



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Έλεγχος Ροής Οχημάτων σε περιοχή Διοδίων**  
**Αυτοκινητοδρόμου**

**ΣΠΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ**

**Επιβλέπων : Ιωάννης Παπαμιχαήλ, Λέκτορας**

**ΧΑΝΙΑ 2007**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Διπλωματική Εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Παπαμιχαήλ, επιβλέπων της εργασίας μου, και τον καθ. Μάρκο Παπαγεωργίου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της.

Επίσης ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του εργαστηρίου Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης και ιδιαίτερα την Αθηνά Τζιμίτση για τις γνώσεις και τη συμπαράσταση που μου προσέφερε.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν ηθικά και ιδιαίτερα την οικογένεια μου.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>	<b>2</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>	<b>3</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων.....</b>	<b>6</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>	<b>8</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>9</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Έλεγχος κυκλοφορίας.....	10
1.2 Παρουσίαση του προβλήματος.....	10
1.3 Δομή της εργασίας.....	11
<b>2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ .....</b>	<b>13</b>
2.1 Εισαγωγή .....	13
2.2 Μέτρα ελέγχου αυτοκινητοδρόμων .....	13
2.3 Στρατηγικές ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμων .....	14
2.4 Τοπικές στρατηγικές ελέγχου ραμπών .....	16
2.4.1 Η Στρατηγική ελέγχου Ζήτησης – Ικανότητας.....	16
2.4.2 Η Στρατηγική ελέγχου ποσοστού κατάληψης .....	17
2.4.3 Η Στρατηγική ελέγχου ALINEA .....	18
2.5 Σύγκριση τοπικών στρατηγικών ελέγχου .....	19
<b>3 Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ AIMSUN.....</b>	<b>20</b>
3.1 Εισαγωγή .....	20
3.2 Παράμετροι εισόδου .....	21
3.2.1 Διάταξη του δικτύου .....	21
3.2.2 Σενάριο ζήτησης.....	21
3.2.3 Έλεγχος κυκλοφορίας.....	21

3.3	AIMSUN API .....	22
3.4	Παράμετροι προσομοίωσης .....	22
3.4.1	Επανάληψη (AIMSUN Replication) .....	22
3.4.2	Σενάριο (AIMSUN Scenario) .....	23
3.4.3	Πείραμα (AIMSUN Experiment) .....	23
3.4.3.1	Μοντέλο ακολουθίας οχημάτων (Car-Following Model) .....	23
3.4.3.2	Μοντέλο αλλαγής λωρίδας (Lane-Changing Model) .....	23
3.5	Έξοδοι προσομοίωσης .....	25
<b>4</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....</b>	<b>26</b>
4.1	Εισαγωγή .....	26
4.2	Παράμετροι εισόδου .....	26
4.2.1	Το δίκτυο .....	27
4.2.2	Σενάριο ζήτησης .....	27
4.2.3	Έλεγχος κυκλοφορίας .....	28
4.3	Η στρατηγική ελέγχου ALINEA .....	29
4.4	AIMSUN API (Application Programming Interface).....	31
4.5	Παράμετροι προσομοίωσης .....	33
4.5.1	Επανάληψη (AIMSUN Replication) .....	34
4.5.2	Σενάριο (AIMSUN Scenario) .....	34
4.5.3	Πείραμα (AIMSUN Experiment) .....	34
4.6	Έξοδοι προσομοίωσης .....	34
<b>5</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>35</b>
5.1	Εισαγωγή .....	35
5.2	Περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας .....	36
5.3	Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA.....	40
5.3.1	Η κρίσιμη τιμή του αριθμού οχημάτων στον κόμβο.....	41
5.3.2	Βέλτιστη τιμή της παραμέτρου κέρδους $K_R$ .....	54
5.4	Σύνοψη Αποτελεσμάτων.....	61
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>62</b>
6.1	Σύνοψη της εργασίας .....	62
6.2	Συμπεράσματα .....	62

6.3	Μελλοντικές επεκτάσεις .....	63
7	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>64</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1 : Περιοχή διοδίων, γέφυρα Bay, San Francisco.....	11
Σχήμα 2-1: Ταξινόμηση στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας.....	15
Σχήμα 2-2: Στρατηγική ελέγχου Ζήτησης-Ικανότητας.....	17
Σχήμα 2-3: Θεμελιώδες διάγραμμα.....	18
Σχήμα 2-4: Στρατηγική ελέγχου ALINEA.....	19
Σχήμα 3-1: Αναπαράσταση της λειτουργίας του AIMSUN API.....	22
Σχήμα 3-2: Ζώνες αλλαγής λωρίδας.....	24
Σχήμα 4-1: Το δίκτυο αυτοκινητοδρόμου σε περιβάλλον AIMSUN NG.....	27
Σχήμα 4-2: Το σενάριο ζήτησης.....	28
Σχήμα 4-3: Ομαδοποίηση φωτεινών σηματοδοτών.....	29
Σχήμα 4-4: Εφαρμογή της στρατηγικής ALINEA στο δίκτυο.....	30
Σχήμα 4-5: Διάγραμμα ροής για την εφαρμογή ελέγχου ALINEA.....	32
Σχήμα 5-1: Το δίκτυο χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας σε περιβάλλον AIMSUN NG (17ο λεπτό της προσομοίωσης).....	36
Σχήμα 5-2: Το δίκτυο χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας σε περιβάλλον AIMSUN NG (22ο λεπτό της προσομοίωσης).....	37
Σχήμα 5-3: Διάγραμμα χρόνου καθυστέρησης για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.....	37
Σχήμα 5-4: Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας για την έκτη προσομοίωση.....	39
Σχήμα 5-5: Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας για την έκτη προσομοίωση.....	39
Σχήμα 5-6: Το δίκτυο σε περιβάλλον AIMSUN NG με εφαρμογή της ALINEA (12ο λεπτό της προσομοίωσης).....	40
Σχήμα 5-7: Το δίκτυο σε περιβάλλον AIMSUN NG με εφαρμογή της ALINEA (18ο λεπτό της προσομοίωσης).....	41
Σχήμα 5-8: Μέσος χρόνος καθυστέρησης για τις δέκα προσομοιώσεις με εφαρμογή της ALINEA.....	42
Σχήμα 5-9: Αποτελέσματα μέσου χρόνου καθυστέρησης με εφαρμογή της ALINEA για το διάστημα κρίσιμου αριθμού οχημάτων $\hat{N}$ [17,300].....	43

Σχήμα 5-10: Γενικά αποτελέσματα μέσου χρόνου καθυστέρησης με εφαρμογή της ALINEA για το διάστημα κρίσιμου αριθμού οχημάτων $\hat{N}$ [17,300].	44
Σχήμα 5-11: Αποτελέσματα μέσου χρόνου καθυστέρησης με εφαρμογή της ALINEA για το διάστημα κρίσιμου αριθμού οχημάτων $\hat{N}$ [17,50].	46
Σχήμα 5-12: Γενικά αποτελέσματα μέσου χρόνου καθυστέρησης με εφαρμογή της ALINEA για το διάστημα κρίσιμου αριθμού οχημάτων $\hat{N}$ [17,50].	47
Σχήμα 5-13: Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την πρώτη προσομοίωση για την πρώτη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 500$ .	48
Σχήμα 5-14: Τιμές ροής οχημάτων της ALINEA κάθε χρονική περίοδο και πραγματική ροή οχημάτων που εξέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες για την πρώτη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 500$ .	49
Σχήμα 5-15: Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την πρώτη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 500$ .	50
Σχήμα 5-16: Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για τη δεύτερη προσομοίωση για τη δεύτερη προσομοίωση και $\hat{N} = 22$ , $K_R = 500$ .	51
Σχήμα 5-17: Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για τη δεύτερη προσομοίωση και $\hat{N} = 22$ , $K_R = 500$ .	51
Σχήμα 5-18: Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την όγδοη προσομοίωση για τη δεύτερη προσομοίωση και $\hat{N} = 30$ , $K_R = 500$ .	52
Σχήμα 5-19: Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την όγδοη προσομοίωση και $\hat{N} = 30$ , $K_R = 500$ .	53
Σχήμα 5-20: Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την έβδομη προσομοίωση για τη έβδομη προσομοίωση και $\hat{N} = 75$ , $K_R = 500$ .	53
Σχήμα 5-21: Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την έβδομη προσομοίωση και $\hat{N} = 75$ , $K_R = 500$ .	54
Σχήμα 5-22: Μέσος χρόνος καθυστέρησης συναρτήσει της παραμέτρου κέρδους για ορισμένους κρίσιμους αριθμούς οχημάτων στον κόμβο για το διάστημα τιμών της παραμέτρου κέρδους [100,800].	55
Σχήμα 5-23: Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για τη δεύτερη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 100$ .	56
Σχήμα 5-24: Τιμές ροής οχημάτων της ALINEA κάθε χρονική περίοδο και πραγματική ροή οχημάτων που εξέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες για τη δεύτερη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 100$ .	57
Σχήμα 5-25: Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για τη δεύτερη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 100$ .	57
Σχήμα 5-26: Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την όγδοη προσομοίωση και $\hat{N} = 30$ , $K_R = 100$ .	58

Σχήμα 5-27: Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την όγδοη προσομοίωση και $\hat{N} = 30$ , $K_R = 100$ .	59
Σχήμα 5-28: Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την πρώτη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 800$ .	59
Σχήμα 5-29: Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την πρώτη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 800$ .	60
Σχήμα 5-30: Τιμές ροής οχημάτων της ALINEA κάθε χρονική περίοδο και πραγματική ροή οχημάτων που εξέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες για την πρώτη προσομοίωση και $\hat{N} = 20$ , $K_R = 800$ .	60

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 4-1:</b> Τιμές παραμέτρων της ALINEA για την εφαρμογή	30
<b>Πίνακας 5-1:</b> Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας	38



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά τη διερεύνηση της εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή του αυτοκινητοδρόμου που υπάρχει έλεγχος διοδίων. Η έντονη συγχώνευση των λωρίδων που παρουσιάζεται σε τέτοιες, όπως και σε παρόμοιες γεωμετρίες, οδηγούν, στις ώρες αιχμής, σε υποβάθμιση της ικανότητας της υποδομής του οδικού δικτύου.

Η εργασία αυτή μελετά την εφαρμογή τοπικού ελέγχου με τοποθέτηση φωτεινών σηματοδοτών μετά την περιοχή των διοδίων, θεωρώντας ότι η εξυπηρέτηση των οχημάτων στα διόδια είναι αρκετά γρήγορη ώστε να μη μειώνει τη ροή κάτω από την ικανότητα του αυτοκινητοδρόμου. Η προσομοίωση του δικτύου και των κυκλοφοριακών συνθηκών πραγματοποιείται στον μικροσκοπικό προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN, ενώ για τον έλεγχο της κυκλοφορίας χρησιμοποιείται μία παραλλαγή της στρατηγικής τοπικού ελέγχου ραμπών εισόδου αυτοκινητοδρόμων ALINEA.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή διοδίων αυτοκινητοδρόμου βελτιώνει τις κυκλοφοριακές συνθήκες, μειώνει κατά πολύ το χρόνο καθυστέρησης των οχημάτων που διασχίζουν τα διόδια, αυξάνοντας παράλληλα τη ροή των οχημάτων και αξιοποιώντας κατά το μέγιστο δυνατό την ικανότητα του δικτύου ιδιαίτερα όταν αυτό είναι αναγκαίο, δηλαδή σε περιόδους αυξημένης κυκλοφοριακής ζήτησης.

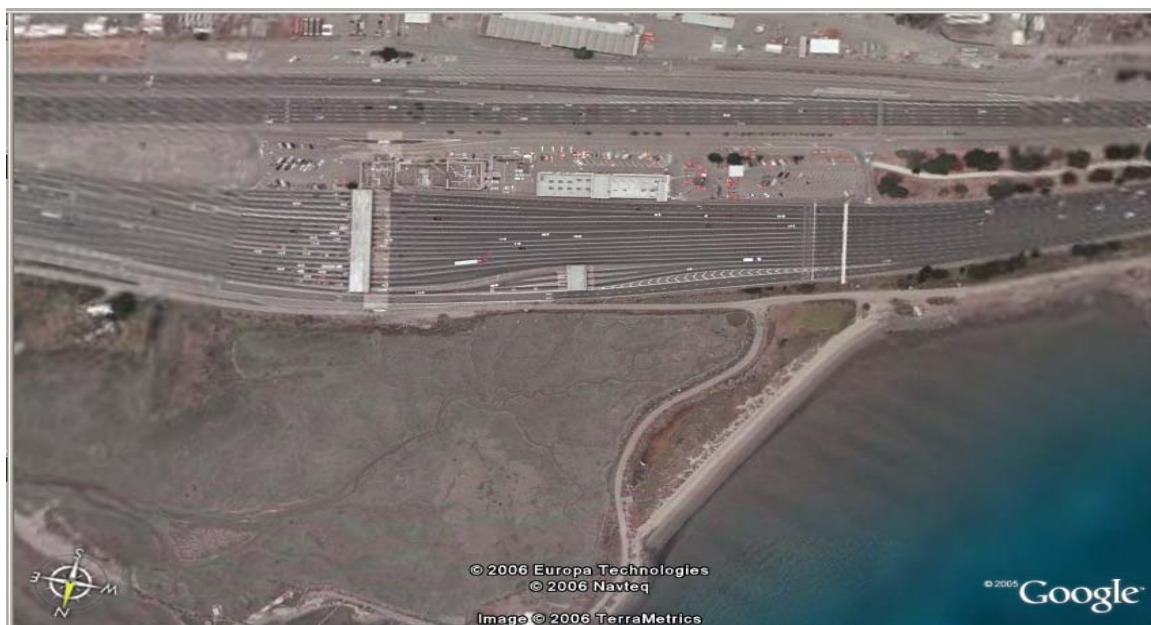
# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Έλεγχος κυκλοφορίας

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

## 1.2 Παρουσίαση του προβλήματος

Η παρούσα μελέτη έχει σκοπό τη διερεύνηση της εφαρμογής τοπικού ελέγχου σε περιοχή του αυτοκινητοδρόμου που εμφανίζεται συγχώνευση λωρίδων εξαιτίας της ύπαρξης διοδίων. Γενικά το γεγονός της συγχώνευσης των λωρίδων μπορεί να οφείλεται σε κυκλοφοριακούς κόμβους, σε ράμπες εισόδου–εξόδου, σε έργα οδοποιίας, στην ιδιαίτερη γεωγραφική μορφολογία του δικτύου, σε αλλαγές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, καθώς και σε άλλα αίτια. Όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση είναι αυξημένη εμφανίζεται στις περιοχές αυτές το φαινόμενο της μείωσης της ικανότητας που περιγράφεται από το θεμελιώδες διάγραμμα (βλέπε Κεφάλαιο 2). Η μείωση της ικανότητας συμβαίνει κυρίως λόγω της διακύμανσης στην επιτάχυνση των οχημάτων. Στην εργασία αυτή, με παράδειγμα την περιοχή διοδίων πριν την είσοδο των οχημάτων στην γέφυρα Bay στο San Francisco Σχήμα 1-1, θα εξεταστεί αν και κατά πόσο η εφαρμογή κάποιας στρατηγικής ελέγχου μπορεί να βελτιώσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες σε μία περιοχή όπου το φαινόμενο της συγχώνευσης λωρίδων είναι ιδιαίτερα έντονο.



*Σχήμα 1-1 : Περιοχή διοδίων, γέφυρα Bay, San Francisco.*

### 1.3 Δομή της εργασίας

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της εργασίας, αναλύονται τα διαθέσιμα μέτρα ελέγχου κυκλοφορίας των αυτοκινητοδρόμων και οι συνηθέστερες τοπικές στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζονται και ακολουθεί σύγκριση αυτών. 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<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Το 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που αποτελούν την εφαρμογή του προβλήματος δηλαδή τις παραμέτρους εισόδου, τη στρατηγική ελέγχου κυκλοφορίας, τις παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης και τις παραμέτρους εξόδου. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το δίκτυο που εξετάζεται, πρώτα χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας και έπειτα με εφαρμογή τοπικού ελέγχου, γίνεται διερεύνηση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων της στρατηγικής ελέγχου και ακολουθεί σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 γίνεται

σύνοψη της παρούσας εργασίας, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και οι επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν στο μέλλον.

## 2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Οι αυτοκινητόδρομοι είχαν αρχικά σχεδιαστεί με σκοπό να παρέχουν απεριόριστη κινητικότητα στους χρήστες. Η συνεχόμενη και ραγδαία αύξηση του αριθμού των οχημάτων οδήγησε σταδιακά στην εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης δημιουργείται όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να αντιμετωπίσει η υποδομή και μπορεί να είναι μεμονωμένη, λόγω τυχαίων περιστατικών, ή επαναλαμβανόμενη, καθημερινά στις ώρες αιχμής. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση έχει ως αποτέλεσμα καθυστερήσεις, μειωμένη ασφάλεια, αυξημένη ρύπανση και υποβαθμισμένη χρήση της ικανότητας του αυτοκινητοδρόμου, ακριβώς τη στιγμή που είναι περισσότερο αναγκαία.

Η λύση στο πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης δεν μπορεί να είναι απλά η επέκταση της υπάρχουσας υποδομής ή η κατασκευή νέας. Το οικονομικό κόστος, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η έλλειψη χώρου είναι μόνο μερικές από τις αιτίες. Αντίθετα, η καλύτερη χρήση και αξιοποίηση της ικανότητας των αυτοκινητοδρόμων μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή μέτρων ελέγχου των δικτύων αυτοκινητοδρόμων.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν τα διαθέσιμα μέτρα ελέγχου αυτοκινητοδρόμων και οι στρατηγικές ελέγχου ραμπών εισόδου. Τέλος θα περιγραφούν οι πιο διαδεδομένες τοπικές στρατηγικές ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμου και θα γίνει μία σύντομη σύγκριση αυτών ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη στρατηγική, η οποία τροποποιημένη θα εφαρμοστεί στο δίκτυο που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Οι πληροφορίες που παρατίθενται για τα μέτρα και τις στρατηγικές ελέγχου προέρχονται κυρίως από προηγούμενες αναφορές (Papageorgiou and Kotsialos, 2002; Papageorgiou et al., 2003)).

### 2.2 Μέτρα ελέγχου αυτοκινητοδρόμων

Τα μέτρα ελέγχου που συνήθως εφαρμόζονται στα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων είναι τα παρακάτω:

- **Έλεγχος ραμπών εισόδου (ramp metering)**, τίθεται σε λειτουργία μέσω της τοποθέτησης φωτεινών σηματοδοτών στις ράμπες εισόδου ή σε κόμβους αυτοκινητοδρόμων.

- **Έλεγχος συνδέσμων (link control)**, εμπεριέχει ένα αριθμό δυνατοτήτων όπως έλεγχος λωρίδων, μεταβλητά όρια ταχύτητας, ενημέρωση για την ύπαρξη κυκλοφοριακής συμφόρησης, οδηγίες διατήρησης πορείας εντός λωρίδας κ.α.
- **Πληροφόρηση του οδηγού και συστήματα καθοδήγησης (driver information and guidance systems)**, πραγματοποιείται είτε χρησιμοποιώντας πινακίδες στην άκρη του αυτοκινητοδρόμου, είτε μέσω αμφίδρομης επικοινωνίας με κατάλληλα εφοδιασμένα οχήματα.

Ο έλεγχος ραμπών είναι ο πιο άμεσος και αποδοτικός τρόπος για τη ρύθμιση και βελτίωση της κυκλοφορίας του αυτοκινητοδρόμου. Αν ο έλεγχος των ραμπών εφαρμοστεί κατάλληλα μπορούν να επιτευχθούν πολλά θετικά αποτελέσματα:

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

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

## 2.3 Στρατηγικές ελέγχου ραμπών αυτοκινητοδρόμων

Οι στρατηγικές ελέγχου ραμπών διακρίνονται στις στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου που περιλαμβάνουν τις συντονισμένες στρατηγικές και στις στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου, οι οποίες περιλαμβάνουν αντίστοιχα τις τοπικές στρατηγικές και τις στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1.

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

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



**Σχήμα 2-1:** Ταξινόμηση στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας.

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

Οι στρατηγικές ελέγχου της ροής ραμπών που χρησιμοποιούν μετρήσεις πραγματικού χρόνου (όπως και αυτές σταθερού χρόνου) διακρίνονται σε *τοπικές στρατηγικές* και σε *στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου*. Οι πρώτες χρησιμοποιούν μετρήσεις που λαμβάνονται από τη γύρω περιοχή της ράμπας εισόδου, ενώ οι δεύτερες χρησιμοποιούν μετρήσεις από φωρατές που είναι τοποθετημένοι σε μια πιο ευρεία περιοχή του αυτοκινητοδρόμου προκειμένου να αποφασίσουν για τον έλεγχο πολλαπλών ραμπών εντός της ίδιας περιοχής. Οι στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου μπορεί να είναι πιο αποδοτικές από τις τοπικές στρατηγικές όταν υπάρχουν πολλαπλά σημεία με μπουτιλιάρισμα στον αυτοκινητόδρομο ή περιορισμένη χωρητικότητα οχημάτων στις ράμπες. Στο δίκτυο που παρουσιάστηκε ήδη, και θα εξεταστεί στην παρούσα μελέτη, θα εφαρμοστεί τοπικός έλεγχος.

## 2.4 Τοπικές στρατηγικές ελέγχου ραμπών

Οι πιο συνηθισμένες τοπικές στρατηγικές ελέγχου ραμπών, που χρησιμοποιούν μετρήσεις πραγματικού χρόνου, είναι η στρατηγική Ζήτησης – Ικανότητας, η στρατηγική ποσοστού κατάληψης και η στρατηγική ελέγχου ALINEA. Η στρατηγική Ζήτησης – Ικανότητας και η στρατηγική ποσοστού κατάληψης είναι στρατηγικές απόρριψης διαταραχών που βασίζονται σε μετρήσεις ροής οχημάτων και ποσοστού κατάληψης στο κύριο ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου ανάντη της ράμπας. Αντιθέτως η στρατηγική ALINEA είναι ένας ελεγκτής με ανατροφοδότηση (τύπου I), που βασίζεται σε μετρήσεις ποσοστού κατάληψης στο κύριο ρεύμα κατάντη της ράμπας.

### 2.4.1 Η Στρατηγική ελέγχου Ζήτησης – Ικανότητας

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

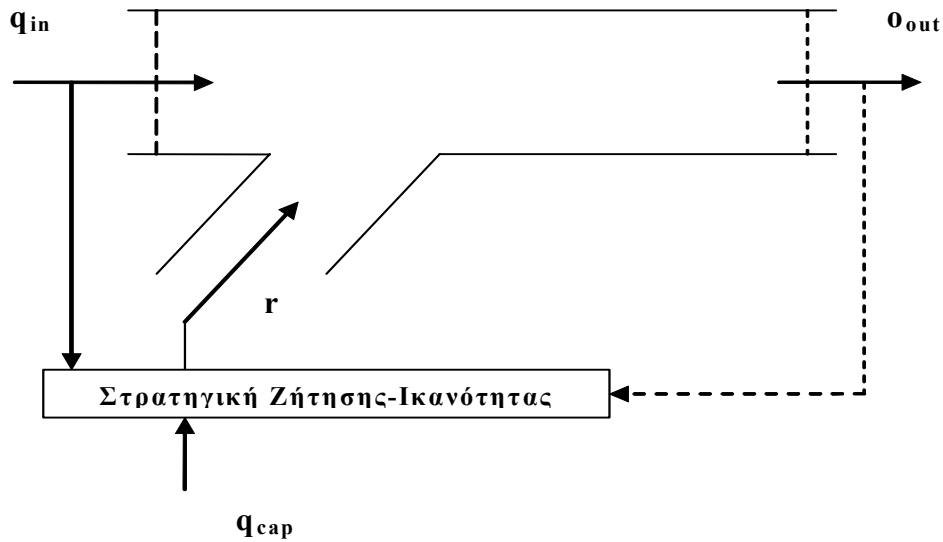
$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k-1) & \text{αν } o_{in}(k-1) \leq o_{cr} \\ r_{min} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.1)$$

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

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

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





**Σχήμα 2-2:** Στρατηγική ελέγχου Ζήτησης-Ικανότητας.

#### 2.4.2 Η Στρατηγική ελέγχου ποσοστού κατάληψης

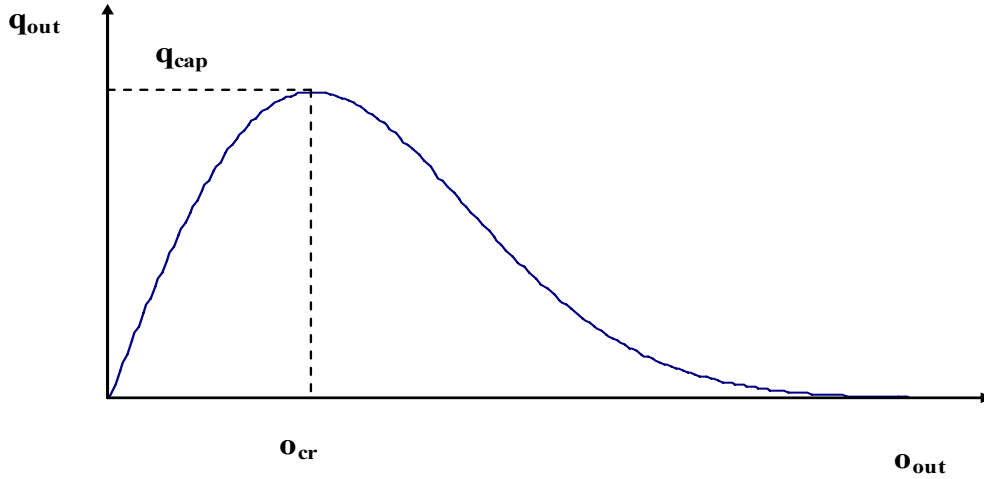
Η στρατηγική ελέγχου ποσοστού κατάληψης (Occupancy Strategy) (Masher et al. 1975) βασίζεται στην ίδια φιλοσοφία με την στρατηγική DC αλλά στηρίζεται στην εκτίμηση του  $q_{in}$  με βάση το ποσοστό κατάληψης, γεγονός που μπορεί να επιφέρει μείωση του κόστους εφαρμογής της στρατηγικής κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Πιο αναλυτικά, αν η αριστερή πλευρά του θεμελιώδους διαγράμματος (Σχήμα 2-3) προσεγγιστεί με μία ευθεία γραμμή, έχουμε

$$q_{in} = \frac{v_f \cdot o_{in}}{g} \quad (2.2)$$

όπου  $v_f$  είναι η ελεύθερη ταχύτητα στον αυτοκινητόδρομο. Αντικαθιστώντας την εξίσωση 2.2 στο πάνω μέρος της εξίσωσης 2.1, προκύπτει

$$r(k) = K_1 - K_2 \cdot o_{in}(k-1) \quad (2.3)$$

όπου  $K_1 = q_{cap}$ ,  $K_2 = v_f / g$  και το  $r(k)$  περικόπτεται αν ξεπερνά το εύρος  $[r_{min}, r_{max}]$ , όπου  $r_{max}$  είναι η εκτιμώμενη χωρητικότητα της ράμπας. Συνεπώς η στρατηγική OCC (Εξίσωση 2.3) είναι μία στρατηγική ανοιχτού βρόχου που βασίζεται στο ποσοστό κατάληψης και είναι ακόμα πιο ανακριβής από την στρατηγική DC λόγω της γραμμικής υπόθεσης για το θεμελιώδες διάγραμμα και της αβεβαιότητας για την ακριβή τιμή των  $v_f$  και  $g$ .



**Σχήμα 2-3:** Θεμελιώδες διάγραμμα.

### 2.4.3 Η Στρατηγική ελέγχου ALINEA

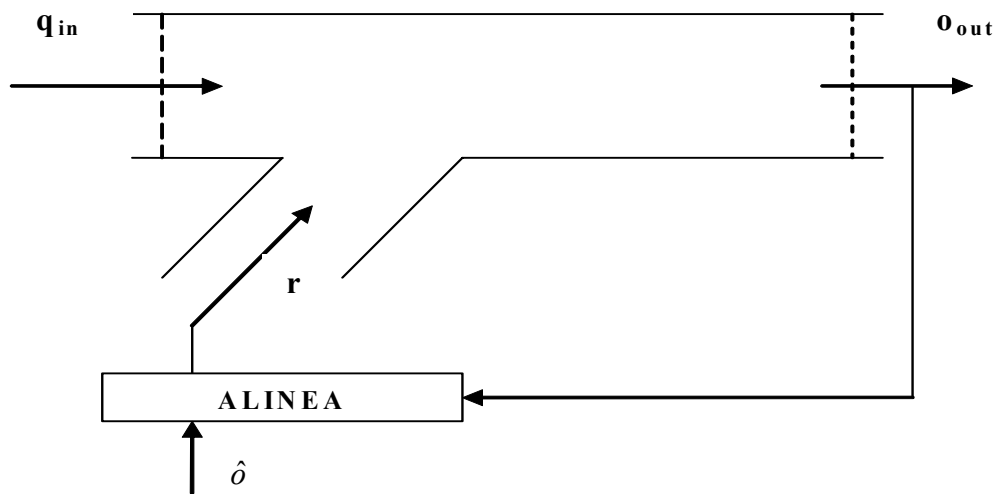
Η ALINEA (Papageorgiou et al. 1991) είναι μία στρατηγική ελέγχου ραμπών εισόδου με ανατροφοδότηση (Σχήμα 2-4) και δίνεται από τη σχέση

$$r(k) = r(k-1) + K_R [\hat{o} - o_{out}(k-1)] \quad (2.4)$$

όπου  $k=1,2,\dots$  είναι η διακριτή χρονική περίοδος,  $r(k)$  είναι η ροή οχημάτων στη ράμπα που θα εφαρμοστεί τη νέα χρονική περίοδο,  $K_R > 0$  είναι η παράμετρος κέρδους και  $\hat{o}$  είναι μία σταθερή επιθυμητή τιμή για το κατάντη ποσοστό κατάληψης. Συνήθως, αυτή η επιθυμητή τιμή ορίζεται ίση με την κρίσιμη τιμή της κατάληψης για την οποία ο κατάντη αυτοκινητόδρομος αποκτά τη μέγιστη ροή οχημάτων (βλέπε Σχήμα 2-3).

Η στρατηγική ελέγχου ALINEA είναι ένας ελεγκτής τύπου I, και ως εκ τούτου, σε μια στάσιμη κατάσταση, δηλαδή όταν η ροή του αυτοκινητόδρομου ανάντη της ράμπας παραμένει σταθερή, θα έχουμε  $\hat{o} = o_{out}$  που προκύπτει από την εξίσωση 2.4 ανεξάρτητα από την ανάντη ροή η οποία δεν χρησιμοποιείται από τη στρατηγική. Επίσης η στρατηγική ALINEA δεν είναι ευαίσθητη σε αλλαγές της τιμής της παραμέτρου κέρδους  $K_R$ .

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



**Σχήμα 2-4:** Στρατηγική ελέγχου ALINEA.

## 2.5 Σύγκριση τοπικών στρατηγικών ελέγχου

Οι στρατηγικές Ζήτησης – Ικανότητας (DC) και Ποσοστού Κατάληψης (OCC) είναι σχέδια απόρριψης διαταραχών ανοιχτού βρόχου, που στοχεύουν στη ροή ικανότητας της περιοχής συγχώνευσης και βασίζονται σε μετρήσεις της ροής οχημάτων ή του ποσοστού κατάληψης αντίστοιχα, στο κύριο ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου ανάντη της ράμπας. Είναι γνωστό (Cassidy and Radjanakanoknad, 2005; Lorenz and Elefteriadou, 2001), ότι η πραγματική ροή ικανότητας σε μια περιοχή συγχώνευσης μπορεί να διαφέρει σημαντικά από ημέρα σε ημέρα, ακόμα και κάτω από τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για τον παραπάνω λόγο, οι στρατηγικές DC και OCC που στοχεύουν σε μία προκαθορισμένη τιμή της ροής ικανότητας μπορεί είτε να υπερφορτώσουν είτε να μη χρησιμοποιούν βέλτιστα την υποδομή του αυτοκινητοδρόμου. Αντιθέτως η κρίσιμη τιμή του ποσοστού κατάληψης για την οποία προκύπτει η ροή ικανότητας, βρέθηκε (Keen et al., 1986; Papageorgiou et al., 2006) να είναι πιο σταθερή.

Από την άλλη μεριά η ALINEA είναι στρατηγική με ανατροφοδότηση, που στοχεύει σε μια προκαθορισμένη κρίσιμη τιμή για την κατάληψη κατάντη της ράμπας. Επίσης η στρατηγική ALINEA αντιδρά ομαλά ακόμα και σε μικρές διαφορές του  $\hat{o} - o_{out}(k-1)$  με αποτέλεσμα να σταθεροποιεί την κυκλοφοριακή ροή γύρω από τη προκαθορισμένη κρίσιμη τιμή. Είναι πιθανό ότι, ακριβώς λόγω της κλειστού βρόχου κατασκευής της και της στόχευσης σε μια αρκετά σταθερή τιμή, του κρίσιμου ποσοστού κατάληψης, η ALINEA βρέθηκε να οδηγεί σε σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα από τις στρατηγικές DC και OCC, σε αντίστοιχες συγκρίσεις πεδίου (Papageorgiou et al., 1998).

## 3 Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ AIMSUN

### 3.1 Εισαγωγή

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

Ο προσομοιωτής AIMSUN ακολουθεί μία μικροσκοπική προσέγγιση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στο περιβάλλον AIMSUN NG. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά κάθε οχήματος στο δίκτυο μοντελοποιείται ενώ αυτό ταξιδεύει μέσα στο δίκτυο, σύμφωνα με διάφορα μοντέλα συμπεριφοράς οχημάτων. Το AIMSUN είναι ένας προσομοιωτής διακριτών και συνεχών καταστάσεων, δηλαδή υπάρχουν 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.

Οι παράμετροι εισόδου που λαμβάνει 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 εισόδου, ενώ οι παράμετροι που περιγράφουν το πείραμα είναι είτε σταθερές τιμές (χρόνος προσομοίωσης, περίοδοι συλλογής στατιστικών κ.α.), είτε μεταβλητές που διορθώνουν την απόδοση του μοντέλου. Οι έξοδοι που παρέχει το AIMSUN είναι μια συνεχής γραφική αναπαράσταση της εξέλιξης του οδικού δικτύου, στατιστικά στοιχεία (ροή οχημάτων, ταχύτητα, χρόνοι ταξιδιού, καθυστερήσεις κ.α.) και δεδομένα που συλλέγονται από τους φωρατές (αριθμός οχημάτων, ποσοστό κατάληψης, ταχύτητα κ.α.).

## 3.2 Παράμετροι εισόδου

Η μικροσκοπική προσομοίωση χαρακτηρίζεται από το υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας με το οποίο το σύστημα μοντελοποιείται. 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 του δικτύου

Ένα μοντέλο οδικού δικτύου αποτελείται από έναν αριθμό τμημάτων δρόμου, μίας κατεύθυνσης, με συγκεκριμένες ιδιότητες που επηρεάζουν τον τρόπο κίνησης των οχημάτων. Τα τμήματα δρόμου συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους (διασταυρώσεις), οι οποίοι μπορεί να περιλαμβάνουν διαφορετικά χαρακτηριστικά κυκλοφορίας. Επίσης στο μοντέλο μπορεί να περιέχονται φωρατές, τοποθετημένοι στο επιθυμητό σημείο του δικτύου και με διάφορες ικανότητες μέτρησης (αριθμού οχημάτων, ποσοστού κατάληψης, ταχύτητας, πυκνότητας 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 αποτελούν το δίκτυο.

### 3.2.2 Σενάριο ζήτησης

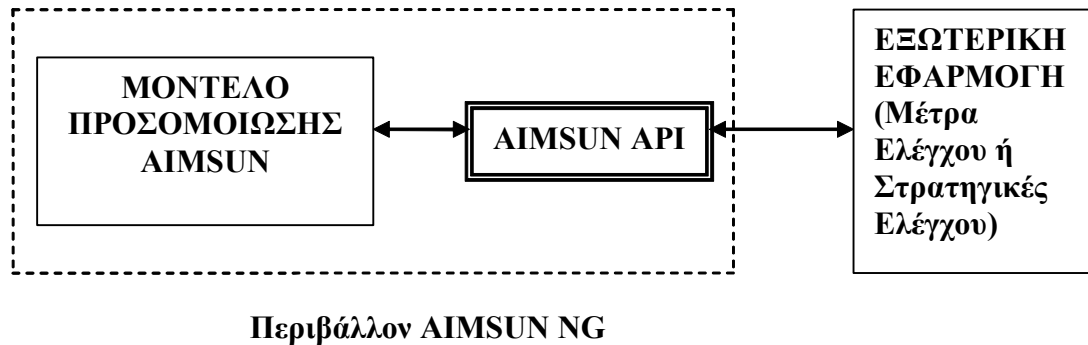
Η πληροφορία που περιλαμβάνει ένα σενάριο ζήτησης αφορά τη ροή οχημάτων στις εισόδους του δικτύου και τα ποσοστά αλλαγής κατεύθυνσης σε κάθε κόμβο. Οι τιμές αυτές ορίζονται από το χρήστη για κάθε διαφορετικό τύπο οχήματος, βάσει μιας πειραματικής υπόθεσης. Τα οχήματα παράγονται και εισάγονται στο δίκτυο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

### 3.2.3 Έλεγχος κυκλοφορίας

Ο προσομοιωτής AIMSUN διαθέτει διάφορους τρόπους ελέγχου κυκλοφορίας. Για τον έλεγχο κυκλοφορίας στους κόμβους ενδείκνυται η εφαρμογή ομάδων φωτεινών σηματοδοτών (ΦΣ) (signal groups). Κάθε ομάδα φωτεινών σηματοδοτών περιλαμβάνει ΦΣ οι οποίοι έχουν προτεραιότητα την ίδια στιγμή, δηλαδή λειτουργούν παράλληλα. Η ρύθμιση του τρόπου λειτουργίας των ομάδων σημάτων γίνεται με βάση κάποιο σενάριο ελέγχου. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει παραπάνω από ένα σταθερά σενάρια ελέγχου κυκλοφορίας και να τα ενεργοποιεί σε διαφορετικές στιγμές της προσομοίωσης ή να χρησιμοποιεί εξωτερικό έλεγχο, επεμβαίνοντας στον τρόπο λειτουργίας των ΦΣ. Αυτό 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 επικοινωνίας με τον προσομοιωτή AIMSUN κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να δοκιμάσει και να αξιολογήσει οποιαδήποτε εξωτερική εφαρμογή, για παράδειγμα κάποια στρατηγική ελέγχου, που χρειάζεται πρόσβαση σε εσωτερικά δεδομένα του AIMSUN ή/και που απαιτεί τη δυναμική αλλαγή της κατάστασης τους.



*Σχήμα 3-1: Αναπαράσταση της λειτουργίας του AIMSUN API.*

Το AIMSUN API (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 Επανάληψη (AIMSUN Replication)

Η Επανάληψη δίνει τον τυχαίο αριθμό που θα αποτελέσει το σπόρο για τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιεί ο προσομοιωτής.

### **3.4.2 Σενάριο (AIMSUN Scenario)**

Το Σενάριο περιλαμβάνει δεδομένα για το σενάριο ζήτησης, τις κυκλοφοριακές ρυθμίσεις, για τις στατιστικές πληροφορίες που θα συλλεχθούν, και εδώ καθορίζεται το αρχείο του AIMSUN API που θα χρησιμοποιηθεί.

### **3.4.3 Πείραμα (AIMSUN Experiment)**

Το Πείραμα περιέχει κυρίως πληροφορίες για την μοντελοποίηση της κίνησης των οχημάτων. Τα βασικά μοντέλα κίνησης των οχημάτων είναι το Μοντέλο Ακολουθίας Οχημάτων (Car-Following Model) και το Μοντέλο Αλλαγής Λωρίδας (Lane-Changing Model), τα οποία θα περιγράψουμε στη συνέχεια. Επίσης στο Πείραμα ορίζεται το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, οι χρόνοι αντίδρασης των οχημάτων κ.α.

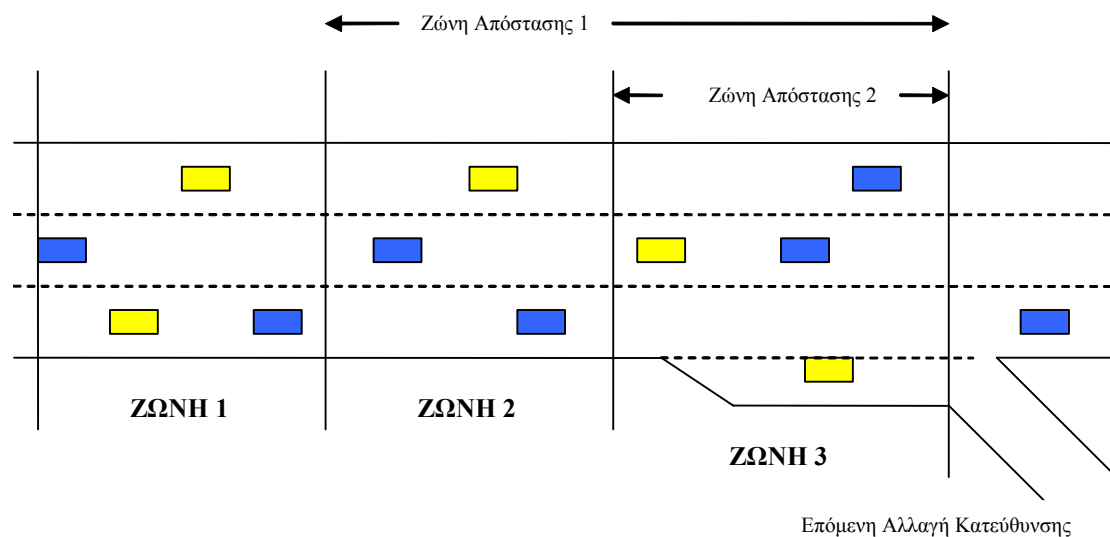
#### **3.4.3.1 Μοντέλο ακολουθίας οχημάτων (Car-Following Model)**

Το μοντέλο ακολουθίας οχημάτων περιλαμβάνει παραμέτρους όχι γενικές αλλά τοπικές που εξαρτώνται από τον τύπο του οδηγού (αποδεκτό όριο ταχύτητας του οχήματος), τη γεωμετρία του τμήματος του δρόμου (όριο ταχύτητας στο δρόμο, όρια ταχύτητας στις στροφές κ.α.), την επιρροή των οχημάτων στις γειτονικές λωρίδες κ.α. Βασικά, αποτελείται από δύο στοιχεία την επιτάχυνση και την επιβράδυνση. Το πρώτο αντιπροσωπεύει την πρόθεση του οχήματος να επιτύχει μία συγκεκριμένη επιθυμητή ταχύτητα, ενώ το δεύτερο αναπαράγει τους περιορισμούς που τίθενται από οχήματα που προηγούνται τα οποία προσπαθούν να οδηγήσουν στην επιθυμητή ταχύτητα. Για να μοντελοποιηθεί η επιρροή των γειτονικών λωρίδων στο μοντέλο ακολουθίας οχημάτων προστίθεται το Μοντέλο Ακολουθίας Οχημάτων Δύο Λωρίδων (2-Lanes Car-Following Model), το οποίο λαμβάνει υπόψη την επιρροή ενός ορισμένου αριθμού οχημάτων που οδηγούν πιο αργά στη διπλανή δεξιά λωρίδα.

#### **3.4.3.2 Μοντέλο αλλαγής λωρίδας (Lane-Changing Model)**

Το μοντέλο αλλαγής λωρίδας μοντελοποιείται σαν μια διαδικασία απόφασης που αναλύει το πόσο αναγκαία είναι η αλλαγή λωρίδας (για παράδειγμα λόγω ύπαρξης στροφής), το πόσο επιθυμητή είναι η αλλαγή λωρίδας (απόκτηση επιθυμητής ταχύτητας όταν το προπορευόμενο όχημα κινείται πιο αργά), και το πόσο εφικτή είναι η αλλαγή λωρίδας που εξαρτάται από τη θέση του οχήματος στο οδικό δίκτυο. Για να επιτευχθεί μία πιο ακριβής αναπαράσταση της συμπεριφοράς των οδηγών, ορίζονται τρεις διαφορετικές ζώνες μέσα σε ένα τμήμα δρόμου που κάθε μία ανταποκρίνεται σε διαφορετικό κίνητρο αλλαγής λωρίδας. Οι ζώνες αυτές, Σχήμα 3-2, χαρακτηρίζονται από την απόστασή τους από το τέλος του τμήματος δρόμου που αντιστοιχεί στο σημείο αλλαγής κατεύθυνσης και ορίζονται ως εξής:

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



**Σχήμα 3-2:** Ζώνες αλλαγής λωρίδας.

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

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

Οι ζώνες αλλαγής λωρίδας καθορίζονται από δύο παραμέτρους, τη Ζώνη Απόστασης 1 και τη Ζώνη Απόστασης 2 όπως φαίνονται στο Σχήμα 3-2. Οι παράμετροι αυτές είναι αρκετά σημαντικές και αποτελούν ιδιότητα του κάθε τμήματος δρόμου.



### **3.5 Έξοδοι προσομοίωσης**

Ο προσομοιωτής AIMSUN παρέχει στο χρήστη διάφορες εξόδους, οι βασικότερες εκ των οποίων είναι οι εξής: δυσδιάστατη και τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της προσομοίωσης, πληροφορίες για τον αριθμό οχημάτων κάθε τύπου που διασχίζουν το δίκτυο κάθε στιγμή, λεπτομερής περιγραφή των χαρακτηριστικών μεμονωμένων οχημάτων, απεικόνιση της κατάστασης των φωτεινών σηματοδοτών κάθε χρονική στιγμή και στατιστικές μετρήσεις της κυκλοφορίας. Οι στατιστικές μετρήσεις, όπως η ροή οχημάτων, η ταχύτητα, ο χρόνος διαδρομής και ο χρόνος καθυστέρησης, μπορεί να αφορούν όλο το σύστημα, κάποια τμήματα δρόμου ή και σημεία αλλαγής κατεύθυνσης. Στατιστικές μετρήσεις όπως αριθμός οχημάτων, ποσοστά κατάληψης, ταχύτητα σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου, λαμβάνονται επίσης από τους φωρατές.

## **4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

### **4.1 Εισαγωγή**

Το οδικό δίκτυο που θα εξεταστεί αποτελεί μία περίπτωση συγχώνευσης λωρίδων ενός αυτοκινητοδρόμου λόγω της ύπαρξης διοδίων. Η στένωση που δημιουργείται από τις δεκαπέντε λωρίδες εξυπηρέτησης των διοδίων στις πέντε λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου στη γέφυρα, προκαλεί μείωση της ροής των οχημάτων και επομένως κυκλοφοριακή συμφόρηση και μείωση της ικανότητας “απορρόφησης” οχημάτων στον κατάντη αυτοκινητόδρομο, ιδιαίτερα στις ώρες αιχμής. Η εφαρμογή κάποιας στρατηγικής ελέγχου αυτοκινητοδρόμων κρίνεται αναγκαία ώστε να αποφευχθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση στην είσοδο της γέφυρας και να γίνει έτσι βέλτιστη χρήση της ικανότητας του αυτοκινητοδρόμου.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν όλα τα στοιχεία που συνθέτουν την εφαρμογή του προβλήματος που θα εξεταστεί και θα προσομοιωθεί στο μικροσκοπικό προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN. Η έκδοση του προσομοιωτή που θα χρησιμοποιηθεί είναι η AIMSUN Simulator v5.0 και η έκδοση του περιβάλλοντος προσομοίωσης είναι η AIMSUN NG Professional Edition 5.0.10.

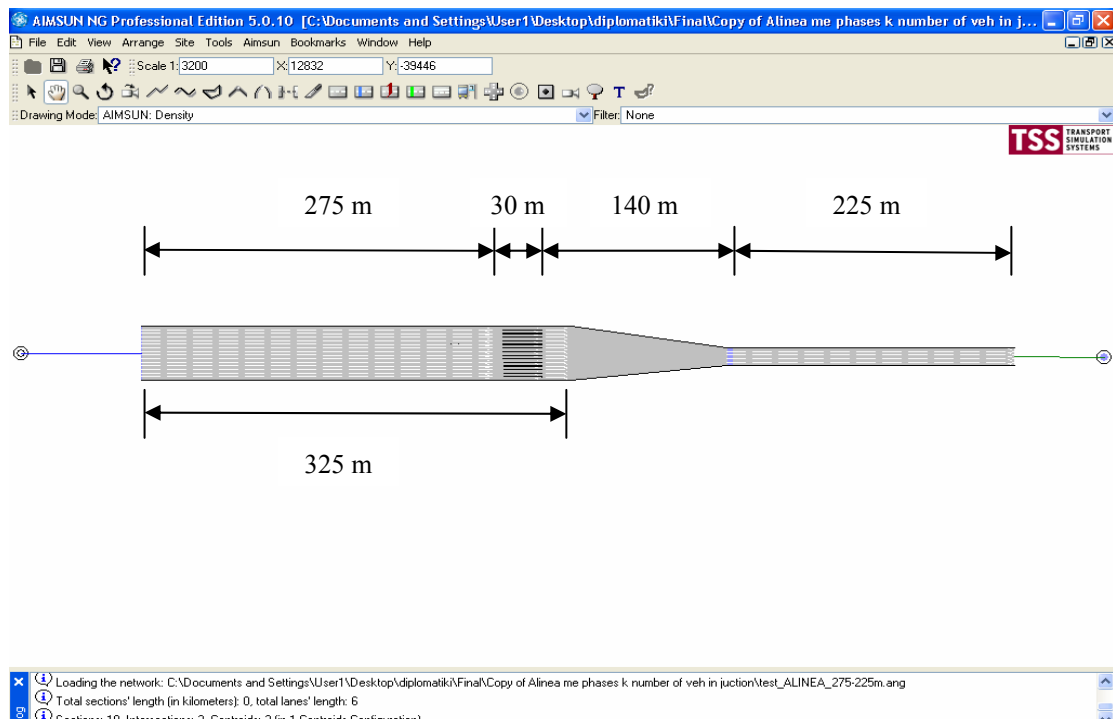
Τα κυριότερα στοιχεία της εφαρμογής του προβλήματος είναι οι παράμετροι εισόδου, η στρατηγική ελέγχου κυκλοφορίας, οι παράμετροι του μοντέλου προσομοίωσης και οι παράμετροι εξόδου. Η σχεδίαση του οδικού δικτύου, το σενάριο ζήτησης που θα εφαρμοστεί και η μέθοδος ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών αποτελούν τις παραμέτρους εισόδου του προσομοιωτή. Ο έλεγχος κυκλοφορίας θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση της τοπικής στρατηγικής ελέγχου αυτοκινητοδρόμων ALINEA, καθώς είναι πιο ισχυρή και εύρωστη από τις άλλες διαθέσιμες στρατηγικές (βλέπε Κεφάλαιο 2). Στο κεφάλαιο αυτό θα προσδιοριστούν οι αλλαγές που έγιναν στα βασικά στοιχεία του μοντέλου προσομοίωσης καθώς και οι παράμετροι εξόδου που θα λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και θα βοηθήσουν στην τελική αξιολόγηση της στρατηγικής ελέγχου.

### **4.2 Παράμετροι εισόδου**

Η πραγματοποίηση της μικροσκοπικής προσομοίωσης απαιτεί τον προσδιορισμό παραμέτρων εισόδου που μοντελοποιούν το πρόβλημα. Οι παράμετροι αυτές είναι η ακριβής σχεδίαση του οδικού δικτύου, ο ορισμός του επιθυμητού σεναρίου ζήτησης και ο προσδιορισμός του κατάλληλου ελέγχου κυκλοφορίας που θα εφαρμοστεί και που περιγράφονται στη συνέχεια. Η ακρίβεια και η πληρότητα των δεδομένων αυτών καθορίζει και την ποιότητα του μοντέλου προσομοίωσης.

### 4.2.1 Το δίκτυο

Το δίκτυο που θα προσομοιωθεί αποτελείται αρχικά από έναν αυτοκινητόδρομο δεκαπέντε λωρίδων μίας κατεύθυνσης και μήκους 275 μέτρων ο οποίος συνδέεται με δεκαπέντε δρόμους μήκους 30 μέτρων στην έξοδο των οποίων θα τοποθετηθούν οι φωτεινοί σηματοδότες. Στη συνέχεια αρχίζει η συγχώνευση των λωρίδων στις πέντε λωρίδες της γέφυρας που αναπαριστάται με έναν κόμβο (junction) μήκους 120 μέτρων.



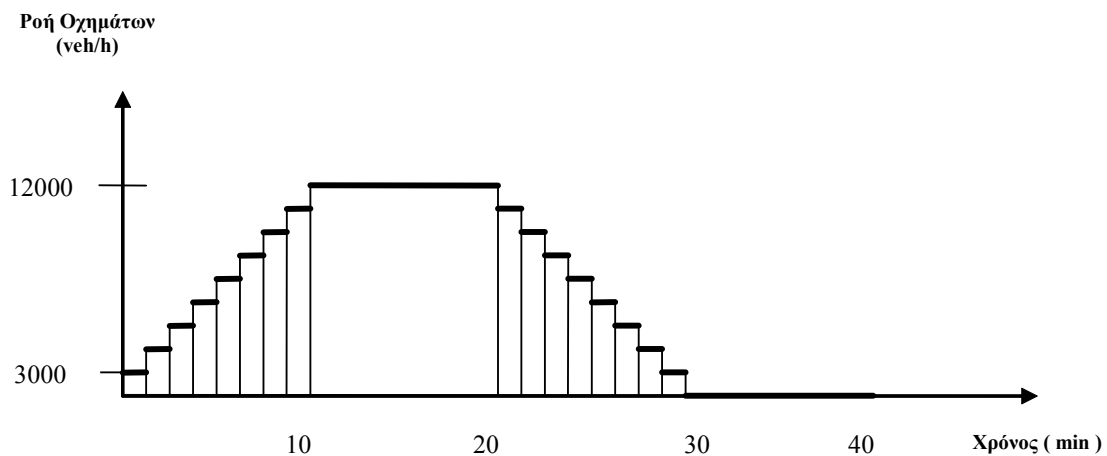
**Σχήμα 4-1:** Το δίκτυο αυτοκινητοδρόμου σε περιβάλλον AIMSUN NG.

Οι διαστάσεις του δικτύου φαίνονται αναλυτικά στο Σχήμα 4-1. Υποτίθεται ότι ο έλεγχος διοδίων γίνεται πριν τη συγχώνευση των λωρίδων και ότι δεν επηρεάζει τη ροή οχημάτων γιατί η εξυπηρέτηση είναι πολύ γρήγορη σε σχέση με την ταχύτητα των οχημάτων υπό συμφόρηση. Επίσης στο δίκτυο έχουν τοποθετηθεί φωρατές στην είσοδο ακριβώς της γέφυρας καθώς και αμέσως μετά τους φωτεινούς σηματοδότες ώστε να καταγράφεται η ροή των οχημάτων στα σημεία αυτά.

### 4.2.2 Σενάριο ζήτησης

Ο χρόνος προσομοίωσης ορίζεται στα 40 λεπτά ενώ δεδομένο του προσομοιωτή είναι ότι κάθε λωρίδα του αυτοκινητοδρόμου έχει χωρητικότητα 2100 veh/hour. Για την

πειραματική εφαρμογή θα χρησιμοποιηθούν οχήματα ενός τύπου που θα εισέρχονται στο δίκτυο σύμφωνα με το σενάριο που δίνεται στο Σχήμα 4-2



**Σχήμα 4-2:** Το σενάριο ζήτησης.

Στα 10 πρώτα λεπτά της προσομοίωσης η ζήτηση, ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο του δικτύου, αυξάνεται βηματικά ξεκινώντας από 3000 veh/h και καταλήγοντας το 10<sup>ο</sup> λεπτό στα 12000 veh/h, που είναι και η μέγιστη ζήτηση. Η ζήτηση διατηρεί τη μέγιστη τιμή της στα επόμενα 10 λεπτά και στη συνέχεια, δηλαδή στο 20<sup>ο</sup> λεπτό, η ζήτηση αρχίζει να μειώνεται μέχρι να φτάσει πάλι τα 3000 veh/h στο 30<sup>ο</sup> λεπτό. Το σενάριο ζήτησης συνεχίζει για 10 λεπτά ακόμα με μηδενική ροή οχημάτων στην είσοδο ώστε να εξασφαλιστεί ότι το δίκτυο θα καταλήξει άδειο όπως ακριβώς ήταν στην αρχή της προσομοίωσης.

Το σενάριο ζήτησης επιλέχθηκε έτσι ώστε να δημιουργεί σταδιακά κυκλοφοριακή συμφόρηση, να τη διατηρεί για κάποιο χρονικό διάστημα και εν συνεχεία να αποσυμφορείται τελείως ακόμα και χωρίς την εφαρμογή κάποιας στρατηγικής ελέγχου ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.

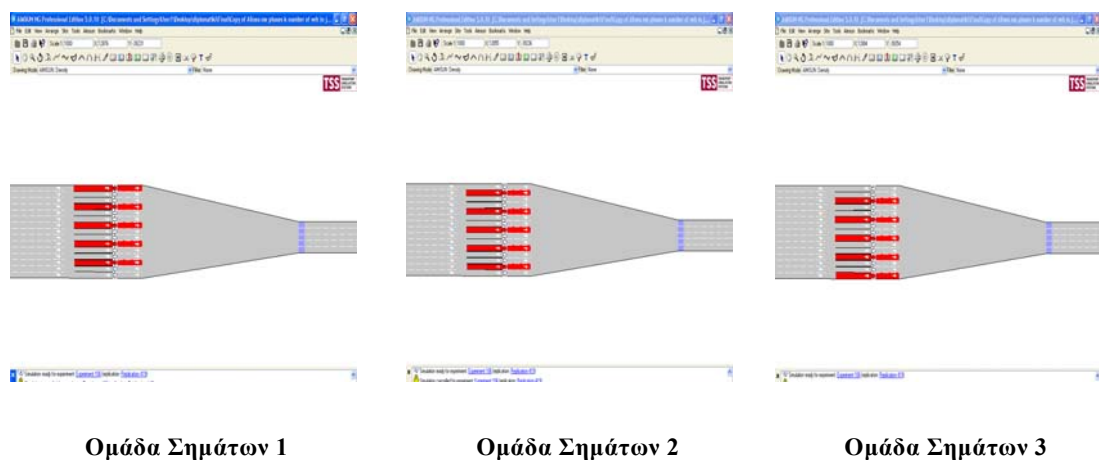
#### 4.2.3 Έλεγχος κυκλοφορίας

Η ρύθμιση της κυκλοφορίας γίνεται μέσω δεκαπέντε φωτεινών σηματοδοτών (ΦΣ). Οι ΦΣ τοποθετούνται σε μια περιοχή λίγο πριν τη συγχώνευση των δεκαπέντε λωρίδων του αυτοκινητοδρόμου στις πέντε λωρίδες της γέφυρας. Ο έλεγχος πραγματοποιείται σε όλες τις λωρίδες του αρχικού αυτοκινητοδρόμου, καθώς όλα τα οχήματα έχουν ήδη επιβραδύνει λόγω της ύπαρξης των διοδίων.

Η ρύθμιση των ΦΣ θα γίνει χρησιμοποιώντας την τοπική στρατηγική ελέγχου ALINEA. Η ALINEA ορίζει για κάθε περίοδο ελέγχου, τη ροή οχημάτων (veh/h) που θα πρέπει να διέλθει από την περιοχή ελέγχου κυκλοφορίας. Η ροή αυτή μετατρέπεται σε διάρκεια κύκλου (χρόνος πρασίνου και κοκκίνου) ανά ΦΣ για την επόμενη περίοδο ελέγχου. Η διάρκεια του πρασίνου στην περίπτωση που εξετάζεται

αφορά δύο οχήματα (2 cars per green). Η διάρκεια του κύκλου υπολογίζεται ως εξής:  $\text{κύκλος} = (\text{Αριθμός } \Phi\text{Σ} \times \text{Αριθμός Οχημάτων ανά πράσινη ένδειξη}) / r(k)$ , όπου  $r(k)$  είναι η νέα ροή οχημάτων που ορίζει η ALINEA σε veh/s (βλέπε παράγραφο 4-3).

Ο χρόνος πρασίνου ανά κύκλο είναι σταθερός και ίσος με 4sec. Η διάρκεια αυτή εξασφαλίζει ότι, κατά μέσο όρο, θα περνάνε 2 οχήματα ανά πράσινη ένδειξη. Ο χρόνος κοκκίνου μεταβάλλεται ανάλογα με τη διάρκεια του κύκλου που έχει ορίσει η στρατηγική ελέγχου. Επίσης τίθεται ελάχιστος χρόνος κοκκίνου ίσος με 2 sec για λόγους ασφαλείας. Η διάρκεια του κύκλου κάθε περιόδου ελέγχου επομένως, είναι ίδια για όλους τους  $\Phi\text{Σ}$ . Εάν η πράσινη ένδειξη στην περιοχή ελέγχου κυκλοφορίας ήταν ταυτόχρονη σε όλους τους  $\Phi\text{Σ}$  τα οχήματα θα αντιμετώπιζαν και πάλι το πρόβλημα της συγχώνευσης των λωρίδων.



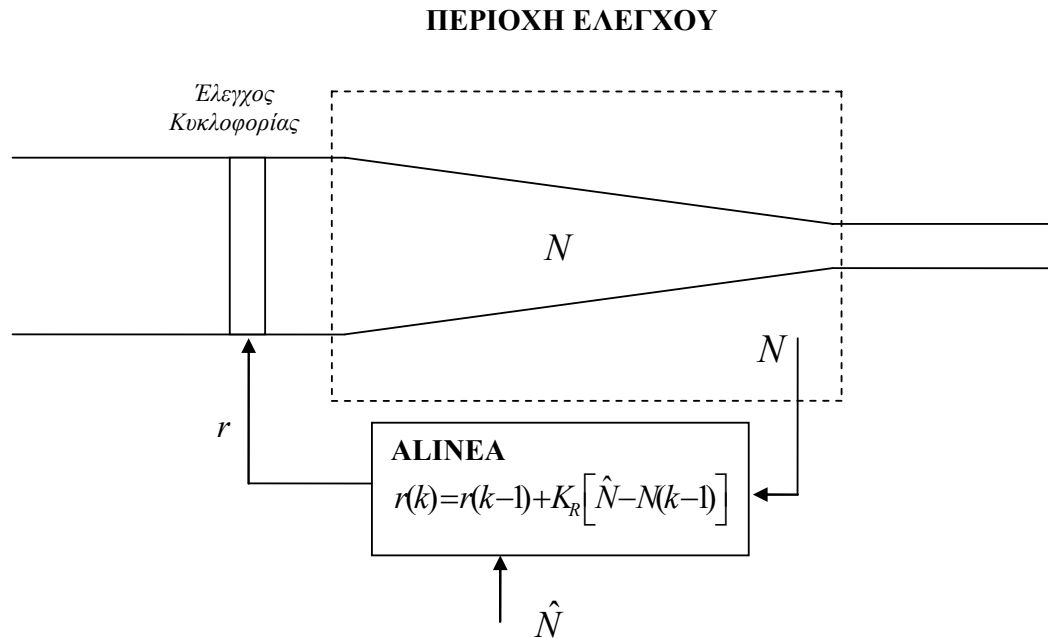
**Σχήμα 4-3:** Ομαδοποίηση φωτεινών σηματοδοτών.

Για να επιτευχθεί ομοιόμορφη και όχι ταυτόχρονη έξοδος των οχημάτων από τους  $\Phi\text{Σ}$  θα εφαρμοστεί η παρακάτω μεθοδολογία. Οι  $\Phi\text{Σ}$  των δεκαπέντε λωρίδων ομαδοποιούνται σε τρεις ομάδες σημάτων (signal groups). Οι  $\Phi\text{Σ}$  κάθε ομάδας σημάτων έχουν προτεραιότητα την ίδια στιγμή. Η πρώτη ομάδα σημάτων περιλαμβάνει τους  $\Phi\text{Σ}$  της 1<sup>ης</sup>, 4<sup>ης</sup>, 7<sup>ης</sup>, 10<sup>ης</sup> και 13<sup>ης</sup> λωρίδας. Η δεύτερη ομάδα σημάτων περιλαμβάνει τους  $\Phi\text{Σ}$  της 2<sup>ης</sup>, 5<sup>ης</sup>, 8<sup>ης</sup>, 11<sup>ης</sup> και 14<sup>ης</sup> λωρίδας ενώ η τρίτη ομάδα σημάτων αποτελείται από τους  $\Phi\text{Σ}$  της 3<sup>ης</sup>, 6<sup>ης</sup>, 9<sup>ης</sup>, 12<sup>ης</sup> και 15<sup>ης</sup> λωρίδας. Η ομαδοποίηση των  $\Phi\text{Σ}$  φαίνεται στο Σχήμα 4-3. Στη συνέχεια κάνοντας χρήση των δυνατοτήτων του προσομοιωτή AIMSUN μοιράζουμε το χρόνο πρασίνου κατά τη διάρκεια του κύκλου ομοιόμορφα ανάμεσα στις ομάδες σημάτων.

### 4.3 Η στρατηγική ελέγχου ALINEA

Στο συγκεκριμένο οδικό δίκτυο όπου θα εφαρμοστεί η ALINEA, αντί για τη μέτρηση του ποσοστού κατάληψης θα χρησιμοποιηθεί η μέτρηση του αριθμού οχημάτων  $N$

μέσα στον κόμβο. Αυτό γίνεται διότι ο προσομοιωτής AIMSUN δε δίνει τη δυνατότητα τοποθέτησης φωρατών μέσα σε κόμβο με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η λήψη μετρήσεων ποσοστού κατάληψης σε συγκεκριμένα σημεία του κόμβου του δικτύου. Η τιμή του αριθμού οχημάτων  $N$  που θα χρησιμοποιηθεί είναι ανάλογη της τιμής του ποσοστού κατάληψης και επομένως αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα. Στο Σχήμα4-6 αναπαριστάται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η ALINEA.



**Σχήμα 4-4:** Εφαρμογή της στρατηγικής ALINEA στο δίκτυο.

Η στρατηγική εφαρμόζεται κάθε χρονική περίοδο  $T = 30\text{sec}$ . Η ALINEA λαμβάνει τον αριθμό οχημάτων  $N$ , της τελευταίας χρονικής περιόδου μέσα στον κόμβο, ελέγχει την απόκλιση του από την επιθυμητή τιμή  $\hat{N}$  και υπολογίζει τη νέα ροή οχημάτων  $r$  (veh/h), που θα εισέλθει στην περιοχή ελέγχου την επόμενη περίοδο. Η νέα ροή οχημάτων περιορίζεται ανάμεσα σε μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή  $[r_{\min}, r_{\max}]$ , ώστε να αποφευχθούν ακραίες τιμές ροής που θα επηρεάσουν τη λειτουργία του ελεγκτή. Με την έναρξη της προσομοίωσης η ροή οχημάτων που εισήλθε στην περιοχή ελέγχου την προηγούμενη περίοδο τίθεται ίση με  $r_{\max}$ . Επίσης πρέπει να καθοριστούν οι τιμές  $K_R$  και  $\hat{N}$ .

**Πίνακας 4-1:** Τιμές παραμέτρων της ALINEA για την εφαρμογή

Δεδομένα Εισόδου της ALINEA	Τιμές Εφαρμογής
$K_R$	500
$r_{\min}$	4500 veh/h
$r_{\max}$	13000 veh/h

Στον Πίνακα 4-1 αναγράφονται οι τιμές που θα χρησιμοποιούν στο συγκεκριμένο οδικό δίκτυο για την εφαρμογή της ALINEA. Η κρίσιμη τιμή θα διερευνηθεί στο επόμενο κεφάλαιο, ενώ θα αποδειχθεί ότι η ALINEA δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην επιλογή της τιμής της παραμέτρου κέρδους  $K_R$ .

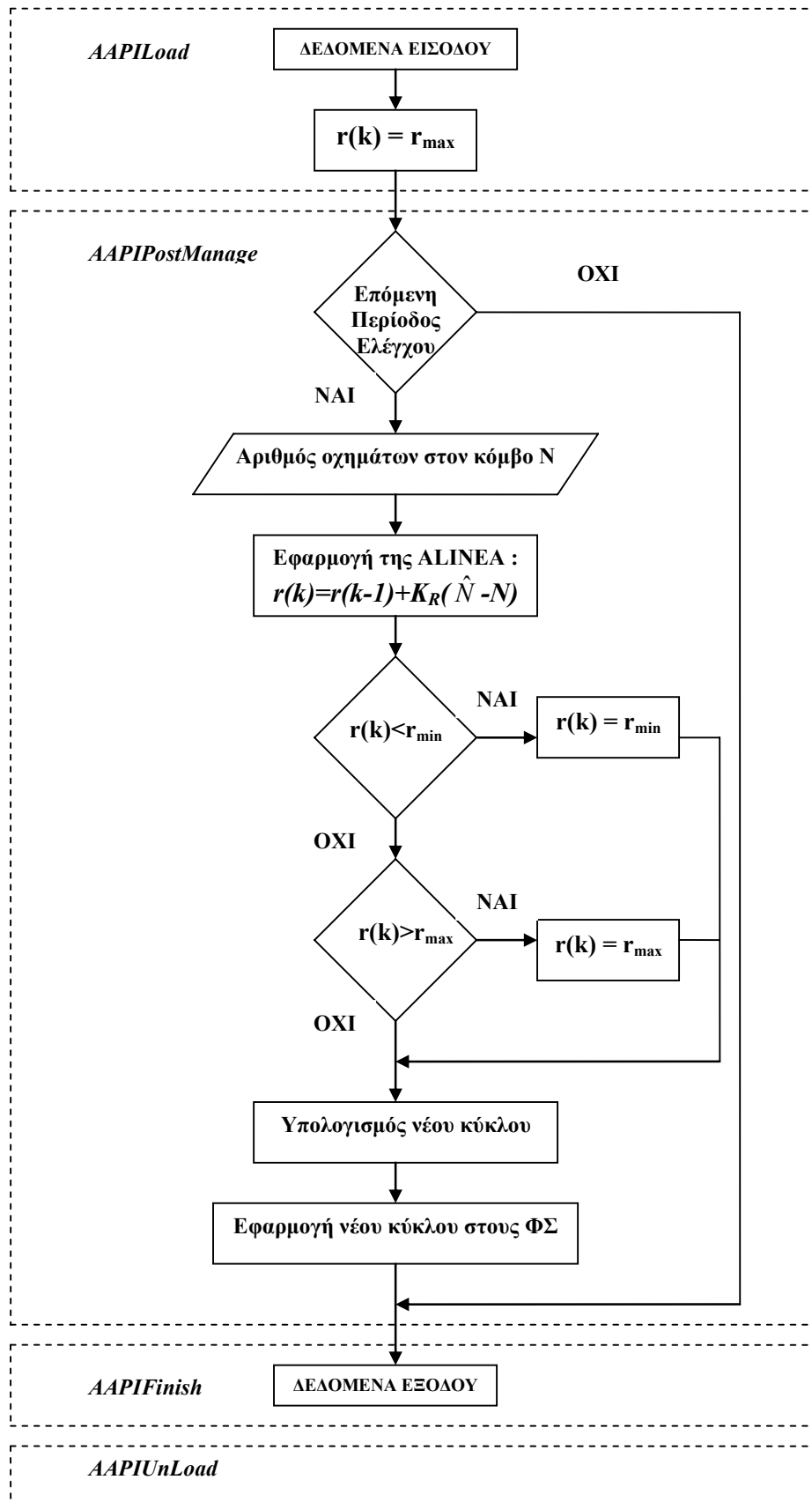
Η νέα ροή οχημάτων που υπολογίζει η ALINEA μετατρέπεται στον κύκλο (χρόνο πρασίνου και κόκκινου), που θα εφαρμοστεί στους φωτεινούς σηματοδότες την επόμενη χρονική περίοδο.

#### 4.4 AIMSUN API (Application Programming Interface)

Το AIMSUN API βρίσκεται μέσα στο περιβάλλον του AIMSUN NG και είναι αυτό που πραγματοποιεί την επικοινωνία μεταξύ της εξωτερικής στρατηγικής ελέγχου ALINEA και του μοντέλου προσομοίωσης AIMSUN. Η επικοινωνία όμως μεταξύ του AIMSUN API και της εξωτερικής εφαρμογής πρέπει να υλοποιηθεί από το χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής.

Το AIMSUN API περιλαμβάνει 8 βασικές συναρτήσεις οι οποίες εξασφαλίζουν την επικοινωνία του με τον προσομοιωτή AIMSUN. Οι συναρτήσεις αυτές είναι οι ακόλουθες: AAPILoad, AAPIInit, AAPIManage, AAPIPostManage, AAPIFinish, AAPILoad, AAPIEnterVehicle και AAPIExitVehicle. Για την εφαρμογή της παρούσας μελέτης θα χρησιμοποιηθούν οι επόμενες συναρτήσεις:

1. **AAPILoad():** Καλείται όταν το AIMSUN API συνδέεται με το AIMSUN.
2. **AAPIPostManage():** Καλείται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, στο τέλος της περιόδου, και χρησιμοποιείται για να λάβει μετρήσεις από στοιχεία του δικτύου (για παράδειγμα από φωρατές) ή για να αλλάξει τιμές στοιχείων (όπως τον κύκλο των φωτεινών σηματοδοτών) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, έτσι ώστε να εφαρμοστεί η επιθυμητή στρατηγική ελέγχου.
3. **AAPIFinish():** Καλείται στο τέλος της προσομοίωσης και χρησιμοποιείται για να ολοκληρώσει ενέργειες, όπως λήψη στατιστικών μετρήσεων του συστήματος, κλείσιμο αρχείων κ.α
4. **AAPIUnLoad():** Καλείται όταν το AIMSUN API αποσυνδέεται από το AIMSUN.



**Σχήμα 4-5:** Διάγραμμα ροής για την εφαρμογή ελέγχου ALINEA.



Το διάγραμμα ροής (Σχήμα 4-7), περιλαμβάνει το σύνολο των εντολών που πραγματοποιούνται στο AIMSUN API και που είναι απαραίτητες για την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA καθώς και για την επικοινωνία του AIMSUN API με τον προσομοιωτή AIMSUN.

Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούνται είναι:

- Η τιμή της παραμέτρου κέρδους  $K_R$ .
- Η τιμή του επιθυμητού αριθμού οχημάτων στον κόμβο  $N$ .
- Η περίοδος ελέγχου ορίζεται στα 30 sec.
- Η μέγιστη τιμή ροής που μπορεί να ορίσει η ALINEA,  $r_{\max}=13000$  veh/h.
- Η ελάχιστη τιμή ροής που μπορεί να ορίσει η ALINEA,  $r_{\min}=4500$  veh/h.
- Ο χρόνος πρασίνου, που είναι σταθερός και είναι ίσος με 4 sec.
- Ο ελάχιστος χρόνος κόκκινου, ίσος με 2 sec.

Τα αποτελέσματα εξόδου καταγράφονται σε αρχεία και λαμβάνονται μετά το τέλος της προσομοίωσης. Τα αρχεία αυτά περιλαμβάνουν αντίστοιχα:

- Το μέσο χρόνο καθυστέρησης (delay time) των οχημάτων του συστήματος.
- Τον αριθμό οχημάτων στον κόμβο  $N$  κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Τη νέα ροή οχημάτων που ορίζει η ALINEA σε κάθε περίοδο ελέγχου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στην περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας, απενεργοποιείται η λειτουργία των φωτεινών σηματοδοτών στο περιβάλλον AIMSUN NG, και λαμβάνονται από τις εξόδους της προσομοίωσης ο μέσος χρόνος καθυστέρησης και ο αριθμός οχημάτων στον κόμβο  $N$ . Σημειώνεται ότι οι τιμές ροής οχημάτων σε διάφορα σημεία του δικτύου συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης, που θα παρουσιαστούν στα αποτελέσματα της μελέτης (Κεφάλαιο 5), παρέχονται από του φωρατές που είναι τοποθετημένοι στα επιθυμητά σημεία.

## 4.5 Παράμετροι προσομοίωσης

Οι παράμετροι προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του συγκεκριμένου οδικού δικτύου, έχουν κυρίως τις προκαθορισμένες τιμές του προσομοιωτή, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του αυτοκινητοδρόμου (χωρητικότητα, μέση ταχύτητα κ.α.), τις ιδιότητες των οχημάτων (μήκος, πλάτος, μέση επιτάχυνση κ.α.), τα μοντέλα κίνησης των οχημάτων (ποσοστά προσπέρασης, χρόνος αντίδρασης κ.α.). Παρακάτω αναφέρονται οι κύριες αλλαγές που έγιναν στα βασικά στοιχεία της προσομοίωσης: την Επανάληψη, το Σενάριο και το Πείραμα.

#### **4.5.1 Επανάληψη (AIMSUN Replication)**

Στην Επανάληψη ορίζονται δέκα διαφορετικοί τυχαίοι αριθμοί που θα αποτελέσουν τους σπόρους για τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιεί ο προσομοιωτής. Για κάθε περίπτωση ελέγχου κυκλοφορίας του δικτύου που θα εξεταστεί, θα πραγματοποιούνται δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις, ώστε να περιοριστεί η στοχαστικότητα των αποτελεσμάτων.

#### **4.5.2 Σενάριο (AIMSUN Scenario)**

Στο Σενάριο ορίζονται το σενάριο ζήτησης που θα εφαρμοστεί, ο τρόπος ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών και το αρχείο AIMSUN API που θα χρησιμοποιηθεί. Επίσης τα στατιστικά στοιχεία από τους φωρατές, θα συλλέγονται ανά 30 sec.

#### **4.5.3 Πείραμα (AIMSUN Experiment)**

Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης θα είναι 0.75 sec ενώ οι παράμετροι Ζώνη Απόστασης 1 και Ζώνη Απόστασης 2 (βλέπε Σχήμα 3-2) που είναι χαρακτηριστικά του αυτοκινητοδρόμου θα πάρουν την τιμή μηδέν σε όλα τα τμήματα του δικτύου. Οι παράμετροι αυτές, επηρεάζουν το Μοντέλο Αλλαγής Λωρίδας και με το μηδενισμό τους επιτυγχάνεται η διατήρηση της λωρίδας κάθε οχήματος κατά το μέγιστο δυνατό.

### **4.6 Έξοδοι προσομοίωσης**

Κατά τη διάρκεια προσομοίωσης του οδικού δικτύου εκτός από τη γραφική αναπαράσταση της κίνησης των οχημάτων και της λειτουργίας των φωτεινών σηματοδοτών λαμβάνονται και άλλες πληροφορίες όπως στατιστικές μετρήσεις από τους φωρατές. Συγκεκριμένα θα καταγράφεται ο αριθμός οχημάτων που περνάνε πάνω από τους φωρατές ανά 30 sec στην είσοδο ακριβώς της γέφυρας και στην έξοδο των οχημάτων από του φωτεινούς σηματοδότες.

Επίσης θα λαμβάνονται στατιστικές μετρήσεις που αφορούν το σύστημα. Το κριτήριο για την αξιολόγηση της απόδοσης της στρατηγικής ελέγχου θα αποτελέσει ο χρόνος καθυστέρησης (delay time) του συστήματος, που αφορά όλο το δίκτυο. Ο μέσος χρόνος καθυστέρησης ανά όχημα ανά χιλιόμετρο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του αναμενόμενου χρόνου διαδρομής (ο χρόνος που θα έπαιρνε για να διασχίσει το σύστημα σε ιδανικές συνθήκες) και του πραγματικού χρόνου διαδρομής. Υπολογίζεται ως μέσος όρος όλων των οχημάτων και ύστερα μετατρέπεται σε χρόνο ανά χιλιόμετρο δικτύου.

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία διερευνάται το πρόβλημα της συγχώνευσης λωρίδων ενός αυτοκινητοδρόμου σε περιοχή διοδίων όπου οι δεκαπέντε λωρίδες εξυπηρέτησης των διοδίων καταλήγουν σε πέντε λωρίδες κυκλοφορίας μίας γέφυρας. Όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση του δικτύου αυξάνει, δημιουργείται συμφόρηση με αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας της υποδομής. Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν όλα τα στοιχεία που συνθέτουν την εφαρμογή (σενάριο ζήτησης, έλεγχος κυκλοφορίας, παράμετροι προσομοίωσης, κ.α.) ενώ στο κεφάλαιο αυτό θα αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της τοπικής στρατηγικής ελέγχου αυτοκινητοδρόμων ALINEA με την πραγματοποίηση προσομοιώσεων στο μικροσκοπικό προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN.

Αρχικά θεωρείται ότι στο δίκτυο δεν υπάρχει έλεγχος κυκλοφορίας και έπειτα γίνεται σύγκριση με την περίπτωση εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου ALINEA πριν τη συγχώνευση των λωρίδων του αυτοκινητοδρόμου. Στη συνέχεια διερευνάται για την περίπτωση με έλεγχο κυκλοφορίας ποια είναι η κρίσιμη τιμή του αριθμού οχημάτων  $\hat{N}$  στον κόμβο (περιοχή συγχώνευσης) και κατά πόσο η τιμή της παραμέτρου κέρδους  $K_R$  της στρατηγικής ALINEA επηρεάζει την αποδοτικότητα της στρατηγικής ελέγχου.

Το δίκτυο στην αρχή της προσομοίωσης είναι άδειο. Το σενάριο ζήτησης που εφαρμόζεται δημιουργεί σταδιακά κυκλοφοριακή συμφόρηση στο δίκτυο, τη διατηρεί για κάποιο χρονικό διάστημα σε μία μέγιστη τιμή και έπειτα προκαλεί σταδιακή αποσυμφόρηση ακόμα και χωρίς την εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας. Το δίκτυο στο τέλος της προσομοίωσης είναι πάλι άδειο ώστε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να είναι συγκρίσιμα. Επίσης οι ουρές που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης δεν ξεπερνούν το μήκος του δικτύου ώστε να μην επηρεάζεται η διαδικασία παραγωγής και εισαγωγής οχημάτων στο δίκτυο και συνεπώς τα στατιστικά στοιχεία του δικτύου όπως ο μέσος χρόνος διαδρομής, ο μέσος χρόνος καθυστέρησης κ.α.

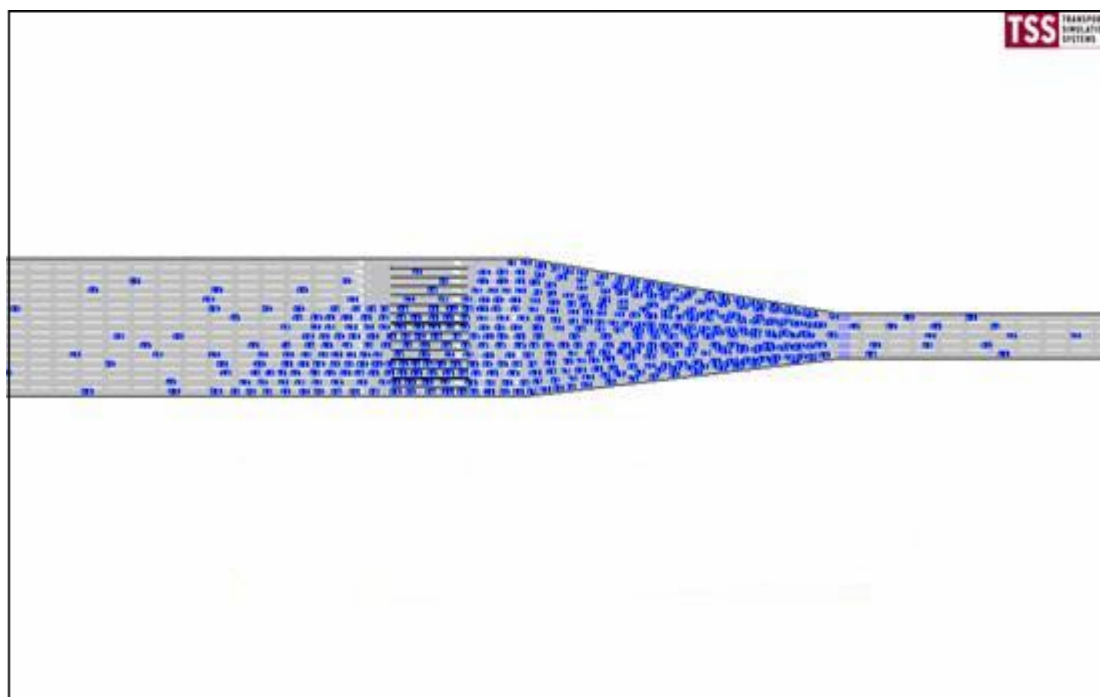
Ο χρόνος προσομοίωσης ορίζεται στα 40 λεπτά ενώ το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι 0.75 sec. Το κριτήριο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι ο μέσος χρόνος καθυστέρησης ανά όχημα ανά χιλιόμετρο δικτύου. Για την αποφυγή της στοχαστικότητας των αποτελεσμάτων πραγματοποιούνται κάθε φορά δέκα προσομοιώσεις, κάθε μία από τις οποίες χρησιμοποιεί διαφορετικό σπόρο στη γεννήτρια τυχαίων αριθμών και λαμβάνεται τελικά η μέση τιμή των μέσων χρόνων

καθυστερήσης. Ο αριθμός οχημάτων που εξυπηρετείται είναι περίπου ίδιος σε όλες τις προσομοιώσεις και είναι της τάξης των 4400 οχημάτων.

## 5.2 Περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας

Στην πρώτη περίπτωση που εξετάζεται δεν εφαρμόζεται έλεγχος κυκλοφορίας. Τα οχήματα εξέρχονται από τον έλεγχο διοδίων και κατευθύνονται προς την είσοδο της γέφυρας. Όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση είναι αυξημένη (ώρες αιχμής), τα οχήματα αναγκάζονται να επιβραδύνουν στην είσοδο της γέφυρας με αποτέλεσμα να δημιουργείται κυκλοφοριακή συμφόρηση και να μη γίνεται βέλτιστη χρήση της ικανότητας της γέφυρας.

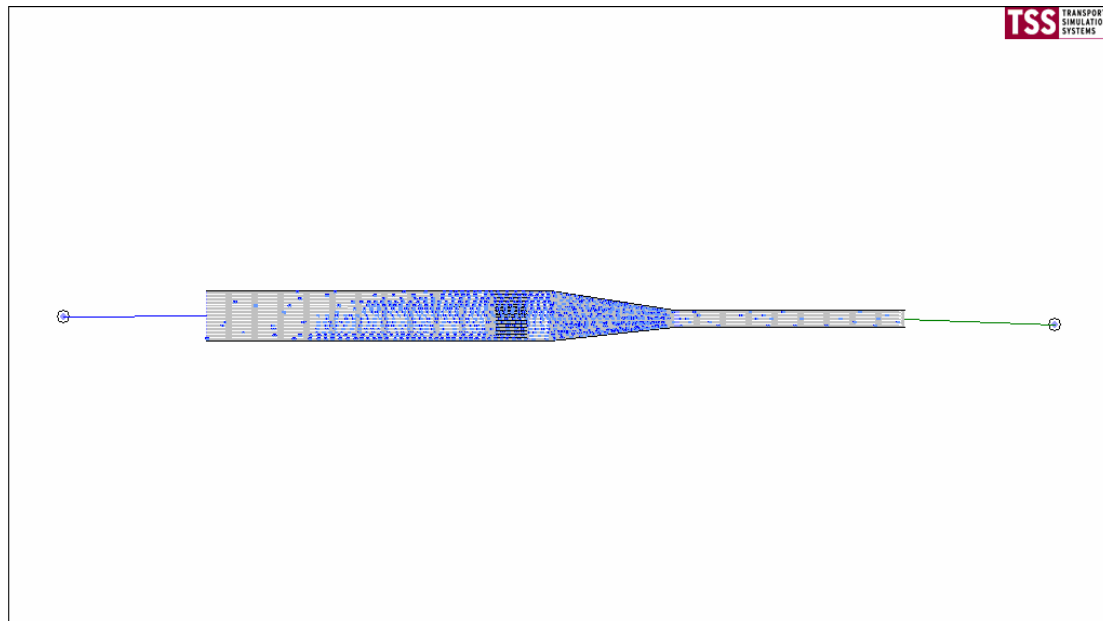
Στα ακόλουθα Σχήματα Σχήμα 5-1 και Σχήμα 5-2, αναπαριστάται το οδικό δίκτυο χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας σε περιβάλλον AIMSUN NG. Παρατηρείται ότι η κυκλοφοριακή συμφόρηση εμφανίζεται σταδιακά (Σχήμα 5-1) εξαιτίας της αυξανόμενης κυκλοφοριακής ζήτησης και της απουσίας ελέγχου κυκλοφορίας κατά την είσοδο των οχημάτων στον κόμβο. Όταν η ζήτηση του αυτοκινητοδρόμου λάβει τη μέγιστη τιμή, η κυκλοφοριακή συμφόρηση δημιουργεί ουρές οχημάτων που μπορεί να φτάσουν σε μήκος τα 400 μέτρα (Σχήμα 5-2).



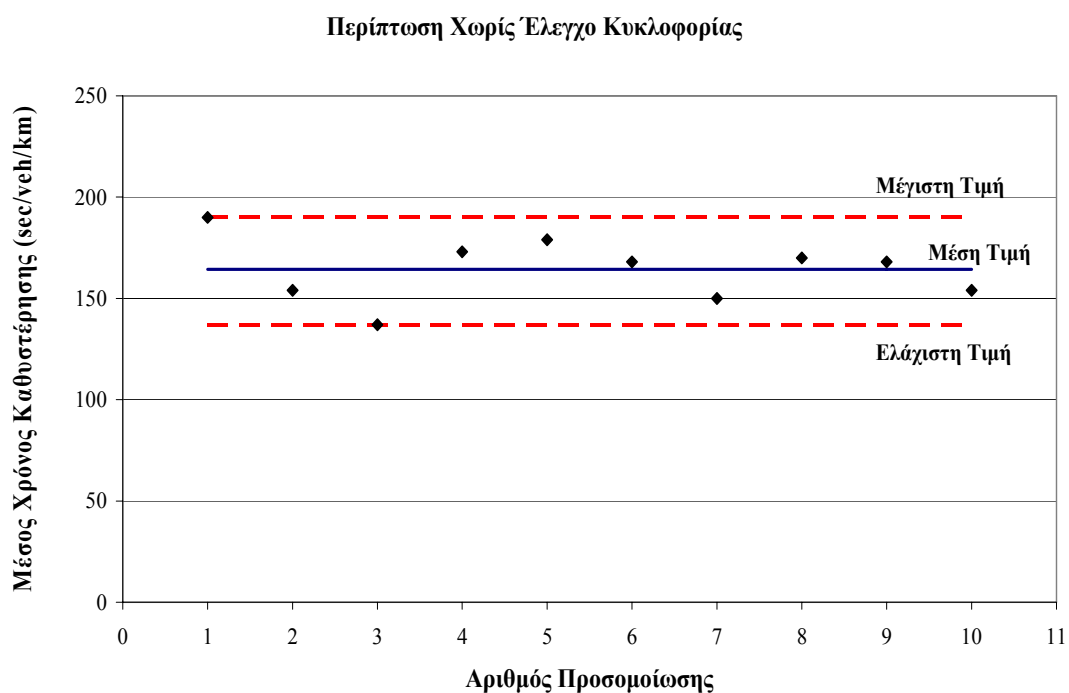
**Σχήμα 5-1:** Το δίκτυο χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας σε περιβάλλον AIMSUN NG (17ο λεπτό της προσομοίωσης).

Η περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας εξετάζεται πραγματοποιώντας δέκα προσομοιώσεις με διαφορετικό σπόρο η κάθε μία. Ο αριθμός της προσομοίωσης θα αντιστοιχίζεται με τον αριθμό του σπόρου που χρησιμοποιήθηκε στις γεννήτριες

τυχαίων αριθμών του προσομοιωτή. Για παράδειγμα ο πρώτος σπόρος αντιστοιχεί με την πρώτη προσομοίωση, ο δεύτερος σπόρος με τη δεύτερη προσομοίωση κ.ο.κ..



**Σχήμα 5-2:** Το δίκτυο χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας σε περιβάλλον AIMSUN NG (22ο λεπτό της προσομοίωσης).



**Σχήμα 5-3:** Διάγραμμα χρόνου καθυστέρησης για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.

Οι τιμές των σπόρων είναι τυχαίες. Κριτήριο για την αξιολόγηση της περίπτωσης αυτής, καθώς και για την περίπτωση με έλεγχο κυκλοφορίας, αποτελεί ο μέσος

χρόνος καθυστέρησης (delay time), που αποτελεί μία από τις εξόδους της προσομοίωσης. Στο Σχήμα 5-3 τα δέκα σημεία αναπαριστούν τις τιμές του χρόνου καθυστέρησης για κάθε προσομοίωση ενώ οι ευθείες αποτελούν τη μέση τιμή, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή των τιμών που ελήφθησαν από τις δέκα προσομοιώσεις.

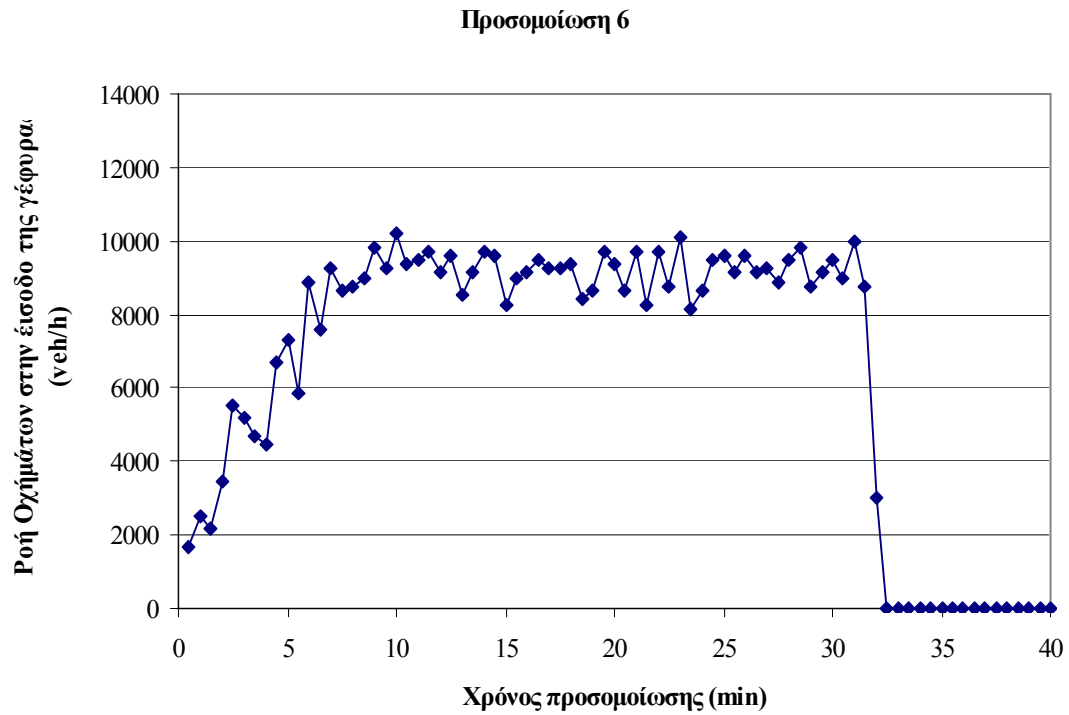
Τα αποτελέσματα της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας, μέση τιμή, τυπική απόκλιση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή περιέχονται στον Πίνακα 5-1. Οι τιμές του Πίνακα 5-1 θα συγκριθούν στην επόμενη παράγραφο με τις τιμές που αντιστοιχούν στην περίπτωση ελέγχου κυκλοφορίας πριν τη συγχώνευση των λωρίδων.

**Πίνακας 5-1:** Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.

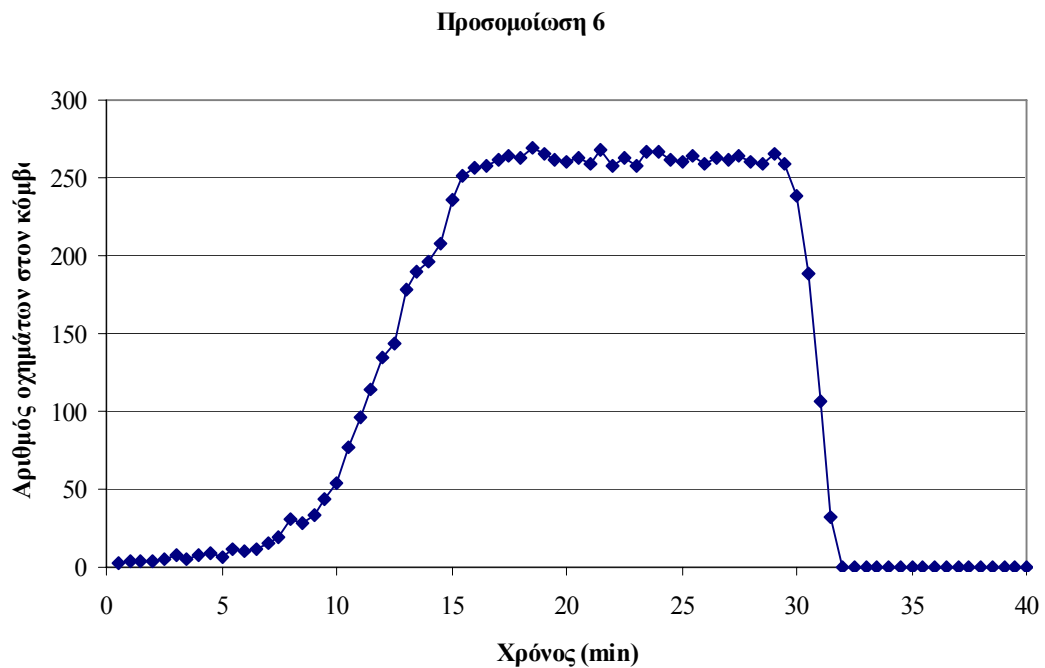
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	Τιμή Χρόνου Καθυστέρησης (sec/veh/km)
Μέση Τιμή	164.3
Τυπική Απόκλιση	15.54
Μέγιστη Τιμή	190.0
Ελάχιστη Τιμή	137.0

Για μία τυχαία προσομοίωση, για παράδειγμα την προσομοίωση με αριθμό έξι, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας (Σχήμα 5-4) και αριθμού οχημάτων μέσα στον κόμβο (Σχήμα 5-5) συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.

Το Σχήμα 5-4 δείχνει ότι με την έναρξη της προσομοίωσης η ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας ακολουθεί για τα πρώτα δέκα λεπτά το προκαθορισμένο σενάριο ζήτησης, στο 10<sup>ο</sup> λεπτό φτάνει στιγμιαία τα 10500veh/h, που είναι η πραγματική ικανότητα των πέντε λωρίδων αυτοκινητοδρόμου της γέφυρας, ενώ στη συνέχεια μέχρι και το 32<sup>ο</sup> λεπτό, που γίνεται αποσυμφόρηση, η ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας βρίσκεται κατά μέσο όρο γύρω στα 9500veh/h. Το παρακάτω διάγραμμα δημιουργεί την υποψία της μείωσης της ικανότητας της γέφυρας, λόγω της συμφόρησης που δημιουργείται, που θα επιβεβαιωθεί στη συνέχεια με την εφαρμογή του ελέγχου κυκλοφορίας. Το διάγραμμα ροής οχημάτων ως προς το χρόνο είναι παρόμοιο και για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις, στις οποίες η μείωση της ικανότητας της γέφυρας μετά το 10<sup>ο</sup> λεπτό της προσομοίωσης παρατηρείται περισσότερο ή λιγότερο έντονα. Αυτό οφείλεται κυρίως στη στοχαστικότητα του μοντέλου.



**Σχήμα 5-4:** Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας για την έκτη προσομοίωση.

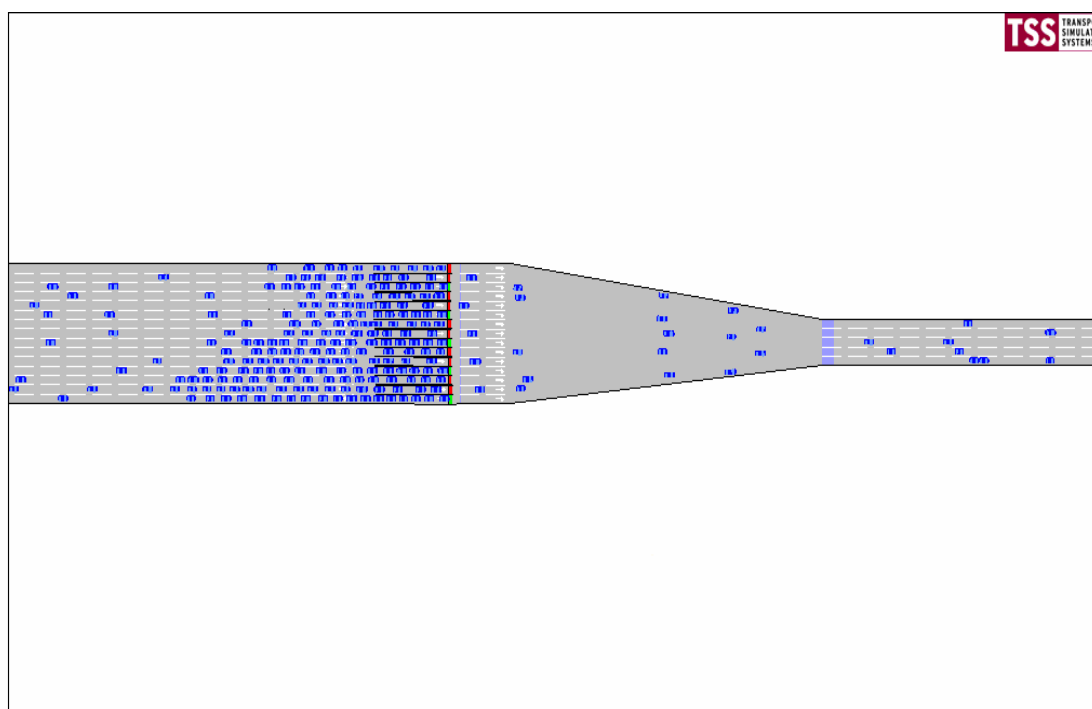


**Σχήμα 5-5:** Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας για την έκτη προσομοίωση.

Το Σχήμα 5-5 παρουσιάζει τον αριθμό οχημάτων μέσα στον κόμβο συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι χωρίς έλεγχο της κυκλοφορίας τα οχήματα συσσωρεύονται σταδιακά μέσα στον κόμβο μέχρι το μέγιστο αριθμό 260 οχημάτων. Η αποσυμφόρηση που ακολουθεί οφείλεται στη μηδενική ζήτηση. Στην περίπτωση με έλεγχο κυκλοφορίας μία τιμή αριθμού οχημάτων μέσα στον κόμβο θα αποτελέσει την κρίσιμη τιμή στην οποία θα στοχεύει η τοπική στρατηγική ελέγχου ALINEA.

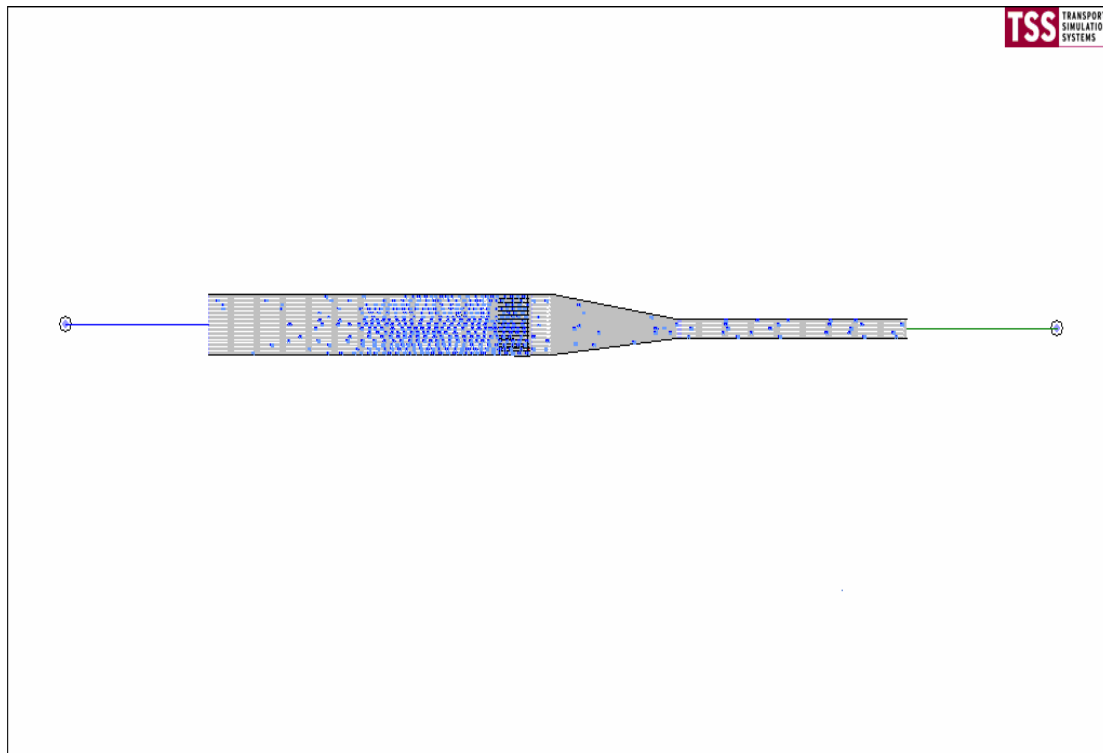
### 5.3 Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA

Η περίπτωση με έλεγχο κυκλοφορίας αναπαριστάται στο Σχήμα 5-6 και στο Σχήμα 5-7. Ο έλεγχος κυκλοφορίας πραγματοποιείται λίγο πριν την έναρξη της συγχώνευσης των λωρίδων. Στην αρχή της προσομοίωσης η ροή οχημάτων που θα εισέλθει στον κόμβο από το σημείο ελέγχου παίρνει τη μέγιστη τιμή ροής οχημάτων που μπορεί να επιτρέψει η στρατηγική ελέγχου. Καθώς η ροή οχημάτων του σεναρίου ζήτησης μεγαλώνει, αυξάνεται αντίστοιχα ο αριθμός οχημάτων μέσα στον κόμβο, αποκλίνοντας από την προκαθορισμένη κρίσιμη τιμή αριθμού οχημάτων στον κόμβο, με αποτέλεσμα η στρατηγική ALINEA να δίνει εντολή για μικρότερες ροές οχημάτων στο σημείο ελέγχου για την επόμενη χρονική περίοδο. Οι μικρότερες ροές αντιστοιχούν σε μεγαλύτερο κύκλο (χρόνος κόκκινου) των φωτεινών σηματοδοτών, ενώ ο χρόνος πρασίνου παραμένει σταθερός (4 sec), επιτρέποντας σε κάθε κύκλο να εξέρχονται δύο οχήματα ανά πράσινη ένδειξη.



**Σχήμα 5-6:** Το δίκτυο σε περιβάλλον AIMSUN NG με εφαρμογή της ALINEA (12ο λεπτό της προσομοίωσης).



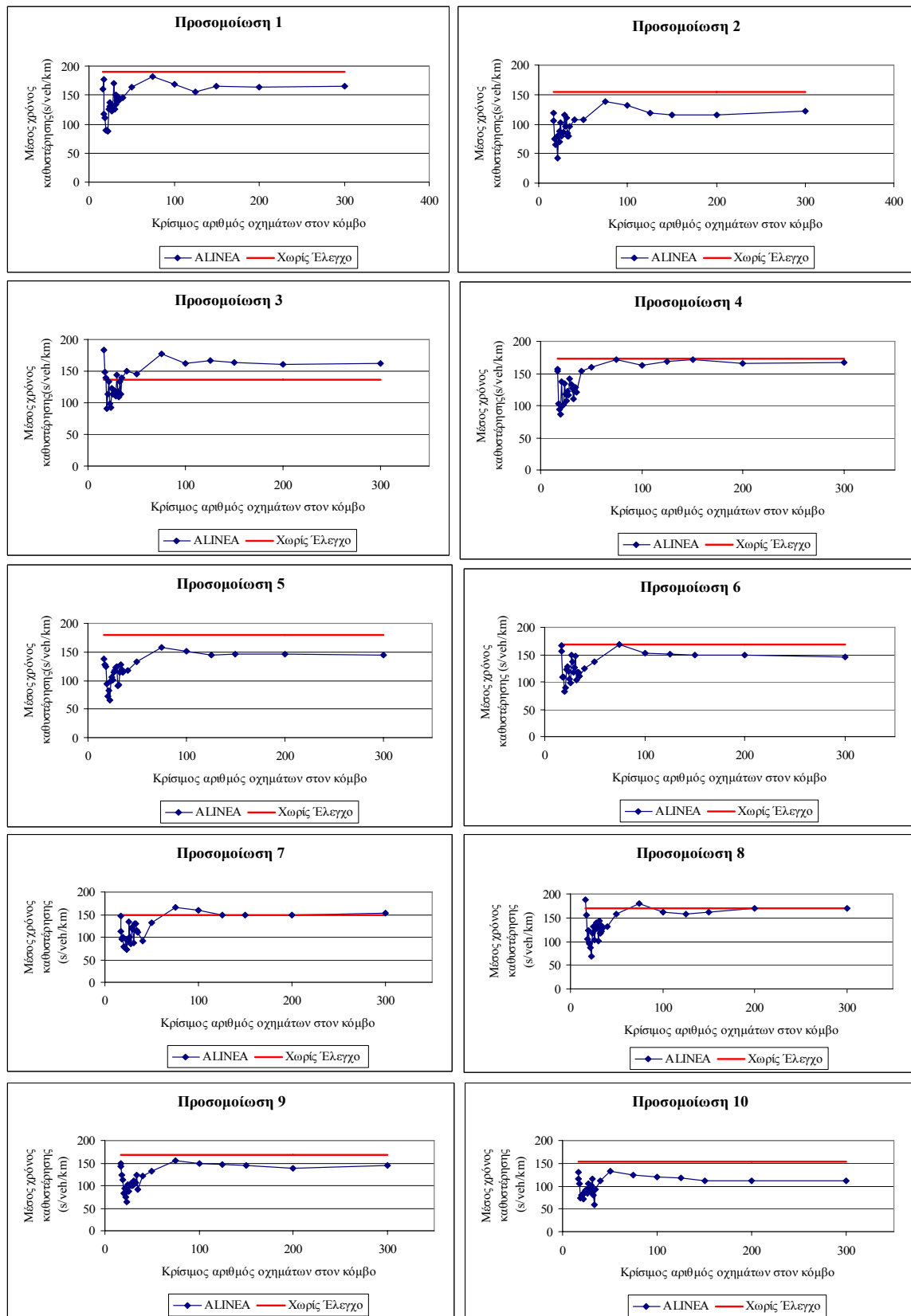


**Σχήμα 5-7:** Το δίκτυο σε περιβάλλον AIMSUN NG με εφαρμογή της ALINEA (18ο λεπτό της προσομοίωσης).

Υπενθυμίζεται ότι τα δεδομένα εισόδου της στρατηγικής ελέγχου ALINEA είναι  $r_{\max} = 13000$  veh/h,  $r_{\min} = 4500$  veh/h και  $K_R = 500$ . Στις επόμενες παραγράφους θα διερευνηθεί ποιος είναι ο κρίσιμος αριθμός οχημάτων  $\hat{N}$  μέσα στον κόμβο και θα εξεταστεί η επιρροή της μεταβολής της τιμής της παραμέτρου κέρδους  $K_R$  στον έλεγχο κυκλοφορίας. Η τελευταία παράγραφος του κεφαλαίου περιλαμβάνει τη σύνοψη των αποτελεσμάτων.

### 5.3.1 Η κρίσιμη τιμή του αριθμού οχημάτων στον κόμβο

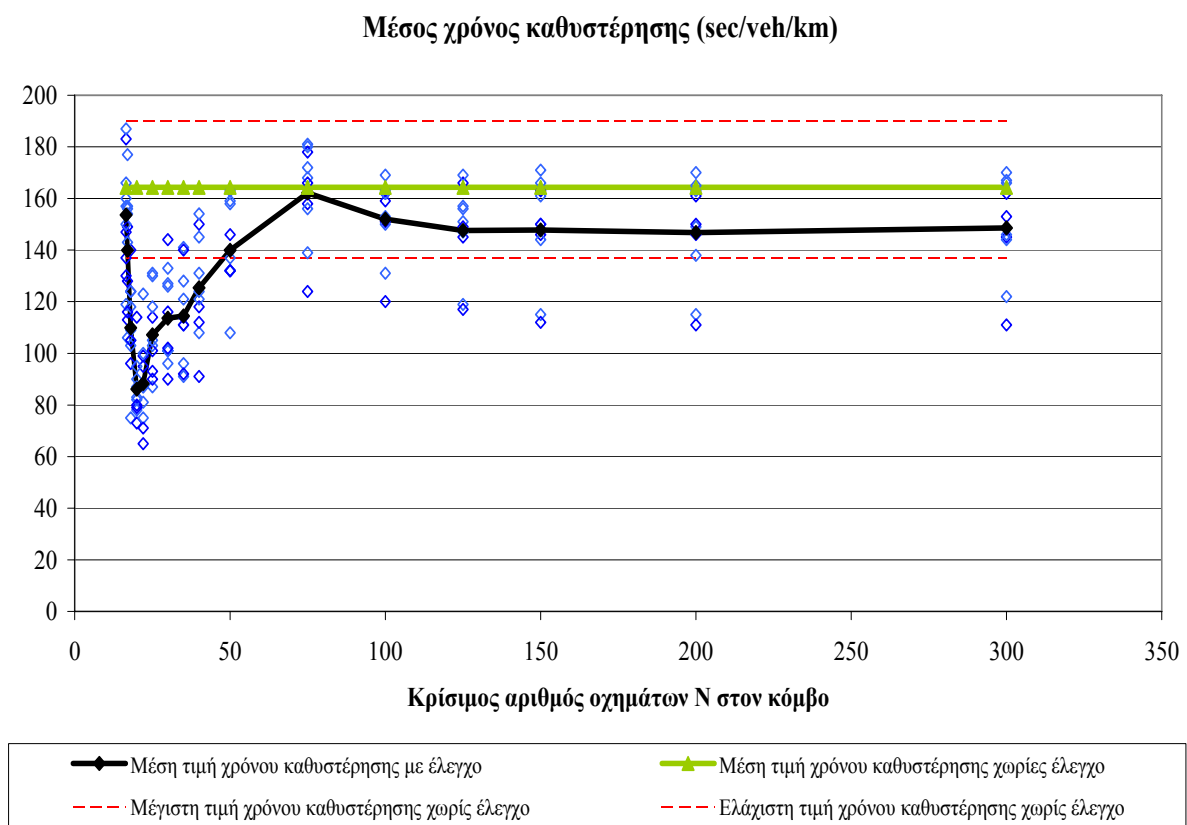
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τοπική στρατηγική ελέγχου ALINEA στοχεύει σε μία κρίσιμη τιμή του αριθμού οχημάτων  $\hat{N}$  μέσα στον κόμβο, για την οποία η ροή προς τη γέφυρα μεγιστοποιείται και επομένως ο μέσος χρόνος καθυστέρησης των οχημάτων ανά χιλιόμετρο δικτύου είναι ελάχιστος. Ο εντοπισμός της κρίσιμης τιμής του αριθμού οχημάτων γίνεται εφαρμόζοντας ως  $\hat{N}$  διάφορες τιμές αριθμού οχημάτων  $N$  στον κόμβο που ανήκουν στο διάστημα  $[17, 300]$ . Οι τιμές κοντά στο άνω όριο του διαστήματος ταυτίζονται με την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας. Για κάθε αριθμό  $N$  που εξετάζεται γίνονται δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις και κάθε φορά λαμβάνεται ο μέσος χρόνος καθυστέρησης από τις εξόδους της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα επόμενα Σχήματα. Στο Σχήμα 5-8, φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από τις δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις.



**Σχήμα 5-8:** Μέσος χρόνος καθυστέρησης για τις δέκα προσομοιώσεις με εφαρμογή της ALINEA.

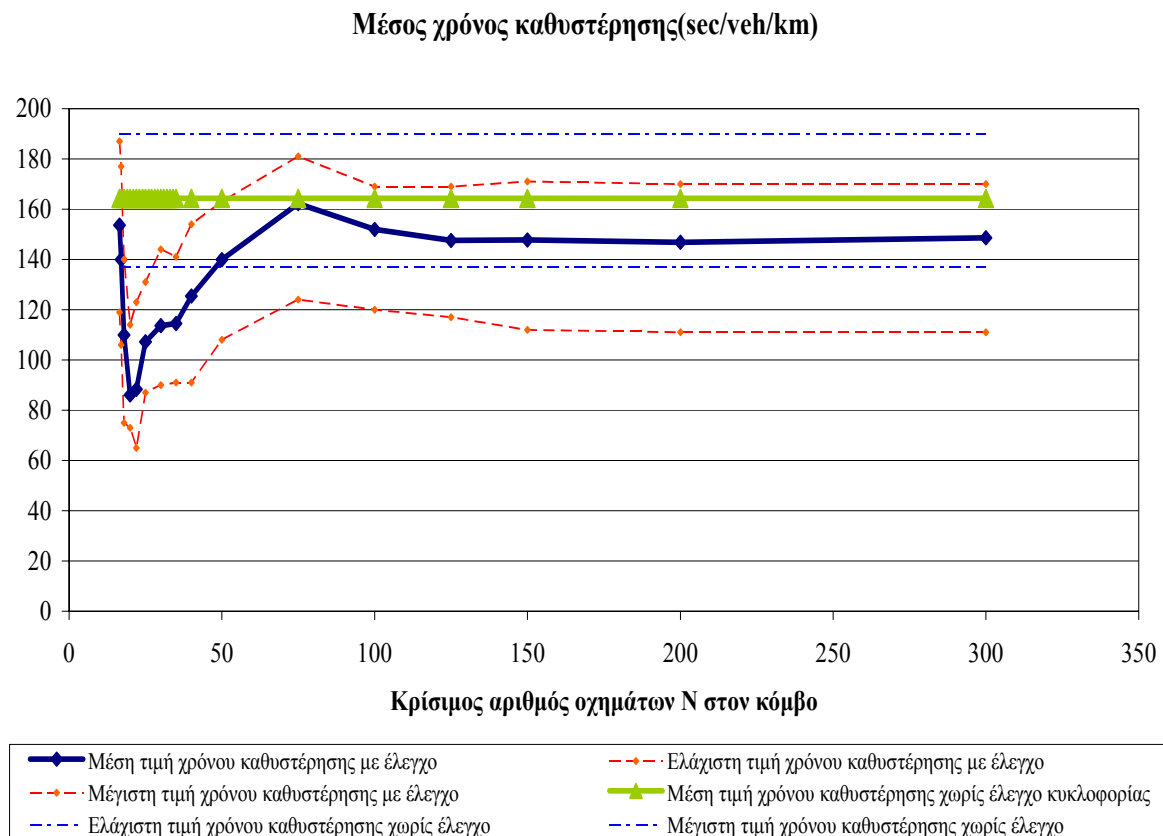
Τα διαγράμματα του Σχήματος 5-8 αναπαριστούν, για κάθε προσομοίωση, τις καμπύλες του μέσου χρόνου καθυστέρησης συναρτήσει του κρίσιμου αριθμού οχημάτων μέσα στον κόμβο. Επίσης περιλαμβάνουν την ευθεία του μέσου χρόνου καθυστέρησης της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας για την αντίστοιχη προσομοίωση. Παρατηρείται ότι σε όλες τις προσομοιώσεις η καμπύλη του μέσου χρόνου καθυστέρησης με έλεγχο κυκλοφορίας βρίσκεται πάντα κάτω από την ευθεία χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας εκτός από την τρίτη προσομοίωση και ελάχιστα σημεία της έβδομης και όγδοης προσομοίωσης.

Τα επόμενα Σχήματα, Σχήμα 5-9 και Σχήμα 5-10, συνοψίζουν τα παραπάνω αποτελέσματα. Το Σχήμα 5-9 αποτελεί το συνοπτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων του μέσου χρόνου καθυστέρησης συναρτήσει του κρίσιμου αριθμού οχημάτων στον κόμβο. Για κάθε επιθυμητό αριθμό οχημάτων  $N$ , στο διάστημα  $[17,300]$ , καταγράφονται με σημεία οι δέκα διαφορετικές τιμές του μέσου χρόνου καθυστέρησης που αντιστοιχούν στις δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν.



**Σχήμα 5-9:** Αποτελέσματα μέσου χρόνου καθυστέρησης με εφαρμογή της ALINEA για το διάστημα κρίσιμου αριθμού οχημάτων  $\hat{N}$   $[17,300]$ .

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή του χρόνου καθυστέρησης για κάθε επιθυμητό αριθμό οχημάτων και τελικά δημιουργείται η καμπύλη της μέσης τιμής του χρόνου καθυστέρησης συναρτήσει του κρίσιμου αριθμού οχημάτων μέσα στον κόμβο για την περίπτωση με έλεγχο κυκλοφορίας. Το Σχήμα 5-9 περιλαμβάνει επίσης τις ευθείες της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης τιμής του χρόνου καθυστέρησης για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας. Αντίστοιχα, το Σχήμα 5-10 περιέχει τις καμπύλες της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης τιμής του χρόνου καθυστέρησης ως προς τον κρίσιμο αριθμό οχημάτων, για τις περιπτώσεις με έλεγχο κυκλοφορίας και χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας στο ίδιο διάστημα [17,300].



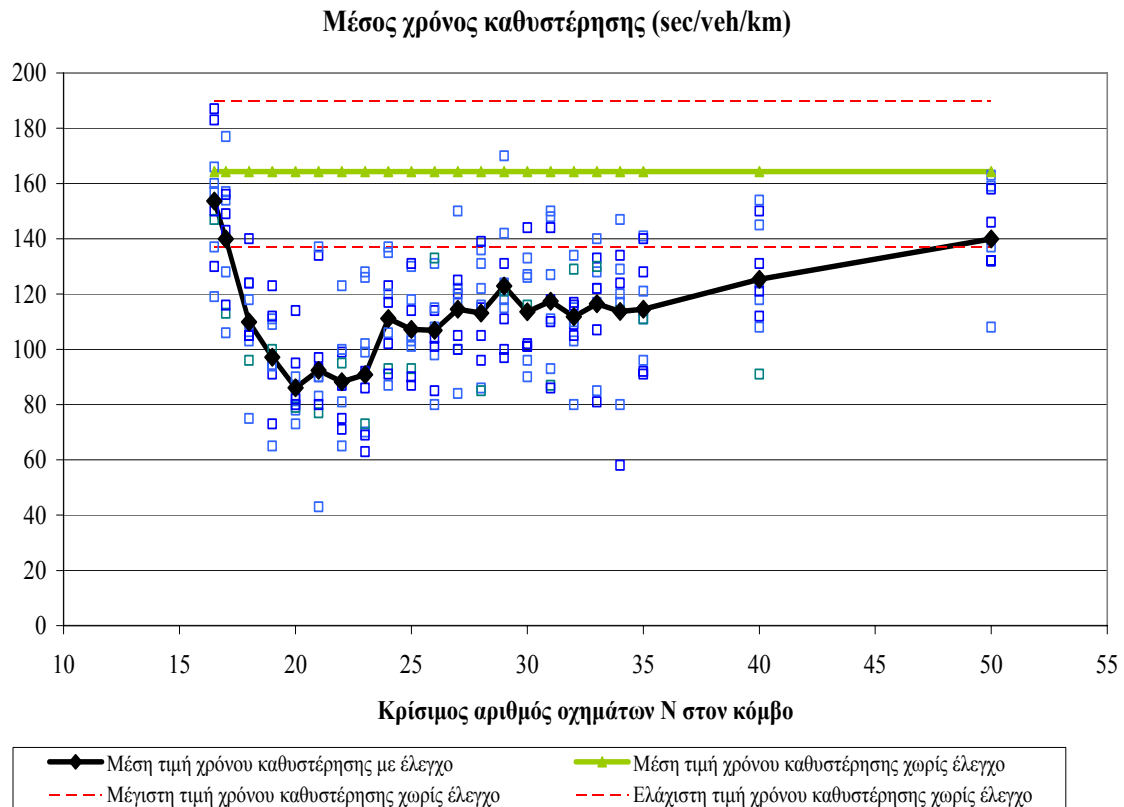
**Σχήμα 5-10:** Γενικά αποτελέσματα μέσου χρόνου καθυστέρησης με εφαρμογή της ALINEA για το διάστημα κρίσιμου αριθμού οχημάτων  $\hat{N}$  [17,300].

Τα Σχήματα 5-9 και 5-10 δείχνουν ότι η μέση τιμή του χρόνου καθυστέρησης στην περίπτωση με έλεγχο κυκλοφορίας του δικτύου είναι πάντα μικρότερη από ή ίση με τη μέση τιμή του χρόνου καθυστέρησης για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας. Επίσης παρατηρείται ότι η καμπύλη της μέγιστης τιμής του χρόνου καθυστέρησης για την περίπτωση με έλεγχο κυκλοφορίας βρίσκεται πάντα κάτω από την ευθεία της μέγιστης τιμής για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας σε όλο το διάστημα που εξετάζεται.

Πιο αναλυτικά, στο διάστημα τιμών  $\hat{N}$  [19,23] εντοπίζεται η περιοχή ολικού ελαχίστου της καμπύλης που δίνει τιμές μέσου χρόνου καθυστέρησης που κυμαίνονται στο διάστημα [86,97]. Στο διάστημα τιμών  $\hat{N}$  [18,50] λαμβάνονται γενικά χαμηλές τιμές του χρόνου καθυστέρησης, ενώ για τιμές επιθυμητού αριθμού οχημάτων στον κόμβο που δεν ανήκουν στο διάστημα αυτό ο μέσος χρόνος καθυστέρησης είναι αισθητά μεγαλύτερος και πλησιάζει την ευθεία του χρόνου καθυστέρησης της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.

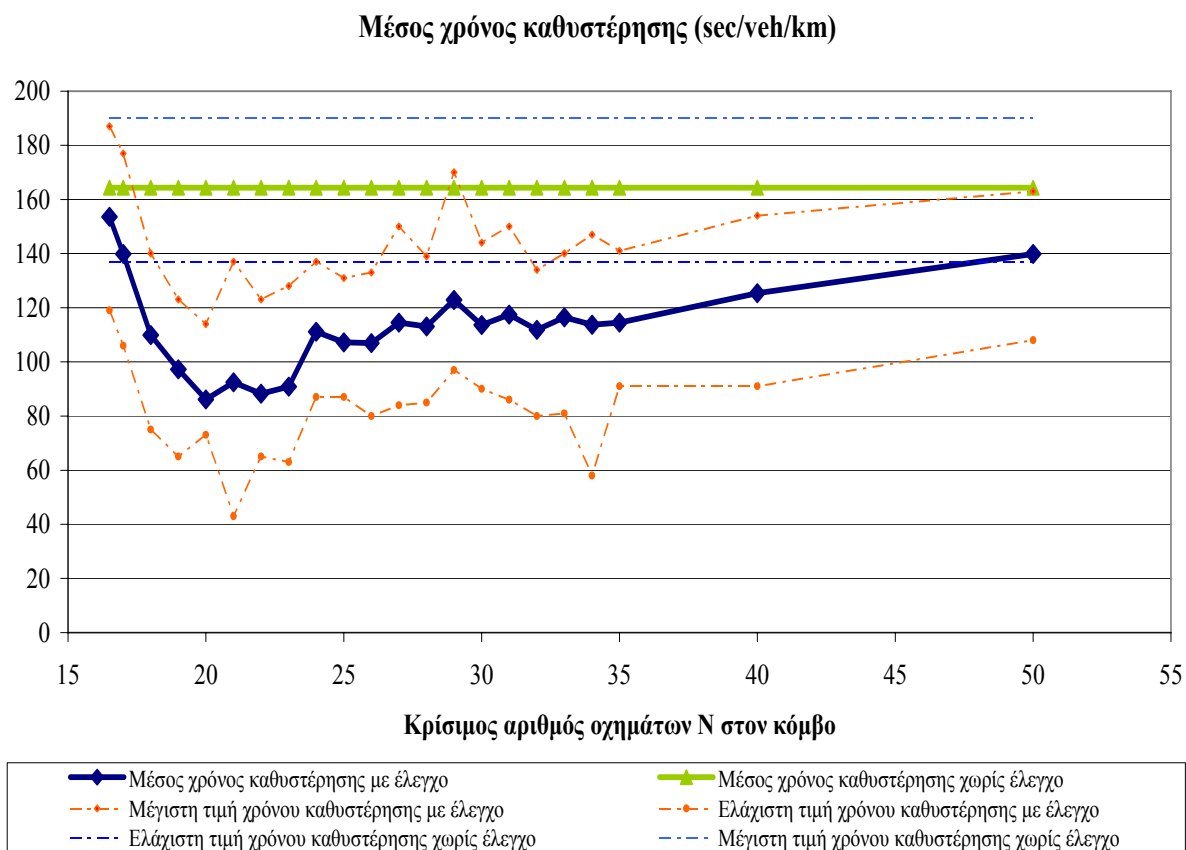
Παρατηρείται επίσης, ότι για αριθμό οχημάτων στον κόμβο  $N$  με τιμή 75, η καμπύλη της μέσης τιμής του μέσου χρόνου καθυστέρησης της περίπτωσης με έλεγχο κυκλοφορίας εφάπτεται της ευθείας της μέσης τιμής του μέσου χρόνου καθυστέρησης χωρίς έλεγχο της κυκλοφορίας. Στη συνέχεια στο διάστημα τιμών  $\hat{N}$  [75,300], ενώ θα αναμενόταν η καμπύλη του χρόνου καθυστέρησης με έλεγχο κυκλοφορίας να ταυτίζεται με την ευθεία χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας, προκύπτει ότι η περίπτωση με έλεγχο κυκλοφορίας δίνει χρόνο καθυστέρησης μικρότερο από την περίπτωση χωρίς έλεγχο λαμβάνοντας μία σχεδόν σταθερή τιμή χρόνου καθυστέρησης, 150 sec/veh/km, για όλο το υπόλοιπο διάστημα. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης των φωτεινών σηματοδοτών καθώς επηρεάζει το μοντέλο κίνησης των οχημάτων τα οποία αναγκάζονται να επιβραδύνουν με αποτέλεσμα να εξυπηρετούνται τα πρώτα οχήματα γρηγορότερα και να καθυστερεί η εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης στην είσοδο της γέφυρας. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται περισσότερο ή λιγότερο έντονα σε κάθε προσομοίωση με διαφορετικό σπόρο, λόγω στοχαστικότητας.

Στο Σχήμα 5-11 απεικονίζεται η καμπύλη της μέσης τιμής του χρόνου καθυστέρησης ως προς τον κρίσιμο αριθμό οχημάτων μέσα στον κόμβο για το διάστημα τιμών  $\hat{N}$  [17,50], όπου εντοπίζεται η περιοχή ελαχίστου. Το διάγραμμα περιλαμβάνει, για κάθε επιθυμητό αριθμό οχημάτων, όλες τις τιμές του χρόνου καθυστέρησης που ελήφθησαν από τις 10 προσομοιώσεις, οι οποίες αναπαρίστανται με σημεία. Ιδιαίτερα στο διάστημα τιμών  $\hat{N}$  [19,23], όπου βρίσκεται το ολικό ελάχιστο της καμπύλης, παρατηρείται ότι η διασπορά των τιμών είναι πολύ μικρή σε σχέση με τιμές που είναι απομακρυσμένες από την περιοχή ολικού ελαχίστου της καμπύλης. Το Σχήμα 5-11 περιλαμβάνει επίσης τις καμπύλες της μέσης, της μέγιστης καθώς και της ελάχιστης τιμής του χρόνου καθυστέρησης για την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.



**Σχήμα 5-11:** Αποτελέσματα μέσου χρόνου καθυστέρησης με εφαρμογή της ALINEA για το διάστημα κρίσιμου αριθμού οχημάτων  $\hat{N}$  [17,50].

Το Σχήμα 5-12 αντίστοιχα, περιλαμβάνει τις καμπύλες μέσης, μέγιστης και ελάχιστης τιμής του μέσου χρόνου καθυστέρησης ανά όχημα ανά χιλιόμετρο δικτύου ως προς τον κρίσιμο αριθμό οχημάτων μέσα στον κόμβο για το ίδιο διάστημα τιμών  $\hat{N}$  [17,50]. Στο διάγραμμα περιλαμβάνονται και οι δύο περιπτώσεις, χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας και με έλεγχο κυκλοφορίας. Παρατηρείται ότι στο διάστημα αυτό, η καμπύλη της μέσης τιμής της περίπτωσης με έλεγχο βρίσκεται όχι μόνο κάτω από την ευθεία της μέσης τιμής αλλά και κάτω από την ευθεία της ελάχιστης τιμής του χρόνου καθυστέρησης της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας. Επίσης η καμπύλη μέγιστης τιμής της περίπτωσης με έλεγχο βρίσκεται συνεχώς κάτω από την ευθεία της μέσης τιμής του χρόνου καθυστέρησης για την περίπτωση χωρίς έλεγχο, εκτός από μία τιμή, για το διάστημα τιμών  $\hat{N}$  [17,50]. Τέλος, στο διάστημα τιμών [19,26] παρατηρείται ότι η καμπύλη μέγιστης τιμής του χρόνου καθυστέρησης με έλεγχο κυκλοφορίας δεν ξεπερνάει τις τιμές της ευθείας ελάχιστης τιμής της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας.



**Σχήμα 5-12:** Γενικά αποτελέσματα μέσου χρόνου καθυστέρησης με εφαρμογή της ALINEA για το διάστημα κρίσιμου αριθμού οχημάτων  $\hat{N}$  [17,50].

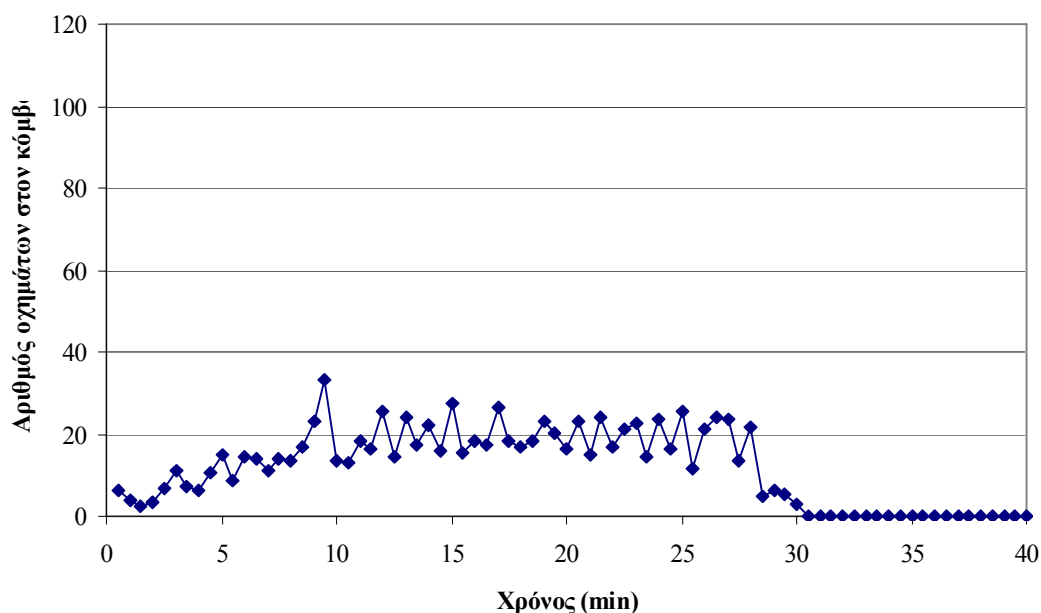
Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η κρίσιμη τιμή αριθμού οχημάτων στον κόμβο, που θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί για το συγκεκριμένο δίκτυο, για τις προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων της στρατηγικής ελέγχου ALINEA και για τα λοιπά δεδομένα της προσομοίωσης, βρίσκεται στο διάστημα τιμών [19,23]. Η κρίσιμη τιμή αριθμού οχημάτων στον κόμβο οδηγεί σε μέγιστη ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας, ίση με την ικανότητα της γέφυρας, και άρα σε μικρότερους χρόνους καθυστέρησης των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο. Παρατηρείται επίσης ότι για τιμές επιθυμητού αριθμού οχημάτων στον κόμβο μικρότερες από την τιμή 18 ή μεγαλύτερες από την τιμή 25 ο μέσος χρόνος καθυστέρησης αυξάνεται συνεχώς. Στην πρώτη περίπτωση αυτό συμβαίνει διότι η ροή οχημάτων που εξέρχεται από τον έλεγχο κυκλοφορίας είναι μικρότερη από την ικανότητα της γέφυρας με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη καθυστέρηση των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο. Στη δεύτερη περίπτωση η αύξηση του μέσου χρόνου καθυστέρησης οφείλεται στη μικρο-συμφόρηση που δημιουργείται στην περιοχή συγχώνευσης, που οδηγεί και πάλι στη μείωση της ροής οχημάτων προς τη γέφυρα κάτω από την ικανότητά της.

Στα επόμενα Σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα αριθμού οχημάτων στον κόμβο ως προς το χρόνο προσομοίωσης για διαφορετικές επιθυμητές τιμές αριθμού

οχημάτων στον κόμβο που ανήκουν στο διάστημα [17,300], ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος λειτουργίας της στρατηγικής ελέγχου για κάθε περίπτωση. Επίσης παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για να διαπιστωθεί εάν ο έλεγχος κυκλοφορίας μετά την έξοδο των οχημάτων από τον έλεγχο διοδίων έχει πράγματι ως αποτέλεσμα την καλύτερη αξιοποίηση της ικανότητας της υποδομής. Τα διαγράμματα αντιστοιχούν σε τυχαίες προσομοιώσεις.

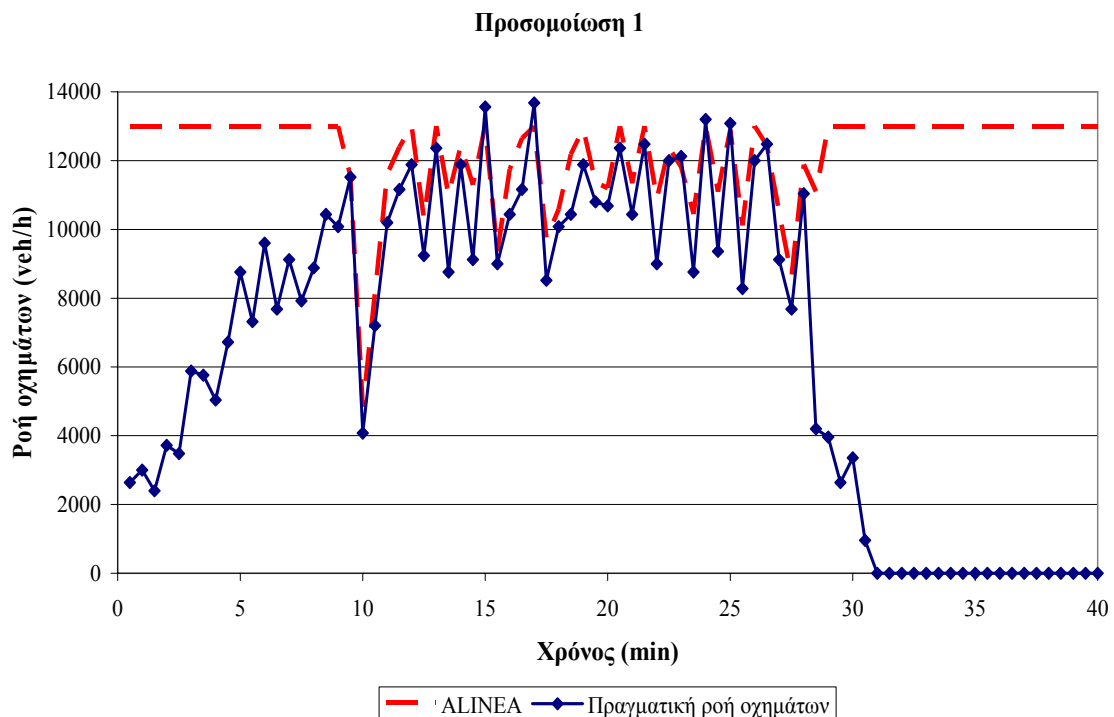
Στο Σχήμα 5-13 παρουσιάζεται για την πρώτη προσομοίωση το διάγραμμα του αριθμού οχημάτων στον κόμβο για επιθυμητή τιμή  $\hat{N} = 20$  και παράμετρο κέρδους της ALINEA  $K_R = 500$ . Στο Σχήμα 5-14 αναπαρίσταται η ροή οχημάτων που δίνει ως εντολή η ALINEA, κάθε χρονική περίοδο, να εισέλθει στο κόμβο και η πραγματική ροή που διέρχεται τελικά από τους φωτεινούς σηματοδότες για τις ίδιες παραμέτρους προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι στα δέκα πρώτα λεπτά της προσομοίωσης ο αριθμός οχημάτων αυξάνεται σταδιακά καθώς μεγαλώνει η κυκλοφοριακή ζήτηση στο δίκτυο (Σχήμα 5-13). Στο 10<sup>ο</sup> λεπτό η ζήτηση γίνεται μέγιστη (Σχήμα 4-2) και ο αριθμός οχημάτων στον κόμβο αυξάνεται απότομα. Η στρατηγική ελέγχου, που μέχρι τώρα έδινε τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ροής (13000veh/h), τίθεται ουσιαστικά σε λειτουργία για πρώτη φορά δίνοντας εντολή για μικρότερες ροές οχημάτων (Σχήμα 5-14). Στη συνέχεια της προσομοίωσης παρατηρείται ότι η ALINEA διατηρεί τον πραγματικό αριθμό οχημάτων στον κόμβο κοντά στην επιθυμητή τιμή με μικρές μόνο αποκλίσεις.

Προσομοίωση 1



**Σχήμα 5-13:** Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την πρώτη προσομοίωση για την πρώτη προσομοίωση και  $\hat{N} = 20$ ,  $K_R = 500$ .

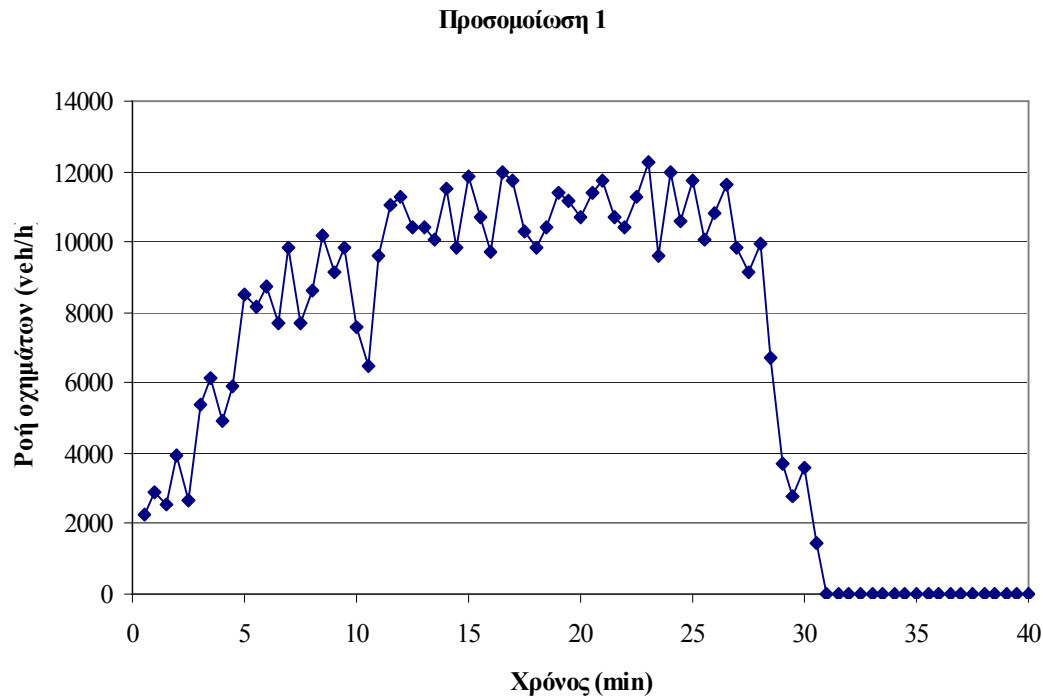




**Σχήμα 5-14:** Τιμές ροής οχημάτων της ALINEA κάθε χρονική περίοδο και πραγματική ροή οχημάτων που εξέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες για την πρώτη προσομοίωση και  $\hat{N} = 20$ ,  $K_R = 500$ .

Το Σχήμα 5-15 δείχνει, για τις τιμές των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω και για τον ίδιο αριθμό προσομοίωσης, ότι η ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας βρίσκεται κατά μέσο όρο στα 11000veh/h (για την περίοδο αιχμής της κυκλοφοριακής ζήτησης), ενώ στιγμιαία αγγίζει τα 12000veh/h. Η ροή οχημάτων είναι αναμενόμενα υψηλή καθώς η επιθυμητή τιμή  $\hat{N}$  που εφαρμόστηκε ανήκει στην περιοχή ολικού ελαχίστου της καμπύλης του μέσου χρόνου καθυστέρησης (Σχήμα 5-11). Η υπερπήδηση (overshooting) του ελεγκτή στο 10<sup>ο</sup> λεπτό της προσομοίωσης προκαλεί απώλεια σε ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας αλλά είναι αναπόφευκτη καθώς αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό όλων των ελεγκτών τύπου I.

Παρατηρείται επίσης ότι η ροή οχημάτων που εξέρχεται τελικά από τους φωτεινούς σηματοδότες (Σχήμα 5-14) είναι πάντα μικρότερη ή ίση από τη ροή οχημάτων που ορίζει η ALINEA σε κάθε περίοδο ελέγχου. Αυτό όμως δεν επηρεάζει τη λειτουργία της στρατηγικής καθώς αυτή στηρίζεται σε ανατροφοδότηση και άρα κάθε σφάλμα στη ροή εισόδου λαμβάνεται υπόψη στην επόμενη περίοδο ελέγχου. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται για διαφορετικούς αριθμούς προσομοίωσης.

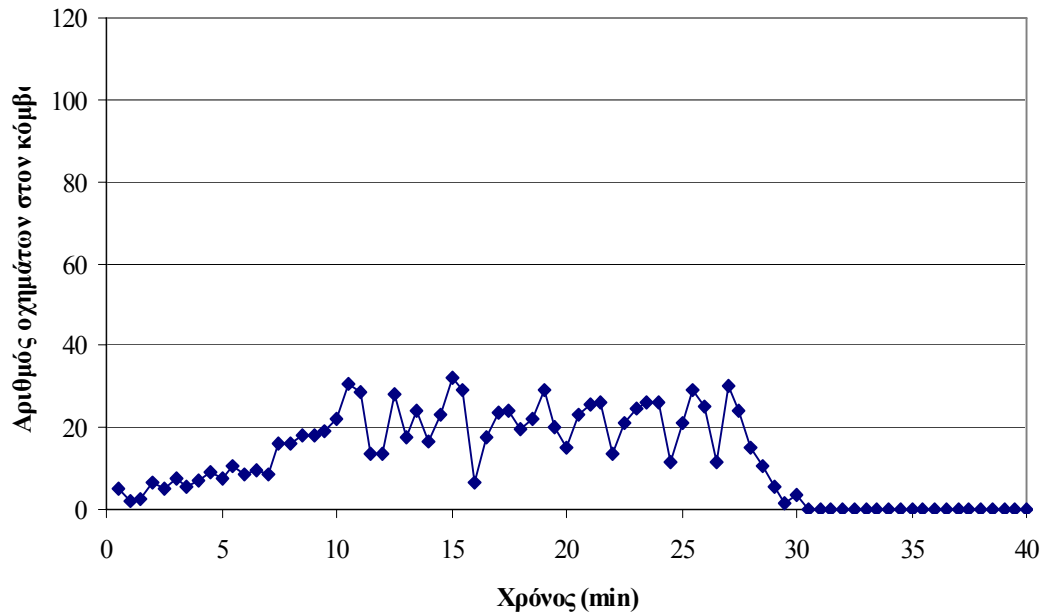


**Σχήμα 5-15:** Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την πρώτη προσομοίωση και  $\hat{N} = 20$ ,  $K_R = 500$ .

Τα επόμενα Σχήματα, 5-16 και 5-17, δίνουν για την δεύτερη προσομοίωση, τον αριθμό οχημάτων στον κόμβο και τη ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για επιθυμητή τιμή  $\hat{N} = 22$  και παράμετρο κέρδους  $K_R = 500$ . Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής διατηρεί τον πραγματικό αριθμό οχημάτων στον κόμβο κοντά στην επιθυμητή τιμή και η ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα καθώς η επιθυμητή τιμή  $\hat{N} = 22$  ανήκει, και πάλι, στην περιοχή ολικού ελαχίστου της καμπύλης του μέσου χρόνου καθυστέρησης (Σχήμα 5-11).

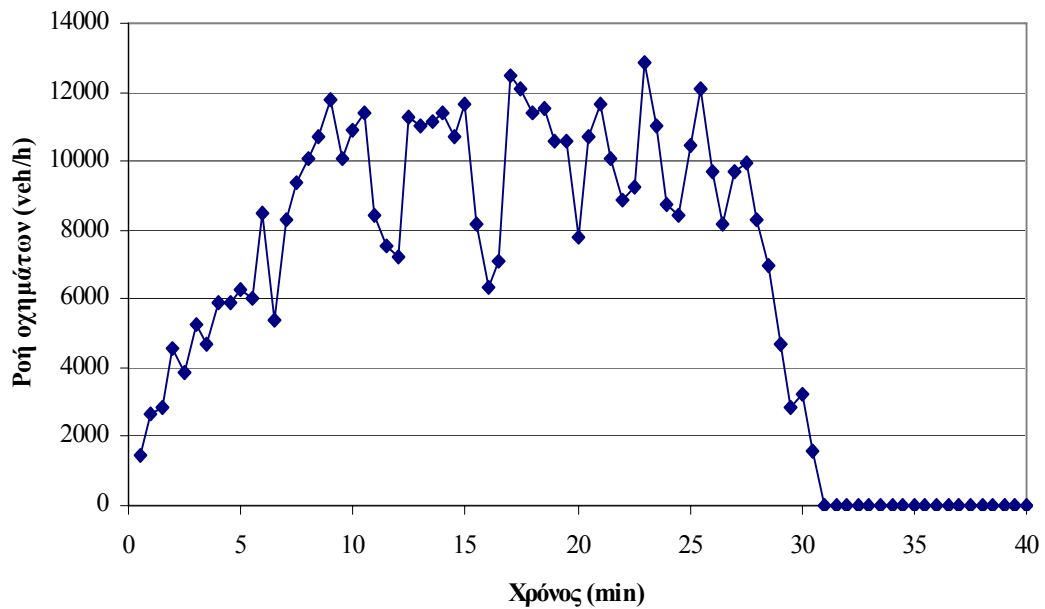
Στοχαστικά γεγονότα που συμβαίνουν στο δίκτυο κατά της διάρκεια της προσομοίωσης (για παράδειγμα στο 15<sup>ο</sup> και 19<sup>ο</sup> λεπτό), οδηγούν σε μικρο-συμφορήσεις αναγκάζοντας την ALINEA να αντιδράσει απότομα. Στη συνέχεια η ALINEA επαναφέρει τον αριθμό οχημάτων στον κόμβο στην καθορισμένη επιθυμητή τιμή, όμως η αντίδραση της στρατηγικής ελέγχου έχει προκαλέσει στιγμιαίες απότομες μειώσεις της ροής οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας, στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Τα φαινόμενα των μικρο-συμφορήσεων οφείλονται σε μοντέλα κίνησης οχημάτων και παραμέτρους προσομοίωσης που χρησιμοποιεί ο προσομοιωτής AIMSUN καθώς και στο συνδυασμό των τιμών των παραμέτρων  $\hat{N}$ ,  $K_R$  της στρατηγικής ελέγχου

### Προσομοίωση 2



**Σχήμα 5-16:** Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για τη δεύτερη προσομοίωση για τη δεύτερη προσομοίωση και  $\hat{N} = 22$ ,  $K_R = 500$ .

### Προσομοίωση 2

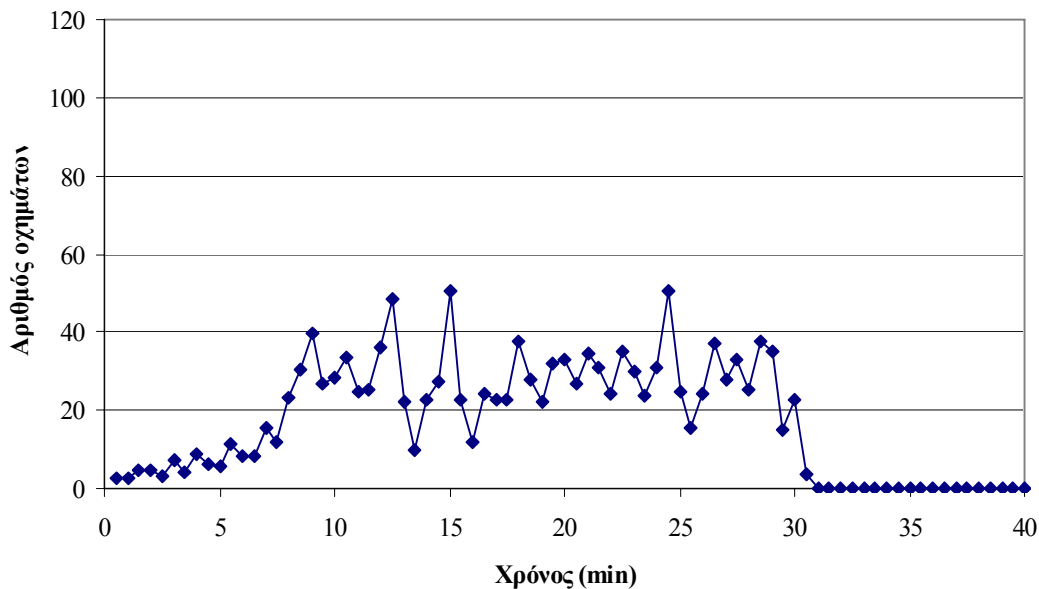


**Σχήμα 5-17:** Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για τη δεύτερη προσομοίωση και  $\hat{N} = 22$ ,  $K_R = 500$ .

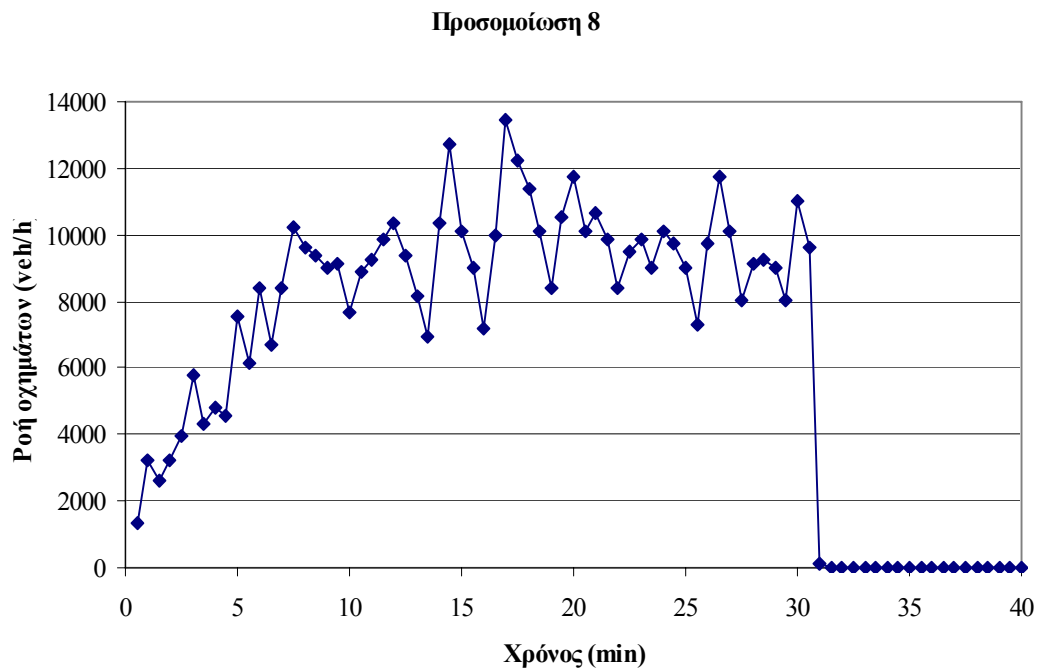
Στο Σχήμα 5-18 και στο Σχήμα 5-19, για την όγδοη προσομοίωση και παραμέτρους  $\hat{N} = 30$ ,  $K_R = 500$ , παρατηρείται ότι ο αριθμός οχημάτων στον κόμβο διατηρείται κατά μέσο όρο στην τιμή 30, ενώ η ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας λαμβάνει υψηλές τιμές (μέχρι και 13500 veh/h). Υπάρχουν όμως, χρονικές στιγμές όπου η ροή οχημάτων μειώνεται απότομα λόγω των μικρο-συμφορήσεων που δημιουργούνται.

Για την προσομοίωση με αριθμό 7 και παραμέτρους της ALINEA  $\hat{N} = 75$ ,  $K_R = 500$ , Σχήμα 5-20 και Σχήμα 5-21, διαπιστώνεται ότι ο ελεγκτής διατηρεί κατά μέσο όρο την επιθυμητή τιμή 75 αν και με μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις προηγούμενες επιθυμητές τιμές που εξετάστηκαν. Υπενθυμίζεται ότι, στο διάγραμμα του μέσου χρόνου καθυστέρησης ως προς τον κρίσιμο αριθμό οχημάτων στον κόμβο (Σχήμα 5-9), για επιθυμητό αριθμό οχημάτων ίσο με 75 οι καμπύλες της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας και της περίπτωσης εφαρμογής της ALINEA εφάπτονται και στη συνέχεια ακολουθούν μία σχεδόν παράλληλη πορεία. Αυτό σημαίνει ότι από την τιμή αυτή και για μεγαλύτερες τιμές του κρίσιμου αριθμού οχημάτων αναμένεται ότι οι περιπτώσεις με έλεγχο και χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας θα δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Πράγματι, το διάγραμμα ροής οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας, Σχήμα 5-21, δίνει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης παρόμοια καμπύλη ροής οχημάτων με αυτή της περίπτωσης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας (Σχήμα 5-5).

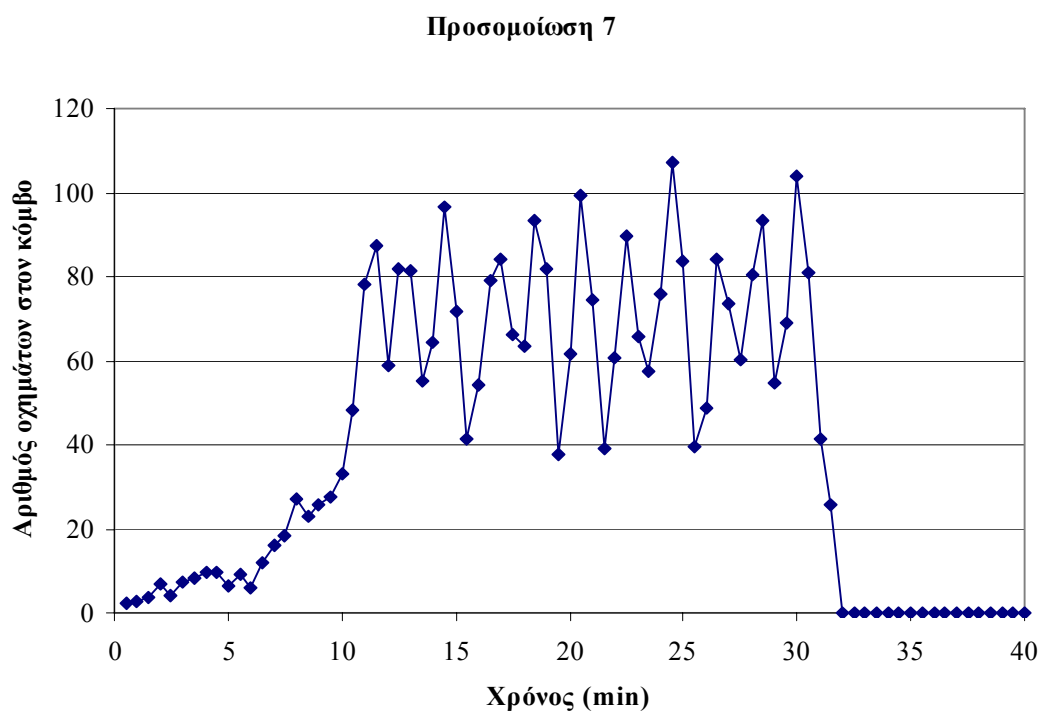
#### Προσομοίωση 8



**Σχήμα 5-18:** Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την όγδοη προσομοίωση για τη δεύτερη προσομοίωση και  $\hat{N} = 30$ ,  $K_R = 500$ .

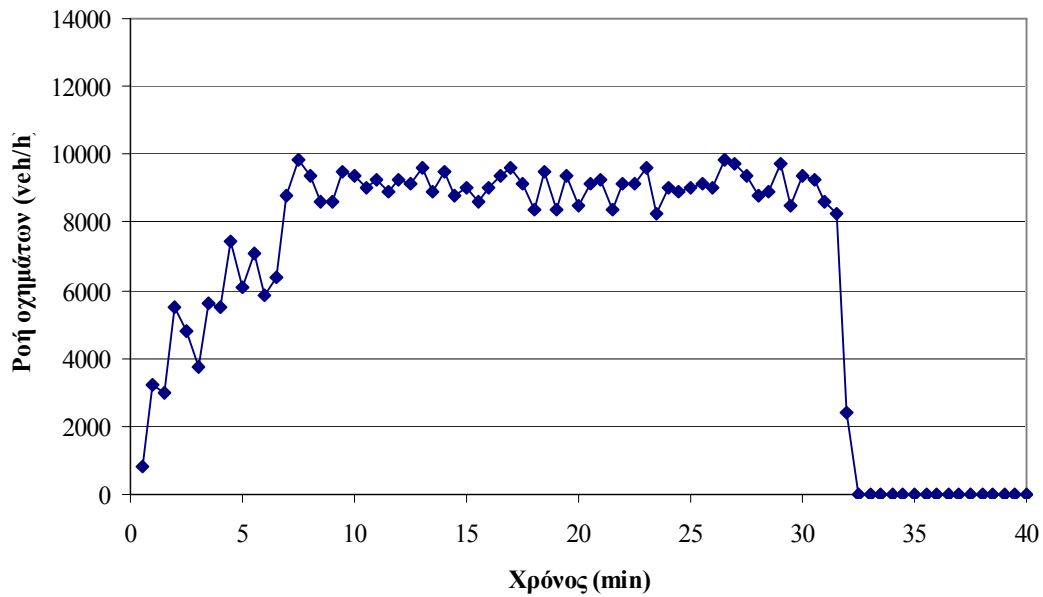


**Σχήμα 5-19:** Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την όγδοη προσομοίωση και  $\hat{N} = 30$   $K_R = 500$ .



**Σχήμα 5-20:** Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την έβδομη προσομοίωση για τη έβδομη προσομοίωση και  $\hat{N} = 75$ ,  $K_R = 500$ .

### Προσομοίωση 7



**Σχήμα 5-21:** Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την έβδομη προσομοίωση και  $\hat{N} = 75$ ,  $K_R = 500$ .

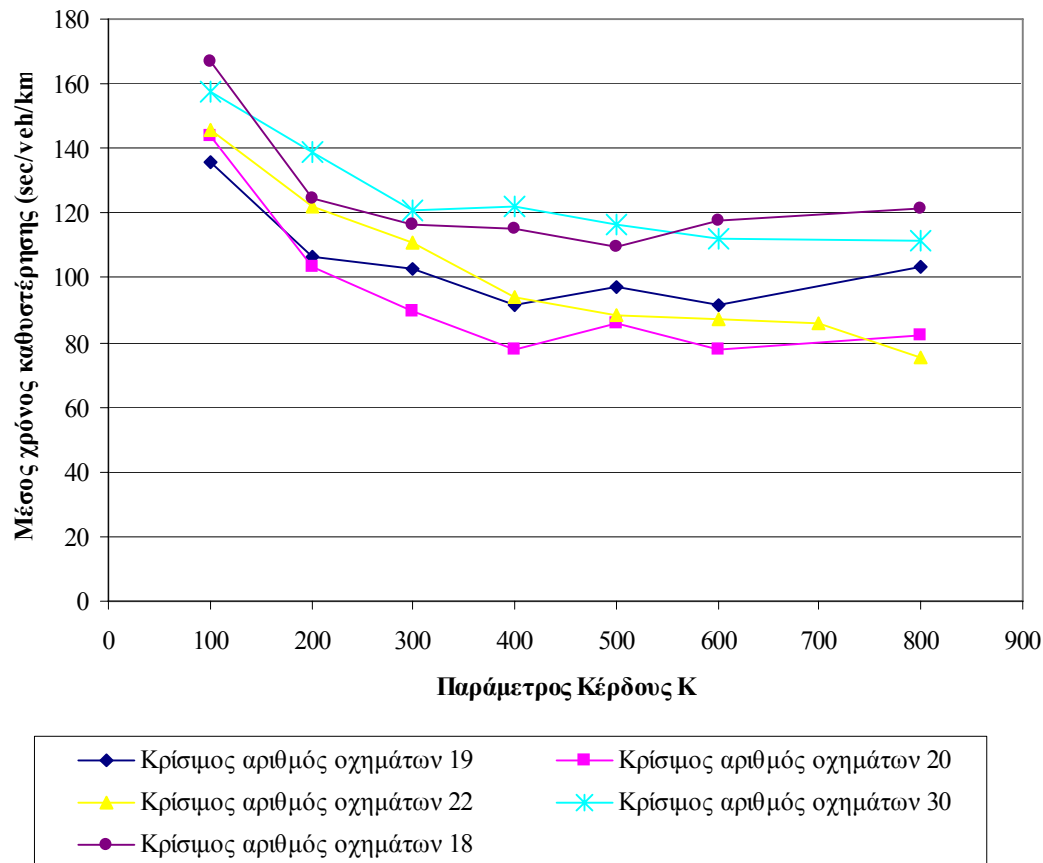
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω διαγράμματα είναι τα ακόλουθα:

- Η στρατηγική ALINEA είναι μία ισχυρή στρατηγική ελέγχου καθώς καταφέρνει να διατηρήσει την πραγματική τιμή του αριθμού οχημάτων στον κόμβο κοντά στην επιθυμητή τιμή που έχει προκαθοριστεί, οποιαδήποτε και αν είναι η τιμή της.
- Όσο η επιθυμητή τιμή που καθορίζεται, απομακρύνεται από την περιοχή ολικού ελαχίστου της καμπύλης του μέσου χρόνου καθυστέρησης (Σχήμα 5-9), υπάρχει κόστος σε ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας.
- Ο έλεγχος της κυκλοφορίας για το διάστημα τιμών κρίσιμου αριθμού οχημάτων  $\hat{N}$  στον κόμβο [19,23] δίνει μεγαλύτερες ροές οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας, οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση της υποδομής και έχει ως αποτέλεσμα μικρότερους χρόνους καθυστέρησης των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο.

#### 5.3.2 Βέλτιστη τιμή της παραμέτρου κέρδους $K_R$

Στην προηγούμενη παράγραφο διαπιστώθηκε ότι για τιμή της παραμέτρου κέρδους  $K_R=500$ , υπάρχει μία περιοχή της καμπύλης του μέσου χρόνου καθυστέρησης συναρτήσει του κρίσιμου αριθμού οχημάτων (Σχήμα 5-9), για την οποία ο μέσος

χρόνος καθυστέρησης των οχημάτων είναι αρκετά μικρός. Στην παράγραφο αυτή θα διερευνηθεί εάν η επιλογή της παραμέτρου κέρδους  $K_R$  επηρεάζει την αποδοτικότητα της στρατηγικής ALINEA ως προς τον έλεγχο κυκλοφορίας.



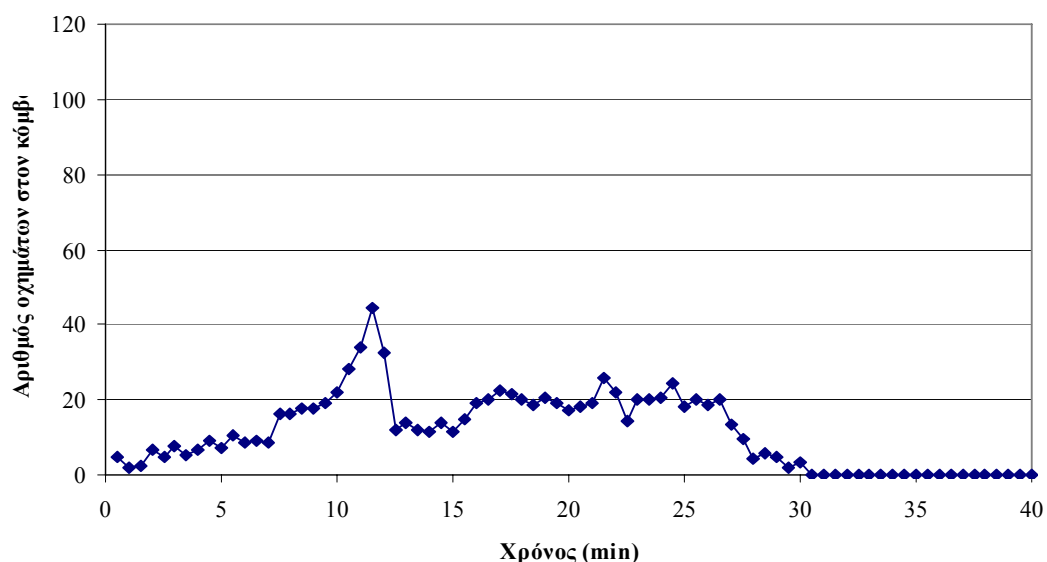
**Σχήμα 5-22:** Μέσος χρόνος καθυστέρησης συναρτήσει της παραμέτρου κέρδους για ορισμένους κρίσιμους αριθμούς οχημάτων στον κόμβο για το διάστημα τιμών της παραμέτρου κέρδους  $[100,800]$ .

Το Σχήμα 5-22 περιλαμβάνει τα διαγράμματα του μέσου χρόνου καθυστέρησης συναρτήσει της παραμέτρου κέρδους  $K_R$  για το διάστημα τιμών  $[100,800]$ . Κάθε μία από τις παραπάνω καμπύλες αντιστοιχεί σε έναν επιθυμητό αριθμό οχημάτων στον κόμβο και συγκεκριμένα στις τιμές 18, 19, 20, 22 και 30. Οι τιμές αυτές ανήκουν στο διάστημα τιμών κρίσιμου αριθμού οχημάτων  $[17,50]$ , που είναι η περιοχή ελαχίστου της καμπύλης του μέσου χρόνου καθυστέρησης για παράμετρο κέρδους  $K_R=500$  (Σχήμα 5-11), και αποτελεί την περιοχή με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Για κάθε τιμή της παραμέτρου κέρδους  $K_R$ , πραγματοποιούνται δέκα προσομοιώσεις και τελικά λαμβάνεται η καμπύλη της μέσης τιμής του μέσου χρόνου καθυστέρησης. Οι καμπύλες του Σχήματος 5-22, επιβεβαιώνουν ότι οι τιμές κρίσιμου αριθμού οχημάτων 19, 20, 22 που ανήκουν στην περιοχή ολικού ελαχίστου  $[19,23]$  (Σχήμα 5-11), οδηγούν σε μικρότερο χρόνο καθυστέρησης των οχημάτων για όλες τις τιμές της παραμέτρου κέρδους στο διάστημα  $[100,800]$ .

Επίσης στο Σχήμα 5-22 παρατηρείται ότι οι τιμές της παραμέτρου  $K_R$  στο διάστημα  $[100,300]$  δίνουν γενικά μεγάλο χρόνο καθυστέρησης για όλες τις κρίσιμες τιμές που εξετάζονται ενώ οι τιμές  $K_R$  που ανήκουν στο διάστημα  $[400,800]$  οδηγούν γενικά σε μικρότερους χρόνους καθυστέρησης. Στη συνέχεια θα διερευνηθεί η συμπεριφορά της στρατηγικής ελέγχου και η αποδοτικότητα του ελέγχου κυκλοφορίας για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου κέρδους.

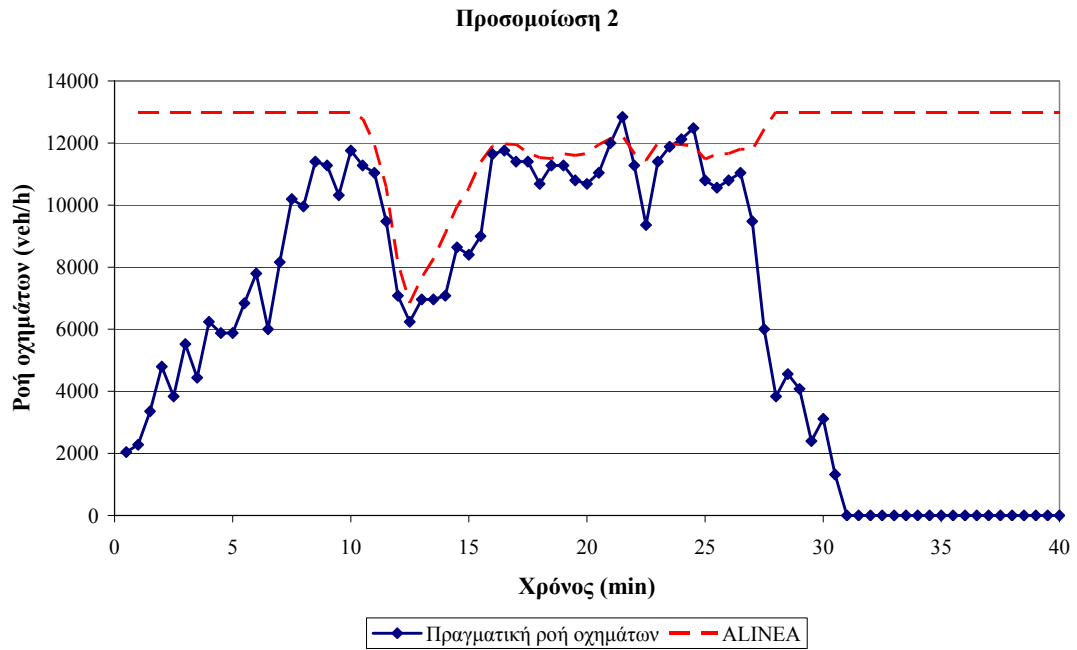
Στο Σχήμα 5-23 παρουσιάζεται για τη δεύτερη προσομοίωση ο αριθμός οχημάτων μέσα στον κόμβο συναρτήσει του χρόνου για επιθυμητό αριθμό οχημάτων  $\hat{N}=20$  και παράμετρο κέρδους  $K_R=100$ , ενώ στο Σχήμα 5-24 για τις ίδιες παραμέτρους αναπαρίστανται οι καμπύλες της νέας ροής οχημάτων που δίνει ως εντολή η στρατηγική ελέγχου κάθε χρονική περίοδο στο σημείο ελέγχου και της πραγματικής ροής οχημάτων που διέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες. Παρατηρείται ότι κοντά στο  $10^{\circ}$  λεπτό, όπου η ροή οχημάτων του σεναρίου ζήτησης γίνεται μέγιστη (Σχήμα 4-2), η στρατηγική ελέγχου ALINEA ενεργοποιείται ουσιαστικά για πρώτη φορά και δίνει εντολή, τα επόμενα 2 λεπτά, για πολύ μικρές ροές οχημάτων ώστε ο αριθμός οχημάτων μέσα στον κόμβο να μειωθεί. Ο αριθμός οχημάτων μειώνεται τελικά περισσότερο από το επιθυμητό και η ALINEA ακολουθεί μία σταθερή ανοδική πορεία, από το  $12^{\circ}$  λεπτό μέχρι το  $16^{\circ}$  λεπτό, την οποία όπως δεν ακολουθεί πιστά η πραγματική ροή οχημάτων που διέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες. Το γεγονός αυτό όμως δεν επηρεάζει τις αποφάσεις της στρατηγικής ελέγχου η οποία καταφέρνει τελικά να επιτύχει την επιθυμητή τιμή αριθμού οχημάτων στον κόμβο και να τη διατηρήσει με μεγάλη ακρίβεια για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα υψηλής κυκλοφοριακής ζήτησης

#### Προσομοίωση 2

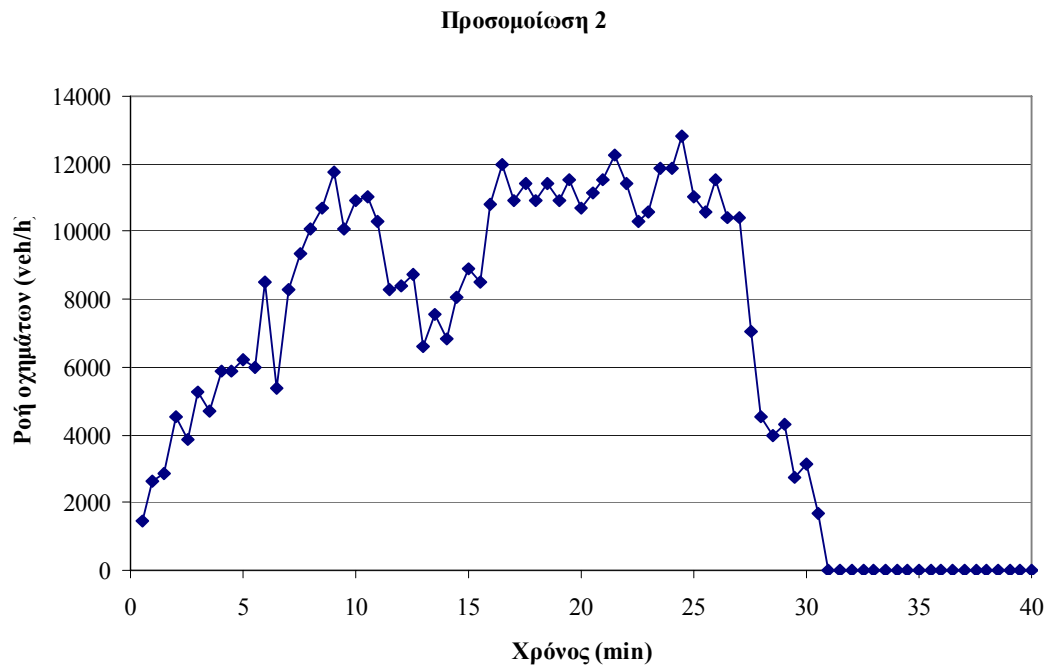


**Σχήμα 5-23:** Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για τη δεύτερη προσομοίωση και  $\hat{N}=20$ ,  $K_R=100$ .





**Σχήμα 5-24:** Τιμές ροής οχημάτων της ALINEA κάθε χρονική περίοδο και πραγματική ροή οχημάτων που εξέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες για τη δεύτερη προσομοίωση και  $\hat{N} = 20$ ,  $K_R = 100$ .

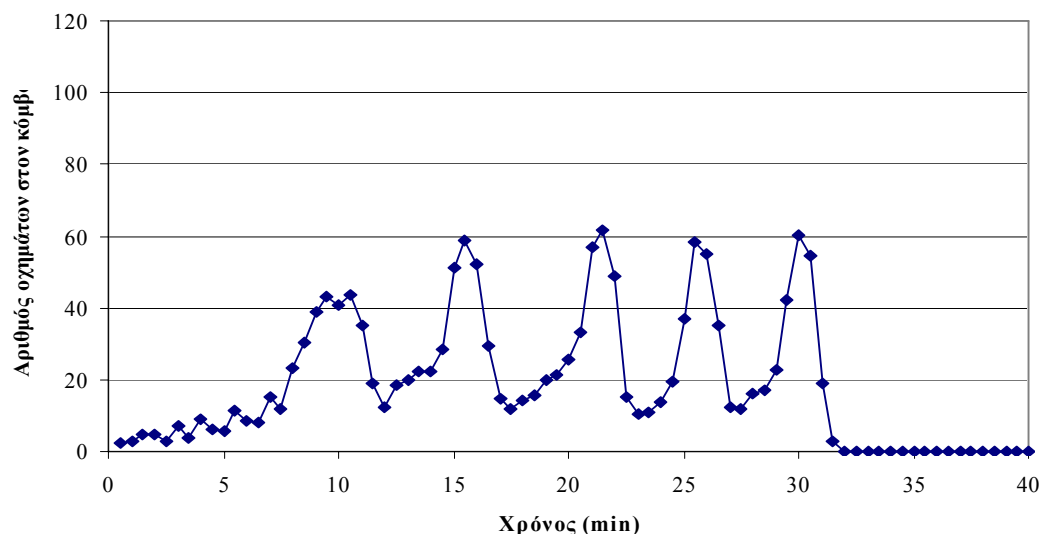


**Σχήμα 5-25:** Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για τη δεύτερη προσομοίωση και  $\hat{N} = 20$ ,  $K_R = 100$ .

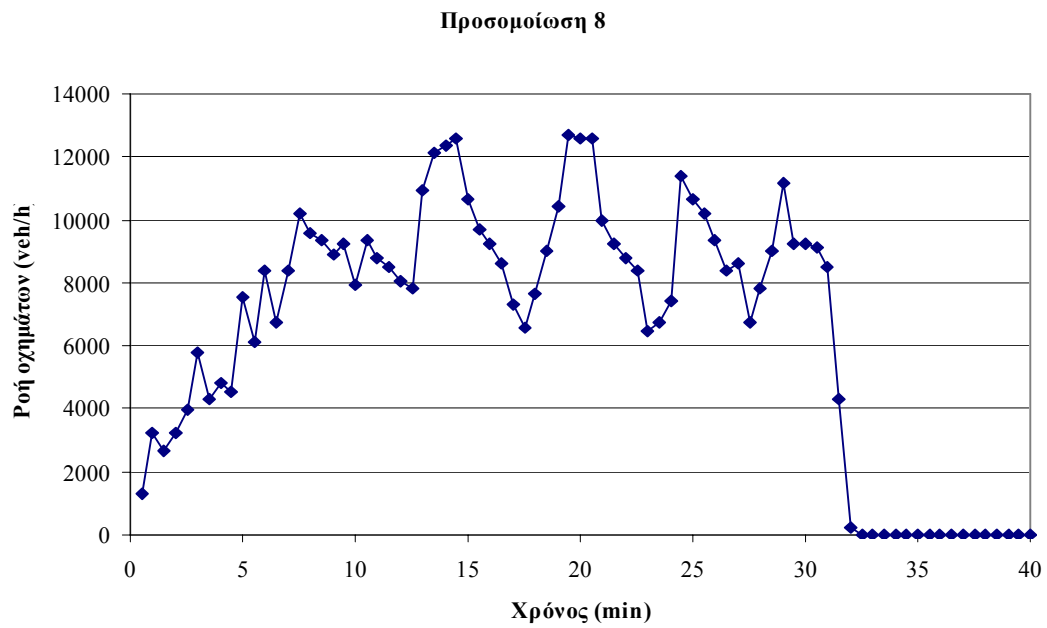
Η καθυστέρηση της ALINEA να προσεγγίσει την επιθυμητή τιμή οφείλεται στη μικρή τιμή της παραμέτρου κέρδους  $K_R$ , η οποία όμως στη συνέχεια συντελεί στη διατήρηση του αριθμού οχημάτων στον κόμβο στην επιθυμητή τιμή με μεγάλη ακρίβεια. Η ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας συναρτήσκει του χρόνου για τη δεύτερη προσομοίωση και  $K_R=100$ ,  $\hat{N}=20$  αναπαρίσταται στο Σχήμα 5-25. Διαπιστώνεται ότι η εφαρμογή μικρής τιμής της παραμέτρου κέρδους  $K_R$ , διάστημα τιμών  $[100,200]$ , δεν οδηγεί σε κέρδος σε ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας. Επιπλέον για παράμετρο κέρδους  $K_R=100$  και επιθυμητό αριθμό οχημάτων στον κόμβο που δεν ανήκει στο διάστημα ολικού ελαχίστου, για παράδειγμα  $\hat{N}=30$ , παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής ALINEA οδηγείται σε μη αποσβενόμενη ταλάντωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-26, με αντίστοιχες επιπτώσεις στην ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας (Σχήμα 5-27).

Μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου κέρδους  $K_R$ , για παράδειγμα για την τιμή  $K_R=800$ , ο ελεγκτής διατηρεί και πάλι τον αριθμό οχημάτων στην επιθυμητή τιμή 20 (Σχήμα 5-28) με μικρές μόνο αποκλίσεις και με αντίστοιχη υψηλή ροή οχημάτων στην είσοδο της γέφυρας (Σχήμα 5-29). Όπως αναμενόταν οι εναλλαγές των αποφάσεων που λαμβάνει η ALINEA κάθε περίοδο ελέγχου είναι πιο απότομες (Σχήμα 5-30) από αυτές για μικρότερη τιμή της παραμέτρου κέρδους όπως για παράδειγμα για  $K_R=500$  (Σχήμα 5-14). Παρατηρείται όμως, ότι τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι εξίσου ικανοποιητικά και συμπεραίνεται ότι για το εύρος τιμών της παραμέτρου κέρδους  $[400,800]$ , η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας μέσω της στρατηγικής ALINEA, οδηγεί σε παρόμοια αποτελέσματα. Μεγαλύτερες, όμως, τιμές της παραμέτρου κέρδους οδηγούν τελικά σε αστάθεια του ελεγκτή, χαρακτηριστικό όλων των ελεγκτών τύπου I.

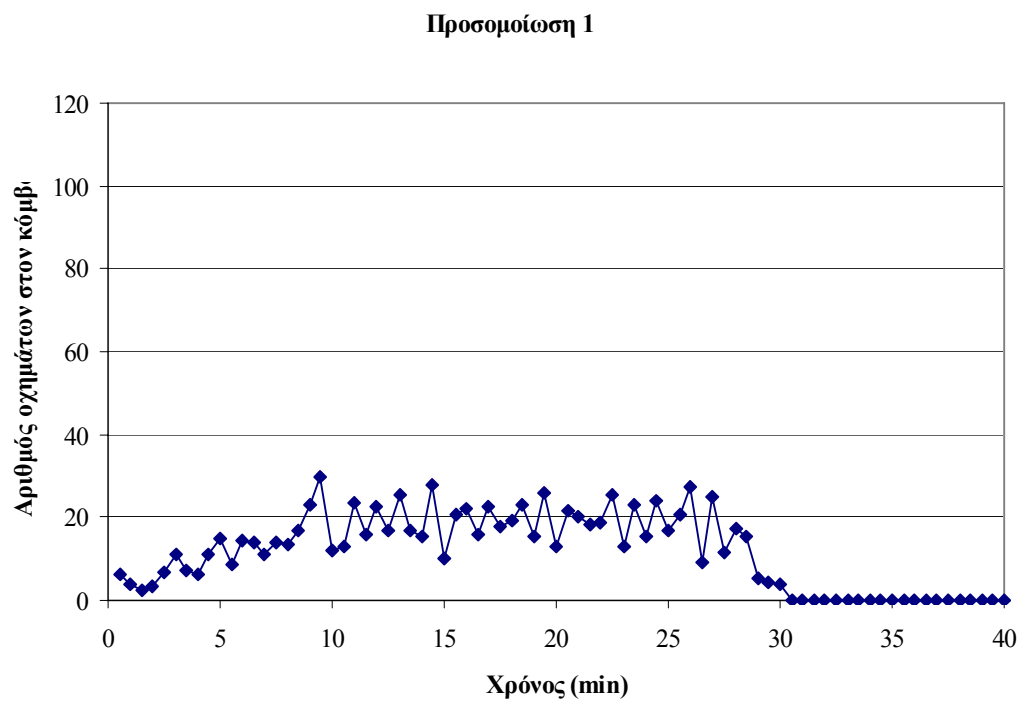
Προσομοίωση 8



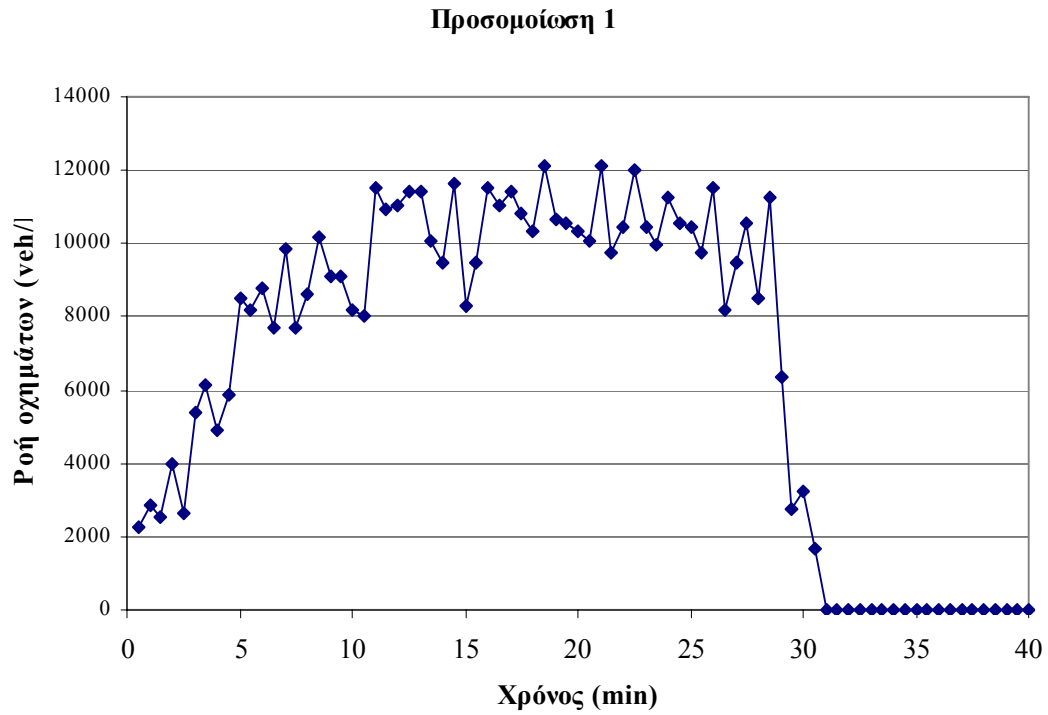
**Σχήμα 5-26:** Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την όγδοη προσομοίωση και  $\hat{N}=30$ ,  $K_R=100$ .



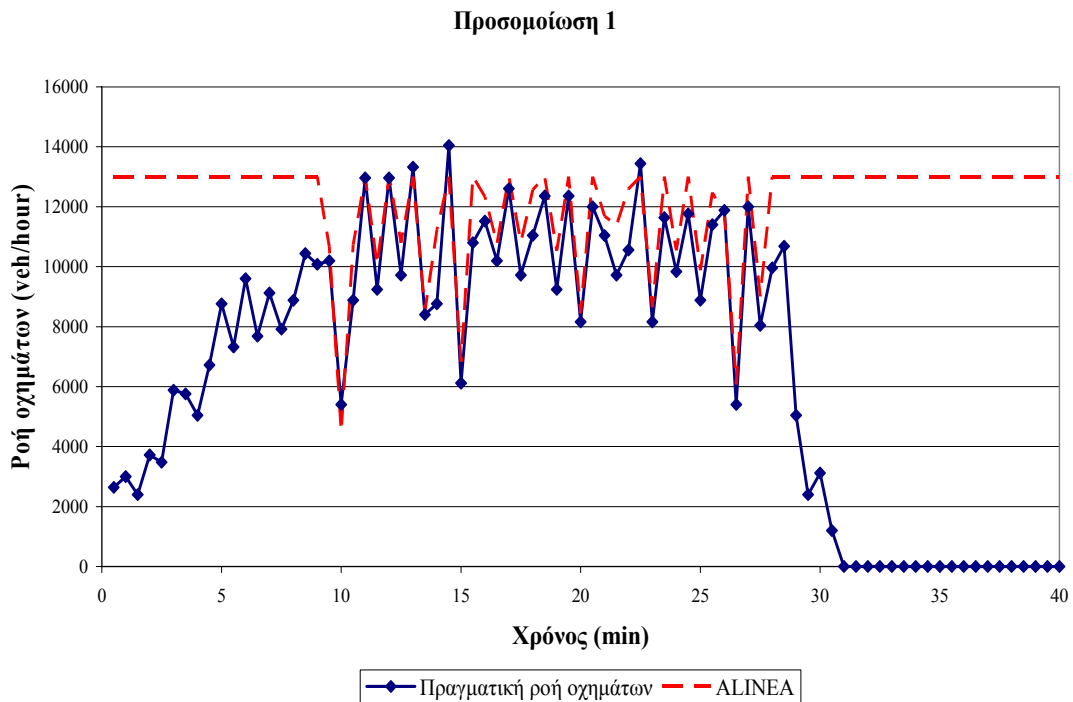
**Σχήμα 5-27:** Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την όγδοη προσομοίωση και  $\hat{N} = 30$ ,  $K_R = 100$ .



**Σχήμα 5-28:** Αριθμός οχημάτων στον κόμβο για την πρώτη προσομοίωση και  $\hat{N} = 20$ ,  $K_R = 800$ .



**Σχήμα 5-29:** Ροή οχημάτων ανά ώρα στην είσοδο της γέφυρας ως προς το χρόνο προσομοίωσης για την πρώτη προσομοίωση και  $\hat{N} = 20$ ,  $K_R = 800$ .



**Σχήμα 5-30:** Τιμές ροής οχημάτων της ALINEA κάθε χρονική περίοδο και πραγματική ροή οχημάτων που εξέρχεται από τους φωτεινούς σηματοδότες για την πρώτη προσομοίωση και  $\hat{N} = 20$ ,  $K_R = 800$ .

## 5.4 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν στο μικροσκοπικό προσομοιωτή AIMSUN, για τη μελέτη της εφαρμογής ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή συγχώνευσης λωρίδων αυτοκινητοδρόμου, λόγω της ύπαρξης διοδίων. Τα συνοπτικά αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

- Η μέση τιμή του μέσου χρόνου καθυστέρησης των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας είναι 164 sec/veh/km. Χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας η ικανότητα της υποδομής δεν αξιοποιείται πλήρως.
- Η πραγματοποίηση ελέγχου κυκλοφορίας με την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA δίνει, για ένα εύρος τιμών επιθυμητού αριθμού οχημάτων στον κόμβο, διάστημα  $\hat{N}$  [19,23], και παράμετρο κέρδους  $K_R = 500$ , μέση τιμή του μέσου χρόνου καθυστέρησης που κυμαίνεται στο διάστημα [86,97] sec/veh/km.
- Το ποσοστό βελτίωσης του μέσου χρόνου καθυστέρησης των οχημάτων, για τις παραπάνω παραμέτρους, σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας κυμαίνεται στο διάστημα [40,47] %. Πράγματι ο έλεγχος της κυκλοφορίας οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση της ικανότητας της υποδομής και πολύ μικρότερους χρόνους καθυστέρησης των οχημάτων.
- Η τιμή της παραμέτρου κέρδους  $K_R$  που εφαρμόστηκε για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων αποδείχθηκε ως μία καλή επιλογή. Παρόλα αυτά, άλλες τιμές της παραμέτρου κέρδους στο διάστημα τιμών [400,800] δίνουν εξίσου θετικά ή ακόμα και καλύτερα αποτελέσματα.
- Σκοπός της μελέτης αυτής δεν είναι η βέλτιστη ρύθμιση της κυκλοφορίας του συγκεκριμένου δικτύου για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων  $\hat{N}$ ,  $K_R$  αλλά η διερεύνηση της βελτίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου για ένα εύρος τιμών τους, γεγονός που συμβαίνει πράγματι στο δίκτυο που εξετάστηκε.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Σύνοψη της εργασίας

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας σε περιοχή αυτοκινητοδρόμου όπου εμφανίζεται έντονη συγχώνευση λωρίδων, λόγω της ύπαρξης διοδίων, συγκεκριμένα από τις δεκαπέντε λωρίδες κυκλοφορίας των διοδίων σε πέντε λωρίδες αυτοκινητοδρόμου. Η προσομοίωση του δικτύου και των κυκλοφοριακών συνθηκών έγινε στον μικροσκοπικό προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN, ενώ για τον έλεγχο της κυκλοφορίας εφαρμόστηκε η τοπική στρατηγική ελέγχου ALINEA. Αρχικά θεωρήθηκε ότι δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να δημιουργείται έντονη συμφόρηση στην περιοχή συγχώνευσης των λωρίδων που συνεπάγεται μειωμένη ροή οχημάτων ιδιαίτερα στην περίοδο μεγάλης κυκλοφοριακής ζήτησης (ώρες αιχμής). Εν συνεχεία εφαρμόστηκε έλεγχος πριν τη συγχώνευση των λωρίδων με χρήση της στρατηγικής ελέγχου ALINEA διερευνώντας παράλληλα την κρίσιμη τιμή του αριθμού οχημάτων στον οποίο στοχεύει η στρατηγική καθώς και τη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου κέρδους της ALINEA.

### 6.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση της εφαρμογής τοπικού ελέγχου σε δίκτυο με έντονη συγχώνευση λωρίδων που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία είναι τα ακόλουθα.

- Η εφαρμογή ελέγχου κυκλοφορίας βελτιώνει τις κυκλοφοριακές συνθήκες, μειώνει σε μεγάλο βαθμό το χρόνο καθυστέρησης των οχημάτων που διασχίζουν το δίκτυο και αυξάνει τη ροή οχημάτων ακριβώς τη στιγμή που κρίνεται αναγκαίο δηλαδή στις ώρες αιχμής.
- Η ALINEA είναι μια αρκετά σταθερή και εύρωστη στρατηγική ελέγχου καθώς επιτυγχάνει να διατηρήσει τις επιθυμητές τιμές ελέγχου χωρίς να επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες.
- Η εφαρμογή της στρατηγικής ALINEA απαιτεί τη ρύθμιση μόνο δύο παραμέτρων, του κρίσιμου αριθμού οχημάτων  $\hat{N}$  και της παραμέτρου κέρδους  $K_R$ . Αποδείχθηκε ότι οι παράμετροι αυτές δίνουν θετικά αποτελέσματα για ένα εύρος τιμών, γεγονός που καθιστά την εφαρμογή της ALINEA σχετικά εύκολη ακόμα και σε πραγματικές συνθήκες.

### **6.3 Μελλοντικές επεκτάσεις**

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας οδηγούν σε σκέψεις για περαιτέρω επεκτάσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο μέλλον. Καταρχήν η παραπάνω μεθοδολογία, καθώς τα αποτελέσματα της έρευνας είναι θετικά, μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικό δίκτυο ρυθμίζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους της στρατηγικής ελέγχου. Κατά δεύτερον η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου ALINEA μπορεί να εξεταστεί σε οδικά δίκτυα με παρόμοια γεωμετρία (όπου εμφανίζεται έντονη συγχώνευση λωρίδων), για παράδειγμα σε κυκλοφοριακούς κόμβους, σε ράμπες εισόδου – εξόδου (όπου γίνεται έλεγχος σε όλες τις λωρίδες του αυτοκινητοδρόμου), σε περιοχές του δικτύου όπου συμβαίνουν έργα οδοποιίας ή άλλα περιστατικά, ή σε περιοχές δικτύων με ιδιαίτερη γεωγραφική μορφολογία.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aimsun 5.0 Microsimulator User's Manual

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

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

Kotsialos A. and Papageorgiou M., 2004, 'Motorway network traffic control systems', *European Journal of Operational Research*, 152, 321-333.

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

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

Papageorgiou M., Diakaki Chr., Dinopoulou V., Kotsialos A. and Wang Y., 2003. 'Review of Road Traffic Control Strategies', *Proceedings of the IEEE*, 91, 2043-2067

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

Papageorgiou M., Kosmatopoulos E., Protopapas M. and Papamichail I., 2006. 'Evaluation of the Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic using M42 Traffic Data'. *Internal Report 2006-25*, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, Chania, Greece.

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

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