτερική συμπίεση, και (e) συρρίκνωση γύρω από την καλύτερη κορυφή x_1	88
Σχήμα 6-2: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Nelder-Mead.....	90
Σχήμα 6-3: Υπό εξέταση δακτύλιος.....	91
Σχήμα 6-4: Μοντελοποίηση των συνδέσμων του δακτυλίου.....	91
Σχήμα 6-5: Offset δακτυλίου.....	93
Σχήμα 6-6: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).....	93
Σχήμα 6-7: Offset δακτυλίου.....	94
Σχήμα 6-8: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).....	94
Σχήμα 6-9: Offset δακτυλίου.....	95
Σχήμα 6-10: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).....	95
Σχήμα 6-11: Offset δακτυλίου.....	96
Σχήμα 6-12: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).....	96
Σχήμα 6-13: Offset δακτυλίου.....	97
Σχήμα 6-14: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).....	97

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1: Περιγραφή των συνδέσμων του δικτύου.....	32
Πίνακας 4-2: Περιγραφή της σηματοδότησης των κόμβων του δικτύου.....	32
Πίνακας 4-3: Περιγραφή των φάσεων κατά τις οποίες έχει δικαίωμα διέλευσης κάθε σύνδεσμος.....	33
Πίνακας 4-4: Πίνακας Ελέγχου L για τον 1 ^ο κόμβο.	33
Πίνακας 4-5: Πίνακας Ελέγχου L για τον 2 ^ο κόμβο.	33
Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα προσομοίωσης σταθερού πλάνου σηματοδότησης.....	40
Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα προσομοίωσης στρατηγικής TUC.	41
Πίνακας 5-3: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 1 δευτερολέπτου (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC).	45
Πίνακας 5-4: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC).	47
Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 3 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC).	50
Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα προσομοίωσης στρατηγικής TUC (με απελευθέρωση των εξόδων).....	53
Πίνακας 5-7: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και με απελευθέρωση των εξόδων).....	53
Πίνακας 5-8: Ποσοστά Βελτίωσης TUC (με απελευθέρωση των εξόδων).....	54
Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου I - 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).....	56
Πίνακας 5-10: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου I - 3 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).....	59
Πίνακας 5-11: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου II (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).	62
Πίνακας 5-12: Αποτελέσματα προσομοίωσης σταθερού πλάνου σηματοδότησης.....	65
Πίνακας 5-13: Αποτελέσματα προσομοίωσης στρατηγικής TUC.	66
Πίνακας 5-14: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC).	71
Πίνακας 5-15: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου I - 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).....	76
Πίνακας 5-16: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου II (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).	81
Πίνακας 5-17: Συνοπτικά αποτελέσματα 1 ^{ου} Σεναρίου ζήτησης.	84
Πίνακας 5-18: Συνοπτικά αποτελέσματα 2 ^{ου} Σεναρίου ζήτησης.	84
Πίνακας 5-19: Αποτελέσματα προσομοίωσης 1 ^{ου} σεναρίου ζήτησης με σταθερό πλάνο σηματοδότησης.....	85
Πίνακας 5-20: Αποτελέσματα προσομοίωσης 2 ^{ου} σεναρίου ζήτησης με σταθερό πλάνο σηματοδότησης.....	85

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά τη διερεύνηση της εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου TUC στο αστικό δίκτυο Κηφισίας-Αττικής Οδού. Το συγκεκριμένο δίκτυο, και ιδιαίτερα ο κόμβος (δακτύλιος) της Αττικής Οδού με τη Λεωφόρο Κηφισίας είναι μια κρίσιμη υποδομή, τόσο για τις τοπικές, όσο και για τις ευρύτερες κυκλοφοριακές συνθήκες επί των διασταυρούμενων αξόνων. Η διαρκής ανάπτυξη της περιοχής τα τελευταία χρόνια οδηγεί σε υποβάθμιση της ικανότητας της υποδομής του οδικού δικτύου.

Η παρούσα μελέτη έχει σκοπό τη διερεύνηση της εφαρμογής των μεθόδων της επενέργειας και επέκτασης πρασίνου στην περιοχή του δικτύου Αττικής Οδού και Λεωφόρου Κηφισίας μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης. Η συγκεκριμένη μελέτη έρχεται να συμπληρώσει τις προηγούμενες εργασίες σχεδιασμού και εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου TUC στην συγκεκριμένη περιοχή, από το Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επιπρόσθετα με την μελέτη των προαναφερθέντων μεθόδων γίνεται η έρευνα βελτιστοποίησης πλάνων σηματοδότησης σε δακτύλιο (roundabout) με χρήση του αλγορίθμου των Nelder-Mead, όπου χρησιμοποιήθηκε επίσης η περιοχή του δακτυλίου Αττικής Οδού και Λεωφόρου Κηφισίας. Η προσομοίωση του δικτύου και των κυκλοφοριακών συνθηκών πραγματοποιήθηκε στον μικροσκοπικό προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι η εφαρμογή των μεθόδων της επενέργειας και επέκτασης πρασίνου μπορούν να βελτιώσουν ακόμη περισσότερο τη δυνατότητα εξυπηρέτησης δικτύων, με παράλληλη λειτουργία της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου TUC αρκεί το δίκτυο που εφαρμόζονται να μπορεί να υποστηρίξει την αύξηση του αριθμού οχημάτων που εξυπηρετούνται μέσω των εξόδων του. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επίσης έδειξαν ότι η εφαρμογή του αλγορίθμου των Nelder-Mead, μπορεί να εξάγει πλάνα σηματοδότησης που με περαιτέρω μελέτη στο μέλλον θα μπορέσουν να κριθούν εφαρμόσιμα σε πραγματικό δίκτυο.

1 Εισαγωγή

1.1 Έλεγχος Κυκλοφορίας

Οι οδικές μεταφορές αντιμετωπίζουν ολοένα και αυξανόμενα προβλήματα καθώς η κινητικότητα των ανθρώπων και των αγαθών ακολουθεί σταθερά αυξητική πορεία. Το αποτέλεσμα είναι κυκλοφοριακές συμφορήσεις να παρουσιάζονται πλέον όχι μόνο στις μεγάλες πόλεις αλλά και στις μικρότερες, όπως επίσης και σε αυτοκινητοδρόμους υψηλής χωρητικότητας, με επακόλουθα την αύξηση του απαιτούμενου χρόνου ταξιδιού, τη μειωμένη οδική ασφάλεια, την αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και τη σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση. Η συνεχής επέκταση της υπάρχουσας υποδομής δεν μπορεί πλέον να εξαλείψει πλήρως την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τις αρνητικές συνέπειες της για λόγους οικονομικούς, οικολογικούς ή και απλά έλλειψης χώρου.

Μια εναλλακτική και εφικτή προσέγγιση προς την επίλυση των κυκλοφοριακών προβλημάτων, η οποία δέχθηκε ισχυρή ώθηση με τις αλματώδεις εξελίξεις στην τεχνολογία των επικοινωνιών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών (τηλεματική), είναι η ορθολογική και πλήρης αξιοποίηση και χρήση της υπάρχουσας υποδομής μέσω της ανάπτυξης και υλοποίησης σύγχρονων μορφών ελέγχου και διαχείρισης. Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας των επικοινωνιών και των υπολογιστών καθώς και του Αυτόματου Ελέγχου και των μεθοδολογιών Βελτιστοποίησης αποτέλεσαν αρωγούς στην προσπάθεια αυτή.

1.2 Παρουσίαση Προβλήματος

Η παρούσα μελέτη έχει σκοπό τη διερεύνηση της εφαρμογής των μεθόδων της επενέργειας (Gap Cutting) και επέκτασης πρασίνου (Green Extend) στην περιοχή του δικτύου Αττικής Οδού και Λεωφόρου Κηφισίας μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης. Η συγκεκριμένη μελέτη έρχεται να συμπληρώσει τις προηγούμενες εργασίες σχεδιασμού και εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου TUC στην συγκεκριμένη περιοχή, από το Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επιπρόσθετα με την μελέτη των προαναφερθέντων μεθόδων γίνεται η έρευνα βελτιστοποίησης πλάνων σηματοδότησης σε δακτύλιο (roundabout) με χρήση του αλγορίθμου των Nelder-Mead, όπου χρησιμοποιήθηκε επίσης η περιοχή του δακτυλίου Αττικής Οδού και Λεωφόρου Κηφισίας.

Ο κόμβος (δακτύλιος) της Αττικής Οδού με την Λεωφόρο Κηφισίας είναι μια κρίσιμη υποδομή, τόσο για τις τοπικές, όσο και για τις ευρύτερες κυκλοφοριακές συνθήκες επί των διασταυρούμενων αξόνων. Ο δακτύλιος λειτουργεί, επί του παρόντος, με σταθερή φωτεινή σηματοδότηση. Αν και ο κύριος κυκλοφοριακός όγκος της Λεωφόρου Κηφισίας διοχετεύεται χωρίς χρήση φωτεινής σηματοδότησης κάτωθεν

του δακτυλίου, τα διάφορα κέντρα πολυποίκιλων δραστηριοτήτων που αναπτύχθηκαν στην περιοχή (εταιρείες, ιατρικά κέντρα, κέντρα αναψυχής, αθλητικών εκδηλώσεων κλπ.) δημιουργούν μια σημαντική ζήτηση στο άνω τμήμα της Λεωφόρου Κηφισίας που διέρχεται από τον δακτύλιο. Πέραν του αξιοσημείωτου όγκου της, κατά τις ώρες κυκλοφοριακής αιχμής, η ζήτηση αυτή παρουσιάζει και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (εντός ή εκτός ωρών αιχμής), όπως, επί παραδείγματι, υψηλότερες βραχύχρονες τιμές λόγω πρόσβασης προς ή αποχώρησης από συγκεκριμένα σημεία μεγάλου αριθμού οχημάτων κατά την αρχή ή το τέλος αθλητικών και άλλων εκδηλώσεων κλπ.

Η Αττική Οδός διέρχεται επίσης κάτωθεν του δακτυλίου, με δύο όμως εξόδους της (από τις αντίστοιχες κατευθύνσεις κυκλοφορίας) να καταλήγουν σε αυτόν. Προβλήματα κυκλοφοριακού κορεσμού και συμφόρησης που παρατηρούνται επί του δακτυλίου κατά τις ώρες αιχμής, δημιουργούν ουρές οχημάτων στις αντίστοιχες 4 προσβάσεις, και ειδικά στις εξόδους της Αττικής Οδού, με αποτέλεσμα την συχνή επέκταση των ουρών μέχρι το κύριο ρεύμα της Αττικής Οδού, την μείωση της ικανότητας του αστικού αυτού αυτοκινητόδρομου και την συνεπακόλουθη εμφάνιση σοβαρής συμφόρησης αρκετών χιλιομέτρων επ' αυτού, που οδηγεί σε σημαντικές καθυστερήσεις για χιλιάδες (εμμέσως) εμπλεκόμενων οχημάτων.

1.3 Δομή της Εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, αναλύεται η στρατηγική ελέγχου πραγματικού χρόνου TUC, που θα λειτουργεί παράλληλα με την επένδυση και επέκταση πρασίνου που επίσης παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο. 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 3^ο Κεφάλαιο. Στο 4^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στοιχεία της μοντελοποίησης και προσομοίωσης του δικτύου, τα σενάρια ζήτησης και ελέγχου. Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το δίκτυο που εξετάζεται. Στο Κεφάλαιο 6^ο γίνεται η εφαρμογή του αλγορίθμου των Nelder – Mead, με αποτελέσματα

προσομοιώσεων-πιθανά πλάνα σηματοδότησης. Τέλος στο Κεφάλαιο 7 υπάρχουν τα συμπεράσματα και πιθανές επεκτάσεις της μελέτης.

2 Έλεγχος Κυκλοφορίας Αστικών Δικτύων

2.1 Εισαγωγή

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση στα αστικά δίκτυα εμφανίζει αυξητικές τάσεις στη σημερινή εποχή, με αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου χρόνου ταξιδιού, τη μειωμένη κυκλοφοριακή ασφάλεια, την αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και τη μόλυνση του περιβάλλοντος. Η έλλειψη χώρου στις πόλεις καθιστά την περαιτέρω επέκταση του δικτύου αδύνατη, με αποτέλεσμα την αναζήτηση άλλων λύσεων που θα αντιμετωπίσουν τα προβλήματα αυτά με τη καλύτερη χρησιμοποίηση του υπάρχοντος δικτύου. Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας των επικοινωνιών και των υπολογιστών καθώς και του Αυτόματου Ελέγχου και των μεθοδολογιών Βελτιστοποίησης αποτέλεσαν αρωγούς στην προσπάθεια αυτή.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν, συνοπτικά η λειτουργία της TUC (Traffic Responsible Urban Control) μιας και η λειτουργία της θα θεωρείται δεδομένη στη συνέχεια παράλληλα με την εφαρμογή της επενέργειας και της λειτουργίας δυο διαφορετικών μεθόδων επέκτασης πρασίνου.

2.2 Στρατηγική Ελέγχου Πραγματικού Χρόνου TUC

Η στρατηγική TUC (Traffic-responsive Urban Control) είναι μία καινοτόμος στρατηγική ελέγχου φωτεινών σηματοδοτών πραγματικού χρόνου για αστικά οδικά δίκτυα που μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού όταν αυτό είναι εφικτό. Η στρατηγική TUC δεν απαιτεί υψηλούς υπολογιστικούς φόρτους και έχει χαμηλές απαιτήσεις επικοινωνίας συγκριτικά με άλλες διαθέσιμες στρατηγικές πραγματικού χρόνου.

Η στρατηγική TUC αποτελείται από 4 τμήματα (modules) για: έλεγχο ποσοστού πρασίνου φάσεων (split control), έλεγχο περιόδου (cycle control), έλεγχο χρονικής μετατόπισης (offset control) και την προτεραιότητα των μέσων μαζικής μεταφοράς. Στην παράγραφο αυτή θα αναπτυχθεί μόνο το πρώτο τμήμα της στρατηγικής (έλεγχος ποσοστού πρασίνων), το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εφαρμογή. Βασικός στόχος ελέγχου για αυτό το τμήμα ήταν η ελαχιστοποίηση του κινδύνου υπερκορεσμού και της διάχυσης των ουρών στο δίκτυο. Αυτό επιχειρήθηκε μέσω της κατάλληλης διαχείρισης της διάρκειας του πρασίνου στις σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις για δεδομένη διάρκεια περιόδου και δεδομένες χρονικές μετατοπίσεις (offsets) περιόδου σε διαδοχικές διασταυρώσεις. Τα αποτελέσματα του ελέγχου (διάρκειες πρασίνων) προέκυψαν από την εφαρμογή ενός απλού κανόνα ελέγχου με ανατροφοδότηση (feedback).

2.2.1 Ορισμοί Και Περιορισμοί

Θεωρούμε μία σηματοδοτούμενη διασταύρωση $j \in J$ (όπου J το σύνολο σηματοδοτούμενων κόμβων του δικτύου) με περίοδο C_j (κοινή για όλες τις υπό

έλεγχου διασταυρώσεις) η οποία περιλαμβάνει ένα σύνολο σταδίων (stages) i που ανήκουν στο σύνολο F_j' και μπορούν να διαχωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μεταβλητά στάδια, τα οποία ανήκουν στο σύνολο F_j και υπόκεινται σε τροποποιήσεις πραγματικού χρόνου μέσα σε δεδομένα όρια.
- Σταθερά στάδια που ανήκουν στο σύνολο $F_j' - F_j$ τα οποία έχουν σχεδιαστεί για λόγους ασφαλείας (ή άλλους) και οποιαδήποτε τροποποίησή τους απαγορεύεται (ή δεν είναι σκόπιμη ή απαραίτητη).

Η στρατηγική TUC τροποποιεί μόνο τα μεταβλητά στάδια, και πιο συγκεκριμένα τη διάρκεια του πρασίνου εντός προκαθορισμένων ορίων. Οι αντίστοιχοι περιορισμοί μπορούν να διατυπωθούν ως ακολούθως:

$$\sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j = C \quad \forall j \in J \quad (1)$$

$$g_{j,i,min} \leq g_{j,i} \leq g_{j,i,max}$$

όπου $g_{j,i}$ είναι η διάρκεια πράσινου του σταδίου $i \in F_j$ της διασταύρωσης j , $g_{j,i,min}$ είναι η αντίστοιχη ελάχιστη επιτρεπόμενη διάρκεια πράσινου του σταδίου, $g_{j,i,max}$ είναι η αντίστοιχη μέγιστη επιτρεπόμενη διάρκεια πράσινου του σταδίου και L_j είναι ο συνολικός χαμένος χρόνος της διασταύρωσης j που περιλαμβάνει και τη συνολική διάρκεια των σταθερών σταδίων.

2.2.2 Στρατηγική TUC

Στόχος του ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου υπερκορεσμού και της διάχυσης των ουρών στο δίκτυο με κατάλληλη τροποποίηση της διάρκειας των πρασίνων όλων των μεταβλητών σταδίων όλων των διασταυρώσεων του δικτύου. Αυτό επιχειρείται μέσω της εφαρμογής του ακόλουθου κανόνα ελέγχου, ο οποίος προκύπτει από την επίλυση ενός κατάλληλου Γραμμικού-Τετραγωνικού Προβλήματος βέλτιστου ελέγχου, και υπολογίζει σε κάθε περίοδο τους νέους χρόνους πρασίνου για τα μεταβλητά στάδια $i \in F_j$ των διασταυρώσεων $j \in J$, που πρέπει να εφαρμοστούν κατά την επόμενη περίοδο:

$$\mathbf{g}(k) = \mathbf{g}^N - \mathbf{L} \cdot \mathbf{x}(k) \quad (2)$$

όπου,

- $k=1,2,\dots$ είναι ο αριθμός της περιόδου,
- \mathbf{g} είναι το διάνυσμα των νέων χρόνων πρασίνου $G_{j,i}$, $\forall i \in F_j, \forall j \in J$,
- \mathbf{g}^N είναι το διάνυσμα των ονομαστικών τιμών του πρασίνου $g_{j,i}^N$ για τα μεταβλητά στάδια $i \in F_j$ των διασταυρώσεων $j \in J$, δηλαδή ένα προκαθορισμένο σταθερό πλάνο σηματοδότησης,

- x είναι το διάνυσμα με στοιχεία $x_z(k)$, όπου x_z είναι ο αριθμός των οχημάτων μέσα στο σύνδεσμο $z \in Z$,
- L είναι ένας σταθερός πίνακας διαστάσεων $n \times m$ όπου n είναι ο αριθμός των σταδίων $i \in F_j$ όλων των διασταυρώσεων $j \in J$, και m είναι ο αριθμός όλων των συνδέσμων $z \in Z$. Ο πίνακας L αποτελεί το υπολογιστικό αποτέλεσμα του προαναφερθέντος προβλήματος Γραμμικού Τετραγωνικού Ελέγχου και ο υπολογισμός του πραγματοποιείται κατά το σχεδιασμό της στρατηγικής για ένα συγκεκριμένο δίκτυο εφαρμογής.

Για την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου (2), απαιτείται η διαθεσιμότητα των μετρήσεων x_z (αριθμός οχημάτων) σε όλους του συνδέσμους $z \in Z$ σε πραγματικό χρόνο. Όμως ο αριθμός οχημάτων δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα, εκτός αν υπάρχουν κατάλληλοι αισθητήρες τεχνητής όρασης. Έτσι, τα x_z εκτιμώνται βάσει των μετρήσεων φωρατών (ένας φωρατής ανά σύνδεσμο).

Επειδή ο κανόνας ελέγχου (2) δεν λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς ελέγχου (1), πρέπει αυτοί να εφαρμοστούν μετά την εκτέλεση του κανόνα ελέγχου (2). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός κατάλληλου προβλήματος βελτιστοποίησης που επιλύεται σε πραγματικό χρόνο για κάθε διασταύρωση, έτσι ώστε να καθοριστούν οι επιτρεπτές τιμές της διάρκειας των πράσινων $g_{j,i}$ που προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο (σε ποσοστό επί της περιόδου - split) τα $G_{j,i}$ που προκύπτουν από τον κανόνα (2). Το πρόβλημα αυτό έχει ως ακολούθως:

Δεδομένων των $G_{j,i}$ που έχουν προκύψει από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου, να προσδιοριστούν τα $g_{j,i} \forall i \in F_j$, έτσι ώστε:

$$\varphi = \frac{1}{2} \sum_{i \in F_j} \frac{(g_{j,i} - G_{j,i})^2}{G_{j,i}} \rightarrow \text{Min} \quad (3)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j = C \quad (4)$$

$$g_{j,i,\min} \leq g_{j,i} \leq g_{j,i,\max}$$

Το πρόβλημα αυτό καθορίζει τη διάρκεια των πράσινων $g_{j,i}$ που προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τα $G_{j,i}$ και ικανοποιούν τους περιορισμούς (4). Η επίλυση του (3)–(4) γίνεται με τη χρήση ενός απλού αλγορίθμου (knapsack algorithm) ο οποίος συγκλίνει στην ακριβή λύση σε πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων που δεν υπερβαίνουν τον αριθμό $|F_j|$ των μεταβλητών σταδίων της διασταύρωσης j .

2.3 Επενέργεια

Στη συγκεκριμένη εργασία θα διερευνηθεί η επέκταση της εφαρμογής της TUC μέσω τοπικής επενέργειας στην κυκλοφορία. Συγκεκριμένα, οι διάρκειες φάσεων που αποφασίζει η TUC μπορούν να μειωθούν με απόφαση του τοπικού ρυθμιστή, αν δεν διέρχονται οχήματα στους αντίστοιχους συνδέσμους πρόσβασης, με αποτέλεσμα την άμεση μετάβαση στην επόμενη φάση.

Η επενέργεια χρησιμοποιεί μετρήσεις κυκλοφορίας πραγματικού χρόνου για να υπολογίσει τις κατάλληλες μειώσεις αν δεν διέρχονται οχήματα. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με φωρατές. Οι φωρατές είναι ηλεκτρομαγνητικοί 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, της ταχύτητας οχημάτων κ.α. Στη δεδομένη εφαρμογή οι φωρατές τοποθετούνται σε συγκεκριμένη απόσταση από τους φωτεινούς σηματοδότες, και αν δεν διέρθουν οχήματα από το σύνολο των φωρατών του υπό εξέταση ρεύματος για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τότε η φάση πρασίνου του ρεύματος διακόπτεται και προχωρούμε στην επόμενη φάση. Λεπτομερή περιγραφή των αποστάσεων και των χρόνων για τη μελέτη θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 4.

Η εφαρμογή της επενέργειας έχει εφαρμοστεί σε διάφορα πακέτα στρατηγικών ελέγχου φωτεινών σηματοδοτών πραγματικού χρόνου στο παρελθόν και μπορεί να προσφέρει σημαντικά θετικά αποτελέσματα ειδικά σε περιόδους μη υψηλής ζήτησης αλλά ακόμη και σε περιπτώσεις υψηλής ζήτησης όταν αυτό είναι εφικτό.

2.4 Επέκταση Πρασίνου

Η επέκταση πρασίνου είναι μια γνωστή μέθοδος που βρίσκει εφαρμογή στη συγκεκριμένη μελέτη. Είναι ένα σύνολο τρόπων-παρεμβάσεων που μπορούν να δώσουν περισσότερο χρόνο πρασίνου σε συνδέσμους που παρατηρείται ότι σπαταλάται πράσινο λόγω μπλοκαρίσματος των εξόδων τους ή να καθυστερήσουν την πράσινη φάση συνδέσμων που είναι μπλοκαρισμένοι παρατείνοντας το πράσινο κάποιου άλλου συνδέσμου.

Η μέθοδος επέκτασης πρασίνου σχεδιάστηκε για το εξεταζόμενο αστικό δίκτυο όπου παρατηρούνται προβλήματα κυκλοφοριακού κορεσμού και συμφόρησης επί του δακτυλίου κατά τις ώρες αιχμής, με δημιουργία ουρών οχημάτων στις αντίστοιχες 4 προσβάσεις, και ιδιαίτερα σε μια από τις εξόδους της Αττικής Οδού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη σπατάλη πρασίνου λόγω του μπλοκαρίσματος και τη συχνή επέκταση των ουρών μέχρι το κύριο ρεύμα της Αττικής Οδού, τη μείωση της ικανότητας του αστικού αυτού αυτοκινητόδρομου και τη συνεπακόλουθη εμφάνιση σοβαρής συμφόρησης αρκετών χιλιομέτρων επ' αυτού, που οδηγεί σε σημαντικές καθυστερήσεις για χιλιάδες (εμμέσως) εμπλεκόμενων οχημάτων. Για αυτό το λόγο

θα εφαρμοστούν δυο διαφορετικές παρεμβάσεις επέκτασης πρασίνου στη μια από τις δυο εξόδους της Αττικής Οδού.

Για τις εφαρμογές της επέκτασης πρασίνου θα χρησιμοποιηθούν , όπως και στην επενέργεια, μετρήσεις ποσοστού κατάληψης από φωρατές. Λεπτομερής περιγραφή της εγκατάστασης (αποστάσεις, ποσοστά κατάληψης) θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

3 Μικροσκοπικός Προσομοιωτής Οδικών Δικτύων AIMSUN

Η εφαρμογή της στρατηγικής TUC στο δίκτυο Κηφισίας-Παρ. Αττικής Οδού θα διερευνηθεί μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης πριν από την εφαρμογή πεδίου. Ως μικροσκοπικός προσομοιωτής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό AIMSUN, τα χαρακτηριστικά του οποίου σκιαγραφούνται στο παρόν κεφάλαιο.

3.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), περιλαμβάνει έναν μικροσκοπικό προσομοιωτή κυκλοφορίας οδικών δικτύων και το περιβάλλον προσομοίωσης AIMSUN NG. Ο προσομοιωτής AIMSUN αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο σχεδιασμού και αξιολόγησης κυκλοφοριακών συστημάτων και στρατηγικών ελέγχου, καθώς παρέχει τη δυνατότητα δοκιμής νέων συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας πριν από την ενδεχόμενη εφαρμογή πεδίου.

Ο προσομοιωτής AIMSUN ακολουθεί μία μικροσκοπική προσέγγιση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στο περιβάλλον AIMSUN NG. Αυτό σημαίνει ότι μοντελοποιείται η συμπεριφορά κάθε οχήματος 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 διαδρομής, καθυστερήσεις κ.α.) και δεδομένα που συλλέγονται από φωρατές σε διάφορα σημεία του δικτύου (αριθμός οχημάτων, ποσοστό κατάληψης, ταχύτητα κ.α.).

3.2 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.

3.2.1 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 μπορούν 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.

3.2.2 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. 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 εξ' ορισμού το AIMSUN είναι η εκθετική κατανομή. Ο χρήστης όμως μπορεί να επέμβει και εδώ.

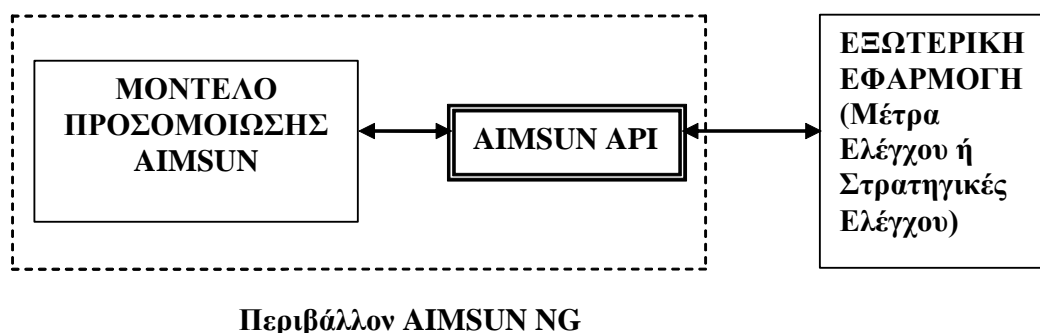
3.2.3 Έλεγχος Κυκλοφορίας

Η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε έναν αστικό κόμβο (διασταύρωση), στον προσομοιωτή AIMSUN πραγματοποιείται μέσω μίας προσέγγισης που βασίζεται σε κυκλοφοριακές φάσεις όπου η περίοδος του κόμβου χωρίζεται σε φάσεις και κάθε φάση αντιστοιχίζεται με μία συγκεκριμένη ομάδα φωτεινών σηματοδοτών που έχουν κυκλοφοριακή προτεραιότητα ταυτόχρονα. Η διάρκεια κάθε φάσης δίνεται σε δευτερόλεπτα και ισοδυναμεί με χρόνο πρασίνου για την ομάδα των φωτεινών σηματοδοτών της αντίστοιχης φάσης.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, το AIMSUN εκτελεί το πλάνο σηματοδότησης που έχει οριστεί, λαμβάνοντας υπόψη τη δομή των φάσεων σε κάθε κόμβο. Εντούτοις, το πλάνο σηματοδότησης μπορεί να μεταβληθεί για κάποιες περιόδους προσομοίωσης. Ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει διαφορετικά πλάνα σηματοδότησης που ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει την εκτέλεση ενός πλάνου σηματοδότησης αλλάζοντας τη διάρκεια των φάσεων ή παραβλέποντας κάποιες φάσεις σε πραγματικό χρόνο προσομοίωσης το οποίο είναι εφικτό μέσω του λογισμικού AIMSUN API του οποίου η περιγραφή θα γίνει στη συνέχεια.

3.3 AIMSUN API

Το AIMSUN API (Application Programming Interface) επεκτείνει τις λειτουργίες του προσομοιωτή καθώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης 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 3-1: Περιβάλλον AIMSUN NG

Το AIMSUN API (Σχήμα 3-1: Περιβάλλον AIMSUN NG Σχήμα 3-1) 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.

3.4 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).

3.4.1 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.

3.4.2 Πείραμα (AIMSUN Experiment)

Το Πείραμα περιέχει κυρίως πληροφορίες για την μοντελοποίηση της κίνησης των οχημάτων και επίσης εκεί 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.

3.4.3 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, ποσοτικά, αποτελέσματα.

3.5 Έξοδοι προσομοίωσης

Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN παρέχει στο χρήστη διάφορες εξόδους, οι βασικότερες εκ των οποίων είναι οι εξής: δυσδιάστατη ή 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, μπορούν 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.

4 Μοντελοποίηση και προσομοίωση του δικτύου

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα στοιχεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης του υπό εξέταση δικτύου στον μικροσκοπικό προσομοιωτή AIMSUN. Συγκεκριμένα, περιγράφεται το δίκτυο και η μοντελοποίησή του με χρήση των εργαλείων του προσομοιωτή, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των σεναρίων ζήτησης και των σεναρίων ελέγχου που θα εφαρμοστούν στο δίκτυο, καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση των διαφόρων σεναρίων ελέγχου.

4.1 Το Δίκτυο

Το δίκτυο που εξετάζεται αποτελείται από τρεις γειτονικούς, αστικούς κόμβους (Σχήμα 4-1), τον κόμβο Κηφισίας-Παραδείσου (Σχήμα 4-2), τον κόμβο Κηφισίας-Αττικής Οδού (Σχήμα 4-3) και τον κόμβο Κηφισίας-Αγ.Κων/νου (Σχήμα 4-4). Κάθε κόμβο προσεγγίζουν τέσσερις σύνδεσμοι και επίσης τέσσερις σύνδεσμοι απομακρύνονται από αυτούς. Χάριν συντομίας οι κόμβοι αυτοί θα αναφέρονται στη συνέχεια ως 1ος, 2ος και 3ος κόμβος, αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ των δύο πρώτων κόμβων είναι 560 m περίπου, ενώ η απόσταση μεταξύ των δύο τελευταίων είναι περίπου 430 m. Για λόγους πληρότητας και ρεαλιστικής περιγραφής των σχετικών φαινομένων, το προσομοιωμένο δίκτυο περιλαμβάνει επίσης το κυρίως τμήμα της λεωφόρου Κηφισίας που διέρχεται κάτω από το δακτύλιο, συμπεριλαμβανομένων των προσβάσεων στο άνω τμήμα της λεωφόρου Κηφισίας που διέρχεται από το δακτύλιο.

4.1.1 Μοντελοποίηση του δικτύου στο AIMSUN

Το εξεταζόμενο δίκτυο μοντελοποιείται στο AIMSUN βάσει των πραγματικών τοπολογικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών και με χρήση των κατάλληλων εργαλείων του προσομοιωτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-5.

4.2 Σενάρια Ζήτησης

Δύο σενάρια ζήτησης, συνολικής διάρκειας 4 ωρών έκαστο, χρησιμοποιήθηκαν για τις διερευνήσεις εφαρμογής διάφορων σεναρίων ελέγχου στο υπό εξέταση δίκτυο. Τα σενάρια ζήτησης για τις εννέα εισόδους του δικτύου (Ο1-Ο9, βλέπε Σχήμα 4-5) είναι βασισμένα σε πραγματικές πληροφορίες προέλευσης-προορισμού και έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

Το πρώτο σενάριο ζήτησης ακολουθεί τραπεζοειδή μορφή σε όλες τις εισόδους του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6. Την πρώτη ώρα της προσομοίωσης η ζήτηση στις εισόδους του δικτύου ξεκινά από μία χαμηλή τιμή (40% της αντίστοιχης μέγιστης ζήτησης) και αυξάνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει τη μέγιστη ζήτηση στο τέλος της πρώτης ώρας. Σημειώνεται ότι η μέγιστη ζήτηση σε κάθε είσοδο (εκτός των εισόδων Ο5 και Ο7), αντιστοιχεί στη μέση ροή που έχει παρατηρηθεί στην



Σχήμα 4-1: Υπό εξέταση δίκτυο.



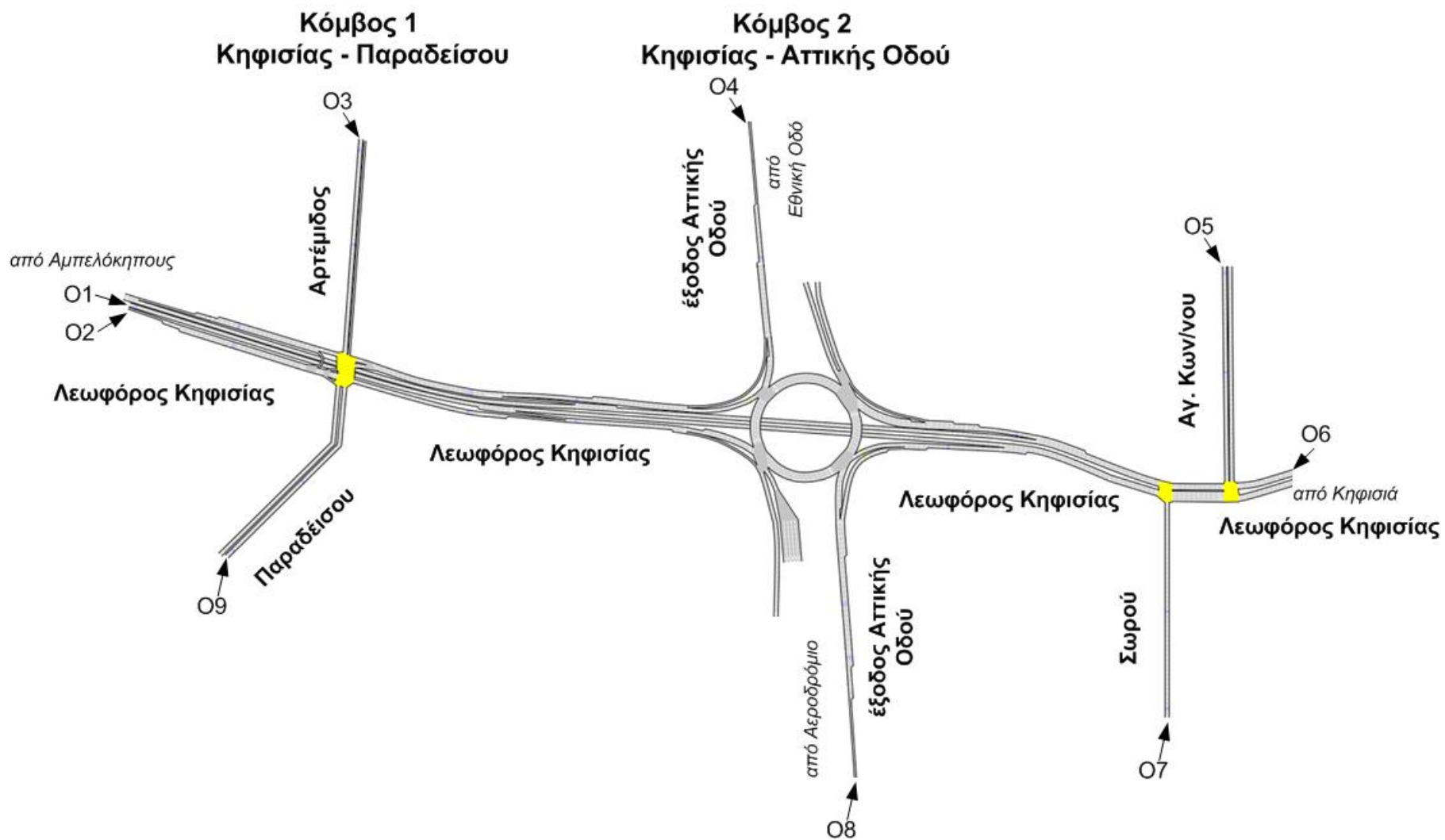
Σχήμα 4-2: Κόμβος Κηφισίας-Παραδείσου.



Σχήμα 4-3: Κόμβος Κηφισίας-Αττικής Οδού.



Σχήμα 4-4: Κόμβος Κηφισίας-Αγ. Κων/νου.



Σχήμα 4-5: Μοντελοποίηση του δικτύου στον προσομοιωτή AIMSUN.

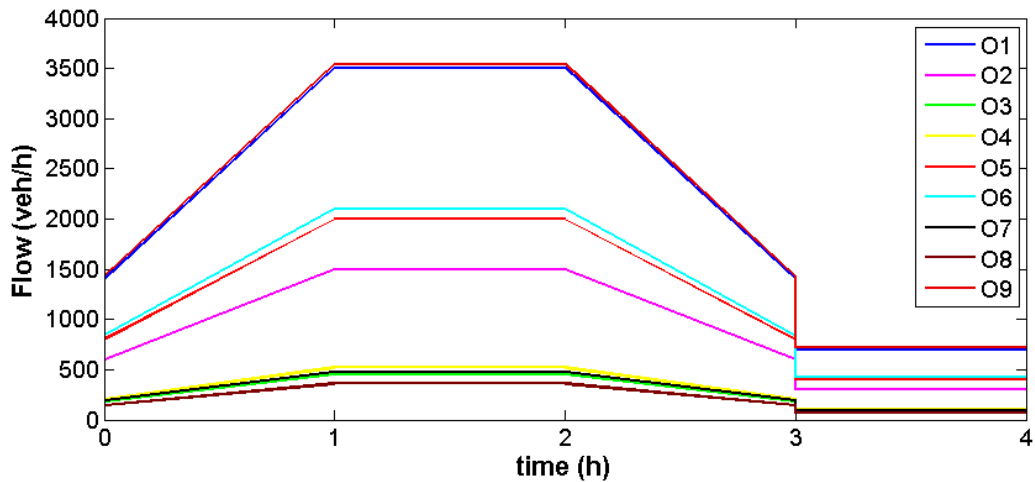
πραγματικότητα στις ώρες αιχμής. Στις εισόδους 05 και 07 η μέγιστη ροή αντιστοιχεί στη ροή που μπορεί να εξυπηρετηθεί σε μία περίοδο από το αντίστοιχο φωτεινό σηματοδότη, ώστε να μην δημιουργούνται στους συνδέσμους αυτούς, υπέρμετρες ουρές (όπως στην πραγματικότητα). Αυτό γίνεται διότι ο αντίστοιχος κόμβος δεν πρόκειται να ελεγχθεί από τη στρατηγική ελέγχου TUC, και δεν θα ήταν επιθυμητό οι κυκλοφοριακές συνθήκες των συγκεκριμένων συνδέσμων να επηρεάσουν τις τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης κατά τη σύγκριση των σεναρίων ελέγχου. Στη δεύτερη ώρα η ζήτηση διατηρεί τη μέγιστη τιμή της σε όλες τις εισόδους. Την τρίτη ώρα προσομοίωσης η ζήτηση αρχίζει σταδιακά να μειώνεται επιστρέφοντας σε μία χαμηλή τιμή (40% της αντίστοιχης μέγιστης ζήτησης) στο τέλος της τρίτης ώρας. Στην τελευταία ώρα προσομοίωσης έχουμε μία πολύ χαμηλή τιμή ζήτησης στις εισόδους του δικτύου (20% της μέγιστης ζήτησης) με στόχο να έχει δίκτυο παρόμοιες κυκλοφοριακές συνθήκες, ανεξαρτήτως του σεναρίου ελέγχου που εφαρμόζεται.

Το δεύτερο σενάριο ζήτησης είναι ίδιο με το πρώτο με μόνη διαφορά ότι έχει προστεθεί, με χρήση των εργαλείων του προσομοιωτή, ένα συμβάν (ακινητοποιημένο όχημα) διάρκειας 8 λεπτών (με χρόνο έναρξης τα 90 λεπτά μετά την αρχή της προσομοίωσης) το οποίο δυσχεραίνει την κίνηση των οχημάτων που εξέρχονται από το δακτύλιο του 2ου κόμβου και κατευθύνονται προς το σημείο συγχώνευσης με την Κηφισιά, στην κατεύθυνση προς Κηφισιά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-7. Το συμβάν αυτό δημιουργεί συμφόρηση η οποία μεταφέρεται προς τα πίσω και μάλιστα εντός του δακτυλίου, γεγονός που παρατηρείται συχνά και στην πραγματικότητα. Έτσι, το σενάριο αυτό επιτρέπει την διερεύνηση αποτελεσματικότητας των σεναρίων ελέγχου σε περιπτώσεις όπου οι σύνδεσμοι εξόδου του δακτυλίου αδυνατούν να απορροφήσουν πλήρως τα αντίστοιχα εξερχόμενα οχήματα.

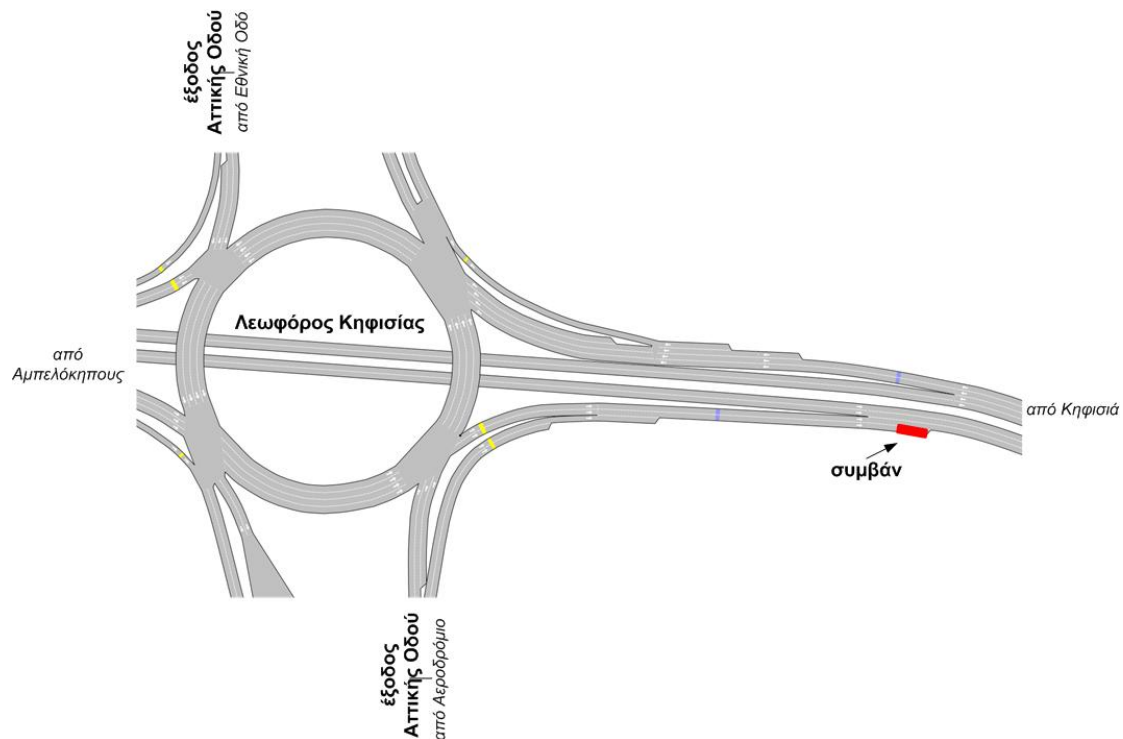
Στόχος των σεναρίων ζήτησης είναι να καταδείξουν τα χαρακτηριστικά κάθε σεναρίου ελέγχου και την αποτελεσματικότητά τους σε διάφορες κυκλοφοριακές συνθήκες του υπό εξέταση δικτύου.

4.3 Σενάρια Ελέγχου

Στη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν πέντε σενάρια ελέγχου στο δίκτυο. Το σταθερό πλάνο σηματοδότησης για τους τρεις κόμβους, η στρατηγική ελέγχου TUC για τον 1^ο και τον 2^ο κόμβο και σταθερό πλάνο για τον 3^ο κόμβο, η επενέργεια στον 1^ο και 2^ο κόμβο (με παράλληλη λειτουργία της TUC), η πρώτη μέθοδος επέκτασης πρασίνου μόνο στο 2^ο κόμβο (με παράλληλη λειτουργία της TUC και της επενέργειας στον 1^ο και 2^ο κόμβο) και η δεύτερη μέθοδος επέκτασης πρασίνου μόνο στο 2^ο κόμβο (με παράλληλη λειτουργία της TUC και της επενέργειας στον 1^ο και 2^ο κόμβο). Παρακάτω περιγράφονται τα χαρακτηριστικά κάθε εξεταζόμενου σεναρίου ελέγχου.



Σχήμα 4-6: Ροή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου.



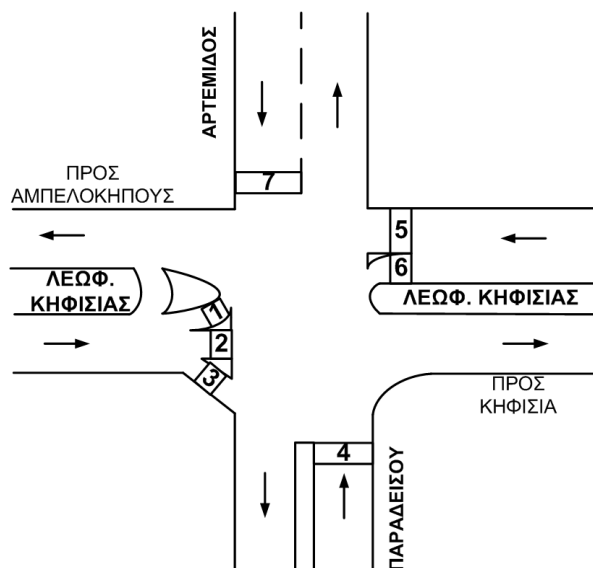
Σχήμα 4-7: Θέση συμβάντος 2^{ου} Σεναρίου Ζήτησης.

4.3.1 Σενάριο 1^ο : Σταθερό Πλάνο Σηματοδότησης

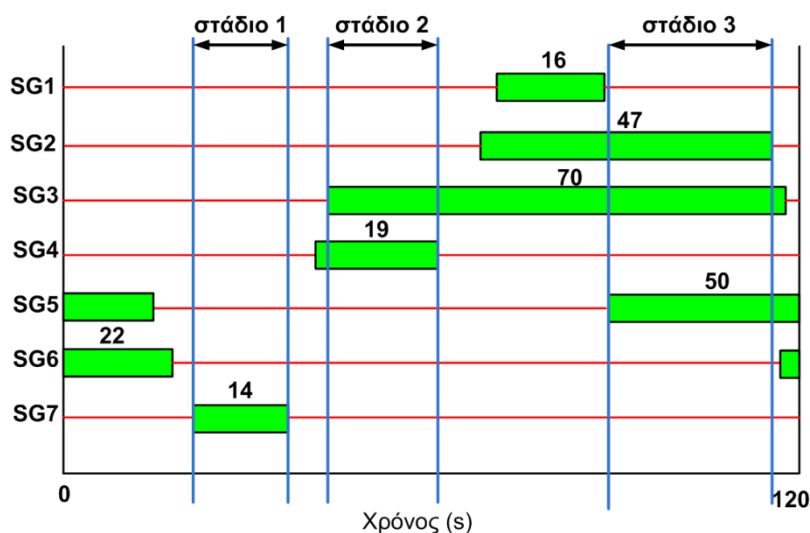
Στο σενάριο αυτό θα γίνει εφαρμογή σταθερών πλάνων και στους τρεις κόμβους του. Στη συνέχεια θα γίνει λεπτομερής περιγραφή των σταθερών πλάνων που αφορούν τον 1^ο και τον 2^ο κόμβο. Ο λόγος που δεν γίνεται εκτενής αναφορά στο σταθερό πλάνο του τρίτου κόμβου είναι το γεγονός ότι το πλάνο που λειτουργεί σε αυτόν κρίνεται ικανοποιητικό για τις ανάγκες του δικτύου, με κύριο χαρακτηριστικό ότι ευνοείται (ευλόγως) η Κηφισίας εις βάρος των δύο κάθετων ρευμάτων, και επομένως δεν υπήρχε πρόθεση αλλαγής του πλάνου αυτού σε πραγματικό χρόνο.

Για τον πρώτο κόμβο (Σχήμα 4-8) το πλάνο σηματοδότησης απεικονίζεται στο Σχήμα 4-9. Οι τρεις κύριες κινήσεις (στάδια) κατά τη διάρκεια της περιόδου είναι: η

διέλευση του ρεύματος της οδού Αρτέμιδος, η διέλευση του ρεύματος της οδού Παραδείσου και η ταυτόχρονη διέλευση των δύο ρευμάτων της Κηφισίας.



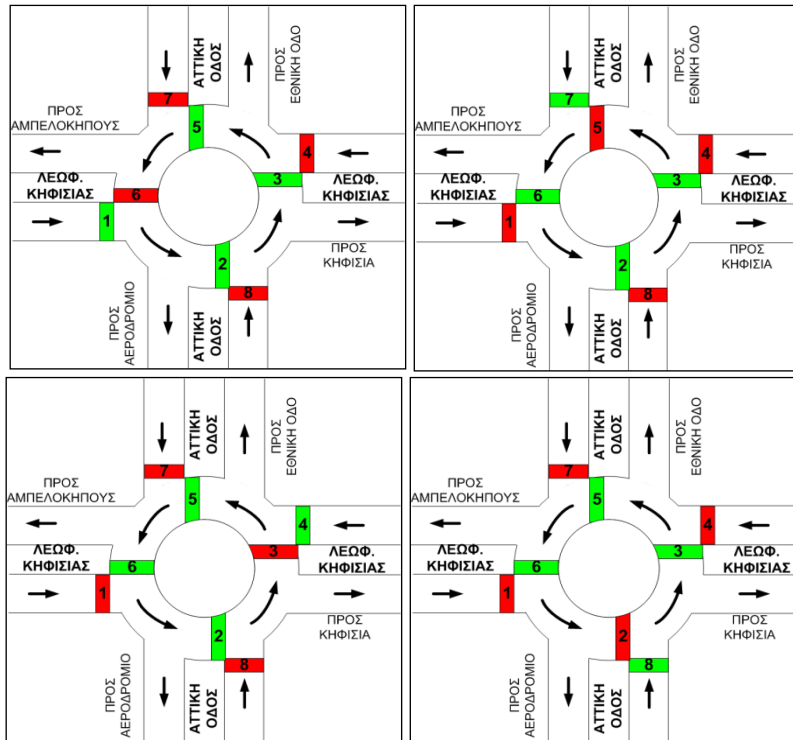
Σχήμα 4-8: Φωτεινή Σηματοδότηση κόμβου Κηφισίας-Παραδείσου.



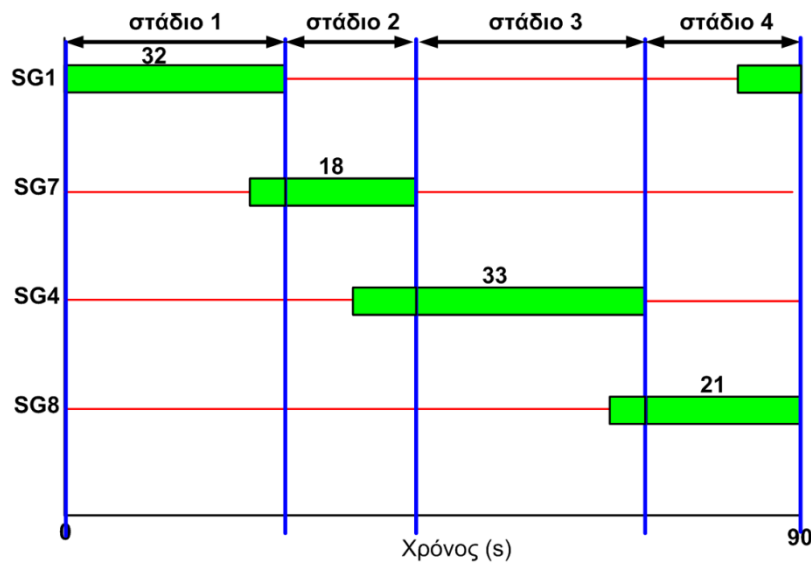
Σχήμα 4-9: Πλάνο Σηματοδότησης κόμβου Κηφισίας-Παραδείσου.

Η μελέτη της τοπολογίας του δακτυλίου οδήγησε σε ένα σταθερό πλάνο σηματοδότησης το οποίο έχει τέσσερα στάδια και η δομή του παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-10. Παρατηρείται ότι σε κάθε ένα από τα τέσσερα στάδια έχει προτεραιότητα ένα αντίστοιχο εισερχόμενο ρεύμα, ενώ τρεις από τους τέσσερις εσωτερικούς φωτεινούς σηματοδότες επιτρέπουν στα οχήματα που εισήλθαν στο δακτύλιο να εξέλθουν από αυτόν ανενόχλητα, μειώνοντας έτσι τις καθυστερήσεις των οχημάτων, αλλά και την πιθανότητα συσσώρευσης μεγάλου αριθμού οχημάτων εντός του δακτυλίου.

Το Σχήμα 4-11 απεικονίζει το σταθερό πλάνο σηματοδότησης, με τις αντίστοιχες διάρκειες πρασίνου, για τους φωτεινούς σηματοδότες των ρευμάτων που εισέρχονται στο δακτύλιο.



Σχήμα 4-10: Κύρια στάδια σταθερού πλάνου σηματοδότησης κόμβου Κηφισίας-Αττικής Οδού.



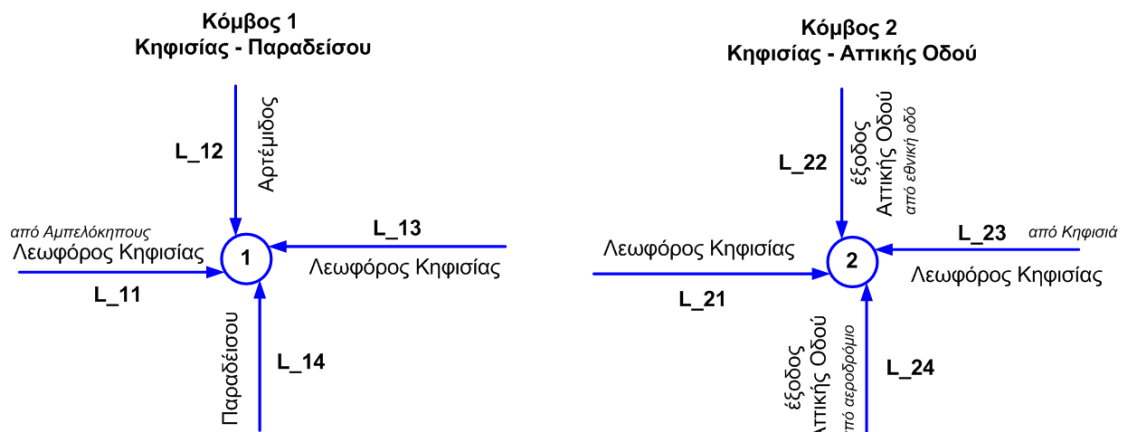
Σχήμα 4-11: Σταθερό πλάνο σηματοδότησης κόμβου Κηφισίας-Αττικής Οδού με επιπλέον χρόνο πρασίνου.

4.3.2 Σενάριο 2^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC

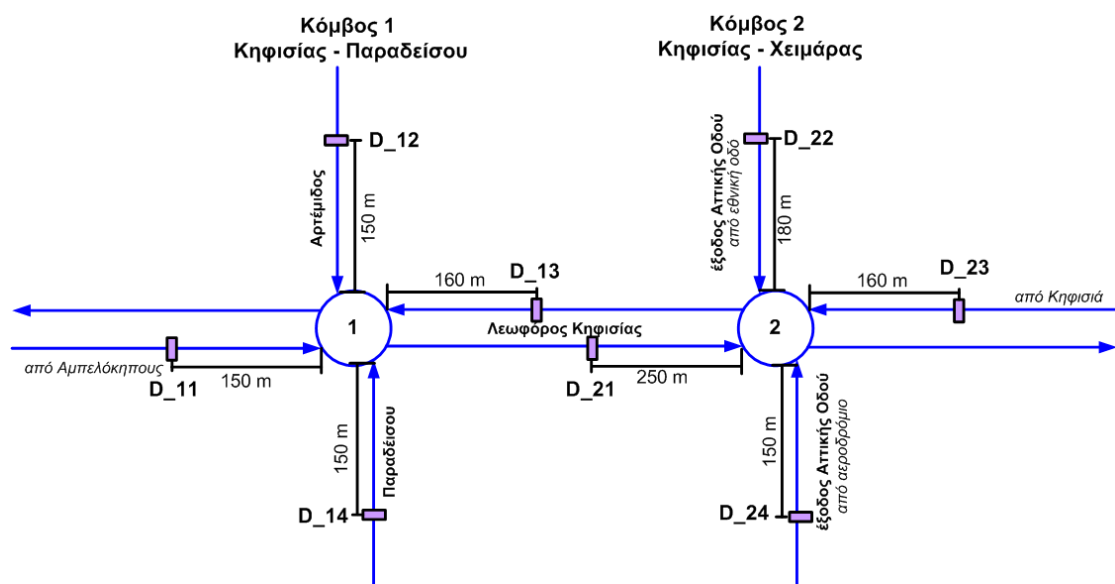
Η ιδιαίτερη μορφολογία του δικτύου που εξετάζεται επιβάλλει διαφορετική διάρκεια περιόδου για κάθε κόμβο (120s για τον πρώτο κόμβο και 90 s για το δεύτερο κόμβο), το οποίο δεν είναι εφικτό στην παρούσα μορφή της στρατηγικής TUC. Επίσης, λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των δύο κόμβων, δεν θεωρείται σημαντικός ο χρονικός συντονισμός (offset) των δύο κόμβων. Οι λόγοι αυτοί οδήγησαν στην εφαρμογή της TUC σε κάθε κόμβο ξεχωριστά, με σταθερή διάρκεια

περιόδου σε κάθε κόμβο, και εφαρμογή μόνο του πρώτου τμήματος της TUC (έλεγχος ποσοστού πρασίνων). Αποφασίστηκε επίσης να μην εφαρμοστεί η TUC στον τρίτο κόμβο όπου, βάσει του σταθερού πλάνου, ευνοείται (ευλόγως) η Κηφισίας εις βάρος των δύο κάθετων ρευμάτων. Ενδεχόμενη εφαρμογή της TUC στον κόμβο αυτό δεν θα μπορούσε να ευνοήσει την Κηφισίας περισσότερο ενώ μία ενδεχόμενη μείωση του χρόνου πρασίνου που της παρέχεται θα μπορούσε να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα σ' αυτήν τη σημαντική αρτηρία κατά τις ώρες αιχμής. Τα σταθερά πλάνα του 1^{ου} και 2^{ου} κόμβου (τα οποία περιγράφηκαν στο Υποκεφάλαιο 4.3.1) χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την εφαρμογή της TUC.

Σε αυτό το σενάριο ελέγχου, η στρατηγική TUC λαμβάνει υπόψη μόνο τους συνδέσμους που προσεγγίζουν τους υπό εξέταση κόμβους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-12. Στο Σχήμα 4-13 απεικονίζονται οι θέσεις των φωρατών σε κάθε σύνδεσμο του δικτύου, ένας ανά λωρίδα συνδέσμου. Αυτοί οι φωρατές θα χρησιμοποιηθούν για τη λήψη μετρήσεων πραγματικού χρόνου κατά την εφαρμογή



Σχήμα 4-12: Μοντελοποίηση των κόμβων του δικτύου στην TUC χωρίς συνδέσμους εξόδου.



Σχήμα 4-13: Θέση φωρατών στο υπό εξέταση δίκτυο.

Πίνακας 4-1: Περιγραφή των συνδέσμων του δικτύου.

Σύνδεσμος	Μήκος (m)	Χωρητικότητα (veh)	Ροή Κορεσμού (veh/h)
L_11	300	180	5000
L_12	300	120	3000
L_13	560	336	5000
L_14	300	120	3000
L_15	300	180	5000
L_21	560	224	3600
L_22	480	288	5000
L_23	430	258	5000
L_24	370	222	5000
L_25	430	172	3600

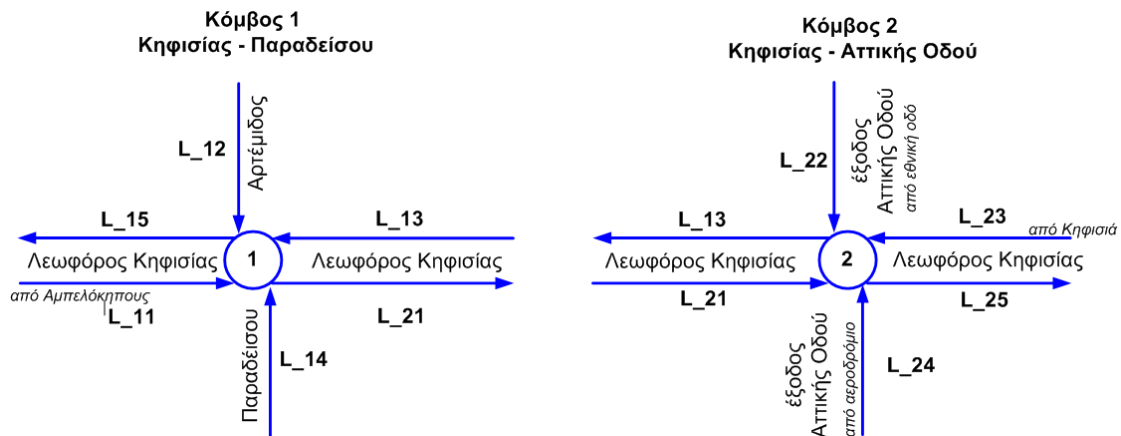
Πίνακας 4-2: Περιγραφή της σηματοδότησης των κόμβων του δικτύου.

Κόμβος (j)	Σύνολο Φάσεων (F _j)	Περίοδος (C _j σε s)	Χαμένος Χρόνος (L _j σε s)	Ελάχιστος Χρόνος Πρασίνου (g _{j,min} σε s)				Ονομαστικές Διάρκειες φάσεων (L _j σε s)			
				i=1	i=2	i=3	i=4	i=1	i=2	i=3	i=4
1	{1,2,3}	120	63	7	7	7	–	25	14	18	–
2	{1,2,3,4}	90	14	8	8	8	8	25	11	26	14

της TUC, αλλά και για να αξιολογηθούν και να συγκριθούν οι κυκλοφοριακές συνθήκες στους συνδέσμους του δικτύου κατά την εφαρμογή των πέντε σεναρίων ελέγχου.

Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει όλες τις παραμέτρους (μήκος, χωρητικότητα, ροή κορεσμού) των συνδέσμων του δικτύου (όπου οι σύνδεσμοι L_15, L_25 εμφανίζονται στο Σχήμα 4-14). Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει λεπτομερώς τα στοιχεία των ελεγχόμενων κόμβων που χρησιμοποιούνται από τη στρατηγική ελέγχου, ενώ Πίνακας 4-3 παρουσιάζει για κάθε σύνδεσμο τον κόμβο στον οποίο ανήκει καθώς και τις φάσεις (στάδια) κατά τις οποίες λαμβάνει πράσινο. Σημειώνεται ότι οι ελάχιστοι χρόνοι πρασίνου που περιέχει ο Πίνακας 4-2 εγγυώνται την ασφαλή διέλευση πεζών από τις διαβάσεις των κόμβων υπό οποιαδήποτε επιτρεπτή απόφαση της TUC.

Για την εφαρμογή της TUC απαιτείται να καθοριστεί ο πίνακας ελέγχου **L** σύμφωνα με τον κανόνα ελέγχου. Το πρόβλημα ελέγχου περιλαμβάνει τέσσερις μεταβλητές κατάστασης για κάθε κόμβο, που αντιστοιχούν στους αριθμούς οχημάτων εντός των αντίστοιχων συνδέσμων του ελεγχόμενου δικτύου και τρεις μεταβλητές ελέγχου για τον πρώτο κόμβο και τέσσερις μεταβλητές ελέγχου για το δεύτερο κόμβο, που αντιστοιχούν στις διάρκειες φάσεων των δύο κόμβων. Τις τιμές του πίνακα ελέγχου **L** (που υπολογίστηκαν μέσω διαθέσιμου λογισμικού ανάπτυξης της TUC) για τον πρώτο και το δεύτερο κόμβο περιέχει ο Πίνακας 4-4 και ο Πίνακας 4-5, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-14: Μοντελοποίηση των κόμβων του δικτύου στην TUC (με συνδέσμους εξόδου).

Σημειώνεται ότι η ευαισθησία των πινάκων αυτών σε αλλαγές κυκλοφοριακών παραμέτρων, όπως ποσοστά στροφής και ροές κορεσμού, είναι, γενικά, μικρή.

Πίνακας 4-3: Περιγραφή των φάσεων κατά τις οποίες έχει δικαίωμα διέλευσης κάθε σύνδεσμος.

Σύνδεσμος (z)	Ελεγχόμενος Κόμβος (j)	Σύνολο Φάσεων με Προτεραιότητα (v _z)
L_11	1	{1}
L_12	1	{2}
L_13	1	{1}
L_14	1	{3}
L_15	1	{-}
L_21	2	{1}
L_22	2	{2}
L_23	2	{3}
L_24	2	{4}
L_25	2	{-}

Πίνακας 4-4: Πίνακας Ελέγχου L για τον 1^ο κόμβο.

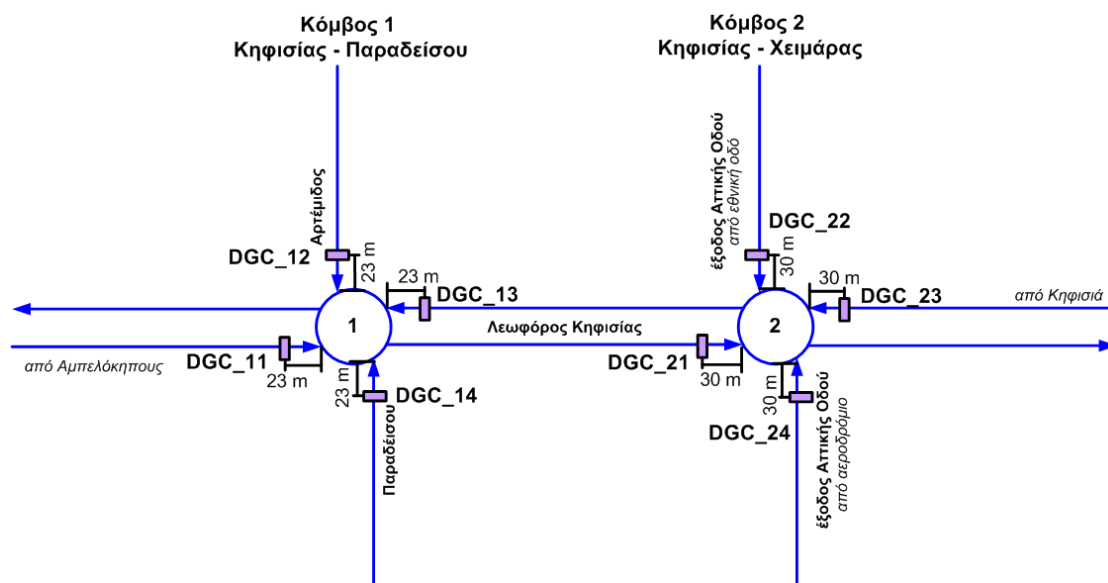
-0.38	0.00	-0.34	0.00
0.00	-1.19	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	-1.19

Πίνακας 4-5: Πίνακας Ελέγχου L για τον 2^ο κόμβο.

-0.99	0.00	0.00	0.00
0.00	-0.72	0.00	0.00
0.00	0.00	-0.72	0.00
0.00	0.00	0.00	-0.72

4.3.3 Σενάριο 3^ο : Στρατηγική Ελέγχου ΤUC και Επενέργεια

Στο σενάριο αυτό γίνεται εφαρμογή της μεθόδου της επενέργειας παράλληλα με τη στρατηγική ελέγχου ΤUC. Με τη λειτουργία της επενέργειας οι διάρκειες των φάσεων που αποφασίζει η ΤUC μπορούν να μειωθούν με απόφαση του τοπικού ρυθμιστή, αν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο αποτελεί παράμετρο της μεθόδου αυτής, δεν διέρχονται οχήματα στους αντίστοιχους συνδέσμους πρόσβασης, όταν αυτοί λαμβάνουν πράσινο, με αποτέλεσμα την άμεση μετάβαση στην επόμενη φάση. Για να ανιχνευτεί η παρουσία ή όχι οχημάτων σε κάθε σύνδεσμο γίνεται η εγκατάσταση φωρατών στους συνδέσμους του δικτύου, ένας ανά λωρίδα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-15.



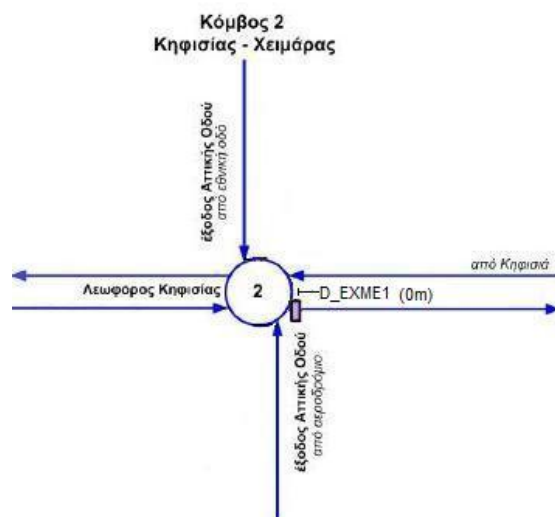
Σχήμα 4-15: Θέση φωρατών επενέργειας στο υπό εξέταση δίκτυο.

Η λειτουργία της επενέργειας στον 1^ο κόμβο ξεκινά μετά την ελάχιστη διάρκεια πρασίνου που ορίζει η ΤUC στις αντίστοιχες φάσεις, ενώ στο 2^ο κόμβο λειτουργεί από την αρχή των φάσεων που ελέγχει η ΤUC. Για το λόγο αυτό η θέση των φωρατών (DGC_11, DGC_12, DGC_13, DGC_14) στον πρώτο κόμβο (Κηφισίας – Παραδείσου) επιλέχθηκε, ύστερα από προσεκτική και ποιοτική μελέτη στον προσομοιωτή να είναι στα είκοσι τρία μέτρα από τους φωτεινούς σηματοδότες, και αντίστοιχα στον δεύτερο κόμβο (Κηφισίας – Χειμάρας) (DGC_21, DGC_22, DGC_23, DGC_24) στα τριάντα μέτρα. Ο υπολογισμός των αποστάσεων για την εγκατάσταση των φωρατών σχετίζεται με την ελάχιστη διάρκεια πρασίνου των φάσεων. Παραδείγματος χάριν, στα 7 δευτερόλεπτα που είναι ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου του 1^{ου} κόμβου προλαβαίνει να διαλυθεί ουρά 23 μέτρων. Τα 30 μέτρα των φωρατών στο 2^ο κόμβο σχετίζονται με τους ελάχιστους χρόνους πρασίνου οι οποίοι υπάρχουν στις προηγούμενες φάσεις από τις φάσεις που επεμβαίνει η επενέργεια. Επίσης σημειώνεται ότι θα εξεταστούν τρεις τιμές της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας που σηματοδοτεί την απουσία οχημάτων στους συνδέσμους του

δικτύου, και συγκεκριμένα τα 1, 2 και 3 δευτερόλεπτα, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.

4.3.4 Σενάριο 4^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου I

Στο σενάριο αυτό γίνεται εφαρμογή της πρώτης μεθόδου επέκτασης πρασίνου, παράλληλα με την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου TUC και της επενέργειας στο δίκτυο. Σημείο εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο δακτύλιος και συγκεκριμένα, η περιοχή της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο προς το δακτύλιο και του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο προς την Κηφισιά με κατεύθυνση προς Κηφισιά, μια περιοχή που είναι ιδιαίτερα νευραλγική σε περιόδους αιχμής. Στόχος της μεθόδου είναι να καθυστερήσει την έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί στην έξοδο της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο όταν η ουρά του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά έχει φτάσει στην αρχή της εισόδου και πιθανότατα έχει εισχωρήσει εντός του δακτυλίου μπλοκάροντας το σύνδεσμο εξόδου της Αττικής Οδού. Για αυτό το σκοπό τοποθετήθηκαν φωρατές όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-16.

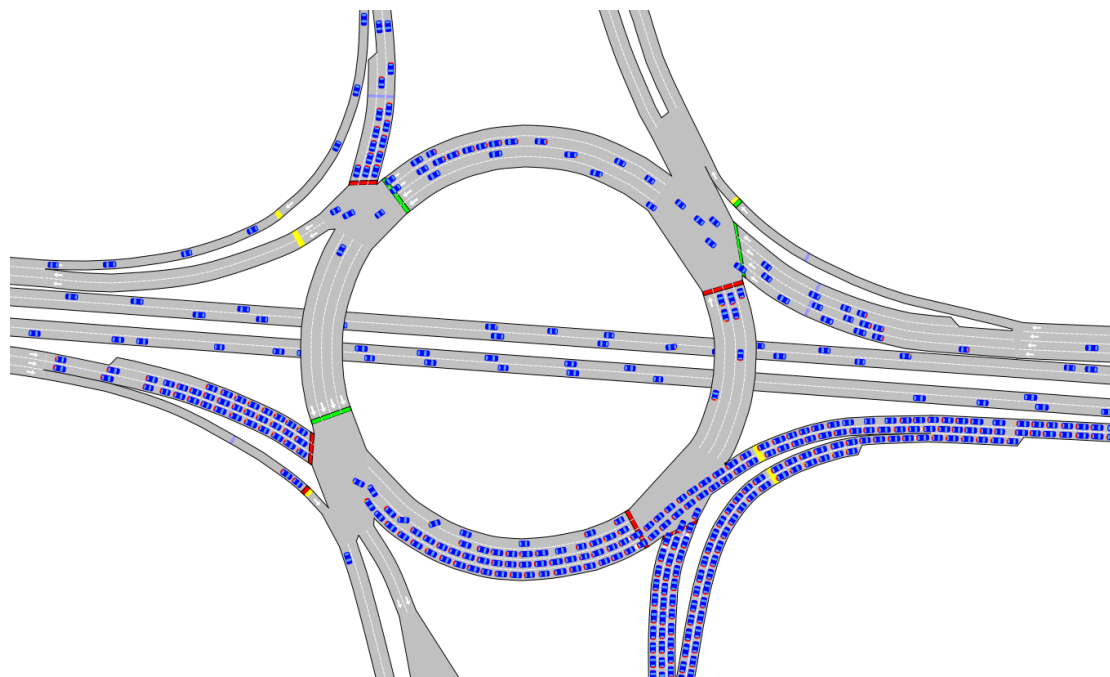


Σχήμα 4-16: Θέση φωρατών μεθόδου επέκτασης πρασίνου I στο δακτύλιο.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή της επέκτασης πρασίνου λειτουργεί λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά χρονικής κατάληψης από τους φωρατές (D_EXME1). Όταν η περίοδος βρίσκεται μια φάση πριν την φάση πρασίνου του ρεύματος εξόδου της Αττικής Οδού στο δακτύλιο, δηλαδή, έχει πράσινο ο σύνδεσμος Κηφισιάς από Κηφισιά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-17, αν το ποσοστό κατάληψης των φωρατών ξεπερνά το 70 % για χρονική διάρκεια που ορίζεται από το χρήστη, στην περίπτωση της παρούσας μελέτης εξετάζονται τα 2 και 3 δευτερόλεπτα πριν το τέλος της φάσης, τότε παρατείνεται η φάση αυτή κατά 2 ή 3 δευτερόλεπτα αντίστοιχα. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αν η κατάληψη ξεπερνά αυτό το ποσοστό για το δεδομένο χρονικό διάστημα η ουρά του συνδέσμου εξόδου του δακτυλίου προς

Κηφισιά έχει φτάσει ως το δακτύλιο και πιθανότατα εμποδίζει την διέλευση της εξόδου της Αττικής Οδού.

Στη μέθοδο ορίζεται μέγιστος αριθμός παρατάσεων της διάρκειας της φάσης που αντιστοιχεί σε 20 δευτερόλεπτα για την περίπτωση των 2 δευτερολέπτων και 18 δευτερόλεπτα για την περίπτωση των 3 δευτερολέπτων.



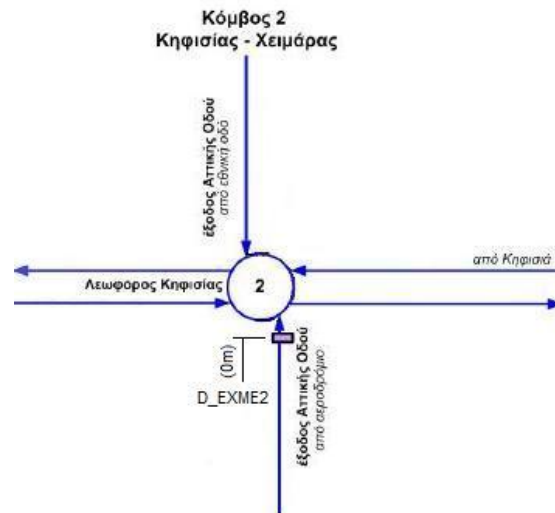
Σχήμα 4-17: Φωτεινή σηματοδότηση δακτυλίου στη φάση λειτουργίας της μεθόδου επέκτασης πρασίνου I.

4.3.5 Σενάριο 5^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου II

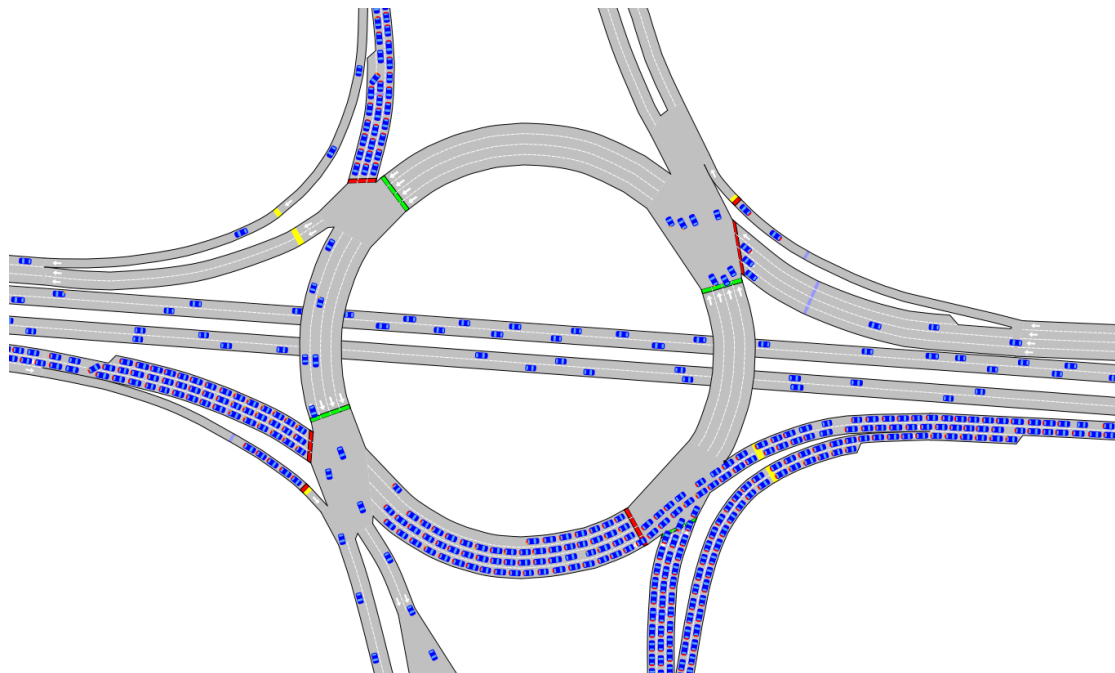
Στο σενάριο αυτό γίνεται εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου επέκτασης πρασίνου, παράλληλα με την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου TUC και της επενέργειας στο δίκτυο. Σημείο εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου είναι και πάλι ο δακτύλιος και συγκεκριμένα ο σύνδεσμος εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο. Στόχος της μεθόδου είναι να παρατείνει τη διάρκεια του πρασίνου του συνδέσμου εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο, όταν η έξοδος του συνδέσμου αυτού έχει μπλοκάρει λόγω μποτιλιαρίσματος εντός του δακτυλίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-19. Για αυτό το σκοπό τοποθετήθηκαν φωρατές όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-18.

Η μέθοδος αυτή της επέκτασης πρασίνου λειτουργεί λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά χρονικής κατάληψης από τους φωρατές (D_EXME2) οι οποίοι βρίσκονται ακριβώς στην έξοδο του συνδέσμου, δηλαδή, στην περιοχή των φωτεινών σηματοδοτών. Όταν η περίοδος βρίσκεται στη φάση πρασίνου του ρεύματος της εξόδου Αττικής Οδού, αν το ποσοστό κατάληψης των φωρατών ξεπερνά το 90 % για χρόνο ενός δευτερολέπτου τότε παρατείνεται η φάση κατά ένα δευτερόλεπτο.

Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αν η κατάληψη ξεπερνά αυτό το ποσοστό και για το δεδομένο χρονικό διάστημα τότε η ουρά του συνδέσμου εξόδου προς Κηφισίας έχει εισέλθει στο δακτύλιο και εμποδίζει την διέλευση της εξόδου με αποτέλεσμα να χάνεται πράσινο. Η μέθοδος έχει σαν ανώτατο όριο να πραγματοποιήσει είκοσι παρατάσεις του 1 δευτερολέπτου, δηλαδή να παρατείνει συνολικά 20 δευτερόλεπτα κατά μέγιστο τη συγκεκριμένη φάση. Να σημειωθεί ότι στη φάση που εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος επέκτασης πρασίνου έχει προτεραιότητα μόνο το ρεύμα εξόδου της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο, όπως φαίνεται Σχήμα 4-19.



Σχήμα 4-18: Θέση φωρατών μεθόδου επέκτασης πρασίνου II στο δακτύλιο.



Σχήμα 4-19: Φωτεινή σηματοδότηση δακτυλίου στη φάση λειτουργίας της μεθόδου επέκτασης πρασίνου II.

4.4 Κριτήρια Αξιολόγησης

Τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση των παραπάνω σεναρίων ελέγχου στο υπό εξέταση δίκτυο είναι:

- ❖ ο μέσος χρόνος καθυστέρησης σε s/km/veh, δηλαδή η διαφορά μεταξύ του πραγματικού χρόνου διαδρομής και του χρόνου που απαιτείται υπό ιδανικές συνθήκες,
- ❖ η μέση ταχύτητα όλων των οχημάτων που εξήλθαν από το δίκτυο, σε km/h,
- ❖ ο μέσος αριθμός το σταματημάτων αρ. veh/km,
- ❖ ο συνολικός χρόνος διαδρομής όλων των οχημάτων που διέσχισαν το δίκτυο, σε ώρες,
- ❖ η συνολική διανυθείσα απόσταση από όλα τα οχήματα που διέσχισαν το δίκτυο, σε km.

Οι τιμές των παραπάνω κριτηρίων αξιολόγησης λαμβάνονται μετά το πέρας κάθε προσομοίωσης μέσω του προσομοιωτή και οι τιμές τους είναι ενδεικτικές της υπεροχής ή μη κάποιας μεθόδου έναντι κάποιας άλλης. Επιπλέον των ποσοτικών κριτηρίων, ενδιαφέρουν κάποια περισσότερο ποιοτικά αποτελέσματα εφαρμογής των στρατηγικών και ειδικότερα οι κυκλοφοριακές συνθήκες σε δύο κρίσιμους συνδέσμους του δικτύου, που είναι οι δύο έξοδοι της Αττικής Οδού (προς το δακτύλιο).

5 Αποτελέσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του υπό εξέταση δικτύου με εφαρμογή των δύο σεναρίων ζήτησης και των πέντε σεναρίων ελέγχου. Όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 4, τα σενάρια ελέγχου που θα εξεταστούν είναι: το σταθερό πλάνο σηματοδότησης, η στρατηγική ελέγχου TUC, η επενέργεια (με παράλληλη λειτουργία της TUC), η επενέργεια και μέθοδος επέκτασης πρασίνου I (με παράλληλη λειτουργία της TUC), η επενέργεια και μέθοδος επέκτασης πρασίνου II (με παράλληλη λειτουργία της TUC). Σημειώνεται ότι ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN χρησιμοποιεί σε κάθε προσομοίωση (επανάληψη) διαφορετικούς σπόρους στις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούνται στα διάφορα μοντέλα του προσομοιωτή. Επομένως, κάθε επανάληψη μπορεί να δώσει κάπως διαφορετικά ποσοτικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, συνήθη πρακτική αποτελεί η πραγματοποίηση ενός αριθμού (δέκα στην παρούσα διερεύνηση) επαναλήψεων για κάθε εξεταζόμενο σενάριο ελέγχου και ζήτησης και ο υπολογισμός της μέσης τιμής των δέκα επαναλήψεων για κάθε κριτήριο αξιολόγησης προκειμένου να συγκριθούν τα διάφορα σενάρια μεταξύ τους. Στην τελευταία παράγραφο παρουσιάζονται επιπλέον συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση επενέργειας και μεθόδων επέκτασης πρασίνου σε σταθερό πλάνο σηματοδότησης.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να διευκρινιστεί ότι στόχος της διερεύνησης μέσω προσομοίωσης δεν είναι η ακριβής περιγραφή των πραγματικών συνθηκών κυκλοφορίας, κάτι εξαιρετικά δύσκολο ή και ανέφικτο. Το μοντέλο προσομοίωσης βασίζεται βέβαια στη λεπτομερή απεικόνιση της κυκλοφοριακής υποδομής. Οι διακυμάνσεις της ζήτησης και διαδρομών (βλ. ποσοστά στροφής) όμως κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, ή για διαφορετικές ημέρες της εβδομάδας ή του έτους, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Το ίδιο ισχύει για τη συμπεριφορά των οδηγών και ιδιαίτερα για τα συμβάντα (π.χ. βραχύχρονη παράνομη στάθμευση μεμονωμένων οχημάτων) που μπορούν να οδηγήσουν σε συμφόρηση συνδέσμων. Βασικοί στόχοι της προσομοίωσης είναι να αναδείξει θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου, καθώς και να επιτρέψει μια καταρχήν σύγκριση αποτελεσματικότητάς (και αντίστοιχη κατάταξή) τους. Η τελική αξιολόγηση και ποσοτική σύγκριση υψηλής αξιοπιστίας είναι εφικτή μόνον μέσω πρακτικής εφαρμογής πεδίου.

5.1 Αποτελέσματα 1ου σεναρίου ζήτησης

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης, ποσοτικά και ποιοτικά, των πέντε σεναρίων ελέγχου με εφαρμογή του πρώτου σεναρίου ζήτησης στο δίκτυο.

5.1.1 Σενάριο 1^ο : Σταθερό Πλάνο Σηματοδότησης

Η εφαρμογή, μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης, σταθερών πλάνων σηματοδότησης και στους τρεις κόμβους του υπό εξέταση δικτύου έχει ήδη πραγματοποιηθεί στη “Μελέτη εφαρμογής της στρατηγικής TUC στο δίκτυο Κηφισίας/Παρ. Αττικής Οδού” του Εργαστηρίου Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης και τα αναλυτικά αποτελέσματα περιέχονται στην αντίστοιχη αναφορά (βλ. Βιβλιογραφία).

Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα των κριτηρίων αξιολόγησης για την περίπτωση σταθερών πλάνων σηματοδότησης για κάθε μία από τις 10 επαναλήψεις (προσομοιώσεις) καθώς και τη μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή αυτών. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν στις επόμενες παραγράφους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα εφαρμογής των υπολοίπων σεναρίων ελέγχου.

Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα προσομοίωσης σταθερού πλάνου σηματοδότησης.

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	78.2	25	1.8	1775.7	48950.9
2	76	25.4	1.7	1741.1	48528.2
3	72.5	26	1.6	1719.3	49213.6
4	75.2	25.5	1.7	1767.9	49180.4
5	85.7	23.8	2	1897.6	49021
6	83.9	24	1.9	1878	49384.5
7	76.5	25.3	1.7	1763.9	49296
8	85.5	23.8	2	1880	48495.7
9	98.2	21.9	2.3	2066.7	49363.4
10	88.5	23.3	2.2	1977.9	49316.2
Μέση Τιμή	79.5	24.8	1.8	1809.2	48989.7
Ελάχιστη Τιμή	72.5	23.8	1.6	1719.3	48495.7
Μέγιστη Τιμή	85.7	26	2	1897.6	49384.5

5.1.2 Σενάριο 2^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC

Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC στον 1^ο και στον 2^ο κόμβο του υπό εξέταση δικτύου. Η διερεύνηση του σεναρίου αυτού, όπως και του πρώτου σεναρίου, έχει ήδη πραγματοποιηθεί στη “Μελέτη εφαρμογής της στρατηγικής TUC στο δίκτυο Κηφισίας/Παρ. Αττικής Οδού” του Εργαστηρίου Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης (βλ. Βιβλιογραφία), και τα συνοπτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζει ο Πίνακας 5-2.

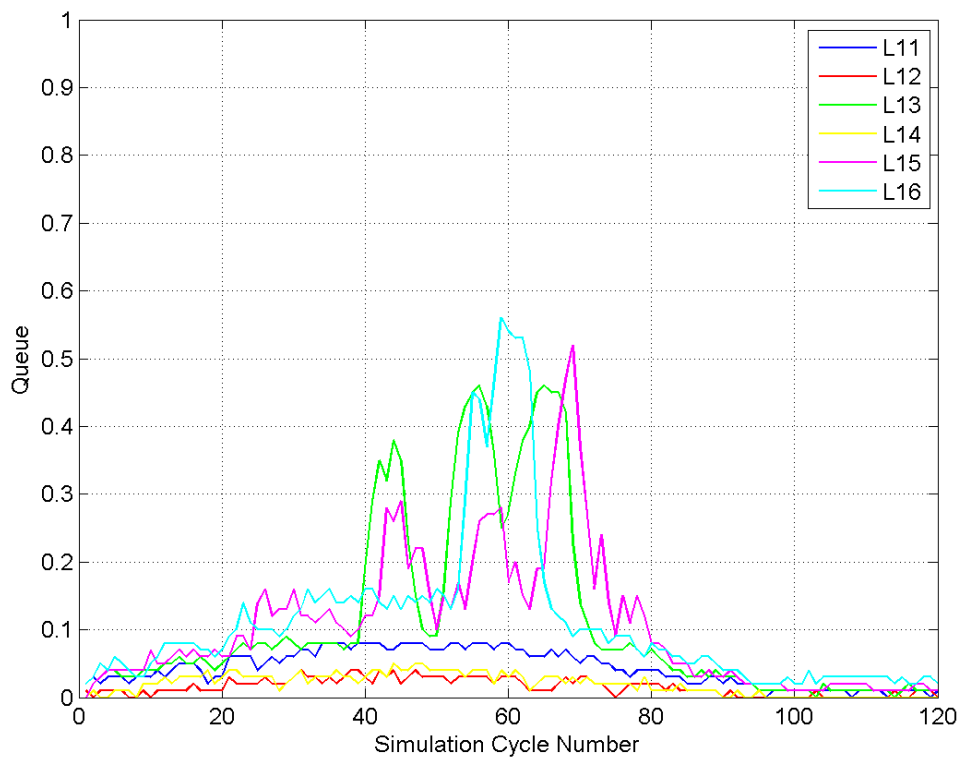
Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα προσομοίωσης στρατηγικής TUC.

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	74.0	25.7	1.8	1814.7	49106.1
2	63.1	27.9	1.7	1695.7	49018.8
3	63.6	27.8	1.6	1675.7	49120.1
4	73.0	25.9	1.9	1801.0	49297.0
5	69.4	26.6	1.7	1735.6	48809.6
6	68.2	26.9	1.7	1733.7	48980.2
7	73.2	25.9	1.8	1803.6	49123.9
8	71.2	26.3	1.8	1795.3	49354.7
9	74.8	25.6	1.9	1823.4	49189.4
10	73.6	25.8	1.8	1821.9	49308.0
Μέση Τιμή	70.4	26.4	1.8	1770.1	49130.8
Ελάχιστη Τιμή	63.1	25.6	1.6	1675.7	48809.6
Μέγιστη Τιμή	74.8	27.9	1.9	1823.4	49354.7
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-11%	+7%	-1%	-2%	0%

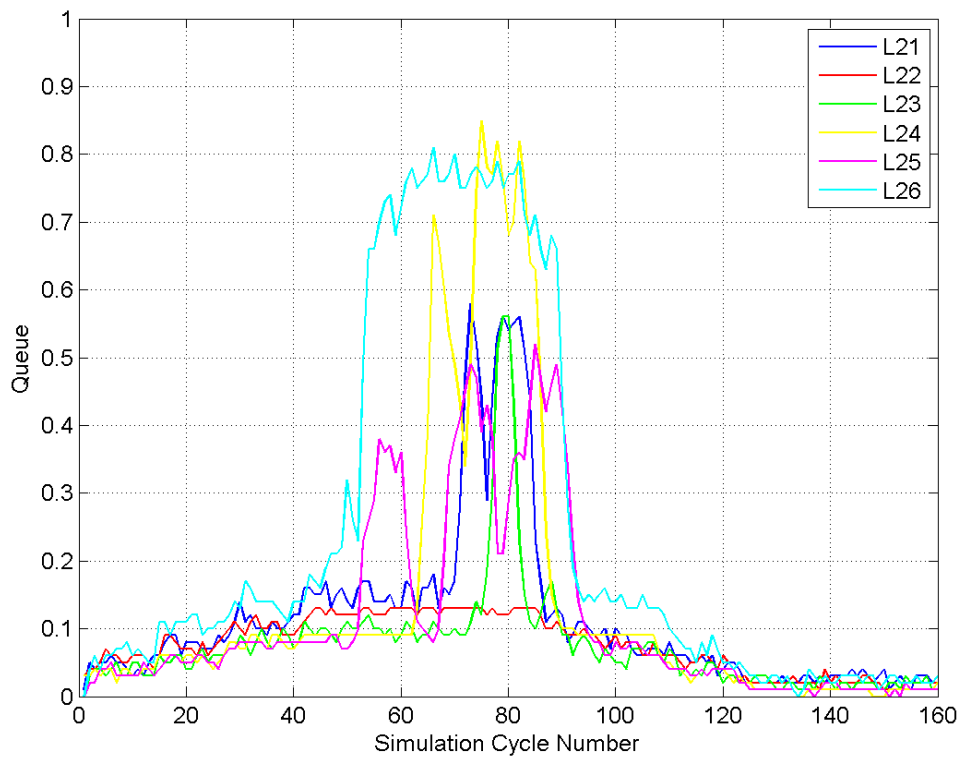
Παρατηρείται ότι, η χρήση της TUC στο δίκτυο λειτουργεί ευεργετικά σε όλα τα υπό εξέταση κριτήρια βελτιώνοντας τις κυκλοφοριακές συνθήκες στους συνδέσμους του δικτύου. Συγκεκριμένα έχουμε μείωση του χρόνου καθυστέρησης των οχημάτων κατά 11% σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης και αύξηση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά 7% για ίδια διανυθείσα απόσταση των οχημάτων του δικτύου. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει ότι η χρήση στρατηγικών ελέγχου πραγματικού χρόνου στα αστικά δίκτυα είναι καλύτερη από τη χρήση σταθερών πλάνων σηματοδότησης.

Το Σχήμα 5-1 και το Σχήμα 5-2 δείχνουν την εκτίμηση του μήκους της ουράς κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των συνδέσμων του 1^{ου} και του 2^{ου} κόμβου αντίστοιχα, όπου 0 σημαίνει καθόλου ουρά και 1 σημαίνει ουρά ίση με το μήκος του συνδέσμου. Επίσης το Σχήμα 5-3 και το Σχήμα 5-4 δείχνουν τα ποσοστά κατάληψης και τη ροή οχημάτων αντίστοιχα στην αρχή της εξόδου της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο για επαναλήψεις με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων. Παρατηρείται ότι σε κάποιες επαναλήψεις το ποσοστό κατάληψης στην αρχή της εξόδου αυξάνεται με αντίστοιχη μείωση της ροής των οχημάτων που σημαίνει ότι η ουρά της εξόδου έχει φτάσει μέχρι τον αυτοκινητόδρομο με όλα τα αρνητικά αποτελέσματα που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 1.2.

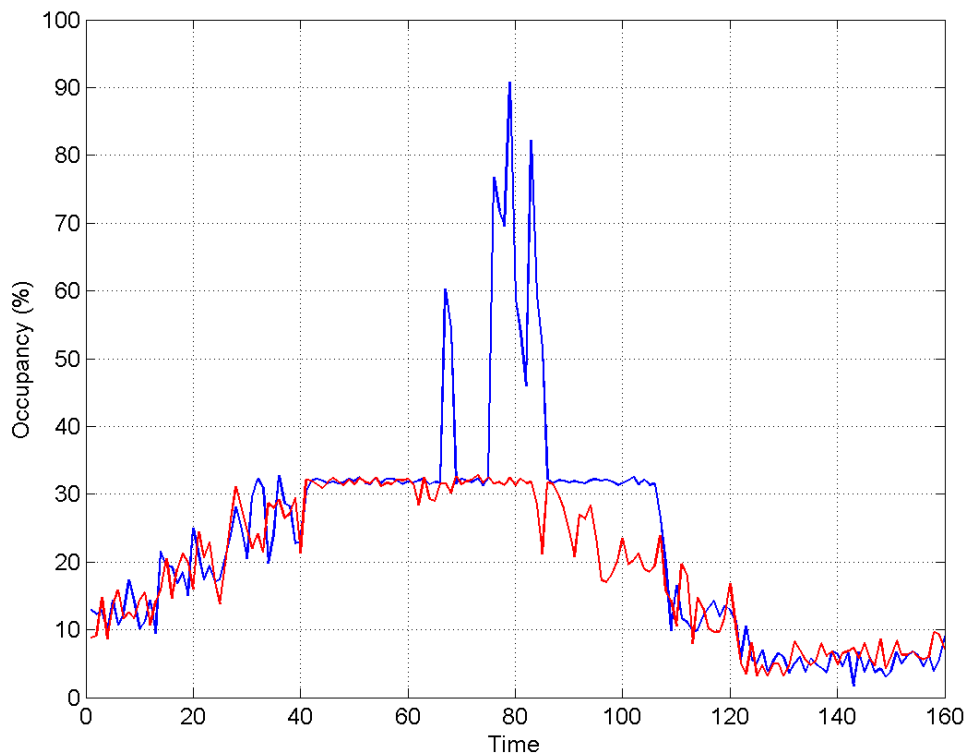
Τα παραπάνω σχήματα που περιγράφουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου θα συγκριθούν με τα αντίστοιχά τους όταν εφαρμοστούν τα υπόλοιπα σενάρια ελέγχου.



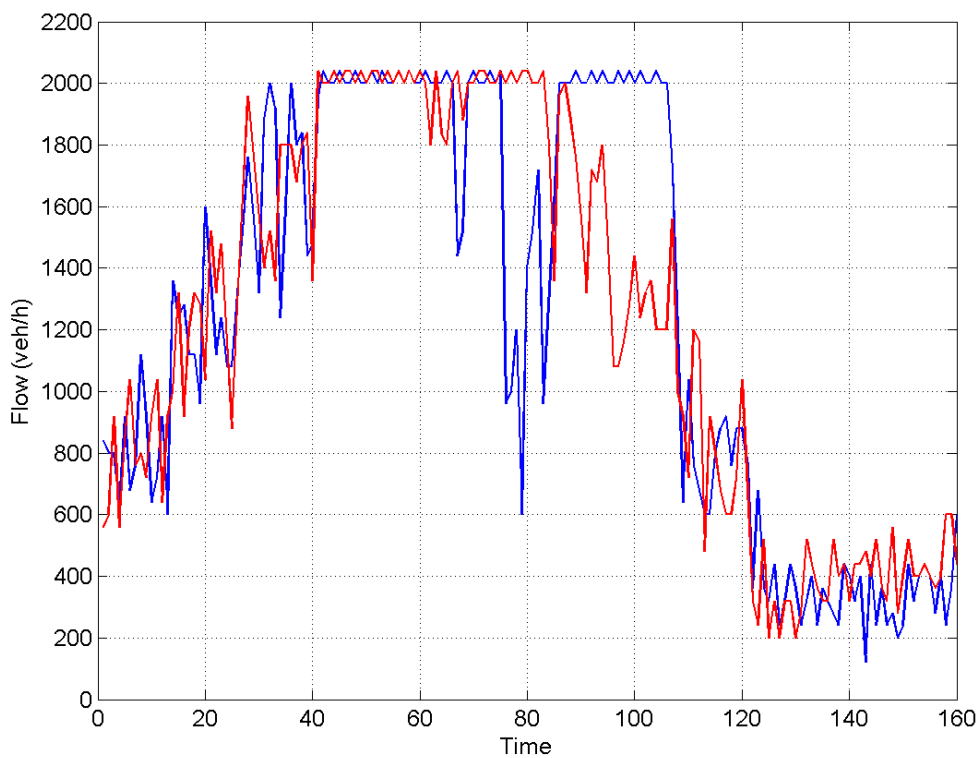
Σχήμα 5-1: Ουρές οχημάτων 1^{ου} κόμβου (Επανάληψη 8) - στρατηγική TUC.



Σχήμα 5-2: Ουρές οχημάτων 2^{ου} κόμβου (Επανάληψη 8) - στρατηγική TUC.



Σχήμα 5-3: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 8 & 5) - στρατηγική TUC.



Σχήμα 5-4: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 8 & 5) - στρατηγική TUC.

5.1.3 Σενάριο 3^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC και Επενέργεια

Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC και η μέθοδος της επενέργειας. Σύμφωνα με τη μέθοδο της επενέργειας οι διάρκειες πρασίνου που ορίζει η TUC μπορούν να μειωθούν εάν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο αποτελεί παράμετρο της μεθόδου, δεν διέρχονται οχήματα από τους αντίστοιχους συνδέσμους όταν αυτοί λαμβάνουν πράσινο. Τρεις τιμές της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας εξετάζονται και συγκεκριμένα τα 1, 2 και 3 δευτερόλεπτα.

5.1.3.1 Επενέργεια 1 δευτερολέπτου

Στο υποσενάριο αυτό, εάν οι φωρατές δεν ανιχνεύσουν παρουσία οχημάτων στο σύνδεσμο που έχει προτεραιότητα (πράσινο) για χρονική διάρκεια ενός δευτερολέπτου τότε η μέθοδος της επενέργειας οδηγεί το πλάνο σηματοδότησης στην επόμενη φάση.

Η εφαρμογή της επενέργειας του 1 δευτερολέπτου στους δύο κόμβους του δικτύου δε λειτούργησε ως προς τη λογική που θα επιθυμούσε η παρούσα μελέτη. Αιτία της λάθος λειτουργίας είναι η μικρή τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας μη κατάληψης του φωρατή από όχημα. Παρατηρήθηκε σε αρκετές χρονικές στιγμές ότι λόγω του χρόνου αντίδρασης των οδηγών και της απόστασης ασφαλείας που είχαν τα οχήματα μεταξύ τους όταν βρίσκονταν εν κινήσει, η ενεργοποίηση της επενέργειας πραγματοποιούνταν σε λάθος χρόνο. Αποτέλεσμα αυτού του λάθους ήταν να σταματάει η φάση πρασίνου ενώ υπήρχε ροή οχημάτων στο σύνδεσμο.

Τα αποτελέσματα που έδωσε η επενέργεια 1 δευτερολέπτου, Πίνακας 5-3, παρουσιάζουν βελτίωση συγκριτικά με τα αποτελέσματα με μη χρήση της μεθόδου, δηλαδή με σταθερό πλάνο (Σενάριο 1) ή με στρατηγική TUC (Σενάριο 2), και αιτία αυτού είναι ότι με εφαρμογή της επενέργειας υπήρξε μείωση της διάρκειας των περιόδων σε, ουσιαστικά, τυχαίους χρόνους μη αιχμής. Η μικρότερη διάρκεια περιόδου σε χρόνους μη αιχμής λειτουργεί στο σύνολο των περιπτώσεων ευεργετικά για το δίκτυο γιατί εξυπηρετούνται περισσότερα οχήματα σε λιγότερο χρόνο. Δε θα γίνει περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων γιατί η επενέργεια του ενός δευτερολέπτου δε λειτουργεί όπως θα ήθελε η παρούσα μελέτη.

5.1.3.2 Επενέργεια 2 δευτερολέπτων

Στο υποσενάριο αυτό η μέθοδος της επενέργειας εφαρμόστηκε με τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας μη κατάληψης των φωρατών ίση με 2 δευτερόλεπτα.

Η εφαρμογή της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων στους δύο κόμβους του δικτύου λειτούργησε ως προς τη λογική που θα επιθυμούσε η παρούσα μελέτη. Το Σχήμα 5-5 και το Σχήμα 5-6 δείχνουν τη διάρκεια της περιόδου στον 1^ο και το 2^ο κόμβο, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για 2 επαναλήψεις με χρόνο

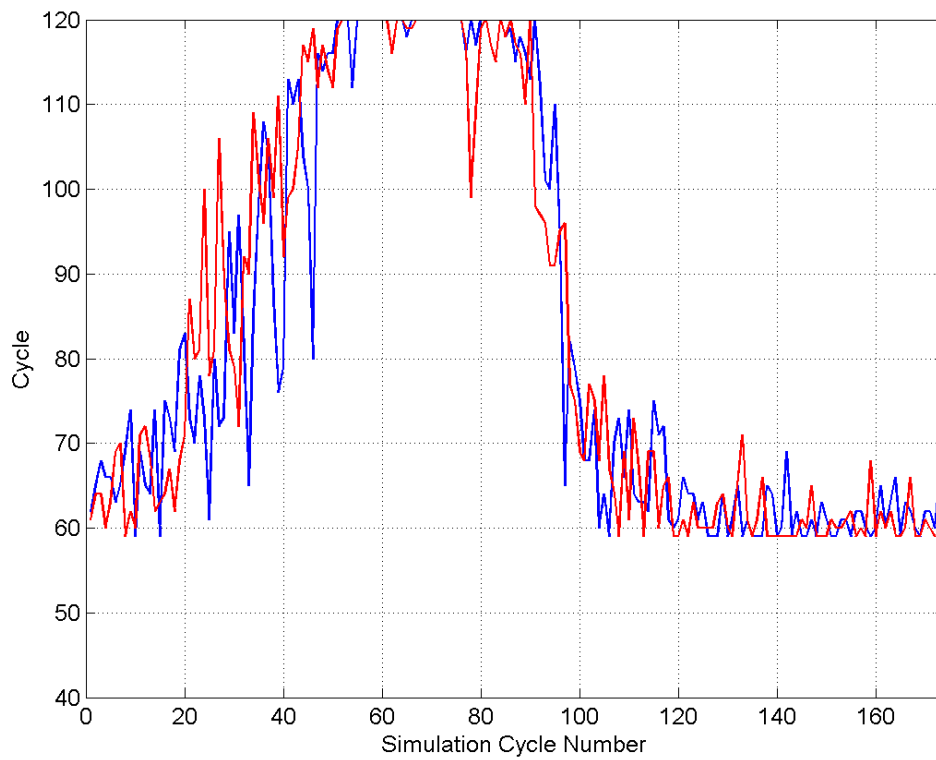
Πίνακας 5-3: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 1 δευτερολέπτου (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	79.13	24.83	2.02	1866.61	48895.75
2	67.52	26.99	1.84	1735.15	48901.16
3	70.39	26.43	1.83	1757.76	49189.21
4	59.26	28.77	1.61	1602.98	49137.10
5	61.27	28.32	1.62	1622.11	49321.59
6	49.04	31.33	1.39	1463.06	48497.28
7	66.17	27.27	1.75	1693.78	49192.92
8	58.64	28.92	1.62	1589.74	48750.71
9	67.03	27.10	1.79	1724.51	49621.33
10	74.87	25.58	1.99	1824.12	49014.34
Μέση Τιμή	65.33	27.55	1.75	1687.98	49052.14
Ελάχιστη Τιμή	49.04	24.83	1.39	1463.06	48497.28
Μέγιστη Τιμή	79.13	31.33	2.02	1866.61	49621.33
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-18%	+11%	-3%	-7%	0%

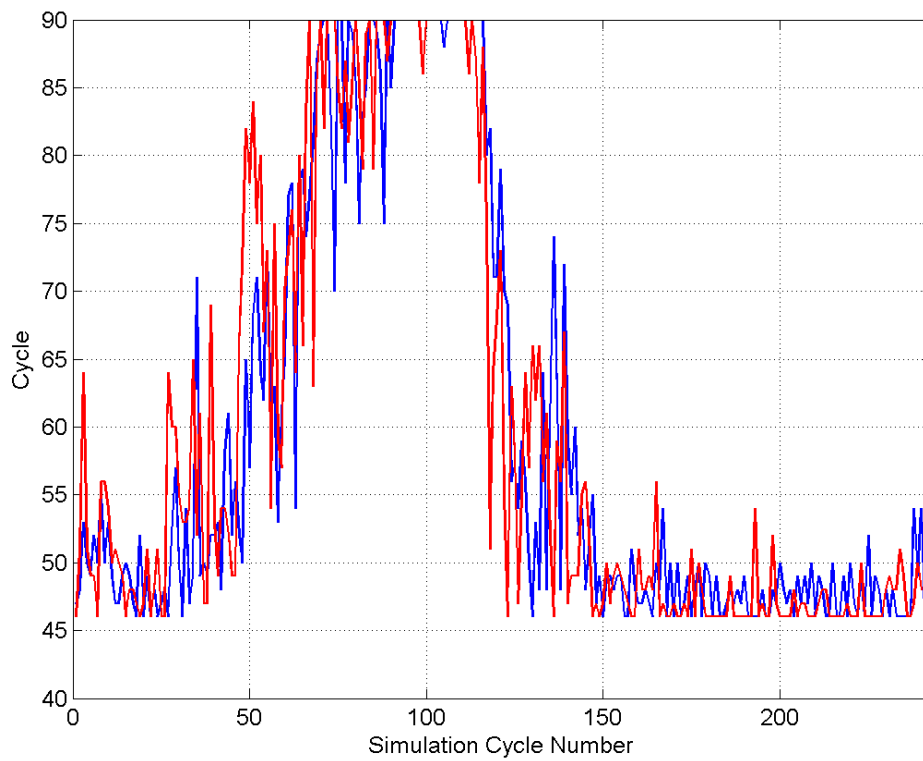
καθυστερήσης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων. Παρατηρείται ότι, η επένεργεια ενεργοποιείται σε πολλές περιόδους της προσομοίωσης με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας τους, που είναι σε κανονικές συνθήκες 120 δευτερόλεπτα για τον 1^ο κόμβο και 90 δευτερόλεπτα για τον 2^ο κόμβο. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης η μέθοδος μειώνει σε μεγάλο βαθμό τη διάρκεια της περιόδου και σε πολλές περιπτώσεις φτάνει να αφαιρεί το μέγιστο επιτρεπτό χρόνο πρασίνου, που είναι 61 δευτερόλεπτα στον 1^ο κόμβο και 44 δευτερόλεπτα στο 2^ο κόμβο. Επιπλέον, η επένεργεια λειτουργεί και στις περιόδους υψηλής ζήτησης και στους δυο κόμβους, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Τα αποτελέσματα των 10 προσομοιώσεων, Πίνακας 5-4, έδειξαν ότι η εφαρμογή επενέργειας 2 δευτερολέπτων παράλληλα με τη στρατηγική TUC, επιφέρει βελτίωση στις κυκλοφοριακές συνθήκες, π.χ. 13% μείωση του χρόνου καθυστέρησης σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης, Σενάριο1, ενώ η βελτίωση που είχε πετύχει η στρατηγική TUC μόνη της, Σενάριο 2, ήταν 11%. Συγκεκριμένα, η διαφορά μεταξύ τους, στρατηγική TUC και στρατηγική TUC με μέθοδο επενέργειας είναι της τάξης του 1,5%. Αν και προφανώς η εφαρμογή της επενέργειας φαίνεται να υπερτερεί της εφαρμογής μόνο της στρατηγικής TUC η βελτίωση που επιφέρει είναι πολύ μικρότερη από την αναμενόμενη.

Το Σχήμα 5-7 και το Σχήμα 5-8 δείχνουν το ποσοστό κατάληψης και τη ροή των οχημάτων στην αρχή της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο για 2 προσομοιώσεις που έχουν χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10



Σχήμα 5-5: Διάρκειες περιόδων στον 1^ο κόμβο (Επαναλήψεις 3 & 5) – Επενέργεια 2 sec.



Σχήμα 5-6: Διάρκειες περιόδων στον 2^ο κόμβο (Επαναλήψεις 3 & 5) – Επενέργεια 2 sec.

επαναλήψεων του σεναρίου αυτού. Συγκρίνοντας τα σχήματα αυτά με τα αντίστοιχα του 2^{ου} Σεναρίου παρατηρείται ότι η ουρά της εξόδου της Αττικής Οδού δεν φτάνει έως τον αυτοκινητόδρομο σε αντίθεση με μια από τις δυο επαναλήψεις του 2^{ου} Σεναρίου. Επίσης το Σχήμα 5-9 και το Σχήμα 5-10 δείχνουν τις ουρές οχημάτων στους συνδέσμους του δικτύου από μια επανάληψη με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων όπου παρατηρείται μείωση της χρονικής διάρκειας της συμφόρησης σε κάποιους συνδέσμους π.χ. στο σύνδεσμο L24 που είναι η έξοδος της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο.

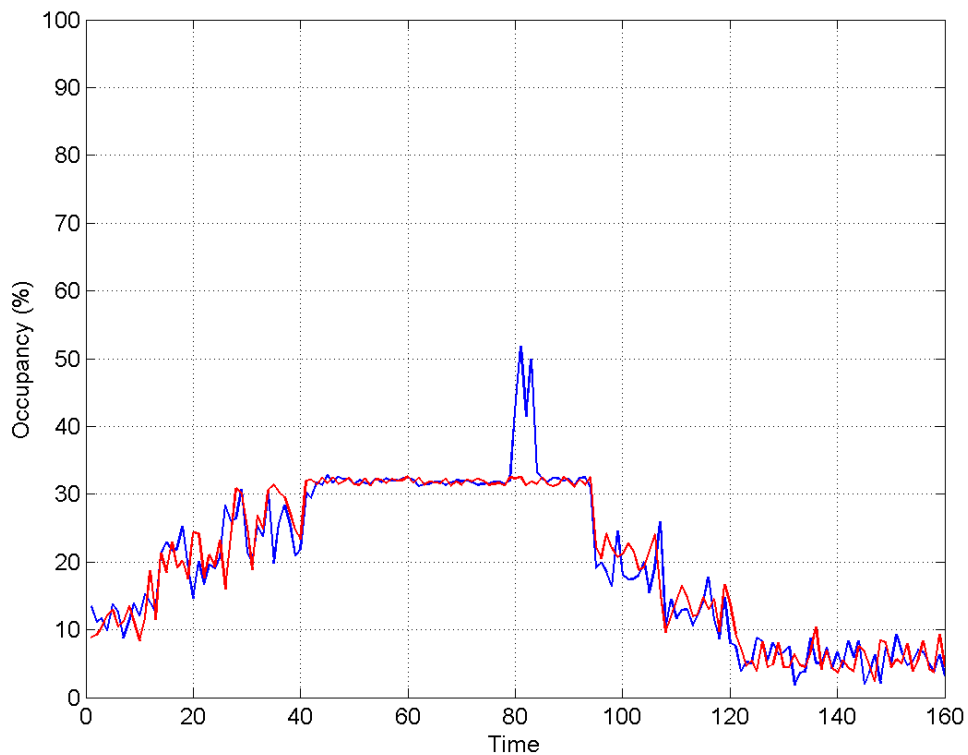
Πίνακας 5-4: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	74.96	25.56	2.02	1852.12	49516.38
2	61.90	28.18	1.70	1659.34	48997.87
3	70.35	26.43	1.85	1780.42	49360.55
4	64.57	27.60	1.76	1709.23	49456.46
5	67.74	26.94	1.83	1760.17	49637.93
6	76.17	25.36	1.99	1850.77	48857.07
7	75.45	25.48	1.92	1847.90	49435.94
8	62.39	28.08	1.64	1659.41	48949.55
9	81.47	24.43	2.10	1922.21	49273.30
10	58.82	28.87	1.56	1599.62	48689.33
Μέση Τιμή	69.38	26.69	1.84	1764.12	49217.44
Ελάχιστη Τιμή	58.82	24.43	1.56	1599.62	48689.33
Μέγιστη Τιμή	81.47	28.87	2.10	1922.21	49637.93
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-13%	+8%	+2%	-2%	0%

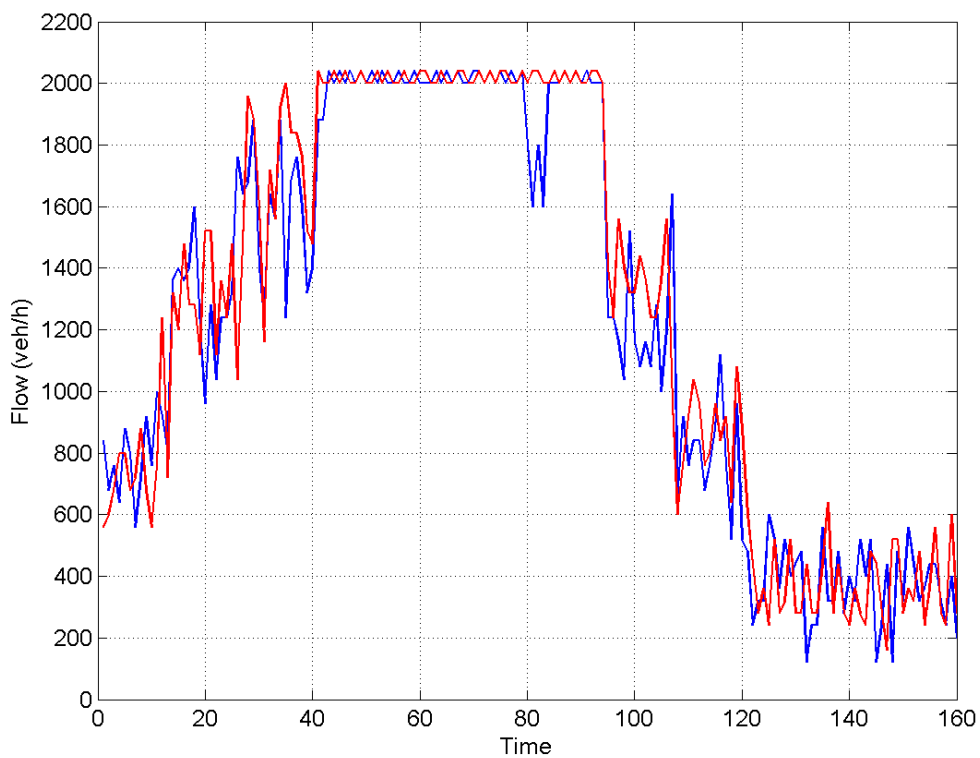
5.1.3.3 Επενέργεια 3 δευτερολέπτων

Στο υποσενάριο αυτό η μέθοδος της επενέργειας εφαρμόστηκε με τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας μη κατάληψης των φωρατών ίση με 3 δευτερόλεπτα.

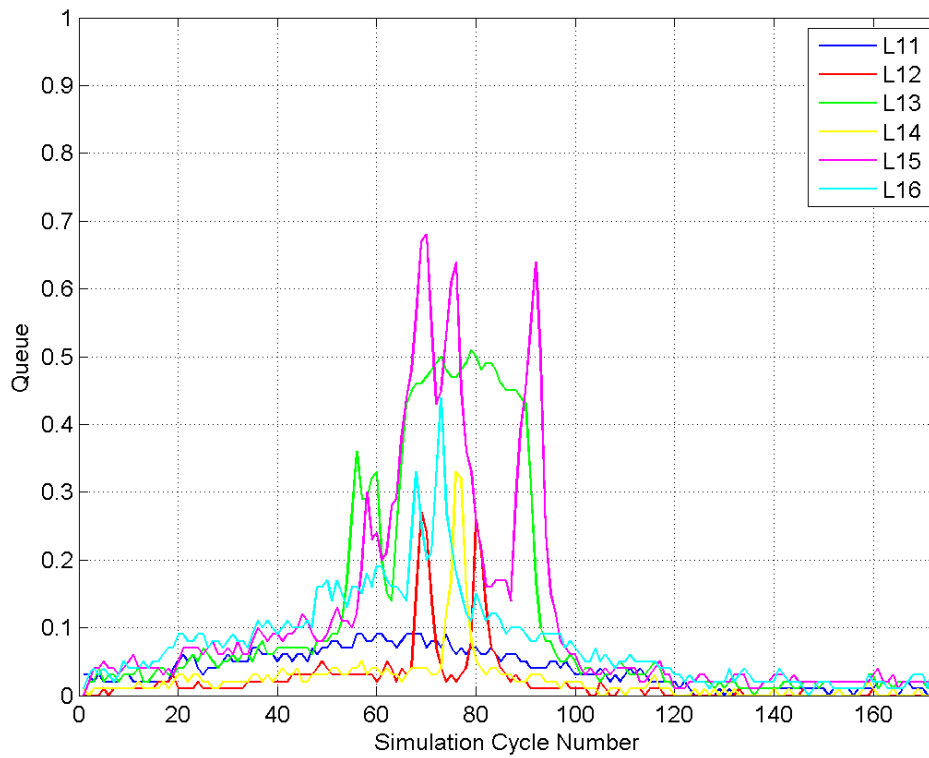
Η εφαρμογή της επενέργειας των 3 δευτερολέπτων στους δύο κόμβους του δικτύου λειτούργησε με τον επιθυμητό τρόπο, όπως και στο προηγούμενο υποσενάριο. Ο Πίνακας 5-5 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα 10 επαναλήψεων και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι το ποσοστό βελτίωσης του χρόνου καθυστέρησης, σε σχέση με το Σενάριο 1, είναι 10% και επομένως η επενέργεια δεν προσφέρει τίποτα παραπάνω στη λειτουργία της στρατηγικής TUC καθώς και στο Σενάριο 2 διαγνώστηκε ότι η λειτουργία της TUC από μόνη της επιφέρει 11% βελτίωση σε σχέση με το Σενάριο 1. Η μείωση της αποτελεσματικότητας της επενέργειας έγκειται



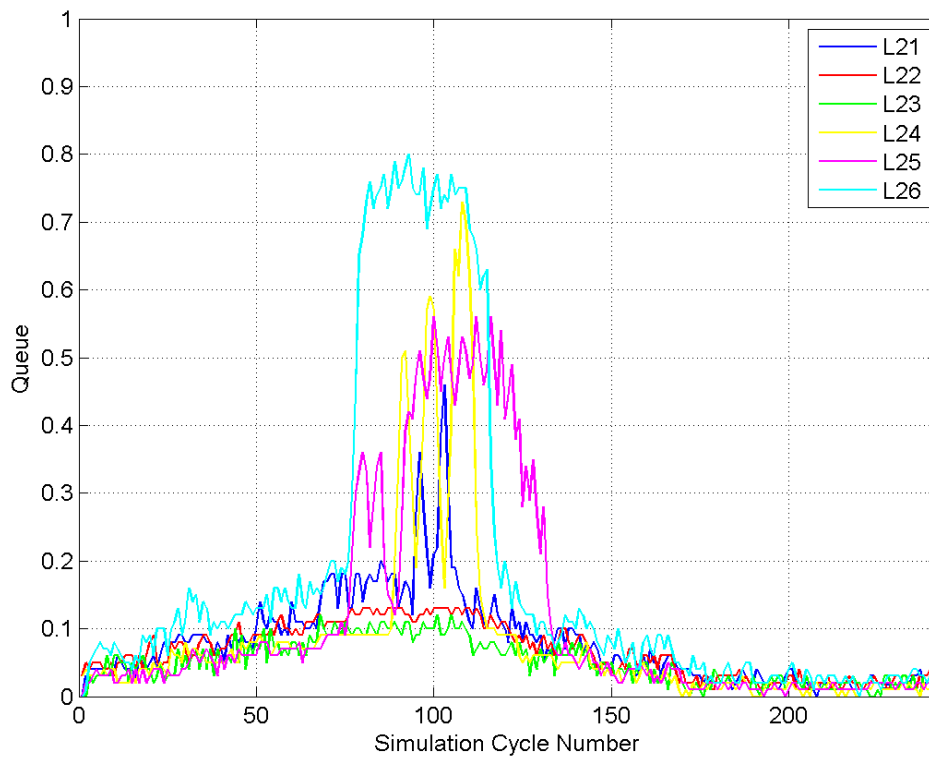
Σχήμα 5-7: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 3 & 5) – Επενέργεια 2 sec.



Σχήμα 5-8: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 3 & 5) – Επενέργεια 2 sec.



Σχήμα 5-9: Ουρές οχημάτων 1^{ου} κόμβου (Επανάληψη 3) – Επενέργεια 2 sec.



Σχήμα 5-10: Ουρές οχημάτων 2^{ου} κόμβου (Επανάληψη 3) – Επενέργεια 2 sec.

Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 3 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	76.68	25.26	1.99	1855.20	49134.21
2	66.80	27.14	1.80	1717.47	48475.37
3	72.61	26.00	1.91	1799.69	49013.70
4	62.52	28.04	1.65	1659.38	49178.80
5	69.88	26.52	1.81	1767.81	49474.22
6	70.97	26.31	1.82	1799.51	49416.74
7	68.71	26.75	1.78	1763.12	49426.46
8	61.76	28.21	1.72	1689.14	49271.93
9	74.85	25.58	1.96	1862.06	49736.55
10	87.21	23.52	2.28	2055.62	49574.08
Μέση Τιμή	71.20	26.33	1.87	1796.90	49270.21
Ελάχιστη Τιμή	61.76	23.52	1.65	1659.38	48475.37
Μέγιστη Τιμή	87.21	28.21	2.28	2055.62	49736.55
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-10%	+6%	+4%	-1%	+1%

στο αναμενόμενο γεγονός ότι όσο περισσότερος χρόνος δίνεται σαν όριο για την διακοπή του πρασίνου, 3 αντί για 2 δευτερόλεπτα στο υποσενάριο αυτό, τότε τόσο πιο πιθανό είναι να διέλθει όχημα από τους φωρατές και να μην διακοπεί η φάση.

5.1.3.4 Διερευνήσεις αποτελεσματικότητας της επενέργειας

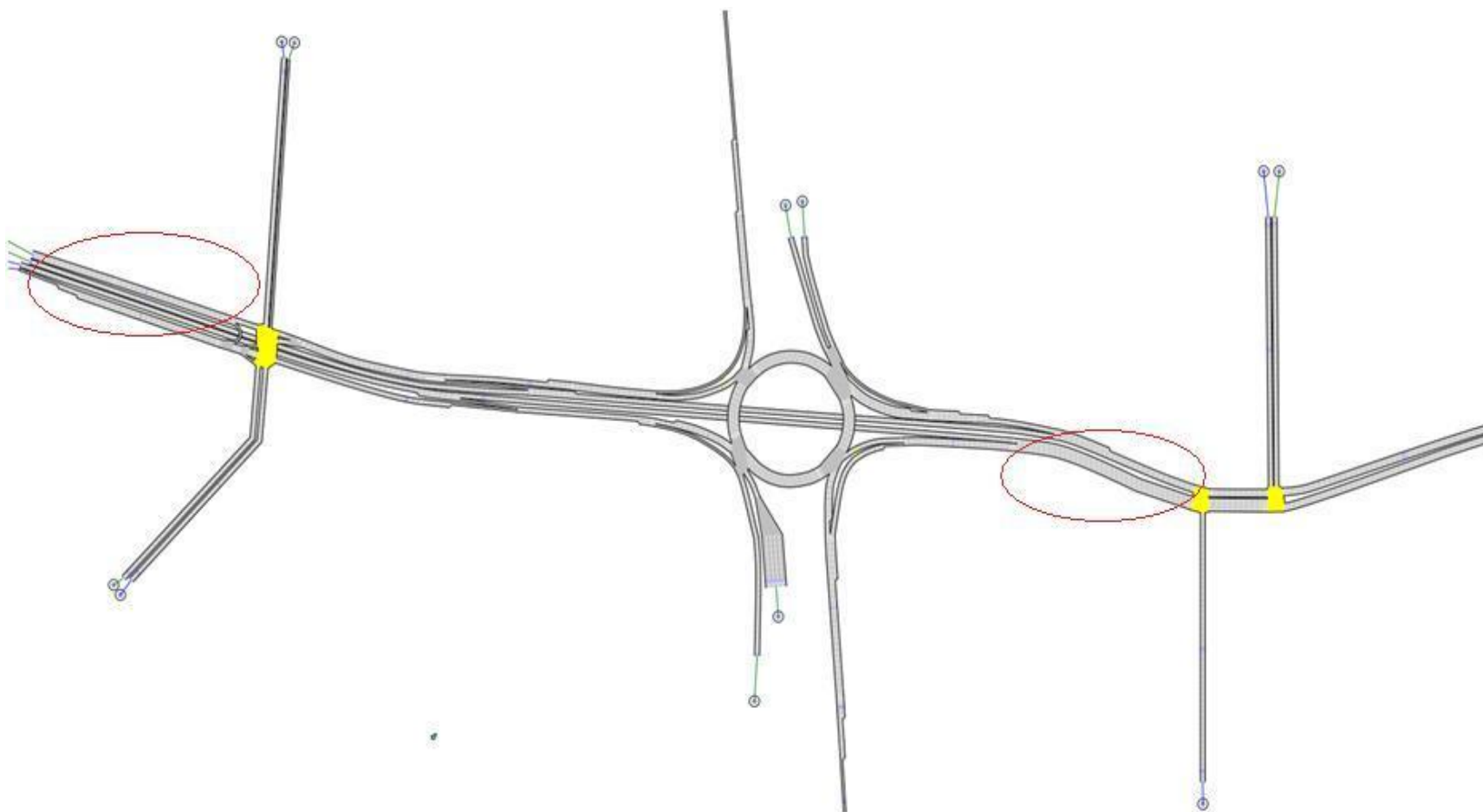
Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια (5.1.3.1 - 5.1.3.3), η επενέργεια με τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας μη κατάληψης των φωρατών ίση με 2 δευτερόλεπτα συγκριτικά με αυτή των 3 δευτερολέπτων είναι καλύτερη, ενώ η επενέργεια του 1 δευτερολέπτου δεν δούλεψε με τον επιθυμητό τρόπο. Όμως η βελτίωση που επέφερε η επενέργεια των 2 δευτερολέπτων ήταν πολύ μικρότερη από την αναμενόμενη. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι, στις μισές επαναλήψεις ήταν καλύτερη από την εφαρμογή μόνο της TUC (Σενάριο 2), ενώ στις υπόλοιπες χειρότερη και επομένως η μέση ποσοστιαία βελτίωση που προσέφερε ήταν αρκετά χαμηλή.

Το γεγονός αυτό οδήγησε σε μια προσεκτική μελέτη του δικτύου στον μικροσκοπικό προσομοιωτή προκειμένου να βρεθεί ο λόγος μη αισθητής βελτίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου, όπως αναμενόταν στη φάση σχεδιασμού της επενέργειας. Η μελέτη του δικτύου έδειξε ότι η επενέργεια λειτουργούσε σωστά, ωθώντας το δίκτυο να εξυπηρετεί περισσότερα οχήματα, αυτό όμως είχε ως αποτέλεσμα να κατευθύνονται περισσότερα οχήματα στις εξόδους του δικτύου. Σε κάποιες εξόδους, και ιδιαίτερα στις εξόδους των συνδέσμων L15 και L25 της Κηφισίας (Σχήμα 4-14), λόγω της τοπολογίας τους, (έχουμε στον L15 σταδιακή

μείωση των λωρίδων από τρεις σε μια και στον L25 έχουμε σταδιακή συγχώνευση τεσσάρων λωρίδων με το κύριο ρεύμα της Κηφισίας) εμφανίζονται συχνά ουρές μεγάλου μήκους λόγω του ότι δεν μπορούν οι σύνδεσμοι αυτοί να εξυπηρετήσουν περισσότερο από ένα μέγιστο αριθμό οχημάτων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον διερεύνηση στην οποία έγινε απελευθέρωση των εξόδων, και πιο συγκεκριμένα η πρόσθεση επιπλέον λωρίδων στους συνδέσμους εξόδου L15 και L25. Στο Σχήμα 5-11 παρουσιάζεται η νέα μοντελοποίηση του δικτύου στον προσομοιωτή AIMSUN. Επίσης, ακολουθούν οι Πίνακας 5-6 και Πίνακας 5-7 με τις δέκα επαναλήψεις για τα σενάρια ελέγχου με χρήση της TUC και με χρήση της TUC με επενέργεια των 2 δευτερολέπτων αντίστοιχα, καθώς και ο Πίνακας 5-8 με την ποσοστιαία βελτίωση που επιφέρει η στρατηγική TUC με λειτουργία της μεθόδου της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων για κάθε επανάληψη. Όπως παρατηρείται σε αυτά τα αποτελέσματα η TUC με επενέργεια βελτιώνει το χρόνο καθυστέρησης κατά 7,1% σε σχέση με την εφαρμογή μόνο της TUC, ενώ η βελτίωση πριν την απελευθέρωση των εξόδων του δικτύου ήταν μόνο 1,5%. Παρατηρείται επίσης ότι η TUC με επενέργεια είναι καλύτερη από την TUC σε όλες τις επαναλήψεις, με μόνη διαφορά την 3^η επανάληψη που υπάρχει χειροτέρευση προερχόμενη σε μεγάλο βαθμό από τυχαίο μπλοκάρισμα στο σύνδεσμο L13. Συμπερασματικά, η μελέτη καταλήγει στο ότι η μέθοδος της επενέργειας μπορεί να προσφέρει σημαντικά στη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών, αυξάνοντας το ρυθμό εξυπηρέτησης των οχημάτων και μειώνοντας τις καθυστερήσεις, με την προϋπόθεση όμως ότι το δίκτυο στο οποίο εφαρμόζεται θα μπορεί να υποστηρίξει την αύξηση του αριθμού οχημάτων που εξυπηρετούνται μέσω των εξόδων του.

5.1.4 Σενάριο 4^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου I

Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC, η μέθοδος της επενέργειας και η μέθοδος επέκτασης πρασίνου I. Σύμφωνα με τη μέθοδο της επενέργειας οι διάρκειες πρασίνου που ορίζει η TUC μπορεί να μειωθούν εάν για συγκεκριμένο διάστημα, το οποίο αποτελεί παράμετρο της μεθόδου, δεν διέρχονται οχήματα από τους αντίστοιχους συνδέσμους όταν αυτοί λαμβάνουν πράσινο. Όπως διερευνήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο (5.1.3) η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας ήταν τα 2 δευτερόλεπτα, επομένως θα χρησιμοποιηθεί αυτή η παράμετρος στη μελέτη του σεναρίου με εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου I. Στόχος της μεθόδου της επέκτασης πρασίνου I είναι να καθυστερήσει την έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί στην έξοδο της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο όταν η ουρά του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά έχει φτάσει στην αρχή της εισόδου και πιθανότατα έχει εισχωρήσει εντός του δακτυλίου μπλοκάροντας το σύνδεσμο εξόδου της Αττικής



Σχήμα 5-11: Νέα Μοντελοποίηση του δικτύου στον προσομοιωτή AIMSUN.

Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα προσομοίωσης στρατηγικής TUC (με απελευθέρωση των εξόδων).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	63.01	27.93	1.68	1719.02	48978.38
2	52.73	30.34	1.41	1568.15	48886.01
3	56.87	29.34	1.35	1597.77	49393.37
4	60.24	28.54	1.63	1664.79	48969.57
5	63.18	27.90	1.53	1692.35	49185.44
6	57.10	29.27	1.46	1623.65	49242.94
7	62.13	28.13	1.59	1703.90	49614.85
8	61.70	28.22	1.63	1693.86	49134.45
9	60.37	28.52	1.61	1687.19	49020.90
10	66.07	27.28	1.79	1777.78	49403.31
Μέση Τιμή	60.34	28.55	1.57	1672.84	49182.92
Ελάχιστη Τιμή	52.73	27.28	1.35	1568.15	48886.01
Μέγιστη Τιμή	66.07	30.34	1.79	1777.78	49614.85

Πίνακας 5-7: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και με απελευθέρωση των εξόδων).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	60.42	28.50	1.74	1706.87	49565.99
2	50.21	31.01	1.32	1514.27	48961.85
3	61.79	28.20	1.52	1662.46	49224.18
4	48.84	31.39	1.19	1473.38	49131.24
5	58.68	28.90	1.62	1665.02	49065.03
6	53.59	30.13	1.40	1583.47	49041.38
7	61.13	28.35	1.72	1711.64	49052.23
8	61.31	28.31	1.66	1691.48	49097.60
9	49.87	31.11	1.34	1531.84	49393.14
10	54.73	29.86	1.46	1588.58	49160.89
Μέση Τιμή	56.06	29.58	1.50	1612.90	49169.35
Ελάχιστη Τιμή	48.84	28.20	1.19	1473.38	48961.85
Μέγιστη Τιμή	61.79	31.39	1.74	1711.64	49565.99
Μέση Τιμή Ποσοστών Βελτίωσης Της TUC	-7.10%	+3.61%	-4.44%	-3.58%	-0.03%

Πίνακας 5-8: Ποσοστά Βελτίωσης TUC (με απελευθέρωση των εξόδων).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	-4.12%	+2.04%	+3.90%	-0.71%	+1.20%
2	-4.78%	+2.21%	-6.59%	-3.44%	+0.16%
3	+8.66%	-3.87%	+12.23%	+4.05%	-0.34%
4	-18.92%	+9.97%	-27.20%	-11.50%	+0.33%
5	-7.12%	+3.61%	+6.50%	-1.61%	-0.24%
6	-6.13%	+2.92%	-4.10%	-2.47%	-0.41%
7	-1.62%	+0.78%	+8.22%	+0.45%	-1.13%
8	-0.64%	+0.34%	+2.32%	-0.14%	-0.08%
9	-17.40%	+9.09%	-16.66%	-9.21%	+0.76%
10	-17.16%	+9.44%	-18.40%	-10.64%	-0.49%

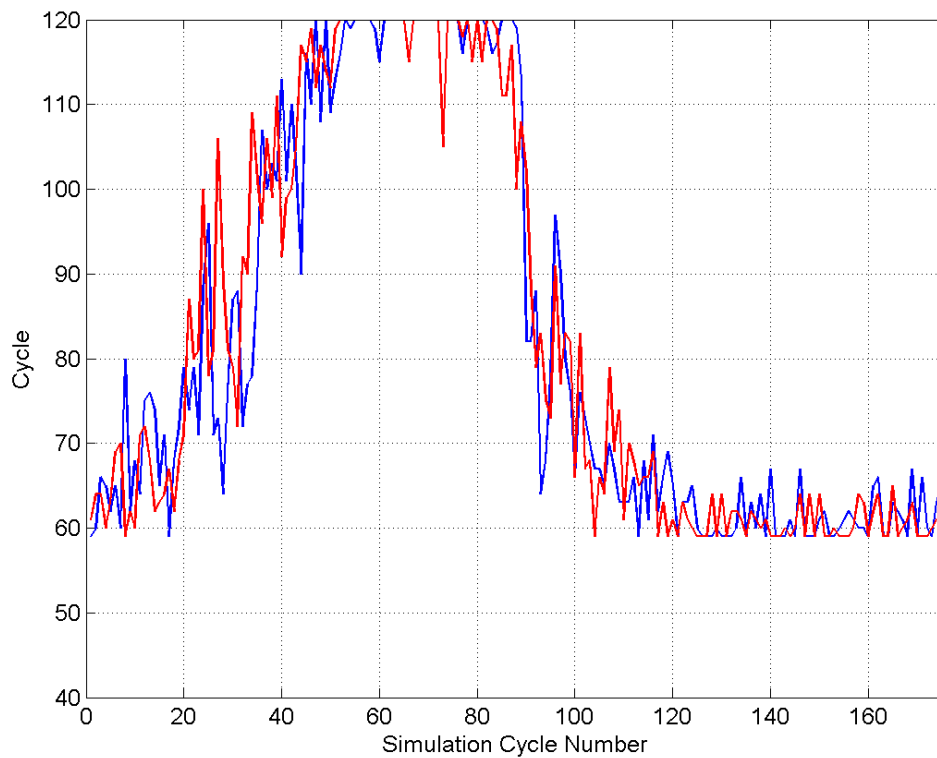
Οδού (Παράγραφος 4.3.4). Δύο τιμές της παραμέτρου της χρονικής παράτασης εξετάζονται και συγκεκριμένα τα 2 και 3 δευτερόλεπτα.

5.1.4.1 Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου Ι – 2 δευτερόλεπτα

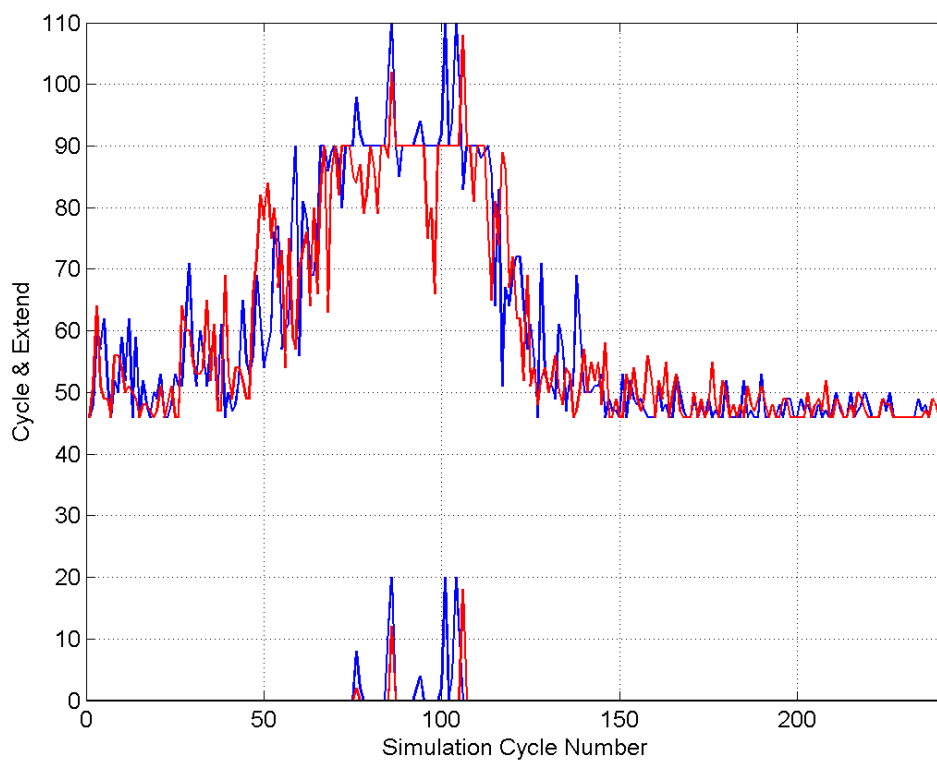
Στο υποσενάριο αυτό εάν οι φωρατές ανιχνεύσουν παρουσία οχημάτων στο τέλος του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά σε ποσοστό άνω του 70% για χρονική διάρκεια 2 δευτερολέπτων τότε καθυστερείται η έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί στην έξοδο της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο κατά 2 δευτερόλεπτα. Να σημειωθεί ότι στη μέθοδο ορίζεται μέγιστος αριθμός παρατάσεων στην έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί σε 20 δευτερόλεπτα.

Η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου Ι των 2 δευτερολέπτων στο 2^ο κόμβο, καθώς και η μέθοδος της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων στους δύο κόμβους του δικτύου λειτούργησαν ως προς τη λογική που θα επιθυμούσε η παρούσα μελέτη. Το Σχήμα 5-12 και το Σχήμα 5-13 δείχνουν τη διάρκεια της περιόδου στον 1^ο και το 2^ο κόμβο, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για 2 επαναλήψεις με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων. Επίσης το Σχήμα 5-13 δείχνει στο κάτω μέρος τον καθαρό χρόνο που δόθηκε ως επέκταση στον κόμβο 2 στην διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-13, η μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι δε χρησιμοποιήθηκε πολλές φορές στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις. Αυτό συνέβη διότι στο συγκεκριμένο σενάριο ζήτησης δεν εμφανίζεται συχνό μπλοκάρισμα στο σύνδεσμο που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά και συνεπώς εντός του δακτυλίου. Πρόβλημα συμφόρησης δημιουργείται μόνο για κάποια χρονικά διαστήματα κατά την ώρα αιχμής, όπου, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5-13, η μέθοδος επέκτασης πρασίνου Ι αυξάνει τη διάρκεια της περιόδου από 90 δευτερόλεπτα έως και το μέγιστο των 110 δευτερολέπτων.

Τα αποτελέσματα 10 προσομοιώσεων, Πίνακας 5-9, έδειξαν ότι η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου Ι παράλληλα με τη μέθοδο της επενέργειας 2



Σχήμα 5-12: Διάρκειες περιόδων στον 1^ο κόμβο (Επαναλήψεις 6 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου I, 2 sec.



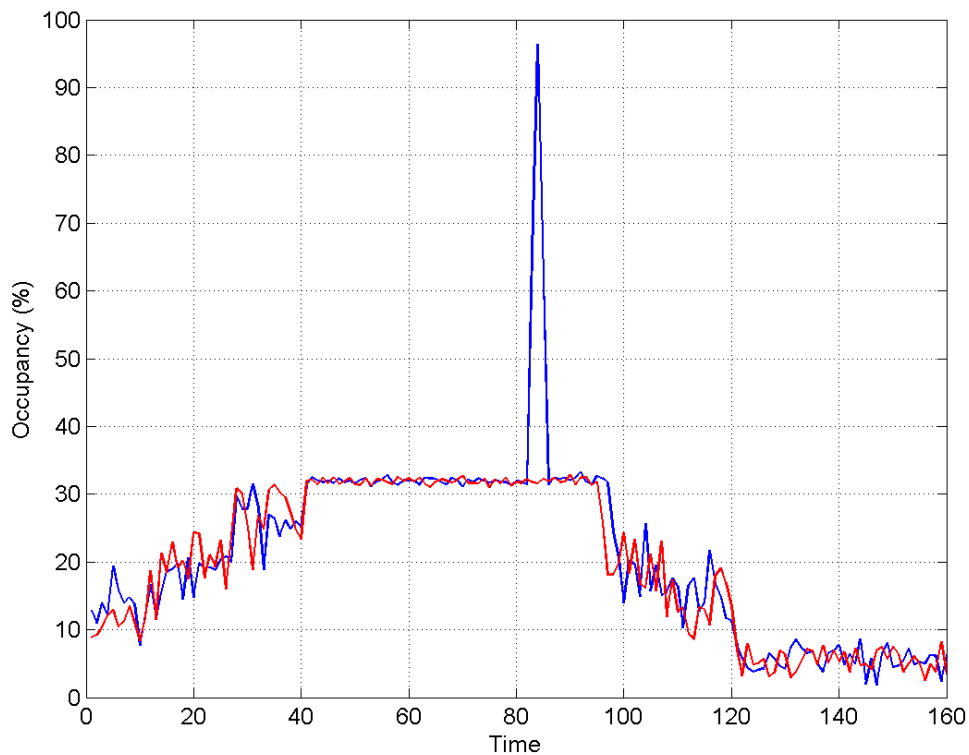
Σχήμα 5-13: Διάρκειες περιόδων και πράσινη επέκταση στον 2^ο κόμβο (Επαναλήψεις 6 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου I, 2 sec.

δευτερολέπτων και της στρατηγικής TUC, επιφέρει βελτίωση στις κυκλοφοριακές συνθήκες, π.χ. 16% μείωση του χρόνου καθυστέρησης σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης, Σενάριο 1^ο, ενώ η βελτίωση που είχε πετύχει η στρατηγική TUC μόνη της, Σενάριο 2^ο, ήταν 11%. Συγκεκριμένα, η διαφορά μεταξύ τους, στρατηγική TUC και στρατηγική TUC με μέθοδο επενέργειας και μέθοδο επέκτασης πρασίνου I είναι της τάξης του 5,3%. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου I παράλληλα με τη λειτουργία της μεθόδου της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων βελτίωσε σε ποσοστό 3,9% την εφαρμογή της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι χάρις στην μέθοδο επέκτασης πρασίνου I η περίοδος του κόμβου αυξάνεται, καθυστερείται η έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί στο μπλοκαρισμένο σύνδεσμο με αποτέλεσμα να μη χάνεται πράσινο αλλά αυτό να αξιοποιείται από άλλη πρόσβαση του δακτυλίου (σύνδεσμος L_23), η οποία μάλιστα δε στέλνει (λόγω των ποσοστών στροφής) επιπλέον κυκλοφοριακό φόρτο στο μπλοκαρισμένο σύνδεσμο εξόδου του δακτυλίου.

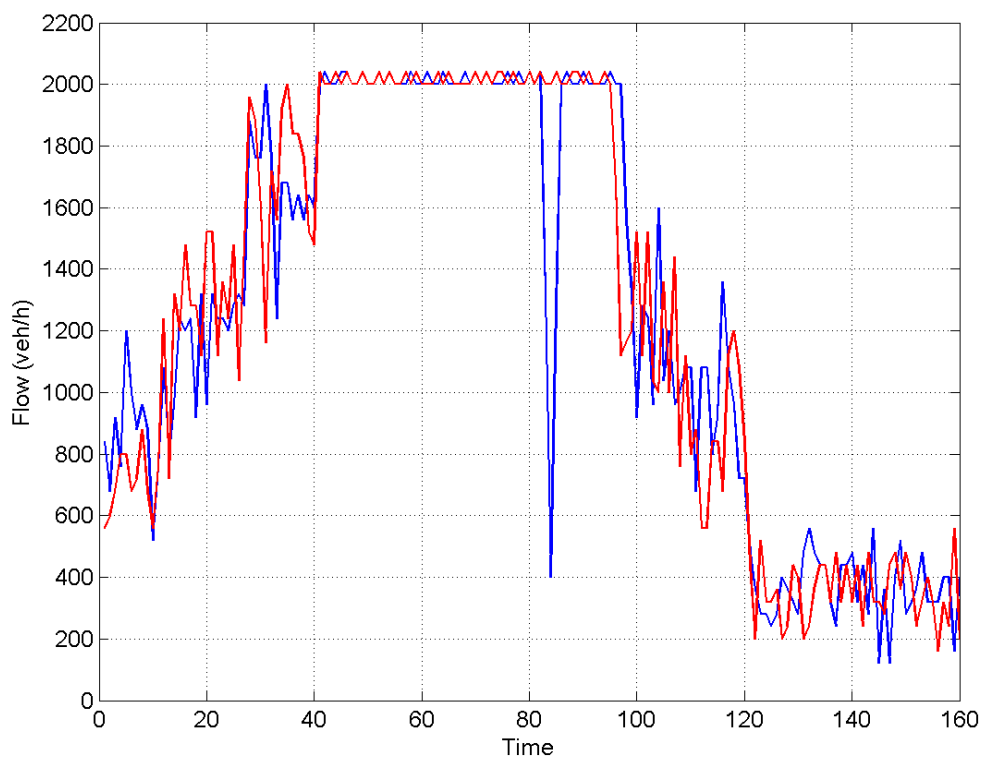
Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου I - 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστέρησης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	74.37	25.67	1.99	1836.44	49321.60
2	59.93	28.62	1.68	1645.78	49002.93
3	68.62	26.76	1.83	1750.85	49223.73
4	57.07	29.29	1.59	1604.25	49446.56
5	64.95	27.51	1.74	1725.50	49754.47
6	66.37	27.23	1.77	1719.38	49037.20
7	76.70	25.25	1.96	1856.65	49464.48
8	62.11	28.14	1.64	1671.07	49191.84
9	78.91	24.88	2.01	1878.18	49099.58
10	57.97	29.08	1.59	1587.06	48496.47
Μέση Τιμή	66.70	27.24	1.78	1727.51	49203.89
Ελάχιστη Τιμή	57.07	24.88	1.59	1587.06	48496.47
Μέγιστη Τιμή	78.91	29.29	2.01	1878.18	49754.47
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-16%	+10%	-1%	-5%	0%

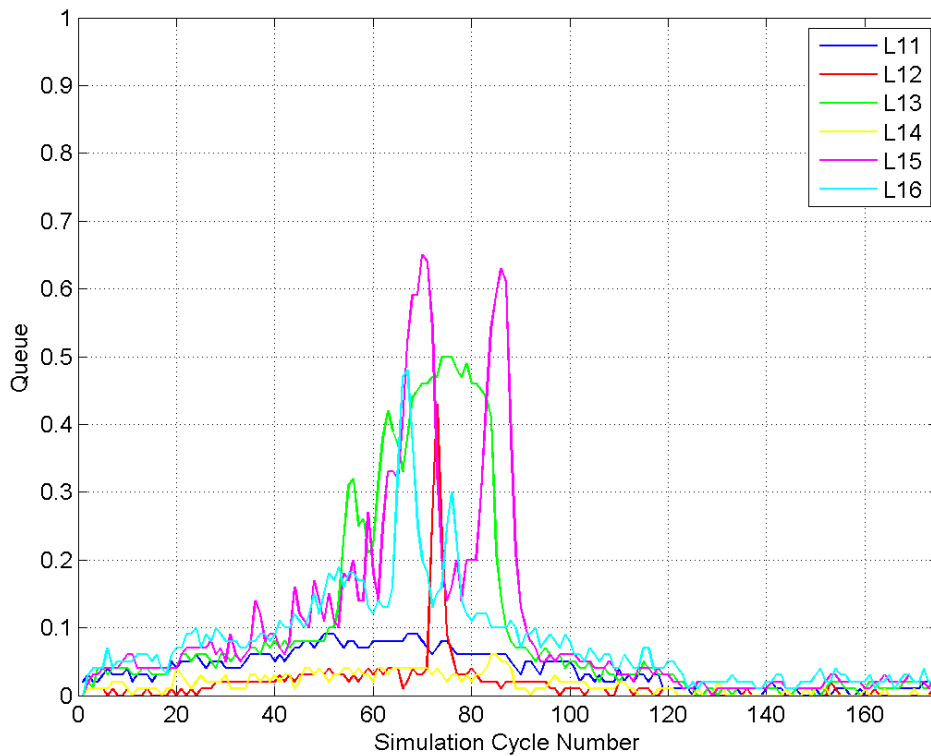
Το Σχήμα 5-14 και το Σχήμα 5-15 δείχνουν το ποσοστό κατάληψης και τη ροή των οχημάτων στην αρχή της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο για 2 προσομοιώσεις που έχουν χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων του σεναρίου αυτού. Παρατηρείται ότι, σε μια από τις δυο επαναλήψεις του Σχήματος 5-14 το ποσοστό κατάληψης είναι υψηλό και υπάρχει αντίστοιχη πτώση της ροής των οχημάτων για μικρό χρονικό διάστημα που οφείλεται σε μικρής διάρκειας μπλοκαρίσματος του συνδέσμου αυτού. Επίσης το Σχήμα 5-16 και το Σχήμα 5-17 δείχνουν τις ουρές οχημάτων στους συνδέσμους του



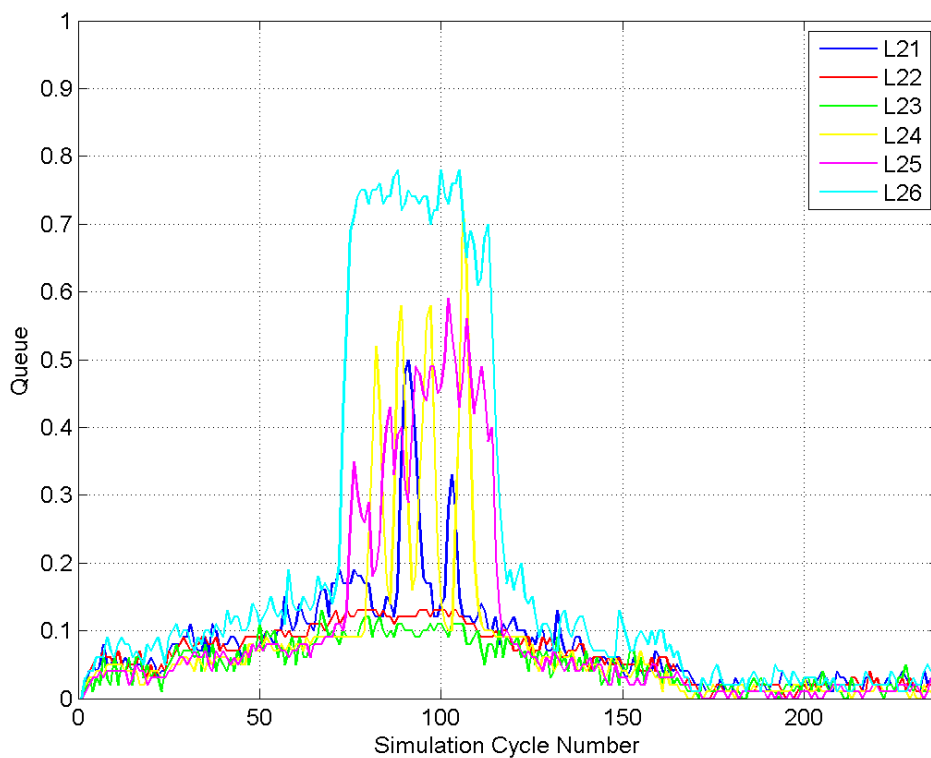
Σχήμα 5-14: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 6 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου 1, 2 sec.



Σχήμα 5-15: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 6 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου 1, 2 sec.



Σχήμα 5-16: Ουρές οχημάτων 1^{ου} κόμβου (Επανάληψη 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου 1, 2 sec.



Σχήμα 5-17: Ουρές οχημάτων 2^{ου} κόμβου (Επανάληψη 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου 1, 2 sec.

δικτύου από μια επανάληψη με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων όπου παρατηρούνται παρόμοιες κυκλοφοριακές συνθήκες με αυτές των αντίστοιχων του Σεναρίου 3.

5.1.4.2 Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου Ι – 3 δευτερόλεπτα

Στο υποσενάριο αυτό εάν οι φωρατές ανιχνεύσουν παρουσία οχημάτων στο τέλος του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά σε ποσοστό άνω του 70% για χρονική διάρκεια 3 δευτερολέπτων τότε καθυστερείται η έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί στην έξοδο της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο κατά 3 δευτερόλεπτα. Να σημειωθεί ότι στη μέθοδο ορίζεται μέγιστος αριθμός παρατάσεων της διάρκειας της φάσης που αντιστοιχεί σε 18 δευτερόλεπτα.

Η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου Ι των 3 δευτερολέπτων στο 2^ο κόμβο, καθώς και η μέθοδος της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων στους δύο κόμβους του δικτύου λειτούργησαν με τον επιθυμητό τρόπο, όπως και στο προηγούμενο υποσενάριο. Ο Πίνακας 5-10 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των 10 επαναλήψεων. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι το ποσοστό βελτίωσης του χρόνου καθυστέρησης, σε σχέση με το Σενάριο 1, είναι 13% όσο ποσοστό βελτίωσης είχε και η λειτουργία της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων μόνη της (Σενάριο 3), δηλαδή δεν προσφέρει τίποτα παραπάνω στη λειτουργία της επενέργειας, λόγω κυρίως του μικρότερου αριθμού ενεργοποίησης της στρατηγικής επέκτασης πρασίνου Ι, 3 δευτερολέπτων συγκριτικά με την περίπτωση 2 δευτερολέπτων.

Πίνακας 5-10: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου Ι - 3 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	75.35	25.49	1.98	1850.65	49496.34
2	66.86	27.12	1.80	1736.72	49156.75
3	67.84	26.92	1.80	1742.13	49388.68
4	57.09	29.28	1.58	1597.64	49260.98
5	71.89	26.13	1.91	1829.78	49680.37
6	71.51	26.21	1.87	1798.92	49231.09
7	77.83	25.06	1.98	1886.25	49337.68
8	62.66	28.03	1.68	1668.89	48936.64
9	82.59	24.25	2.10	1936.05	49353.84
10	59.50	28.72	1.60	1616.21	48714.06
Μέση Τιμή	69.31	26.72	1.83	1766.33	49255.64
Ελάχιστη Τιμή	57.09	24.25	1.58	1597.64	48714.06
Μέγιστη Τιμή	82.59	29.28	2.10	1936.05	49680.37
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-13%	+8%	+2%	-2%	+1%

5.1.5 Σενάριο 5^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου II

Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC, η μέθοδος της επενέργειας 2 δευτερολέπτων και η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II. Στόχος της δεύτερης μεθόδου επέκτασης πρασίνου είναι να παρατείνει τη διάρκεια του πρασίνου του συνδέσμου εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο, όταν η έξοδος του συνδέσμου αυτού έχει μπλοκάρει λόγω μποτιλιαρίσματος εντός του δακτυλίου, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.3.5.

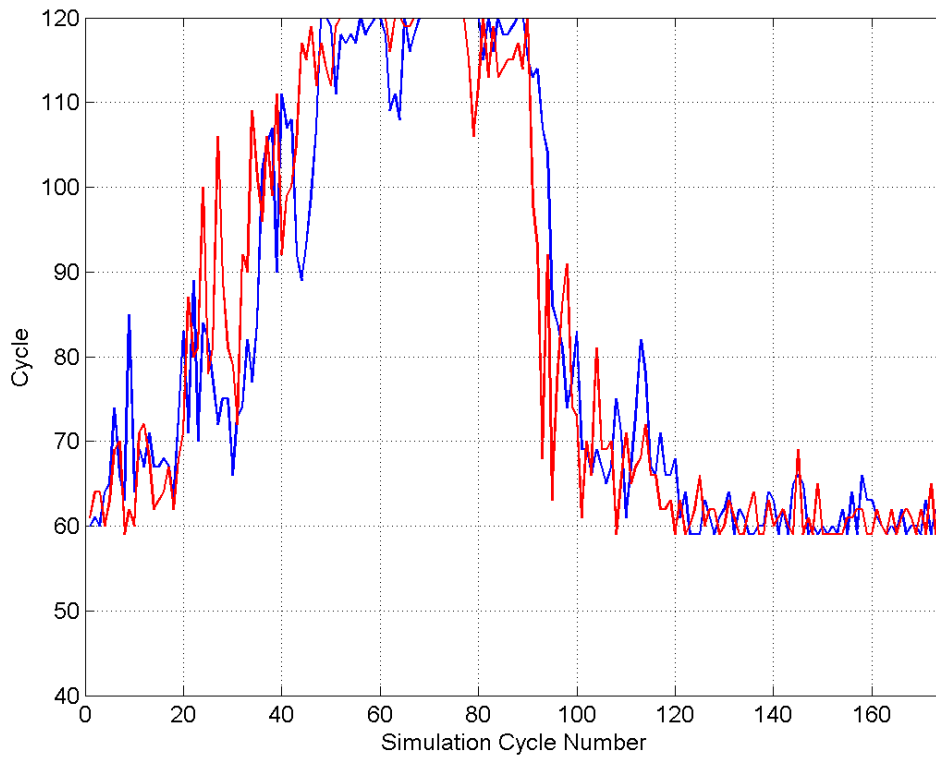
5.1.5.1 Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου II

Στο σενάριο αυτό εάν οι φωρατές, στη φάση πρασίνου του ρεύματος της εξόδου της Αττικής Οδού, ανιχνεύσουν ποσοστό κατάληψης άνω του 90% για χρόνο ενός δευτερολέπτου τότε παρατείνεται η φάση κατά ένα δευτερόλεπτο. Να σημειωθεί ότι στη μέθοδο ορίζεται μέγιστος αριθμός παρατάσεων της διάρκειας της φάσης που αντιστοιχεί σε 20 δευτερόλεπτα.

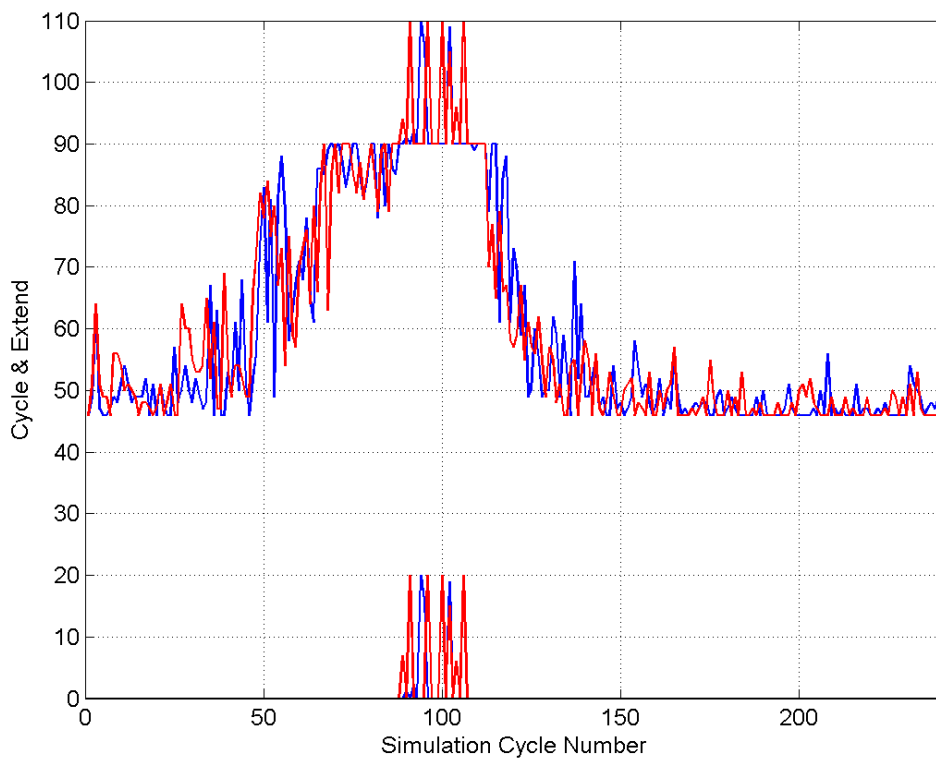
Η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου II στο 2^ο κόμβο, καθώς και η μέθοδος της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων στους δύο κόμβους του δικτύου λειτούργησαν ως προς τη λογική που θα επιθυμούσε η παρούσα μελέτη. Το Σχήμα 5-18 και το Σχήμα 5-19 δείχνουν τη διάρκεια της περιόδου στον 1^ο και το 2^ο κόμβο, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για 2 επαναλήψεις με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων. Επίσης το Σχήμα 5-19 δείχνει στο κάτω μέρος τον καθαρό χρόνο που δόθηκε ως επέκταση στον κόμβο 2 στην διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται στο ίδιο Σχήμα, η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II δε χρησιμοποιήθηκε πολλές φορές στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις παρά μόνο για κάποια χρονικά διαστήματα κατά τις ώρες αιχμής.

Τα αποτελέσματα των 10 προσομοιώσεων, Πίνακας 5-11, έδειξαν ότι η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου II παράλληλα με τη μέθοδο της επενέργειας 2 δευτερολέπτων και της στρατηγικής TUC, επιφέρει βελτίωση στις κυκλοφοριακές συνθήκες, π.χ. 10% μείωση του χρόνου καθυστέρησης σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης, Σενάριο 1^ο, ενώ η βελτίωση που είχε πετύχει η μέθοδος επέκτασης πρασίνου I, των 2 δευτερολέπτων, Σενάριο 4^ο, ήταν 16%. Όπως παρατηρείται η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II δεν πρόσφερε τόσο καλά αποτελέσματα όσο η πρώτη μέθοδος επέκτασης. Αυτό το γεγονός οφείλεται εν μέρη στο ότι κατά τη διάρκεια επέκτασης της φάσης πρασίνου της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο, δεν ωφελείται κανένα άλλο ρεύμα εισόδου του δακτυλίου και επομένως “χάνεται” πράσινο.

Το Σχήμα 5-20 και το Σχήμα 5-21 δείχνουν το ποσοστό κατάληψης και τη ροή των οχημάτων στην αρχή της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο για 2 προσομοιώσεις που έχουν χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων του σεναρίου αυτού. Συγκρίνοντας τα σχήματα αυτά με τα



Σχήμα 5-18: Διάρκειες περιόδων στον 1^ο κόμβο (Επαναλήψεις 2 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.



Σχήμα 5-19: Διάρκειες περιόδων και πράσινη επέκταση στον 2^ο κόμβο (Επαναλήψεις 2 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.

Πίνακας 5-11: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου II (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).

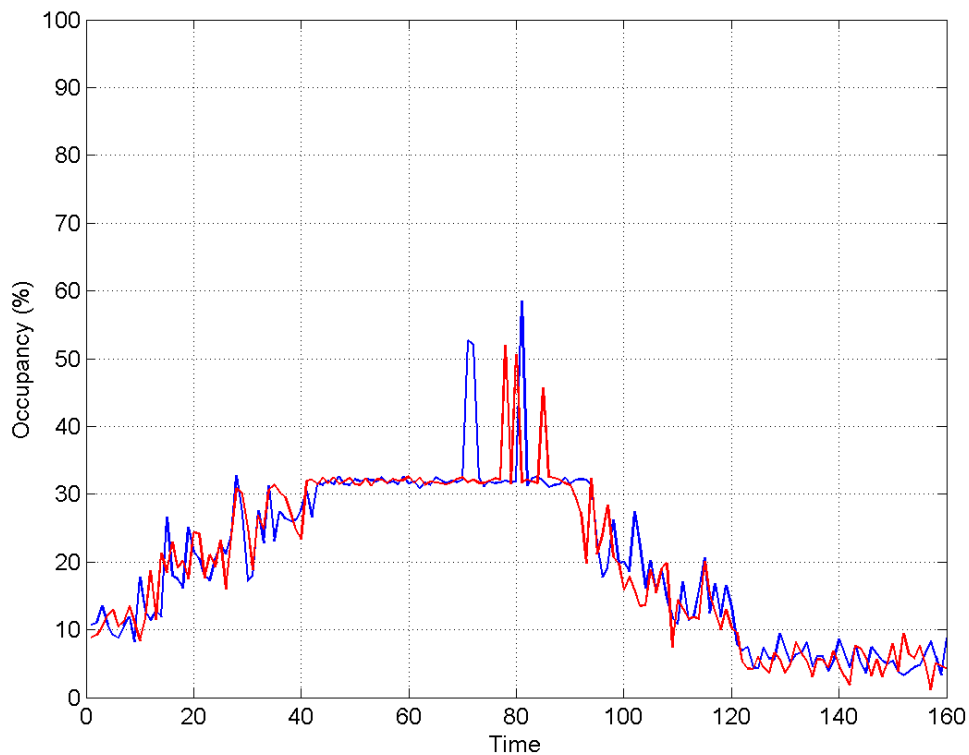
Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	78.17	24.99	2.05	1863.50	49181.76
2	72.47	26.02	1.94	1816.79	49448.22
3	68.24	26.84	1.83	1740.91	49034.92
4	67.95	26.91	1.84	1748.35	49199.51
5	69.62	26.57	1.88	1774.96	49593.89
6	68.87	26.73	1.87	1746.14	48579.41
7	81.70	24.39	2.07	1932.06	49480.95
8	61.62	28.25	1.63	1665.33	49277.28
9	86.49	23.63	2.21	2002.14	49650.29
10	58.40	28.97	1.56	1596.93	48704.67
Μέση Τιμή	71.35	26.33	1.89	1788.71	49215.09
Ελάχιστη Τιμή	58.40	23.63	1.56	1596.93	48579.41
Μέγιστη Τιμή	86.49	28.97	2.21	2002.14	49650.29
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-10%	+6%	+5%	-1%	0%

αντίστοιχα του Σεναρίου 4 παρατηρείται ότι η ουρά της εξόδου της Αττικής Οδού δεν φτάνει έως τον αυτοκινητόδρομο παρά μόνο για λίγες χρονικές στιγμές. Επίσης το Σχήμα 5-22 και το Σχήμα 5-23 δείχνουν τις ουρές οχημάτων στους συνδέσμους του δικτύου από μια επανάληψη με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων.

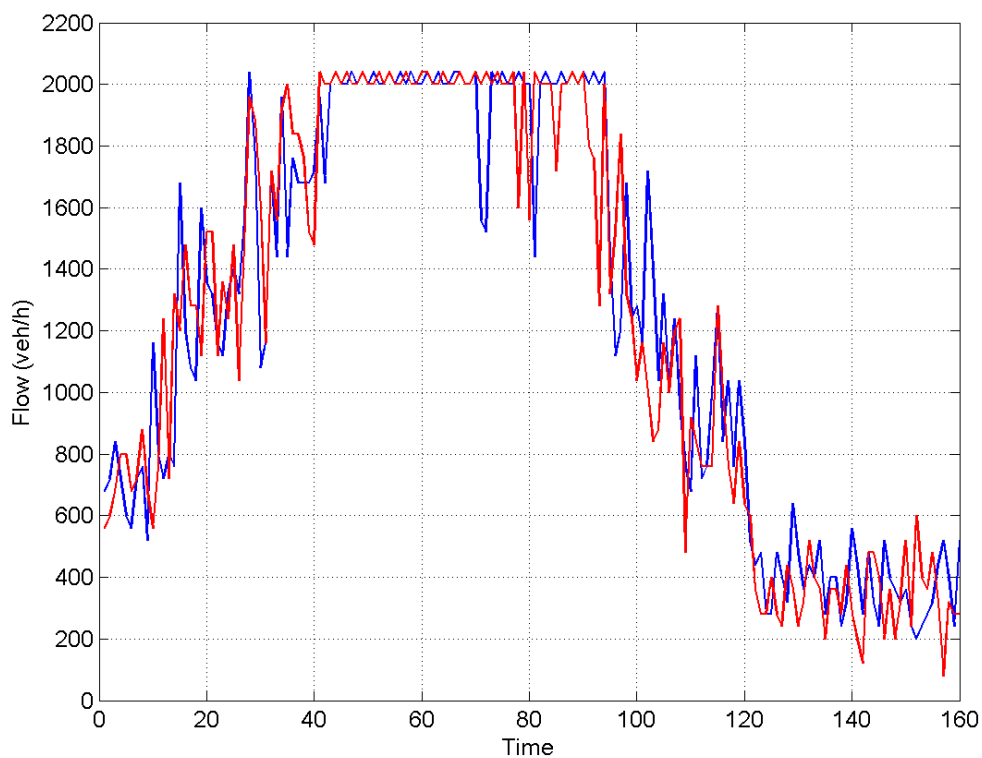
5.2 Αποτελέσματα 2ου σεναρίου ζήτησης

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης, ποσοτικά και ποιοτικά, των πέντε σεναρίων ελέγχου με εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου ζήτησης στο δίκτυο.

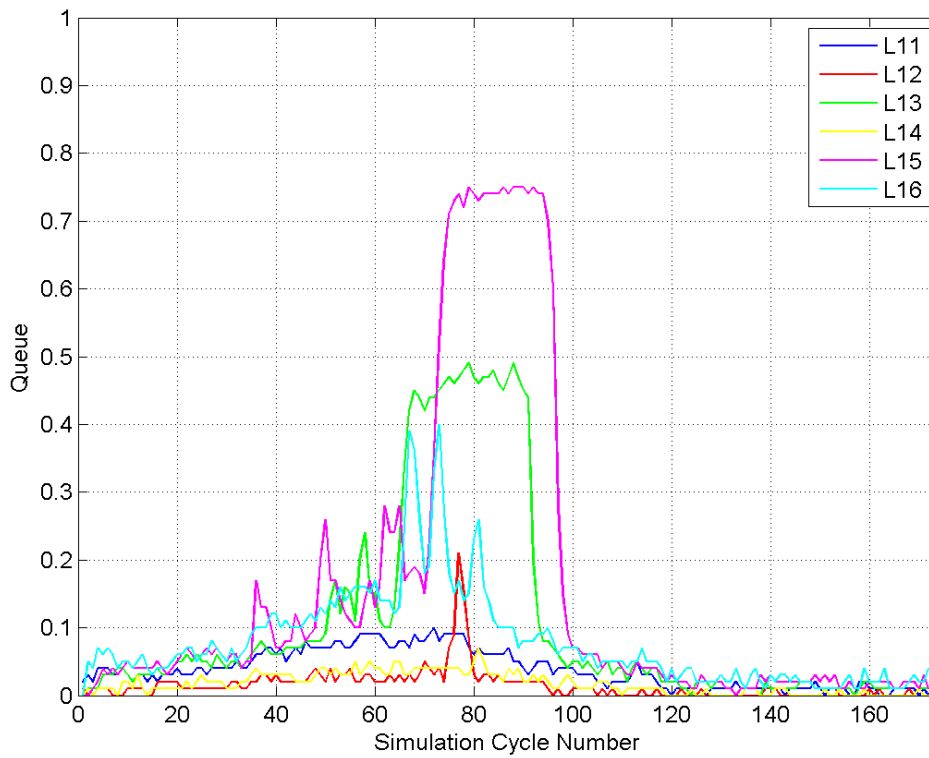
Θα πρέπει να σημειωθεί, όπως είχε αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4.2, ότι η μόνη διαφορά μεταξύ των δυο σεναρίων ζήτησης είναι ότι έχει προστεθεί, με χρήση των εργαλείων του προσομοιωτή, ένα συμβάν (ακινητοποιημένο όχημα) διάρκειας 8 λεπτών (με χρόνο έναρξης τα 90 λεπτά μετά την αρχή της προσομοίωσης) το οποίο δυσχεραίνει την κίνηση των οχημάτων που εξέρχονται από το δακτύλιο του 2^{ου} κόμβου και κατευθύνονται προς το σημείο συγχώνευσης με την Κηφισιά, στην κατεύθυνση προς Κηφισιά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-7. Το συμβάν αυτό δημιουργεί συμφόρηση η οποία μεταφέρεται προς τα πίσω και μάλιστα εντός του δακτυλίου, γεγονός που παρατηρείται συχνά και στην πραγματικότητα. Έτσι, το σενάριο αυτό επιτρέπει την διερεύνηση αποτελεσματικότητας των σεναρίων ελέγχου σε περιπτώσεις όπου οι σύνδεσμοι εξόδου του δακτυλίου αδυνατούν να απορροφήσουν πλήρως τα αντίστοιχα εξερχόμενα οχήματα.



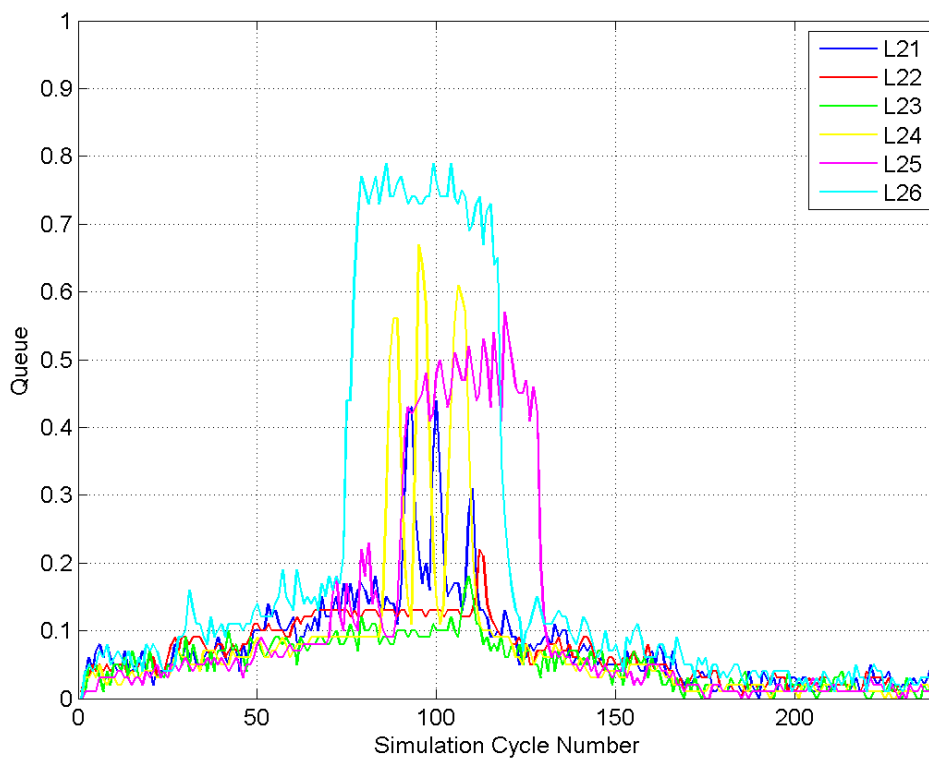
Σχήμα 5-20: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 2 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.



Σχήμα 5-21: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 2 & 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.



Σχήμα 5-22: Ουρές οχημάτων 1^{ου} κόμβου (Επανάληψη 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.



Σχήμα 5-23: Ουρές οχημάτων 2^{ου} κόμβου (Επανάληψη 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.

Σημειώνεται ότι λόγω της μικρής διάρκειας του συμβάντος αναμένεται μικρή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων από αυτά του 1^{ου} Σεναρίου ζήτησης

5.2.1 Σενάριο 1^ο : Σταθερό Πλάνο Σηματοδότησης

Η εφαρμογή, μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης, σταθερών πλάνων σηματοδότησης και στους τρεις κόμβους του υπό εξέταση δικτύου έχει ήδη πραγματοποιηθεί στη “Μελέτη εφαρμογής της στρατηγικής TUC στο δίκτυο Κηφισίας/Παρ. Αττικής Οδού” του Εργαστηρίου Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης και τα αναλυτικά αποτελέσματα περιέχονται στην αντίστοιχη αναφορά (βλ. Βιβλιογραφία).

Ο Πίνακας 5-12 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα των κριτηρίων αξιολόγησης για την περίπτωση σταθερών πλάνων σηματοδότησης για κάθε μία από τις 10 επαναλήψεις (προσομοιώσεις) καθώς και τη μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή αυτών. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν στις επόμενες παραγράφους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα εφαρμογής των υπολοίπων σεναρίων ελέγχου.

Πίνακας 5-12: Αποτελέσματα προσομοίωσης σταθερού πλάνου σηματοδότησης.

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστέρησης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	77.3	25.1	1.8	1756.9	48782.3
2	82.7	24.2	1.9	1834.9	48942.9
3	81.2	24.5	1.9	1845.2	49363.3
4	75.9	25.4	1.8	1747.6	48693.7
5	82.3	24.3	1.9	1836.8	48924.3
6	83.0	24.2	1.9	1857.0	49209.2
7	81.3	24.5	1.9	1827.5	48828.2
8	84.8	23.9	1.9	1866.1	48794.8
9	87.7	23.4	2.0	1907.8	49207.4
10	84.9	23.9	2.0	1930.1	49483.7
Μέση Τιμή	82.1	24.3	1.9	1841.0	49023.0
Ελάχιστη Τιμή	75.9	23.4	1.8	1747.6	48693.7
Μέγιστη Τιμή	87.7	25.4	2.0	1930.1	49483.7

5.2.2 Σενάριο 2^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC

Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC στον 1^ο και στον 2^ο κόμβο του υπό εξέταση δικτύου. Η διερεύνηση του σεναρίου αυτού, όπως και του πρώτου σεναρίου, έχει ήδη πραγματοποιηθεί στη “Μελέτη εφαρμογής της στρατηγικής TUC στο δίκτυο Κηφισίας/Παρ. Αττικής Οδού” του Εργαστηρίου Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης (βλ. Βιβλιογραφία), και τα συνοπτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων περιέχει ο Πίνακας 5-13. Παρατηρείται ότι, η χρήση της TUC στο δίκτυο λειτουργεί ευεργετικά σε όλα τα υπό εξέταση κριτήρια βελτιώνοντας τις κυκλοφοριακές συνθήκες στους συνδέσμους του δικτύου.

Συγκεκριμένα έχουμε μείωση του χρόνου καθυστέρησης των οχημάτων κατά 10% σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης και αύξηση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά 6% για ίδια διανυθείσα απόσταση των οχημάτων του δικτύου.

Πίνακας 5-13: Αποτελέσματα προσομοίωσης στρατηγικής TUC.

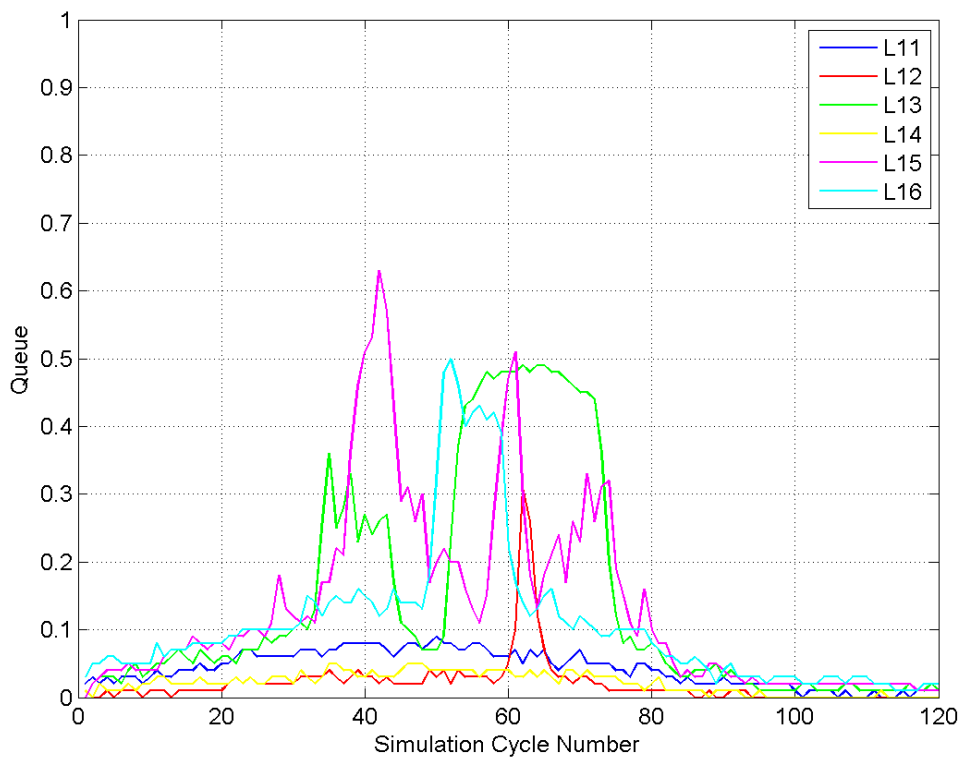
Επανάληψη	Χρόνος Καθυστέρησης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	77.0	25.2	1.9	1862.6	49213.5
2	69.5	26.6	1.8	1783.8	49274.7
3	69.4	26.6	1.7	1763.0	49111.0
4	74.8	25.6	1.8	1837.9	49737.8
5	76.9	25.2	1.8	1846.5	48851.5
6	75.2	25.5	1.9	1830.0	49074.7
7	77.4	25.1	1.9	1868.2	49264.0
8	73.0	25.9	1.8	1804.5	49093.5
9	75.6	25.4	1.9	1833.1	48719.0
10	72.1	26.1	1.8	1789.2	48932.8
Μέση Τιμή	74.1	25.7	1.8	1821.9	49127.2
Ελάχιστη Τιμή	69.4	25.1	1.7	1763.0	48719.0
Μέγιστη Τιμή	77.4	26.6	1.9	1868.2	49737.8
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-10%	+6%	-3%	-1%	0%

Το Σχήμα 5-24 και το Σχήμα 5-25 δείχνουν την εκτίμηση του μήκους της ουράς κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των συνδέσμων του 1^{ου} και του 2^{ου} κόμβου αντίστοιχα, όπου 0 σημαίνει καθόλου ουρά και 1 σημαίνει ουρά ίση με το μήκος του συνδέσμου. Επίσης το Σχήμα 5-26 και το Σχήμα 5-27 δείχνουν τα ποσοστά κατάληψης και τη ροή οχημάτων αντίστοιχα στην αρχή της εξόδου της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο για επαναλήψεις με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων. Παρατηρείται ότι σε όλες τις επαναλήψεις και σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή το ποσοστό κατάληψης στην αρχή της εξόδου αυξάνεται απότομα με αντίστοιχη μεγάλη μείωση της ροής των οχημάτων που σημαίνει ότι η ουρά της εξόδου έχει φτάσει μέχρι τον αυτοκινητόδρομο λόγω του συμβάντος.

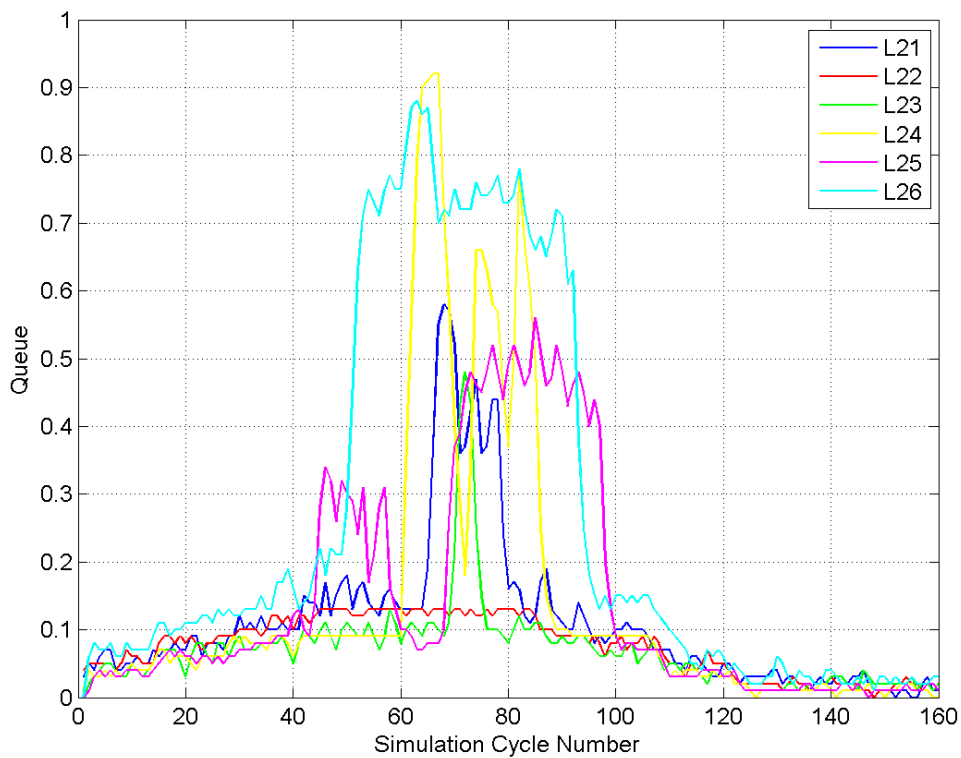
Τα παραπάνω σχήματα που περιγράφουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα τους όταν εφαρμοστούν τα υπόλοιπα σενάρια ελέγχου.

5.2.3 Σενάριο 3^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC και Επενέργεια

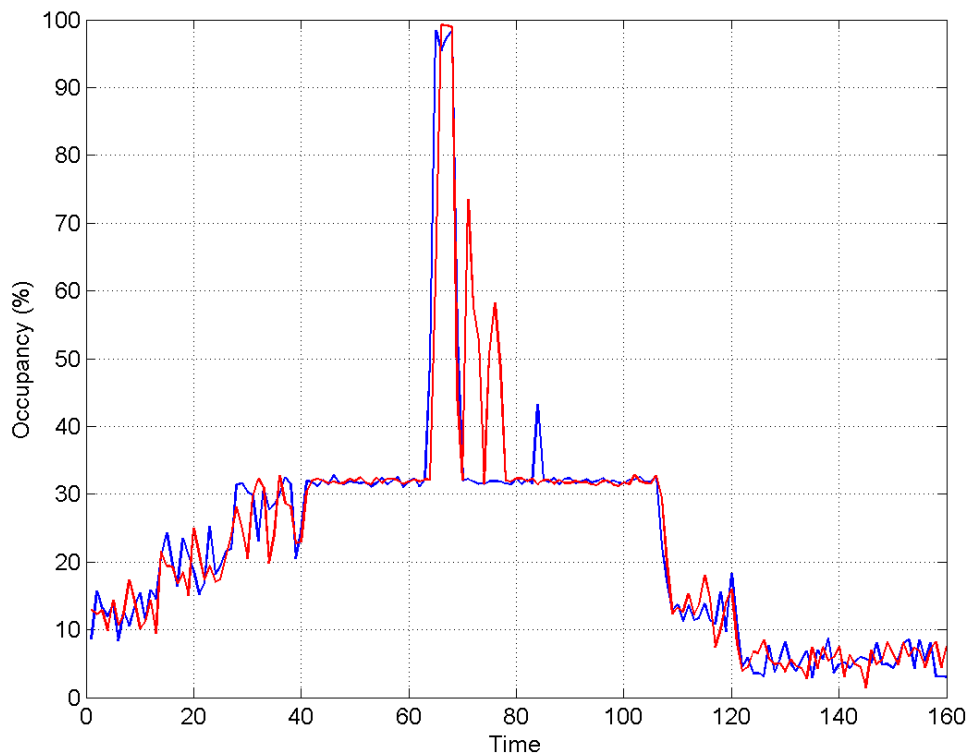
Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC και η μέθοδος της επενέργειας. Σύμφωνα με τη μέθοδο της επενέργειας οι διάρκειες πρασίνου που ορίζει η TUC μπορεί να μειωθούν εάν για συγκεκριμένο διάστημα, το οποίο αποτελεί παράμετρο της μεθόδου, δε διέρχονται οχήματα από τους αντίστοιχους συνδέσμους όταν αυτοί λαμβάνουν πράσινο. Μια τιμή της παραμέτρου της



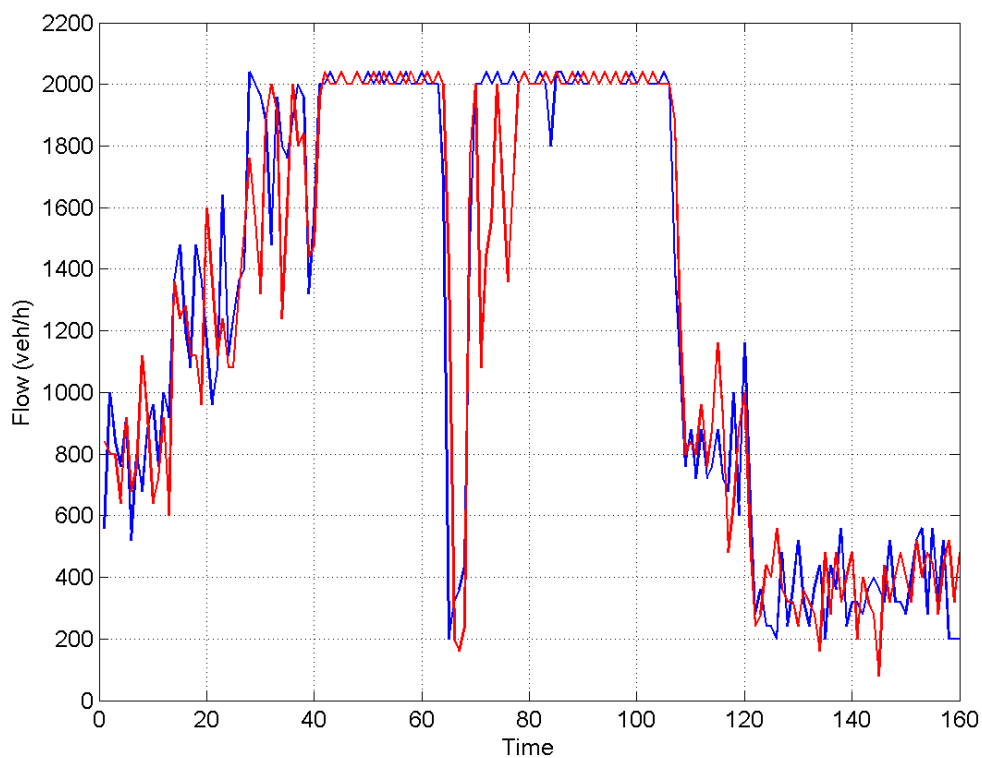
Σχήμα 5-24: Ουρές οχημάτων 1^{ου} κόμβου (Επανάληψη 4) – στρατηγική TUC.



Σχήμα 5-25: Ουρές οχημάτων 2^{ου} κόμβου (Επανάληψη 4) – στρατηγική TUC.



Σχήμα 5-26: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 4 & 8) – στρατηγική TUC.



Σχήμα 5-27: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 4 & 8) – στρατηγική TUC.

χρονικής διάρκειας θα εξεταστεί στο συγκεκριμένο σενάριο ζήτησης που είναι τα 2 δευτερόλεπτα, καθώς είναι παράμετρος με την οποία λειτουργεί σωστά και με καλά αποτελέσματα η μέθοδος αυτή.

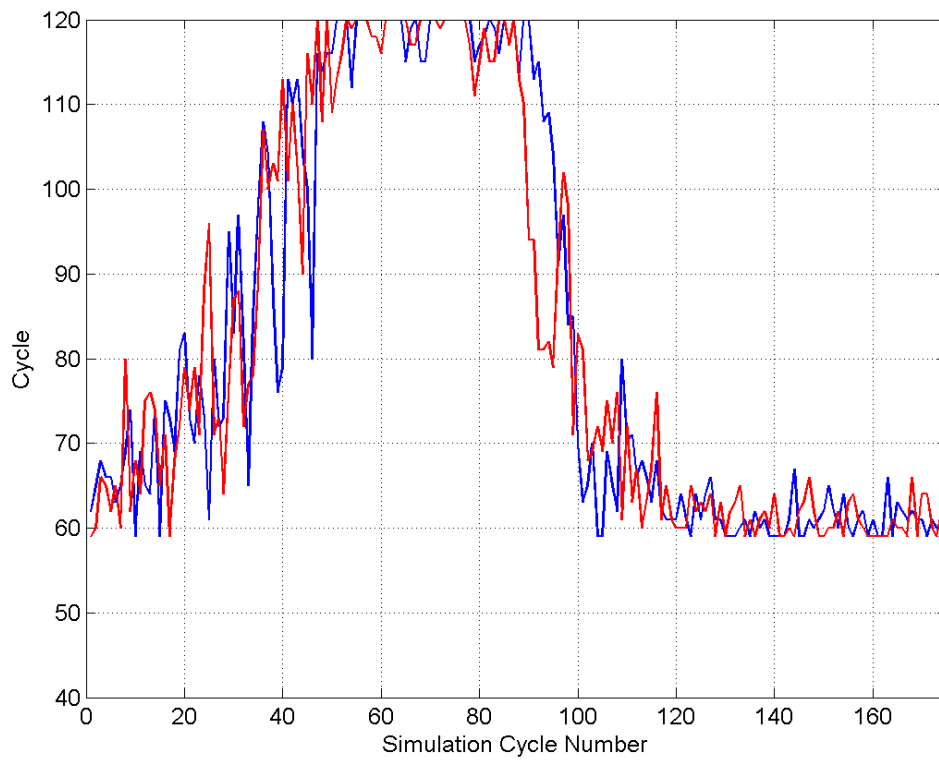
5.2.3.1 Επενέργεια 2 δευτερολέπτων

Στο σενάριο αυτό η μέθοδος της επενέργειας εφαρμόστηκε με τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας μη κατάληψης των φωρατών ίση με 2 δευτερόλεπτα.

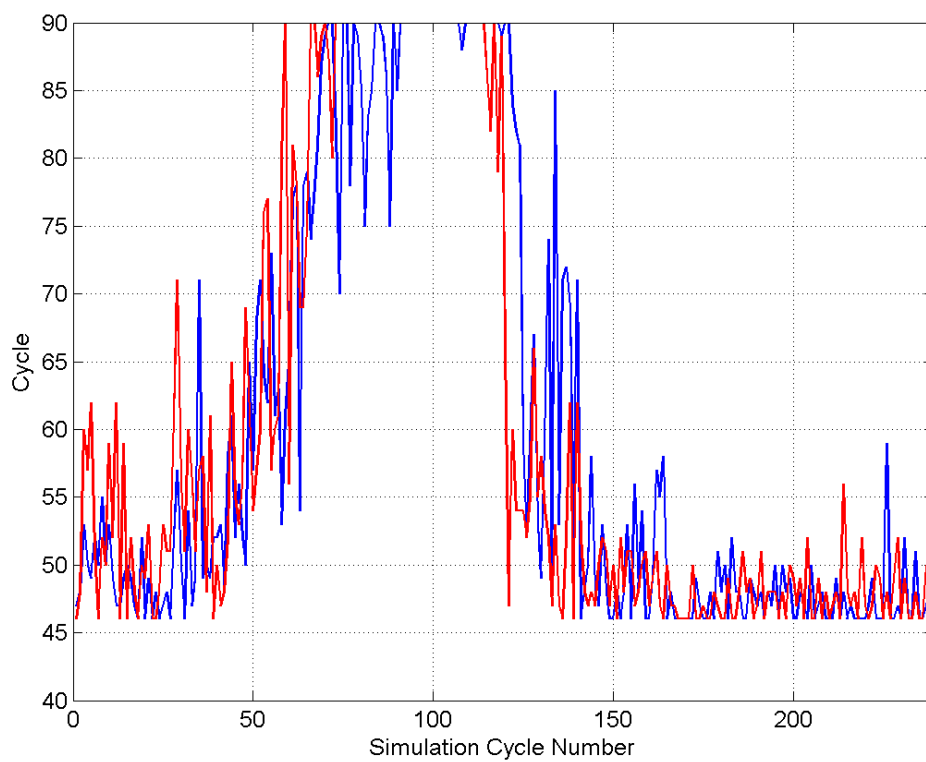
Η εφαρμογή της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων στους δύο κόμβους του δικτύου λειτούργησε ως προς τη λογική που θα επιθυμούσε η παρούσα μελέτη. Το Σχήμα 5-28 και το Σχήμα 5-29 δείχνουν τη διάρκεια της περιόδου στον 1^ο και το 2^ο κόμβο, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για 2 επαναλήψεις με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων. Παρατηρείται ότι, η επενέργεια ενεργοποιείται σε πολλές περιόδους της προσομοίωσης και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της χαμηλής ζήτησης με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας τους.

Τα αποτελέσματα των 10 προσομοιώσεων, Πίνακας 5-14, έδειξαν ότι η εφαρμογή επενέργειας 2 δευτερολέπτων παράλληλα με τη στρατηγική TUC, επιφέρει βελτίωση στις κυκλοφοριακές συνθήκες, π.χ. 10% μείωση του χρόνου καθυστέρησης σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης, Σενάριο 1^ο, ίδιο με αυτό που είχε πετύχει η στρατηγική TUC μόνη της, Σενάριο 2^ο. Συγκεκριμένα, η στρατηγική TUC με επενέργεια, Σενάριο 3^ο, υπερτερεί της στρατηγικής TUC, Σενάριο 2^ο, μόνο κατά 0,8%. Παρατηρείται επίσης, ότι, όπως και στο 1^ο Σενάριο ζήτησης, η στρατηγική TUC με επενέργεια είναι στις μισές επαναλήψεις καλύτερη από την στρατηγική TUC ενώ στις υπόλοιπες χειρότερη. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι με τη μέθοδο της επενέργειας ωφελείται το δίκτυο κυρίως στους χρόνους μη αιχμής, ενώ κατά τη διάρκεια της αιχμής συσσωρεύονται πολλά εξυπηρετηθέντα οχήματα στις εξόδους του δικτύου, τα οποία η τοπολογία του δικτύου εμποδίζει να εξέλθουν του συστήματος (όπως αναλυτικά περιγράφηκε στην Παράγραφο 5.1.3.4). Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στο δεδομένο σενάριο ζήτησης, καθώς με το μπλοκάρισμα της εξόδου της Κηφισίας με κατεύθυνση προς Κηφισιά, λόγω του συμβάντος (ακινητοποιημένο όχημα), η έξοδος επιβαρύνεται ακόμα περισσότερο.

Το Σχήμα 5-30 και το Σχήμα 5-31 δείχνουν το ποσοστό κατάληψης και τη ροή των οχημάτων στην αρχή της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο για 2 προσομοιώσεις που έχουν χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων του σεναρίου αυτού. Συγκρίνοντας τα σχήματα αυτά με τα αντίστοιχα του Σεναρίου 2 παρατηρείται ότι η ουρά της εξόδου της Αττικής Οδού φτάνει περισσότερες φορές έως τον αυτοκινητόδρομο σε αντίθεση με τις δυο επαναλήψεις του Σεναρίου 2. Επίσης το Σχήμα 5-32 και το Σχήμα 5-33 δείχνουν τις ουρές οχημάτων στους συνδέσμους του δικτύου από μια επανάληψη με χρόνο



Σχήμα 5-28: Διάρκειες περιόδων στον 1^ο κόμβο (Επαναλήψεις 3 & 6) – Επενέργεια 2 sec.



Σχήμα 5-29: Διάρκειες περιόδων στον 2^ο κόμβο (Επαναλήψεις 3 & 6) – Επενέργεια 2 sec.

καθυστερήσης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων όπου παρατηρούνται παρόμοιες ουρές με του Σεναρίου 2.

Πίνακας 5-14: Αποτελέσματα προσομοίωσης επενέργειας 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC).

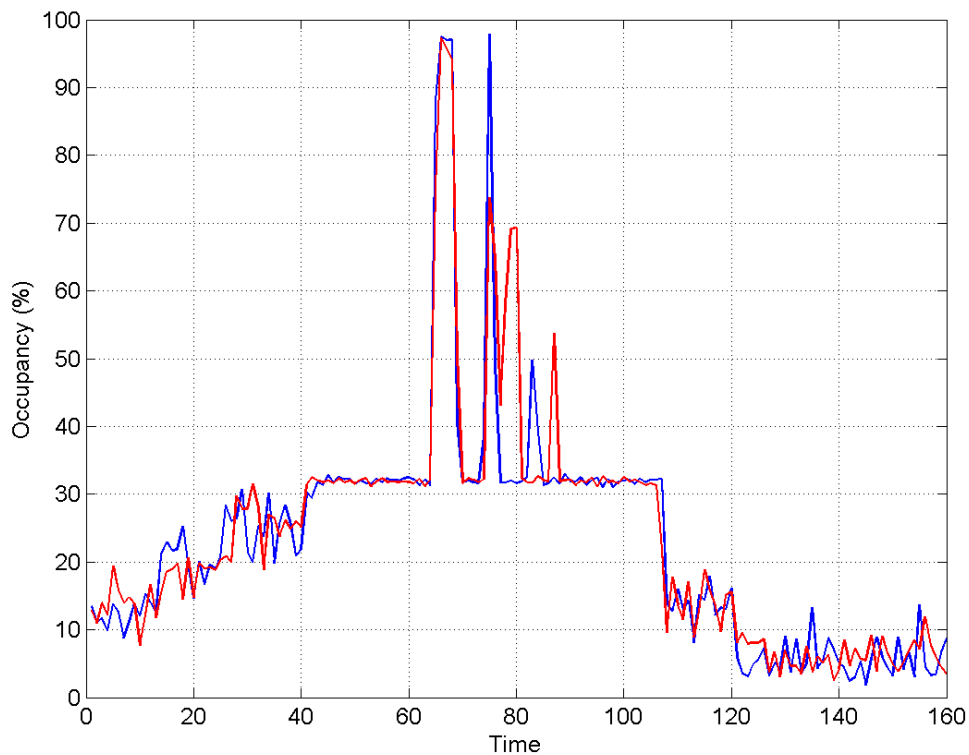
Επανάληψη	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	80.4	24.6	2.0	1914.0	49600.1
2	63.8	27.8	1.7	1682.3	48655.8
3	74.7	25.6	1.9	1831.6	49399.2
4	66.4	27.2	1.7	1717.8	49311.5
5	78.3	25.0	2.0	1903.4	49636.9
6	72.0	26.1	1.9	1800.6	49007.6
7	76.0	25.4	2.0	1871.4	49636.2
8	71.6	26.2	1.8	1777.1	48921.8
9	90.3	23.1	2.3	2037.8	49490.2
10	61.5	28.3	1.6	1651.6	48863.2
Μέση Τιμή	73.5	25.9	1.9	1818.7	49252.3
Ελάχιστη Τιμή	61.5	23.1	1.6	1651.6	48655.8
Μέγιστη Τιμή	90.3	28.3	2.3	2037.8	49636.9
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-10%	+7%	0%	-1%	0%

5.2.4 Σενάριο 4^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου I

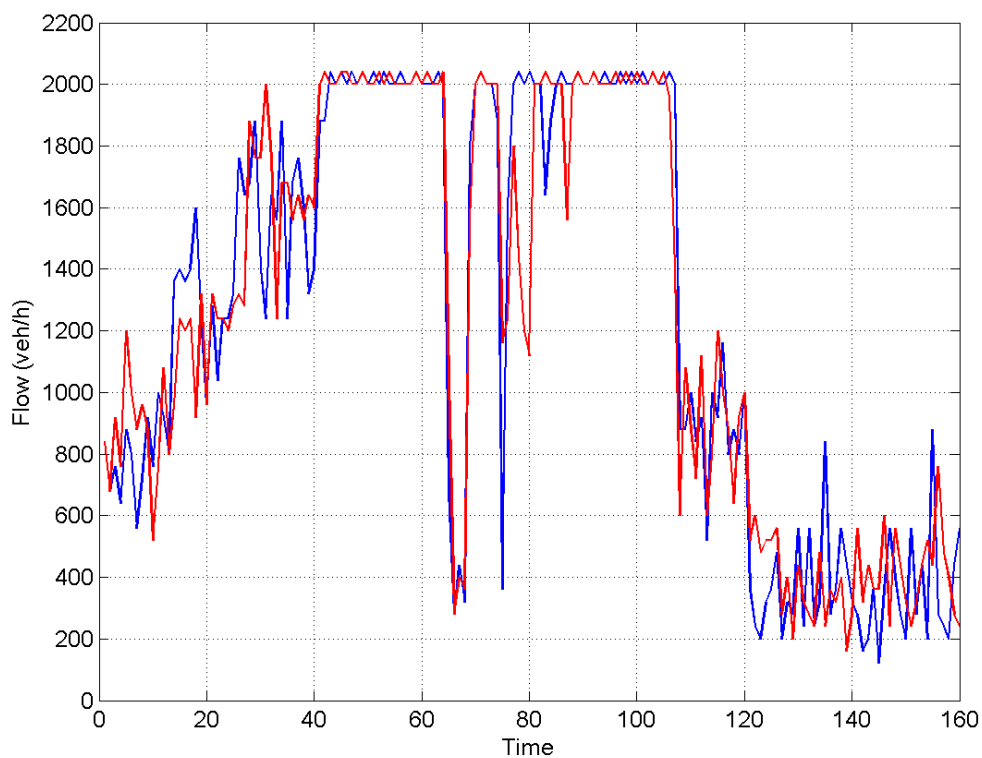
Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC, η μέθοδος της επενέργειας και η μέθοδος επέκτασης πρασίνου I. Όπως διερευνήθηκε στην Παράγραφο 5.1.3, η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας ήταν τα 2 δευτερόλεπτα, επομένως θα χρησιμοποιηθεί αυτή η παράμετρος στη μελέτη του σεναρίου με εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου I. Στόχος της μεθόδου της επέκτασης πρασίνου I είναι να καθυστερήσει την έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί στην έξοδο της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο όταν η ουρά του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά έχει φτάσει στην αρχή της εισόδου και πιθανότατα έχει εισχωρήσει εντός του δακτυλίου μπλοκάροντας το σύνδεσμο εξόδου της Αττικής Οδού. Μία τιμή της παραμέτρου της χρονικής παράτασης θα εξεταστεί στο συγκεκριμένο σενάριο ζήτησης που είναι τα 2 δευτερόλεπτα, καθώς είναι παράμετρος με την οποία λειτουργεί σωστά και με καλά αποτελέσματα η μέθοδος αυτή.

5.2.4.1 Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου I – 2 δευτερόλεπτα

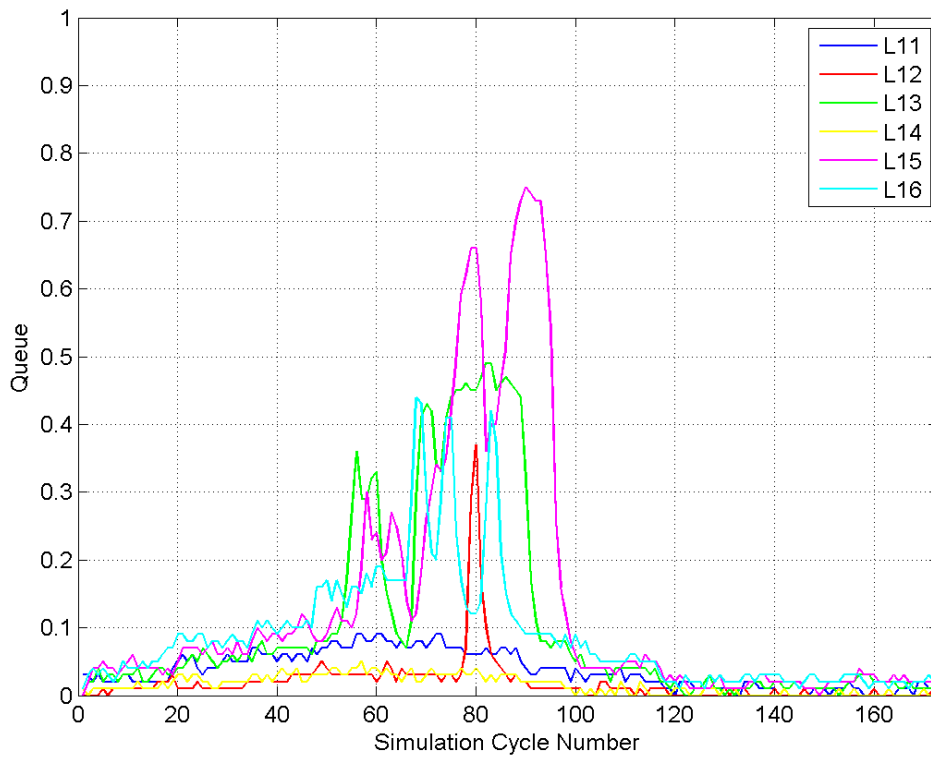
Στο σενάριο αυτό εάν οι φωρατές ανιχνεύσουν παρουσία οχημάτων στο τέλος του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά σε ποσοστό άνω του 70% για χρονική διάρκεια 2 δευτερολέπτων τότε καθυστερείται η



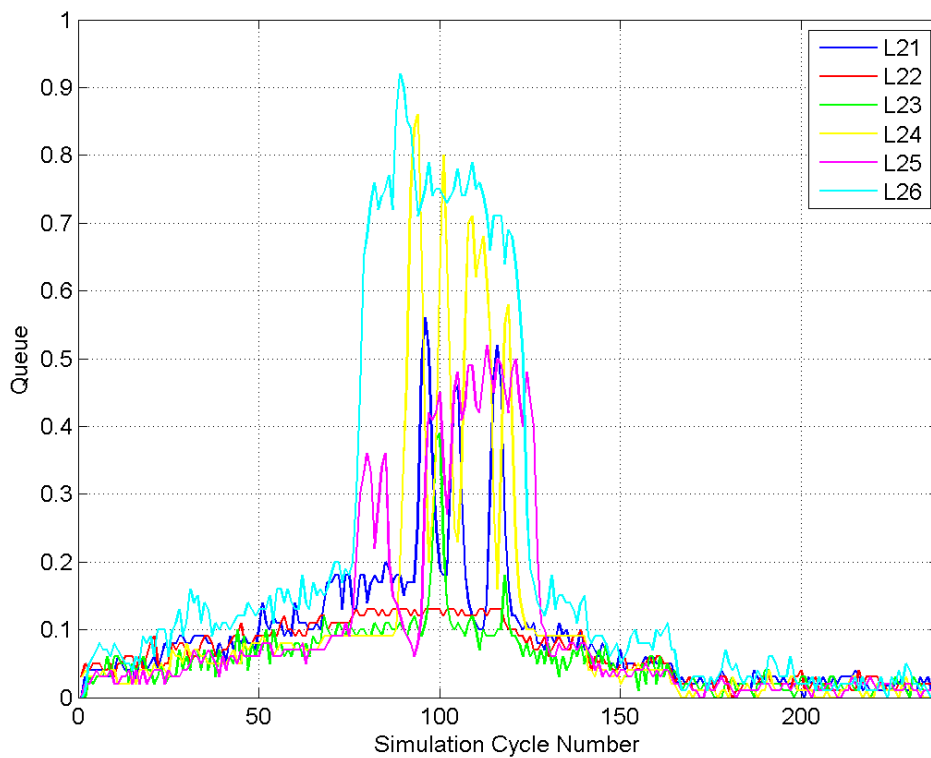
Σχήμα 5-30: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 3 & 6) – Επενέργεια 2 sec.



Σχήμα 5-31: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 3 & 6) – Επενέργεια 2 sec.



Σχήμα 5-32: Ουρές οχημάτων 1^{ου} κόμβου (Επανάληψη 3) – Επενέργεια 2 sec.



Σχήμα 5-33: Ουρές οχημάτων 2^{ου} κόμβου (Επανάληψη 3) – Επενέργεια 2 sec.

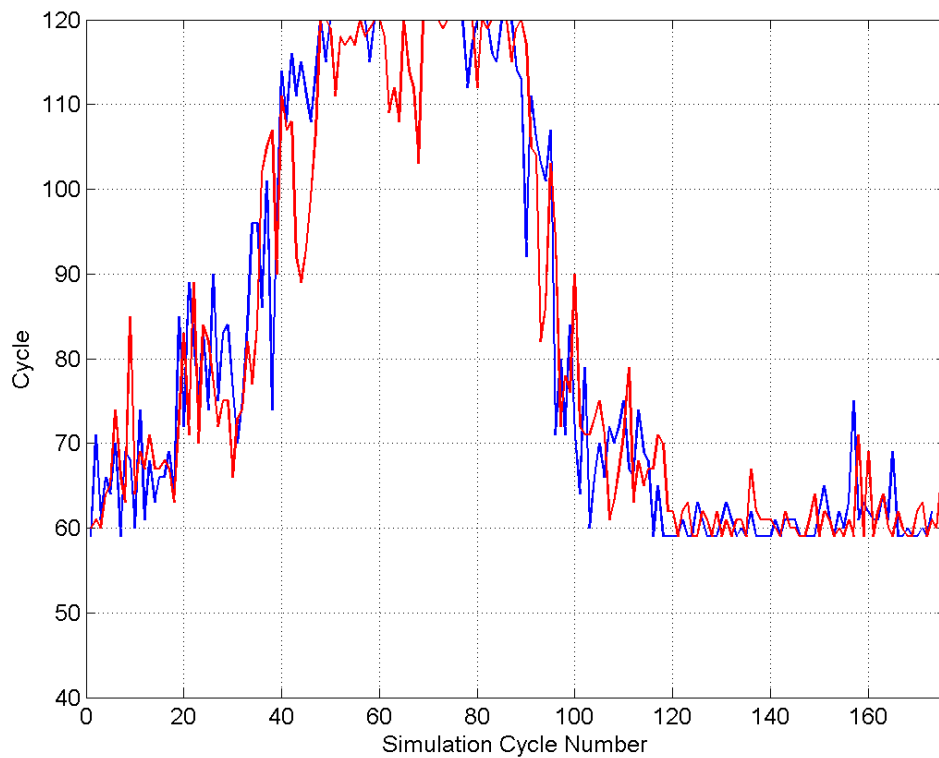
έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί στην έξοδο της Αττικής Οδού από αεροδρόμιο κατά 2 δευτερόλεπτα. Να σημειωθεί ότι στη μέθοδο ορίζεται μέγιστος αριθμός παρατάσεων της διάρκειας της φάσης που αντιστοιχεί σε 20 δευτερόλεπτα.

Το Σχήμα 5-34 και το Σχήμα 5-35 δείχνουν τη διάρκεια της περιόδου στον 1^ο και το 2^ο κόμβο, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για 2 επαναλήψεις με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων. Επίσης το Σχήμα 5-35 δείχνει στο κάτω μέρος τον καθαρό χρόνο που δόθηκε ως επέκταση στον κόμβο 2 στην διάρκεια της προσομοίωσης.

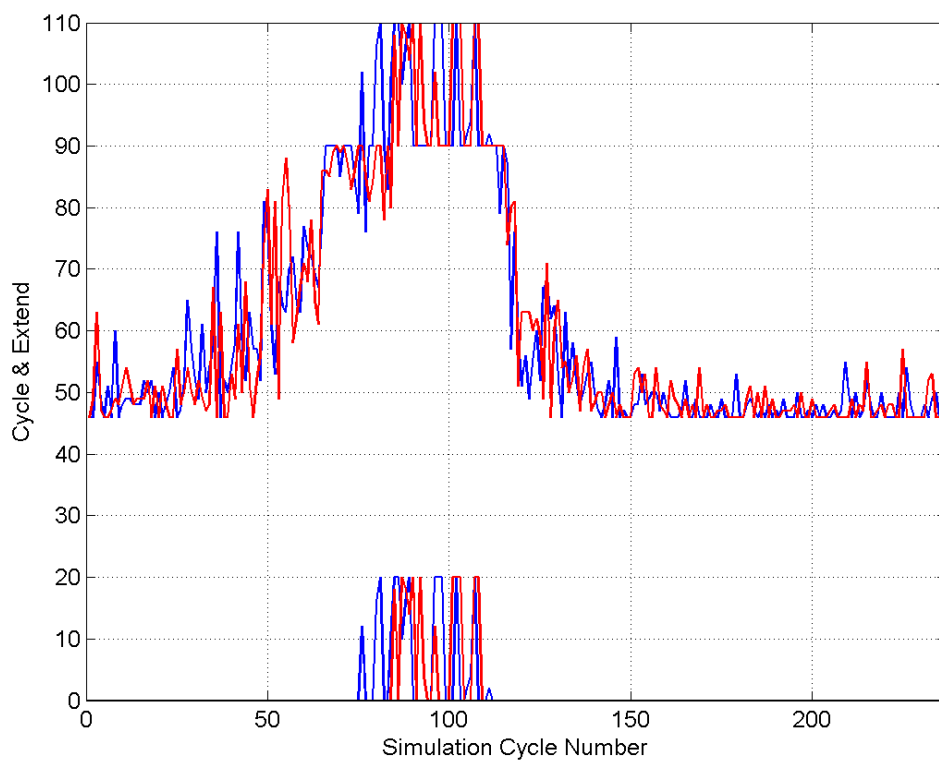
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-35, η μέθοδος επέκτασης πρασίνου I χρησιμοποιήθηκε αρκετές φορές στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις. Αυτό συνέβη διότι στο συγκεκριμένο σενάριο ζήτησης, λόγω της ύπαρξης του συμβάντος, εμφανίζεται έντονο μπλοκάρισμα στο τέλος του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά. Στο Σχήμα 5-35 βλέπουμε ότι η μέθοδος επέκτασης πρασίνου I αύξησε τη διάρκεια της περιόδου 90 δευτερόλεπτα στο μέγιστο των 110 δευτερόλεπτων σε αρκετές περιόδους της προσομοίωσης κατά την ώρα αιχμής.

Τα αποτελέσματα 10 προσομοιώσεων, Πίνακας 5-15, έδειξαν ότι η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου I παράλληλα με τη μέθοδο της επενέργειας 2 δευτερολέπτων και της στρατηγικής TUC, επιφέρει βελτίωση στις κυκλοφοριακές συνθήκες, π.χ. 12% μείωση του χρόνου καθυστέρησης σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης, Σενάριο 1^ο, ενώ η βελτίωση που είχε πετύχει η στρατηγική TUC μόνη της, Σενάριο 2^ο, ήταν 10%. Συγκεκριμένα, η διαφορά μεταξύ τους, στρατηγική TUC και στρατηγική TUC με μέθοδο επενέργειας και μέθοδο επέκτασης πρασίνου I είναι της τάξης του 2,4%. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου I παράλληλα με τη λειτουργία της μεθόδου της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων βελτίωσε σε ποσοστό 1,6% την εφαρμογή της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι χάρις στην μέθοδο επέκτασης πρασίνου η περίοδος του κόμβου αυξάνεται, καθυστερείται η έναρξη της φάσης που αντιστοιχεί στον μπλοκαρισμένο σύνδεσμο με αποτέλεσμα να μη χάνεται πράσινο αλλά αυτό να αξιοποιείται από άλλη πρόσβαση του δακτυλίου (σύνδεσμο L_23), η οποία μάλιστα δε στέλνει (λόγω των ποσοστών στροφής) επιπλέον κυκλοφοριακό φόρτο στο μπλοκαρισμένο σύνδεσμο εξόδου του δακτυλίου.

Το Σχήμα 5-36 και το Σχήμα 5-37 δείχνουν το ποσοστό κατάληψης και τη ροή των οχημάτων στην αρχή της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο για 2 προσομοιώσεις που έχουν χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων του σεναρίου αυτού. Συγκρίνοντας τα σχήματα αυτά με τα αντίστοιχα του Σεναρίου 3 παρατηρείται ότι η ουρά της εξόδου της Αττικής Οδού φτάνει έως τον αυτοκινητόδρομο λιγότερες φορές συγκριτικά με τις δυο επαναλήψεις του Σεναρίου 3. Επίσης το Σχήμα 5-38 και το Σχήμα 5-39 δείχνουν τις



Σχήμα 5-34: Διάρκειες περιόδων στον 1^ο κόμβο (Επαναλήψεις 9 & 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου I, 2 sec.



Σχήμα 5-35: Διάρκειες περιόδων και πράσινη επέκταση στον 2^ο κόμβο (Επαναλήψεις 9 & 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου I, 2 sec.

ουρές οχημάτων στους συνδέσμους του δικτύου από μια επανάληψη με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων.

Πίνακας 5-15: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου I - 2 δευτερολέπτων (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).

Επανάληψη	Χρόνος Καθυστέρησης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	75.4	25.5	1.9	1853.3	49323.9
2	70.9	26.3	1.9	1795.5	49137.1
3	66.8	27.1	1.7	1719.3	49241.1
4	65.6	27.4	1.7	1696.0	49030.2
5	75.5	25.5	1.9	1872.4	49715.9
6	87.6	23.5	2.1	1993.5	49147.8
7	75.5	25.5	1.9	1834.5	48996.6
8	75.4	25.5	1.9	1831.2	49161.9
9	71.9	26.1	1.9	1783.1	48775.1
10	58.5	29.0	1.6	1609.6	48752.2
Μέση Τιμή	72.3	26.1	1.9	1798.8	49128.2
Ελάχιστη Τιμή	58.5	23.5	1.6	1609.6	48752.2
Μέγιστη Τιμή	87.6	29.0	2.1	1993.5	49715.9
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-12%	+8%	-2%	-2%	0%

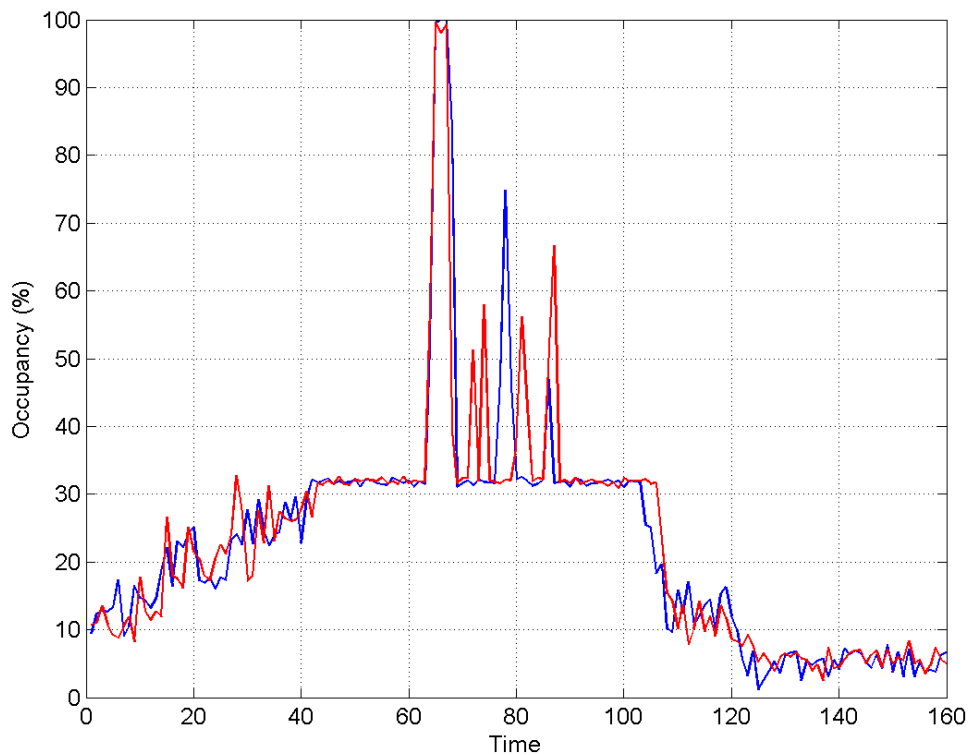
5.2.5 Σενάριο 5^ο : Στρατηγική Ελέγχου TUC, Επενέργεια και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου II

Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC, η μέθοδος της επενέργειας και η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II. Όπως διερευνήθηκε στη Παράγραφο 5.1.3 η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας ήταν τα 2 δευτερόλεπτα, επομένως θα χρησιμοποιηθεί αυτή η παράμετρος στη μελέτη του σεναρίου με εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου II. Στόχος της μεθόδου είναι να παρατείνει τη διάρκεια του πρασίνου του συνδέσμου εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο, όταν η έξοδος του συνδέσμου αυτού έχει μπλοκάρει λόγω μπουτλιαρίσματος εντός του δακτυλίου.

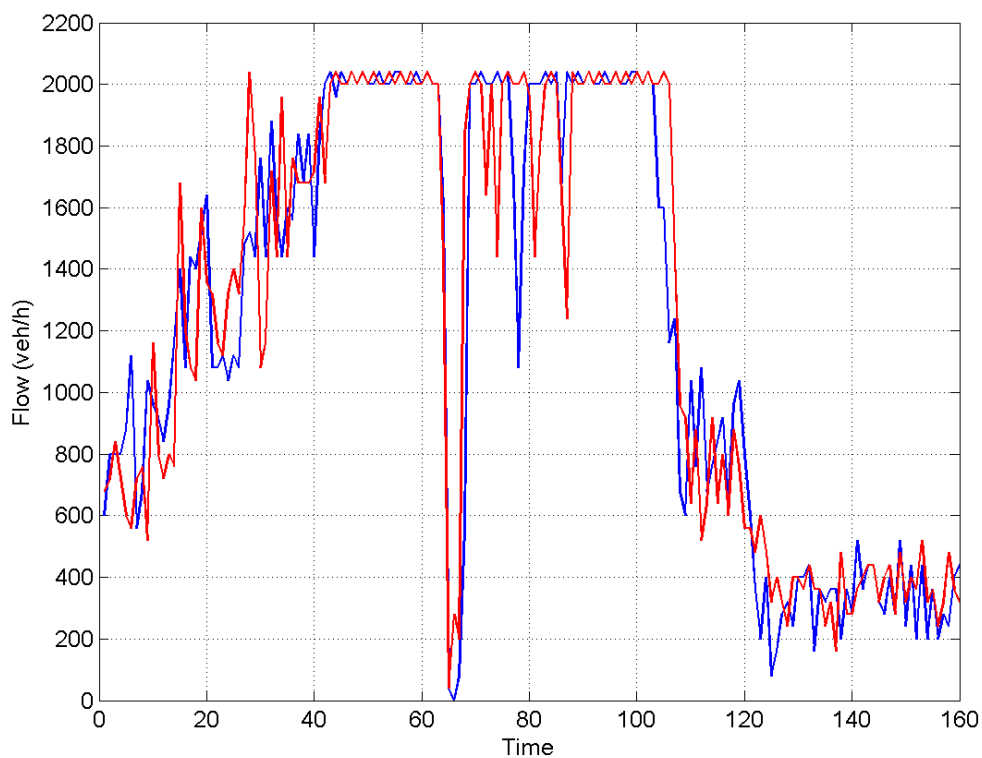
5.2.5.1 Επενέργεια 2 δευτερολέπτων και Μέθοδος Επέκτασης Πρασίνου II

Στο υποσενάριο αυτό εάν οι φωρατές, στη φάση πρασίνου του ρεύματος της εξόδου της Αττικής Οδού, ανιχνεύσουν ποσοστό κατάληψης άνω του 90% για χρόνο ενός δευτερολέπτου τότε παρατείνεται η φάση κατά ένα δευτερόλεπτο. Να σημειωθεί ότι στη μέθοδο ορίζεται μέγιστος αριθμός παρατάσεων της διάρκειας της φάσης που αντιστοιχεί σε 20 δευτερόλεπτα.

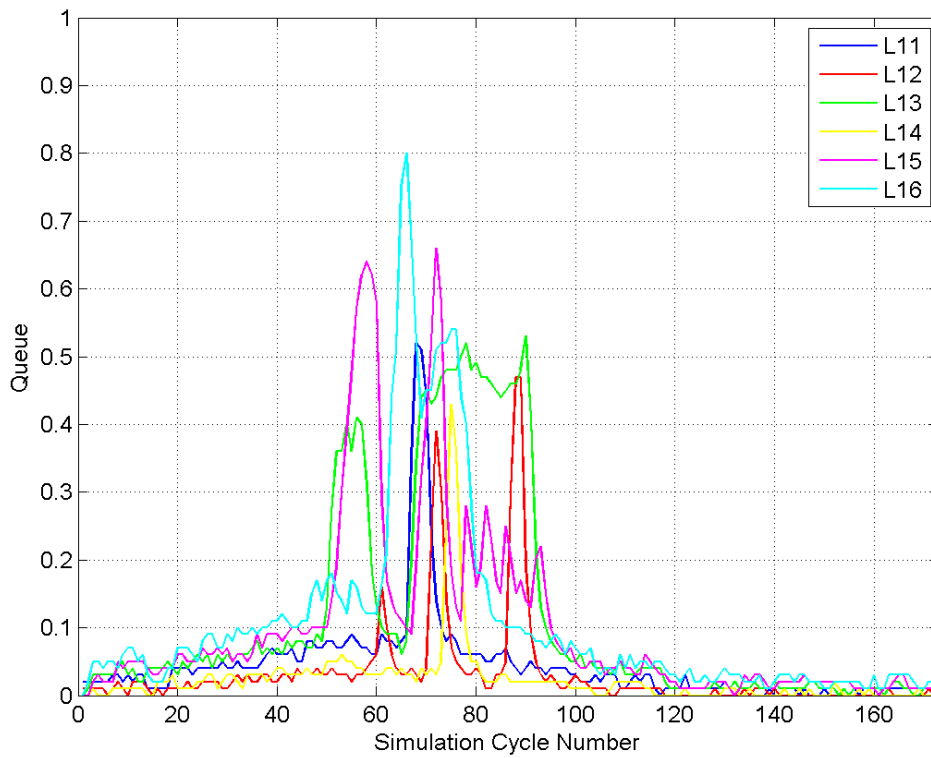
Η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου II στο 2^ο κόμβο, καθώς και η μέθοδος της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων στους δύο κόμβους του δικτύου λειτούργησαν ως προς τη λογική που θα επιθυμούσε η παρούσα μελέτη. Το



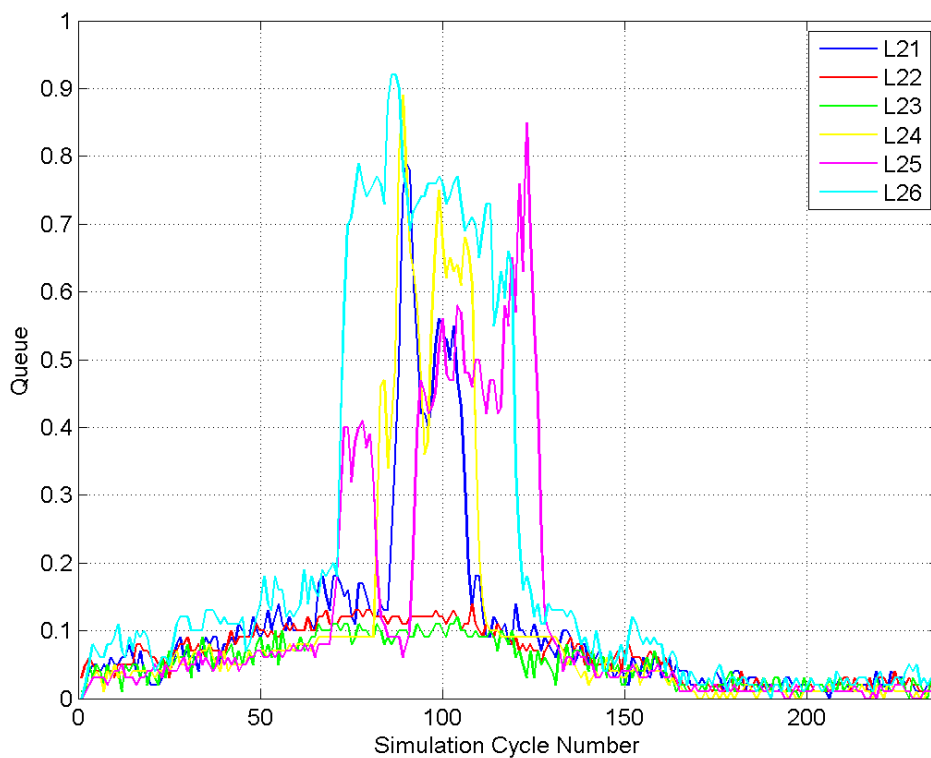
Σχήμα 5-36: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 9 & 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου 1, 2 sec.



Σχήμα 5-37: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 9 & 2) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου 1, 2 sec.



Σχήμα 5-38: Ουρές οχημάτων 1^{ου} κόμβου (Επανάληψη 9) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου 1, 2 sec.



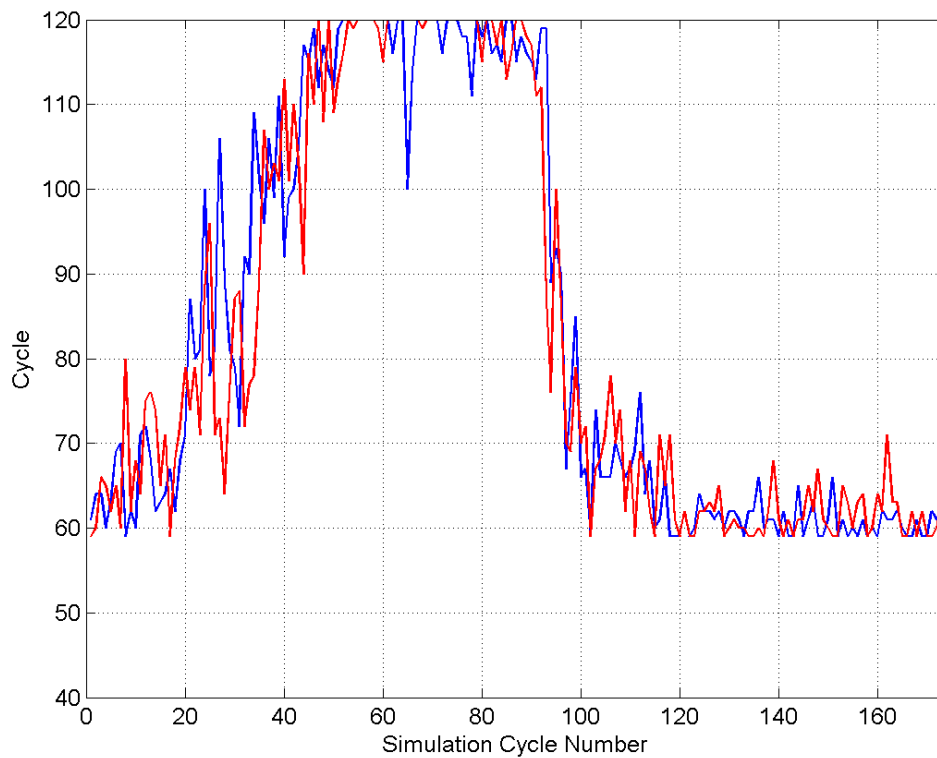
Σχήμα 5-39: Ουρές οχημάτων 2^{ου} κόμβου (Επανάληψη 9) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου 1, 2 sec.

Σχήμα 5-40 και το Σχήμα 5-41 δείχνουν τη διάρκεια της περιόδου στον 1^ο και το 2^ο κόμβο, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για 2 επαναλήψεις με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων. Επίσης το Σχήμα 5-41 δείχνει στο κάτω μέρος τον καθαρό χρόνο που δόθηκε ως επέκταση στον κόμβο 2 στην διάρκεια της προσομοίωσης.

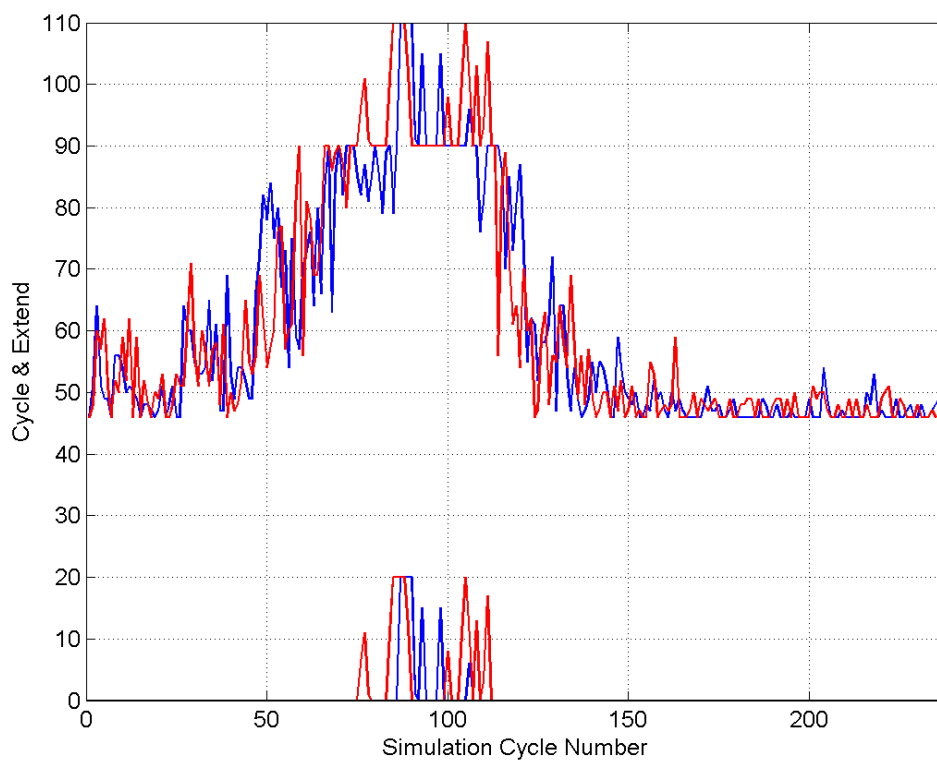
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-41, η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II χρησιμοποιήθηκε αρκετές φορές στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις. Αυτό συνέβη διότι στο συγκεκριμένο σενάριο ζήτησης, λόγω της ύπαρξης του συμβάντος, εμφανίζεται έντονο μπλοκάρισμα στο τέλος του συνδέσμου που εξέρχεται από το δακτύλιο με κατεύθυνση προς Κηφισιά. Στο Σχήμα 5-41 βλέπουμε ότι η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II αύξησε τη διάρκεια της περιόδου από 90 δευτερόλεπτα στο μέγιστο των 110 δευτερόλεπτων σε αρκετές περιόδους της προσομοίωσης κατά την ώρα αιχμής.

Τα αποτελέσματα 10 προσομοιώσεων, Πίνακας 5-16, έδειξαν ότι η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης πρασίνου II παράλληλα με τη μέθοδο της επενέργειας 2 δευτερολέπτων και της στρατηγικής TUC, επιφέρει βελτίωση στις κυκλοφοριακές συνθήκες, π.χ. 8% μείωση του χρόνου καθυστέρησης σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης, Σενάριο 1^ο, ενώ η βελτίωση που είχε πετύχει η στρατηγική TUC μόνη της, Σενάριο 2^ο, ήταν 10%. Όπως παρατηρείται η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II δεν πρόσφερε τόσο καλά αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψη ότι συγκριτικά με την λειτουργία της στρατηγικής TUC μόνη της, Σενάριο 2, είχε χειροτέρευση της τάξης του 1,9% ενώ η πρώτη μέθοδος επέκτασης, Σενάριο 4, είχε καλύτερευση της τάξης του 2,4%. Αυτό το γεγονός οφείλεται κυρίως στο ότι κατά τη διάρκεια που επεκτείνεται η φάση πρασίνου της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο, δεν ωφελείται κανένα άλλο ρεύμα εισόδου του δακτυλίου, και επομένως “χάνεται” πράσινο, και ιδιαίτερα στο συγκεκριμένο σενάριο ζήτησης που πραγματοποιούνται περισσότερες επεκτάσεις λόγω του συμβάντος.

Το Σχήμα 5-42 και το Σχήμα 5-43 δείχνουν το ποσοστό κατάληψης και τη ροή των οχημάτων στην αρχή της εξόδου της Αττικής Οδού από το αεροδρόμιο για 2 προσομοιώσεις που έχουν χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων του σεναρίου αυτού. Συγκρίνοντας τα σχήματα αυτά με τα αντίστοιχα του Σεναρίου 4 παρατηρείται ότι η ουρά της εξόδου της Αττικής Οδού φτάνει έως τον αυτοκινητόδρομο σε μικρότερο ποσοστό από τις δυο επαναλήψεις του Σεναρίου 4. Επίσης το Σχήμα 5-44 και το Σχήμα 5-45 δείχνουν τις ουρές οχημάτων στους συνδέσμους του δικτύου από μια επανάληψη με χρόνο καθυστέρησης κοντά στη μέση τιμή των 10 επαναλήψεων.



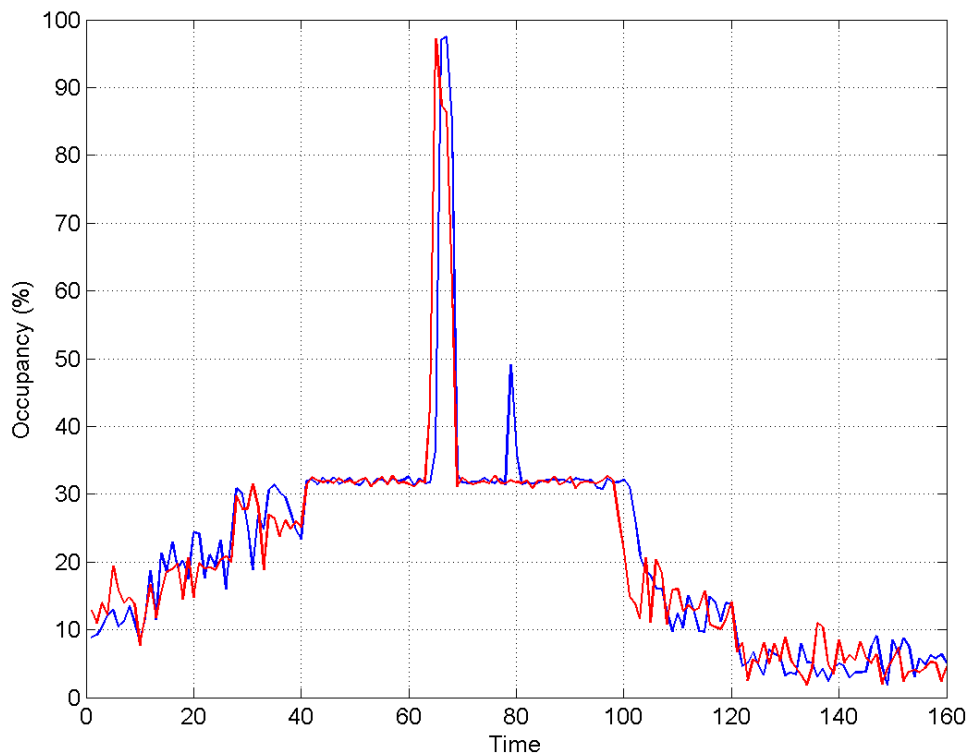
Σχήμα 5-40: Διάρκειες περιόδων στον 1^ο κόμβο (Επαναλήψεις 5 & 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.



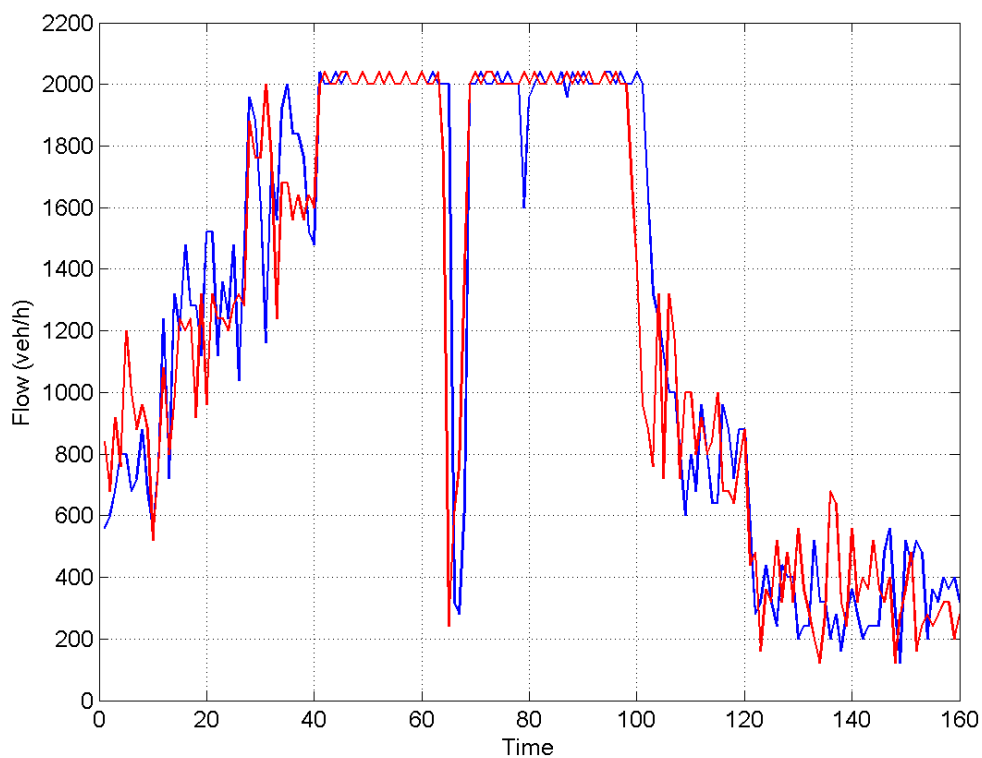
Σχήμα 5-41: Διάρκειες περιόδων και πράσινη επέκταση στον 2^ο κόμβο (Επαναλήψεις 5 & 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.

Πίνακας 5-16: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεθόδου επέκτασης πρασίνου II (με παράλληλη λειτουργία στρατηγικής TUC και επενέργειας).

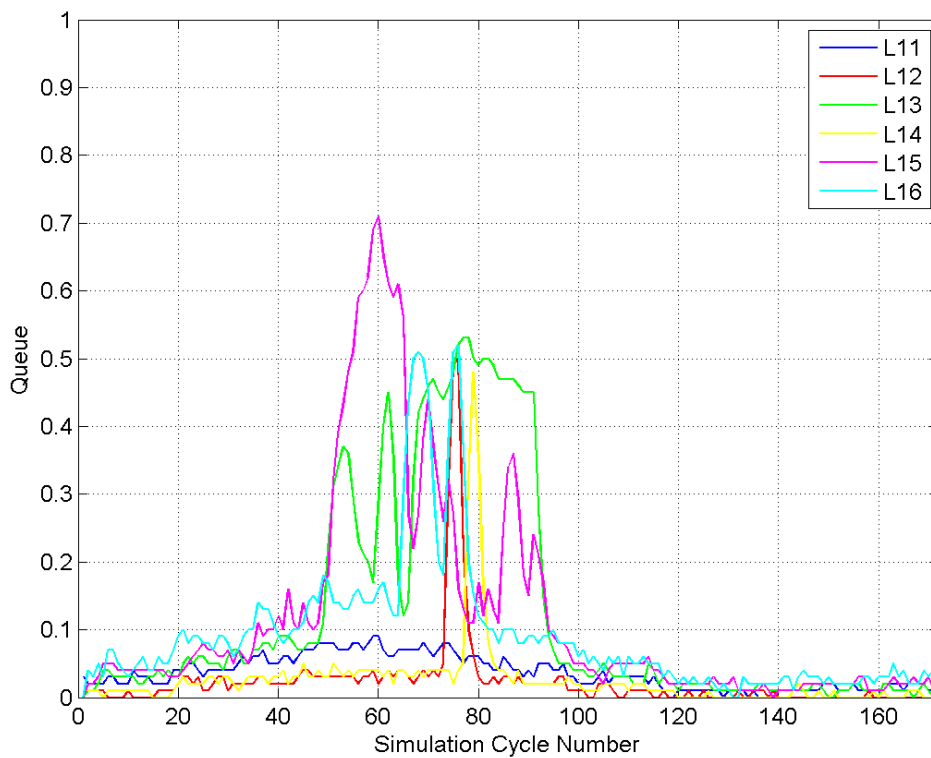
Επανάληψη	Χρόνος Καθυστέρησης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
1	81.1	24.5	2.1	1911.6	49245.5
2	69.6	26.6	1.9	1772.4	48974.2
3	66.8	27.1	1.7	1729.2	49274.0
4	70.3	26.4	1.8	1775.4	49449.4
5	75.6	25.4	1.9	1861.1	49374.7
6	76.8	25.2	2.0	1870.9	48792.3
7	80.4	24.6	2.0	1900.9	49312.4
8	73.9	25.8	1.9	1805.8	49097.7
9	102.0	21.5	2.5	2182.9	49549.8
10	58.7	28.9	1.6	1595.8	48499.4
Μέση Τιμή	75.5	25.6	1.9	1840.6	49156.9
Ελάχιστη Τιμή	58.7	21.5	1.6	1595.8	48499.4
Μέγιστη Τιμή	102.0	28.9	2.5	2182.9	49549.8
Ποσοστό Βελτίωσης Σ.Π.	-8%	+5%	+2%	0%	0%



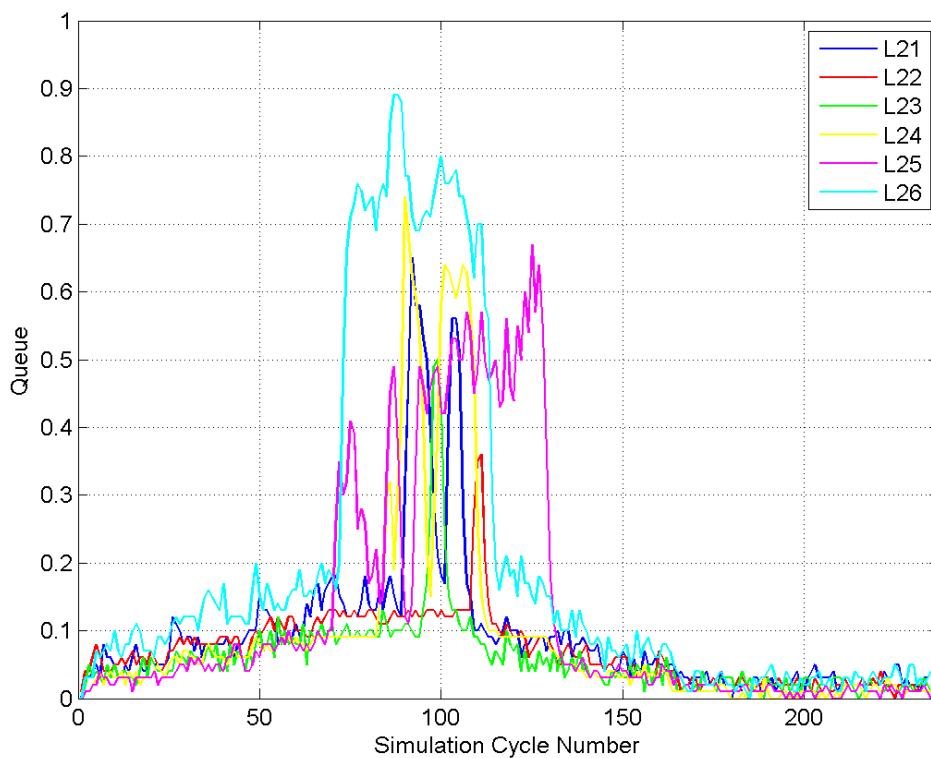
Σχήμα 5-42: Ποσοστά κατάληψης εξόδου Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 5 & 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.



Σχήμα 5-43: Ροή οχημάτων στην έξοδο της Αττικής Οδού από Αεροδρόμιο (Επαναλήψεις 5 & 6) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.



Σχήμα 5-44: Ουρές οχημάτων 1^{ου} κόμβου (Επανάληψη 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.



Σχήμα 5-45: Ουρές οχημάτων 2^{ου} κόμβου (Επανάληψη 5) – Μέθοδος επέκτασης πρασίνου II.

5.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί η σύνοψη των αποτελεσμάτων του 1^{ου} και 2^{ου} σεναρίου ζήτησης. Ο Πίνακας 5-17 και ο Πίνακας 5-18 δείχνουν τα ποσοστά βελτίωσης του σταθερού πλάνου σηματοδότησης, Σενάριο 1. Τα σενάρια ελέγχου που εξετάζονται είναι η στρατηγική TUC, Σενάριο 2, η μέθοδος της επενέργειας με τιμές της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας τα 1,2 και 3 δευτερόλεπτα, Σενάριο 3, η μέθοδος επέκτασης πρασίνου I με τιμές της παραμέτρου της χρονικής παράτασης τα 2 και 3 δευτερόλεπτα και με παράλληλη λειτουργία της μεθόδου της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων, Σενάριο 4, και η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II με παράλληλη λειτουργία της μεθόδου της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων, Σενάριο 5.

Πίνακας 5-17: Συνοπτικά αποτελέσματα 1^{ου} Σεναρίου ζήτησης.

Σενάριο	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
Σενάριο 2	-11%	+7%	-1%	-2%	0%
Σενάριο 3 (1 sec)	-18%	+11%	-3%	-7%	0%
Σενάριο 3 (2 sec)	-13%	+8%	+2%	-2%	0%
Σενάριο 3 (3 sec)	-10%	+6%	+4%	-1%	+1%
Σενάριο 4 (2 sec)	-16%	+10%	-1%	-5%	0%
Σενάριο 4 (3 sec)	-13%	+8%	+2%	-2%	+1%
Σενάριο 5	-10%	+6%	+5%	-1%	0%

Πίνακας 5-18: Συνοπτικά αποτελέσματα 2^{ου} Σεναρίου ζήτησης.

Σενάριο	Χρόνος Καθυστερήσης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
Σενάριο 2	-10%	+6%	-3%	-1%	0%
Σενάριο 3 (2 sec)	-10%	+7%	0%	-1%	0%
Σενάριο 4 (2 sec)	-12%	+8%	-2%	-2%	0%
Σενάριο 5	-8%	+5%	+2%	0%	0%

5.4 Αποτελέσματα για σταθερό πλάνο σηματοδότησης

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν αποτελέσματα εφαρμογής των διαφόρων σεναρίων ελέγχου με σταθερό πλάνο σηματοδότησης (χωρίς τη λειτουργία της TUC). Σκοπός αυτής της επιπλέον εφαρμογής ήταν να διερευνηθεί η ανταπόκριση των μεθόδων σε σταθερό πλάνο σηματοδότησης. Παρουσιάζονται οι

πίνακες των ποσοστών βελτίωσης του σταθερού πλάνου, Σενάριο 1, για τα δυο σενάρια ζήτησης. Τα σενάρια ελέγχου που εξετάζονται είναι η μέθοδος επενέργειας με τιμή της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας τα 2 δευτερόλεπτα, Σενάριο I, η μέθοδος επέκτασης πρασίνου I με τιμή της παραμέτρου της χρονικής παράτασης τα 2 δευτερόλεπτα και με παράλληλη λειτουργία της μεθόδου επενέργειας των 2 δευτερολέπτων, Σενάριο II, και η μέθοδος επέκτασης πρασίνου II με παράλληλη λειτουργία της μεθόδου επενέργειας των 2 δευτερολέπτων, Σενάριο III.

Ο Πίνακας 5-19 και ο Πίνακας 5-20 δείχνουν μια σαφή βελτίωση σε σχέση με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης π.χ. στο κριτήριο του χρόνου καθυστέρησης υπάρχει με βελτίωση της τάξης του 17-19%.

Παρατηρείται ότι η βελτίωση που πρόσφεραν η μέθοδος της επενέργειας και οι μέθοδοι της επέκτασης πρασίνου σε συνδυασμό με το σταθερό πλάνο σηματοδότησης είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που προσφέρουν σε συνδυασμό με τη στρατηγική TUC. Ο λόγος είναι ότι η στρατηγική TUC μαζί με τις μεθόδους επενέργειας και επέκτασης πρασίνου αυξάνουν κατά πολύ τον ρυθμό εξυπηρέτησης οχημάτων του δικτύου το οποίο λειτουργεί εις βάρος τους όταν στο δίκτυο που εφαρμόζονται υπάρχουν περιορισμοί, π.χ. λόγω τοπολογίας, μεγίστου αριθμού οχημάτων που μπορούν να εξυπηρετηθούν μέσω των εξόδων του δικτύου.

Πίνακας 5-19: Αποτελέσματα προσομοίωσης 1^{ου} σεναρίου ζήτησης με σταθερό πλάνο σηματοδότησης.

Σενάριο	Χρόνος Καθυστέρησης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
Σενάριο I	-19%	11%	-6%	-8%	0%
Σενάριο II	-18%	11%	-5%	-7%	0%
Σενάριο III	-18%	11%	-5%	-7%	0%

Πίνακας 5-20: Αποτελέσματα προσομοίωσης 2^{ου} σεναρίου ζήτησης με σταθερό πλάνο σηματοδότησης.

Σενάριο	Χρόνος Καθυστέρησης (sec/km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)	Σταματήματα (#/veh/km)	Συνολικός Χρόνος Διαδρομής (h)	Συνολική Απόσταση Διαδρομής (km)
Σενάριο I	-17%	10%	-7%	-6%	0%
Σενάριο II	-18%	11%	-8%	-7%	0%
Σενάριο III	-17%	11%	-7%	-7%	0%

6 Διερευνήσεις με χρήση του αλγορίθμου των Nelder And Mead

6.1 Εισαγωγή

Οι Nelder and Mead (1965) ανέπτυξαν μια εξαιρετικά βελτιωμένη παραλλαγή της αρχικής μεθόδου κατερχόμενου συμπλέγματος (downhill simplex method), η οποία αποτελεί σήμερα μια από τις πλέον διαδεδομένες τεχνικές αναζήτησης τοπικών ακρότατων. Εκτός από την ανάκλαση (Reflection), οι Nelder and Mead όρισαν τρεις ακόμη κινήσεις, την επέκταση (expansion), τη συμπίεση (contraction) και τη συρρίκνωση (shrinkage). Με τον τρόπο αυτό ο αλγόριθμος έγινε πιο ευέλικτος, ώστε να προσαρμόζεται στο σχήμα της επιφάνειας απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης.

6.2 Αλγόριθμος

Έστω ότι στην k επανάληψη είναι γνωστές οι $n+1$ κορυφές, οι οποίες ορίζονται ως ένα σύνολο γραμμικά ανεξάρτητων διανυσμάτων $x_1^{[k]}, x_2^{[k]}, \dots, x_{n+1}^{[k]}$ τέτοιων ώστε:

$$f(x_1)^{[k]} \leq f(x_2)^{[k]} \leq \dots \leq f(x_{n+1})^{[k]}$$

Εφόσον αναφερόμαστε σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης, η κορυφή $x_1^{[k]}$ αντιστοιχεί στο καλύτερο σημείο, ενώ η κορυφή $x_{n+1}^{[k]}$ αντιστοιχεί στο χειρότερο σημείο. Σε κάθε επαναληπτικό βήμα, ο αλγόριθμος Nelder-Mead έχει ως αποτέλεσμα δύο δυνατές καταστάσεις, είτε την αντικατάσταση μόνο της χειρότερης κορυφής από μια βελτιωμένη λύση είτε την αντικατάσταση όλων των κορυφών πλην της καλύτερης. Η πορεία του αλγορίθμου σε κάθε επανάληψη έχει ως εξής:

Βήμα 1^ο: Οι κορυφές x_1, x_2, \dots, x_{n+1} διατάσσονται κατά αύξουσα σειρά ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Βήμα 2^ο: Υπολογίζεται το κέντρο βάρους των n καλύτερων κορυφών, δηλαδή:

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

Βήμα 3^ο: Υπολογίζεται το σημείο που προκύπτει με ανάκλαση της χειρότερης κορυφής x_{n+1} περί του κέντρο βάρους x_0 μέσω της σχέσης:

$$x_r = x_0 + \alpha * (x_0 - x_{n+1})$$

Όπου, $\alpha > 0$ είναι συντελεστής ανάκλασης (Reflection coefficient).

Εφόσον $f(x_1) \leq f(x_r) \leq f(x_n)$, το σημείο ανάκλασης x_r γίνεται αποδεκτό, αντικαθίσταται με το χειρότερο σημείο x_{n+1} και ο αλγόριθμος μεταβαίνει στον επόμενο επαναληπτικό κύκλο.

Βήμα 4^ο: Εφόσον $f(x_r) < f(x_1)$, δηλαδή η τιμή της συνάρτησης στη νέα κορυφή είναι καλύτερη από την τρέχουσα βέλτιστη, το σύμπλεγμα επεκτείνεται (expanding) προς την κατεύθυνση της ανάκλασης έτσι ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία κατάβασης, με εφαρμογή της σχέσης:

$$x_e = x_0 + \beta * (x_0 - x_{n+1})$$

Όπου, $\beta > 1$ είναι συντελεστής επέκτασης (Expansion coefficient).

Αν $f(x_e) < f(x_r)$, γίνεται αποδεκτό το σημείο επέκτασης x_e , διαφορετικά γίνεται αποδεκτό το σημείο ανάκλασης x_r και αντικαθιστά με το χειρότερο σημείο x_{n+1} . Σε κάθε περίπτωση, ο αλγόριθμος μεταβαίνει στον επόμενο επαναληπτικό κύκλο.

Βήμα 5^ο: Αν $f(x_r) > f(x_n)$, πραγματοποιείται συμπίεση (contraction) του συμπλέγματος μεταξύ του κέντρο βάρους x_0 και της καλύτερης εκ των κορυφών x_{n+1} και x_r , με εφαρμογή της σχέσης:

$$x_c = x_{n+1} + \gamma * (x_0 - x_{n+1})$$

Όπου, $0 < \gamma < 1$ είναι συντελεστής συμπίεσης (Contraction coefficient).

Αν $f(x_c) < f(x_{n+1})$, γίνεται αποδεκτό το σημείο συμπίεσης x_c , και αντικαθίσταται με το χειρότερο σημείο x_{n+1} , και ο αλγόριθμος μεταβαίνει στον επόμενο επαναληπτικό κύκλο, διαφορετικά ο αλγόριθμος πραγματοποιεί συρρίκνωση (shrinkage) του συμπλέγματος (βήμα 6).

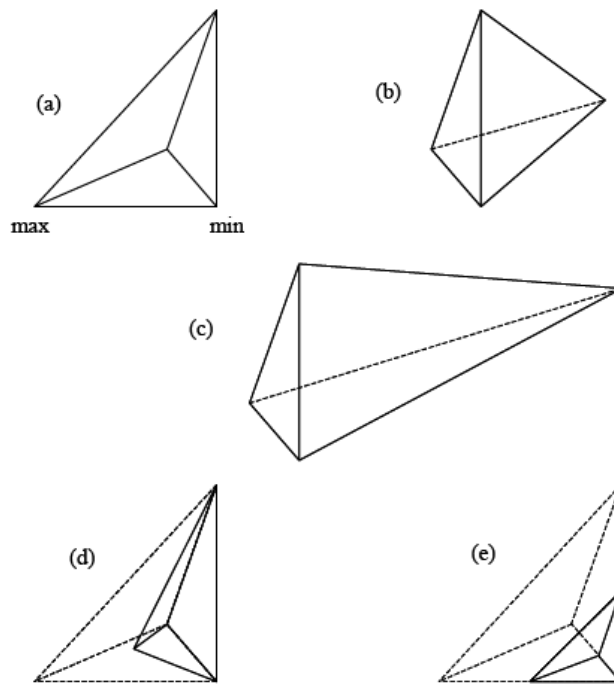
Βήμα 6^ο: Το σύμπλεγμα συμπιέζεται κατά μήκος όλων των διαστάσεων του και προς την κατεύθυνση της καλύτερης κορυφής x_1 . Με τον τρόπο αυτό, αντικαθίστανται όλες οι κορυφές εκτός από την καλύτερη, με εφαρμογή της σχέσης:

$$x_i = x_1 + \sigma * (x_i - x_1)$$

για $i = \{2, \dots, n+1\}$ και $\sigma = 0,5$ που είναι ο συντελεστής συρρίκνωσης (Shrinkage coefficient).

Η καλύτερη κορυφή (x_1) καθώς και τα νέα σημεία που δημιουργήθηκαν αποτελούν τις κορυφές του συμπλέγματος στον επόμενο επαναληπτικό κύκλο.

Στο Σχήμα 6-1 απεικονίζονται οι δυνατές κινήσεις ενός συμπλέγματος στον χώρο των τριών διαστάσεων και στο Σχήμα 6-2 το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου των Nelder & Mead.



Σχήμα 6-1: Δυνατές κινήσεις του συμπλέγματος για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης στον χώρο των τριών διαστάσεων: (a) αρχικό σχήμα, (b) ανάκλαση της χειρότερης κορυφής x_{n+1} περί το κέντρο βάρους των υπολοίπων κορυφών του συμπλέγματος, (c) επέκταση κατά μήκος της διεύθυνσης ανάκλασης, (d) εσωτερική συμπίεση, και (e) συρρίκνωση γύρω από την καλύτερη κορυφή x_1 .

Ως κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου μπορούν να τεθούν η ελάχιστη σχετική μεταβολή της συνάρτησης σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, ο ελάχιστος όγκος του συμπλέγματος, η ελάχιστη μετατόπιση του σχήματος ή ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων.

6.3 Χαρακτηριστικά

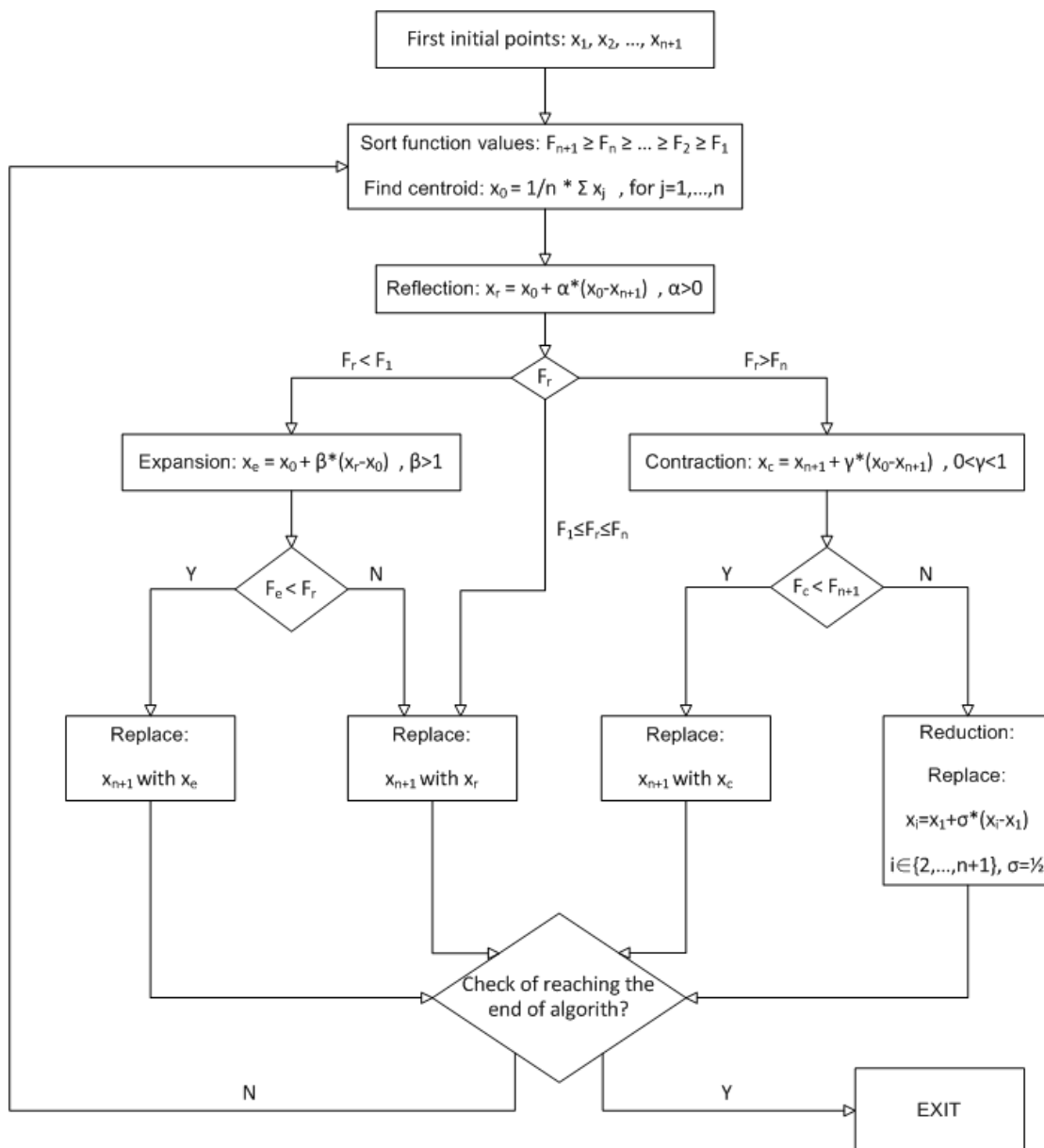
Ορισμένα χαρακτηριστικά της μεθόδου Nelder-Mead είναι:

- ❖ Το σύμπλεγμα προσαρμόζει το σχήμα του στο ανάγλυφο της επιφάνειας απόκρισης της συνάρτησης. Σε περίπτωση έντονης μεταβολής του ανάγλυφου, συγκλίνει γρήγορα προς το κοντινότερο σημείο ελαχίστου, αν το ανάγλυφο είναι σχεδόν επίπεδο τότε αντίθετα κινείται πολύ αργά.
- ❖ Σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, εκτός και αν πραγματοποιηθεί πολλαπλή συμπίεση του συμπλέγματος, η κορυφή στην οποία αντιστοιχεί η χειρότερη τιμή της συνάρτησης αντικαθίσταται από μία καλύτερη, κάτι που εγγυάται τη σταδιακή του μετάβαση προς κάποιο τοπικό ακρότατο.
- ❖ Στη μέθοδο Nelder-Mead, το πλήθος των δοκιμών, δηλαδή των υπολογισμών της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι το μικρότερο σε σχέση με τις περισσότερες τεχνικές βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, σε κάθε επανάληψη n , γεννώνται είτε ένα, είτε δύο, είτε $n+2$ σημεία, ανάλογα με το αν ο

αλγόριθμος σταματά στο βήμα ανάκλασης, στο βήμα επέκτασης (ή συμπίεσης) ή στο βήμα συρρίκνωσης, αντίστοιχα.

- ❖ Το σχήμα κάθε νέου συμπλέγματος εξαρτάται από τις συντεταγμένες των κορυφών του προηγούμενου σχήματος και τη σχετική διάταξη των τιμών της συνάρτησης και όχι τις ίδιες τις τιμές.

Βάσει των βιβλιογραφικών αναφορών, για ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων η μέθοδος Nelder-Mead έχει αποδειχθεί πολύ ταχύτερη από οποιαδήποτε άλλη τεχνική άμεσης αναζήτησης (Torczon, 1991. Wright, 1996. Lewis et al., 2000). Οι Press et al. (1992) τη θεωρούν ως την προσφορότερη τεχνική επίλυσης προβλημάτων με σχετικά μικρό πλήθος παραμέτρων. Έχει ωστόσο αναφερθεί ένας όχι αμελητέος αριθμός εφαρμογών στις οποίες η μέθοδος έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αναποτελεσματική. Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει δυνατότητα θεωρητικής τεκμηρίωσης της σύγκλισης του αλγορίθμου. Ο λόγος είναι ότι σε κάθε επανάληψη η αναζήτηση πραγματοποιείται σε μία διεύθυνση, αντί για η γραμμικά ανεξάρτητες διευθύνσεις.



Σχήμα 6-2: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Nelder-Mead.

6.4 Εφαρμογή

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Nelder-Mead με σκοπό τον εντοπισμό βέλτιστων πλάνων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας οχημάτων σε δακτύλιο. Ως δακτύλιος χρησιμοποιήθηκε αυτός του συμπλέγματος Κηφισίας-Αττικής Οδού στην περιοχή του Αμαρουσίου (Σχήμα 6-3). Ο συγκεκριμένος δακτύλιος αποτελείται από τέσσερις συνδέσμους εισόδου και εξόδου (Σχήμα 6-4). Οι λόγοι που επιλέχθηκε ο εν λόγω δακτύλιος είναι:

- ❖ Ότι εντάσσεται σε μια γενικότερη έρευνα βελτιστοποίησης αλλά κυρίως αποσυμφόρησης του σε περιόδους υψηλής ζήτησης με χρήση όσο το δυνατόν καλύτερων πλάνων σηματοδότησης

- ❖ Ο συγκεκριμένος δακτύλιος είναι συμμετρικά κατασκευασμένος με μόνη διαφορά μεταξύ των δυο ρευμάτων εισόδου από την Λεωφόρο Κηφισίας, όπου στο ένα ρεύμα έχουμε τρεις λωρίδες εισόδου στο δακτύλιο και στο άλλο τέσσερις.
- ❖ Η ύπαρξη μόνο τεσσάρων συνδέσμων εισόδου καθιστά την αναζήτηση λιγότερο χρονοβόρα, μιας και η αντικειμενική συνάρτηση δεν έχει αυξημένη πολυπλοκότητα.



Σχήμα 6-3: Υπό εξέταση δακτύλιος.

Πιο συγκεκριμένα η αναζήτηση που καλείται να κάνει ο Nelder-Mead γίνεται στο χώρο των τεσσάρων διαστάσεων. Η μια διάσταση είναι μια χρονική διάρκεια πρασίνου και οι άλλες τρεις διαστάσεις αφορούν τη χρονική μετατόπιση των πρασίνων στους υπο-κόμβους του δακτυλιδιού. Δηλαδή τα σημεία είναι της μορφής:

$$x_i = \{green, offset1, offset2, offset3\}, \text{για } i = 1, \dots, 5$$



Σχήμα 6-4: Μοντελοποίηση των συνδέσμων του δακτυλίου.

Αναλυτικότερα, ο χρόνος πρασίνου στα σημεία (πρώτη μεταβλητή) αφορά τη σηματοδότηση πρασίνου στο ρεύμα L_21 της λεωφόρου Κηφισίας. Λόγο συμμετρίας του δακτυλιδιού, ο ίδιος χρόνος πρασίνου δίνεται επίσης και στο ρεύμα L_23 της λεωφόρου Κηφισίας. Οι έξοδοι τις Αττικής Οδού έχουν και οι δυο ποσόστωση επί του πρασίνου της λεωφόρου Κηφισίας της τάξεως του 55%. Ο συνολικός χρόνος της περιόδου είναι ενενήντα δευτερόλεπτα. Όσον αφορά τις χρονικές μετατοπίσεις των πρασίνων (offsets), με σταθερό το πράσινο του κόμβου L_21 στην αρχή του πλάνου, διαμορφώνονται το offset1 μεταξύ των L_21 και L_22, το offset2 μεταξύ των L_21 και L_23 και τέλος το offset3 μεταξύ των L_21 και L_24.

Το αντικειμενικό κριτήριο της συνάρτησης είναι η μεγιστοποίηση των οχημάτων που εξυπηρετούνται από το συγκεκριμένο δίκτυο.

Η υλοποίηση της συγκεκριμένης εφαρμογής έγινε με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης AIMSUN. Μέσω API αξιοποιήθηκε η δυνατότητα επαφής με τον μικροσκοπικό προσομοιωτή, ώστε να ακολουθούνται τα βήματα του αλγορίθμου των Nelder-Mead. Το σενάριο που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις ήταν το ίδιο και αφορούσε διαρκή μέγιστη ζήτηση σε όλα τα ρεύματα. Ο χρόνος της κάθε προσομοίωσης ήταν τριάντα δυο λεπτά, δυο λεπτά στην αρχή για προετοιμασία του δικτύου (warm up) και τριάντα λεπτά υψηλής ζήτησης οχημάτων (high demand) σε όλα τα ρεύματα εισόδου του δακτυλίου.

6.5 Αποτελέσματα

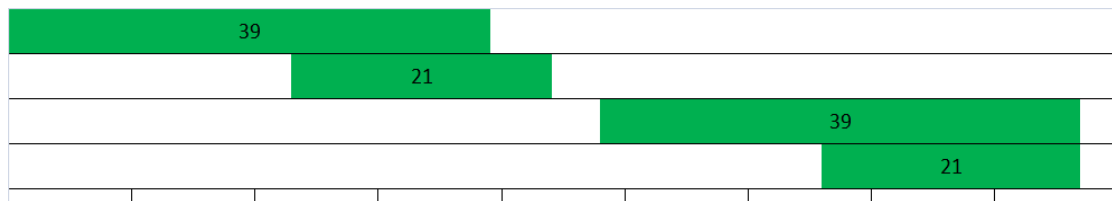
Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν κάποια εξαγόμενα πλάνα που συνέκλινε ο αλγόριθμος των Nelder-Mead. Στα Σχήματα 6-5,6-7,6-9,6-11 και 6-13 παρουσιάζονται τα offsets του δακτυλίου σύμφωνα με τα εξαγόμενα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του αλγορίθμου, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη το πράσινο και τα 3 offsets. Στο δεύτερο και τέταρτο σύνδεσμο (L_22 και L_24) έχει υπολογιστεί ο χρόνος πρασίνου σύμφωνα με το ποσοστό του 55% του πρασίνου του πρώτου συνδέσμου (L_21). Ο τρίτος σύνδεσμος, L_23 έχει ίδιο χρόνο πρασίνου με τον πρώτο. Στα Σχήματα 6-6,6-8,6-10,6-12 και 6-14 παρουσιάζεται η πορεία του αλγορίθμου. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο αριθμός της προσομοίωσης και στον κάθετο άξονα τα οχήματα που εξυπηρετήθηκαν από το δίκτυο. Με μπλε χρώμα σκιαγραφείται η καλύτερη τιμή κατά τη διάρκεια της σύγκλισης, με κόκκινο η χειρότερη και με πράσινο η μέση τιμή (των πέντε σημείων) αντίστοιχα.

Ο αλγόριθμος Nelder-Mead συγκλίνει γρήγορα μετά το πέρας περίπου είκοσι με εικοσιπέντε προσομοιώσεων. Σε διαφορετικές πεντάδες αρχικών σημείων συγκλίνει σε διαφορετικά βέλτιστα πλάνα. Επίσης, αλγόριθμος Nelder-Mead συνέκλινε τις περισσότερες των περιπτώσεων σε πλάνα εξόδου οχημάτων άνω των 4000, ενώ τα μέχρι πρότινος πλάνα ήταν κάτω από αυτό το αριθμό (~3700). Με προσεκτική ποιοτική παρατήρηση στον μικροσκοπικό προσομοιωτή, εντοπίστηκε η προσπάθεια

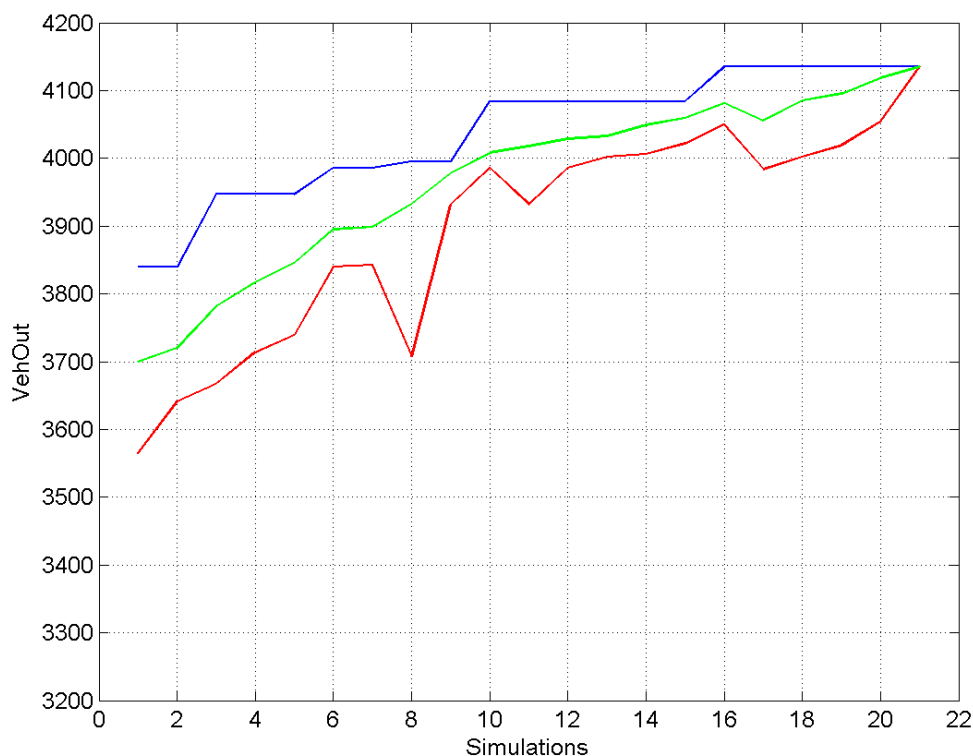
του αλγορίθμου να αξιοποιήσει όσο το δυνατόν καλύτερα την αποθηκευτική δυνατότητα του δακτυλίου. Πολλά πλάνα αν και παρουσιάζουν αρκετά καλό αντικειμενικό κριτήριο, στο τέλος του αλγορίθμου, φαίνεται ότι διαμορφώνουν πολύ οριακές συνθήκες που πιθανά αν εφαρμόζονταν σε πραγματικό δίκτυο να μην απέδιδαν τα βέλτιστα ή ακόμη και να ήταν καταστροφικά.

$$x = \{green, offset1, offset2, offset3\} = \{39, 13, 48, 66\}$$

Εξυπηρετηθέντα οχήματα (veh.out): 4135



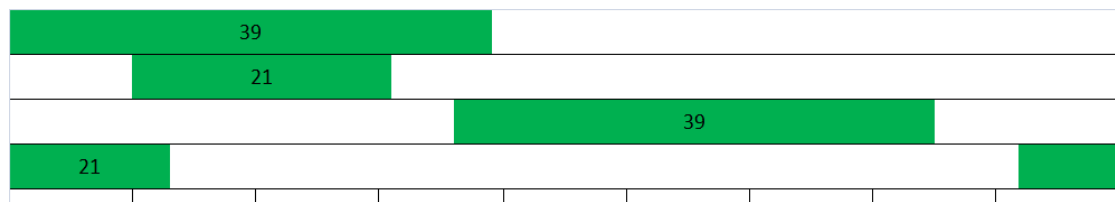
Σχήμα 6-5: Offset δακτυλίου.



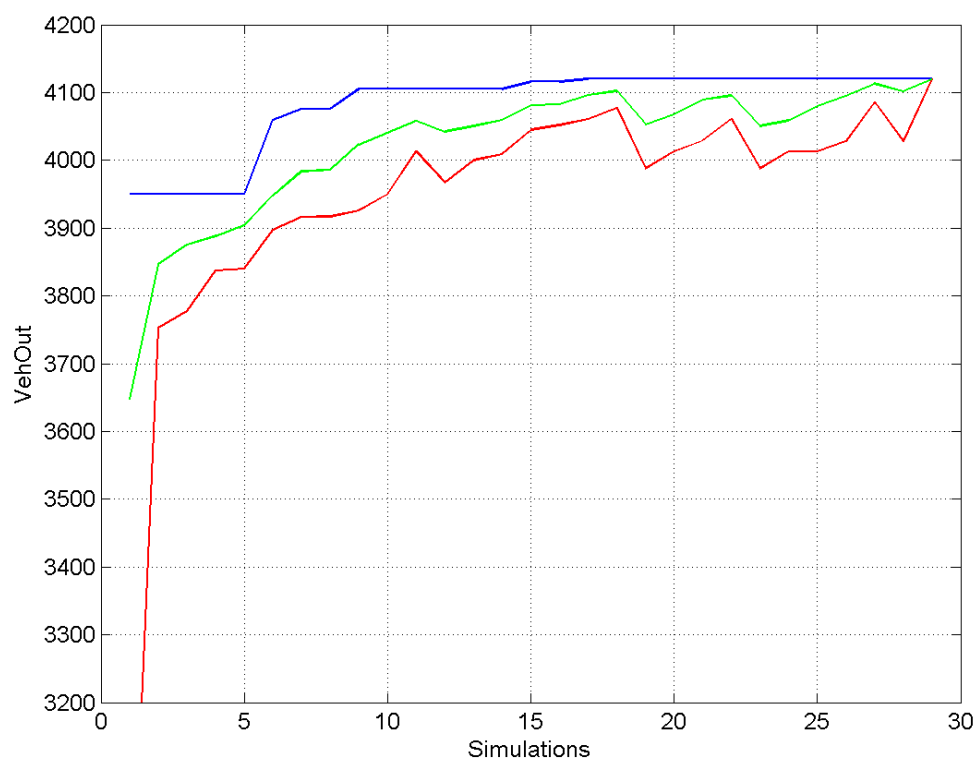
Σχήμα 6-6: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).

$$x = \{green, offset1, offset2, offset3\} = \{39, 10, 36, 82\}$$

Εξυπηρετηθέντα οχήματα (veh.out): 4120



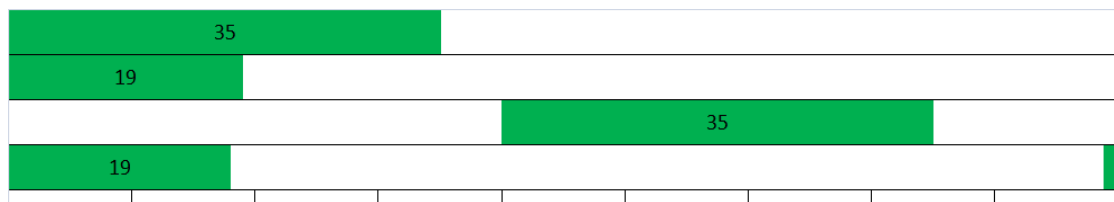
Σχήμα 6-7: Offset δακτυλίου.



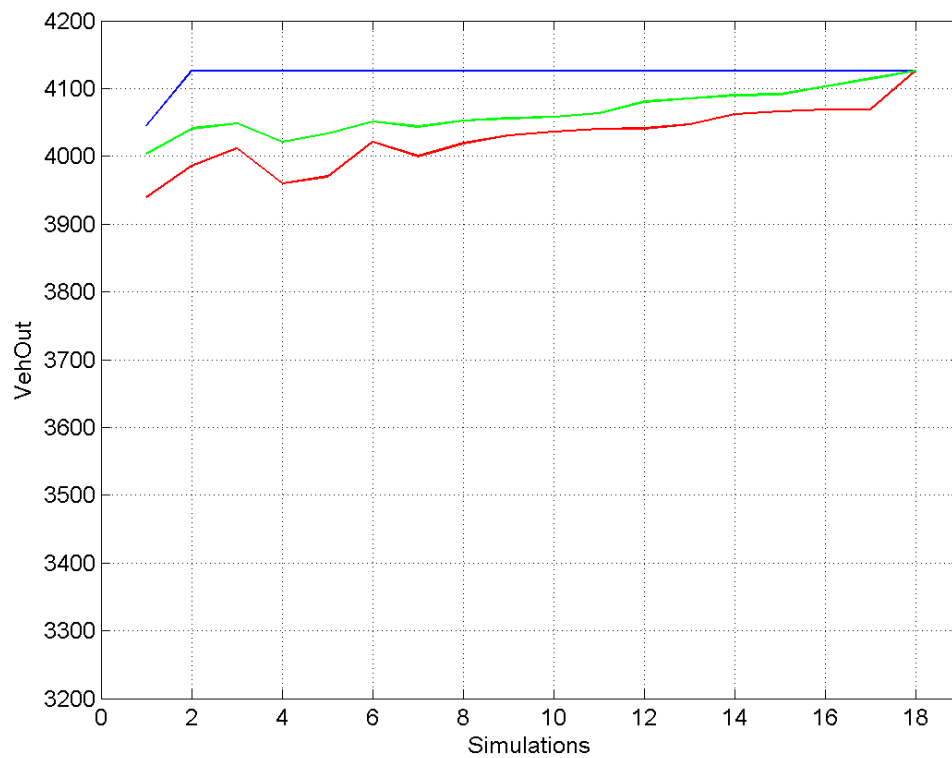
Σχήμα 6-8: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).

$$x = \{green, offset1, offset2, offset3\} = \{35, 0, 40, 89\}$$

Εξυπηρετηθέντα οχήματα (veh.out): 4126



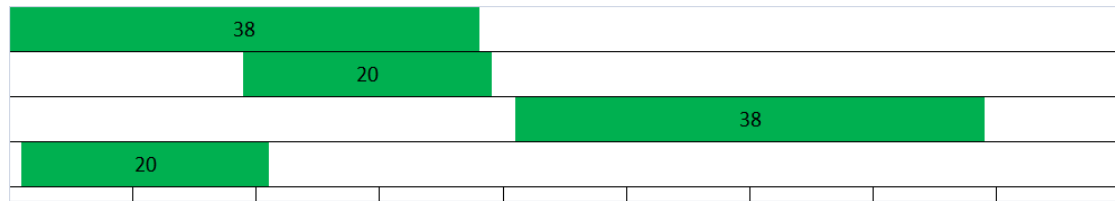
Σχήμα 6-9: Offset δακτυλίου.



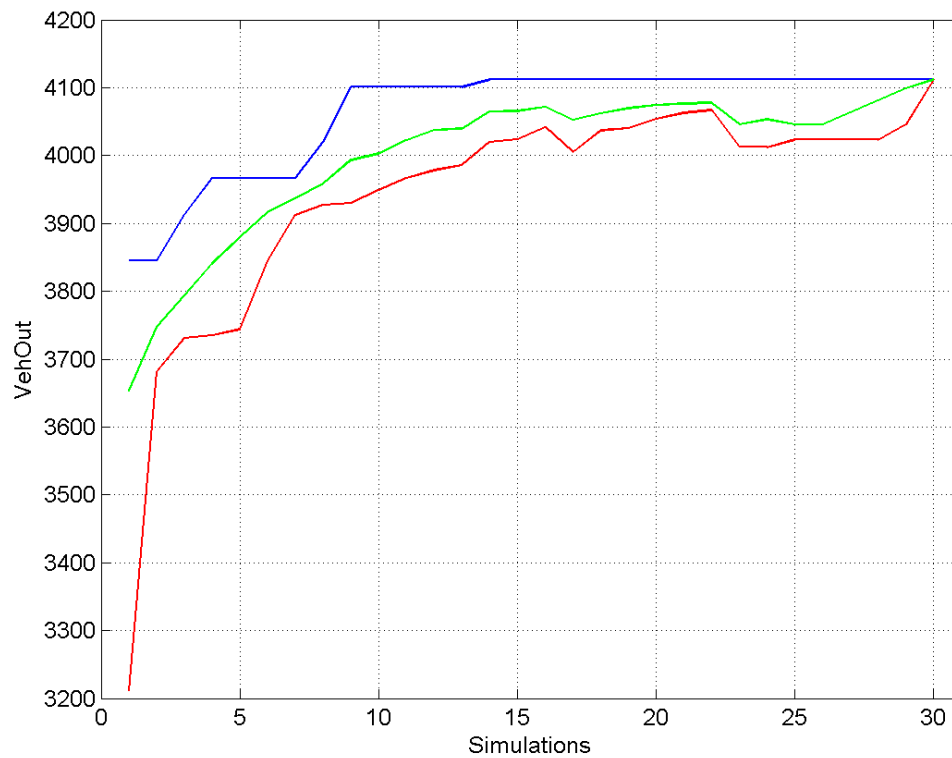
Σχήμα 6-10: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).

$$x = \{green, offset1, offset2, offset3\} = \{38, 9, 41, 1\}$$

Εξυπηρετηθέντα οχήματα (veh.out): 4112



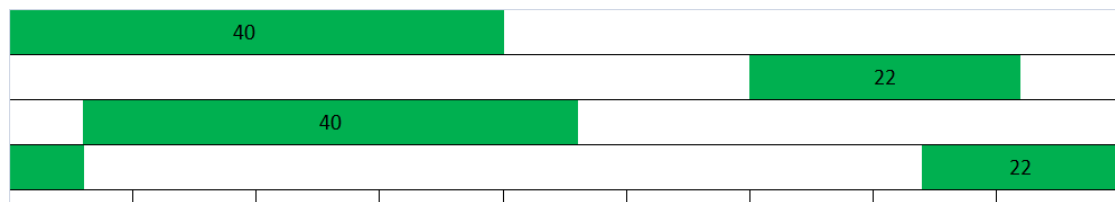
Σχήμα 6-11: Offset δακτυλίου.



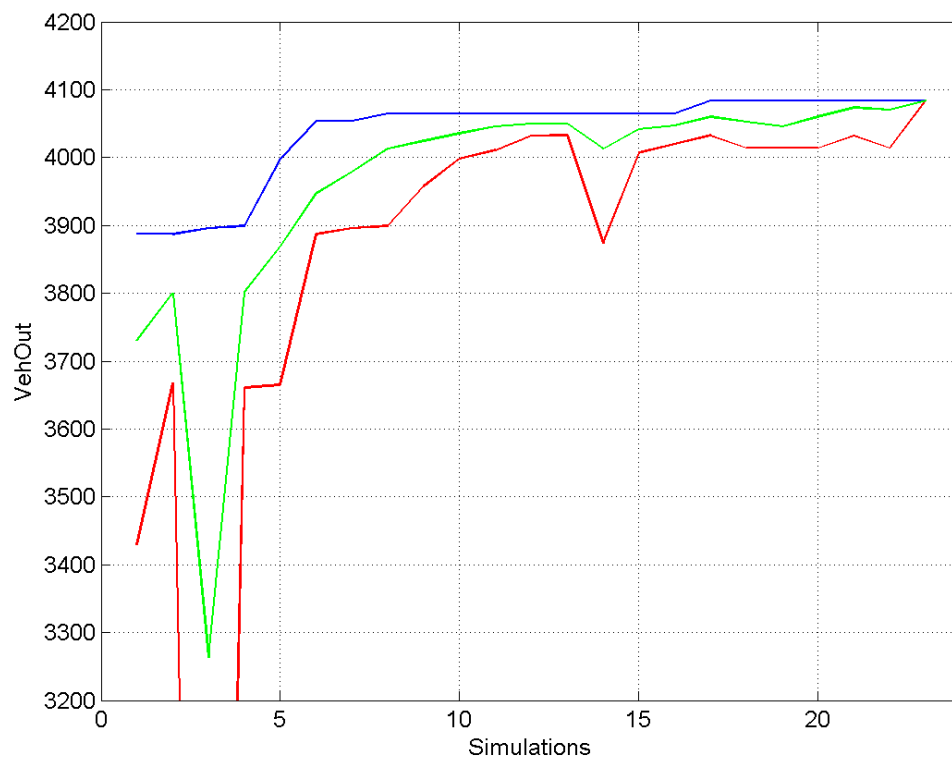
Σχήμα 6-12: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).

$$x = \{green, offset1, offset2, offset3\} = \{40, 60, 6, 74\}$$

Εξυπηρετηθέντα οχήματα (veh.out): 4084



Σχήμα 6-13: Offset δακτυλίου.



Σχήμα 6-14: Πορεία αλγορίθμου Nelder-Mead (όπου, μπλε: καλύτερη τιμή, πράσινη: μέση τιμή, κόκκινη: χειρότερη τιμή σε κάθε προσομοίωση).

7 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

7.1 Σύνοψη της εργασίας

Η παρούσα μελέτη έχει σκοπό τη διερεύνηση της εφαρμογής των μεθόδων της επενέργειας και επέκτασης πρασίνου στην περιοχή του δικτύου Αττικής Οδού και Λεωφόρου Κηφισίας. Η προσομοίωση του δικτύου και των κυκλοφοριακών συνθηκών πραγματοποιήθηκε στον μικροσκοπικό προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN, ενώ για τον έλεγχο της κυκλοφορίας εφαρμόστηκε η στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου TUC. Αρχικά εφαρμόστηκε το σταθερό πλάνο σηματοδότησης και η στρατηγική TUC, όπου αυτά τα δυο αποτέλεσαν συγκριτικά σενάρια για την κύρια μελέτη. Έπειτα εφαρμόστηκε η μέθοδος της επενέργειας παράλληλα με τη στρατηγική TUC με διαφορετικές τιμές της παραμέτρου της χρονικής διάρκειας μη κατάληψης του φωρατή όπου αναδείχθηκε η παράμετρος των 2 δευτερολέπτων ως καλύτερη, καθώς βελτίωσε ακόμη περισσότερο τις κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου μαζί με την στρατηγική TUC. Έπειτα εφαρμόστηκε η μέθοδος επέκτασης πρασίνου I με διαφορετικές τιμές της παραμέτρου της χρονικής παράτασης (παράλληλα με τη στρατηγική TUC και τη μέθοδο της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων), όπου εκεί η βελτίωση του δικτύου έγινε ακόμη πιο αισθητή με ανάδειξη της παραμέτρου των 2 δευτερολέπτων ως καλύτερη. Επίσης, έγινε διερεύνηση της μεθόδου επέκτασης πρασίνου II (παράλληλα με τη στρατηγική TUC και τη μέθοδο της επενέργειας των 2 δευτερολέπτων) χωρίς όμως να προσφέρει σημαντικά αποτελέσματα.

Επιπρόσθετα με την μελέτη των προαναφερθέντων μεθόδων πραγματοποιήθηκε η έρευνα βελτιστοποίησης πλάνων σηματοδότησης σε δακτύλιο (roundabout) με χρήση του αλγορίθμου των Nelder-Mead, όπου χρησιμοποιήθηκε επίσης η περιοχή του δακτυλίου Αττικής Οδού και Λεωφόρου Κηφισίας.

7.2 Συμπεράσματα

7.2.1 Μέθοδοι Επενέργειας και Επέκτασης Πρασίνου

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση της εφαρμογής των μεθόδων της επενέργειας και επέκτασης πρασίνου στην περιοχή του δικτύου Αττικής Οδού και Λεωφόρου Κηφισίας, είναι τα ακόλουθα.

- ❖ Η μέθοδος της επενέργειας βελτιώνει την ικανότητα εξυπηρέτησης του δικτύου, κυρίως κατά τη διάρκεια μη αιχμής αλλά και σε στιγμές υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου, όπου ήταν δυνατό.
- ❖ Ανάμεσα στις μεθόδους επέκτασης πρασίνου, η πρώτη μέθοδος βρέθηκε να δίνει καλύτερα αποτελέσματα, και αυτό οφείλεται στο ότι με την πρώτη μέθοδο δε “χάνεται” πράσινο, λόγω του μπλοκαρίσματος, αλλά αυτό αξιοποιείται από κάποιο άλλο σύνδεσμο.

- ❖ Τα αποτελέσματα των μεθόδων της επενέργειας και της επέκτασης πρασίνου θα μπορούσαν να δώσουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα αν το δίκτυο που εφαρμόζονταν θα μπορούσε να υποστηρίξει την αύξηση του αριθμού των οχημάτων που εξυπηρετούνται μέσω των εξόδων του, γεγονός που αναδείχθηκε σε μια επιπλέον διερεύνηση με απελευθέρωση των εξόδων του δικτύου στην παρούσα μελέτη.

7.2.2 Αλγόριθμος Nelder-Mead

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση του εφαρμογής των μεθόδων της επενέργειας και επέκτασης πρασίνου στην περιοχή του δικτύου Αττικής Οδού και Λεωφόρου Κηφισίας, είναι τα ακόλουθα.

- ❖ Ο αλγόριθμος Nelder-Mead συγκλίνει γρήγορα μετά το πέρας λίγων προσομοιώσεων.
- ❖ Με διαφορετικά αρχικά σημεία συγκλίνει σε διαφορετικά βέλτιστα πλάνα.
- ❖ Ο αλγόριθμος Nelder-Mead συνέκλινε σε πλάνα όπου το αντικειμενικό κριτήριο της εξόδου οχημάτων από το δίκτυο είχε καλύτερες τιμές από τα παλαιότερα πλάνα.
- ❖ Με προσεκτική ποιοτική παρατήρηση στον μικροσκοπικό προσομοιωτή, εντοπίστηκε η προσπάθεια του αλγορίθμου να αξιοποιήσει όσο το δυνατόν καλύτερα τις τοπολογικές συνθήκες του δακτυλίου. Αρχικά, προσπάθησε να επωφεληθεί από την αποθηκευτική δυνατότητα του δακτυλίου. Πολλά πλάνα αν και παρουσιάζουν αρκετά καλό αντικειμενικό κριτήριο στο τέλος του αλγορίθμου φαίνεται ότι διαμορφώνουν πολύ οριακές συνθήκες που πιθανά αν εφαρμόζονταν σε πραγματικό δίκτυο να μην απέδιδαν τα βέλτιστα ή ακόμη και να ήταν καταστροφικά.

7.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις

7.3.1 Μέθοδοι Επενέργειας και Επέκτασης Πρασίνου

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία οδηγούν σε σκέψεις για περαιτέρω επεκτάσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο μέλλον. Αρχικά οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν στο πραγματικό δίκτυο ώστε να διερευνηθεί η λειτουργία τους και σε πραγματικές συνθήκες. Μπορούν να δοκιμαστούν είτε σε παράλληλη λειτουργία με τη στρατηγική TUC είτε σε εφαρμογή με υπάρχοντα ή μελλοντικά σταθερά πλάνα σηματοδότησης. Επίσης, μελλοντική εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει η διερεύνηση της εφαρμογής των μεθόδων της επενέργειας και της επέκτασης πρασίνου σε δίκτυα δακτυλίων με μεγαλύτερη ικανότητα εξυπηρέτησης οχημάτων ώστε να μελετηθεί ο μέγιστος βαθμός προσφοράς των μεθόδων αυτών.

7.3.2 Αλγόριθμος Nelder-Mead

Ο αλγόριθμος των Nelder-Mead λειτούργησε σωστά και τα αποτελέσματα του μπορούν μελλοντικά εφόσον επεξεργαστούν κατάλληλα να αποτελέσουν και πραγματικά-εφαρμόσιμα πλάνα λειτουργίας για το συγκεκριμένο δακτύλιο. Μια μελλοντική επέκταση θα ήταν η προσθήκη ενός δεύτερου αντικειμενικού κριτηρίου, όπως π.χ. ο μέσος αριθμός σταματημάτων (#stops/veh/km), που θα κατεύθυνε τον αλγόριθμο σε ακόμη πιο σωστά αποτελέσματα.

8 Βιβλιογραφία

AIMSUN 6.0 Microsimulator User's Manual

AIMSUN API Version 6

Σπηλιοπούλου Α., Παπαγεωργίου Μ., Κουβελάς Α. και Αμπουντώλας Κ. "Μελέτη Εφαρμογής της Στρατηγικής TUC στο Δίκτυο Κηφισίας / Παρ. Αττικής Οδού", Τεχνική Έκθεση, Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2010.

Diakaki, C., M., Papageorgiou, and K., Aboudolas (2002). A Multivariable Regulator Approach to Traffic-Responsive Network-Wide Signal Control. *Control Engineering Practice*, Vol. 10, pp. 183–195.

Diakaki, C., V., Dinopoulou, K., Aboudolas, M., Papageorgiou, E., Ben-Shabat, E., Seider, and A., Leibov (2003). Extensions and New Applications of the Traffic-Responsive Urban Control Strategy: Coordinated Signal Control for Urban Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1856, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 202–211.

Nelder, J. A., and R. Mead, A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 7(4), 308-313, 1965.

Philip E. Gill, Walter Murray, Margaret H. Wright. "Practical Optimization". Academic Press, 1981.

Torczon, V., On the convergence of the multidirectional search algorithm, *SIAM Journal on Optimization*, 1, 123-145, 1991.

Wright, M., Direct search methods: once scorned, now respectable, Numerical Analysis 1995, *Proceedings of the 1995 Biennial Conference on Numerical Analysis*, Dundee, Addison Wesley Longman, 191-208, 1996.

Lewis, R. M., V. Torczon, and M. W. Trosset, Direct search methods: then and now, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 124, 191-207, 2000.

Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 1992.