

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Μοντελοποίηση και Βέλτιστος Έλεγχος Κυκλοφορίας  
Δικτύων Αυτοκινητοδρόμων Ευρείας Κλίμακας

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση  
Διδακτορικού Διπλώματος

Υπό  
Αποστόλου Κότσιαλου

Χανιά, 2004

©Copyright Απόστολος Κότσιαλος  
2004

Η Διδακτορική Διατριβή του Απόστολου Κότσιαλου εγκρίθηκε από:

1. Καθ. Μάρκος Παπαγεωργίου (επιβλέπων) .....
2. Καθ. Γεώργιος Σταυρακάκης .....
3. Καθ. Κωνσταντίνος Ζοπουνίδης .....
4. Αναπ. Καθ. Αθανάσιος Ζηλιασκόπουλος .....
5. Αναπ. Καθ. Βασίλειος Κουϊκόγλου .....
6. Αναπ. Καθ. Αθανάσιος Μυγδαλάς .....
7. Λέκτ. Ηλίας Κοσμάτοπουλος .....

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>13</b>
1.1	Κυκλοφοριακή Συμφόρηση . . . . .	13
1.2	Έλεγχος της Κυκλοφορίας . . . . .	14
1.2.1	Μέτρα ελέγχου της κυκλοφορίας . . . . .	14
1.2.2	Έλεγχος ράμπας εισόδου . . . . .	14
1.3	Ο Βρόχος Ελέγχου . . . . .	15
1.4	Η Βιβλιογραφία για τον Έλεγχο Ροής των Ραμπών Εισόδου . . . . .	17
1.5	Περιεχόμενο της Εργασίας . . . . .	25
<b>2</b>	<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ</b>	<b>26</b>
2.1	Εισαγωγή . . . . .	26
2.2	Το Μακροσκοπικό Μοντέλο METANET . . . . .	27
2.2.1	Μοντελοποίηση του δικτύου . . . . .	27
2.2.2	Μοντελοποίηση των συνδέσμων . . . . .	28
2.2.3	Μοντελοποίηση των κόμβων του δικτύου . . . . .	32
2.2.4	Υπολογιζόμενα κριτήρια . . . . .	33
2.3	Επικύρωση του Μοντέλου . . . . .	35
2.3.1	Σκοποί και μέσα . . . . .	35
2.3.2	Ποσοτική επικύρωση . . . . .	35
2.3.3	Ποιοτική επικύρωση . . . . .	37
2.4	Το Δίκτυο του Άμστερνταμ . . . . .	37
2.4.1	Περιγραφή του δικτύου . . . . .	37
2.4.2	Το μοντέλο του Άμστερνταμ . . . . .	38
2.4.3	Διαθέσιμα δεδομένα . . . . .	39
2.4.4	Ποσοτική επικύρωση στο δίκτυο του Άμστερνταμ . . . . .	40
2.4.5	Ποιοτική επικύρωση στο δίκτυο του Άμστερνταμ . . . . .	41
2.5	Σύνοψη . . . . .	42
<b>3</b>	<b>ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ-ΔΡΟΜΩΝ</b>	<b>47</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	47
3.2	Γενική Ιεραρχική Δομή Ελέγχου . . . . .	47
3.3	Επίπεδο Εκτίμησης και Πρόβλεψης . . . . .	50
3.3.1	Λειτουργίες του επιπέδου . . . . .	50
3.3.2	Εκτίμηση της κατάστασης της κυκλοφορίας . . . . .	52
3.3.3	Εκτίμηση παραμέτρων . . . . .	52
3.3.4	Πρόβλεψη διαταραχών . . . . .	52

3.4	Επίπεδο Βελτιστοποίησης . . . . .	53
3.4.1	Λειτουργίες του επιπέδου . . . . .	53
3.4.2	Μορφοποίηση του προβλήματος . . . . .	54
3.4.3	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης . . . . .	55
3.5	Επίπεδο Ανάθεσης Καθηκόντων . . . . .	58
3.5.1	Λειτουργίες του επιπέδου . . . . .	58
3.5.2	Από το στρατηγικό επίπεδο στο τακτικό . . . . .	58
3.6	Επίπεδο Αποκεντρωμένου Τοπικού Ελέγχου . . . . .	60
3.7	Η Τεχνική του Κυλιόμενου Ορίζοντα . . . . .	61
3.8	Σύνοψη . . . . .	62
<b>4</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟ ΔΑΚΤΥΛΙΟ ΤΟΥ ΑΜΣΤΕΡΝΤΑΜ</b>	<b>63</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	63
4.2	Περιγραφή του Δικτύου . . . . .	64
4.3	Περιγραφή Σεναρίων . . . . .	65
4.4	Σενάριο 0 . . . . .	66
4.5	Σενάριο 1 . . . . .	68
4.6	Σενάριο 2 . . . . .	71
4.7	Σενάριο 3 . . . . .	71
4.8	Σενάριο 4 . . . . .	76
4.9	Η Αποτελεσματικότητα της Στρατηγικής . . . . .	76
4.10	Η Ισορροπία Μεταξύ Αποτελεσματικότητας και Ισοτιμίας . . . . .	79
4.11	Υπολογιστικός Φόρτος . . . . .	83
4.12	Σύνοψη . . . . .	83
<b>5</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ</b>	<b>85</b>
5.1	Εισαγωγή . . . . .	85
5.2	Περιγραφή της Κυκλοφοριακής Κατάστασης Χωρίς Έλεγχο . . . . .	87
5.3	Εφαρμογή Τοπικού Ελέγχου . . . . .	87
5.4	Εφαρμογή Ιεραρχικού Ελέγχου και η Επίδραση των $H_P$ και $H_A$ . . . . .	89
5.5	Επίδραση των Σφαλμάτων της Πρόβλεψης των Ποσοστών Στροφής . . . . .	100
5.6	Επίδραση των Σφαλμάτων της Πρόβλεψης της Ζήτησης . . . . .	103
5.7	Επίδραση Διαφορετικών Τιμών της $v_f$ στο METANET και στο AMOC . . . . .	107
5.8	Επίδραση των Μέγιστων Ουρών . . . . .	109
5.9	Επίδραση Συμβάντων . . . . .	111
5.10	Υπολογιστικός Φόρτος . . . . .	115
5.11	Σύνοψη . . . . .	116
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ</b>	<b>118</b>
6.1	Συμπεράσματα . . . . .	118
6.2	Μελλοντική Εργασία . . . . .	120

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Ράμπα εισόδου. . . . .	15
1.2	Διαδικασία κυκλοφοριακής ροής υπό έλεγχο. . . . .	16
1.3	Το θεμελιώδες διάγραμμα. . . . .	19
1.4	Διάγραμμα λειτουργίας της στρατηγικής ζήτησης-ικανότητας. . . . .	20
1.5	Διάγραμμα λειτουργίας της ALINEA . . . . .	21
2.1	Διακριτά τμήματα ενός συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου. . . . .	29
2.2	Το θεμελιώδες διάγραμμα για το διακριτό τμήμα αυτο/μου ( $i, m$ ). . . . .	29
2.3	Δυνατή εκροή από μία ράμπα συναρτήσει των κυκλοφοριακών συνθηκών του αυτοκινητοδρόμου. . . . .	31
2.4	Το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων του Άμστερνταμ. . . . .	38
2.5	Το μοντέλο του δικτύου του Άμστερνταμ. . . . .	39
2.6	L26, μετρούμενη – προβλεπόμενη ροή, ποιοτική επιχύρωση. . . . .	42
2.7	L26, μετρούμενη – προβλεπόμενη ταχύτητα, ποιοτική επιχύρωση. . . . .	43
2.8	L11, μετρούμενη – προβλεπόμενη ροή, ποιοτική επιχύρωση. . . . .	43
2.9	L11, μετρούμενη – προβλεπόμενη ταχύτητα, ποιοτική επιχύρωση. . . . .	44
2.10	L72, μετρούμενη – προβλεπόμενη ροή, ποιοτική επιχύρωση. . . . .	44
2.11	L72, μετρούμενη – προβλεπόμενη ταχύτητα, ποιοτική επιχύρωση. . . . .	45
2.12	Προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου, 7:30 π.μ. . . . .	45
2.13	Προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου, 9:00 π.μ. . . . .	46
3.1	Διάγραμμα ιεραρχικής δομής ελέγχου της κυκλοφορίας. . . . .	51
3.2	Διακριτά χρονικά βήματα ελέγχου του AMOC , των τοπικών ελεγκτών και διακριτό χρονικό βήμα του μοντέλου. . . . .	60
3.3	Επαναλήψεις κυλιόμενου ορίζοντα. . . . .	62
4.1	Ο δακτύλιος του Άμστερνταμ (αντίθετα προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού) . . . . .	64
4.2	Σενάριο 0: Πυκνότητα. . . . .	67
4.3	Σενάριο 0: Μέση ταχύτητα. . . . .	67
4.4	Σενάριο 0: Ουρές ραμπών εισόδου. . . . .	68
4.5	Σενάριο 1: Πυκνότητα. . . . .	69
4.6	Σενάριο 1: Ουρές ραμπών εισόδου. . . . .	69
4.7	Σενάριο 1: Μέση ταχύτητα. . . . .	70
4.8	Σενάριο 1: Βέλτιστες τροχιές ελέγχου. . . . .	70
4.9	Σενάριο 2: Πυκνότητα. . . . .	72
4.10	Σενάριο 2: Μέση ταχύτητα. . . . .	72
4.11	Σενάριο 2: Ουρές ραμπών εισόδου. . . . .	73

4.12	Σενάριο 2: Βέλτιστες τροχιές ελέγχου. . . . .	73
4.13	Σενάριο 3: Πυκνότητα. . . . .	74
4.14	Σενάριο 3: Μέση ταχύτητα. . . . .	74
4.15	Σενάριο 3: Ουρές ραμπών εισόδου. . . . .	75
4.16	Σενάριο 3: Βέλτιστες τροχιές ελέγχου. . . . .	75
4.17	Σενάριο 4: Πυκνότητα. . . . .	77
4.18	Σενάριο 4: Μέση ταχύτητα. . . . .	77
4.19	Σενάριο 4: Ουρές ραμπών εισόδου. . . . .	78
4.20	Σενάριο 4: Βέλτιστες τροχιές ελέγχου. . . . .	78
4.21	Μέσοι χρόνοι ταξιδιού $\bar{t}_o$ για κάθε ράμπα εισόδου $o$ . . . . .	81
4.22	Διασπορά των μέσων χρόνων ταξιδιού για κάθε ράμπα εισόδου $o$ . . . . .	82
4.23	Υπολογιστικός φόρτος για τις διάφορες μεθόδους αναζήτησης κατεύ- θυνσης. . . . .	84
5.1	Πυκνότητα χωρίς την εφαρμογή ελέγχου. . . . .	87
5.2	Ουρές ραμπών εισόδου χωρίς εφαρμογή ελέγχου. . . . .	88
5.3	Πυκνότητα κατά την εφαρμογή της ALINEA χωρίς έλεγχο ουράς. . . . .	90
5.4	Ουρές ραμπών εισόδου κατά την εφαρμογή της ALINEA χωρίς έλεγχο ουράς. . . . .	90
5.5	Πυκνότητα κατάντη του A1 όταν εφαρμόζεται ALINEA χωρίς έλεγχο ουράς. . . . .	91
5.6	Πυκνότητα κατά την εφαρμογή της ALINEA με έλεγχο ουράς. . . . .	91
5.7	Ουρές ραμπών εισόδου κατά την εφαρμογή της ALINEA με έλεγχο ουράς. . . . .	92
5.8	Μέσος χρόνος ταξιδιού για απόσταση 6,5 χλμ. κατάντη κάθε ράμπας εισόδου. . . . .	92
5.9	Πυκνότητα μετά την εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου ( $H_P = H_A = 4$ ώρες). . . . .	93
5.10	Ουρές ραμπών εισόδου μετά την εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου ( $H_P = H_A = 4$ ώρες). . . . .	94
5.11	Ταχύτητα ανάντι της διασταύρωσης του A10 με τον A1 χωρίς εφαρμογή ελέγχου. . . . .	96
5.12	Ταχύτητα κατάντη της εισόδου του A4 στον A10, χωρίς εφαρμογή ε- λέγχου. . . . .	97
5.13	Ταχύτητα στον δυτικό A10 όπου τελειώνει η πρώτη συμφόρηση, χωρίς εφαρμογή ελέγχου. . . . .	97
5.14	Ουρές ραμπών εισόδου με ( $H_P, H_A$ ) = (60, 30). . . . .	98
5.15	Ουρές ραμπών εισόδου με ( $H_P, H_A$ ) = (30, 30). . . . .	98
5.16	Πρόβλεψη του AMOC της πυκνότητας χωρίς εφαρμογή ελέγχου όταν ( $H_P, H_A$ ) = (60, 30). . . . .	99
5.17	Πρόβλεψη του AMOC της πυκνότητας χωρίς εφαρμογή ελέγχου όταν ( $H_P, H_A$ ) = (30, 30). . . . .	99
5.18	Ποσοστά στροφής στην έξοδο D1 για το AMOC και το METANET. . . . .	101
5.19	Γενικό κυκλοφοριακό σύστημα. . . . .	103
5.20	Ζήτηση στον A8 για τις διάφορες τιμές σφάλματος. . . . .	104
5.21	ΣΧ ως προς τα ποσοστά λάθους στις προβλέψεις των ζητήσεων. . . . .	106
5.22	Ομαλοποιημένη ζήτηση του A8. . . . .	107
5.23	Θεμελιώδες διάγραμμα για διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής. . . . .	108
5.24	Μέσοι χρόνοι ταξιδιού για κάθε ράμπα εισόδου. . . . .	112

5.25 Πυκνότητα στο δίκτυο με ατύχημα χωρίς εφαρμογή ελέγχου. . . . .	113
5.26 Ουρές στο δίκτυο με ατύχημα χωρίς εφαρμογή ελέγχου. . . . .	113
5.27 Πυκνότητα στο δίκτυο με ατύχημα και με εφαρμογή ελέγχου. . . . .	114
5.28 Ουρές στο δίκτυο με ατύχημα και με εφαρμογή ελέγχου. . . . .	114
5.29 Χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό των βέλτιστων λύσεων. . .	117



# Κατάλογος Πινάκων

1.1	Συγκριτικά αποτελέσματα εφαρμογής τοπικού ελέγχου ροής ράμπας εισόδου. . . . .	22
2.1	Οι αυτοκινητόδρομοι του δικτύου. . . . .	40
2.2	Σύνολα βέλτιστων παραμέτρων. . . . .	40
4.1	Σενάρια αναφορικά με τις μέγιστες επιτρεπτές ουρές . . . . .	66
4.2	ΣΧ, ΣΧΤ και ΣΧΑ για κάθε σενάριο . . . . .	79
5.1	ΣΧ για διάφορα ζεύγη ( $H_P, H_A$ ) με ακριβή γνώση διαταραχών . . . . .	95
5.2	ΣΧ για τα σενάρια 1 και 2 (επίδραση σφαλμάτων ποσοστών στροφής). . . . .	100
5.3	ΣΧ για τα σενάρια 1–5 (επίδραση σφαλμάτων ζήτησης). . . . .	104
5.4	ΣΧ για τα σενάρια 1–3 (επίδραση της διαφοράς των $v_f$ και των σφαλμάτων ζήτησης). . . . .	109
5.5	Μέγιστες επιθυμητές ουρές ανά σενάριο. . . . .	110
5.6	Αποτελέσματα για κάθε σενάριο (επίδραση μεγίστων ουρών). . . . .	110
5.7	Αποτελέσματα για κάθε σενάριο με ακριβή πρόβλεψη των διαταραχών (επίδραση μεγίστων ουρών). . . . .	111

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Καθ. Μάρκο Παπαγεωργίου για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που παρείχε αλλά κυρίως για την υπομονή που επέδειξε. Επίσης θα πρέπει να ευχαριστήσω τον Dr.-Ing. Albert Messmer για τη βοήθεια και την προσφορά του στον κώδικα του AMOC.

## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο Απόστολος Κότσιαλος γεννήθηκε στη Λάρισα τον Ιανουάριο του 1972. Το 1995 αποφοίτησε από το Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η διπλωματική του εργασία αφορούσε συστήματα αυτόματων αυτοκινητόδρομων. Συνέχισε τις σπουδές του στο διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών του τμήματος απ' όπου αποφοίτησε το 1998. Η μεταπτυχιακή του εργασία αφορούσε τον έλεγχο της κυκλοφοριακής ροής σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων με τη χρήση διαφορετικών μέτρων ελέγχου (έλεγχος ραμπών εισόδου και καθοδήγηση πορείας). Καθόλη τη διάρκεια των σπουδών του εργάστηκε και εξακολουθεί να εργάζεται στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης σαν επιστημονικός συνεργάτης. Στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας έχει εργαστεί σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα καθώς επίσης και έχει διδάξει, σαν βοηθός, σε προπτυχιακά μαθήματα του τμήματος.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη ασχολείται με τη μοντελοποίηση και τον έλεγχο της κυκλοφορίας δικτύων αυτοκινητοδρόμων ευρείας κλίμακας. Εστιάζουμε την προσοχή μας στον συντονισμένο έλεγχο ραμπών εισόδου σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων μεγάλης κλίμακας. Οι στρατηγικές ελέγχου ραμπών εισόδου στοχεύουν στον προσδιορισμό της ροής οχημάτων που θα πρέπει να εισέλθει από την κάθε ράμπα εισόδου στην κυκλοφορία των αυτοκινητοδρόμων κατά τη διάρκεια ενός διακριτού βήματος ελέγχου. Η προσέγγιση μας βασίζεται στην μακροσκοπική μοντελοποίηση της κυκλοφορίας.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε το εργαλείο μοντελοποίησης METANET για να αναπτύξουμε το μοντέλο του περιαστικού δικτύου του Άμστερνταμ. Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής δείχνουν ότι το METANET είναι ικανό να προσομοιώσει ικανοποιητικά το φαινόμενο της κυκλοφοριακής ροής στο δίκτυο. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την αξιολόγηση της εφαρμογής μιας στρατηγικής ελέγχου όσο και για το σχεδιασμό αυτής της στρατηγικής. Στην περίπτωση μας, βασισμένοι στο μοντέλο του METANET, αναπτύσσουμε μία στρατηγική βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου (στρατηγική AMOC) η οποία εντάσσεται σε μία ευρύτερη ιεραρχική δομή ελέγχου που βασίζεται στην τεχνική του κυλιόμενου ορίζοντα.

Μέσα σ' αυτήν τη δομή συνδιάζονται η στρατηγική συντονισμένου ελέγχου των ραμπών εισόδου AMOC με στρατηγικές τοπικού ελέγχου, με στόχο τη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών εν όψη των αναμενόμενων διαταραχών (μη-ελεγχόμενων εισόδων) του κυκλοφοριακού συστήματος (ζήτηση στις ράμπες εισόδου, ποσοστά στροφής σε κάθε έξοδο και διακλάδωση, ύπαρξη συμβάντων μέσα στο δίκτυο που δημιουργούν συμφόρηση).

Αρχικά διερευνούμε τις ιδιότητες του AMOC πάνω στο δίκτυο του Άμστερνταμ (μέρος του αρχικού δικτύου που μοντελοποιήθηκε) με την υπόθεση ότι όλες οι διαταραχές είναι γνωστές εκ των προτέρων επακριβώς. Χρησιμοποιώντας το METANET σαν εργαλείο προσομοίωσης της πραγματικότητας μελετούμε το AMOC ως προς τα χαρακτηριστικά της αποτελεσματικότητας και της ισοτιμίας μέσα από έναν αριθμό κατάλληλα επιλεγμένων σεναρίων. Αποδεικνύεται ότι το AMOC παρουσιάζει πολύ καλές ιδιότητες, είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό όσον αφορά τη μείωση ή και εξαφάνιση της συμφόρησης αλλά και ταυτόχρονα μπορεί να είναι δίκαιο ως προς την κατανομή των καθυστερήσεων που επιβάλλει στους οδηγούς στις ουρές αναμονής των ραμπών εισόδου.

Αυτά τα εξαιρετικά χρήσιμα χαρακτηριστικά βασίζονται πάνω στην υπόθεση της πλήρους και επακριβούς γνώσης των μελλοντικών διαταραχών. Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να ισχύσει σε μια πραγματική εφαρμογή, πράγμα που μειώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής ανοικτού βρόχου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την τεχνική του κυλιόμενου ορίζοντα (ανάδραση) που χρησιμοποιεί ο ιεραρχικός έλεγχος.

Στο πλαίσιο αυτό, το AMOC προσδιορίζει τις βέλτιστες κυκλοφοριακές συνθήκες ανοικτού βρόχου για μία συγκεκριμένη περίοδο στο μέλλον (ορίζοντας πρόβλεψης) βασισμένο στην εκτίμηση της τρέχουσας κυκλοφοριακής κατάστασης και στις πρόβλεψεις των διαταραχών. Τις βέλτιστες κυκλοφοριακές συνθήκες αναλαμβάνουν να τις υλοποιήσουν οι τοπικοί αναδραστικοί ελεγκτές. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα (ορίζοντας εφαρμογής) το AMOC ενημερώνεται για την τρέχουσα κυκλοφοριακή κατάσταση και με ανανεωμένες προβλέψεις των διαταραχών εφαρμόζεται ξανά στο πρόβλημα του ελέγχου του δικτύου, με αποτέλεσμα να προσδιορίζεται μία καινούργια βέλτιστη τρο-

χιά κατάσταση. Εν συνεχεία ανανεώνονται οι παράμετροι λειτουργίας των τοπικών ελεγκτών έτσι ώστε στόχος τους να γίνει η υλοποίηση της καινούργιας βέλτιστης τροχιάς κατάστασης. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ανάδραση για τη συνολική ιεραρχική δομή ελέγχου.

Η συμπεριφορά του ιεραρχικού ελέγχου εξετάζεται κάτω από διάφορα σενάρια σφαλμάτων των διαταραχών, διαφορών στις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ανάμεσα στο AMOC και στο METANET, μεγέθους των μέγιστων επιτρεπτών ουρών στις ράμπες εισόδου και ύπαρξης συμβάντων στο δίκτυο. Οι διερευνήσεις δείχνουν ότι ο ιεραρχικός έλεγχος εξακολουθεί να δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για όλα τα σενάρια. Επιπλέον, ο αναγκαίος υπολογιστικός φόρτος που απαιτεί η στρατηγική ελέγχου είναι μικρός, πράγμα που κάνει εφικτή την εφαρμογή της στο πεδίο.

# Κεφάλαιο 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Κυκλοφοριακή Συμφόρηση

Κάθε σύστημα πεπερασμένης χωρητικότητας είναι αναπόφευκτο να παρουσιάσει φαινόμενα κορεσμού κάτω από συνθήκες συνεχώς αύξουσας ζήτησης. Τα οδικά κυκλοφοριακά συστήματα είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα. Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη στους τομείς της μηχανολογίας, των αυτοματισμών και των υλικών επιτρέπει τη μείωση του κόστους παραγωγής των οχημάτων, κάτι που συνδυαζόμενο με την ταυτόχρονη οικονομική ανάπτυξη και αύξηση του κατά κεφαλήν εισοδήματος στις αναπτυγμένες χώρες, οδηγεί στην άνευ προηγουμένου χρήση αυτοκινούμενων οχημάτων παντός είδους και κυρίως των ιδιωτικής χρήσης. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι μία κοινή εμπειρία τόσο των πολιτών των αναπτυγμένων όσο και των αναπτυσσόμενων χωρών. Πρόκειται για ένα πρόβλημα που μοιραία θα οξύνεται τις επόμενες δεκαετίες καθώς θα αυξάνεται ο αριθμός των οχημάτων που θα χρησιμοποιούν την πεπερασμένη χωρητικότητα των οδικών κυκλοφοριακών συστημάτων.

Τα κορεσμένα κυκλοφοριακά συστήματα είναι αιτίες μεγάλων προβλημάτων καθώς υποβαθμίζουν την ποιότητα ζωής των πολιτών, συνεισφέρουν στη ρύπανση του αστικού και περιαστικού περιβάλλοντος, με την έκλυση ρυπογόνων χημικών ουσιών, καθώς και στην ηχητική ρύπανση. Πέρα από αυτά, η οικονομική επιβάρυνση που προκύπτει από την ατελή καύση των καυσίμων σε συνθήκες συμφόρησης, αλλά και από τις χαμένες ανθρωποώρες που σπαταλούνται μέσα σε ακινητοποιημένα οχήματα, είναι πάρα πολύ μεγάλη. Η δυσάρεστη ψυχολογία που αναπτύσσεται στους επιβάτες των οχημάτων που βρίσκονται στο μέσο ενός δρόμου σε συνθήκες συμφόρησης είναι κάτι που δεν πρέπει να υποτιμηθεί. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η οδήγηση μέσα σε πυκνή κυκλοφορία είναι σχετικά πιο δύσκολη, η συμφόρηση έχει σαν αποτέλεσμα και την μείωση της οδικής ασφάλειας.

Καθίσταται έτσι επιτακτική η αντιμετώπιση του προβλήματος της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Σε στρατηγικό επίπεδο σχεδιασμού υπάρχουν δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη είναι η αύξηση της χωρητικότητας με την κατασκευή καινούργιων δρόμων, ενώ η δεύτερη είναι η ενεργή εμπλοκή στη δυναμική της κυκλοφοριακής ροής έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη χρήση της υπάρχουσας υποδομής. Προφανώς μία ολοκληρωμένη πολιτική που θα αναφέρεται σε μεγάλες περιοχές θα είναι ένα μίγμα αυτών των δύο στρατηγικών, αλλά είναι γεγονός ότι έχει υποτιμηθεί το πραγματικό δυναμικό της διαθέσιμης οδικής υποδομής. Θέση αυτής της εργασίας είναι ότι μπορεί να υπάρξει βελτίωση, της τάξης του 40%, των κυκλοφοριακών συνθηκών μέσω της συστηματικής

παρέμβασης στη διαδικασία της κυκλοφοριακής ροής που μορφοποιείται συστηματικά στο πλαίσιο της θεωρίας του αυτομάτου ελέγχου.

## 1.2 Έλεγχος της Κυκλοφορίας

### 1.2.1 Μέτρα ελέγχου της κυκλοφορίας

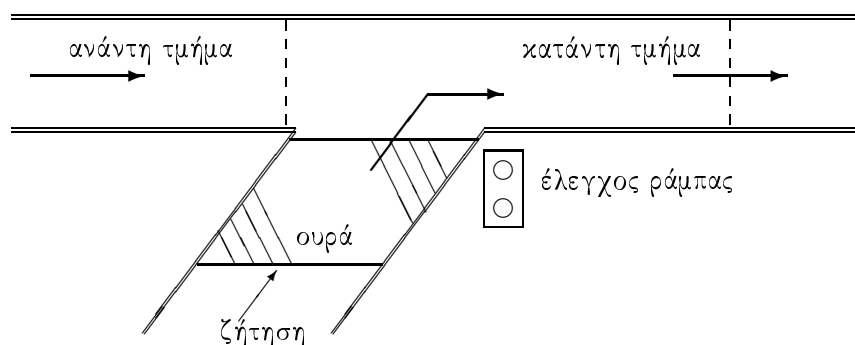
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ζητούμενη παρέμβαση στο φαινόμενο της κυκλοφοριακής ροής, απαιτούνται μηχανισμοί και μέθοδοι παρέμβασης ικανές να επηρεάσουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες με τρόπο συστηματικό και συνεκτικό. Με άλλα λόγια, χρειάζονται μέτρα ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής ικανά εν δυνάμει να επιδράσουν θετικά. Ο λόγος για τον οποίο η θετική επίδραση των μέτρων ελέγχου αναφέρεται όχι ως δεδομένο αλλά ως εν δυνάμει χαρακτηριστικό, είναι ότι η αλόγιστη χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε αντίθετα αποτελέσματα π.χ. λόγω μη σωστής εφαρμογής ή λόγω ανταγωνιστικών συμπεριφορών τους.

Ανταγωνιστικές συμπεριφορές μεταξύ μέτρων ελέγχου, του ιδίου ή διαφορετικού είδους, εφαρμοζόμενων στο ίδιο σύστημα απαντάται συχνά σε εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου. Ο συντονισμός των μέτρων ελέγχου είναι μία εκ των ουκ άνευ ιδιοτήτων μίας συνολικής στρατηγικής ελέγχου που έχει υπό την εποπτεία της διάφορα μέτρα ελέγχου του ιδίου ή διαφορετικού είδους. Κατά σύμβαση ονομάζουμε τον έλεγχο που παρέχεται από μία στρατηγική που λαμβάνει υπόψη της μέτρα ελέγχου του ιδίου είδους *συντονισμένο έλεγχο*, ενώ όταν υπάρχουν διαφορετικού είδους μέτρα ελέγχου λέμε ότι έχουμε *ολοκληρωμένο έλεγχο*. Τα κύρια μέτρα ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν σ' ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμων είναι ο έλεγχος της ροής των ραμπών εισόδου (ramp metering), η καθοδήγηση πορείας (route guidance), τα μεταβλητά όρια ταχύτητας (variable speed limits) και ο έλεγχος ροής από αυτοκινητόδρομο σε αυτοκινητόδρομο. Στην παρούσα εργασία, θα εστιάσουμε την προσοχή μας στον συντονισμένο έλεγχο ραμπών εισόδου σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων μεγάλης κλίμακας. Στο [23] αναφερθήκαμε στον ολοκληρωμένο έλεγχο ραμπών εισόδου και καθοδήγησης πορείας.

### 1.2.2 Έλεγχος ράμπας εισόδου

Ο έλεγχος ράμπας εισόδου είναι ένα από τα βασικά και πλέον αποτελεσματικά μέτρα ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων. Η βασική αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στη συνεχή ρύθμιση, με βάση κάποιον προαποφασισμένο κανόνα που ονομάζεται στρατηγική ελέγχου, του αριθμού των οχημάτων που επιτρέπεται να εισέλθουν στο κυρίως ρεύμα της κυκλοφοριακής ροής (δηλαδή τον αυτοκινητόδρομο), μέσω των ραμπών εισόδου.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται μία ράμπα εισόδου μέσω της οποίας οχήματα εισέρχονται στο κυρίως ρεύμα κυκλοφορίας. Πιο συγκεκριμένα, χωρίζουμε το τμήμα του αυτοκινητοδρόμου που μας ενδιαφέρει σε δύο τμήματα, ένα ανάντη της ράμπας, κι ένα κατάντη της ράμπας. Η κυκλοφοριακή ζήτηση που εμφανίζεται στην αρχή της ράμπας εισόδου, είτε από κάποιο αστικό οδικό δίκτυο είτε από κάποιον άλλο αυτοκινητόδρομο, αναμιγνύεται με τη ροή του κυρίου ρεύματος που κατέρχεται από το ανάντη τμήμα του αυτοκινητοδρόμου και προωθείται στο κατάντη τμήμα. Το εμπειρικό γεγονός που χαρακτηρίζει αυτό το φαινόμενο είναι διττό. Πρώτον, η ζήτηση της ράμπας εισόδου ικανοποιείται εις βάρος της πεπερασμένης χωρητικότητας του αυτοκινητοδρόμου, και δεύτερον, η διαδικασία μίξης των οχημάτων της ανάντη ροής με τη ροή της ράμπας



Σχήμα 1.1: Ράμπα εισόδου.

οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας στην περιοχή γύρω από τη ράμπα. Αυτή η μείωση της ταχύτητας μεγιστοποιείται όταν η είσοδος των οχημάτων που βρίσκονται στην ουρά της ράμπας εισόδου είναι άναρχη και μη ελεγχόμενη.

Προκειμένου να αποφευχθεί η άναρχη είσοδος των οχημάτων από την ουρά στην κυκλοφορία εγκαθίστανται φωτεινοί σηματοδότες στη διασταύρωση της ράμπας με τον αυτοκινητόδρομο. Η στρατηγική ελέγχου προσδιορίζει τη λειτουργία του φωτεινού σηματοδότη έτσι ώστε να ρυθμίζεται η είσοδος των οχημάτων στο κύριο ρεύμα σύμφωνα με τη λογική αρχή βάσει της οποίας σχεδιάστηκε.

Στην πράξη, η λειτουργία του φωτεινού σηματοδότη λαμβάνει δύο μορφές. Η πρώτη υπογορεύει την είσοδο ενός οχήματος κάθε φορά που ο σηματοδότης δείχνει πράσινο, ενώ η δεύτερη κάνει χρήση της περιόδου φωτεινής σηματοδότησης όπως και στα αστικά οδικά δίκτυα. Λειτουργικοί περιορισμοί αφορούν την ελάχιστη διάρκεια του πράσινου φωτός, καθώς και τη μέγιστη επιτρεπτή ουρά που είναι ανεκτό να σχηματιστεί μέσα στη ράμπα.

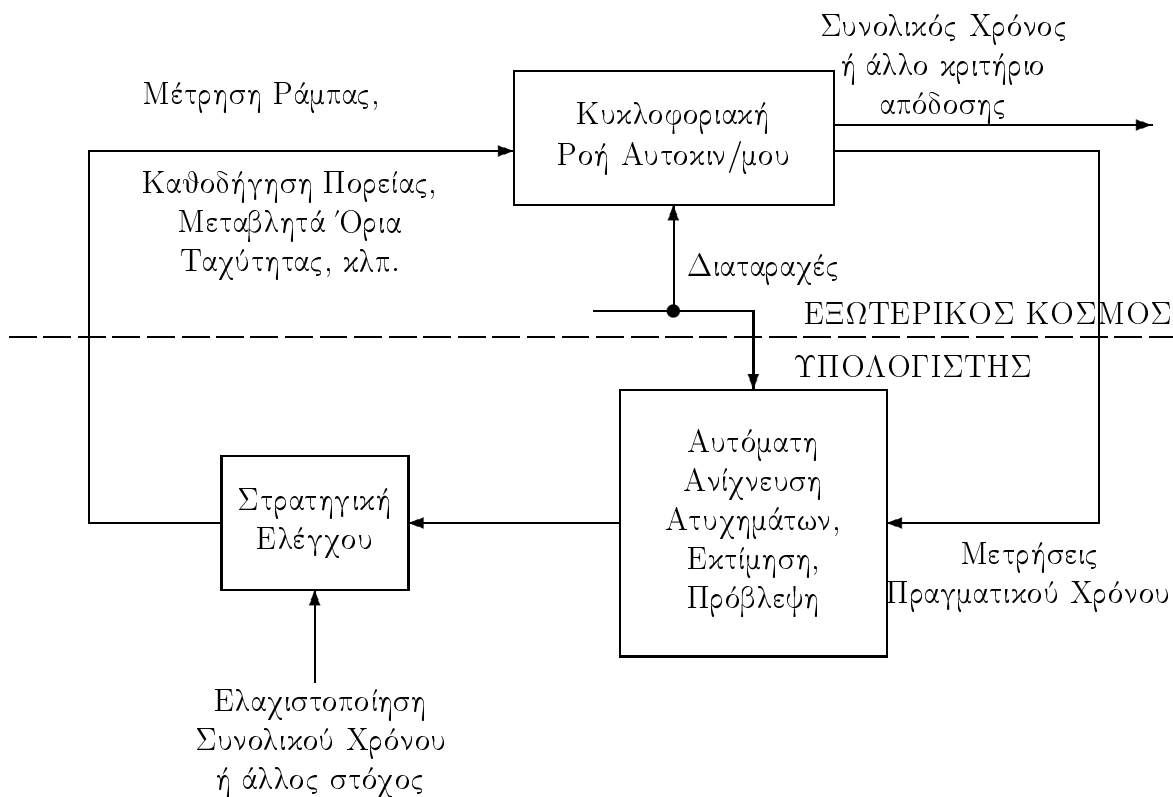
Αυτοί οι περιορισμοί είναι συγκεκριμένοι σε κάθε περίπτωση και εξαρτώνται από τις αποφάσεις των υπευθύνων για τη λειτουργία του κυκλοφοριακού συστήματος. Ο σχεδιασμός όμως των στρατηγικών ελέγχου πρέπει να είναι γενικός προκειμένου να είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε δίκτυο αυτοκινητοδρόμων.

Οι στρατηγικές ελέγχου ραμπών εισόδου στοχεύουν στον προσδιορισμό της κυκλοφοριακής ροής που θα πρέπει να εισέλθει από την ουρά στην κυκλοφορία κατά τη διάρκεια ενός διακριτού βήματος ελέγχου. Ο προσδιορισμός αυτού του μεγέθους οδηγεί και στην αντίστοιχη ακολουθία πράσινου και κόκκινου ανάλογα με τις προδιαγραφές λειτουργίας του φωτεινού σηματοδότη, με βάση έναν απλό μετασχηματισμό. Έτσι ο προσδιορισμός του αριθμού των οχημάτων στα οποία θα επιτραπεί η είσοδος κατά τη διάρκεια ενός διακριτού βήματος ελέγχου, είναι αρκετός στα πλαίσια μιας μελέτης για τον σχεδιασμό μιας στρατηγικής ελέγχου.

### 1.3 Ο Βρόχος Ελέγχου

Έχοντας περιγράψει με γενικούς όρους την κυκλοφοριακή διαδικασία και τα μέτρα ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν πάνω της, θα πρέπει να εντάξουμε όλες αυτές τις έννοιες σ' ένα ενιαίο πλαίσιο. Αυτό το εννοιολογικό πλαίσιο το παρέχει η θεωρία αυτομάτου ελέγχου. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται τα βασικά στοιχεία του βρόχου ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής, της οποίας η συμπεριφορά εξαρτάται από ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες που χαρακτηρίζουν τη δυναμική της. Οι εξωγενείς παράγοντες





Σχήμα 1.2: Διαδικασία κυκλοφοριακής ροής υπό έλεγχο.

μπορούν να καταταχθούν σε δύο κατηγορίες:

- Είσοδοι ελέγχου, που είναι ευθέως συσχετισμένες με τα αντίστοιχα μέσα ελέγχου, όπως φωτεινοί σηματοδότες, κ.λ.π. Οι είσοδοι ελέγχου επιλέγονται από μία επιτρεπτή περιοχή ελέγχου που προσδιορίζεται από τεχνικούς και επιχειρησιακούς περιορισμούς.
- Διαταραχές, που είναι μη ελεγχόμενες είσοδοι από το περιβάλλον του κυκλοφοριακού συστήματος. Οι τιμές τους δεν μπορούν να ελεγχθούν αλλά μπορεί να είναι μετρήσιμες (ζήτηση), ανιχνεύσιμες (ατυχήματα), ή προβλέψιμες για κάποιον χρονικό ορίζοντα (ροή που εξέρχεται από τον αυτοκινητόδρομο).

Το κριτήριο απόδοσης του δικτύου ποικίλει ανάλογα με την περίπτωση για την οποία γίνεται ο έλεγχος. Είναι αναγκαίο το κριτήριο να είναι μετρήσιμο και υπολογίσιμο, έμμεσα ή άμεσα, με βάση τους αισθητήρες που υπάρχουν μέσα στο δίκτυο έτσι ώστε να είναι δυνατή η ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Το κριτήριο απόδοσης που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ο Συνολικός Χρόνος (ΣΧ) όλων των οχημάτων που ξοδεύουν καθώς ταξιδεύουν μέσα στους αυτοκινητοδρόμους, και καθώς περιμένουν στην ουρά αναμονής μέσα στις ράμπες εισόδου.

Αισθητήρες τοποθετημένοι μέσα στο δίκτυο παρέχουν μετρήσεις πραγματικού χρόνου που χρησιμοποιούνται, σε συνδιασμό με μετρήσεις των διαταραχών, από αλγόριθμους αυτόματης ανίχνευσης ατυχημάτων, εκτίμησης της κατάστασης του συστήματος, και πρόβλεψης των διαταραχών. Οι αλγόριθμοι αυτοί εμπλουτίζουν την πληροφορία

που παρέχεται από τους αισθητήρες με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων. Κατ' αυτόν τον τρόπο η μέγιστη δυνατή πληροφορία είναι στη διάθεση της στρατηγικής ελέγχου για τους παραπέρα υπολογισμούς που πρέπει να πραγματοποιήσει.

Η στρατηγική ελέγχου είναι ο πυρήνας κάθε συστήματος κυκλοφοριακού ελέγχου που προσδιορίζει, με βάση τις τρέχουσες και προηγούμενες εκτιμήσεις της κατάστασης του συστήματος και των διαταραχών, τις απαραίτητες ενέργειες ελέγχου που θα βελτιστοποιήσουν το προεπιλεγμένο κριτήριο απόδοσης. Ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζονται αυτές είναι συνέπεια του σχεδιασμού της στρατηγικής ελέγχου. Τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο πρακτικών εφαρμογών, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός στρατηγικών ελέγχου που διαφοροποιούνται ως προς τα μέσα που χρησιμοποιούν, την γεωγραφική κατανομή τους, το βαθμό συνεργασίας μεταξύ τους, καθώς και την αξιοποιούμενη πληροφορία.

## 1.4 Η Βιβλιογραφία για τον Έλεγχο Ροής των Ραμπών Εισόδου

Ο έλεγχος των ραμπών εισόδου είναι από τα πρώτα μέτρα ελέγχου που υλοποιήθηκαν στους αυτοκινητοδρόμους των Η.Π.Α. κατά τη δεκαετία του 1960. Οι πρώτες στρατηγικές ελέγχου βασίζονταν σε προεπιλεγμένα πλάνα σηματοδότησης σύμφωνα με την ώρα της ημέρας. Αυτά τα πλάνα εξαγώταν βάση ιστορικών μετρήσεων, κάτι που αναπόφευκτα οδήγησε σε προβλήματα λόγω μη αντίδρασης σε μη αναμενόμενες καταστάσεις. Έτσι από την ίδια χρονική περίοδο αρχίζουν να εμφανίζονται και τοπικές στρατηγικές ελέγχου που αντιδρούν στις τρέχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Τέτοια συστήματα εφαρμόστηκαν πειραματικά κατά τη δεκαετία του '60 στο Detroit, στη Νέα Υόρκη, στο St. Louis, και στο Σικάγο. Η εξέλιξη αυτών των συστημάτων έγινε σταδιακά συμβαδίζοντας με την τεχνολογική πρόοδο αλλά και με την επιδείνωση των κυκλοφοριακών προβλημάτων.

Οι πιο απλές στρατηγικές ελέγχου είναι οι στρατηγικές σταθερού χρόνου (fixed-time ramp metering strategies) όπου οι φωτεινοί σηματοδότες ρυθμίζονται ανάλογα με την ώρα. Οι αναγκαίοι υπολογισμοί δεν γίνονται σε πραγματικό χρόνο και δεν χρησιμοποιούνται δεδομένα της τρέχουσας κυκλοφοριακής κατάστασης. Απλά στατικά μοντέλα χρησιμοποιούν δεδομένες ιστορικές μετρήσεις της ζήτησης σε κάθε ράμπα προκειμένου να προσδιοριστεί ο τρόπος λειτουργίας του φωτεινού σηματοδότη ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Ένας αυτοκινητόδρομος με ράμπες εισόδου και εξόδου υποδιαιρείται σε τμήματα που το καθένα απ' αυτά περιέχει μία ράμπα εισόδου. Τότε είναι

$$q_j = \sum_{i=1}^j \alpha_{i,j} r_i \quad (1.1)$$

όπου  $q_j$  είναι η ροή (οχ./ώρα) του αυτοκινητοδρόμου στο τμήμα  $j$ ,  $r_i$  είναι η ροή της ράμπας εισόδου που ανήκει στο τμήμα  $i$  και  $\alpha_{i,j} \in [0, 1]$  εκφράζει το γνωστό ποσοστό των οχημάτων που εισέρχονται στο τμήμα  $i$  και δεν εξέρχονται από τον αυτοκινητόδρομο μέχρι ανάντη του τμήματος  $j$ . Προκειμένου να μην υπάρξει συμφόρηση θα πρέπει

$$q_j \leq q_{j,cap} \quad \forall j \quad (1.2)$$

όπου  $q_{j,cap}$  είναι η ικανότητα του τμήματος  $j$ . Επιπλέον, υπάρχουν οι περιορισμοί

$$r_{j,min} \leq r_j \leq \min\{r_{j,max}, d_j\} \quad (1.3)$$

όπου  $d_j$  είναι η ζήτηση της ράμπας  $j$ . Αυτή η προσέγγιση προτάθηκε πρώτα στο [48]. Παρόμοιες μορφοποιήσεις μπορούν να βρεθούν στα [50], [44], [45], [46], [11] και [39].

Ένα αντικειμενικό κριτήριο προς μεγιστοποίηση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά το σχεδιασμό αυτών των στρατηγικών, είναι ο συνολικός αριθμός των οχημάτων που εξυπηρετούνται, κάτι που ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση του ΣΧ, δηλαδή

$$\sum_j r_j \rightarrow \max. \quad (1.4)$$

Άλλο αντικειμενικό κριτήριο μπορεί να είναι η συνολικά διανυθείσα απόσταση, δηλαδή

$$\sum_j \Delta_j q_j \rightarrow \max \quad (1.5)$$

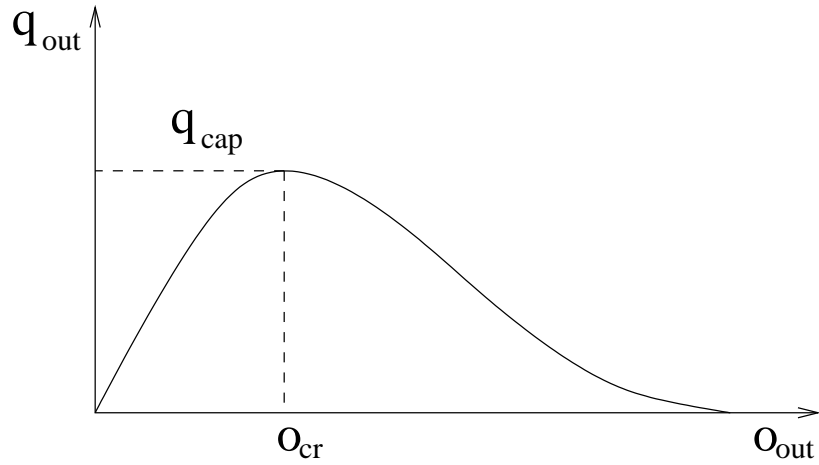
όπου  $\Delta_j$  το μήκος του τμήματος  $j$ , ή η εξισορρόπηση των ουρών που σχηματίζονται στις ράμπες, δηλαδή

$$\sum_j (d_j - r_j)^2 \rightarrow \min. \quad (1.6)$$

Οι παραπάνω μορφοποιήσεις του προβλήματος οδηγούν σε γραμμικά ή τετραγωνικά προβλήματα βελτιστοποίησης που μπορούν να λυθούν εύκολα. Μία επέκταση αυτής της προσέγγισης που βασίζεται σε μία δυναμική εκδοχή της (1.1) προτάθηκε στο [29].

Το βασικό μειονέκτημα των στρατηγικών σταθερού χρόνου είναι το γεγονός ότι βασίζονται σε ιστορικά και όχι σε δεδομένα πραγματικού χρόνου. Αυτό οδηγεί σε μία υπεραπλούστευση του πραγματικού προβλήματος ελέγχου γιατί οι ζητήσεις δεν είναι σταθερές μέσα στη μέρα και μπορεί να μεταβάλλονται από μέρα σε μέρα. Επίσης, τα ιστορικά δεδομένα παρουσιάζουν το φαινόμενο της γήρανσης, κάτι που κάνει και τα βελτιστοποιημένα πλάνα ξεπερασμένα με τον καιρό. Επιπλέον, μπορεί να υπάρξουν απρόβλεπτα συμβάντα μέσα στον δρόμο για τα οποία δεν μπορεί να προσδιορισθεί η πρόβλεψη αντίδραση της στρατηγικής εκ των προτέρων και χωρίς τη χρήση μετρήσεων πραγματικού χρόνου. Αυτή η έλλειψη χρήσης μετρήσεων πραγματικού χρόνου μπορεί να οδηγήσει τη στρατηγική είτε στο να υπερφορτώσει τον αυτοκινητόδρομο φτάνωντάς τον στα όρια του, είτε να δημιουργήσει μη αναγκαίες ουρές στις ράμπες εισόδου. Κατά συνέπεια το επόμενο λογικό βήμα στο σχεδιασμό στρατηγικών ελέγχου της ροής των ραμπών εισόδου είναι η χρήση μετρήσεων πραγματικού χρόνου.

Θα πρέπει, σ' αυτό το σημείο, να περιγράψουμε το είδος των μετρήσεων που μπορούν να συλλεγούν από τον αυτοκινητόδρομο και τις ράμπες εισόδου. Η πιο διαδεδομένη μορφή αισθητήρα που απαντάται πρακτικά σ' όλα τα δίκτυα όπου υπάρχει επιτήρηση της κυκλοφορίας είναι ο φωρατής. Πρόκειται για ένα ορθογώνιο πλαίσιο στην επιφάνεια του δρόμου, σε κάθε λωρίδα, όπου με τη βοήθεια του επαγωγικού φαινομένου μπορεί να προσδιορισθεί η παρουσία ενός οχήματος που περνάει από πάνω του. Ο αριθμός των οχημάτων που περνούν κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος δίνει τη ροή του αυτοκινητοδρόμου. Μετρώντας επίσης το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ο φωρατής είναι κατειλημένος λαμβάνουμε το ποσοστό κατάληψης του δρόμου, που είναι ένα μέγεθος ευθέως ανάλογο της κυκλοφοριακής πυκνότητας. Αν απαιτούνται μετρήσεις ταχύτητας τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν πιο σύνθετες διατάξεις διπλών φωρατών. Άλλου τύπου αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι αισθητήρες υπέρηχων και λέιζερ, που δίνουν μετρήσεις ροής και ταχύτητας, καθώς και βιντεοκάμερες που δίνουν μετρήσεις ταχύτητας, ροής και πυκνότητας μέσω κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας εικόνων.



Σχήμα 1.3: Το θεμελιώδες διάγραμμα.

Οι στρατηγικές ελέγχου της ροής των ραμπών εισόδου που χρησιμοποιούν μετρήσεις πραγματικού χρόνου χωρίζονται σε τοπικές στρατηγικές (local ramp metering) και σε στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου. Οι τοπικές στρατηγικές χρησιμοποιούν μετρήσεις που λαμβάνονται από αισθητήρες που βρίσκονται τοποθετημένοι στην περιοχή γύρω από την ελεγχόμενη ράμπα, ενώ οι στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου χρησιμοποιούν μετρήσεις που λαμβάνονται από αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε μία ευρύτερη περιοχή.

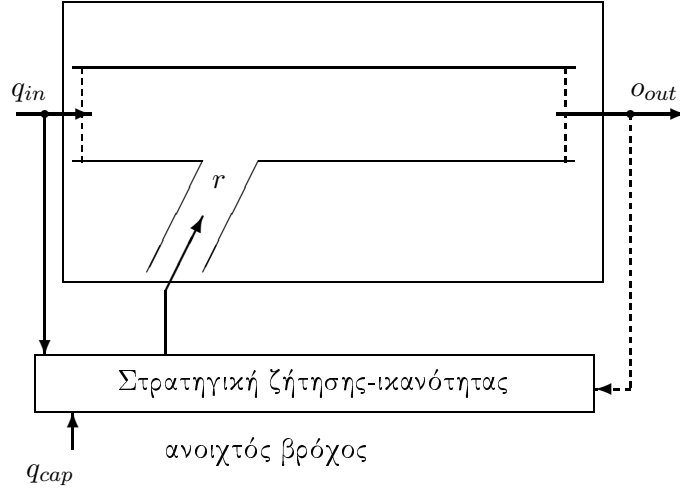
Η πλέον διαδεδομένη στρατηγική τοπικού ελέγχου στη Βόρειο Αμερική είναι η στρατηγική ζήτησης-ικανότητας (demand-capacity) η οποία υπολογίζει τη ροή της ράμπας για το διακριτό χρονικό βήμα  $k$ ,  $r(k)$ , με βάση τον κανόνα

$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k-1) & \text{αν } o_{out}(k) \leq o_{cr} \\ r_{min} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (1.7)$$

όπου  $q_{cap}$  είναι η ικανότητα του αυτοκινητοδρόμου κατάντη της ράμπας,  $q_{in}$  είναι η μέτρηση της ροής ανάντη της ράμπας,  $o_{out}$  είναι η μέτρηση του ποσοστού κατάληψης (occupancy) του αυτοκινητοδρόμου κατάντη της ράμπας,  $o_{cr}$  είναι το κρίσιμο ποσοστό κατάληψης όπου η ροή του αυτοκινητοδρόμου γίνεται μέγιστη και  $r_{min}$  είναι η προκαθορισμένη ελάχιστη ροή της ράμπας που επιβάλλεται προκειμένου να μην κλείσει εντελώς για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στο σχήμα 1.3 απεικονίζεται το θεμελιώδες διάγραμμα (fundamental diagram) όπου φαίνεται η σχέση μεταξύ των μεγεθών που αναφέρθηκαν.

Η στρατηγική (1.7) επιχειρεί να προσθέσει στη ροή που μετράται ανάντη,  $q_{in}(k-1)$ , τόση ροή  $r(k)$  όση είναι αναγκαία έτσι ώστε η κατάντη ροή να φτάσει την ικανότητα του αυτοκινητοδρόμου  $q_{cap}$ . Αν όμως, για κάποιο λόγο, η κατάντη ροή γίνει μεγαλύτερη της κρίσιμης, τότε η ροή της ράμπας γίνεται ίση με την ελάχιστη δυνατή, προκειμένου να αποφευχθεί ή να διαλυθεί μία συμφόρηση στο κατάντη τμήμα. Στο σχήμα 1.4 φαίνεται το διάγραμμα της λειτουργίας αυτής της στρατηγικής.

Από το σχήμα 1.4 είναι φανερό ότι το  $r$  είναι μία μεταβλητή ελέγχου, το κατάντη ποσοστό κατάληψης  $o_{out}$  είναι η μετρούμενη έξοδος του συστήματος ενώ η ανάντη ροή  $q_{in}$  είναι μία διαταραχή στο σύστημα. Άρα η (1.7) δεν είναι μία αναδραστική στρατηγική κλειστού βρόχου αλλά μία στρατηγική ανοιχτού βρόχου απόρριψης διαταραχής



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα λειτουργίας της στρατηγικής ζήτησης-ικανότητας.

(disturbance-rejection). Είναι γνωστό ότι γενικά αυτού του είδους οι στρατηγικές είναι αρκετά ευαίσθητες σε άλλες μη-μετρήσιμες διαταραχές.

Η στρατηγική ποσοστού κατάληψης, που περιγράφεται στο [26], βασίζεται στην ίδια φιλοσοφία όπως η στρατηγική ζήτησης-ικανότητας, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί μία εκτίμηση της ροής  $q_{in}$  που επιτυγχάνεται με τη χρήση μετρήσεων του ποσοστού κατάληψης στο ανάντη τμήμα του αυτοκινητοδρόμου. Κάτω από ορισμένες συνθήκες αυτή η στρατηγική μπορεί να μειώσει το κόστος εφαρμογής του ελέγχου ροής ράμπας εισόδου.

Μία τοπική στρατηγική κλειστού βρόχου που προτάθηκε στο [34] (ALINEA) έχει τη μορφή

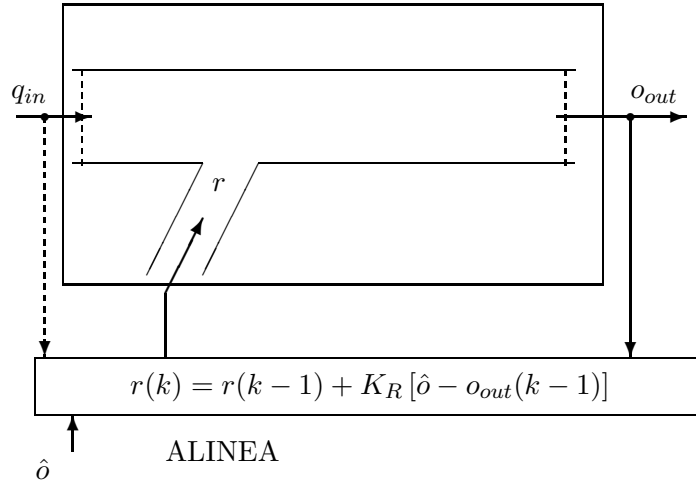
$$r(k) = r(k-1) + K_R [\hat{o} - o_{out}(k-1)] \quad (1.8)$$

όπου  $K_R$  είναι μία παράμετρος του ελεγκτή και  $\hat{o}$  είναι το επιθυμητό ποσοστό κατάληψης του αυτοκινητοδρόμου κατάντη της ράμπας. Συνήθως, αλλά όχι πάντα,  $\hat{o} = o_{cr}$ , οπότε η κατάντη ροή γίνεται ίση με τη χωρητικότητα  $q_{cap}$ . Εμπειρικά έχει βρεθεί ότι η ALINEA δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην παράμετρο  $K_R$ . Η αρχή λειτουργίας της ALINEA φαίνεται στο σχήμα 1.4.

Η στρατηγική ζήτησης-ικανότητας αντιδρά μόνο όταν το ποσοστό κατάληψης κατάντη της ράμπας ξεπεράσει το κρίσιμο σημείο  $o_{cr}$  και αυτό γίνεται με άκομφο τρόπο. Αντίθετα, η ALINEA αντιδρά με ομαλό και ήπιο τρόπο ακόμη και σε μικρές διαφορές  $\hat{o} - o_{out}(k-1)$  και έτσι μπορεί να προλάβει τη δημιουργία της συμφόρησης σταθεροποιώντας την κατάντη ροή σ' ένα υψηλό επίπεδο. Είναι επίσης φανερό από την (1.8) ότι στην στάσιμη κατάσταση, δηλαδή όταν η  $q_{in}$  είναι σταθερή, θα είναι  $o_{out}(k) = \hat{o}$ , παρόλο που δεν χρησιμοποιούνται καθόλου μετρήσεις της  $q_{in}$  από τη στρατηγική.

Το σημείο  $\hat{o}$  μπορεί να μεταβάλλεται, επιτρέποντας κατ' αυτόν τον τρόπο στην ALINEA να είναι μέρος ενός ευρύτερου συστήματος ιεραρχικού ελέγχου όπου τα σημεία  $\hat{o}$  κάθε ράμπας προσδιορίζονται με βάση κάποια γενικότερη λογική που αφορά ολόκληρο το δίκτυο κι όχι μόνον τις τοπικές συνθήκες.

Όλες οι στρατηγικές που αναφέρθηκαν υπολογίζουν μία ροή  $r$  για τη ράμπα εισόδου. Αν η υλοποίηση του ελέγχου χρησιμοποιεί περίοδο φωτεινής σηματοδότησης, τότε η



Σχήμα 1.5: Διάγραμμα λειτουργίας της ALINEA .

$r$  μετατρέπεται σε ένα χρονικό διάστημα  $g$  πράσινου στο σηματοδότη σύμφωνα με τη σχέση

$$g = \left( \frac{r}{r_{\max}} \right) \cdot c \quad (1.9)$$

όπου  $c$  είναι η προκαθορισμένη περίοδος φωτεινής σηματοδότησης και  $r_{\max}$  είναι η μέγιστη δυνατή ροή της ράμπας. Η διάρκεια του πράσινου  $g$  περιορίζεται στο διάστημα  $[g_{\min}, g_{\max}]$ , όπου  $g_{\min} > 0$  προκειμένου να αποφευχθεί το πλήρες κλείσιμο της ράμπας και  $g_{\max} \leq c$ . Στην περίπτωση όπου η υλοποίηση βασίζεται στην αρχή του ενός-οχήματος-ανά-πράσινο, τότε επιτρέπεται η είσοδος στον αυτοκινητόδρομο μόνο σ' ένα όχημα κάθε φορά που ανάβει πράσινο. Σ' αυτήν την περίπτωση η ροή  $r$  ελέγχεται με τη μεταβολή της διάρκειας της κόκκινης φάσης ανάμεσα στο ελάχιστο και στο μέγιστο.

Η ALINEA είναι εφαρμόσιμη και με όρους της διάρκειας της πράσινης φάσης, σύμφωνα με τη σχέση

$$g(k) = g(k-1) + K'_R [\hat{o} - o_{out}(k-1)] \quad (1.10)$$

όπου  $K'_R = K_R/r_{\max}$ . Οι ποσότητες  $r(k-1)$  και  $g(k-1)$  που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις (1.8) και (1.10), αντίστοιχα, θα πρέπει να είναι μέσα στα αντίστοιχα όρια τους, δηλαδή θα πρέπει πρώτα να φραγούν με τα άνω και κάτω όρια τους.

Αν η ουρά των οχημάτων στη ράμπα εισόδου γίνει πολύ μεγάλη τότε αρχίζει να επιδρά η κυκλοφορία του αυτοκινητοδρόμου στην κυκλοφορία του αστικού δικτύου. Οι μεγάλες ουρές μπορούν να εντοπιστούν με τη χρήση αισθητήρων τοποθετημένων κατάλληλα πάνω στο μήκος της ράμπας. Όταν το μέγεθος της ουράς περάσει ένα προκαθορισμένο κατώφλι, τότε γίνεται ένας υπερκερασμός της απόφασης της στρατηγικής ελέγχου με αντικειμενικό σκοπό την αύξηση της ροής της ράμπας εισόδου προκειμένου να μειωθεί το μήκος της ουράς που έχει σχηματισθεί.

Συγκριτικές μελέτες των στρατηγικών έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες χώρες με σκοπό τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητάς τους, όπως π.χ. στο [32]. Μία απ' αυτές έλαβε χώρα στη ράμπα Branchion στη δεξιόστροφη κατεύθυνση του Boulevard Périphérique του Παρισιού. Ένας αριθμός διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου εφαρμόστηκε για ένα μήνα η καθεμιά και για κάθε μία επιλέχθηκαν 13 τυπικές ημέρες,

Πίνακας 1.1: Συγκριτικά αποτελέσματα εφαρμογής τοπικού ελέγχου ροής ράμπας εισόδου.

Στρατηγική ελέγχου	ΣΧ		ΣΔΑ		ΜΤ		ΜΔΣ	
	οχ. ώρες	% αλλαγή	οχ. χιλ.	% αλλαγή	χιλ/ώρα	% αλλαγή	λεπτά	% αλλαγή
Χωρίς έλεγχο	421	—	16.463	—	39	—	108	—
ALINEA	354	-15,9	16.980	3,1	48	23,1	53	-50,9
Ζήτησης- χωρητικότητας	407	-3,3	15.143	-8,0	37	-5,1	108	0,0
Κατάληψης	438	0,4	15.673	-4,8	36	-7,7	103	-4,6

χωρίς να υπάρχει κάποιο ατύχημα κατά τη διάρκεια τους. Τα κριτήρια, βάση των οποίων συγκρίθηκαν, ήταν ο συνολικός χρόνος διαδρομής (ΣΧΔ) μέσα στον αυτοκινητόδρομο, ο συνολικός χρόνος αναμονής στη ράμπα εισόδου (ΣΧΑ), ο συνολικός χρόνος (ΣΧ) με  $\Sigma\chi = \Sigma\chi\Delta + \Sigma\chi\alpha$ , η συνολικά διανυθείσα απόσταση (ΣΔΑ), η μέση ταχύτητα ( $MT = \Sigma\Delta A / \Sigma\chi$ ) και η μέση διάρκεια συμφόρησης (ΜΔΣ) που είναι η συνολικός χρόνος κατά τη διάρκεια της πρωινής αιχμής, από 7:00 έως 10:00, όπου το ποσοστό κατάληψης του αυτοκινητοδρόμου ήταν μεγαλύτερο του  $o_{cr}$ . Στον πίνακα 1.1 φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για την περίοδο 7:00 π.μ. έως 10:00 π.μ. Είναι φανερό ότι η ALINEA οδηγεί στα καλύτερα αποτελέσματα.

Όλη η προηγούμενη ανάλυση αναφερόταν σε τοπικές στρατηγικές ελέγχου. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, η αποτελεσματικότητα αυτών των στρατηγικών περιορίζεται από το γεγονός ότι χρησιμοποιούν τοπικού χαρακτήρα πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Οι πολυμεταβλητές στρατηγικές ρύθμισης (multivariable regulator strategies) είναι μία προσέγγιση που κάνει χρήση μετρήσεων που λαμβάνονται από ένα μεγάλο τμήμα του αυτοκινητοδρόμου, με αντικειμενικό σκοπό να φέρει την κυκλοφοριακή κατάσταση σε μία προκαθορισμένη μορφή. Ενώ ο τοπικός έλεγχος εφαρμόζεται ανεξάρτητα σε κάθε ράμπα εισόδου βασιζόμενος μόνο σε τοπικές μετρήσεις, ο πολυμεταβλητός έλεγχος κάνει χρήση όλων των διαθέσιμων μετρήσεων  $o_i(k), i = 1, \dots, n$ , που λαμβάνονται από τον αυτοκινητόδρομο προκειμένου να γίνει ο ταυτόχρονος υπολογισμός των ροών  $r_i(k), i = 1, \dots, m$ , όλων των ραμπών εισόδου που ελέγχονται, βλ. [33]. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυτή η προσέγγιση είναι εν δυνάμει ποιοτική αποτελεσματική σε σχέση με τον τοπικό έλεγχο λόγω του εύρους της χρησιμοποιούμενης πληροφορίας. Η συστηματική και συνεπής χρήση των μετρήσεων πραγματικού χρόνου οδηγεί τη στρατηγική στο να αποφεύγει δράσεις ελέγχου που είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους. Πολυμεταβλητές προσεγγίσεις στο πρόβλημα του συντονισμένου ελέγχου ροής ράμπας εισόδου έχουν προταθεί στα [49], [18], [19], [16], [37], [1], [25], [12], [14], [31], [4], [9] και [53].

Η πολυμεταβλητή στρατηγική ρύθμισης METALINE μπορεί να θεωρηθεί μία γενίκευση της τοπικής αναδραστικής στρατηγικής ALINEA όπου οι ροές των ραμπών εισόδου υπολογίζονται από τη σχέση

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{r}(k-1) - \mathbf{K}_1 [\mathbf{o}(k) - \mathbf{o}(k-1)] + \mathbf{K}_2 [\hat{\mathbf{O}} - \mathbf{O}(k)] \quad (1.11)$$

όπου  $\mathbf{r} = [r_1 \dots r_m]^T$  είναι το διάνυσμα των ροών των  $m$  ελεγχόμενων ραμπών εισόδου,  $\mathbf{o} = [o_1 \dots o_n]^T$  είναι το διάνυσμα των μετρήσεων που συλλέγονται από τον αυτοκινητόδρομο,  $\mathbf{O} = [O_1 \dots O_m]^T$  είναι ένα υποσύνολο του  $\mathbf{o}$  που περιλαμβάνει τις  $m$

τοποθεσίες για τις οποίες είναι επιθυμητό το ποσοστό κατάληψής τους να διατηρηθεί στο προκαθορισμένο διάνυσμα  $\hat{\mathbf{O}} = [\hat{O}_1 \dots \hat{O}_m]^T$ . Τέλος, οι σταθερές  $\mathbf{K}_1$  και  $\mathbf{K}_2$  είναι οι πίνακες κέρδους (gain matrices) που πρέπει να σχεδιαστούν με κατάλληλο τρόπο, βλέπε [33] και [13].

Συγκρίσεις αποτελεσμάτων υλοποιήσεων και προσομοιώσεων για τις στρατηγικές ALINEA και METALINE δείχνουν ότι:

- Ενώ η ALINEA απαιτεί ελάχιστο σχεδιασμό, η METALINE απαιτεί εκτεταμένο σχεδιασμό που βασίζεται στη θεωρία του γραμμικού-τετραγωνικού βελτίστου ελέγχου.
- Για αυτοκινητοδρόμους που βρίσκονται σε αστικό περιβάλλον και έχουν μεγάλο αριθμό ραμπών εισόδου πολύ κοντά μεταξύ τους, δεν παρατηρήθηκε κάποια υπεροχή της METALINE έναντι της ALINEA, όταν η τελευταία εφορμόστηκε ανεξάρτητα σε κάθε ράμπα εισόδου.
- Στην περίπτωση συμφόρησης λόγω ατυχημάτων, η METALINE αποδίδει καλύτερα από την ALINEA, λόγω της πιο έγκαιρης χρήσης των διαθέσιμων μετρήσεων.

Παρόλα αυτά, ένα βασικό μειονέκτημα των αναδραστικών στρατηγικών που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα, είναι ότι αντιδρούν σε μία de facto κατάσταση που έχει ήδη δημιουργηθεί. Δεν καταπολεμούν τις αιτίες της συμφόρησης, αλλά προσπαθούν να τη μειώσουν όταν αυτή εμφανίζεται. Αντίθετα, μία στρατηγική που σχεδιάζεται με βάση τη θεωρία βελτίστου ελέγχου μπορεί να ανιχνεύσει τα αίτια μίας συμφόρησης, πριν αυτή λάβει χώρα, και εν συνεχεία να προσδιορίσει το βέλτιστο τρόπο αντίδρασης. Μία τέτοια στρατηγική ελέγχου θα πρέπει να έχει πληροφορίες σχετικά με τα παρακάτω:

- Προβλέψεις της ζήτησης για ένα ικανό μελλοντικό χρονικό διάστημα.
- Την τρέχουσα κατάσταση στον αυτοκινητόδρομο και στις ράμπες εισόδου.
- Την πεπερασμένη χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων των ραμπών εισόδου.
- Τους περιορισμούς λειτουργίας του ελέγχου των ραμπών.
- Την μη-γραμμική φύση της κυκλοφοριακής ροής, συμπεριλαμβανομένης και της πεπερασμένης χωρητικότητας των αυτοκινητοδρόμων.
- Ατυχήματα που έχουν συμβεί στον αυτοκινητόδρομο.

Όλη αυτή η πληροφορία εντάσσεται στο πλαίσιο ενός μη-γραμμικού δυναμικού μοντέλου και οι βέλτιστες κυκλοφοριακές συνθήκες προσδιορίζονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ένα συγκεκριμένο κριτήριο κόστους. Το μη-γραμμικό μοντέλο της κυκλοφορίας έχει τη μορφή

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{r}(k), \mathbf{d}(k)] \quad (1.12)$$

όπου το  $\mathbf{x}$  είναι το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος (στους αυτοκινητοδρόμους και στις ράμπες εισόδου),  $\mathbf{r}$  το διάνυσμα ελέγχου των ροών όλων των ραμπών εισόδου που ελέγχονται και  $\mathbf{d}$  είναι το διάνυσμα των διαταραχών. Οι περιορισμοί για τις μεταβλητές ελέγχου δίνονται από τη σχέση (1.3) ενώ οι περιορισμοί των ουρών των ραμπών από τη σχέση

$$w_i(k) \leq w_{i,\max} \quad (1.13)$$



όπου  $w_i$  είναι το μήκος της ουράς στη ράμπα  $i$ . Η στρατηγική ελέγχου εστιάζεται στην ελαχιστοποίηση ενός κριτηρίου κόστους της μορφής

$$J = \vartheta [\mathbf{x}(K)] + \sum_{k=0}^{K-1} \varphi [\mathbf{x}(k), \mathbf{r}(k), \mathbf{d}(k)] \quad (1.14)$$

όπου  $\vartheta$  και  $\varphi$  είναι διπλά διαφορίσιμες συναρτήσεις κόστους και  $K$  ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης. Έτσι, δεδομένης της αρχικής (τρέχουσας) κατάστασης του συστήματος  $\mathbf{x}(0)$ , της πρόβλεψης των διαταραχών  $\mathbf{d}(k)$ ,  $k = 0, \dots, K-1$ , το πρόβλημα συνίσταται στον προσδιορισμό των βέλτιστων ροών  $\mathbf{r}^*(k)$ ,  $k = 0, \dots, K-1$  που ελαχιστοποιούν το  $J$ , υπό τους περιορισμούς (1.3) και (1.13).

Οι στρατηγικές μη-γραμμικού βέλτιστου ελέγχου είναι υπέρτερες των υπόλοιπων στρατηγικών γιατί βασίζονται σε ρεαλιστικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους την έντονα μη-γραμμική φύση της κυκλοφοριακής ροής, χωρίς να καταφεύγουν σε κάποια προσέγγιση (π.χ. νευρωνικά δίκτυα) ή σε κάποια γραμμικοποίηση γύρω από ένα σημείο.

Αυτό το πρόβλημα και παραλλαγές του έχει αναλυθεί και λυθεί στα [7], [36], [30], [6], [5], [43], [51], [10], [22], [52], [3], [15] και [2]. Παρόλο που μελέτες προσομοίωσης έχουν δείξει ότι αυτού του τύπου οι στρατηγικές έχουν τη δυνατότητα να επιφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στο σύστημα, δεν έχει καμία τους εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες. Μία στρατηγική αυτού του είδους είναι και το AMOC, βλ. [23]. Το AMOC αποτελεί τον πυρήνα της στρατηγικής ελέγχου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 3 θα γίνει πιο εκτενής παρουσίασή του.

Οι εργασίες που περιγράφουν προσεγγίσεις μη-γραμμικού βέλτιστου ελέγχου προχωρούν μέχρι τη μελέτη των βέλτιστων τροχιών ανοικτού βρόχου κάτω από συνθήκες πλήρους γνώσης των διαταραχών, για ένα δοκιμαστικό και στοιχειώδες δίκτυο. Αντίθετα, σ' αυτήν την εργασία θα μελετηθεί και η συμπεριφορά του βέλτιστου ελέγχου κλειστού βρόχου έτσι όπως αυτός υλοποιείται με βάση την τεχνική του κυλιόμενου ορίζοντα, για ένα ρεαλιστικό δίκτυο ευρείας κλίμακας. Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστεί η επίδραση των σφαλμάτων των διαταραχών στην απόδοση της στρατηγικής κλειστού βρόχου, όπου σαν διαταραχές νοούνται οι ζητήσεις στις εισόδους του δικτύου, η συμπεριφορά πλοήγησης των οδηγών μέσα στο δίκτυο και η ύπαρξη συμβάντων (π.χ. κάποιο ατύχημα) μέσα σ' αυτό. Πέρα όμως από σφάλματα στις προβλέψεις των διαταραχών, σε μία πρακτική εφαρμογή υπάρχουν και σφάλματα των παραμέτρων του μοντέλου πάνω στο οποίο βασίζεται η στρατηγική ελέγχου. Με άλλα λόγια, οι παράμετροι του μοντέλου (π.χ. ταχύτητα ελεύθερης ροής, χωρητικότητα του αυτοκινητόδρομου) δεν αντιστοιχούν ακριβώς στα αντίστοιχα πραγματικά μεγέθη. Η επίδραση αυτής της διαφοράς των τιμών των παραμέτρων στην απόδοση του βέλτιστου ελέγχου δεν έχει εξεταστεί στη βιβλιογραφία.

Ένα άλλο σημείο που δεν έχει εξεταστεί ιδιαίτερα είναι η ισορροπία ανάμεσα στην αποτελεσματικότητα της στρατηγικής και της ισοτιμίας της προς τους οδηγούς που κάνουν χρήση του δικτύου. Τα δύο αυτά μεγέθη είναι μερικώς ανταγωνιστικά αλλά και τα δύο είναι απαραίτητα να υπάρχουν σε οποιαδήποτε στρατηγική συντονισμένου ελέγχου ροής σ' ένα δίκτυο. Στην παρούσα μελέτη αυτή η ισορροπία εξετάζεται λεπτομερώς.

Μία από τις κύριες συνεισφορές αυτής της εργασίας είναι η προτεινόμενη ιεραρχική δομή ελέγχου. Στη βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου εφαρμόζονται απευθείας στην κυκλοφοριακή ροή χάνωντας κατ' αυτόν τον τρόπο την πραγματική προοπτική του συστήματος. Από τη δική μας άποψη η βέλτιστες εισορές στο σύστημα και η αντίστοιχη βέλτιστη τροχιά κατά-

στασης είναι ευρύτεροι στρατηγικοί στόχοι τους οποίους προσπαθούμε να επιτύχουμε κάνοντας χρήση τοπικών στρατηγικών ελέγχου σ' ένα τακτικό επίπεδο. Οι τοπικές στρατηγικές ελέγχου έχουν αποδείξει ότι μπορούν να δημιουργήσουν στην περιοχή τους τις κυκλοφοριακές συνθήκες που τους δίνονται ως στόχοι. Δεν μπορούν όμως να καθορίσουν αυτούς τους στόχους. Σ' αυτό το σημείο βρίσκεται και το ιδιαίτερο στοιχείο της στρατηγικής που προτείνουμε. Η ιεραρχική δομή ελέγχου που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, συνδιάζει το μη-γραμμικό βέλτιστο έλεγχο με τον τοπικό σε μία ευέλικτη μορφή. Για πρώτη φορά περιγράφεται, εφαρμόζεται και μελετάται διεξοδικά μία τέτοια στρατηγική.

Τέλος, ένα δευτερεύων στοιχείο αυτής της εργασίας είναι η μοντελοποίηση του δικτύου των περιφερειακών δακτυλίων της περιοχής του Άμστερνταμ, συνολικού μήκους 143 χιλιομέτρων.

## 1.5 Περιεχόμενο της Εργασίας

Η εργασία αυτή είναι δομημένη ως εξής: στο Κεφάλαιο 2 γίνεται λεπτομερής παρουσίαση του μακροσκοπικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί τόσο για την προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής ενός δικτύου όσο και για το σχεδιασμό του AMOC. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα ευρείας κλίμακας δίκτυο αυτοκινητοδρόμων στο Άμστερνταμ της Ολλανδίας. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της ιεραρχικής δομής συντονισμένου ελέγχου ροών ραμπών εισόδου, μέσα στην οποία εντάσσεται το AMOC, όπου και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας της. Η εφαρμογή του AMOC σαν αυτόνομο εργαλείο περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4 όπου όπου εξετάζεται η συμπεριφορά του βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου για ένα μέρος του ευρύτερου δικτύου του Άμστερνταμ. Στο Κεφάλαιο 5 το ιεραρχικό σχήμα ελέγχου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 εφαρμόζεται κάτω από διάφορα σενάρια όσον αφορά τις προβλέψεις των διαταραχών και τη γνώση των παραμέτρων του συστήματος. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

## Κεφάλαιο 2

# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Η μαθηματική αναπαράσταση ενός φυσικού φαινομένου είναι αναγκαία για τη συστηματική και επισταμένη μελέτη του. Η λεπτομέρεια με την οποία αναλύονται τα βασικά συστατικά στοιχεία του φαινομένου, οι αλληλεπιδράσεις τους και η δυναμική τους εξαρτάται από το πλαίσιο μέσα στο οποίο εντάσσεται αυτό το μοντέλο. Για να ικανοποιηθούν διαφορετικές ανάγκες, μπορούν να αναπτυχθούν διαφορετικά μοντέλα του ιδίου φαινομένου. Το κύριο χαρακτηριστικό που επηρεάζει την επιλογή του μοντέλου είναι ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτεί. Μοντέλα που περιγράφουν το αντικείμενό τους σε μεγάλη λεπτομέρεια απαιτούν και υψηλό υπολογιστικό φόρτο και αντίστροφα. Καθώς μειώνεται η ακρίβεια περιγραφής μειώνεται και το υπολογιστικό κόστος. Ο υπολογιστικός χρόνος είναι κρίσιμη παράμετρος της εφαρμογής, όπως π.χ. σε εφαρμογές ελέγχου πραγματικού χρόνου, όπου η ακρίβεια της περιγραφής μπορεί να θυσιαστεί στο βωμό της ταχύτητας υπολογισμού.

Στην περίπτωση του φαινομένου της κυκλοφοριακής ροής σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων ευρείας κλίμακας, τα μαθηματικά πρότυπα που την περιγράφουν μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βαθμό ακρίβειας της περιγραφής. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα *μικροσκοπικά μοντέλα* τα οποία παρακολουθούν την ατομική κίνηση καθενός οχήματος ξεχωριστά καθώς ταξιδεύει μέσα στο δίκτυο. Ο αναγκαίος αριθμός των οχημάτων σε ένα τέτοιο σχήμα είναι της τάξεως μερικών χιλιάδων για ένα δίκτυο μετρίου μεγέθους. Αυτό σημαίνει αυξημένη πολυπλοκότητα που πολλαπλασιάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως ο τύπος του οχήματος και η συμπεριφορά των οδηγών. Είναι προφανές ότι ο αναγκαίος υπολογιστικός χρόνος είναι υψηλός για τα μικροσκοπικά μοντέλα που επιτυγχάνουν μεγαλύτερο βαθμό λεπτομέρειας στην περιγραφή τους. Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται τα *μεσοσκοπικά μοντέλα* τα οποία αντί να παρακολουθούν και να επιβλέπουν ατομικά οχήματα, παρακολουθούν και επιβλέπουν την κίνηση ομάδων οχημάτων που έχουν κάποια κοινά κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά, όπως π.χ. την ίδια πορεία μέσα στο δίκτυο. Στον αντίποδα αυτών των δύο προσεγγίσεων που είναι προσανατολισμένες προς αυτά καθευτά τα οχήματα ή ομάδες οχημάτων και τη δυναμική της κίνησής τους, βρίσκεται η προσέγγιση των *μακροσκοπικών μοντέλων* τα οποία περιγράφουν την κυκλοφοριακή ροή σαν ένα ρευστό που χαρακτηρίζεται από μακροσκοπικές μεταβλητές, όπως η

κυκλοφοριακή ροή, πυκνότητα και η μέση ταχύτητα των οχημάτων. Αποστασιοποιούμενη αυτή η προσέγγιση από την ατομική κίνηση των οχημάτων, αποδίδει βάρος στην ορθή περιγραφή του αθροιστικού αποτελέσματος όλων των κινήσεων των οχημάτων που βρίσκονται στο δίκτυο. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μακροσκοπική περιγραφή του φαινομένου της κυκλοφοριακής ροής, που φυσικά υπολείπεται σε λεπτομέρεια της μικροσκοπικής και της μεσοσκοπικής, αλλά απαιτεί ελάχιστο υπολογιστικό φόρτο, κάτι που την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές κυκλοφοριακού ελέγχου πραγματικού χρόνου. Επίσης, οι εξισώσεις των μακροσκοπικών μοντέλων έχουν αναλυτική μορφή πράγμα που είναι αναγκαίο για το σχεδιασμό στρατηγικών βελτίστου ελέγχου.

Μοντέλα και των τριών κατηγοριών μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της μελέτης προβλημάτων κυκλοφοριακού ελέγχου. Προκειμένου να μελετηθεί και να εκτιμηθεί η επίδραση μιας στρατηγικής ελέγχου μέσω προσομοίωσης, ένα μοντέλο οποιασδήποτε κατηγορίας μπορεί να αναλάβει το ρόλο του πραγματικού φαινομένου της κυκλοφοριακής ροής, τοποθετούμενο στο στοιχείο «Κυκλοφοριακή Ροή Αυτοκιν/μου» στο σχήμα 1.2. Όσο πιο λεπτομερές είναι το μοντέλο, τόσο περισσότερο λεπτομερές θα είναι η μελέτη αυτής της επίδρασης και τόσο πιο χρονοβόρα θα είναι η όλη διαδικασία.

Αν εστιάσουμε όμως την προσοχή μας στο στοιχείο «Στρατηγική Ελέγχου» του σχήματος 1.2, τότε, αν χρησιμοποιηθεί ως βάση σχεδιασμού της στρατηγικής ελέγχου ένα μοντέλο κυκλοφοριακής ροής, πρέπει αυτό να είναι μακροσκοπικό αφού ο κυκλοφοριακός έλεγχος πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο και άρα το μοντέλο πάνω στο οποίο βασίζεται πρέπει να χαρακτηρίζεται από χαμηλούς υπολογιστικούς χρόνους. Αυτή η συνθήκη ικανοποιείται μόνο από τα μακροσκοπικά μοντέλα. Για μία γενικότερη ανάλυση της σχέσης των μοντέλων κυκλοφοριακής ροής με τον έλεγχο της, βλ. [20].

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας χρησιμοποιείται το μακροσκοπικό μοντέλο METANET, βλ. [27]. Αυτό το μοντέλο το χρησιμοποιείται τόσο σαν προσομοιωτής της κυκλοφοριακής ροής όσο και σαν βάση σχεδιασμού στρατηγικής ελέγχου. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο METANET.

## 2.2 Το Μακροσκοπικό Μοντέλο METANET

### 2.2.1 Μοντελοποίηση του δικτύου

Προκειμένου να περιγραφεί η διαδικασία της κυκλοφοριακής ροής σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων, χρησιμοποιείται ένα επικυρωμένο, με βάση πραγματικά δεδομένα, μοντέλο. Το δίκτυο αναπαρίσταται σαν προσανατολισμένος γράφος, όπου οι σύνδεσμοί του αντιπροσωπεύουν μέρη αυτοκινητοδρόμων. Οι κόμβοι τοποθετούνται σε σημεία όπου υπάρχει αλλαγή γεωμετρίας, διασταύρωση ή ένωση δύο αυτοκινητοδρόμων ή ένωση αυτοκινητοδρόμου με ράμπα εισόδου ή εξόδου. Κατά σύμβαση σε κάθε κόμβο μπορούν να υπάρχουν συνολικά μέχρι τρεις προσκείμενοι σύνδεσμοι, εισερχόμενοι και εξερχόμενοι. Πολύπλοκες τοπολογίες δικτύων μπορούν να ληφθούν υπόψη με τη χρήση ψευδοσυνδέσμων και ψευδοκόμβων.

Η μακροσκοπική μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής δικτύων αυτοκινητοδρόμων μπορεί να λάβει επιπλέον υπόψη της τη συμπεριφορά των οδηγών ως προς την πορεία που ακολουθούν προκειμένου να φτάσουν στον προορισμό τους. Όταν μας ενδιαφέρει να συμπεριλάβουμε το μηχανισμό λήψης απόφασης σχετικά με την ακολουθητέα πορεία, ανάμεσα σ' ένα πλήθος εναλλακτικών πορειών, τότε κατά σύμβαση λέμε ότι έχουμε μοντελοποίηση προσανατολισμένη προς τους προορισμούς, ενώ στην αντίθετη περίπτωση έχουμε μοντελοποίηση μη-προσανατολισμένη προς τους προορισμούς.

Επειδή στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν θα ασχοληθούμε με μέτρα ελέγχου καθοδήγησης πορείας, δεν είναι αναγκαίο να παρουσιάσουμε την μοντελοποίηση που είναι προσανατολισμένη προς τους προορισμούς. Περιγράφεται στο [23] όπου ασχοληθήκαμε με τον ολοκληρωμένο έλεγχο ροής ράμπας εισόδου και καθοδήγησης πορείας.

## 2.2.2 Μοντελοποίηση των συνδέσμων

### Είδη συνδέσμων δικτύου

Τα είδη των συνδέσμων που συναποτελούν τον αναπαριστώντα το δίκτυο γράφο, διαφοροποιούνται ανάλογα με τη λειτουργία τους. Υπάρχουν οι σύνδεσμοι που αντιπροσωπεύουν τους αυτοκινητοδρόμους, οι σύνδεσμοι που αντιστοιχούν στις ράμπες εισόδου, οι σύνδεσμοι για τις ράμπες εξόδου και οι ψευδοσύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται για να αναλύονται περίπλοκες τοπολογίες. Επίσης υπάρχουν και σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης που χαρακτηρίζονται μόνο από την ικανότητα και το χρόνο διαδρομής τους.

### Σύνδεσμοι αυτοκινητοδρόμων

Κάθε ομοιόμορφο τμήμα ενός αυτοκινητοδρόμου δεν παρουσιάζει μεταβολές στη γεωμετρία του, έχει σταθερό αριθμό λωρίδων και δεν εμπεριέχει ανάμεσα στα άκρα που το καθορίζουν συμβολή με κάποιον άλλο αυτοκινητόδρομο ή ράμπα εισόδου ή εξόδου. Τόσο ο χρόνος  $t$  όσο και το μήκος  $L$  του αυτοκινητοδρόμου είναι διακριτοποιημένα. Το διακριτό βήμα του χρόνου είναι  $T$  (της τάξης των 10 δευτερολέπτων), ενώ για το σύνδεσμο  $m$  που αντιπροσωπεύει ένα ομοιόμορφο κομμάτι αυτοκινητοδρόμου, το διακριτό διάστημα είναι  $L_m$  (της τάξης των 400 – 800 μέτρων), σχήμα 2.1. Προκειμένου να υπάρξει ευστάθεια στο μοντέλο, θα πρέπει η χωρική και η χρονική διακριτοποίηση να μην επιτρέπουν σε οχήματα που οδεύουν με τη μέγιστη ταχύτητα  $v_{f,m}$  στο σύνδεσμο  $m$ , να μεταπηδήσουν από τη θέση τους σ' ένα διακριτό τμήμα του δρόμου στο μεθεπόμενο τμήμα ή παραπέρα κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος. Δηλαδή, στη χρονική διάρκεια  $T$  τα οχήματα που βρίσκονται σ' ένα διακριτό τμήμα, μπορούν να φτάσουν το πολύ μέχρι το επόμενο τμήμα του συνδέσμου, κι όχι παραπέρα. Γιαυτό θα πρέπει να ισχύει πάντα η ανισότητα

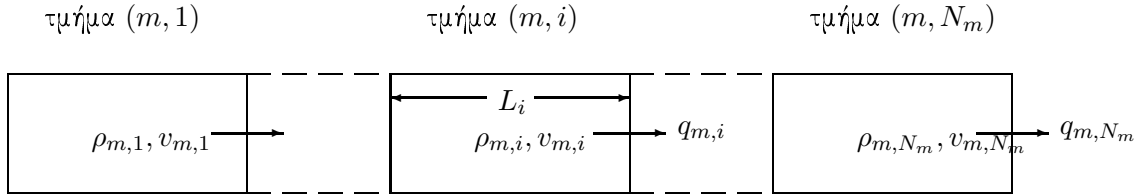
$$L_m > v_{f,m} \cdot T \quad (2.1)$$

Σ' ένα διακριτό τμήμα  $i$  ενός συνδέσμου  $m$  τη χρονική στιγμή  $t = kT$  οι κυκλοφοριακές συνθήκες χαρακτηρίζονται μακροσκοπικά από την κυκλοφοριακή ροή (ή φόρτος)  $q_{m,i}(k)$  (οχήματα/ώρα), την κυκλοφοριακή πυκνότητα  $\rho_{m,i}(k)$  (οχήματα/χιλιόμετρο/λωρίδα) και τη μέση ταχύτητα  $v_{m,i}(k)$  (χιλιόμετρα/ώρα). Η χωρική και χρονική εξέλιξη των κυκλοφοριακών συνθηκών κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου προσδιορίζεται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

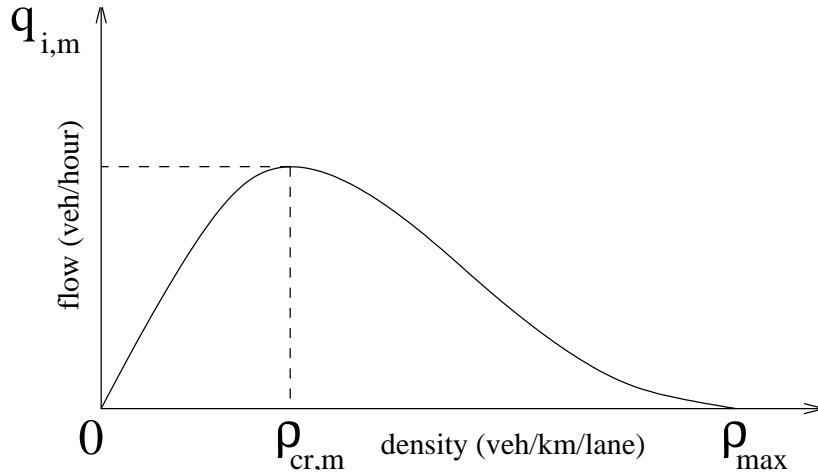
$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \Lambda_m} [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)] \quad (2.2)$$

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k) \Lambda_m \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} v_{m,i}(k+1) &= v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} \{V[\rho_{m,i}(k)] - v_{m,i}(k)\} \\ &\quad + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] \end{aligned}$$



Σχήμα 2.1: Διακριτά τμήματα ενός συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου.

Σχήμα 2.2: Το θεμελιώδες διάγραμμα για το διακριτό τμήμα αυτο/μου  $(i, m)$ .

$$-\frac{\nu T}{\tau L_m} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \quad (2.4)$$

$$V[\rho_{m,i}(k)] = v_{f,m} \exp \left[ -\frac{1}{a_m} \left( \frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}} \right)^{a_m} \right] \quad (2.5)$$

όπου  $\tau$ ,  $\nu$  και  $\kappa$  είναι παράμετροι που έχουν την ίδια τιμή για όλους τους συνδέσμους του δικτύου που αντιστοιχούν σε αυτοκινητοδρόμους.  $\Lambda_m$  είναι ο αριθμός των λωρίδων και  $a_m$  μία παράμετρος του θεμελιώδους διαγράμματος (εξίσωση (2.5)).  $\rho_{cr,m}$  είναι η κρίσιμη πυκνότητα του συνδέσμου  $m$  και αντιπροσωπεύει την πυκνότητα στην οποία επιτυγχάνεται μέγιστη ροή (σχήμα 2.2).

Στην περίπτωση που στην αρχή του συνδέσμου  $m$  συγκλίνουν δύο άλλοι σύνδεσμοι, ένας εκ των οποίων θεωρείται κύριος σύνδεσμος  $p$ , ενώ ο άλλος σύνδεσμος  $o$  θεωρείται σαν δευτερεύων, τότε, αν  $\Lambda_m \leq \Lambda_p + \Lambda_o$ , στην εξίσωση (2.4) για το πρώτο τμήμα του συνδέσμου  $m$  προστίθεται ο όρος:

$$-\frac{\delta T}{L_m \Lambda_m} \frac{q_\mu(k) v_{m,1}(k)}{\rho_{m,1}(k) + \kappa} \quad (2.6)$$

όπου  $\delta$  είναι παράμετρος του μοντέλου,  $q_\mu(k)$  είναι η εισερχόμενη ροή από το δευτερεύοντα σύνδεσμο. Αν  $\Lambda_m > \Lambda_p$  τότε υπάρχουν λωρίδες που διευκολύνουν την ένταξη των οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο (dedicated lanes). Σ' αυτήν την περίπτωση η  $q_\mu(k)$  ισούται με τη διαφορά της ροής του συνδέσμου  $\mu$  με τη χωρητικότητα αυτών των λωρίδων, αν αυτή είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Αν είναι μικρότερη του μηδενός, τότε ο όρος (2.6) δεν προστίθεται στην (2.4).

Αν μετά από έναν σύνδεσμο αυτοκινητοδρόμου  $m$  που έχει  $\Lambda_m$  λωρίδες βρίσκεται ένας άλλος σύνδεσμος αυτοκινητοδρόμου  $\mu$  με  $\Lambda_m < \Lambda_\mu$ , τότε αυτή η μείωση του αριθμού των λωρίδων έχει σαν συνέπεια την πτώση της ταχύτητας, κάτι που λαμβάνεται υπόψη στην εξίσωση (2.4) για το τελευταίο διακριτό τμήμα του συνδέσμου  $m$ ,  $\ell_m$ , με την πρόσθεση του όρου:

$$-\frac{\phi}{L_m \Lambda_m} \frac{\Delta \Lambda_{\rho_{m,\ell_m}}(k)}{\rho_{cr,m}} v_{m,\ell_m}(k)^2 \quad (2.7)$$

όπου  $\phi$  επίσης μία παράμετρος του μοντέλου και  $\Delta \Lambda$  είναι η διαφορά των λωρίδων.

### Σύνδεσμοι ραμπών εισόδου

Οι ράμπες εισόδου, συμπεριλαμβανομένων και των ανάντη ορίων των αυτοκινητοδρόμων, λαμβάνουν το κυκλοφοριακό φορτίο από το περιβάλλον του κυκλοφοριακού συστήματος και το προωθούν στο δίκτυο. Θεωρούμε ότι αυτή η ζήτηση για τη χρήση του δικτύου είναι γνωστή για όλο τον χρονικό ορίζοντα που μας ενδιαφέρει, π.χ. μέσω μιας πρόβλεψης που βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες σε μία ράμπα εισόδου  $o$  κατά τη χρονική περίοδο  $t = kT$  χαρακτηρίζονται από τη ζήτηση  $d_o(k)$  (οχ./ώρα), την ουρά που ενδεχομένως σχηματίζεται  $w_o(k)$  (οχήματα) και από τη ροή προς τον αυτοκινητόδρομο  $q_o(k)$  (οχ./ώρα). Η ουρά των οχημάτων εξελίσσεται στο χρόνο με βάση τη σχέση:

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T [d_o(k) - q_o(k)] \quad (2.8)$$

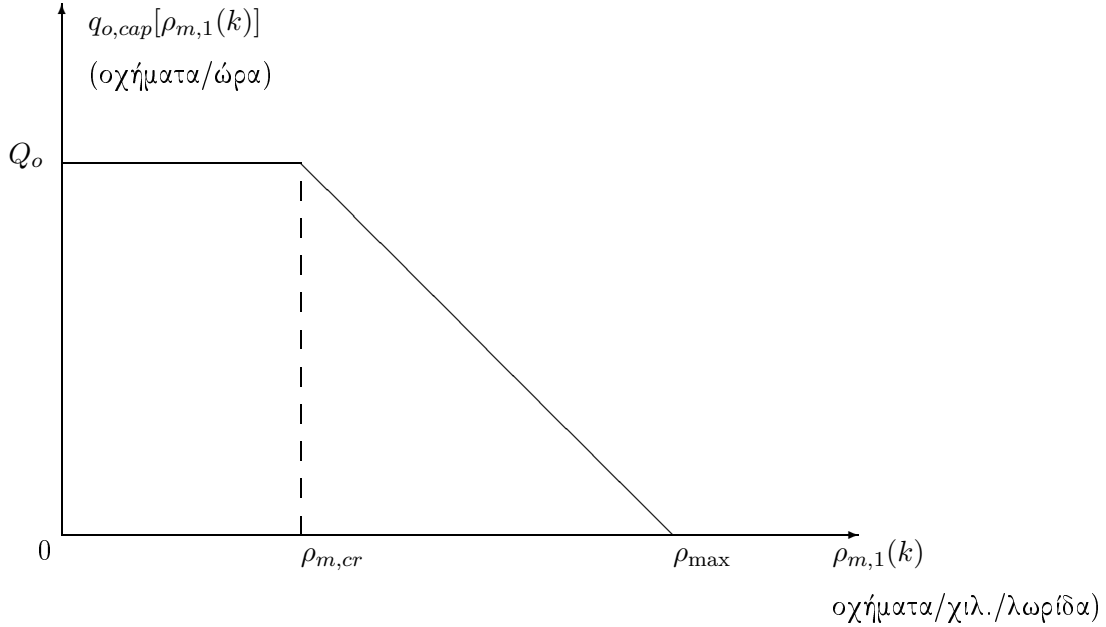
με

$$q_o(k) = \min \{ \hat{q}_{o,1}(k), \hat{q}_{o,2}(k) \} \quad (2.9)$$

$$\hat{q}_{o,1}(k) = d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T} \quad (2.10)$$

$$\hat{q}_{o,2}(k) = Q_o \min \left\{ 1, \frac{\rho_{\max} - \rho_{\mu,1}(k)}{\rho_{\max} - \rho_{cr,\mu}} \right\} \quad (2.11)$$

όπου  $Q_o$  είναι η ικανότητα της ράμπας (οχ./ώρα) όταν ο αυτοκινητόδρομος δεν έχει συμφόρηση και η είσοδος των οχημάτων μέσω της ράμπας σ' αυτόν είναι ανεμπόδιστη.  $\mu$  είναι ο κατάντη σύνδεσμος αυτοκινητοδρόμου και  $\rho_{\max}$  είναι η μέγιστη δυνατή πυκνότητα στο δίκτυο (οχ./χλμ/λωρίδα). Κατ' αυτόν τον τρόπο η εκροή της ράμπας εισόδου καθορίζεται είτε από την τρέχουσα ζήτηση ( $\hat{q}_{o,1} < \hat{q}_{o,2}$  στην (2.9)), είτε από τη γεωμετρική ικανότητα της ράμπας  $Q_o$  (αν η πυκνότητα κατάντη της ράμπας είναι μικρότερη της κρίσιμης, δηλαδή αν  $\rho_{\mu,1}(k) < \rho_{cr,\mu}$  στην (2.11)), είτε, τέλος, από τη μειωμένη ικανότητα της ράμπας λόγω της συμφόρησης που επικρατεί κατάντη της ράμπας (δηλαδή  $\rho_{\mu,1}(k) \geq \rho_{cr,\mu}$  στην (2.11)). Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η μεταβολή της ικανότητας της ράμπας συναρτήσει των κυκλοφοριακών συνθηκών στο κατάντη τμήμα αυτοκινητοδρόμου.



Σχήμα 2.3: Δυνατή εκροή από μία ράμπα συναρτήσει των κυκλοφοριακών συνθηκών του αυτοκινητοδρόμου.

### Σύνδεσμοι εξόδου

Οι ράμπες εξόδου, συμπεριλαμβανομένων και των κατάντη ορίων των αυτοκινητοδρόμων, λαμβάνουν τον κυκλοφοριακό όγκο του δικτύου και τον προωθούν στο περιβάλλον. Οι σύνδεσμοι αυτοί παρέχουν, όπως και οι σύνδεσμοι ραμπών εισόδου, συνοριακές συνθήκες στο μοντέλο. Υπάρχουν δύο δυνατότητες για αυτές τις συνθήκες. Είτε θα είναι γνωστές εκ των προτέρων, όπως και στην περίπτωση των ζητήσεων για τους συνδέσμους εισόδου, μέσω ενός αλγορίθμου πρόβλεψης, είτε δεν θα είναι γνωστές οπότε θα ισχύει η αρχή ότι το περιβάλλον έχει άπειρη χωρητικότητα και κατά συνέπεια όση ροή κι αν βγει από το δίκτυο δεν θα προκαλέσει πρόβλημα συμφόρησης στο περιβάλλον που να μεταδοθεί προς τα πίσω και να επηρεάσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου. Σ' αυτήν την περίπτωση, η εκροή από το δίκτυο εξαρτάται από την ικανότητα του συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου ανάντη του συνδέσμου εξόδου. Αν  $d$  είναι ο σύνδεσμος εξόδου και  $m$  είναι ο ανάντη σύνδεσμος, τότε η εκροή  $q_d(k)$  δίνεται από τη σχέση:

$$q_d(k) = \begin{cases} q_{m,\ell_m}(k) & \text{αν } \rho_{m,\ell_m}(k) \leq \rho_{cr,m} \\ V[\rho_{cr,m}] \rho_{cr,m} \Lambda_m & \text{αν } \rho_{m,\ell_m}(k) > \rho_{cr,m} \end{cases} \quad (2.12)$$

Η (2.12) θέτει ουσιαστικά έναν περιορισμό στη δυνατότητα εκροής του δικτύου. Παρόλο που το περιβάλλον θεωρείται ότι έχει άπειρη χωρητικότητα, η δυνατότητα εκροής του δικτύου είναι πεπερασμένη.



### Σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης

Οι σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης περιγράφουν με χαμηλότερη ακρίβεια την κυκλοφοριακή ροή. Χρησιμοποιούνται για την κυκλοφοριακή ροή σε αστικές περιοχές καθώς και στις συνδέσεις μεταξύ αυτοκινητοδρόμων, όταν εφαρμόζονται μέτρα ελέγχου αυτοκινητοδρόμου προς αυτοκινητόδρομο. Τα αστικά δίκτυα αποτελούνται από δρόμους και διασταυρώσεις ελεγχόμενες από φωτεινούς σηματοδότες, κάτι που τα καθιστά τοπολογικά πιο πολύπλοκα σε σχέση με τα δίκτυα των αυτοκινητοδρόμων. Η λεπτομερής περιγραφή των κυκλοφοριακών συνθηκών των αστικών δικτύων απαιτεί διαφορετική προσέγγιση που δεν είναι όμως αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Περιοριζόμαστε μόνο στο να μοντελοποιήσουμε τις αστικές περιοχές χρησιμοποιώντας συνδέσμους αποθήκευσης και προώθησης. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες σ' ένα τέτοιο σύνδεσμο  $a$  χαρακτηρίζονται από το μέσο χρόνο διαδρομής,  $t_a$  (αριθμός διακριτών βημάτων), την ικανότητα του  $Q_a$  (οχή./ώρα) και την ουρά του συνδέσμου  $w_a$  (οχήματα). Η ροή που εισέρχεται σ' ένα σύνδεσμο αποθήκευσης και προώθησης προστίθεται στην ουρά του συνδέσμου μετά από χρονική υστέρηση  $t_a$ . Η εξέλιξη της ουράς δίνεται από τη σχέση:

$$w_a(k+1) = w_a(k) + T [q_{a,i}(k) - q_a(k)] \quad (2.13)$$

όπου  $q_{a,i}(k)$  είναι η ροή εισόδου και

$$q_a(k) = \min \{ \hat{q}_{a,1}(k), \hat{q}_{a,2}(k) \} \quad (2.14)$$

όπου

$$\hat{q}_{a,1}(k) = q_{a,i}(k) + \frac{w_a}{T} \quad (2.15)$$

και

$$\hat{q}_{a,2}(k) = Q_a \min \left\{ 1, \frac{\rho_{\max} - \rho_{m,1}(k)}{\rho_{\max} - \rho_{cr,m}} \right\} \quad (2.16)$$

όπου  $m$  είναι ο κατάντη σύνδεσμος που στην περίπτωση που και αυτός είναι σύνδεσμος αποθήκευσης και προώθησης, είναι

$$\rho_{cr,m} = \frac{\rho_{\max}}{2}. \quad (2.17)$$

Η πυκνότητα για ένα τέτοιο σύνδεσμο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_a(k) = \rho_{\max} \frac{[w_a(k) + q_{a,d}(k)] L_v}{L_a \Lambda_a} \quad (2.18)$$

όπου  $q_{a,d}(k)$  είναι η ροή που έχει εισέλθει στο σύνδεσμο αλλά δεν έχει φτάσει ακόμα στην ουρά,  $L_v$  είναι το μέσο μήκος ενός οχήματος ίσο με 0.006 χλμ.,  $L_a$  είναι το μήκος του συνδέσμου και  $\Lambda_a$  είναι ο αριθμός των λωρίδων.

### 2.2.3 Μοντελοποίηση των κόμβων του δικτύου

#### Κατανομή της ροής στους κόμβους

Η κυκλοφοριακή ροή εισέρχεται σ' ένα κόμβο  $n$  μέσω το πολύ δύο συνδέσμων που ανήκουν στο σύνολο  $I_n$  και κατανέμεται το πολύ σε δύο συνδέσμους που εξέρχονται

από τον κόμβο και που ανήκουν στο σύνολο  $O_n$ . Η συνολική ροή  $Q_n(k)$  που εισέρχεται στον κόμβο δίνεται από τη σχέση:

$$Q_n(k) = \sum_{\mu \in I_n} q_{\mu, \ell_\mu}(k) \quad (2.19)$$

Η ροή που αποδίδεται σε κάθε εξερχόμενο σύνδεσμο  $m \in O_n$  δίδεται από τη σχέση:

$$q_{m,0}(k) = \beta_n^m(k) Q_n(k) \quad \forall m \in O_n \quad (2.20)$$

όπου  $\beta_n^m(k)$  είναι το ποσοστό στροφής και αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ροής που εισέρχεται στον κόμβο  $n$  και ακολουθεί εν συνεχεία το σύνδεσμο  $m$ . Οι εξίσωση (2.20) δίνει τα  $q_{m,0}(k)$  για  $i = 1$  στην εξίσωση (2.2).

### Ανάντη επίδραση της πυκνότητας

Όταν ένας κόμβος  $m$  έχει δύο εξερχόμενους συνδέσμους, τότε ανάντη αυτών των δύο συνδέσμων, στο τελευταίο τμήμα του εισερχόμενου συνδέσμου, απαιτείται στην εξίσωση της ταχύτητας (2.4) μία κατάντη πυκνότητα  $\rho_{m, \ell_m+1}(k)$  ( $i = \ell_m$  στην (2.4)). Αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{m, \ell_m+1}(k) = \frac{\sum_{\mu \in O_n} \rho_{\mu,1}(k)^2}{\sum_{\mu \in O_n} \rho_{\mu,1}(k)}. \quad (2.21)$$

Η τετραγωνική μορφή της (2.21) έχει σαν συνέπεια να παρουσιάζεται συμφόρηση ακόμη κι όταν μόνο ένας από τους δύο εξερχόμενους συνδέσμους έχει συμφόρηση, πράγμα που επαληθεύεται σαν γεγονός από την εμπειρία.

### Κατάντη επίδραση της ταχύτητας

Όταν ένας κόμβος  $n$  έχει δύο εισερχόμενους κι έναν εξερχόμενο σύνδεσμο, τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση των ταχυτήτων στα τέλη των δύο εισερχόμενων συνδέσμων επί της αρχής του εξερχόμενου. Αυτό γίνεται με τον υπολογισμό της ταχύτητας  $v_{m,0}(k)$ , που απαιτείται στην (2.4) για  $i = 1$ , σύμφωνα με το σταθμισμένο μέσο

$$v_{m,0}(k) = \frac{\sum_{\mu \in I_n} v_{\mu, \ell_\mu}(k) q_{\mu, \ell_\mu}(k)}{\sum_{\mu \in I_n} q_{\mu, \ell_\mu}(k)}. \quad (2.22)$$

## 2.2.4 Υπολογιζόμενα κριτήρια

Με βάση το μοντέλο που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, μπορούν να υπολογιστούν διάφορα κριτήρια απόδοσης. Αυτά τα κριτήρια ποσοτικοποιούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συνολικού δικτύου και αποτελούν δείκτες που περιγράφουν την αντίστοιχη απόδοσή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο διάφορες στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας μπορούν να αξιολογηθούν ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Τα κριτήρια απόδοσης που μπορούν να υπολογιστούν είναι τα εξής:

1. Συνολικός Χρόνος Ταξιδιού (ΣΧΤ)  $\tau_{\Sigma XT}$  (οχ. \* ώρες). Ο ΣΧΤ αντιπροσωπεύει το συνολικό χρόνο ταξιδιού όλων των οχημάτων επί των συνδέσμων αυτοκινητοδρόμων και αποθήκευσης και προώθησης. Ο ΣΧΤ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{\Sigma XT} = \sum_k \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \Lambda_m T + \sum_k \sum_a \rho_a(k) L_a \Lambda_a T \quad (2.23)$$

2. Συνολικός Χρόνος Αναμονής Εισόδου (ΣΧΑΕ)  $\tau_{\Sigma\chi\chi\chi\chi\chi}$  (οχ. \* ώρες). Ο ΣΧΑΕ αντιπροσωπεύει το συνολικό χρόνο αναμονής των οχημάτων στις ουρές των εισόδων του δικτύου. Ο ΣΧΑΕ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{\Sigma\chi\chi\chi\chi\chi} = \sum_k \sum_o w_o(k)T \quad (2.24)$$

3. Συνολικός Χρόνος Αναμονής στις ουρές των συνδέσμων Αποθήκευσης και Προώθησης (ΣΧΑΑΠ)  $\tau_{\Sigma\chi\chi\chi\chi\chi\chi}$  (οχ./ώρες). Ο ΣΧΑΑΠ εκφράζει το συνολικό χρόνο που δαπανούν τα οχήματα στις ουρές των συνδέσμων αποθήκευσης και προώθησης του δικτύου. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{\Sigma\chi\chi\chi\chi\chi\chi} = \sum_k \sum_a w_a(k)T \quad (2.25)$$

4. Συνολικός Χρόνος (ΣΧ)  $\tau_{\Sigma\chi}$  (οχ.\*ώρες). Ο ΣΧ είναι το άθροισμα των ΣΧΤ, ΣΧΑΕ και ΣΧΑΑΠ. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{\Sigma\chi} = \tau_{\Sigma\chi\chi\chi\chi\chi} + \tau_{\Sigma\chi\chi\chi\chi\chi\chi} + \tau_{\Sigma\chi\chi\chi\chi\chi\chi} \quad (2.26)$$

5. Συνολική Διανυθείσα Απόσταση (ΣΔΑ)  $L_{\Sigma\Delta\Delta}$  (οχ.\*χλμ.). Η ΣΔΑ αντιπροσωπεύει τη συνολική απόσταση που διανύουν όλα τα οχήματα μέσα στους αυτοκινητοδρόμους και τους συνδέσμους αποθήκευσης και προώθησης. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{\Sigma\Delta\Delta} = \sum_k \sum_m \sum_i q_{m,i}(k)L_mT + \sum_k \sum_a q_a(k)L_aT \quad (2.27)$$

6. Συνολική Ποσότητα Καυσίμων (ΣΠΚ)  $V_{\Sigma\pi\pi\kappa}$  (οχ.\*λίτρα). Η ΣΠΚ αντιπροσωπεύει την ποσότητα των καυσίμων που καταναλώνεται από τα οχήματα καθώς αυτά κινούνται μέσα στο δίκτυο. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{\Sigma\pi\pi\kappa} = V_{\Sigma\pi\pi\kappa,1} + V_{\Sigma\pi\pi\kappa,2} \quad (2.28)$$

όπου

$$V_{\Sigma\pi\pi\kappa,1} = \sum_k \frac{T}{100} \sum_m \sum_i \kappa_1(k) \quad (2.29)$$

με

$$\kappa_1(k) = \begin{cases} q_{m,i}(k)L_m \left[ 4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} + 0.0016 (v_{m,i}(k) - 60)^2 \right] & \text{αν } v_{m,i}(k) > 60 \\ q_{m,i}(k)L_m \left( 4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} \right) & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.30)$$

και

$$V_{\Sigma\pi\pi\kappa,2} = \sum_k \frac{T}{100} \sum_a \kappa_2(k) \quad (2.31)$$

με

$$\kappa_2(k) = \begin{cases} q_a(k)L_a \left[ 4.49 + \frac{122}{v_a(k)} + 0.0016 (v_a(k) - 60)^2 \right] & \text{αν } v_a(k) > 60 \\ q_a(k)L_a \left( 4.49 + \frac{122}{v_a(k)} \right) & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.32)$$

Οι σχέσεις (2.28)–(2.32) βασίζονται στο [17].

## 2.3 Επικύρωση του Μοντέλου

### 2.3.1 Σκοποί και μέσα

Το μοντέλο που περιγράφηκε λεπτομερώς στις προηγούμενες ενότητες περιλαμβάνει έναν αριθμό παραμέτρων. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων είναι διαφορετικές για κάθε δίκτυο αυτοκινητοδρόμων και αντικατοπτρίζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του κυκλοφοριακού συστήματος που εξαρτώνται από τους οδηγούς, τον σχεδιασμό των δρόμων, ή από άλλους παράγοντες. Προκειμένου να εντοπιστούν οι τιμές αυτών των παραμέτρων, απαιτείται συστηματική χρήση μετρήσεων κυκλοφοριακών μεγεθών που λαμβάνονται από αισθητήρες εγκατεστημένους στο δίκτυο.

Ανάλογα με το ποιες παράμετροι πρέπει να προσδιοριστούν, ακολουθούνται διαφορετικές μεθοδολογίες. Δύο είναι οι κύριες προσεγγίσεις που ακολουθούνται για την εύρεση των παραμέτρων ενός κυκλοφοριακού μοντέλου δικτύου αυτοκινητοδρόμων. Η πρώτη είναι η ποσοτική επικύρωση, ενώ η δεύτερη είναι η ποιοτική επικύρωση. Χαρακτηρίζονται και οι δύο από τον τρόπο με τον οποίο κάνουν χρήση των κυκλοφοριακών μετρήσεων. Η ποσοτική επικύρωση έχει περιορισμένο γεωγραφικό χώρο αναφοράς αλλά κάνει πιο αυστηρή, με τη μαθηματική έννοια, χρήση των μετρήσεων, ενώ η ποιοτική βασίζεται στην ποσοτική, έχει διευρυνόμενο γεωγραφικό χώρο καλύπτοντας όλο το δίκτυο, αλλά κάνει λιγότερο αυστηρή χρήση των μετρήσεων.

### 2.3.2 Ποσοτική επικύρωση

#### Επισκόπηση

Η ποσοτική επικύρωση επιδιώκει την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου μέσω μιας σαφούς και καλά προσδιορισμένης διαδικασίας που επιτελείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση μία ομάδα παραμέτρων που αντικατοπτρίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενός δεδομένου τμήματος αυτοκινητοδρόμου που εξαρτώνται από τη γεωμετρία του, τα χαρακτηριστικά των οχημάτων, τη συμπεριφορά των οδηγών κ.λ.π., προσαρμόζεται σ' ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα πραγματικών δεδομένων με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια (εκτίμηση παραμέτρων). Στη δεύτερη φάση, το μοντέλο, που αναπτύχθηκε για το εξεταζόμενο τμήμα αυτοκινητοδρόμου, με τις τιμές των παραμέτρων που προσδιορίστηκαν στην πρώτη φάση, εφαρμόζεται και τα αποτελέσματά του συγκρίνονται με πραγματικά δεδομένα, που όμως δεν χρησιμοποιήθηκαν στην αρχική φάση της εκτίμησης παραμέτρων (επιβεβαίωση μοντέλου). Αυτή η διαδικασία των δύο φάσεων πραγματοποιείται για έναν αριθμό τμημάτων αυτοκινητοδρόμων, και στο τέλος προσδιορίζεται ένα σύνολο παραμέτρων που χρησιμοποιείται αργότερα στην ποιοτική επικύρωση του μοντέλου.

#### Εκτίμηση παραμέτρων

Με βάση την περιγραφή του μοντέλου της κυκλοφοριακής ροής δικτύων αυτοκινητοδρόμων που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, ένα μη-γραμμικό δυναμικό μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής για μεγάλα τμήματα αυτοκινητοδρόμων μπορεί να μορφοποιηθεί ως εξής:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{h}(k), \mathbf{z}], \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (2.33)$$

όπου  $\mathbf{x}$  είναι το διάνυσμα κατάστασης που περιγράφει τις κυκλοφοριακές συνθήκες,  $\mathbf{h}$  είναι το διάνυσμα των συνοριακών συνθηκών (που παρέχονται από αντίστοιχες μετρήσεις) και  $\mathbf{z}$  είναι το διάνυσμα των παραμέτρων του μοντέλου. Η εξίσωση (2.33) μπορεί

να εξαχθεί από την αντικατάσταση των εξισώσεων (2.3) και (2.20) στην εξίσωση (2.2), των εξισώσεων (2.5), (2.21) και (2.22) στην εξίσωση (2.4) και της εξίσωσης (2.9) στην (2.8).

Η εκτίμηση των αγνώστων παραμέτρων  $\mathbf{z}$  του κυκλοφοριακού συστήματος απέχει πολύ απ' το να είναι ένα απλό πρόβλημα λόγω της έντονης μη-γραμμικότητας του μοντέλου τόσο ως προς τις παραμέτρους όσο και ως προς τις μεταβλητές κατάστασης  $\mathbf{x}$ . Η πιο κοινή προσέγγιση γι' αυτό το πρόβλημα συνίσταται στην ελαχιστοποίηση της διαφοράς ανάμεσα στους υπολογισμούς του μοντέλου και στις πραγματικές μετρήσεις που λαμβάνονται από την κυκλοφοριακή ροή, με την έννοια μιας τετραγωνικής συνάρτησης λάθους της εξόδου. Έστω  $\mathbf{y}$  το διάνυσμα εξόδου του μη-γραμμικού συστήματος (2.33) με

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{g}[\mathbf{x}(k), \mathbf{z}]. \quad (2.34)$$

Τότε το πρόβλημα της εκτίμησης των παραμέτρων μορφοποιείται σαν ένα πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων των λαθών εξόδου που εκφράζεται ως εξής:

*Δεδομένων των χρονικών ακολουθιών μετρήσεων  $\mathbf{h}^m(k)$  (μετρούμενες συνοριακές συνθήκες),  $\mathbf{y}^m(k)$  (μετρούμενες έξοδοι του συστήματος),  $k = 0, 1, \dots, K$  και της αρχικής κατάστασης  $\mathbf{x}_0$ , να προσδιοριστούν οι παράμετροι  $\mathbf{z}$  που ελαχιστοποιούν το κόστος*

$$J(\mathbf{z}) = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{y}(k) - \mathbf{y}^m(k)\|_{\mathbf{Q}}^2 \quad (2.35)$$

υπό τους περιορισμούς (2.33) με  $\mathbf{h}(k) = \mathbf{h}^m(k)$  και (2.34).

Οι παράμετροι του μοντέλου  $\mathbf{z}^T = [v_f, \rho_{cr}, a_f, \tau, \phi, \nu, \delta, \kappa, v_{\min}]$ , όταν χρησιμοποιείται ένα μόνο θεμελιώδες διάγραμμα για όλα τα διακριτά τμήματα του αυτοκινητοδρόμου, επιλέγονται από ένα κλειστό διάστημα του χώρου εφικτών παραμέτρων.  $\mathbf{Q}$  είναι ένας θετικά ορισμένος διαγώνιος πίνακας. Στην περίπτωση που υπάρχουν  $e$  θέσεις απ' όπου λαμβάνονται μετρήσεις ροής και ταχύτητας, τότε  $\mathbf{y}^T = [q_1 v_1 \dots q_e v_e]$ .

Ο προσδιορισμός του συνόλου των βέλτιστων παραμέτρων πραγματοποιείται με τη χρήση μη-γραμμικού προγραμματισμού όπου για κάθε επιλογή του διανύσματος παραμέτρων  $\mathbf{z}$  η τιμή του κριτηρίου κόστους (2.35) υπολογίζεται εκτελώντας μία προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής με βάση τις εξισώσεις του μοντέλου έχοντας σαν είσοδο τις πραγματικές μετρήσεις  $\mathbf{h}^m(k)$ .

Μία μέθοδος λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί αυτή η διαδικασία είναι ο αλγόριθμος πλέγματος του Box, βλ. [8]. Τα πλεονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου συνοψίζονται παρακάτω:

- Ο αλγόριθμος δεν απαιτεί τον υπολογισμό παραγώγων του κριτηρίου κόστους όπως στις μεθόδους που απαιτούν τον υπολογισμό του ανάδελτα της συνάρτησης ελαχιστοποίησης.
- Ο αλγόριθμος έχει, γιαυτό το συγκεκριμένο πρόβλημα, περισσότερες πιθανότητες να φτάσει σ' ένα ολικό ελάχιστο (ή τουλάχιστον ένα καλό τοπικό ελάχιστο) από μεθόδους βασισζόμενες στον υπολογισμό παραγώγων.

Ο αλγόριθμος αρχίζει από ένα πλέγμα σημείων, δηλαδή μία ομάδα σημείων  $\mathbf{z}$  που είναι διεσπαρμένα τυχαία στον χώρο εφικτών παραμέτρων. Σε κάθε επανάληψη το διάνυσμα παραμέτρων με το χειρότερο αποτέλεσμα αντικαθίσταται από ένα καινούργιο εφικτό διάνυσμα που επιλέγεται μ' έναν κατάλληλο τρόπο. Η όλη διαδικασία τερματίζεται όταν το πλέγμα σημείων καταλαμβάνει έναν ικανοποιητικά μικρό χώρο όπου δεν

επιτυγχάνεται κάποια σημαντική βελτίωση του κριτηρίου κόστους. Ακόμα και σ' αυτήν την περίπτωση, όμως, δεν υπάρχει εγγύηση ότι έχει προσδιοριστεί το πραγματικό ολικό ελάχιστο, γιαυτό και είναι χρήσιμο αυτή η διαδικασία να επαναλαμβάνεται από διαφορετικά αρχικά σημεία.

### **Επιβεβαίωση του μοντέλου**

Η διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων, αποδίδει για κάθε τμήμα αυτοκινητοδρόμου του δικτύου στο οποίο εφαρμόζεται, ένα σύνολο παραμέτρων του μοντέλου κυκλοφοριακής ροής. Αυτές οι παράμετροι προσδιορίστηκαν με βάση κάποια πραγματικά δεδομένα. Η εγγυρότητα τους πρέπει να επαληθευτεί πάλι με πραγματικά δεδομένα τα οποία όμως δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκτίμησης των βέλτιστων παραμέτρων.

### **2.3.3 Ποιοτική επικύρωση**

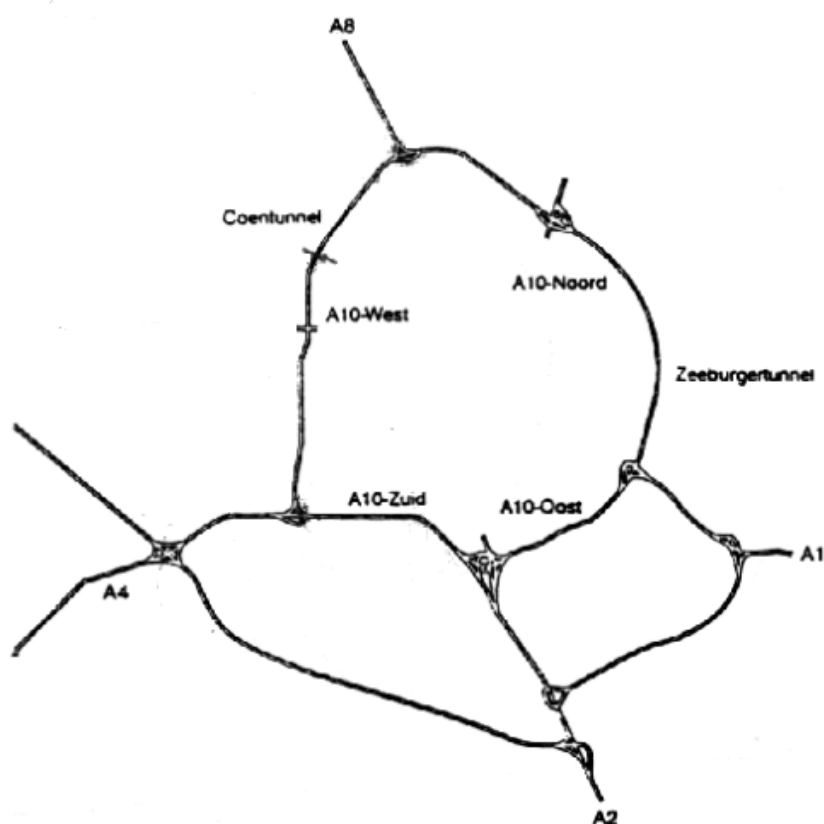
Η ποσοτική επικύρωση του μοντέλου, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, έχει περιορισμένο πεδίο εφαρμογής που προσδιορίζεται από τα γεωγραφικά όρια των αυτοκινητοδρόμων. Δεν λαμβάνει υπόψη της το δίκτυο σαν μία ενότητα, που αποτελείται από αλληλοσυνδεδεμένους αυτοκινητοδρόμους. Σκοπός μας είναι να μοντελοποιήσουμε δίκτυα και όχι μόνο γραμμικούς αυτοκινητοδρόμους, κάτι που σημαίνει ότι θα πρέπει το μοντέλο να είναι σε θέση να αναπαραστήσει το φαινόμενο της κυκλοφοριακής ροής ολόκληρου του δικτύου, θεωρούμενο από μία πιο μακροσκοπική οπτική γωνία.

Αυτήν την οπτική γωνία υιοθετεί η ποιοτική επικύρωση του μοντέλου και σκοπός της είναι να το κάνει ικανό να συνθέτει τη δυναμική της συμφοράς σ' όλο το χώρο του δικτύου. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να καταγραφούν όλες οι συμφορές που εμφανίζονται καθημερινά στο δίκτυο, τα σημεία και τις χρονικές στιγμές απ' όπου καθεμία ξεκινάει, οι αυτοκινητόδρομοι που επηρεάζονται και η χωρική και χρονική επέκτασή τους. Με βάση αυτές τις πληροφορίες και τα αποτελέσματα της ποσοτικής επικύρωσης πραγματοποιούνται προσομοιώσεις στο πλαίσιο μιας διαδικασίας δοκιμής και λάθους μεταβάλλοντας ποσοστά στροφής στις διασταυρώσεις των αυτοκινητοδρόμων καθώς και χαρακτηριστικά των συνδέσμων αποθήκευσης και προώθησης. Οι τιμές των παραμέτρων κρίνονται ως ικανοποιητικές όταν το μοντέλο προβλέπει τη χωρική και χρονική έκταση, δηλαδή τη δυναμική, της συμφοράς.

## **2.4 Το Δίκτυο του Άμστερνταμ**

### **2.4.1 Περιγραφή του δικτύου**

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να περιγραφεί το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων γύρω από το Άμστερνταμ. Μία γενική άποψη του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 2.4. Το κεντρικό χαρακτηριστικό του είναι ο Περιφερειακός Δακτύλιος του Άμστερνταμ, ο A10. Ο δακτύλιος αυτός εξυπηρετεί την τοπική και περιφερειακή κυκλοφορία των οχημάτων που έχουν σαν προορισμό το Άμστερνταμ καθώς και άλλα σημεία ενδιαφέροντος, όπως το διεθνές αεροδρόμιο Σχίπολ. Στο βορά βρίσκεται ο A8, που εξυπηρετεί τη ζήτηση της Βόρειας Ολλανδίας ενώ στα νοτιοδυτικά βρίσκεται ο A4 ο οποίος εξυπηρετεί την κίνηση προς τη Χάγη, το Ρόττερνταμ και το Σχίπολ. Στο νότο βρίσκεται ο A9 που εξυπηρετεί την κίνηση από νοτιοανατολικά με προορισμό το κέντρο της χώρας καθώς



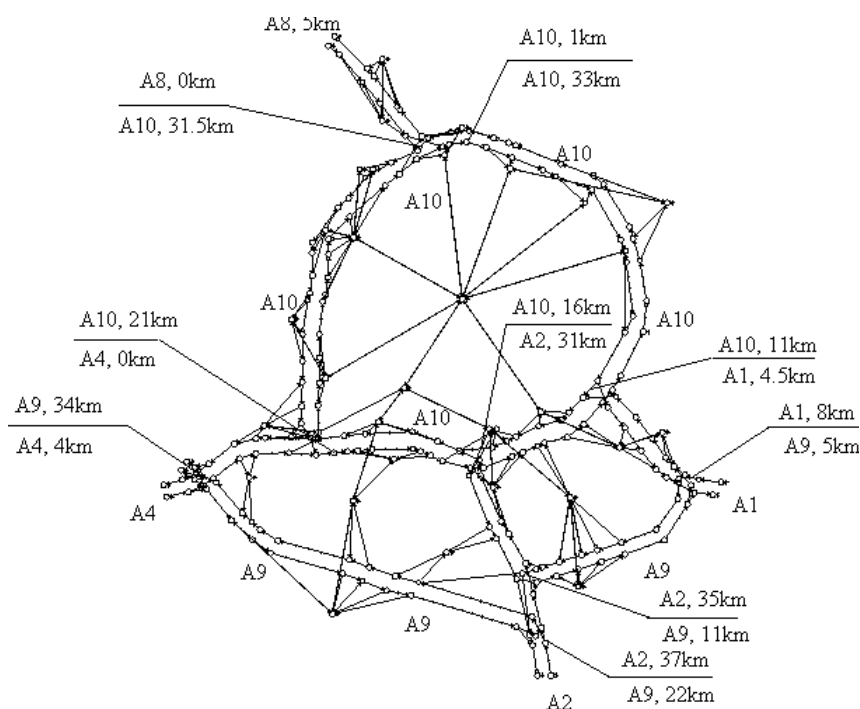
Σχήμα 2.4: Το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων του Άμστερνταμ.

και την περιοχή του Άμστερνταμ. Κάθετα προς τον άξονα του A9 και συνδέοντας τον A9 με τον A10 βρίσκονται στα νότια ο A2 και στα νοτιοανατολικά ο A1. Ο A10 περιλαμβάνει δύο υποβρύχιες σύραγγες, τη σύραγγα Κοέν στα βορειοδυτικά και τη σύραγγα Ζίμπουργκ, που έχει σαν αποτέλεσμα τη γεωγραφική διαίρεσή του στο νότιο και στο δυτικό/νότιο/ανατολικό δακτύλιο.

Το δίκτυο υπόκειται σε καθημερινή συμφόρηση η οποία είναι ιδιαίτερα μεγάλη στο βορειοδυτικό και στο νότιο τμήμα του A10, ενώ είναι χαμηλότερη στο ανατολικό τμήμα.

#### 2.4.2 Το μοντέλο του Άμστερνταμ

Κάθε αυτοκινητόδρομος του δικτύου μοντελοποιήθηκε και προς τις δύο κατευθύνσεις κίνησης· ο πίνακας 2.1 δείχνει τα όρια τους. Το συνολικό μήκος του δικτύου είναι 143 χιλ. (και οι δύο κατευθύνσεις), και το κύριο μέρος του είναι ο A10 που περικλείει την πόλη του Άμστερνταμ. Ο συνολικός αριθμός των συνδέσμων είναι 654 (σύνδεσμοι όλων των ειδών). Αυτός ο αριθμός περιλαμβάνει 249 συνδέσμους αυτοκινητοδρόμων, 231 συνδέσμους αποθήκευσης και προώθησης και 174 ψευδοσυνδέσμους. Οι σύνδεσμοι αυτοκινητοδρόμων χωρίστηκαν σε 291 τμήματα των οποίων το μήκος κυμαίνεται από 400 ως 800 μέτρα, πράγμα που σημαίνει ότι το μέσο μήκος ενός διακριτού τμήματος συνδέ-



Σχήμα 2.5: Το μοντέλο του δικτύου του Άμστερνταμ.

σμου αυτοκινητοδρόμου είναι 491,4 μέτρα. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται το μοντελοποιημένο δίκτυο μαζί με τους αριθμούς γιλιόμετρων στις διασταυρώσεις των αυτοκινητοδρόμων.

Στο βορρά, υπάρχουν τα 5 χιλιόμετρα του A8. Ο A10 που είναι το κυρίαρχο και το πιο σημαντικό μέρος του δικτύου έχει μήκος 32 χιλιόμετρα. Πιο νότια φαίνεται ο A9 και οι τρεις άλλοι αυτοκινητόδρομοι που τον συνδέουν με τον A10, οι A4, A2 και A1 από δυτικά προς ανατολικά.

Εκατέρωθεν των αυτοκινητοδρόμων και στο εσωτερικό των τριών δακτυλίων βρίσκονται εικονικοί κόμβοι που αναπαριστούν αστικές περιοχές. Χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιηθεί η επίδραση της αστικής κυκλοφορίας στην κυκλοφορία των αυτοκινητοδρόμων. Σημεία αναχώρησης και άφιξης ενώνονται στον γράφο του δικτύου μέσω μιας διαδρομής που αποτελείται εξ ολοκλήρου από συνδέσμους αυτοκινητοδρόμων, ή από συνδέσμους αυτοκινητοδρόμων και συνδέσμους αποθήκευσης και προώθησης. Αυτοί οι σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης χρησιμοποιούνται για να λαμβάνεται υπόψη η κίνηση των οχημάτων μέσα στις αστικές περιοχές. Επίσης χρησιμοποιούνται και για τη μοντελοποίηση των ραμπών εισόδου και εξόδου των αυτοκινητοδρόμων.

### 2.4.3 Διαθέσιμα δεδομένα

Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία επικύρωσης και στις δύο φάσεις, υπήρχαν στη διάθεσή μας δεδομένα από φωρατές τεσσάρων ημερών, από τις 3 έως τις 6 Ιουνίου 1996. Αυτά τα δεδομένα αποτελούνταν από μετρήσεις κυκλοφοριακής ροής και μέσης ταχύτητας για όλο το 24-ώρο με συχνότητα ενός λεπτού. Χρησιμοποιήθηκαν για



Πίνακας 2.1: Οι αυτοκινητόδρομοι του δικτύου.

Αυτοκινητόδρομος	Από (χιλ.)	Έως (χιλ.)	Μήκος (χιλ.)
A10	1	32	$32 \times 2$
A8	1	5	$5 \times 2$
A4	1	5	$5 \times 2$
A2	31	36	$6 \times 2$
A1	4,5	7,5	$4 \times 2$
A9	5	11	$7 \times 2$
A9	22	33,5	$12,5 \times 2$

Πίνακας 2.2: Σύνολα βέλτιστων παραμέτρων.

	Τμήματα αυτοκινητοδρόμων			
	1	2	3	4
Από (χιλ.)	10,7	22,0	28,1	13,5
Έως (χιλ.)	19,7	33,0	16,7	3,4
<b>Παράμετροι</b>				
$\rho_{cr,m}$ (οχ./χιλ./λωρίδα)	35,93	28,75	33,25	27,65
	<b>Κοινές παράμετροι</b>			
$a_m$	2,34			
$v_{f,m}$ (χιλ./ώρα)	102			
$\tau$ (δευτ.)	18			
$\delta$	0,012			
$\nu$ (χιλ. <sup>2</sup> /ώρα)	60			
$\phi$	2,2			
$v_{\min}$ (χιλ./ώρα)	7,4			
$\kappa$ (οχ./χιλ.)	40			

να προσδιοριστούν οι διαταραχές του συστήματος και για να δωθούν τα συνοριακά δεδομένα στο μοντέλο. Στην ποσοτική επικύρωση σαν συνοριακά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν η πυκνότητα (υπολογιζόμενη με βάση τη ροή και την ταχύτητα), η ροή και η μέση ταχύτητα, ενώ στην ποιοτική η ροή και η μέση ταχύτητα.

#### 2.4.4 Ποσοτική επικύρωση στο δίκτυο του Άμστερνταμ

Για την ποσοτική επικύρωση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις ομάδες δεδομένων που αντιστοιχούν σε τέσσερα τμήματα αυτοκινητοδρόμων. Για κάθε ένα από αυτά τα τμήματα προσδιορίστηκαν τα βέλτιστα διανύσματα παραμέτρων. Η σπουδαιότερη μεταβλητή είναι η κρίσιμη πυκνότητα και είναι αυτή που χαρακτηρίζει κάθε εξεταζόμενο τμήμα αυτοκινητοδρόμου. Ενώ όλες οι άλλες μεταβλητές έχουν την ίδια τιμή για όλα τα τμήματα, η κρίσιμη πυκνότητα διαφοροποιείται. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 2.2. Λεπτομέρειες για την ποσοτική επικύρωση αναφέρονται στο [21].

### 2.4.5 Ποιοτική επικύρωση στο δίκτυο του Άμστερνταμ

Προκειμένου το μοντέλο του δικτύου, βασιζόμενο στα αποτελέσματα της ποσοτικής επικύρωσης, να μπορέσει να αναπαραστήσει επιτυχώς τη δυναμική της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης, όπως αυτή εκδηλώνεται σε όλο το δίκτυο, καταγράφηκαν όλες οι καθημερινές συμφορήσεις που λαμβάνουν χώρα στους αυτοκινητοδρόμους. Οι κύριες περιπτώσεις ημερησίως επαναλαμβανόμενης συμμόρφωσης που καταγράφηκαν είναι τρεις. Δύο απ' αυτές σχετίζονται μεταξύ τους λόγω γεωγραφικής γειτνίασης, ενώ η τρίτη δημιουργείται ανεξάρτητα από τις άλλες δύο. Μία βασική αιτία συμμόρφωσης στον Α10 είναι ο μεγάλος αριθμός οδηγών που επιθυμούν να εξέλθουν από τον αυτοκινητόδρομο μέσω μιας ράμπας εξόδου, που όμως δεν μπορεί να ανταποκριθεί στη μεγάλη ζήτηση που δημιουργείται. Έτσι παρουσιάζεται το φαινόμενο πολλοί οδηγοί να συνωθούνται μέσα στον αυτοκινητόδρομο ανάντη της ράμπας εξόδου καθώς προσπαθούν να φύγουν από αυτόν.

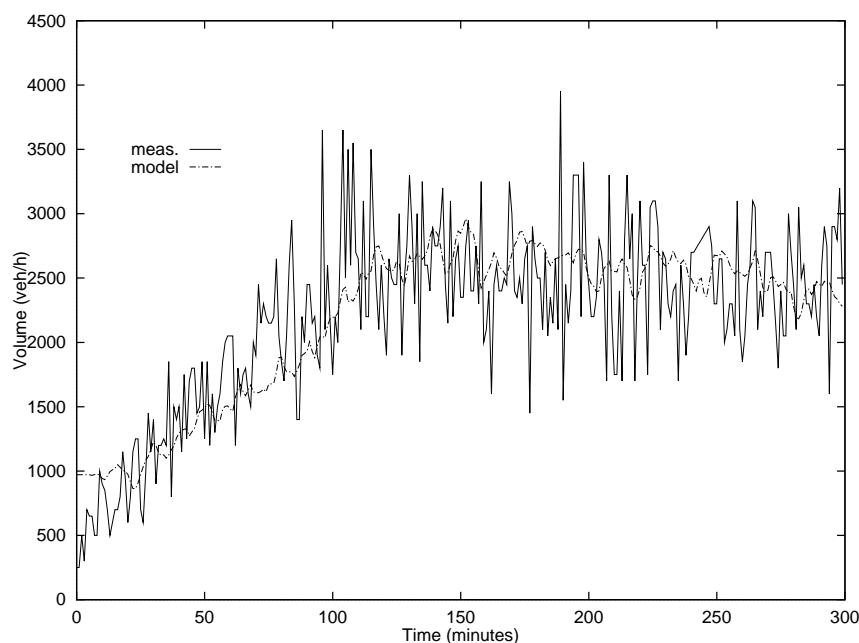
Η μεγαλύτερη συμμόρφωση εμφανίζεται ανάντη της σύραγγας Κοέν στο 30-οστό χιλιόμετρο του Α10 στη δεξιόστροφη κατεύθυνση της κυκλοφορίας. Αρχίζει στο 30-οστό χιλιόμετρο και μεταδίδεται προς τα πίσω έως το 32-ο χιλιόμετρο του Α10 και ως το 3,3 χιλιόμετρο του Α8. Αυτή η περιοχή έχει συμμόρφωση από τις 06:20 π.μ. έως τις 10:00 π.μ.

Η δεύτερη συμμόρφωση εμφανίζεται στο νότιο τμήμα του Α10. Ξεκινάει από το χιλιόμετρο 17,6 του Α10 στις 08:00 στην αριστερόστροφη κατεύθυνση και επεκτείνεται προς τα πίσω έως το χιλιόμετρο 13,6 μέχρι τις 10:25 π.μ. Λίγο αργότερα σοβαρή συμμόρφωση εμφανίζεται στο χιλιόμετρο 2,4 του Α4 στην κατεύθυνση της ροής που φεύγει από το Άμστερνταμ. Αυτή η συμμόρφωση μεταδίδεται προς τα πίσω στον Α10 και συμβάλλει με τη συμμόρφωση που ήδη υπάρχει στο νότιο τμήμα του Α10, κάτι που επιδεινώνει την κατάσταση ακόμη περισσότερο και κάνει τη συμμόρφωση να επεκταθεί μέχρι τον Α2.

Μία άλλη συμμόρφωση εμφανίζεται στο νότιο τμήμα του Α10 στην δεξιόστροφη κατεύθυνση αρχίζει στο χιλιόμετρο 18 στις 08:00 π.μ. και μεταδίδεται προς τα πίσω μέχρι το χιλιόμετρο 24,2 του Α10. Αυτή η συμμόρφωση περνάει και στον Α4, στην κατεύθυνση της ροής που έρχεται προς το Άμστερνταμ, μέχρι το χιλιόμετρο 4 του Α4.

Με βάση τη διαδικασία δοκιμής και λάθους και μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του μοντέλου (ποσοστά στροφής, ικανότητες των συνδέσμων αποθήκευσης και προώθησης, κ.λ.π.) για τη χρονική περίοδο 06:00 έως 11:00 έγινε δυνατό το μοντέλο να αναπαραστήσει τη δυναμική της ροής του δικτύου με ικανοποιητική ακρίβεια. Στα σχήματα 2.6 και 2.7 φαίνονται οι τροχιές της ροής και της ταχύτητας, αντίστοιχα, όπως υπολογίζονται από το μοντέλο και συγκρινόμενες με πραγματικές μετρήσεις, για το σύνδεσμο L26 (28,489-28,911 χιλ.) του Α10 στην αριστερόστροφη φορά της κίνησης. Για τα τμήματα αυτά του δικτύου όπου δεν υπάρχει συμμόρφωση, το μοντέλο ανταποκρίνεται χωρίς προβλήματα. Στα σχήματα 2.8 και 2.9 φαίνονται οι ίδιες μεταβλητές για το σύνδεσμο L11 (22,950-23,721 χιλ.) του Α10 στην δεξιόστροφη φορά της κίνησης. Είναι φανερό ότι και πάλι το μοντέλο ανταποκρίνεται πολύ καλά κάτω από συνθήκες συμμόρφωσης.

Το μοντέλο δεν ανταποκρίνεται τόσο καλά στις περιπτώσεις συμμόρφωσης όπου λόγω συνωστισμού στις ράμπες εξόδου δημιουργείται συμμόρφωση μέσα στον αυτοκινητόδρομο. Μία τέτοια περίπτωση φαίνεται στα σχήματα 2.10 και 2.11 όπου απεικονίζονται οι τροχιές ροής και ταχύτητας, αντίστοιχα, για το σύνδεσμο L72 (18,2-19,5 χιλ.) στην αριστερόστροφη κατεύθυνση της κίνησης. Σ' αυτήν την περιοχή η συμμόρφωση δημιουργείται για το λόγο που αναφέρθηκε. Είναι φανερό ότι το μοντέλο προβλέπει



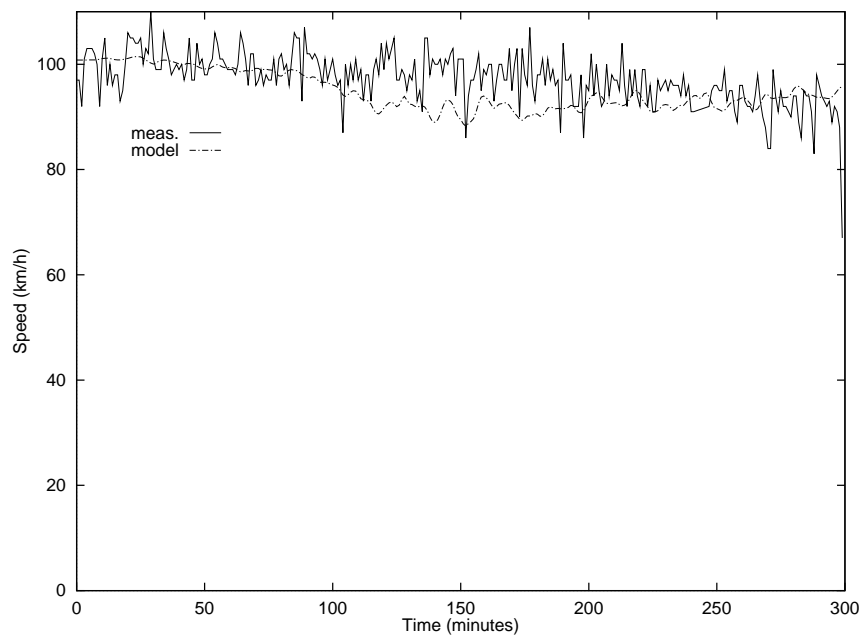
Σχήμα 2.6: L26, μετρούμενη – προβλεπόμενη ροή, ποιοτική επικύρωση.

συμφόρηση αλλά μετά από την πάροδο αρκετού χρόνου, σε σχέση με το χρόνο που πραγματικά εμφανίζεται στον αυτοκινητόδρομο. Είναι αρκετά δύσκολο να μοντελοποιηθεί αυτό του είδους η συμφόρηση και δεν υπάρχει κάποια επαρκής θεωρία για αυτό το φαινόμενο σε μακροσκοπικό επίπεδο, καταδεικνύοντας έτσι τα όρια της μακροσκοπικής προσέγγισης στο πρόβλημα της μοντελοποίησης της κυκλοφοριακής ροής.

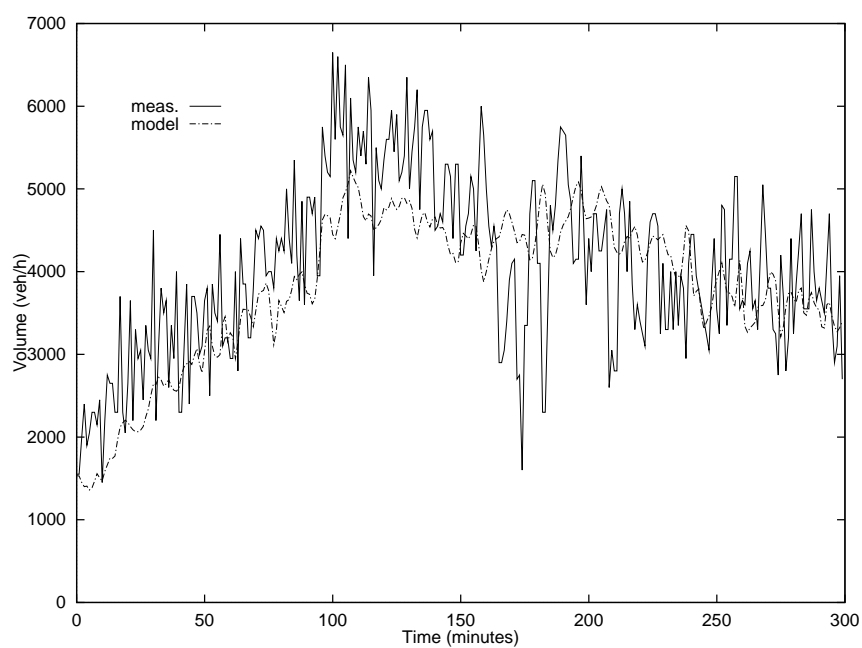
Παρόλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη την επίδοση του μοντέλου για όλο το δίκτυο μπορούμε να πούμε ότι το μακροσκοπικό μοντέλο που παρουσιάστηκε είναι ικανό να αναπαραστήσει το φαινόμενο της κυκλοφοριακής ροής σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων με αρκετή ακρίβεια, όπως φαίνεται και στα σχήματα 2.12 και 2.13. Σ' αυτά τα σχήματα φαίνεται όλο το δίκτυο του Άμστερνταμ με κυκλοφοριακές συνθήκες έτσι όπως τις προβλέπει το μοντέλο. Φαίνονται τα διακριτά τμήματα στα οποία έχουν διαιρεθεί οι σύνδεσμοι, το πάχος του κάθε διακριτού τμήματος συνδέσμου είναι ανάλογο της κυκλοφοριακής ροής ενώ το χρώμα κάθε διακριτού τμήματος είναι ανάλογο προς την κυκλοφοριακή πυκνότητα.

## 2.5 Σύνοψη

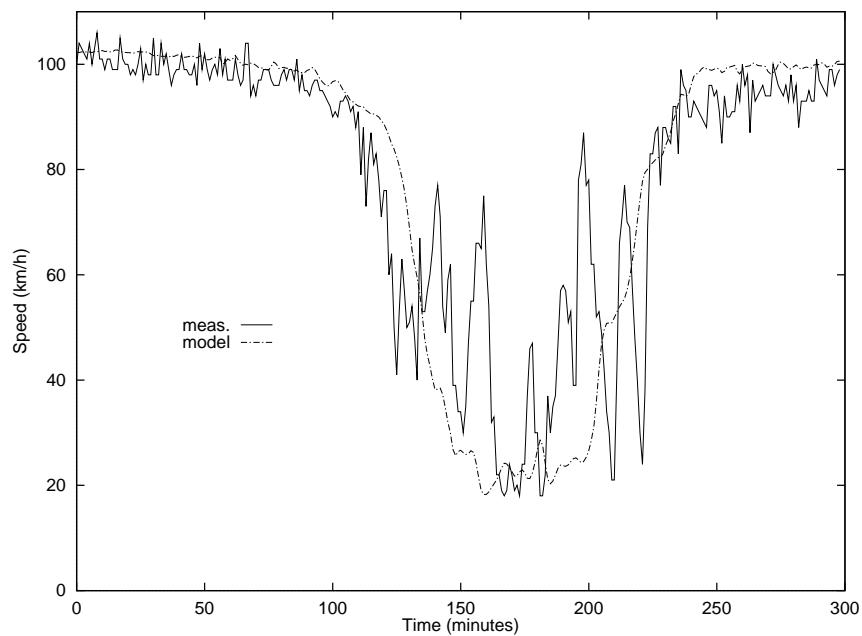
Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε λεπτομερώς το μακροσκοπικό μοντέλο META-NET και η εφαρμογή του στο δίκτυο του Άμστερνταμ. Το μοντέλο ανταποκρίνεται επιτυχώς τόσο σε κυκλοφοριακές συνθήκες χωρίς όσο και σε συνθήκες με συμφόρηση. Για να γίνει κάτι τέτοιο πρέπει να ακολουθηθεί μία συνεπής και επίπονη διαδικασία εκτίμησης όλων των παραμέτρων του μοντέλου προκειμένου τα αποτελέσματα να συμφωνούν με τις μετρήσεις. Η χρησιμότητα του μοντέλου που παρουσιάστηκε είναι διττή στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Πρώτον, χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την κυκλοφοριακή ροή σ' ένα δίκτυο και δεύτερον, για να σχεδιαστεί μία στρατηγική ελέγχου της κυκλοφορίας του δικτύου. Ο σχεδιασμός αυτός της στρατηγικής ελέγχου



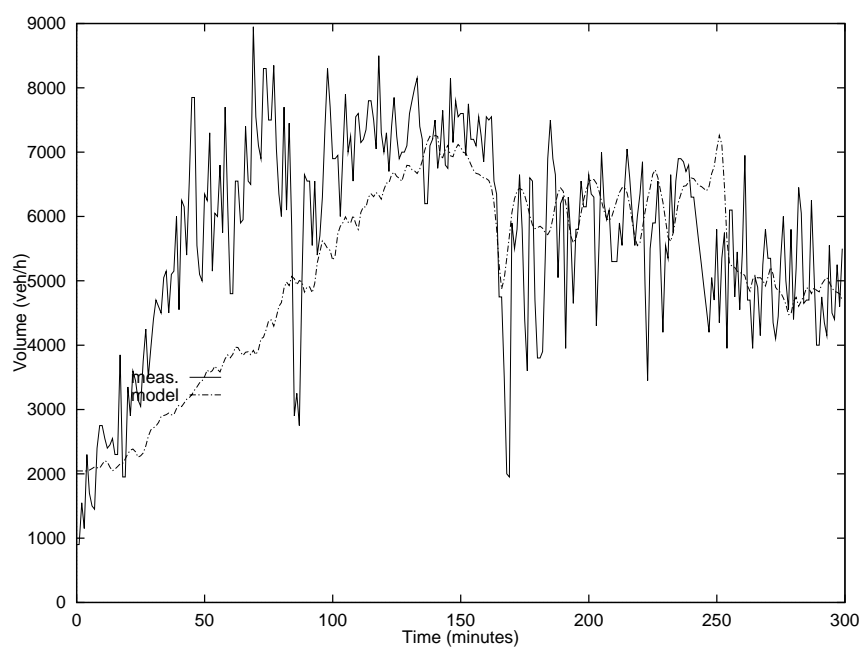
Σχήμα 2.7: L26, μετρούμενη – προβλεπόμενη ταχύτητα, ποιοτική επικύρωση.



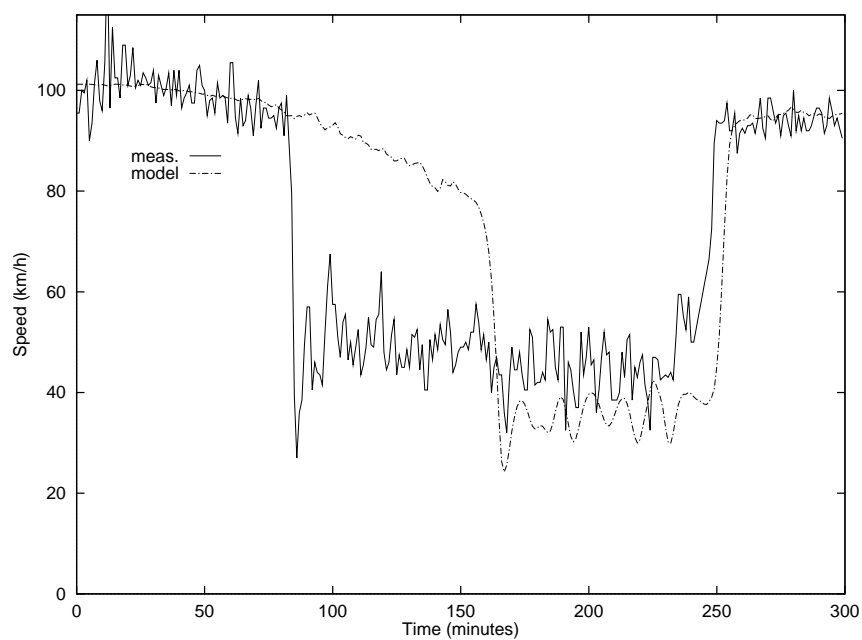
Σχήμα 2.8: L11, μετρούμενη – προβλεπόμενη ροή, ποιοτική επικύρωση.



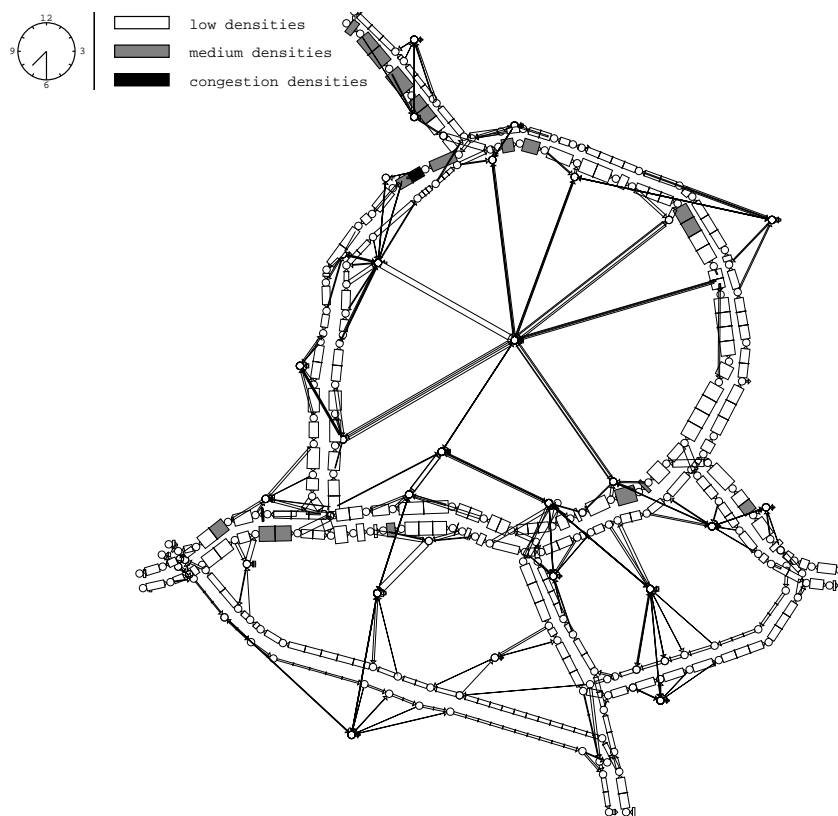
Σχήμα 2.9: L11, μετρούμενη – προβλεπόμενη ταχύτητα, ποιοτική επικύρωση.



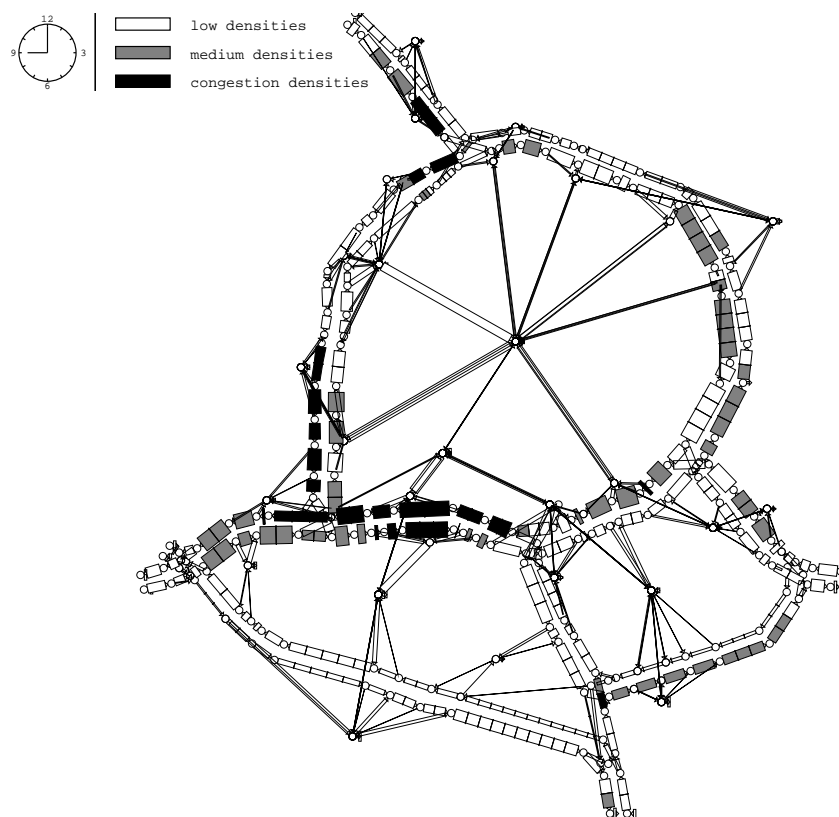
Σχήμα 2.10: L72, μετρούμενη – προβλεπόμενη ροή, ποιοτική επικύρωση.



Σχήμα 2.11: L72, μετρούμενη – προβλεπόμενη ταχύτητα, ποιοτική επικύρωση.



Σχήμα 2.12: Προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου, 7:30 π.μ.



Σχήμα 2.13: Προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου, 9:00 π.μ.

είναι το αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου.

## Κεφάλαιο 3

# ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

### 3.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η λεπτομερής παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο εφαρμόζεται η θεωρία βελτίστου ελέγχου σε προβλήματα κυκλοφοριακού ελέγχου δικτύων αυτοκινητοδρόμων. Με όρους του σχήματος 1.2 το κεφάλαιο αυτό περιγράφει το δομικό στοιχείο «Στρατηγική Ελέγχου» και το συνδέει με το δομικό στοιχείο «Αυτόματη Ανίχνευση Ατυχημάτων, Εκτίμηση, Πρόβλεψη». Στη θέση της «Στρατηγικής Ελέγχου» προτείνεται ένα ιεραρχικό σύστημα ελέγχου που αποτελείται από πέντε επίπεδα. Η γενική ιεραρχική δομή περιγράφεται στην ενότητα 3.2. Το πρώτο επίπεδο της είναι αυτό της εκτίμησης της τρέχουσας κατάστασης της κυκλοφορίας του δικτύου καθώς και της πρόβλεψης των διαταραχών του συστήματος, δηλαδή της ζήτησης και της συμπεριφοράς των οδηγών ως προς την επιλογή της πορείας τους. Αυτό το επίπεδο περιγράφεται στην ενότητα 3.3. Το δεύτερο επίπεδο είναι επιφορτισμένο με την πολιτική ελέγχου που θα πρέπει να ακολουθηθεί σε στρατηγικό επίπεδο έχοντας υπ' όψη το συνολικό δίκτυο και το συνεργατικό αποτέλεσμα όλων των μέτρων ελέγχου που εφαρμόζονται στην κυκλοφορία. Αυτό το επίπεδο αποτελεί και τον πυρήνα του συνολικού συστήματος που βασίζεται στη θεωρία βελτίστου ελέγχου και μη-γραμμικής βελτιστοποίησης και περιγράφεται εκτενώς στην ενότητα 3.4. Το τρίτο επίπεδο έχει σα στόχο να μεταφράσει τη στρατηγική που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο επίπεδο, δηλαδή το στρατηγικό επίπεδο, σε συγκεκριμένους τακτικούς στόχους σε τοπικό επίπεδο όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.5. Τέλος, όλα τα παραπάνω συγκλίνουν στο επίπεδο της εφαρμογής αποκεντρωμένου τοπικού ελέγχου σε κάθε ελεγχόμενο στοιχείο του δικτύου, που περιγράφεται στην ενότητα 3.6. Η όλη προσέγγιση εφαρμόζεται με την τεχνική του κυλιόμενου ορίζοντα που περιγράφεται στην ενότητα 3.7.

### 3.2 Γενική Ιεραρχική Δομή Ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η συνολική στρατηγική ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής που έχει σχεδιαστεί έχει ιεραρχική δομή. Η έννοια της ιεραρχίας λαμβάνει,



στη συγκεκριμένη περίπτωση, το νόημα της αυστηρής και συγκεκριμένης ροής και επεξεργασίας πληροφοριών με στόχο την υποστήριξη της διαδικασίας ελέγχου. Την κυκλοφορία αυτή καθεαυτή την θεωρούμε σαν ένα αιτιοκρατικό φαινόμενο που όμως επηρεάζεται από πεπερασμένου μεγέθους στοχαστικές διαταραχές. Έτσι, ο σχεδιασμός του συνολικού ελεγκτή θα πρέπει να είναι σε θέση να λαμβάνει υπ' όψη τόσο την αιτιοκρατική δυναμική της κυκλοφοριακής ροής, όσο και το στοχαστικό χαρακτήρα των διαταραχών που επενεργούν πάνω της.

Το έργο του ελεγκτή είναι να ελέγχει την κυκλοφορία σε πραγματικό χρόνο έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η αποτελεσματικότητά της, πράγμα που συνήθως συνεπάγεται την αποφυγή ή μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Εφόσον απαιτείται λειτουργία σε πραγματικό χρόνο για μια στρατηγική ελέγχου που καλύπτει όλο το δίκτυο, είναι αναγκαία η γνώση της κυκλοφοριακής κατάστασης του δικτύου. Άρα το πρώτο υποπρόβλημα που αναδύεται είναι αυτό της εκτίμησης της κατάστασης του δικτύου με βάση πραγματικές μετρήσεις. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, η μακροσκοπική περιγραφή της κυκλοφοριακής κατάστασης πραγματοποιείται με βάση τις μεταβλητές πυκνότητας, ροής και ταχύτητας για τους αυτοκινητόδρομους και ουράς για τους συνδέσμους που αντιστοιχούν σε ράμπες εισόδου. Έτσι το πρόβλημα εκτίμησης της τρέχουσας κυκλοφοριακής κατάστασης είναι αυτό του προσδιορισμού των μακροσκοπικών μεταβλητών πυκνότητας, ροής και ταχύτητας κάθε διακριτού τμήματος των συνδέσμων αυτοκινητοδρόμων του δικτύου και των ουρών κάθε ράμπας εισόδου, με βάση μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο δίκτυο. Οι αισθητήρες αυτοί συνήθως είναι φωρατές τοποθετημένοι στο οδόστρωμα που μετρούν τη μέση ταχύτητα και το ποσοστό κατάληψης του οδοστρώματος από οχήματα, κάμερες που παρακολουθούν την κίνηση και με ειδικό λογισμικό επεξεργασίας εικόνες υπολογίζουν την μέση ταχύτητα, τη ροή και την πυκνότητα και τέλος, μπορεί να είναι συσκευές που βασίζονται σε τεχνολογία υπερήχων ή λέιζερ για να μετρούν μέση ταχύτητα και ροή. Σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με το είδος των μετρήσεων, θα πρέπει να υπάρχει ένας αλγόριθμος που να πραγματοποιεί τη ζητούμενη εκτίμηση κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο, βλ. [47].

Επιπλέον της εκτίμησης της τρέχουσας κυκλοφοριακής κατάστασης, απαιτείται και η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, όπως π.χ. η ικανότητα των συνδέσμων. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε το πρόβλημα της εκτίμησης των παραμέτρων και η συνολική διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές τους. Αυτές οι τιμές μπορεί να μεταβάλλονται μέσα στο χρόνο για διάφορους λόγους, π.χ. λόγω αλλαγής των εξωτερικών συνθηκών. Κατά συνέπεια θα πρέπει να υπάρχει και μία σαφώς προσδιορισμένη διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθείται προκειμένου να προσδιορίζονται σε πραγματικό χρόνο οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου.

Πέραν όμως της εκτίμησης που αφορά την τρέχουσα κυκλοφοριακή κατάσταση και τις παραμέτρους του μοντέλου, θα πρέπει να υπάρχει και μία πρόβλεψη των στοχαστικών διαταραχών που θα επενεργήσουν πάνω στη διαδικασία κυκλοφοριακής ροής. Αυτή η πρόβλεψη είναι αναγκαία προκειμένου να συνυπολογιστεί η επίδραση των διαταραχών στην εξέλιξη της διαδικασίας μέσα στο χρόνο και μπορεί να επιτευχθεί με τη συστηματική χρήση ιστορικών δεδομένων σε συνδυασμό με μετρήσεις πραγματικού χρόνου. Η εκτίμηση της κυκλοφοριακής κατάστασης, των παραμέτρων και η πρόβλεψη των στοχαστικών διαταραχών είναι λειτουργίες που μπορούν να δώσουν την απαραίτητη πληροφορία σε μία στρατηγική κυκλοφοριακού ελέγχου προκειμένου να προσδιορίσει το τρόπο με τον οποίο θα αντιδράσει στις προβλεπόμενες διαταραχές δεδομένης της

τρέχουσας κατάστασης του συστήματος, και γιαυτό το λόγο τοποθετούνται στην κορυφή της ιεραρχίας των λειτουργιών. Η θέση αυτή δεν αφορά βέβαια τη σπουδαιότητα της λειτουργίας, αλλά δείχνει τη χρονική διαδοχή των υπολογισμών που πρέπει να γίνουν. Στην ενότητα 3.3 θα αναλυθεί λεπτομερέστερα αυτό το επίπεδο του συνολικού ελεγκτή.

Εφόσον η στρατηγική έχει σχεδιαστεί με βάση ένα αιτιοκρατικό μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής, τότε, δεδομένων των επικρατούντων κυκλοφοριακών συνθηκών και των (μη ελεγχόμενων) μελλοντικών διαταραχών που θα επιδράσουν στο σύστημα μπορεί να προβλεφθεί η μελλοντική πορεία του συστήματος, δηλαδή η μελλοντική τροχιά του διανύσματος της κατάστασης, με χρήση αυτού του αιτιοκρατικού μοντέλου για εφικτές τιμές των μεταβλητών ελέγχου. Αυτή η πρόβλεψη της μελλοντικής πορείας του συστήματος καθιστά μία στρατηγική ελέγχου βασιζόμενη στο μοντέλο της διαδικασίας υπό έλεγχο (Model Predictive Control – MPC) ικανή να προβλέψει πιθανές αρνητικές μελλοντικές καταστάσεις, την υλοποίηση των οποίων θα προσπαθήσει να αποτρέψει μέσω κατάλληλων (βέλτιστων) χειρισμών των διαθέσιμων μέτρων κυκλοφοριακού ελέγχου. Το μοντέλο METANET που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 είναι ένα αιτιοκρατικό μοντέλο όπου η κυκλοφοριακή κατάσταση περιγράφεται από την πυκνότητα, τη μέση ταχύτητα, και τις ουρές των οχημάτων και λαμβάνει υπόψη του τις διαταραχές που επιδρούν στην κυκλοφορία. Η στρατηγική ελέγχου που έχει αναπτυχθεί μ' αυτή τη φιλοσοφία ονομάζεται AMOC (Advanced Motorway Optimal Control) και είναι ο πυρήνας και το πιο σημαντικό στοιχείο της ιεραρχικής δομής ελέγχου που αναπτύχθηκε. Το AMOC δέχεται σαν δεδομένα εισόδου την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, που θεωρείται σαν αρχική κατάσταση, και τις προβλέψεις των διαταραχών και με βάση το μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής του δικτύου υπολογίζει, βελτιστοποιώντας ένα κατάλληλο κριτήριο κόστους, τις βέλτιστες τροχιές ελέγχου, δηλαδή καθορίζει πώς θα πρέπει να λειτουργήσουν τα διαθέσιμα μέτρα κυκλοφοριακού ελέγχου στο μέλλον. Το επίπεδο αυτό θα αναλυθεί στην ενότητα 3.4.

Παρόλο που οι τροχιές ελέγχου που προσδιορίζονται από το AMOC είναι βέλτιστες, οι προκαθορισμένες ενέργειες που θα τις υλοποιήσουν δεν διατηρούν αυτήν την ιδιότητα. Αυτό συμβαίνει για τους παρακάτω λόγους:

1. Η εκτίμηση της αρχικής κατάστασης του συστήματος δεν είναι απολύτως ακριβής είτε ελλείψει αρκετών δεδομένων είτε λόγω περιορισμένης ακρίβειας των αλγορίθμων εκτίμησης. Συνήθως δεν υπάρχουν μεγάλα λάθη στην εκτίμηση της αρχικής κατάστασης γιατί τα σύγχρονα και μεγάλα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων είναι εφοδιασμένα μ' ένα πυκνό δίκτυο αισθητήρων που παρέχουν την αναγκαία πληροφορία. Στο δίκτυο του Άμστερνταμ, για παράδειγμα, υπάρχουν φωρατές κάθε 500 μέτρα περίπου. Εξάλλου έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι εκτίμησης με καλή απόδοση όταν έχουν στη διάθεση τους ικανή ποσότητα πληροφορίας, βλ. [47].
2. Η πρόβλεψη των στοχαστικών διαταραχών έχει πεπερασμένη ακρίβεια αφού οι διαταραχές έχουν στοχαστικό χαρακτήρα και άρα η πρόβλεψή τους αναπόφευκτα περιλαμβάνει λάθη που μεταδίδονται στο μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής. Άρα το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύει το AMOC δεν ανταποκρίνεται στο πραγματικό πρόβλημα, αλλά σε μία προσέγγιση αυτού.
3. Πεπερασμένη ακρίβεια εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου της κυκλοφοριακής ροής ή αλλαγή των παραμέτρων κατά τη διάρκεια εφαρμογής του ελέγ-

χου. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε μία διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων του μακροσκοπικού μοντέλου METANET μέσω της διαδικασίας επικύρωσης του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία εγγυάται σε μεγάλο βαθμό τον προσδιορισμό των σωστών τιμών των παραμέτρων, αλλά πιθανώς σε μία εφαρμογή να μην πραγματοποιηθεί, π.χ. γιατί είναι αρκετά επίπονη, απαιτεί χρόνο και ποσότητα δεδομένων. Επιπλέον, οι παράμετροι του μοντέλου παίρνουν τις τιμές τους με βάση τα χαρακτηριστικά των οδών. Ο τρόπος οδήγησης μπορεί να μεταβληθεί με το χρόνο, π.χ. λόγω αλλαγής των εξωτερικών συνθηκών ή της σύνθεσης της κυκλοφορίας.

4. Κάποιο απρόβλεπτο συμβάν (π.χ. ατύχημα) μπορεί να έλαβε χώρα στον αυτοκινητόδρομο και κατά συνέπεια, η στρατηγική που δεν είναι ενήμερη για το γεγονός θα συνεχίσει να λειτουργεί σαν να μην έγινε κάτι τέτοιο.

Καθίσταται έτσι αναγκαία η ύπαρξη ενός ενδιάμεσου επιπέδου ανάμεσα στο AMOC και στις εντολές που θα δωθούν στο πεδίο που σκοπό θα έχει την προσαρμογή των αποτελεσμάτων στην τρέχουσα πραγματική κυκλοφοριακή κατάσταση. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται αυτός ο στόχος περιγράφεται στην ενότητα 3.5

Όλοι οι υπολογισμοί που έχουν γίνει στα προηγούμενα επίπεδα καταλήγουν στους τοπικούς ελεγκτές που ρυθμίζουν την κυκλοφορία. Στα κυκλοφοριακά μέτρα ελέγχου έχουμε να κάνουμε με κατανεμημένες μονάδες ελέγχου που υλοποιούν τις αποφάσεις που έχουν ληφθεί στα ανώτερα επίπεδα και περιγράφονται στην ενότητα 3.6.

Με βάση όσα έχουν ειπωθεί μέχρι τώρα, μπορούμε να αναπαραστήσουμε γραφικά την ιεραρχική δομή ελέγχου που αναπτύχθηκε. Στις επόμενες ενότητες κάθε επίπεδο της δομής του σχήματος 3.1 περιγράφεται αναλυτικά.

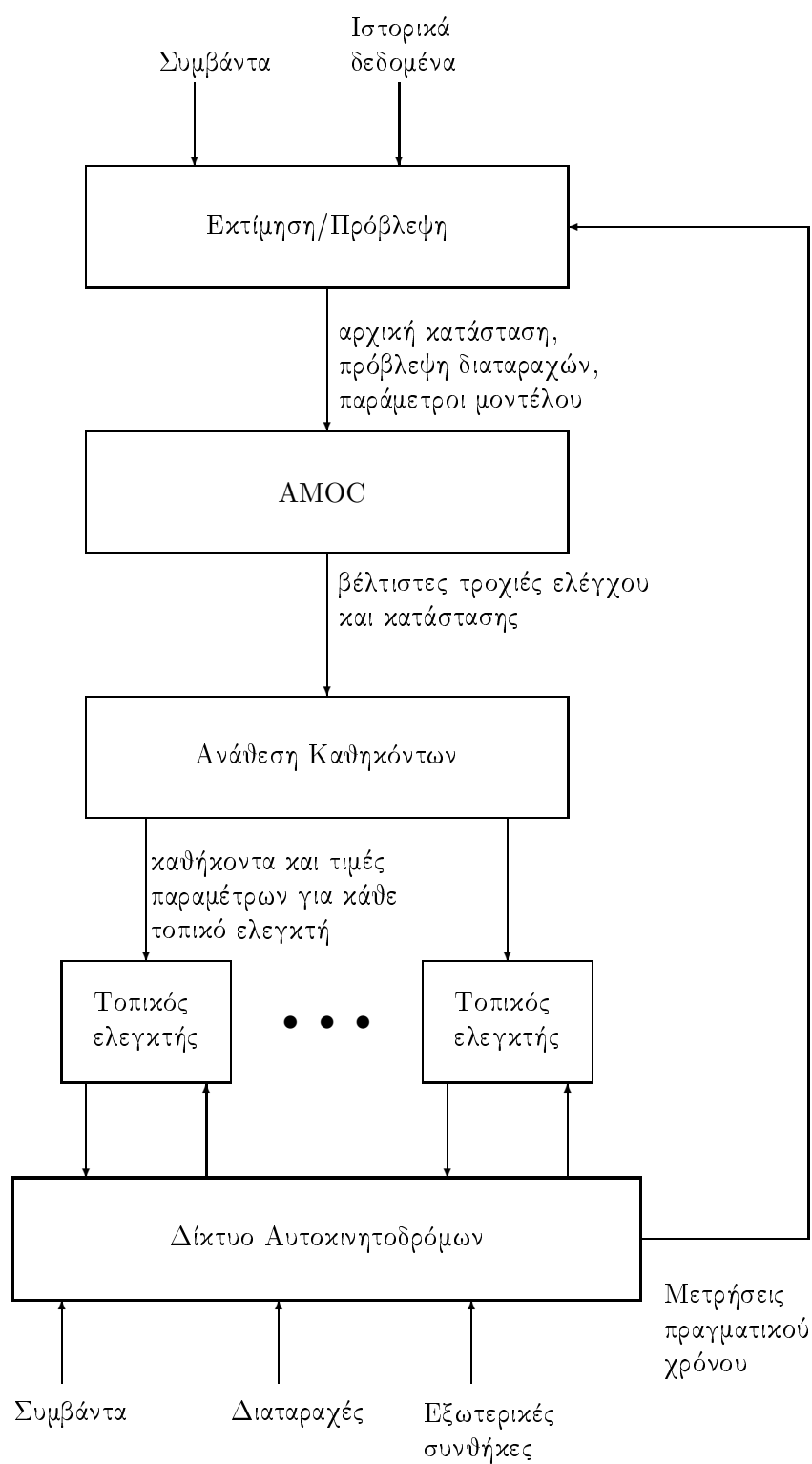
### 3.3 Επίπεδο Εκτίμησης και Πρόβλεψης

#### 3.3.1 Λειτουργίες του επιπέδου

Το επίπεδο εκτίμησης και πρόβλεψης έχει στόχο να καθορίζει σε πραγματικό χρόνο τις αρχικές συνθήκες του συστήματος, τις παραμέτρους του μοντέλου και να πραγματοποιήσει μία πρόβλεψη των διαταραχών που πρόκειται να επενεργήσουν στο μέλλον για μία περίοδο  $H_P$ .

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, είσοδοι σ' αυτό το επίπεδο είναι:

1. Ενημέρωση για την περίπτωση που έγινε κάποιο συμβάν, το μέρος όπου έλαβε χώρα και τη σοβαρότητά του. Αυτή η πληροφορία μπορεί να δοθεί είτε από κάποιον χειριστή που βρίσκεται στο κέντρο ελέγχου και επιβλέπει την κυκλοφορία, είτε από ένα σύστημα αυτόματης αναγνώρισης ατυχημάτων. Η αυτοματοποίηση του εντοπισμού ενός ατυχήματος είναι ένα δύσκολο πρόβλημα που απαιτεί μεγάλο αριθμό δεδομένων από τους αισθητήρες του δικτύου.
2. Ιστορικά δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από αλγόριθμους πρόβλεψης των διαταραχών, όπως της ζήτησης στις ράμπες εισόδου των αυτοκινητοδρόμων.
3. Μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο από το πεδίο που προέρχονται από φωρατές, κάμερες, συσκευές λείζερ, συσκευές υπερήχων ή συνδιασμού αυτών. Μετρούμενα μεγέθη είναι η μέση ταχύτητα, η κυκλοφοριακή ροή και το ποσοστό κατάληψης των δρόμων.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ιεραρχικής δομής ελέγχου της κυκλοφορίας.

Οι παραπάνω είσοδοι παρέχουν την αναγκαία πληροφορία στο επίπεδο «Εκτίμησης και Πρόβλεψης» για να επιτελέσει τις λειτουργίες του. Η έξοδός του είναι το διάνυσμα της τρέχουσας (αρχικής) κατάστασης του συστήματος, οι προβλεπόμενες τροχιές των διαταραχών και το διάνυσμα των παραμέτρων του μοντέλου.

### 3.3.2 Εκτίμηση της κατάστασης της κυκλοφορίας

Επειδή το AMOC βασίζεται στη μακροσκοπική περιγραφή της κυκλοφοριακής ροής η κατάσταση του συστήματος περιγράφεται μακροσκοπικά από τις παρακάτω μεταβλητές που έχουν οριστεί στο Κεφάλαιο 2:

1. Πυκνότητα των οχημάτων  $\rho_{m,i}$  (οχήματα/χιλιόμετρα/λωρίδα) σε κάθε διακριτό τμήμα  $i$  του συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου  $m$ .
2. Μέση ταχύτητα  $v_{m,i}$  (χιλιόμετρα/ώρα) που επικρατεί σε κάθε διακριτό τμήμα  $i$  κάθε συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου  $m$ .
3. Ουρά  $w_o$  (οχήματα) της ράμπας εισόδου ή συνδέσμου αποθήκευσης και προώθησης  $o$ .

Έτσι, αν υπάρχουν στο δίκτυο  $N$  σύνδεσμοι αυτοκινητοδρόμων που ο καθένας είναι χωρισμένος σε  $N_m$  διακριτά τμήματα και  $W$  σύνδεσμοι ουρών, τότε το διάνυσμα κατάστασης είναι

$$\mathbf{x} = [\rho_{1,1}v_{1,1} \dots \rho_{1,N_1}v_{1,N_1} \dots \rho_{N,1}v_{N,1} \dots \rho_{N,N_N}v_{N,N_N}w_1 \dots w_W]^T \quad (3.1)$$

Κατά συνέπεια έργο ενός αλγορίθμου εκτίμησης της τρέχουσας κατάστασης είναι, με βάση τις μετρήσεις πραγματικού χρόνου, και τις παραμέτρους του μοντέλου να εκτιμηθεί το διάνυσμα κατάστασης στην τρέχουσα χρονική στιγμή, που τη θεωρούμε  $k = 0$ ,  $\mathbf{x}(0)$ .

Αυτό είναι ένα κλασσικό πρόβλημα εκτίμησης για το οποίο η θεωρία αυτομάτου ελέγχου έχει αναπτύξει αποτελεσματικά εργαλεία. Το πιο διαδεδομένο είναι το φίλτρο Kalman κι επειδή το σύστημα είναι μη γραμμικό, εφαρμόζεται το επεκταμένο φίλτρο Kalman. Αυτές οι μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς με βάση το μακροσκοπικό μοντέλο METANET (κεφάλαιο 2) στο [47]. Στα σενάρια που θα εξετάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο, θα θεωρήσουμε ότι έχουμε πλήρη γνώση του διανύσματος  $\mathbf{x}(0)$ .

### 3.3.3 Εκτίμηση παραμέτρων

Η εκτίμηση παραμέτρων είναι ένα περίπλοκο και χρονοβόρο πρόβλημα όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 2. Θα πρέπει να πραγματοποιηθεί για κατηγορίες κλιματολογικών συνθηκών και να υπάρχουν έτοιμα σύνολα παραμέτρων για κάθε κατηγορία έτσι ώστε να χρησιμοποιείται το κατάλληλο σύνολο σε κάθε περίπτωση. Η διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων δεν χρειάζεται να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, αλλά σε τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να προσαρμόζεται το μοντέλο σε αλλαγές της οδηγικής συμπεριφοράς των χρηστών του δικτύου.

### 3.3.4 Πρόβλεψη διαταραχών

Οι είσοδοι στη διαδικασία κυκλοφοριακής ροής που δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν και προέρχονται από το περιβάλλον του δικτύου ονομάζονται διαταραχές. Η λεπτομέρεια με την οποία περιγράφονται αυτές οι διαταραχές εξαρτάται τόσο από την ίδια

τους τη φύση, όσο και από το μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής που χρησιμοποιείται. Στη μακροσκοπική μοντελοποίηση που ακολουθούμε μας ενδιαφέρουν δύο ειδών διαταραχές. Η πρώτη αφορά τη ζήτηση  $d_o$  που εμφανίζεται στις εισόδους του δικτύου, και η δεύτερη τις διαδρομές των οδηγών του δικτύου όπως συγκεκριμενοποιούνται στα ποσοστά στροφής  $\beta_n^m$ .

Η ζήτηση λαμβάνεται υπόψη στις εξισώσεις της ουράς των οχημάτων στις ράμπες εισόδου, (2.8)–(2.11).

Επιπλέον διαταραχές στο σύστημα μπορούν να θεωρηθούν και η ταχύτητα στις εισόδους και η πυκνότητα στις εξόδους. Δεν προκύπτει κάποιο σοβαρό πρόβλημα στο μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής αν αυτές παραβλεφθούν και γιαυτό δεν πρόκειται να μας απασχολήσουν καθόλου στο εξής.

Το δεύτερο είδος των διαταραχών αφορά, τις διαδρομές των οδηγών στο δίκτυο των αυτοκινητοδρόμων. Στο METANET αυτή η διαδικασία μοντελοποιείται στις εξισώσεις των κόμβων του γράφου που αναπαριστά το δίκτυο, δηλαδή στις εξισώσεις (2.19) και (2.20), όπου διαταραχή είναι το ποσοστό στροφής  $\beta_n^m$ .

Θεωρούμε ότι όλες οι διαταραχές συγκεντρώνονται στο διάνυσμα  $\mathbf{d}$  που έχει τη μορφή

$$\mathbf{d} = [d_1 \dots d_O \beta_1^{m_1} \dots \beta_B^{m_B}]^T \quad (3.2)$$

όπου  $O$  ο συνολικός αριθμός των ραμπών και  $B$  ο συνολικός αριθμός των διακλαδώσεων, είτε από αυτοκινητόδρομο προς ράμπα εξόδου είτε από αυτοκινητόδρομο προς άλλον αυτοκινητόδρομο.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την πρόβλεψη των ζητήσεων στις ράμπες εισόδου. Με δεδομένη την περιοδική φύση των ημερήσιων δρομολογίων των οδηγών, τα ιστορικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την πρόβλεψη της ζήτησης σε κάθε ράμπα, βλ. [24], [28] και [42].

Τέλος, τα ποσοστά στροφής είναι εύκολο να προσδιοριστούν με βάση ιστορικά δεδομένα, καθώς έχουν σταθερή τιμή για συγκεκριμένες περιόδους της ημέρας (π.χ. πρωινή ώρα αιχμής) και δεν αλλάζουν σημαντικά (εκτός του στοχαστικού θορύβου).

### 3.4 Επίπεδο Βελτιστοποίησης

#### 3.4.1 Λειτουργίες του επιπέδου

Η λειτουργία του επιπέδου βελτιστοποίησης είναι η βασικότερη της δομής ελέγχου που περιγράφεται σ' αυτό το κεφάλαιο. Σαν είσοδο δέχεται την τρέχουσα κυκλοφοριακή κατάσταση του δικτύου με τη μορφή του διανύσματος  $\mathbf{x}(0)$  της σχέσης (3.1), τις παραμέτρους του μακροσκοπικού μοντέλου METANET του δικτύου και τις προβλέψεις των διαταραχών  $\mathbf{d}$  για έναν χρονικό ορίζοντα  $H_P$  διακριτών βημάτων χρόνου. Με βάση αυτά τα δεδομένα εφαρμόζεται για το δίκτυο των αυτοκινητοδρόμων το AMOC και προσδιορίζονται οι βέλτιστες τροχιές ελέγχου και οι αντίστοιχες βέλτιστες τροχιές της κατάστασης. Αυτό πραγματοποιείται με την αριθμητική επίλυση ενός μη-γραμμικού προβλήματος βελτίστου ελέγχου διακριτού χρόνου. Όταν επέλθει η σύγκλιση του αλγορίθμου, τότε οι βέλτιστες τροχιές ελέγχου έχουν προσδιοριστεί και κατά συνέπεια έχει προσδιοριστεί και η βέλτιστη τροχιά του διανύσματος της κατάστασης.

Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται για όλο το δίκτυο και τα αποτελέσματά της αποτελούν στόχους που πρέπει να επιτευχθούν από τη λειτουργία των τοπικών ελεγκτών. Με άλλα λόγια, η λύση του προβλήματος βελτίστου ελέγχου αποτελεί την πολι-

τική που αποφασίζεται σε στρατηγικό επίπεδο, καθοδηγώντας έτσι τους τοπικούς ελεγκτές στη δράση τους σε τακτικό επίπεδο. Προκειμένου να αποφασιστεί η τακτική μέσω της οποίας θα επιτευχθούν οι στρατηγικοί στόχοι, τα αποτελέσματα του AMOC προωθούνται στο επόμενο επίπεδο.

### 3.4.2 Μορφοποίηση του προβλήματος

Το πρόβλημα του ελέγχου ενός δικτύου αυτοκινητοδρόμων μορφοποιείται σαν ένα μη-γραμμικό πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου με περιορισμούς. Η κυκλοφοριακή ροή θεωρείται σαν μία διαδικασία που ελέγχεται μέσω της ροής εισόδου σε κάθε ράμπα εισόδου του δικτύου μέσω κατάλληλων συστημάτων φωτεινής σηματοδότησης που είναι εγκατεστημένα. Η κατάσταση της διαδικασίας περιγράφεται από το διάνυσμα  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{(2 \times \sum_{\ell=1}^N N_{\ell} + W)}$  και η εξέλιξη της εξαρτάται από τις εισόδους που δέχεται και τη μη-γραμμική δυναμική του μοντέλου που περιγράφεται από τη συνάρτηση  $\mathbf{f}$ . Οι μεταβλητές εισόδου διαχωρίζονται στις μεταβλητές ελέγχου  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^M$  και στις μη ελεγχόμενες εξωγενείς διαταραχές  $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^{(O+B)}$ . Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τη γενική μορφή του προβλήματος όπου κάθε μέτρο ελέγχου μπορεί να μεταβάλλεται με μικρότερη συχνότητα από την κατάσταση του συστήματος. Υποθέτουμε ότι για τα  $M$  μέτρα ελέγχου υπάρχουν  $p$  διαφορετικά χρονικά βήματα τα οποία είναι κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο του διακριτού χρονικού βήματος της κατάστασης  $T$ . Δηλαδή,  $T_{\ell} = z_{\ell} \cdot T$ , με  $z_{\ell} \in \mathbb{N}$ ,  $\ell = 1, \dots, p$  και  $p \leq M = \dim \mathbf{u}$ . Έστω ότι  $k_{\ell} = \text{integer } [k/z_{\ell}]$  και ότι  $j_{\ell}$  είναι ο αριθμός των μέτρων ελέγχου που έχουν διακριτό χρονικό βήμα  $T_{\ell}$  που συγκεντρώνονται στο διάνυσμα  $\mathbf{u}_{\ell}$ . Τότε  $\mathbf{u}(k) = [\mathbf{u}_1(k_1)^T \dots \mathbf{u}_p(k_p)^T]^T$ . Η γενική μορφή του προβλήματος που επιλύεται αριθμητικά έχει ως εξής:

Ελάχιστο

$$J = \vartheta[\mathbf{x}(K)] + \sum_{k=0}^{K-1} \varphi[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}_1(k_1), \dots, \mathbf{u}_p(k_p), \mathbf{d}(k)] \quad (3.3)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}_1(k_1), \dots, \mathbf{u}_p(k_p), \mathbf{d}(k)], \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (3.4)$$

$$\mathbf{u}_{\ell, \min} \leq \mathbf{u}_{\ell}(k_{\ell}) \leq \mathbf{u}_{\ell, \max} \text{ και } \ell \in \{1, \dots, p\} \quad (3.5)$$

όπου  $K$  είναι ο χρονικός ορίζοντας για τον οποίο λύνεται το πρόβλημα,  $\mathbf{u}_{\ell, \min}$  και  $\mathbf{u}_{\ell, \max}$  είναι τα κάτω και άνω όρια των ελέγχων αντίστοιχα και  $\vartheta, \varphi$  είναι διπλά παραγωγίσιμες μη-γραμμικές συναρτήσεις κόστους.

Προκειμένου να θέσουμε το πρόβλημα του ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής δικτύων αυτοκινητοδρόμων, με την εφαρμογή μέτρων ελέγχου εισόδου της ροής, στη μορφή (3.3)–(3.5), θα πρέπει πρώτα να επεκτείνουμε το μοντέλο της ουράς που σχηματίζεται στις ράμπες εισόδου, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη ο έλεγχος ράμπας εισόδου. Έτσι, αν η ράμπα εισόδου ο ελέγχεται, οι εξισώσεις (2.8)–(2.11) παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T[d_o(k) - q_o(k)] \quad (3.6)$$

$$q_o(k) = r_o(k) \min\{\hat{q}_{o,1}(k), \hat{q}_{o,2}(k)\} \quad (3.7)$$

$$\hat{q}_{o,1}(k) = d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T} \quad (3.8)$$

$$\hat{q}_{o,2}(k) = Q_o \min \left\{ 1, \frac{\rho_{\max} - \rho_{\mu,1}(k)}{\rho_{\max} - \rho_{cr,\mu}} \right\} \quad (3.9)$$

όπου  $r_o(k) \in [0, 1]$  είναι το ποσοστό της συνολικής ροής, η οποία θέλει να εισέλθει στον αυτοκινητόδρομο κατά τη χρονική περίοδο  $k$ , που τελικά της επιτρέπεται να εισέλθει στο δίκτυο κατά την αυτή περίοδο. Το  $r_o(k)$  λέγεται ποσοστό εισόδου της ράμπας (ramp metering rate).

Μ' αυτήν την επέκταση του μοντέλου μπορούμε να πάρουμε τη μορφή των εξισώσεων (3.3)–(3.5) με την αντικατάσταση των σχέσεων (2.3), (2.19), (2.20) στην εξίσωση (2.2)· την αντικατάσταση των σχέσεων (2.5), (2.22) στη σχέση (2.4)· τέλος, την αντικατάσταση των σχέσεων (3.7)–(3.9) στην εξίσωση (3.6). Το διάνυσμα κατάστασης είναι αυτό που δίνεται από τη σχέση (3.1), το διάνυσμα ελέγχου αποτελείται από όλα τα ποσοστά εισόδου ραμπων  $r_o$  και το διάνυσμα των διαταραχών αποτελείται από τις ζητήσεις  $d_o$  σε κάθε είσοδο  $o$  και τα ποσοστά στροφής σε κάθε διασταύρωση, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Τα ποσοστά εισόδου των ραμπων είναι προφανώς φραγμένα από πάνω από τη μονάδα, ενώ από κάτω από το μηδέν. Συνήθως, όμως, υπάρχει ένα κατώτατο όριο ροής που μπορεί να εισέλθει στο δίκτυο, κάτι που επιβάλλουν οι υπεύθυνοι του δικτύου προκειμένου να εξυπηρετείται πάντα ένας ελάχιστος αριθμός οχημάτων. Αυτό μεταφράζεται σε μία τιμή του ελάχιστου επιτρεπτού ρυθμού μέτρησης ράμπας διαφορετική του μηδενός, π.χ. ίση με 0,04.

Το κριτήριο κόστους που έχει επιλεγεί για να ελαχιστοποιηθεί είναι ο Συνολικός Χρόνος (ΣΧ) που δίδεται από τη σχέση (2.26) με την προσθήκη όρων ποινής. Το κριτήριο κόστους δίνεται από τη σχέση:

$$J = \tau_{\Sigma X} + \sum_{k=0}^{K-1} \sum_o \left\{ a_f T [r_o(k) - r_o(k-1)]^2 + a_w \psi [w_o(k)]^2 \right\} \quad (3.10)$$

με

$$\psi [w_o(k)] = \max \{0, w_o(k) - w_{o,\max}\} \quad (3.11)$$

όπου  $a_f$  είναι ένας συντελεστής βάρους ποινής που τιμωρεί σημαντικές χρονικές μεταβολές των μεταβλητών ελέγχου, ενώ  $a_w$  είναι συντελεστής βάρους ποινής που τιμωρεί τιμές της κάθε ουράς  $w_o$  που είναι μεγαλύτερες από την αντίστοιχη μέγιστη επιτρεπτή ουρά  $w_{o,\max}$ .

Η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου  $J$  της (3.10) οδηγεί ουσιαστικά στην ελαχιστοποίηση του Συνολικού Χρόνου όλων των οχημάτων που κινούνται στο δίκτυο αφού ο παράγοντας που τιμωρεί τις χρονικές μεταβολές των μεταβλητών ελέγχου δεν επιφέρει κάποια σημαντική υποβάθμιση της βέλτιστης λύσης. Αντίθετα, η βέλτιστη λύση επηρεάζεται από τους όρους που τιμωρούν παραβιάσεις των περιορισμών μέγιστης ουράς, οδηγώντας έτσι σε μία εξισορρόπηση ανάμεσα στην αποτελεσματικότητα της στρατηγικής και στην δίκαιη κατανομή του κόστους, που απαιτείται για την επίτευξή της, ανάμεσα στις ράμπες του δικτύου. Λεπτομέρειες αναφέρονται στο κεφάλαιο 4.

### 3.4.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Έχοντας θέσει το πρόβλημα του ελέγχου της κυκλοφορίας στη μορφή (3.3)–(3.5), χρειαζόμαστε έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος βελτίστου ελέγχου διακριτού χρόνου. Αρχίζουμε ορίζοντας τις ποσότητες:

$$K_\ell = \begin{cases} \frac{K}{z_\ell} - 1 & \text{αν } K \bmod z_\ell = 0 \\ \text{integer} \left( \frac{K}{z_\ell} \right) & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (3.12)$$



Για μία δεδομένη εφικτή τροχιά ελέγχου  $\mathbf{u}_\ell(k_\ell)$ ,  $k_\ell = 0, \dots, K_\ell$ , η τροχιά κατάστασης  $\mathbf{x}(k+1)$  μπορεί να προσδιοριστεί με την επίλυση της (3.4) με δεδομένη αρχική κατάσταση  $\mathbf{x}(0)$ . Κατά συνέπεια το κριτήριο κόστους  $J$  μπορεί να θεωρηθεί σα συνάρτηση μόνο του διανύσματος ελέγχου, για δεδομένη αρχική τιμή  $\mathbf{x}(0)$  και γνωστές μέσω πρόβλεψης διαταραχές, δηλαδή  $J = \bar{J}[\mathbf{u}(k)]$ . Η παράγωγος του  $\bar{J}$  ως προς το  $\mathbf{u}_\ell(k_\ell)$  πάνω στους περιορισμούς ισότητας για την περίοδο  $k_\ell$  δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{g}_\ell(k_\ell) = \sum_{k=k_\ell z_\ell}^{\min\{(k_\ell+1)z_\ell-1, K-1\}} \left\{ \frac{\partial \varphi[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}_1(k_1), \dots, \mathbf{u}_\ell(k_\ell), \dots, \mathbf{u}_p(k_p), \mathbf{d}(k)]}{\partial \mathbf{u}_\ell(k_\ell)} + \right. \\ \left. + \frac{\partial \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}_1(k_1), \dots, \mathbf{u}_\ell(k_\ell), \dots, \mathbf{u}_p(k_p), \mathbf{d}(k)]^T}{\partial \mathbf{u}_\ell(k_\ell)} \boldsymbol{\lambda}(k+1) \right\} \quad (3.13)$$

όπου το συν-καταστατικό διάνυσμα  $\boldsymbol{\lambda}$  ικανοποιεί τη σχέση:

$$\boldsymbol{\lambda}(k) = \frac{\partial \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}_1(k_1), \dots, \mathbf{u}_p(k_p), \mathbf{d}(k)]^T}{\partial \mathbf{x}(k)} \boldsymbol{\lambda}(k+1) + \\ + \frac{\partial \varphi[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}_1(k_1), \dots, \mathbf{u}_p(k_p), \mathbf{d}(k)]}{\partial \mathbf{x}(k)} \quad k = 0, \dots, K-1 \quad (3.14)$$

και

$$\boldsymbol{\lambda}(K) = \frac{\partial \vartheta[\mathbf{x}(K)]}{\partial \mathbf{x}(K)}. \quad (3.15)$$

Η μειωθείσα παράγωγος  $\xi_\ell(k_\ell)$  ορίζεται έτσι ώστε οι συνιστώσες της  $\xi_{\ell,i}(k_\ell)$  να είναι ίσες με  $g_{\ell,i}(k_\ell)$  αν κανένα από τα αντίστοιχα άνω και κάτω όρια της σχέσης (3.5) δεν ενεργοποιείται και  $\xi_{\ell,i}(k_\ell) = 0$  αλλιώς. Ορίζουμε, επιπλέον, το διάνυσμα κορεσμού  $\text{sat}(\boldsymbol{\eta})$  που έχει συνιστώσες

$$\text{sat}_i(\boldsymbol{\eta}) = \begin{cases} \eta_{i,\max} & \text{αν} & \eta_i > \eta_{i,\max} \\ \eta_{i,\min} & \text{αν} & \eta_i < \eta_{i,\min} \\ \eta_i & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (3.16)$$

Οι αναγκαίες συνθήκες βελτίστου δίδονται από τις σχέσεις (3.4), (3.5), (3.14), (3.15) και  $\xi_{\ell,i}(k_\ell) = 0 \forall i, k_\ell, \ell$ . Ένας γνωστός αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος που βασίζεται στη μέθοδο των εφικτών κατευθύνσεων εφαρμόζεται για να προσδιορίσει τη βέλτιστη τροχιά ελέγχου  $\mathbf{u}^*(k)$  και κατ'επέκταση και τη βέλτιστη τροχιά κατάστασης  $\mathbf{x}^*(k)$ ,  $k = 0, \dots, K$ . Ο αλγόριθμος αυτός έχει ως εξής:

1. Επιλέγεται μία εφικτή αρχική τροχιά ελέγχου  $\mathbf{u}^{(0)}(k)$ ,  $k = 0, \dots, K-1$  και τίθεται ο δείκτης επανάληψης  $\iota = 0$ .
2. Χρησιμοποιώντας το  $\mathbf{u}^{(\iota)}(k)$ ,  $k = 0, \dots, K-1$  επιλύεται η (3.4) αρχίζοντας από το γνωστό διάνυσμα αρχικών συνθηκών  $\mathbf{x}(0)$  για να προσδιοριστεί το  $\mathbf{x}^{(\iota)}(k+1)$  με δεδομένα τα  $\mathbf{x}^{(\iota)}(k+1)$  και  $\mathbf{u}^{(\iota)}(k)$  επιλύεται η (3.14) με τερματική συνθήκη (3.15) έτσι ώστε να προσδιοριστεί το  $\boldsymbol{\lambda}^{(\iota)}(k+1)$ .
3. Χρησιμοποιώντας τα  $\mathbf{x}(0)$ ,  $\mathbf{x}^{(\iota)}(k+1)$ ,  $\mathbf{u}^{(\iota)}(k)$  και  $\boldsymbol{\lambda}^{(\iota)}(k+1)$ ,  $k = 0, 1, \dots, K-1$ , υπολογίζονται οι παράγωγοι  $\mathbf{g}^{(\iota)}(k)$  και  $\boldsymbol{\xi}^{(\iota)}(k)$ .
4. Προσδιορίζεται μία εφικτή κατεύθυνση  $\mathbf{s}^{(\iota)}(k)$  με κάποια μέθοδο π.χ συζυγών κλίσεων (βλέπε παρακάτω).

5. Εφαρμόζεται αναζήτηση επί γραμμής πάνω στην κατεύθυνση  $\mathbf{s}$ , έτσι ώστε να προσδιοριστεί μία καινούργια τροχιά ελέγχου  $\mathbf{u}^{(\iota+1)}(k)$  που βελτιώνει το κριτήριο κόστους, δηλαδή

$$\alpha^{(\iota)} = \arg \min_{\alpha} \bar{J} \left[ \text{sat} \left( \mathbf{u}^{(\iota)} + \alpha \mathbf{s}^{(\iota)} \right) \right]$$

όπου  $\alpha^{(\iota)}$  είναι το μήκος του βήματος πάνω στην  $\mathbf{s}$ .

6. Αν, για δεδομένο θετικό  $\sigma$ , ικανοποιείται η συνθήκη  $|J^{(\iota+1)} - J^{(\iota)}| / J^{(\iota)} < \sigma$  τότε σταματάει ο αλγόριθμος και η τρέχουσα τροχιά ελέγχου είναι η βέλτιστη στην αντίθετη περίπτωση θέτουμε  $\iota := \iota + 1$  και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το Βήμα 2.

Για τον προσδιορισμό των κατευθύνσεων αναζήτησης  $\mathbf{s}^{(\iota)}$  υπάρχει ένας αριθμός εναλλακτικών προσεγγίσεων που μπορούν να εφαρμοστούν όπως οι μέθοδοι μέγιστης κατάβασης, συζυγών κατευθύνσεων (π.χ. Fletcher-Reeves και Polak-Ribiere) και σχεδόν-Newton (π.χ. DFP και BFGS). Οποιαδήποτε μέθοδος κι αν εφαρμοστεί, η περιοδική ανακίνηση του αλγορίθμου με την κατεύθυνση μέγιστης κατάβασης επιταχύνει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και τις ιδιότητες του αναφέρονται στο [35].

Εναλλακτικά, τα Βήματα 4 και 5 μπορούν να αντικατασταθούν από τη μέθοδο RPROP (Resilient backPROPagation) και που έχει προταθεί στο [38] για εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων. Το RPROP δεν απαιτεί την αναζήτηση επί γραμμής (Βήμα 5), επειδή η μεταβολή των μεταβλητών ελέγχου σε κάθε επανάληψη γίνεται βάση του προσήμου της αντίστοιχης συνιστώσας της παραγώγου  $g_i(k)$ .

Όταν χρησιμοποιείται το RPROP (λίγο διαφοροποιημένο σε σχέση με αυτό που περιγράφεται στο [38]), τα Βήματα 4 και 5 αντικαθίστανται από τους ακόλουθους υπολογισμούς:

$$\mathbf{u}^{(\iota+1)}(k) = \text{sat} \left( \mathbf{u}^{(\iota)}(k) + \Delta \mathbf{u}^{(\iota)}(k) \right)$$

όπου οι μεταβολές των μεταβλητών ελέγχου  $\Delta u_i^{(\iota)}(k)$  υπολογίζονται βάση του προσήμου της παραγώγου  $g_i^{(\iota)}(k)$  και βάση της αντίστοιχης προηγούμενης μεταβολής  $\Delta u_i^{(\iota-1)}(k)$  ως εξής:

$$\Delta u_i^{(\iota)}(k) = \begin{cases} -\text{sign} \left( g_i^{(\iota)}(k) \right) \eta^+ \Delta u_i^{(\iota-1)}(k) & \text{αν } g_i^{(\iota-1)}(k) g_i^{(\iota)}(k) > 0 \\ -\eta^- \Delta u_i^{(\iota)}(k) & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου  $0 < \eta^- < 1 < \eta^+$ . Έτσι, αν δεν υπάρχει αλλαγή προσήμου του  $g_i(k)$  στις δύο επαναλήψεις  $(\iota - 1)$  και  $(\iota)$ , η αντίστοιχη μεταβολή  $\Delta u_i^{(\iota)}(k)$  αυξάνεται σε σχέση με τη μεταβολή της προηγούμενης επανάληψης  $\Delta u_i^{(\iota-1)}(k)$  κατά έναν παράγοντα  $\eta^+$  (συνήθως  $\eta^+ = 1.2$ ). Αν υπάρξει αλλαγή προσήμου του  $g_i(k)$ , τότε αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος προσπέρασε ένα τοπικό ελάχιστο στην αντίστοιχη κατεύθυνση, πράγμα που σημαίνει ότι η μεταβολή της αντίστοιχης μεταβλητής ελέγχου  $\Delta u_i^{(\iota)}(k)$  πρέπει να αντιστραφεί και να μειωθεί (συνήθως  $\eta^- = 0.5$ ). Ο αλγόριθμος αρχίζει με  $\Delta u_i^{(0)}(k) = \Delta_i$  και τα υπολογιζόμενα  $\Delta u_i^{(\iota)}(k)$  σε κάθε επανάληψη περιορίζονται στο εκ των προτέρων προσδιορισμένο διάστημα  $[\Delta_{\min}, \Delta_{\max}]$ .

Η μέθοδος του RPROP διατηρεί την ιδιότητα της εφικτής κατεύθυνσης, αλλά δεν διατηρεί την ιδιότητα κατάβασης, δηλαδή δεν εγγυάται την μείωση του κριτηρίου

κόστους σε κάθε επανάληψη. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να διατηρείται στη μνήμη η μέχρι την τρέχουσα επανάληψη βέλτιστη τροχιά ελέγχου, η βέλτιστη τιμή του κριτηρίου κόστους και ο αριθμός της επανάληψης όπου έχει αυτό επιτευχθεί. Έτσι το κριτήριο σύγκλισης του αλγορίθμου περιλαμβάνει μία ακόμη συνθήκη, αυτή του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων από την επανάληψη όπου επιτεύχθηκε η τρέχουσα βέλτιστη τροχιά ελέγχου.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκε δεν εγγυάται τη σύγκλιση στο απόλυτο ελάχιστο (global minimum) αλλά σ' ένα τοπικό ελάχιστο. Παρόλα αυτά η εφαρμογή του καταλήγει πάντα σε αποτελέσματα που κρίνονται αποτελεσματικά για τη φύση του προβλήματος. Διαφοροποιήσεις μπορεί να υπάρχουν στη μορφή των βέλτιστων τροχιών ελέγχου, που όμως δεν συνοδεύονται από σοβαρές διαφορές του κριτηρίου κόστους.

### 3.5 Επίπεδο Ανάθεσης Καθηκόντων

#### 3.5.1 Λειτουργίες του επιπέδου

Σκοπός αυτού του επιπέδου είναι να διαμορφώσει την τακτική που θα πρέπει να ακολουθηθεί από τους τοπικούς ελεγκτές προκειμένου να υλοποιηθεί η βέλτιστη πολιτική που έχει προσδιοριστεί στο προηγούμενο επίπεδο. Γιαυτό δέχεται σαν είσοδο τις βέλτιστες τροχιές ελέγχου και κατάστασης που έχει υπολογίσει το AMOC και που περιγράφουν πλήρως τις κυκλοφοριακές συνθήκες που θα πρέπει να διαμορφωθούν στη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα  $H_P$ . Με δεδομένες αυτές τις βέλτιστες τροχιές το πρόβλημα απόφασης που αντιμετωπίζεται σ' αυτό το επίπεδο, είναι να ανατεθεί σε κάθε τοπικό ελεγκτή, σε κάθε είσοδο που ελέγχεται, η εφαρμογή μιας κατάλληλης τοπικής στρατηγικής ελέγχου. Οι τοπικές στρατηγικές μέτρησης ράμπας εισόδου που χρησιμοποιούνται είναι η κλασσική ALINEA, και η ALINEA που στηρίζεται σε μετρήσεις ροής. Οι λεπτομέρειες αυτών των στρατηγικών αναφέρονται στην ενότητα 3.6.

Έξοδος αυτού του επιπέδου είναι η στρατηγική τοπικού ελέγχου που θα εφαρμοστεί σε κάθε ελεγχόμενη ράμπα εισόδου μαζί με τις αναγκαίες παραμέτρους που τη χαρακτηρίζουν. Αυτές οι παράμετροι προσδιορίζονται με βάση τις βέλτιστες τροχιές ελέγχου και κατάστασης έτσι ώστε να καθίσταται η λειτουργία των τοπικών ελεγκτών υποστηρικτική της ευρύτερης πολιτικής του AMOC που αφορά όλο το δίκτυο.

#### 3.5.2 Από το στρατηγικό επίπεδο στο τακτικό

Η πιο απλή λύση που μπορεί να εφαρμοστεί έτσι ώστε να υλοποιηθεί η πολιτική του AMOC είναι η απευθείας εφαρμογή των βέλτιστων τροχιών ελέγχου στις ελεγχόμενες ράμπες εισόδου. Η ποιότητα αυτής της λύσης δεν είναι αναγκαστικά κακή, αλλά εξαρτάται από την ακρίβεια των προβλέψεων των διαταραχών των εκτιμήσεων της αρχικής κατάστασης και των παραμέτρων του μοντέλου. Στην ενότητα 3.2 αναφέρθηκαν οι λόγοι για τους οποίους μπορεί η βέλτιστη λύση του AMOC να μην είναι βέλτιστη και στην πραγματικότητα. Έτσι, η εφαρμογή στην πράξη των βέλτιστων τροχιών ελέγχου του AMOC μπορεί να μην οδηγήσει στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, είναι όμως μία λύση την οποία θα εξετάσουμε και τη θεωρούμε σαν μία δυνατότητα υλοποίησης του Επιπέδου Ανάθεσης Καθηκόντων. Τη δεύτερη δυνατότητα υλοποίησης τη δίνει η χρήση των δύο τοπικών αναδραστικών στρατηγικών, ALINEA και ALINEA βασισμένη στη ροή.

Η πρώτη δυνατότητα δεν συμπεριλαμβάνει κάποια τοπική στρατηγική ελέγχου, αφού τα αποτελέσματα του AMOC εφαρμόζονται ως έχουν χωρίς καμία προηγούμενη επεξεργασία. Η μοναδική έξοδος από το επίπεδο είναι οι βέλτιστες τροχιές ελέγχου οι οποίες κι εφαρμόζονται στο πεδίο από τους τοπικούς ελεγκτές. Το πώς ακριβώς γίνεται αυτή η εφαρμογή περιγράφεται στην ενότητα 3.6.

Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται η κλασσική ALINEA και η ALINEA βασισμένη σε μετρήσεις ροής. Σκοπός του Επιπέδου Ανάθεσης Καθηκόντων είναι να αποφασίσει με βάση τις βέλτιστες τροχιές ελέγχου και κατάστασης ποια από τις δύο στρατηγικές θα εφαρμοστεί σε κάθε ράμπα εισόδου και με ποιές παραμέτρους.

Η βέλτιστη τροχιά κατάστασης περιγράφει την εξέλιξη της κυκλοφοριακής ροής μέσα στο δίκτυο για έναν χρονικό ορίζοντα  $H_p$ . Άρα η τοπική στρατηγική ελέγχου θα πρέπει να έχει ως στόχο της τη διαμόρφωση κυκλοφοριακών συνθηκών όμοιων αυτών που προβλέπονται από το AMOC στην περιοχή ευθύνης της. Αυτό σημαίνει ότι ο αποκεντρωμένος έλεγχος θα πρέπει να εγγυάται ότι η ροή κατάντη της ελεγχόμενης ράμπας εισόδου θα είναι ίδια ή κοντά στην προβλεπόμενη βέλτιστη ροή. Για να ικανοποιηθεί αυτή η συνθήκη θα πρέπει να εφαρμόζεται ALINEA βασισμένη στην ροή.

Υπάρχει όμως μία εξαίρεση σ' αυτόν τον κανόνα. Το AMOC μπορεί να προβλέπει, για κάποιους λόγους, εσκεμμένα συμφόρηση σε κάποια σημεία του δικτύου, π.χ. αν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την ικανότητα του δικτύου, οπότε η συμφόρηση είναι αναπόφευκτη και κατά συνέπεια το AMOC τη διαχειρίζεται με βέλτιστο τρόπο, τοποθετώντας τη κάπου στο δίκτυο όπου προκαλεί τις λιγότερο αρνητικές συνέπειες. Αυτή η συμφόρηση θα πρέπει τότε να δημιουργηθεί και αυτό το καθήκον θα κληθεί να το αναλάβει η ράμπα εισόδου που βρίσκεται ανάντι του σημείου όπου είναι βέλτιστο να εμφανιστεί συμφόρηση. Λόγω όμως της μορφής του θεμελιώδους διαγράμματος, εξίσωση (2.5), η ALINEA βασισμένη στη ροή δεν μπορεί να λειτουργήσει σε κατάντη κυκλοφοριακές συνθήκες συμφόρησης. Σ' αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται η κλασσική ALINEA με σκοπό να δημιουργήσει την επιθυμητή συμφόρηση.

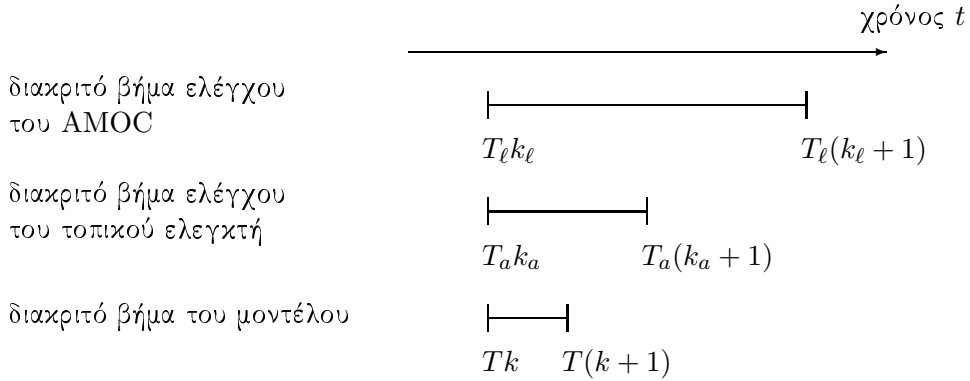
Ας θεωρήσουμε ότι ο τοπικός ελεγκτής έχει διακριτό βήμα ελέγχου ίσο με  $T_a$  το οποίο δεν είναι αναγκαστικά ίδιο με το αντίστοιχο βήμα ελέγχου του AMOC  $T_\ell$ . Θα πρέπει να ισχύει ότι  $T_a \leq T_\ell$  και έστω  $z_a = \text{int}[T_a/T]$  ( $T$  είναι το διακριτό βήμα του μοντέλου). Τότε επειδή  $T_a \leq T_\ell$  το χρονικό διάστημα  $[T_\ell k_\ell, T_\ell(k_\ell + 1)]$  μπορεί να υποδιαιβηθεί σε  $\text{int}[T_\ell/T_a]$  χρονικά υποδιαστήματα  $[T_a k_a, T_a(k_a + 1)]$ , βλέπε σχήμα 3.2. Για κάθε ένα από αυτά τα υποδιαστήματα ορίζουμε τη ροή  $\bar{q}_{m,1}^*$  σαν

$$\bar{q}_{m,1}^*(k_a) = \frac{1}{z_a k_a} \sum_{k=z_a k_a}^{z_a(k_a+1)-1} q_{m,1}^*(k) \quad (3.17)$$

όπου  $q_{m,1}^*(k)$  είναι η βέλτιστη ροή που προβλέπεται από το AMOC για το διακριτό τμήμα αυτοκινητοδρόμου  $(m, 1)$  κατά τη χρονική περίοδο  $[Tk, T(k + 1)]$ . Όμοια ορίζουμε και την πυκνότητα  $\bar{\rho}_{m,1}^*$  σαν

$$\bar{\rho}_{m,1}^*(k_a) = \frac{1}{z_a k_a} \sum_{k=z_a k_a}^{z_a(k_a+1)-1} \rho_{m,1}^*(k). \quad (3.18)$$

Η απόφαση για την ανάθεση του τύπου της στρατηγικής ελέγχου κάθε ελεγχόμενης ράμπας εισόδου  $o$  (κλασσική ALINEA ή ALINEA βασισμένη σε μετρήσεις ροής), εξαρτάται από τις κυκλοφοριακές συνθήκες, στο πρώτο διακριτό τμήμα του συνδέσμου  $m$  που βρίσκεται κατάντη της  $o$ , έτσι όπως αυτές προβλέπονται από το AMOC.



Σχήμα 3.2: Διακριτά χρονικά βήματα ελέγχου του AMOC , των τοπικών ελεγκτών και διακριτό χρονικό βήμα του μοντέλου.

Έτσι, για να εφαρμοστεί ALINEA βασισμένη σε μετρήσεις ροής θα πρέπει να μην υπάρχει συμφόρηση κατάντη της ράμπας, δηλαδή θα πρέπει η βέλτιστη ροή να είναι μικρότερη κατά ένα ποσοστό (της τάξεως του 10%) της ικανότητας του συνδέσμου  $m$  η οποία είναι  $q_{c,m} = V[\rho_{cr,m}]\rho_{cr,m}\Lambda_m$ . Άρα θα πρέπει να ισχύει  $\bar{q}_{m,1}^*(k_a) \leq a_c q_{c,m}$ , όπου  $a_c$  είναι παράμετρος με τυπική τιμή 0,9. Στην αντίθετη περίπτωση εφαρμόζεται κλασσική ALINEA .

### 3.6 Επίπεδο Αποκεντρωμένου Τοπικού Ελέγχου

Στο «Επίπεδο Αποκεντρωμένου Τοπικού Ελέγχου» υλοποιούνται οι αποφάσεις που έχουν ληφθεί στα ανώτερα επίπεδα, με τη χρήση τοπικών ελεγκτών ανάδρασης. Κάθε τοπικός ελεγκτής προσδιορίζει μια κατάλληλη ροή  $R_o$  για τη ράμπα εισόδου  $o$  που ελέγχει. Όλες οι τοπικές στρατηγικές που χρησιμοποιούνται προσδιορίζουν σε πρώτη φάση τη ροή  $\tilde{q}_o$  με βάση τον κανόνα ελέγχου που τις χαρακτηρίζει. Εν συνεχεία εξετάζεται αν η ουρά της ράμπας έχει υπερβεί το άνω όριο της οπότε και υπολογίζεται η ροή  $q_{o,w}(k_a)$  που απαιτείται για να επιστρέψει η ουρά σε αποδεκτά όρια. Η σύγκριση των  $\tilde{q}_o(k_a)$  και  $q_{o,w}(k_a)$  προσδιορίζει τη ροή  $\hat{\tilde{q}}_o(k_a)$  που λαμβάνει υπόψη της τον περιορισμό ουράς. Τέλος, η σύγκριση της  $\hat{\tilde{q}}_o(k_a)$  με τη μέγιστη δυνατή ροή που μπορεί να υπάρξει στη ράμπα,  $Q_o$  (σχέση 3.9), δίνει την τελική τιμή της ροής  $R_o(k_a)$ .

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται απευθείας τα αποτελέσματα του AMOC η επιθυμητή ροή της ράμπας εισόδου  $o$  για το χρονικό διάστημα  $[T_a k_a, T_a (k_a + 1)]$  είναι ίση με

$$\tilde{q}_o(k_a) = \min \left\{ \frac{1}{z_a k_a} \sum_{k=z_a k_a}^{z_a (k_a+1)-1} q_o^*(k), q_{o,\min} \right\} \quad (3.19)$$

όπου  $q_{o,\min}$  είναι η ελάχιστη ροή που πρέπει να περάσει από τη ράμπα εισόδου κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $[T_a k_a, T_a (k_a + 1)]$ .

Όταν γίνεται χρήση των στρατηγικών τύπου ALINEA , τότε για την κλασσική ALINEA έχουμε τη σχέση (βλ. [34])

$$\tilde{q}_o(k_a + 1) = \min \{ R_o(k_a) + K_A [\bar{\rho}_o - \rho_{m,1}(k_a)], q_{o,\min} \} \quad (3.20)$$

όπου  $K_A$  είναι ο παράγοντας κέρδους του ελεγκτή και  $\bar{p}_o$  είναι το σημείο ρύθμισής του. Στην περίπτωση της ALINEA βασισμένης σε μετρήσεις ροής έχουμε τη σχέση

$$\tilde{q}_o(k_a + 1) = \min \{R_o(k_a) + K_F [\bar{q}_o - q_{m,1}(k_a)], q_{o,\min}\} \quad (3.21)$$

όπου  $K_F$  είναι ο παράγοντας κέρδους του ελεγκτή και  $\bar{q}_o$  είναι το σημείο ρύθμισής του.

Οι παράμετροι  $\bar{q}_o$  και  $\bar{p}_o$  δίνονται από τις σχέσεις (3.17) και (3.18), αντίστοιχα, έτσι όπως έχουν υπολογισθεί στο επίπεδο Ανάθεσης Καθηκόντων.

Οι σχέσεις (3.19)–(3.21) υπολογίζουν την επιθυμητή ροή χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους το μέγεθος της ουράς  $w_o(k_a)$ . Στην περίπτωση που το μήκος της ουράς γίνει μεγαλύτερο της μέγιστης επιτρεπτής ουράς  $w_{o,\max}$ , τότε η ροή της ράμπας πρέπει να γίνει τόση ώστε το μήκος της ουράς να γίνει  $w_{o,\max}$ . Η αναγκαία ροή είναι η  $q_{o,w}(k_a)$  και υπολογίζεται από τη σχέση (στο [40] αναφέρονται λεπτομέρειες)

$$q_{o,w}(k_a) = -\frac{1}{T_a} [w_{o,\max} - w_a(k_a)] + \bar{d}(k_{a-1}) \quad (3.22)$$

όπου

$$\bar{d}_o(k_a) = \frac{1}{z_a k_a} \sum_{k=z_a k_a}^{z_a(k_a+1)-1} d_o(k). \quad (3.23)$$

Έτσι θα έχουμε

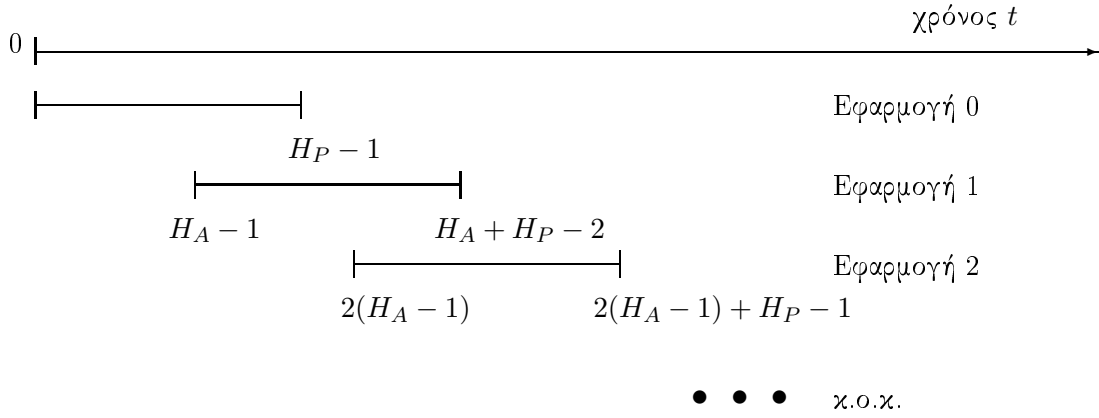
$$\hat{\tilde{q}}_o(k_a) = \max \{\tilde{q}_o(k_a), q_{o,w}(k_a)\}. \quad (3.24)$$

Η ροή  $\tilde{q}_o(k_a)$  φράσσεται από πάνω από τη μέγιστη δυνατή ροή της ράμπας εισόδου  $Q_o$ , οπότε τελικά προσδιορίζεται η επιθυμητή ροή  $R_o$  σύμφωνα με τη σχέση

$$R_o(k_a) = \min \{\hat{\tilde{q}}_o(k_a), Q_o\}. \quad (3.25)$$

### 3.7 Η Τεχνική του Κυλιόμενου Ορίζοντα

Στις προηγούμενες ενότητες περιγράψαμε τις λειτουργίες κάθε επιπέδου της ιεραρχικής δομής ελέγχου του σχήματος 3.1. Η περιγραφή της λειτουργίας αυτής της στρατηγικής θα ολοκληρωθεί με την παρουσίαση της τεχνικής του κυλιόμενου ορίζοντα. Όπως έχει αναφερθεί, ο πυρήνας της στρατηγικής είναι το AMOC το οποίο στηριζόμενο σε προβλέψεις των διαταραχών για έναν χρονικό ορίζοντα  $H_P$  προσδιορίζει τη βέλτιστη λύση που ελαχιστοποιεί το κριτήριο κόστους (3.10). Η βέλτιστη τροχιά κατάστασης  $\mathbf{x}^*(k)$ ,  $k = 0, \dots, H_P - 1$ , χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν κατάλληλα οι παράμετροι (σημεία ρύθμισης) των τοπικών ελεγκτών. Η βέλτιστη λύση  $\mathbf{x}^*(k)$ ,  $k = 0, \dots, H_P - 1$ , ενσωματώνει σφάλματα στην εκτίμηση του αρχικού διανύσματος κατάστασης  $\mathbf{x}(0)$  και των παραμέτρων του μοντέλου καθώς και σφάλματα των προβλέψεων των διαταραχών. Προκειμένου να περιοριστεί η επιρροή διάδοση των σφαλμάτων αυτών στη διάρκεια του χρόνου, απαιτείται να γίνεται μία περιοδική ανανέωση της αρχικής κατάστασης  $\mathbf{x}(0)$  και των προβλέψεων των διαταραχών ανά περίοδο  $H_A \leq H_P$ . Δηλαδή, για κάθε εφαρμογή εκτιμάται το τρέχον διάνυσμα κατάστασης το οποίο κάθε φορά παίζει το ρόλο αρχικής κατάστασης  $\mathbf{x}(0)$  και με βάση τις ανανεωμένες προβλέψεις των διαταραχών για χρονικό ορίζοντα  $H_P$  προσδιορίζεται από το AMOC η βέλτιστη τροχιά κατάστασης  $\mathbf{x}^*(k)$ ,  $k = 0, \dots, H_P - 1$ . Από την τροχιά  $\mathbf{x}^*(k)$ ,  $k = 0, \dots, H_P - 1$  χρησιμοποιείται μόνο το πρώτο μέρος της  $k = 0, \dots, H_A - 1$ . Μετά το τέλος της περιόδου εφαρμογής



Σχήμα 3.3: Επαναλήψεις κυλιόμενου ορίζοντα.

$H_A$  επαναλαμβάνονται οι διαδικασίες εκτίμησης, πρόβλεψης, βελτιστοποίησης και εφαρμογής της βέλτιστης λύσης, έτσι όπως περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ανάδραση για το AMOC. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η διαδοχή των εφαρμογών κυλιόμενου ορίζοντα.

Επειδή η παρούσα μελέτη ελέγχου αυτοκινητοδρόμων γίνεται μέσω προσομοίωσης η οποία έχει ένα πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα, θα υπάρξει κάποια στιγμή όπου ο χρόνος πρόβλεψης θα ξεπεράσει το τέλος του ορίζοντα προσομοίωσης  $K$ . Για το χρονικό αυτό διάστημα πέραν του  $K$  θεωρούμε ότι οι διαταραχές είναι σταθερές και ίσες με την τελευταία τιμή  $\mathbf{d}(K - 1)$ .

### 3.8 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μία ιεραρχική δομή ελέγχου που χρησιμοποιεί σαν κεντρικό στοιχείο το AMOC και εφαρμόζει τη μεθοδολογία του κυλιόμενου ορίζοντα. Καθένα από τα επίπεδα της δομής ελέγχου περιγράφηκε ως προς τις εισόδους, τη λειτουργία του και τις εξόδους του. Αυτή η στρατηγική ελέγχου είναι κλειστού βρόχου, χάρις στη χρήση της μεθοδολογίας του κυλιόμενου ορίζοντα, σε αντίθεση με το AMOC ως ανεξάρτητο εργαλείο που είναι ανοικτού βρόχου. Επειδή το AMOC, σαν εργαλείο ελέγχου, χαρακτηρίζεται από πολύ καλές ιδιότητες, η ιεραρχική δομή ελέγχου που προτάθηκε αποσκοπεί στο να τις διατηρήσει εν όψει αβεβαιοτήτων και σφαλμάτων.

## Κεφάλαιο 4

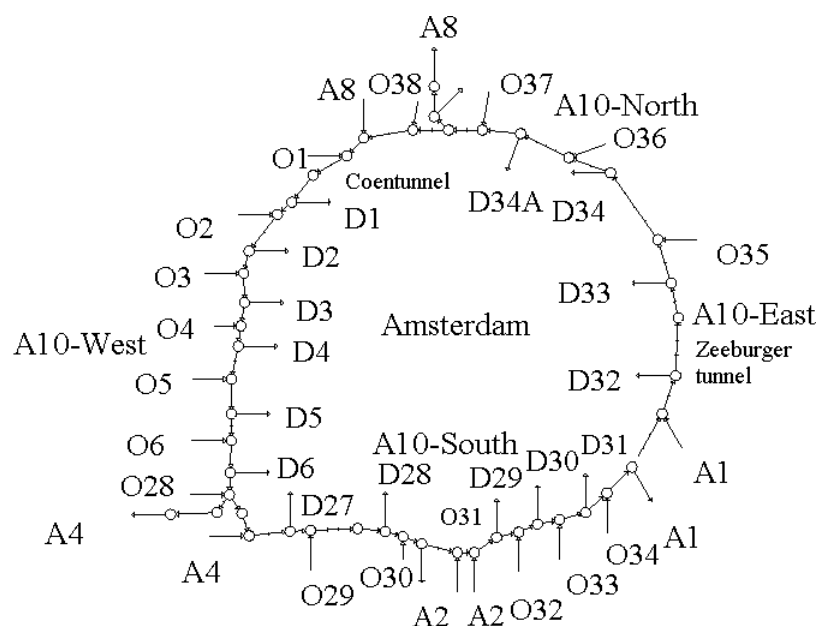
# ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟ ΔΑΚΤΥΛΙΟ ΤΟΥ ΑΜΣΤΕΡΝΤΑΜ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε η γενική δομή ιεραρχικού ελέγχου που έχει σαν πυρήνα της τη στρατηγική AMOC που υπολογίζει βέλτιστες τροχιές ελέγχου ανοιχτού βρόχου. Σκοπός αυτού του Κεφαλαίου είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς του AMOC αυτού καθεαυτού, πριν ενταχθεί στην ευρύτερη δομή ελέγχου που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Με άλλα λόγια, θέλουμε να διερευνήσουμε τα αποτελέσματα που δίνει το AMOC, όταν εφαρμόζεται σ' ένα δίκτυο, από πλευράς αποτελεσματικότητας αλλά και από πλευράς ισότιμης κατανομής του κόστους βελτίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών. Η συνολική δομή που χτίζεται γύρω από το AMOC, έχει σκοπό να δημιουργήσει τις συνθήκες εκείνες που θα διατηρήσουν τις θετικές ιδιότητες της βέλτιστης λύσης εν όψη η σφαλμάτων στην πρόβλεψη των διαταραχών και άλλων αβεβαιοτήτων της πρακτικής εφαρμογής. Αυτές οι θετικές ιδιότητες θα παρουσιαστούν σ' αυτό το κεφάλαιο.

Στην ενότητα 4.2 περιγράφεται το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων στο οποίο εφαρμόστηκε το AMOC για τη μελέτη των αποτελεσμάτων. Πρόκειται για ένα μέρος του ευρύτερου δικτύου του Άμστερνταμ που περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 και πρόκειται να αποτελέσει το βασικό δίκτυο της μελέτης μας, στα πλαίσια της οποίας εξετάζεται συστηματικά ένας αριθμός κατάλληλα επιλεγμένων σεναρίων. Τα σενάρια περιγράφονται συνοπτικά στην ενότητα 4.3 και αναλυτικά στις ενότητες 4.4 έως 4.6. Τέλος, στην ενότητα 4.7 περιγράφεται η ισορροπία ανάμεσα σε δύο ιδιότητες που χαρακτηρίζουν μία στρατηγική ελέγχου ραμπών εισόδου, που είναι η αποτελεσματικότητά της στη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών και η ισοκατανομή του κόστους που απαιτείται για τη βελτίωση που επιτυγχάνεται, ανάμεσα στους οδηγούς που χρησιμοποιούν τις διάφορες ράμπες εισόδου που ελέγχονται. Οι δύο αυτές ιδιότητες είναι εν μέρει ανταγωνιστικές και το AMOC προσφέρει λύσεις που παρουσιάζουν μία ισορροπία μεταξύ τους.





Σχήμα 4.1: Ο δακτύλιος του Άμστερνταμ (αντίθετα προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού) .

## 4.2 Περιγραφή του Δικτύου

Το δίκτυο στο οποίο εφαρμόστηκε το AMOC ως στρατηγική συντονισμένου ελέγχου ραμπών εισόδου είναι μέρος του ευρύτερου δικτύου του Άμστερνταμ. Το δίκτυο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2 είναι πολύπλοκο και πάρα πολύ μεγάλο για το σκοπό μας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούμε τον αυτοκινητόδρομο A10 για την αριστερόστροφη κατεύθυνση κίνησης. Το μήκος του αυτοκινητοδρόμου είναι γύρω στα 32 χιλιόμετρα, κάτι που το κατατάσσει στην κατηγορία των μεγάλων δικτύων. Το δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 4.1.

Ο αυτοκινητόδρομος αυτός έχει μήκος 32 χιλιομέτρων με 21 ράμπες εισόδου και 20 ράμπες εξόδου. Σαν ράμπες εισόδου/εξόδου θεωρούμε και τις τέσσερις συνδέσεις του A10 με τους αυτοκινητοδρόμους A8, A4, A2 και A1. Ο δακτύλιος χωρίζεται σε 76 διακριτά τμήματα με μέσο μήκος 421 μέτρα, κάτι που σημαίνει ότι το διάλυσμα κατάστασης έχει διάσταση 173. Θεωρώντας ότι όλες οι ράμπες ελέγχονται, το διάλυσμα ελέγχου έχει διάσταση 21. Το διάλυσμα των διαταραχών έχει διάσταση 41 (21 που αντιστοιχούν στη ζήτηση των ραμπών εισόδου και 20 που αντιστοιχούν στα ποσοστά στροφής των ραμπών εξόδου). Ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής του AMOC είναι 4 ώρες, ήτοι 1440 διακριτά χρονικά βήματα για διακριτό βήμα του μοντέλου  $T = 10$  δευτερολέπτων. Για διακριτό βήμα ελέγχου ίσο με 60 δευτερόλεπτα για όλες τις ράμπες εισόδου, το πρόβλημα μη-γραμμικής βελτιστοποίησης που προκύπτει έχει 254,160 μεταβλητές.

### 4.3 Περιγραφή Σεναρίων

Για τη μελέτη των ιδιοτήτων των βέλτιστων τροχιών ελέγχου του AMOC, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια για το δίκτυο του Άμστερνταμ. Υποθέτουμε για όλα τα σενάρια ότι ακόμα και σε περιπτώσεις μεγάλων ουρών στις ράμπες, δεν υπάρχει μεταβολή της απόφασης των οδηγών για την πορεία που πρόκειται να ακολουθήσουν. Με άλλα λόγια, θεωρούμε ότι οι οδηγοί ακόμα και αν δούνε μία τεράστια ουρά στη ράμπα εισόδου που έχουν αποφασίσει να χρησιμοποιήσουν προκειμένου να εισέλθουν στον αυτοκινητόδρομο, δεν πρόκειται να στραφούν προς άλλες εναλλακτικές διαδρομές, π.χ. να χρησιμοποιήσουν το αστικό δίκτυο, αλλά θα περιμένουν στην ουρά μέχρις ότου έρθει η σειρά τους να εισέλθουν στον αυτοκινητόδρομο. Αυτή η υπόθεση προφανώς δεν στέκει στην πραγματικότητα. Όταν οι οδηγοί δουν ότι υπάρχει μία πολύ μεγάλη ουρά μπροστά τους, είναι φυσικό να θελήσουν να χρησιμοποιήσουν κάποια εναλλακτική διαδρομή για να φτάσουν στον προορισμό τους ή για να μπουν στον αυτοκινητόδρομο από κάποιο άλλο σημείο με μικρότερη ουρά.

Ο λόγος για τον οποίο κάνουμε αυτή την υπόθεση είναι ότι το πόσοι οδηγοί θα αλλάξουν πορεία και ποια πορεία θα ακολουθήσουν δεν είναι κάτι που εξαρτάται από τη στρατηγική ελέγχου αυτή καθαυτή, αλλά από το επίπεδο της ζήτησης και της γεωγραφίας του δικτύου. Είναι δηλαδή διαταραχές στο σύστημα κυκλοφορίας υπό έλεγχο, οι οποίες όμως μπορούν να ενταχθούν χωρίς ιδιαίτερα μεθοδολογικά προβλήματα στο επίπεδο της πρόβλεψης της ζήτησης. Η αλλαγή πορείας λόγω των συννοριακών κυκλοφοριακών συνθηκών είναι κάτι που πρέπει να συμπεριληφθεί στον συνολικό αλγόριθμο πρόβλεψης της ζήτησης. Δεν είναι θέμα, δηλαδή, ελέγχου, αλλά θέμα πρόβλεψης των διαταραχών. Έτσι, ένας αλγόριθμος πρόβλεψης της ζήτησης που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο μπορεί να λαμβάνει υπόψη του και τις αποφάσεις των οδηγών για αλλαγή πορείας ανάλογα με τις ουρές που σχηματίζονται στις ράμπες εισόδου. Σε κάθε περίπτωση, όμως, είτε λαμβάνεται υπόψη είτε όχι, το ζητούμενο είναι να προσδιορισθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια οι τροχιές της ζήτησης σε κάθε ράμπα εισόδου.

Στο τρέχον κεφάλαιο, τα σενάρια εφαρμογής του AMOC στο δίκτυο του Άμστερνταμ διαφοροποιούνται ως προς το μέγιστο επιτρεπτό μέγεθος της ουράς σε κάθε ράμπα εισόδου και ως προς το αν ελέγχονται οι ράμπες εισόδου που αντιστοιχούν σε συνδέσεις με άλλους αυτοκινητοδρόμους. Αρχικά θεωρούμε ότι δεν ασκείται οποιοσδήποτε έλεγχος στο δίκτυο, οπότε αυτό είναι το σενάριο 0. Στο σενάριο 1, θεωρούμε ότι όλες οι ράμπες εισόδου ελέγχονται και ότι η μέγιστη επιθυμητή ουρά στις αστικές ράμπες εισόδου είναι ίση με 40 οχήματα, ενώ για τις ράμπες εισόδου που αντιστοιχούν στις συνδέσεις του A10 με τους αυτοκινητοδρόμους A4, A2, A1 και A8 το αντίστοιχο όριο είναι ίσο με 100 οχήματα. Στο σενάριο 2, θεωρούμε πάλι ότι όλες οι ράμπες ελέγχονται και τα αντίστοιχα όρια είναι 80 και 200 οχήματα. Στο σενάριο 3 θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν μέγιστα όρια τις ουρές, και τέλος στο σενάριο 4 θεωρούμε ότι ελέγχονται μόνο οι αστικές ράμπες εισόδου, με μέγιστη επιτρεπτή ουρά ίση με 40 οχήματα, ενώ οι συνδέσεις των αυτοκινητοδρόμων δεν ελέγχονται καθόλου. Τα σενάρια αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Για όλα τα σενάρια θεωρούμε ότι υπάρχει ακριβής γνώση των διαταραχών και ταυτόχρονα οι τροχιές τους δεν χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα έντονη στοχαστική συμπεριφορά υψηλής συχνότητας. Αντίθετα, βασιζόμενοι σε πραγματικά δεδομένα, θεωρούμε ότι οι τροχιές ζήτησης κάθε ράμπας εισόδου είναι τμηματικά γραμμικές και τα ποσοστά στροφής σταθερά για όλον τον ορίζοντα.

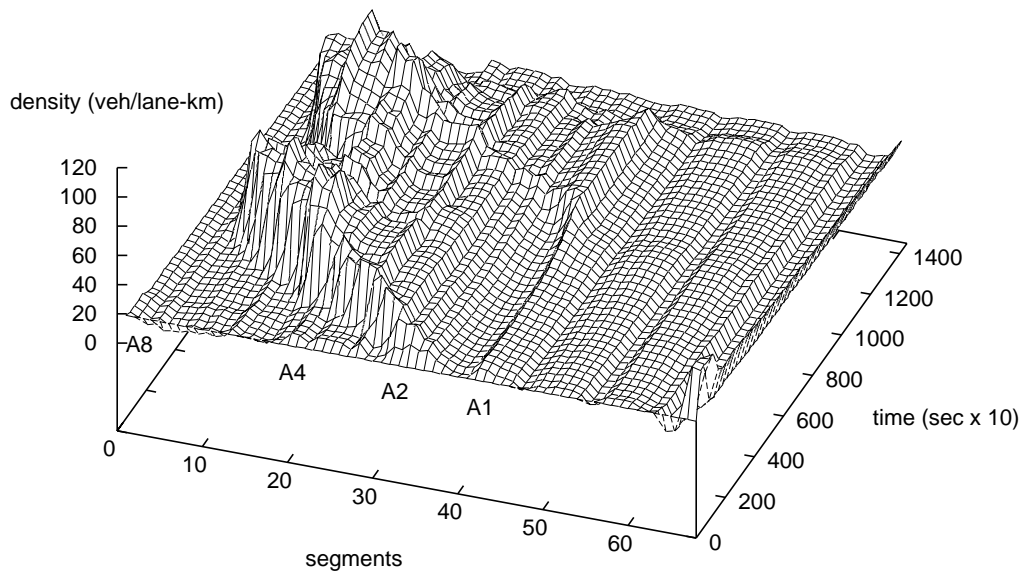
Πίνακας 4.1: Σενάρια αναφορικά με τις μέγιστες επιτρεπτές ουρές

Σενάριο	Μέγιστο μήκος ουράς (αριθμ. οχημ.)	
#	αστικές ράμπες εισόδου	συνδέσεις αυτ/μων
0	χωρίς έλεγχο	χωρίς έλεγχο
1	40	100
2	80	200
3	$+\infty$	$+\infty$
4	40	χωρίς έλεγχο

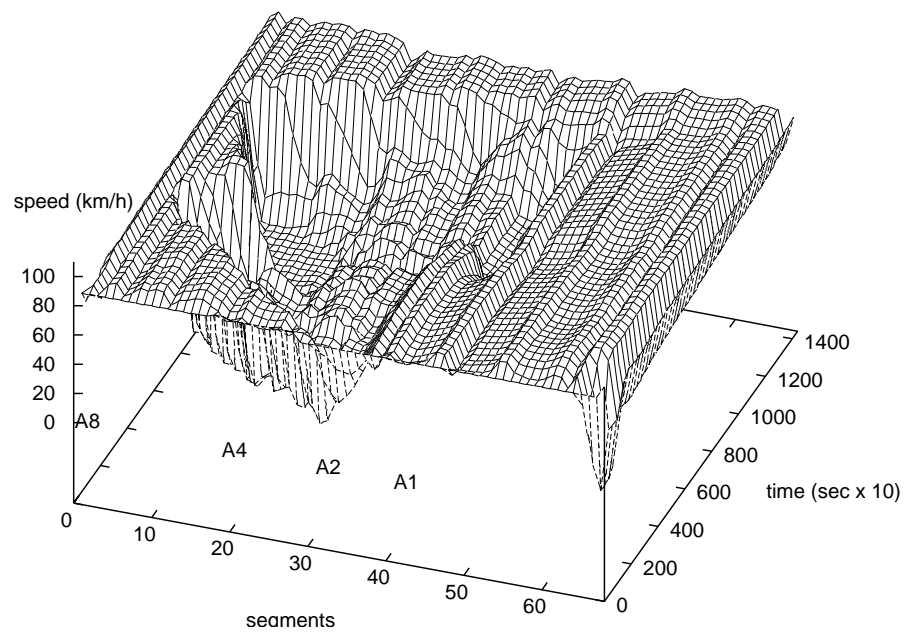
Αυτές οι παραδοχές δεν λαμβάνουν χώρα στην πραγματικότητα, αλλά σ' αυτό το κεφάλαιο σκοπός μας είναι να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του AMOC κάτω από ιδανικές συνθήκες, θεωρώντάς το σαν έναν αυτόνομο εργαλείο. Το πώς αντιμετωπίζονται τα προβλήματα που προκύπτουν από την ασυμφωνία της πραγματικότητας με τις παραδοχές, είναι αντικείμενο του Κεφαλαίου 5. Αυτό που μας ενδιαφέρει εδώ είναι η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά της βέλτιστης στρατηγικής ελέγχου κάτω από συνθήκες πλήρους και ακριβούς γνώσης των μελλοντικών εισόδων. Θέλουμε να δούμε, δηλαδή, πώς αντιδρά το AMOC και τι προτείνει για κάθε ένα από τα σενάρια, έτσι ώστε να καταλάβουμε με όρους κυκλοφοριακής τεχνικής, τη λογική με την οποία μορφοποιούνται οι βέλτιστες τροχιές ελέγχου. Αυτή η λογική δεν είναι καθόλου ευνόητη ή τετριμμένη καθώς απαιτείται συστηματική μελέτη των αποτελεσμάτων προκειμένου να γίνει κατανοητή η ευφυής συμπεριφορά του AMOC ως προς το πρόβλημα που τίθεται. Έτσι, συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του κάθε σεναρίου με το βασικό σενάριο 0, όπου δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος, για να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα.

#### 4.4 Σενάριο 0

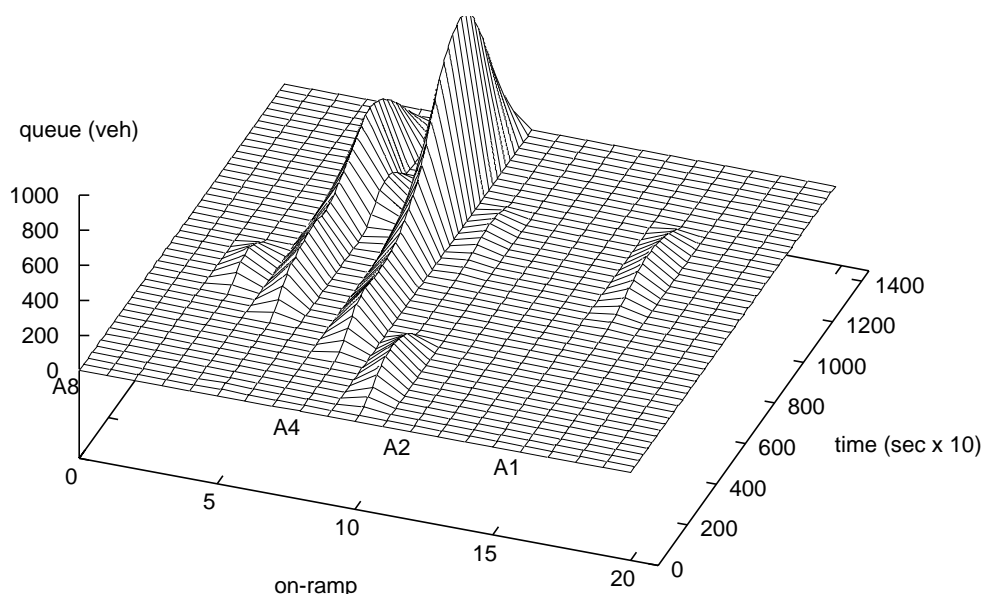
Το μηδενικό σενάριο είναι αυτό όπου δεν ασκείται κανένας έλεγχος και είναι αυτό βάσει του οποίου κρίνονται όλα τα υπόλοιπα σενάρια. Ο χρονικός ορίζοντας της μελέτης των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου είναι τέσσερεις (4) ώρες, από τις 16:00 το απόγευμα έως τις 20:00 το βράδυ. Αυτή η χρονική περίοδος περιλαμβάνει την απογευματινή ώρα αιχμής. Η απουσία μέτρων ελέγχου στο δακτύλιο έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης η οποία δημιουργείται κατάντη των διασταυρώσεων του A10 με τον A2 και με τον A1, στον νότιο A10. Αυτή η συμφόρηση μεταδίδεται προς τα πίσω με αποτέλεσμα να προκαλούνται σοβαρές καθυστερήσεις στον δυτικό A10. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η εξέλιξη της κυκλοφοριακής πυκνότητας για όλα τα διακριτά τμήματα του αυτοκινητοδρόμου, ενώ στο σχήμα 4.3 φαίνεται η αντίστοιχη μέση ταχύτητα. Το τμήμα 0 αντιστοιχεί στο πρώτο τμήμα του A10 μετά τη διασταύρωση του A10 με τον A8 στο βορρά. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται ο σχηματισμός μεγάλων ουρών στις ράμπες εισόδου του δυτικού A10 και ιδιαίτερα στη ράμπα που αντιστοιχεί στον A4. Αυτές οι μεγάλες ουρές οφείλονται στη συμφόρηση που επικρατεί στον αυτοκινητόδρομο, και όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.4, ακολουθούν χωρικά και χρονικά την αύξηση της πυκνότητας όπως φαίνεται από το σχήμα 4.2. Λόγω αυτών των συμφορήσεων ο ΣΧ για την περίοδο των τεσσάρων ωρών είναι ίσος με 13.226 οχ.\*ώρες.



Σχήμα 4.2: Σενάριο 0: Πυκνότητα.



Σχήμα 4.3: Σενάριο 0: Μέση ταχύτητα.

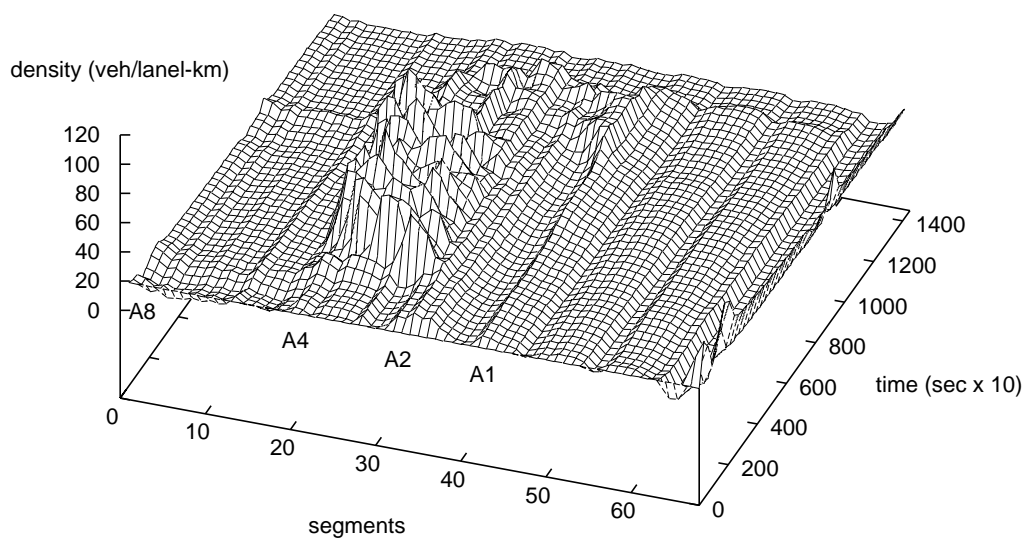


Σχήμα 4.4: Σενάριο 0: Ουρές ραμπών εισόδου.

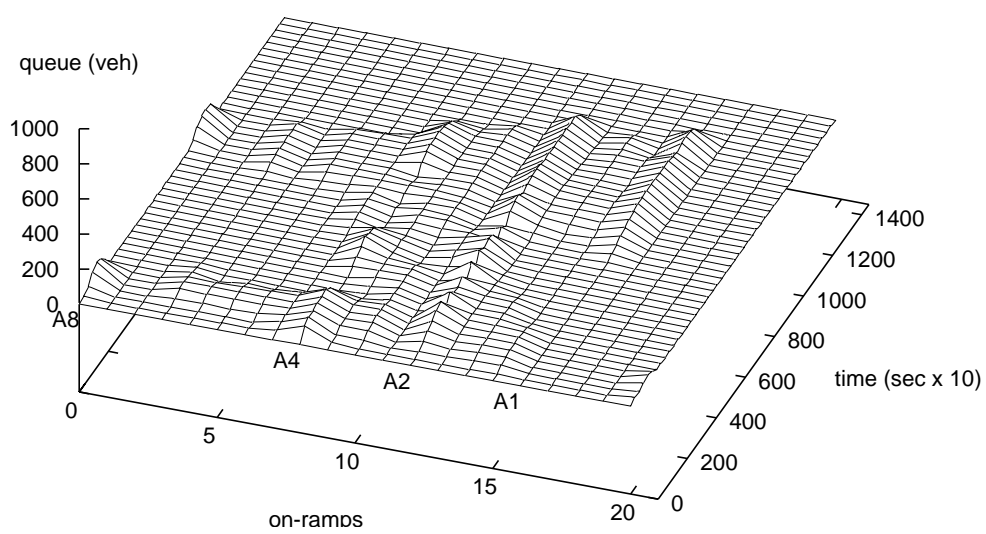
#### 4.5 Σενάριο 1

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στο σενάριο 1 όλες οι ράμπες εισόδου ελέγχονται και για τις κανονικές ράμπες η μέγιστη επιτρεπτή ουρά είναι 40 οχήματα, ενώ για τις ράμπες που αντιστοιχούν στις συνδέσεις των A4, A2, A1 και A8 με τον A10 η μέγιστη επιτρεπτή ουρά είναι 100 οχήματα.

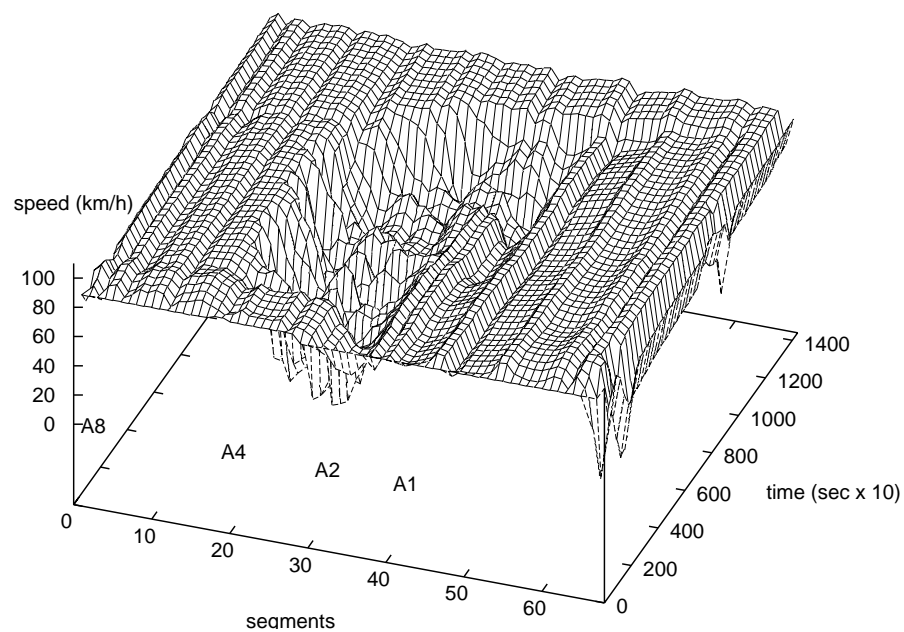
Όταν εφαρμόζεται το AMOC στο δίκτυο τότε ο ΣΧ γίνεται 9.032 οχ.\*ώρες, που αποτελεί βελτίωση κατά 31,7% σε σχέση με το σενάριο 0 όπου δεν ασκείται έλεγχος. Αυτή η βελτίωση φαίνεται στο σχήμα 4.5 που παρουσιάζει τη χρονική και χωρική εξέλιξη της πυκνότητας των οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο, καθώς και στο σχήμα 4.6 που αντίστοιχα αναφέρεται στις ουρές που σχηματίζονται στις ράμπες εισόδου. Οι μεγάλες ουρές που εμφανίζονται στην περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος, δεν εμφανίζονται πλέον. Αντίθετα, εμφανίζονται μικρότερες ουρές, κατανομημένες όμως σε περισσότερες ράμπες εισόδου, έτσι ώστε να καταπολεμούν την ανάπτυξη της συμφόρησης. Για να μπορέσει η στρατηγική ελέγχου να είναι συνεπής με τους περιορισμούς μέγιστης ουράς και ταυτόχρονα να είναι αποτελεσματική στη μείωση του ΣΧ, κατανέμει χωρικά και χρονικά τις ουρές σχεδόν στο ίδιο μοτίβο της δημιουργίας, ανάπτυξης κι επέκτασης της συμφόρησης έτσι όπως αντικατοπτρίζεται στην εξέλιξη της πυκνότητας στο σχήμα 4.2. Παρόλα αυτά, η διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης των 40 και 100 οχημάτων για τις αστικές ράμπες εισόδου και τις εισόδους των αυτοκινητοδρόμων, αντίστοιχα, δεν είναι αρκετή για να εξαλειφθεί εντελώς η συμφόρηση. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 και στο σχήμα 4.7 όπου απεικονίζεται η μέση ταχύτητα στον αυτοκινητόδρομο, το AMOC δημιουργεί, με την εφαρμογή των βέλτιστων τροχιών ελέγχου που φαίνονται στο σχήμα 4.8, και ανέχεται συμφόρηση μέσα στο δίκτυο γιατί η χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων στις ράμπες εισόδου που διαθέτει είναι μικρή σε σχέση με τη συνολική ζήτηση.



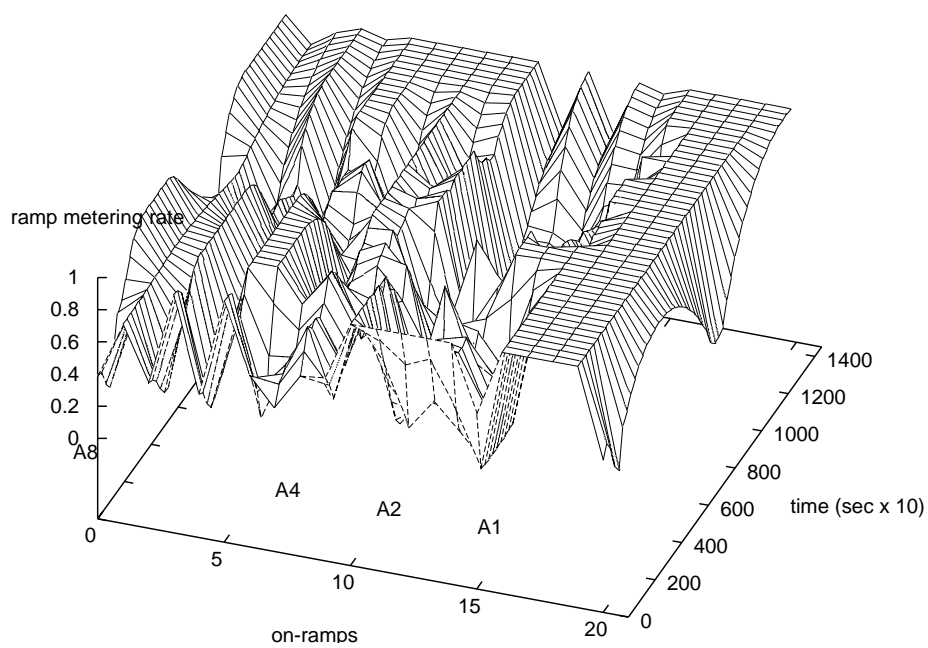
Σχήμα 4.5: Σενάριο 1: Πυκνότητα.



Σχήμα 4.6: Σενάριο 1: Ουρές ραμπών εισόδου.



Σχήμα 4.7: Σενάριο 1: Μέση ταχύτητα.



Σχήμα 4.8: Σενάριο 1: Βέλτιστες τροχιές ελέγχου.

## 4.6 Σενάριο 2

Στο σενάριο 2, θεωρούμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας περισσότερη χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων στις ράμπες εισόδου αφού η μέγιστη επιτρεπτή ουρά στις αστικές ράμπες εισόδου είναι 80 οχήματα, ενώ για τις εισόδους των αυτοκινητοδρόμων είναι 200 οχήματα. Η εφαρμογή του AMOC σ' αυτήν την περίπτωση έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του ΣΧ στο επίπεδο των 7.930 οχ.\*ώρων, που αποτελεί βελτίωση κατά 40,0% σε σχέση με την περίπτωση μη-ελέγχου. Αυτή η μεγαλύτερη βελτίωση φαίνεται στο σχήμα 4.9 όπου απεικονίζεται η χωρική και η χρονική εξέλιξη της πυκνότητας, καθώς και στο σχήμα 4.10 όπου απεικονίζεται η μέση ταχύτητα.

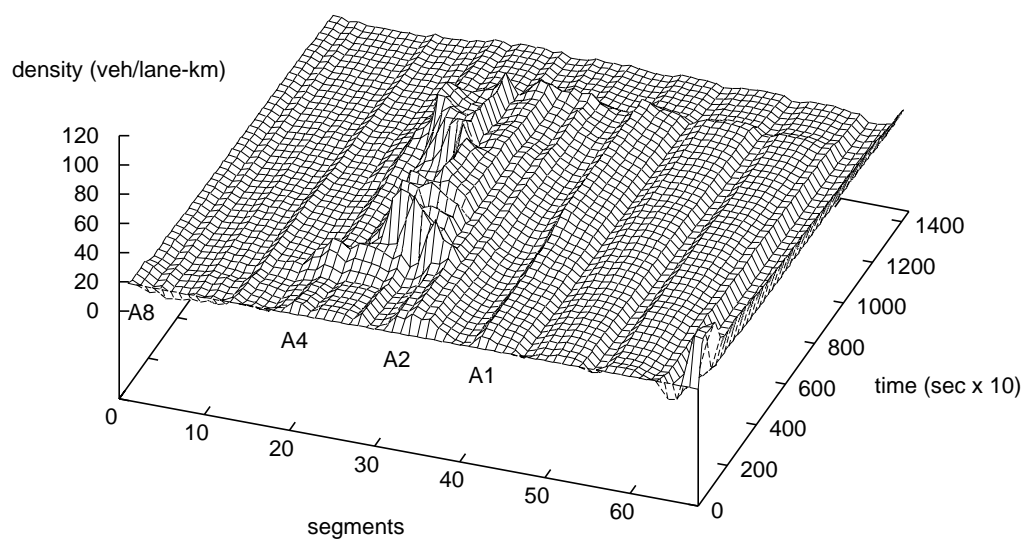
Λόγω της διαθέσιμης χωρητικότητας αποθήκευσης των ραμπών εισόδου, σχηματίζονται μεγαλύτερες ουρές οι οποίες όμως κατανέμονται σε μικρότερο αριθμό ραμπών, σχήματα 4.11 και 4.12. Η στρατηγική ελέγχου συμπεριφέρεται κατ' αυτόν τον τρόπο γιατί εν τέλει η συμφόρηση δημιουργείται από την υψηλή ζήτηση στις ράμπες εισόδου του νότιου Α10. Η αποτελεσματική καταπολέμηση των αιτιών αυτής της συμφόρησης μέσω του συστηματικού ελέγχου που εφαρμόζεται στις ράμπες του νότιου Α10, καθιστά την επιβολή περιορισμών στις εισροές των υπόλοιπων ραμπών (π.χ. στις ράμπες του δυτικού Α10), μη αναγκαία. Στην πραγματικότητα ο έλεγχος των ραμπών του Δυτικού-Α10 θα είχε σαν αποτέλεσμα τον αναίτιο σχηματισμό ουρών και κατά συνέπεια την επιβολή καθυστερήσεων χωρίς ουσιαστικό αντίκρισμα. Το AMOC έχει να διαλέξει ανάμεσα στην περαιτέρω μείωση της συμφόρησης και την επιπλέον αύξηση των καθυστερήσεων στις ράμπες για τα οχήματα που θα εξέλθουν πριν τη συμφόρηση, και προσδιορίζει τη βέλτιστη στάθμη ελέγχου.

Τα παραπάνω δείχνουν ότι η στρατηγική ελέγχου διαθέτει αρκετή ευφυΐα έτσι ώστε να δημιουργεί μόνο τις αναγκαίες ουρές και μόνο στο βαθμό που μπορούν να συνεισφέρουν στη μείωση του ΣΧ, κάτω από τους περιορισμούς μέγιστης ουράς κάθε ράμπας εισόδου. Γιαυτό το λόγο το διάγραμμα της πυκνότητας 4.9 δεν είναι εντελώς επίπεδο, ακριβώς λόγω του ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων στις ράμπες εισόδου του νοτίου Α10 δεν είναι αρκετή για την πλήρη εξάλειψη της συμφόρησης.

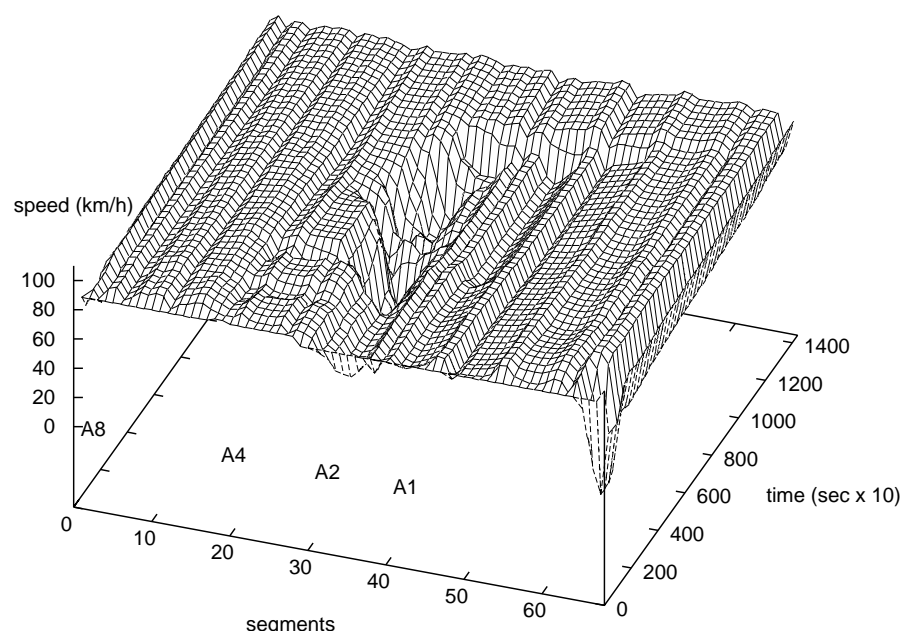
## 4.7 Σενάριο 3

Στην περίπτωση του σεναρίου 3, η απουσία περιορισμού μέγιστης ουράς στις ράμπες εισόδου οδηγεί τον ΣΧ σε τιμή ίση με 7.466 οχ.\*ώρες, που αποτελεί βελτίωση κατά 43.5% σε σχέση με το σενάριο μη ελέγχου (σενάριο 0). Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.13, το γράφημα της πυκνότητας είναι εντελώς επίπεδο, καταδεικνύοντας έτσι το γεγονός ότι δεν υπάρχει καθόλου συμφόρηση στο δίκτυο. Αυτό φαίνεται και από το γράφημα της ταχύτητας του σχήματος 4.14. Η στρατηγική ελέγχου κατορθώνει αυτήν την εντυπωσιακή βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών με τη δημιουργία μεγάλων ουρών στις ράμπες εισόδου που βρίσκονται πλησίον της τοποθεσίας όπου αρχικά εμφανίζεται η συμφόρηση, όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.15 και 4.16. Οι ουρές που δημιουργούνται δεν επιτρέπουν τη μεγάλη εισροή οχημάτων στην κρίσιμη περιοχή που θα είχε σαν συνέπεια την υποβάθμιση του δικτύου. Επειδή δεν υπάρχει ανώτατο όριο στις ουρές που σχηματίζονται, αυτές που μορφοποιούνται στην κρίσιμη περιοχή του νότιου Α10 είναι αρκετά μεγάλες. Ο σχηματισμός ουρών στις υπόλοιπες ράμπες εισόδου δεν είναι απαραίτητος από τη στιγμή που η αιτία της συμφόρησης έχει αντιμετωπιστεί τοπικά.

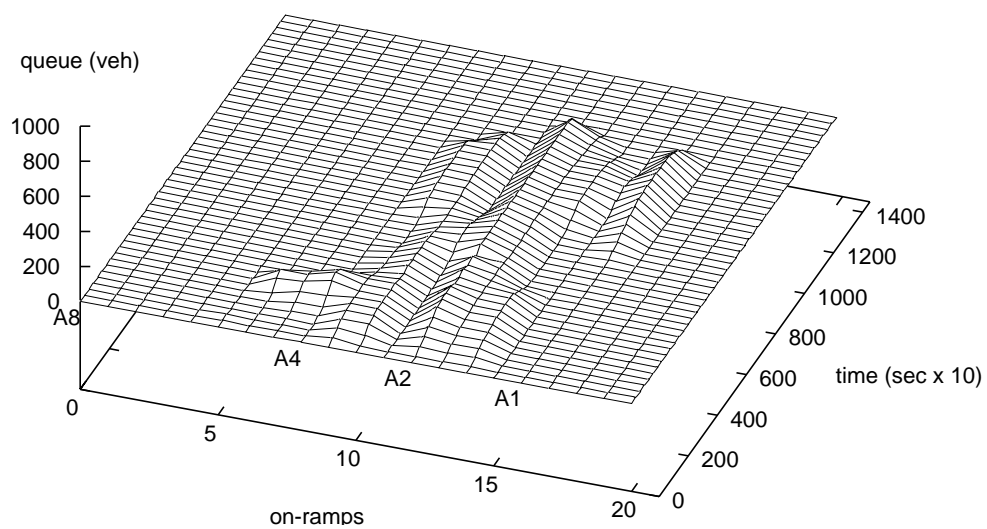




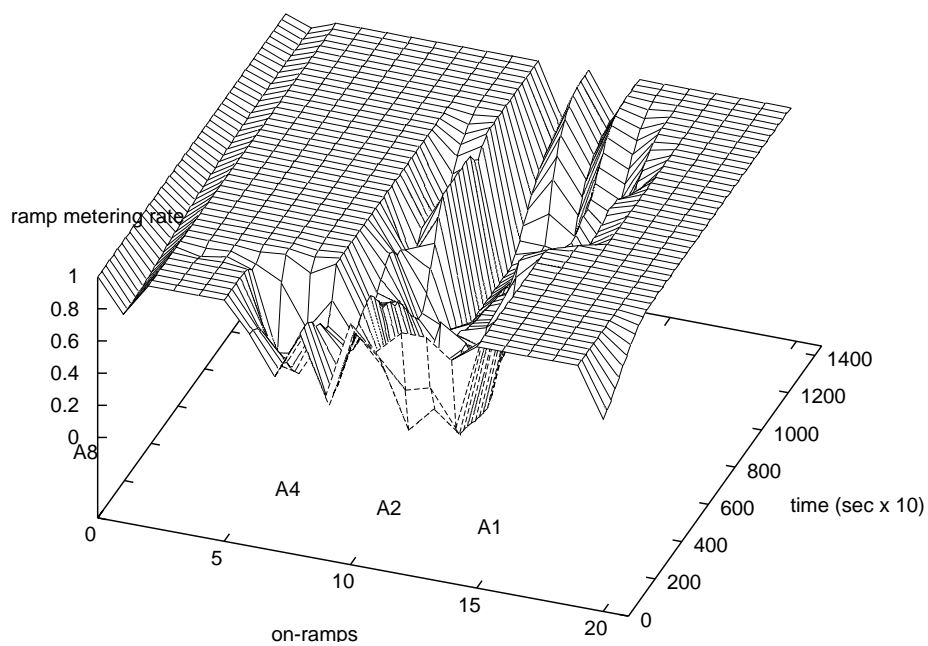
Σχήμα 4.9: Σενάριο 2: Πυκνότητα.



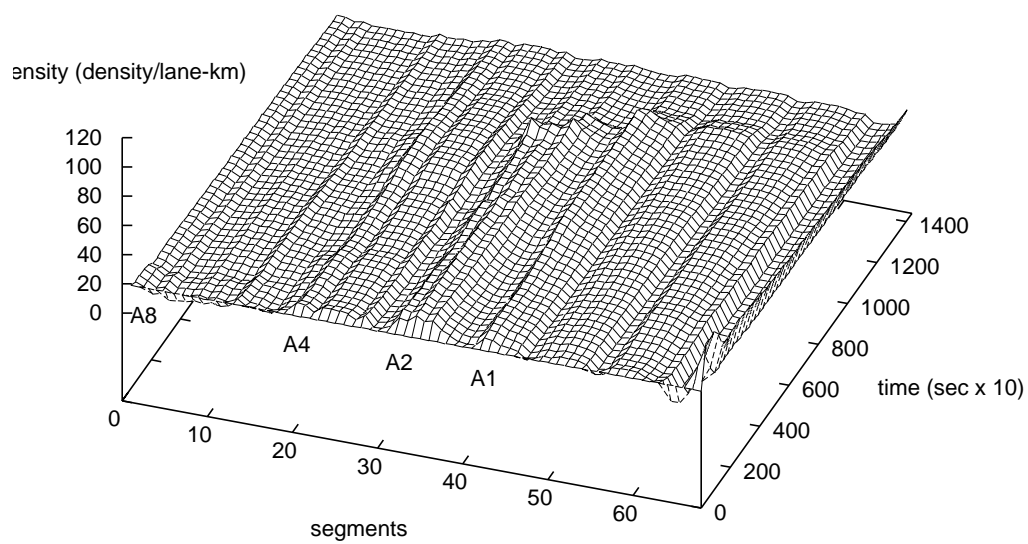
Σχήμα 4.10: Σενάριο 2: Μέση ταχύτητα.



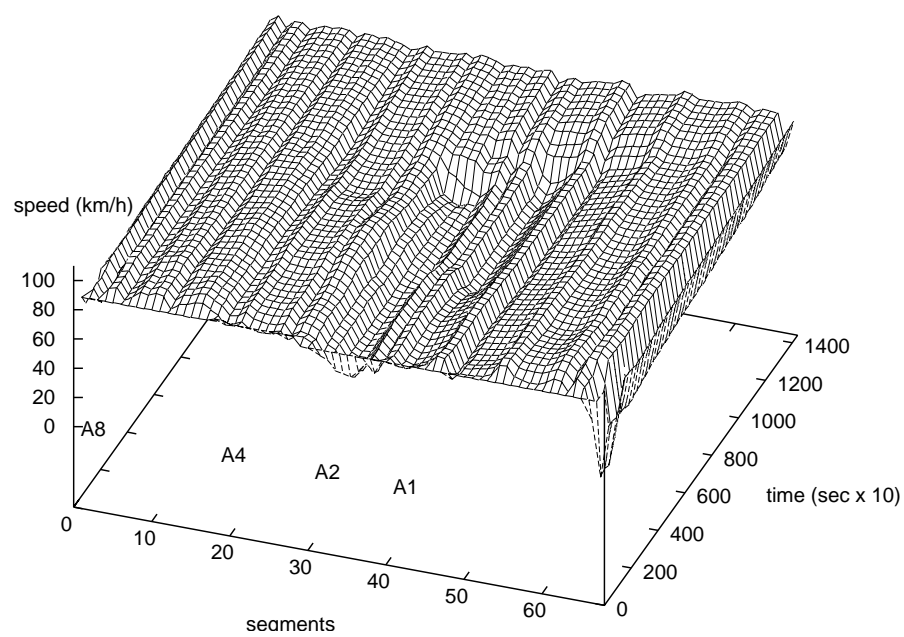
Σχήμα 4.11: Σενάριο 2: Ουρές ραμπών εισόδου.



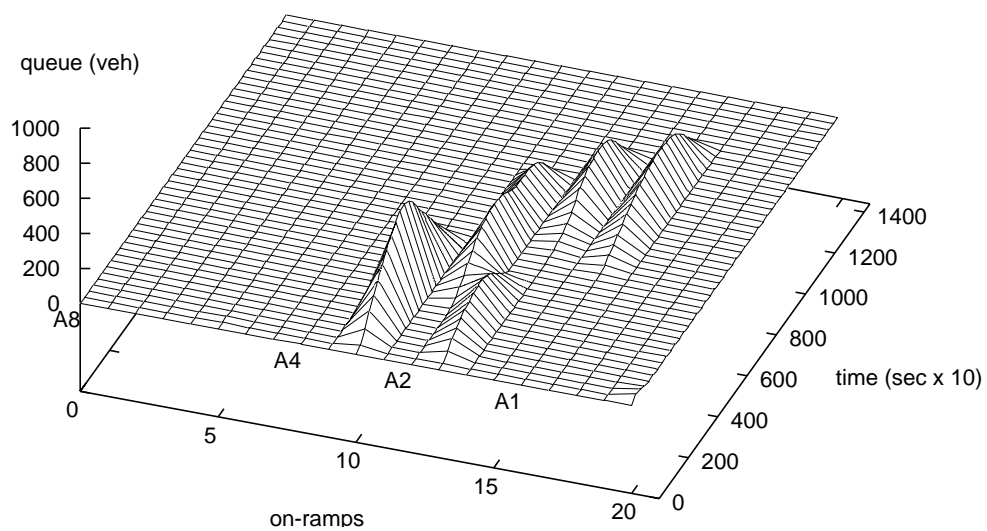
Σχήμα 4.12: Σενάριο 2: Βέλτιστες τροχιές ελέγχου.



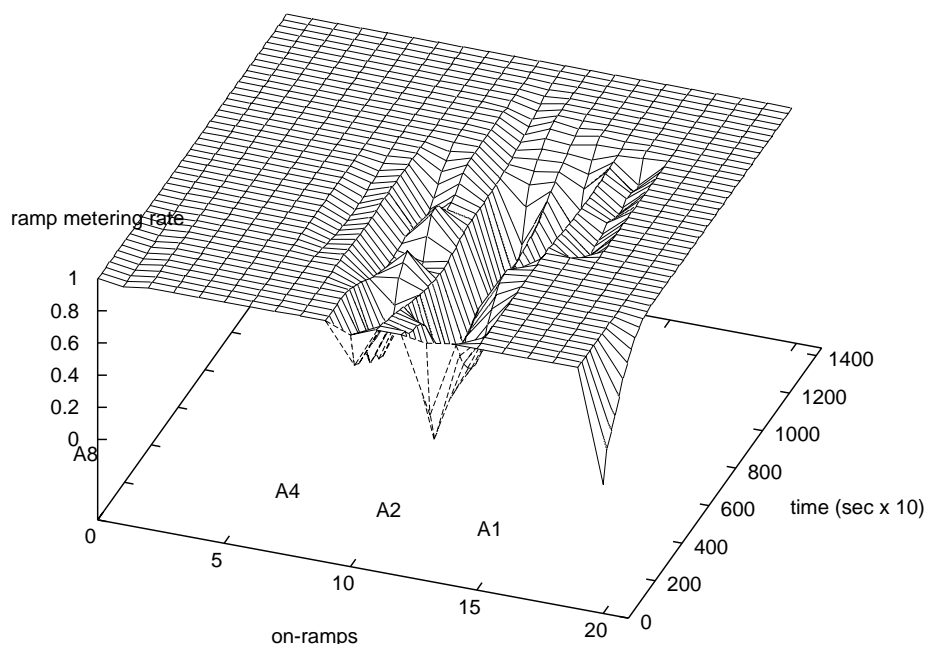
Σχήμα 4.13: Σενάριο 3: Πυκνότητα.



Σχήμα 4.14: Σενάριο 3: Μέση ταχύτητα.



Σχήμα 4.15: Σενάριο 3: Ουρές ραμπών εισόδου.



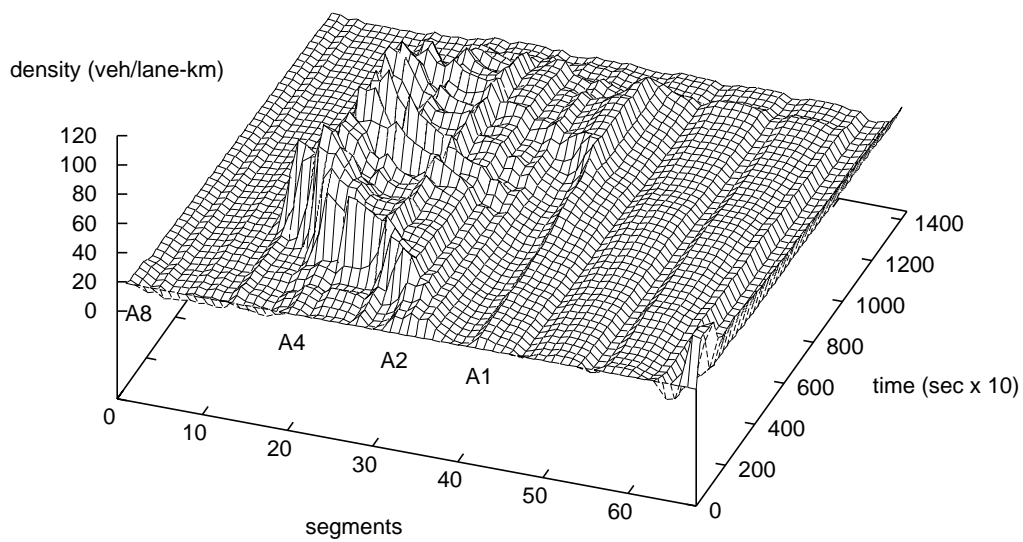
Σχήμα 4.16: Σενάριο 3: Βέλτιστες τροχιές ελέγχου.

## 4.8 Σενάριο 4

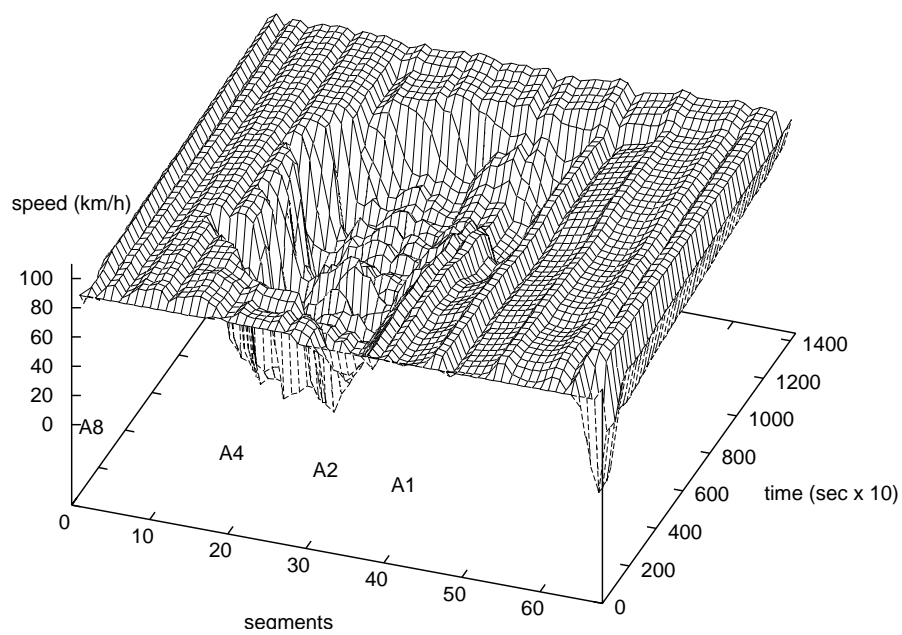
Σ' αυτό το σενάριο, που είναι και το τελευταίο, θεωρούμε ότι ασκείται έλεγχος μόνο στις αστικές ράμπες εισόδου, ενώ δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος στις συνδέσεις μεταξύ των αυτοκινητοδρόμων. Για όλες τις αστικές ράμπες εισόδου η μέγιστη επιτρεπτή ουρά είναι 40 οχήματα. Είναι σύνηθες το φαινόμενο, οι υπεύθυνοι των δικτύων να μην επιτρέπουν τον έλεγχο των συνδέσεων αυτοκινητοδρόμων. Ο λόγος είναι ότι οι αυτοκινητόδρομοι δημιουργήθηκαν για να παρέχουν ανεμπόδιστη ροή οχημάτων για μεγάλα διαστήματα χωρίς την ύπαρξη φωτεινών σηματοδοτών και συνεπακόλουθων ουρών. Με τη χρήση ελέγχου, όμως, κάτι τέτοιο είναι αδύνατο αφού ο σχηματισμός ουρών είναι αναπόφευκτος. Στις σημερινές συνθήκες, όμως, που οι αυτοκινητόδρομοι περιβάλλουν πληθυσμιακά πυκνές αστικές περιοχές η δημιουργία ουρών λόγω συμφόρησης εξαιτίας της υψηλής ζήτησης είναι εξίσου αναπόφευκτη, με αποτέλεσμα την υποβέλτιστη χρήση της διαθέσιμης υποδομής ακριβώς τη στιγμή που αυτή η υποδομή είναι πιο αναγκαία. Το σενάριο 4 καταδεικνύει αυτήν την κατάσταση, όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.17 και 4.18, όπου απεικονίζονται η πυκνότητα και η μέση ταχύτητα, αντίστοιχα. Ο ΣΧ γίνεται σ' αυτήν την περίπτωση ίσος με 10.383 οχ.\*ώρες, κάτι που αποτελεί βελτίωση ίση με 21,5% σε σχέση με την περίπτωση ολικής απουσίας ελέγχου. Επιπλέον, όπως μπορεί να φανεί από το σχήμα 4.19, όταν εφαρμόζονται οι βέλτιστες τροχιές ελέγχου του σχήματος 4.20 στην κυκλοφοριακή ροή, μία μεγάλη ουρά εμφανίζεται στον Α4 που είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι σε οποιοδήποτε άλλο σενάριο όπου εφαρμόστηκε έλεγχος στις συνδέσεις των αυτοκινητοδρόμων. Με άλλα λόγια, είναι η έλλειψη μέτρων ελέγχου που οδηγεί σε μεγάλες ουρές και όχι η εφαρμογή τους. Ο λόγος αυτής της συμπεριφοράς είναι το όριο των 40 οχημάτων που επιβάλλεται στις αστικές ράμπες εισόδου. Αυτή η χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων δεν είναι αρκετή για να ικανοποιήσει τη συνολική ζήτηση και να διαμορφώσει συνθήκες μη-συμφόρησης. Αν υπήρχε μεγαλύτερη χωρητικότητα στις αστικές ράμπες, τότε θα παρουσιαζόταν μικρότερες ουρές στον Α4. Απ' αυτό το παράδειγμα φαίνεται ξεκάθαρα ότι η εφαρμογή ελέγχου στις συνδέσεις αυτοκινητοδρόμων μπορεί να μειώσει, όχι να αυξήσει, την παρουσία ουρών οχημάτων όσο παράδοξο και αν ακούγεται αυτό χωρίς την αντίστοιχη ανάλυση και κατανόηση.

## 4.9 Η Αποτελεσματικότητα της Στρατηγικής

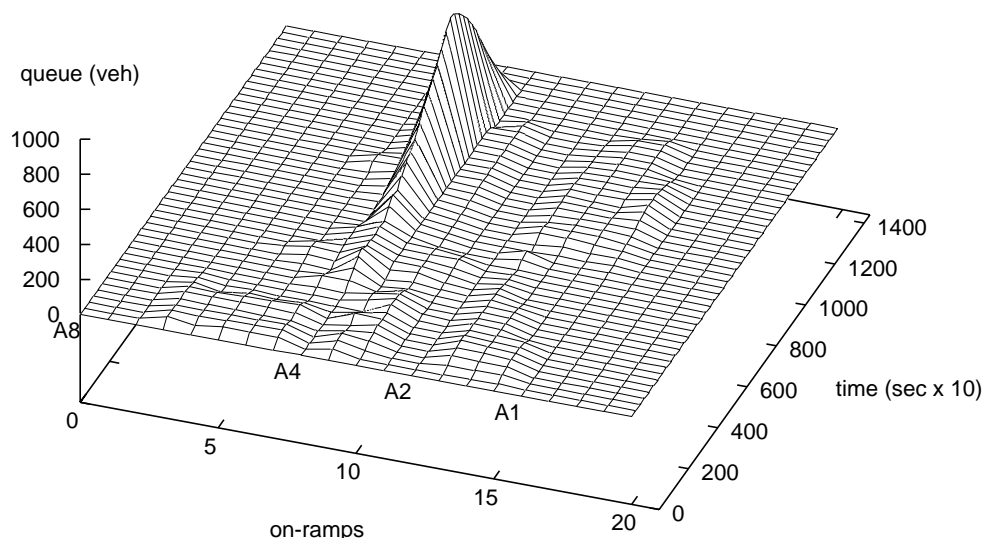
Από τις προηγούμενες ενότητες είναι φανερό ότι το AMOC είναι ικανό να μειώσει το ΣΧ σ' ένα δίκτυο σε σημαντικό βαθμό για ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα και ταυτόχρονα να σέβεται τους περιορισμούς μέγιστης ουράς. Το ποσοστό της μείωσης του ΣΧ εξαρτάται άμεσα από τη χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων των ραμπών εισόδου που είναι διαθέσιμη στη στρατηγική. Οι βέλτιστες τροχιές ελέγχου του AMOC μειώνουν τον ΣΧ με το να μεταβάλλουν τη σύνθεση του ΣΧ ως προς τον ΣΧΤ στους αυτοκινητοδρόμους και τον ΣΧΑ στις ουρές των ραμπών εισόδου. Στον πίνακα 4.2 αναγράφονται ο ΣΧΤ και ο ΣΧΑ σαν ποσοστά του ΣΧ. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση των σεναρίων 3 και 4 όπου πρακτικά ο ΣΧ έχει την ίδια εκατοστιαία σύνθεση αλλά διαφορετικές απόλυτες τιμές του ΣΧΤ και του ΣΧΑ. Παρόλο που τα ποσοστά είναι ίδια, συμφόρηση παρουσιάζεται μόνο στο σενάριο 4 κι όχι στο σενάριο 3. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι στο σενάριο 3 τα μέτρα ελέγχου των ραμπών εισόδου συντονίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται ουρές εκεί που είναι απαραίτητο, ενώ



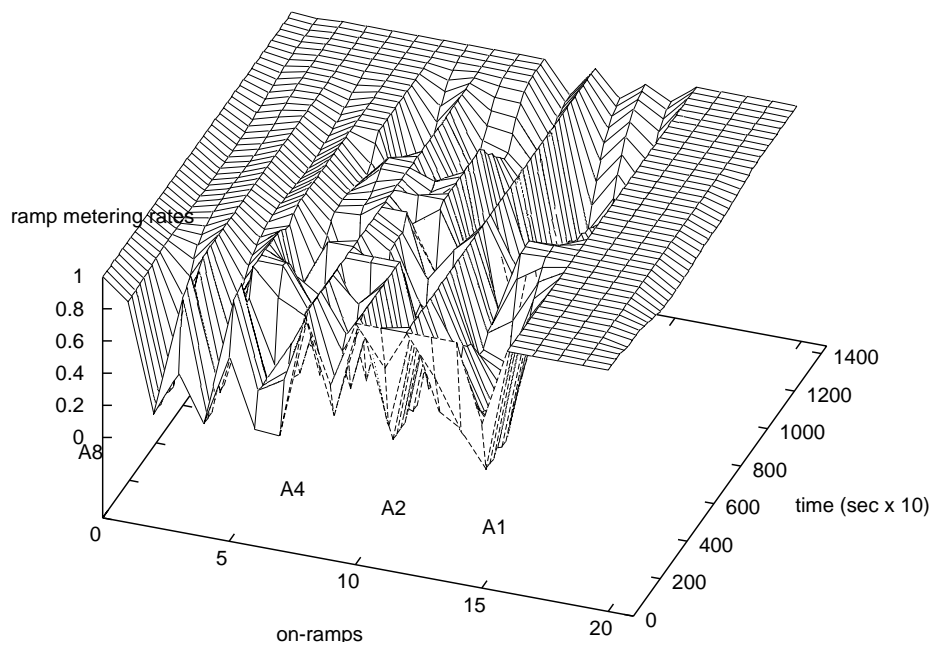
Σχήμα 4.17: Σενάριο 4: Πυκνότητα.



Σχήμα 4.18: Σενάριο 4: Μέση ταχύτητα.



Σχήμα 4.19: Σενάριο 4: Ουρές ραμπών εισόδου.



Σχήμα 4.20: Σενάριο 4: Βέλτιστες τροχιές ελέγχου.

Πίνακας 4.2: ΣΧ, ΣΧΤ και ΣΧΑ για κάθε σενάριο

Σενάριο	ΣΧ	ΣΧΤ	ΣΧΑ
αριθμ.	οχ.*ώρες	οχ.*ώρες	οχ.*ώρες
0	13.226	10.832	2.394
	100%	81,9 %	18,1%
1	9.032	7.712	1.320
	100%	85,39%	14,61%
2	7.930	6.619	1.311
	100%	83,47%	16,53%
3	7.466	6.247	1.219
	100%	83,67%	16,33%
4	10.383	8.682	1.701
	100%	83,62%	16,38%

στο σενάριο 4 δημιουργούνται μεγάλες ουρές στις συνδέσεις των αυτοκινητοδρόμων, κυρίως στον Α4, σαν αποτέλεσμα της έλλειψης ελέγχου των.

Η συμπεριφορά που παρουσιάζει το AMOC στα τρία σενάρια όπου εφαρμόστηκε, δείχνει ότι όταν εμφανίζεται συμφόρηση σε μία κρίσιμη περιοχή, τότε ο πιο αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισής της είναι να περιορισθεί η εισροή οχημάτων στις ράμπες εισόδου που βρίσκονται εγγύτερα ανάντη αυτής της περιοχής, όπως στην περίπτωση του σεναρίου 3. Η απεριόριστη χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων σ' αυτό το σενάριο έκανε το AMOC αδιάφορο στη δημιουργία μεγάλων ουρών στη γειτονιά της κρίσιμης περιοχής στο βαθμό που δεν επιβαρυνόταν ο ΣΧ. Καθώς η χωρητικότητα περιορίζεται, όπως συμβαίνει στα σενάρια 4, 2 και 1, δημιουργούνται ουρές ολοένα και πιο ανάντη της κρίσιμης περιοχής. Ταυτόχρονα συμφόρηση εμφανίζεται στον αυτοκινητόδρομο της οποίας η έκταση εξαρτάται από τη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων σε κάθε σενάριο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που υπάρχει επιπλέον χωρητικότητα στις πιο απομακρυσμένες ανάντη ράμπες εισόδου, π.χ. στον βόρειο και στον ανατολικό Α10, η συμφόρηση έγινε αποδεκτή γιατί η δημιουργία ουρών σ' αυτές τις ράμπες εισόδου θα ήταν ανώφελη και απλώς θα επιβάρυνε τον ΣΧ χωρίς ουσιαστικό αντίκρυσμα. Σ' αυτήν την περίπτωση ο ρυθμός εκροής του δικτύου θα μειωνόταν με αρνητικές συνέπειες για τον ΣΧ. Στην ουσία, η στρατηγική ελέγχου προσπαθεί να επιτύχει τη βέλτιστη εξισορρόπηση ανάμεσα στη μείωση των καθυστερήσεων λόγω της μείωσης της συμφόρησης, από τη μια μεριά, και στην αύξηση των καθυστερήσεων, λόγω της λήψης μέτρων ελέγχου των ραμπών εισόδου, των οχημάτων που βγαίνουν από το δίκτυο πριν φτάσουν στην κρίσιμη περιοχή.

#### 4.10 Η Ισορροπία Μεταξύ Αποτελεσματικότητας και Ισοτιμίας

Ας επανεξετάσουμε τις ουρές που εμφανίζονται όταν η στρατηγική ελέγχου εφαρμόζεται για τα τέσσερα σενάρια που παρουσιάστηκαν. Τα σχήματα 4.6, 4.11, 4.15 και 4.19 διαφέρουν ως προς το μέγεθος, την έκταση και την τοποθεσία των ουρών που σχηματίζονται λόγω της διαφορετικής χωρητικότητας οχημάτων που είναι διαθέσιμη σε κάθε σενάριο.



Στο σενάριο 1, οι ουρές εξαπλώνονται στις ράμπες εισόδου του δικτύου και διαρκούν για ένα μεγάλο μέρος του χρονικού ορίζοντα. Αυτό δε συμβαίνει μόνο για τις ράμπες σύνδεσης των αυτοκινητοδρόμων, αλλά και για τις αστικές ράμπες εισόδου. Στο σενάριο 2, οι ουρές είναι λιγότερο εξαπλωμένες, βρίσκονται γύρω από την κρίσιμη περιοχή και διαρκούν λιγότερο απ' ό,τι στο σενάριο 1. Στο σενάριο 3, δημιουργούνται ουρές σε επιλεγμένες ράμπες εισόδου όπου η υπερβάλλουσα ζήτηση δημιουργεί τελικά τη συμφόρηση μέσα στον αυτοκινητόδρομο και η διάρκειά τους είναι μικρότερη. Στο σενάριο 4, δεν υπάρχει αρκετή χωρητικότητα και οι ουρές είναι πιο απλωμένες. Ο λόγος αυτής της συμπεριφοράς είναι οι περιορισμοί ουράς.

Οι σχηματισμοί ουρών, που είναι απαραίτητες για τη μείωση του  $\Sigma X$ , κατανέμεται ανάμεσα στις ράμπες εισόδου έτσι ώστε η στρατηγική να συμμορφώνεται με τους περιορισμούς μέγιστης ουράς. Όταν δεν υπάρχει ένας τέτοιος περιορισμός, το βάρος της βελτίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών πέφτει στις ράμπες εισόδου που προκαλούν τελικά τη συμφόρηση. Κατά συνέπεια, η επιβολή περιορισμών μέγιστης ουράς μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας τρόπος κατανομής των καθυστερήσεων που επιβάλλονται στους οδηγούς στις ελεγχόμενες ράμπες. Λόγω της τετραγωνικής φύσης των όρων που τιμωρούν την παραβίαση αυτών των περιορισμών (εξίσωση (3.10)) η κατανομή των καθυστερήσεων γίνεται μ' έναν ισορροπημένο τρόπο, δηλαδή, το τίμημα που απαιτείται για την ουσιαστική βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου μοιράζεται ανάμεσα στους οδηγούς που εισέρχονται στο δίκτυο από όλες ή την πλειοψηφία των ραμπών εισόδου, ανάλογα με το πόσο αυστηροί είναι οι περιορισμοί ουράς. Μ' αυτόν τον τρόπο, η στρατηγική γίνεται πιο δίκαιη απέναντι στους οδηγούς που χρησιμοποιούν το δίκτυο. Αυτό το χαρακτηριστικό, όμως, υλοποιείται εις βάρος της παραπέρα βελτίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών, πράγμα που δείχνει ότι η ισοτιμία και η αποτελεσματικότητα είναι τουλάχιστον μερικώς ανταγωνιστικά χαρακτηριστικά μιας στρατηγικής ελέγχου.

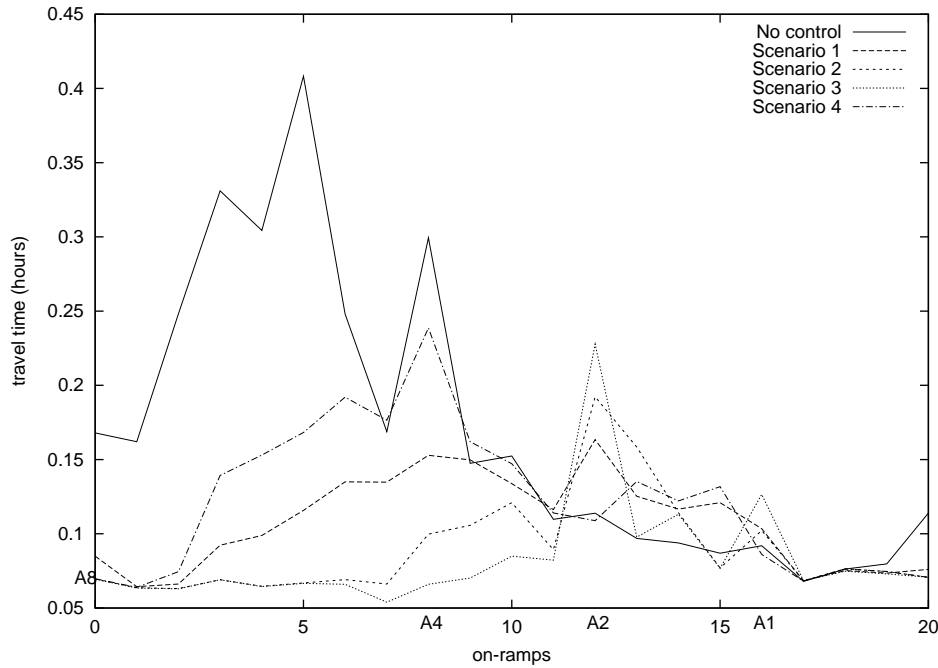
Στο σχήμα 4.21 φαίνεται ο μέσος χρόνος ταξιδιού  $\bar{t}_o$ , για κάθε ράμπα εισόδου  $o$ , που απαιτείται για την αναμονή στην ουρά και την εν συνεχεία διάνυση 6,5 χλμ. στον αυτοκινητόδρομο. Για κάθε ράμπα εισόδου  $o$  ο  $\bar{t}_o$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{t}_o = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \frac{w_o(k)}{q_o(k)} + \sum_{i=\omega_1}^{\omega_2} \sum_{j=1}^{\xi} \frac{L_i}{v_{i,j}(k)} \right] \quad (4.1)$$

όπου  $\omega_1$  είναι ο δείκτης του συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου που βρίσκεται αμέσως κατάντη της  $o$  και  $\omega_2$  είναι ο δείκτης του συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου όπου για κάποιο διακριτό του τμήμα  $\xi \leq N_{\omega_2}$  συμπληρώνονται 6,5 χιλ. κατάντη της  $o$ .

Είναι φανερό από το σχήμα 4.21 ότι όταν απουσιάζουν τα μέτρα ελέγχου οι ράμπες εισόδου του δυτικού A10 είναι οι πιο υποβαθμισμένες του δικτύου γιατί η συμφόρηση που δημιουργείται στον νότιο A10 μεταδίδεται προς τα πίσω στο δυτικό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εκεί μεγάλες ουρές και κατά συνέπεια να αυξάνει ο  $\bar{t}_o$ . Επειδή στο μέρος του δικτύου από τον A1 ως τον A8, δεν εμφανίζεται συμφόρηση ο μέσος χρόνος ταξιδιού για τις ράμπες εισόδου που βρίσκονται σ' αυτήν την περιοχή είναι μικρός.

Όλα τα σενάρια ελέγχου βελτιώνουν την κατάσταση σε σχέση με το σενάριο 0, σε όρους τόσο αποτελεσματικότητας όσο και δικαιοσύνης. Θα επικεντρωθούμε τώρα στις διαφορές που παρουσιάζονται ανάμεσα στα σενάρια ελέγχου. Οι μικρότεροι μέσοι χρόνοι διαδρομής επιτυγχάνονται στο σενάριο 3, όπου δεν υπάρχουν περιορισμοί ουράς. Οι πιο μεγάλοι χρόνοι εμφανίζονται στις ράμπες εισόδου ανάμεσα στον A1 και στον A4, όπου και εφαρμόζεται πιο έντονα ο έλεγχος (σχήμα 4.15). Με το να εστιάζεται η



Σχήμα 4.21: Μέσοι χρόνοι ταξιδιού  $\bar{t}_o$  για κάθε ράμπα εισόδου  $o$ .

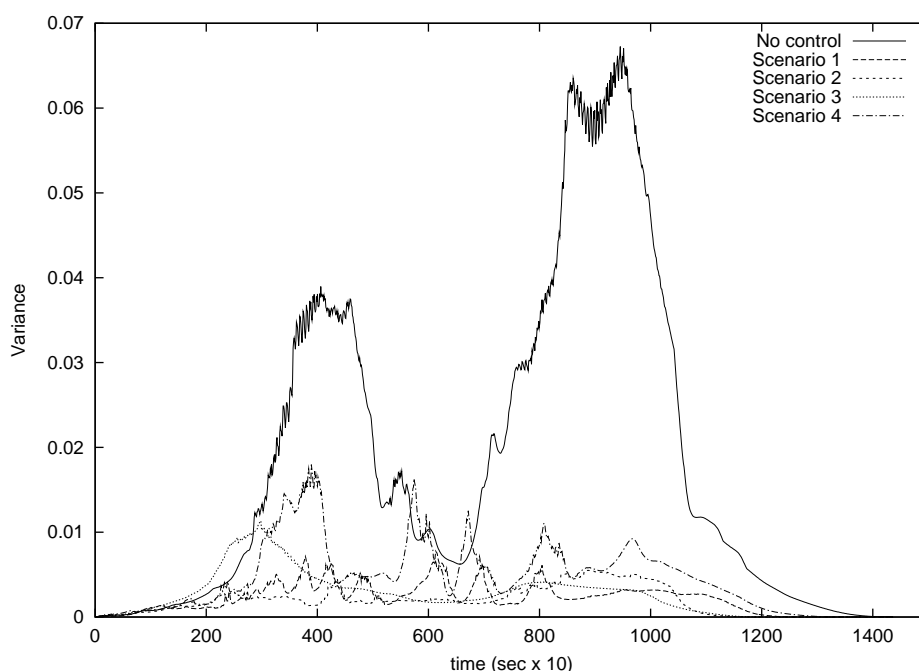
στρατηγική ελέγχου σ' αυτήν την περιοχή, οι οδηγοί που επιχειρούν να εισέλθουν στο δίκτυο μέσω αυτών των ραμπών επιβαρύνονται σε σχέση μ' αυτούς που χρησιμοποιούν τις υπόλοιπες ράμπες εισόδου. Μ' αυτόν τον τρόπο όμως επιτυγχάνεται ο μικρότερος ΣΧ απ' όλα τα σενάρια.

Τα αποτελέσματα των περιορισμών ουράς που υπάρχουν στα σενάρια 1 και 2 μπορούν να εκτιμηθούν από το σχήμα 4.21. Οι μέσοι χρόνοι διαδρομής γίνονται μεγαλύτεροι (λόγω συμφόρησης) καθώς οι μέγιστες επιτρεπτές ουρές γίνονται μικρότερες, αλλά αυτή η αύξηση κατανέμεται πιο ομαλά και σε επιπλέον ράμπες εισόδου πέραν αυτών που βρίσκονται στην κρίσιμη περιοχή δημιουργίας της συμφόρησης. Μ' αυτήν τη λογική η στρατηγική είναι πιο δίκαιη προς τους οδηγούς στο σενάριο 1 απ' ό,τι στο 2. Στην περίπτωση του σεναρίου 4, το γεγονός ότι η είσοδος του A4 στον A10 δεν ελέγχεται συνεπάγεται τη σημαντική επιβάρυνση των οδηγών του δυτικού A10, ενώ οι μέσοι χρόνοι διαδρομής, για τις ράμπες εισόδου μετά τη διασταύρωση του A10 με τον A4, γίνονται σταδιακά μικρότεροι, προσεγγίζοντας τα επίπεδα των υπολοίπων σεναρίων. Αυτό γίνεται γιατί η αναπόφευκτη συμφόρηση αυτού του σεναρίου υποχρεώνει τους οδηγούς του δυτικού A10 να ταξιδεύσουν μέσα της και άρα να υποστούν τις ανάλογες καθυστερήσεις.

Η χωρική διασπορά των μέσων χρόνων διαδρομής για κάθε χρονικό διακριτό βήμα του μοντέλου υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$\text{Var}_t(k) = \frac{\sum_{o=1}^n [\tilde{t}_o(k) - t_o(k)]^2}{n} \quad (4.2)$$

όπου  $\tilde{t}_o(k) = \sum_{o=1}^n t_o(k)/n$  και  $n$  είναι ο αριθμός των ραμπών εισόδου (σχήμα 4.22). Η μέση διασπορά δίνεται από τη σχέση  $\text{Var}_t = \sum_{k=0}^{K-1} \text{Var}_t(k)/K$ . Στην περίπτωση



Σχήμα 4.22: Διασπορά των μέσων χρόνων ταξιδιού για κάθε ράμπα εισόδου ο.

απουσίας ελέγχου, η διασπορά των χρόνων διαδρομής ακολουθεί το μοτίβο της διαμόρφωσης της συμφόρησης μέσα στον αυτοκινητόδρομο, καταδεικνύοντας έτσι τους μεγάλους χρόνους διαδρομής των οδηγών που εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο μέσω των ραμπών εισόδου που επηρεάζονται άμεσα από τη συμφόρηση. Η διασπορά είναι  $0,0183 \text{ ώρες}^2$ . Για τις περιπτώσεις των σεναρίων 1,2,3 και 4 η διασπορά των χρόνων διαδρομής είναι γενικά μικρότερη λόγω του εφαρμοζόμενου ελέγχου και η μέση διασπορά παίρνει τις τιμές  $0,0022 \text{ ώρες}^2$ ,  $0,0019 \text{ ώρες}^2$ ,  $0,0026 \text{ ώρες}^2$  και  $0,0046 \text{ ώρες}^2$ , αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τα τρία σενάρια όπου επιτρέπεται ο έλεγχος των συνδέσεων των αυτοκινητοδρόμων, φαίνεται ότι το σενάριο 3 έχει τη μεγαλύτερη μέση διασπορά και στην αρχή του χρονικού ορίζοντα έχει μεγαλύτερη διασπορά ακόμα κι από την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος. Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα των αυξημένων καθυστερήσεων που συνεπάγονται οι μεγάλες ουρές που σχηματίζονται στην αρχή του χρονικού ορίζοντα. Η διασπορά των χρόνων διαδρομής για τα άλλα δύο σενάρια είναι περίπου στα ίδια επίπεδα, με το σενάριο 1 να έχει λίγο μεγαλύτερη μέση διασπορά απ' ό,τι το σενάριο 2. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο σενάριο 1 υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στον αυτοκινητόδρομο απ' ό,τι στο σενάριο 2. Οι καθυστερήσεις που προκαλούνται απ' αυτήν τη συμφόρηση έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση των χρόνων διαδρομής λόγω του μεγαλύτερου χρόνου διαδρομής που αντιστοιχεί στις ράμπες που επηρεάζονται από τη συμφόρηση.

Όταν δεν ελέγχονται οι συνδέσεις των αυτοκινητοδρόμων, η στρατηγική γίνεται άδικη προς τους οδηγούς του δυτικού Α10, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.21, κάτι που δικαιολογεί τη μεγάλη τιμή της μέσης διασποράς, που είναι και η μεγαλύτερη όλων των σεναρίων όπου ασκείται έλεγχος. Αυτό σημαίνει ότι όταν η χωρητικότητα των συνδέσεων των αυτοκινητοδρόμων παραμένει ενεχμετάλευτη, η στρατηγική ελέγχου

επηρεάζεται αρνητικά τόσο ως προς την αποτελεσματικότητά της, όσο και ως προς τη δίκαιη κατανομή του τιμήματος που απαιτείται για τη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών.

Με βάση όλα τα προηγούμενα, τα σχήματα 4.21 και 4.22 δείχνουν την ανταγωνιστική φύση των ιδιοτήτων αποτελεσματικότητας και ισοτιμίας της στρατηγικής ελέγχου. Το σενάριο 3 είναι το πιο αποτελεσματικό με 43,5% βελτίωση του ΣΧ, αλλά είναι και το πιο άδικο (εκτός του σεναρίου 4): το σενάριο 1 είναι το πιο δίκαιο απ' όλα τα σενάρια αλλά με κόστος τη μείωση του ΣΧ «μόνο» κατά 31,7%· το σενάριο 2 βρίσκεται ανάμεσα στα σενάρια 1 και 3 όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και τη δικαιοσύνη. Το σενάριο 4 είναι το λιγότερο δίκαιο απ' όλα εξαιτίας της έλλειψης ελέγχου των συνδέσεων των αυτοκινητοδρόμων.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, επιτυγχάνεται μία σημαντική βελτίωση παρόλο που υπάρχει μία συστηματική υποτίμηση της αποτελεσματικότητας γιατί ο ΣΧ υπολογίζεται για όλη τη χρονική περίοδο των τεσσάρων ωρών κατά τη διάρκεια της οποίας δεν υπάρχει συνεχώς συμφόρηση.

#### 4.11 Υπολογιστικός Φόρτος

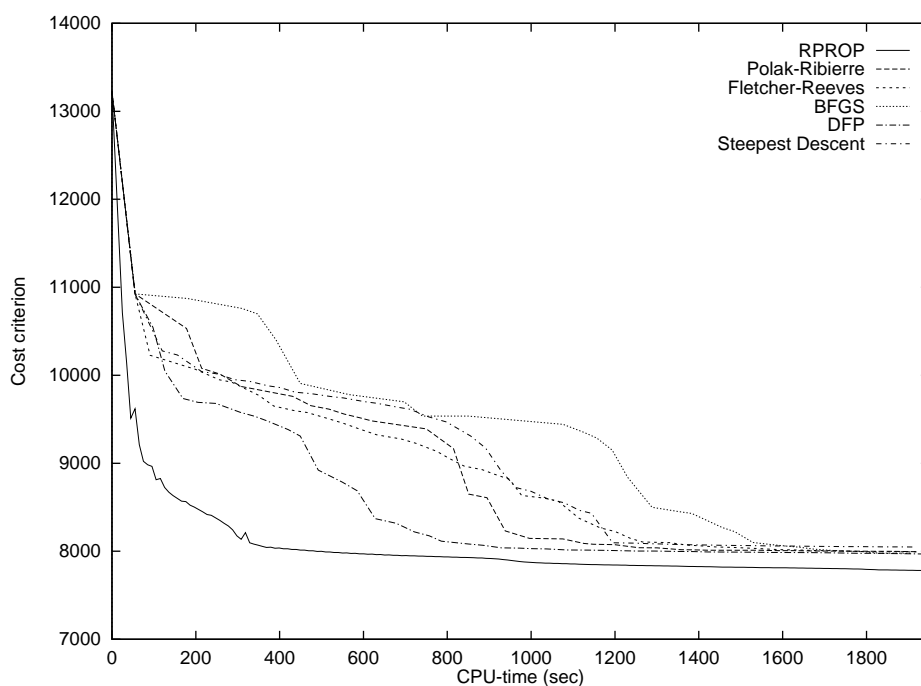
Ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος είναι μεσαίας τάξης. Εμπειρικά βρέθηκε ότι για τις μεθόδους αναζήτησης κατεύθυνσης που χρησιμοποιούν αναζήτηση επι γραμμής μία περιοδική ανανέωση κάθε 4 επαναλήψεις με το διάνυσμα κατεύθυνσης να τίθεται ίσο με το διάνυσμα μέγιστης κατάβασης είναι το καλύτερο για γρήγορη σύγκλιση. Για το RPROP οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι  $\eta^+ = 1,2$ ,  $\eta^- = 0,5$ ,  $\Delta_{\max} = 0,1$  και  $\Delta_{\min} = 10^{-7}$ . Στο σχήμα 4.23 φαίνεται ο υπολογιστικός φόρτος για τις διάφορες μεθόδους αναζήτησης κατεύθυνσης για το σενάριο 3. Είναι φανερό ότι το RPROP είναι πολύ πιο γρήγορο σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Μέσα σε 20 περίπου λεπτά έχει πραγματοποιηθεί το κύριο μέρος της βελτίωσης που επιφέρει το AMOC. Τα αποτελέσματα αυτά βασίζονται σ' έναν υπολογιστή Sun Ultra5 Sparc Iii-360Mhz που σήμερα θεωρείται αργός. Το RPROP συνεχίζει να είναι καλύτερο και όταν υπάρχουν παράγοντες τιμωρίας στο κριτήριο κόστους, αλλά τότε αρχίζει να γίνεται πιο αργή η σύγκλιση. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι για διαφορετικές αρχικές τροχιές ελέγχου, ο αλγόριθμος κατέληγε σε διαφορετικές βέλτιστες τροχιές ελέγχου αλλά οι αντίστοιχες τροχιές της κατάστασης είχαν ελάχιστες διαφορές.

#### 4.12 Σύνοψη

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η στρατηγική ελέγχου AMOC απομονωμένη από τη συνολική δομή ιεραρχικού ελέγχου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Τα χαρακτηριστικά της αποτελεσματικότητας και της ισοτιμίας της παρουσιάστηκαν αναλυτικά και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι:

- Η έλλειψη ελέγχου μέτρησης ράμπας σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων καθιστά αναποτελεσματική τη χρήση της οδικής υποδομής.
- Με τη χρήση στρατηγικών ελέγχου που βασίζονται στη θεωρία βελτίστου ελέγχου είναι εφικτή μία εντυπωσιακή βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών.



Σχήμα 4.23: Υπολογιστικός φόρτος για τις διάφορες μεθόδους αναζήτησης κατεύθυνσης.

- Η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα επιτυγχάνεται με τον εκτεταμένο έλεγχο των ραμπών εισόδου που βρίσκονται εγγύτερα στην κρίσιμη περιοχή (bottleneck), αλλά με τίμημα τη δημιουργία εκτεταμένων ουρών.
- Μπορεί να υπάρξει μία ισορροπία της αποτελεσματικότητας και της ισοτιμίας της στρατηγικής AMOC που επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω της επιβολής περιορισμών μεγίστης ουράς στις ράμπες εισόδου. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ένα εργαλείο κάποιας ευρύτερης πολιτικής των υπευθύνων του δικτύου.
- Η χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων των αυτοκινητοδρόμων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί επειδή βελτιώνει σημαντικά τόσο την αποτελεσματικότητα όσο και την ισοτιμία της στρατηγικής.

Όλη η συζήτηση αυτού του Κεφαλαίου πραγματοποιήθηκε πάνω στα αποτελέσματα που δίνουν οι βέλτιστες τροχιές ελέγχου ανοιχτού βρόχου που προσδιορίζονται από το AMOC και όχι στα αποτελέσματα της εφαρμογής της συνολικής δομής ελέγχου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ιεραρχικού ελέγχου του Κεφαλαίου 3 που έχει το AMOC στον πυρήνα του.

## Κεφάλαιο 5

# ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα της εφαρμογής της ιεραρχικής δομής ελέγχου που παρουσιάσθηκε στο κεφάλαιο 3. Οι διερευνήσεις του προηγούμενου κεφαλαίου αφορούσαν το ΑΜΟC ως ανεξάρτητο εργαλείο ελέγχου. Οι βέλτιστες λύσεις ανοικτού βρόχου μελετήθηκαν, ως προς την αποτελεσματικότητα και την ισοτιμία τους απέναντι στους οδηγούς, θεωρώντας ότι υπάρχει πλήρης γνώση των διαταραχών. Αυτή η παραδοχή είναι καταφανώς λανθασμένη και άρα τα αποτελέσματα της εφαρμογής των βέλτιστων τροχιών ελέγχου δεν θα είναι τα αναμενόμενα. Προκειμένου να συντηρηθεί ο βέλτιστος χαρακτήρας του ελέγχου που θα ασκηθεί στην κυκλοφοριακή ροή, η ιεραρχική δομή ελέγχου που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 εφαρμόστηκε στο δίκτυο του Άμστερνταμ. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν την αποτελεσματικότητα και την ισοτιμία της για έναν αριθμό σεναρίων.

Τα διάφορα σενάρια που θα εξεταστούν χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, δύο παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν είναι ο χρόνος πρόβλεψης της βελτιστοποίησης,  $H_P$ , και ο χρόνος εφαρμογής των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης,  $H_A$ , στο πλαίσιο του κυλιόμενου ορίζοντα. Μεγαλύτερος χρόνος πρόβλεψης  $H_P$  σημαίνει ότι η βελτιστοποίηση λαμβάνει υπόψη της τη δυναμική του συστήματος για μεγαλύτερη μελλοντική χρονική περίοδο. Κατά συνέπεια η ολοκλήρωση της καταστατικής εξίσωσης (3.4) για μεγάλο  $K$ , θα δώσει μια ακριβέστερη περιγραφή των δυναμικών φαινομένων που θα λάβουν χώρα αλλά και των επιπτώσεων της εφαρμογής του ελέγχου. Ταυτόχρονα όμως ένας μεγάλος χρονικός ορίζοντας της βελτιστοποίησης αυξάνει τον υπολογιστικό φόρτο που απαιτείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα βελτίστου ελέγχου (3.3)–(3.5), πράγμα που εμποδίζει την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Μικρότερος χρόνος πρόβλεψης συνεπάγεται μικρότερης διάστασης πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται περιοδικά μετά από ένα χρονικό διάστημα ίσο με  $H_A$ . Με βάση το γενικό σχήμα του κυλιόμενου ορίζοντα, στη διαδικασία της κυκλοφοριακής ροής δεν εφαρμόζεται ολόκληρη η τροχιά του βελτίστου ελέγχου, αλλά μόνο το πρώτο μέρος της για το χρονικό διάστημα  $H_A$ . Στο τέλος της χρονικής περιόδου  $H_A$  ενημερώνονται οι προβλέψεις των διαταραχών και η εκτίμηση της κατάστασης της κυκλοφορίας και επιλύεται εκ νέου το πρόβλημα βελτίστου ελέγχου για χρονικό ορίζοντα  $H_P$ . Μικρότερη περίο-

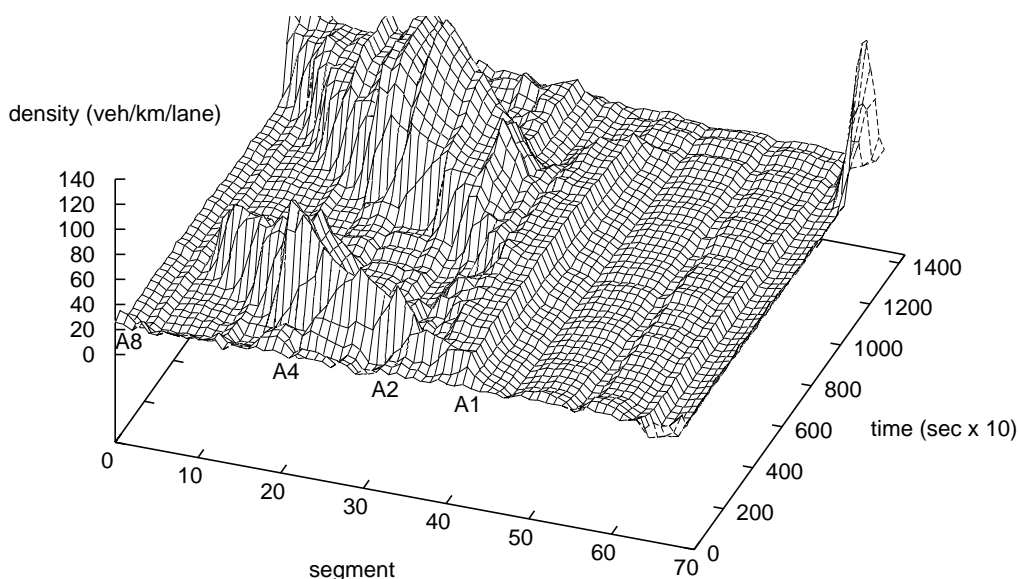
δος εφαρμογής  $H_A$  σημαίνει συχνότερη ενημέρωση των προβλέψεων των διαταραχών και άρα μικρότερα σφάλματα. Μεγαλύτερη περίοδος εφαρμογής σημαίνει ότι υπάρχουν μεγαλύτερα σφάλματα στις προβλέψεις των διαταραχών αλλά και ότι απαιτείται μικρότερος υπολογιστικός φόρτος. Δεν υπάρχει ένα θεωρητικό πλαίσιο μέσα στο οποίο να βρεθεί ένας αυστηρός τρόπος προσδιορισμού των  $H_P$  και  $H_A$ . Το μέγεθός τους προσδιορίζεται εμπειρικά με βάση τις τρέχουσες υπολογιστικές δυνατότητες, την απορρέουσα αποτελεσματικότητα και τις ιδιότητες σύγκλισης του αλγορίθμου αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος βελτίστου ελέγχου.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που μας ενδιαφέρει, είναι η επίδραση των σφαλμάτων της πρόβλεψης των διαταραχών στην αποτελεσματικότητα της στρατηγικής ελέγχου. Οι διαταραχές με τις οποίες θα ασχοληθούμε είναι η ζήτηση σε κάθε ράμπα εισόδου και τα ποσοστά στροφής σε κάθε ράμπα εξόδου. Τα σφάλματα που υπεισέρχονται στις προβλέψεις αυτών των διαταραχών μεταδίδονται αναπόφευκτα και στις βέλτιστες τροχιές ελέγχου. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, προκειμένου να μειωθεί η επίδραση των σφαλμάτων των προβλέψεων των διαταραχών, χρησιμοποιείται τοπικός έλεγχος των ραμπών εισόδου.

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να έχει αρνητική επίδραση πάνω στη στρατηγική ελέγχου είναι η ασυμφωνία ανάμεσα στις παραμέτρους της κυκλοφοριακής ροής που ελέγχεται και στις αντίστοιχες παραμέτρους του μοντέλου της κυκλοφοριακής ροής πάνω στο οποίο βασίζεται η μορφοποίηση του προβλήματος βελτίστου ελέγχου. Η παράμετρος που μας ενδιαφέρει είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής  $v_f$ . Θα εξετάσουμε την περίπτωση όπου η  $v_f$  για το METANET και η  $v_f$  για το AMOC έχουν διαφορετικές τιμές. Μία τέτοια κατάσταση μπορεί να προκύψει, π.χ., λόγω της μείωσης της  $v_f$  στο δίκτυο κατά τη διάρκεια βροχερών καιρικών συνθηκών χωρίς όμως να γίνει ενημέρωση στη στρατηγική ελέγχου αυτής της αλλαγής της παραμέτρου.

Τέλος, θα εξεταστεί η επίδραση της διαθέσιμης χωρητικότητας αποθήκευσης οχημάτων στις ράμπες εισόδου στη στρατηγική κλειστού βρόχου καθώς επίσης και η επίδραση ενός συμβάντος στον αυτοκινητόδρομο.

Η δομή αυτού του κεφαλαίου έχει ως εξής. Στην ενότητα 5.2 περιγράφεται η κυκλοφορία των οχημάτων στο δίκτυο χωρίς την εφαρμογή μέτρων ελέγχου. Στην ενότητα 5.3 περιγράφεται η εφαρμογή της ALINEA σ' όλες τις ράμπες εισόδου του δικτύου. Στην ενότητα 5.4 περιγράφεται η εφαρμογή του ιεραρχικού ελέγχου των ραμπών εισόδου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. και ειδικότερα η επίδραση των  $H_P$  και των  $H_A$  στη αποτελεσματικότητά της. Η επίδραση των σφαλμάτων στις προβλέψεις των ζητήσεων και των ποσοστών στροφής στην αποτελεσματικότητα και στην ισοτιμία της στρατηγικής ελέγχου, περιγράφεται στις ενότητες 5.5 και 5.6. Η επίδραση των διαφορετικών τιμών των παραμέτρων ανάμεσα στο METANET και στο AMOC περιγράφονται στην ενότητα 5.7 για την περίπτωση της ταχύτητας ελεύθερης ροής  $v_f$ . Στην ενότητα 5.8 περιγράφεται η επίδραση των μέγιστων ουρών στη στρατηγική κλειστού βρόχου, ενώ η επίδραση ατυχημάτων που λαμβάνουν χώρα μέσα στο δίκτυο περιγράφεται στην ενότητα 5.9. Τέλος, στην ενότητα 5.10 γίνεται μία αναφορά στον υπολογιστικό φόρτο που απαιτείται από τη στρατηγική.



Σχήμα 5.1: Πυκνότητα χωρίς την εφαρμογή ελέγχου.

## 5.2 Περιγραφή της Κυκλοφοριακής Κατάστασης Χωρίς Έλεγχο

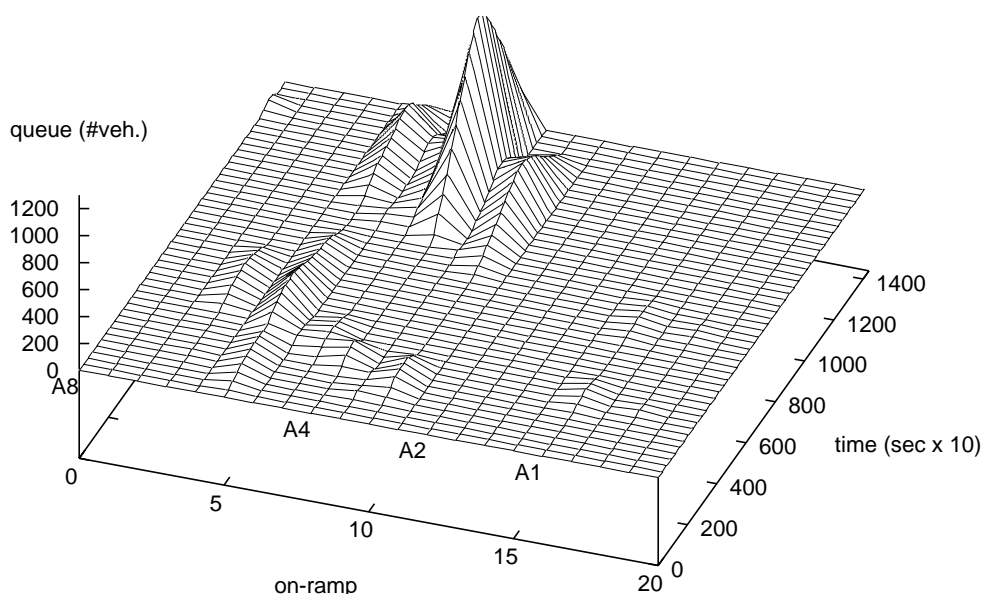
Το βασικό σενάριο με βάση το οποίο θα συγκριθούν τα διάφορα σενάρια είναι αυτό στο οποίο δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος. Σε αντίθεση με το σενάριο 0 του Κεφαλαίου 4, εδώ δεν θεωρούμε ότι έχουμε σταθερά ποσοστά στροφής, αλλά μεταβαλλόμενα, ούτε ότι η ζήτηση είναι κατά τμήματα γραμμική, αλλά είναι στοχαστική. Με δεδομένες αυτές τις διαταραχές και χωρίς την εφαρμογή κανενός ελέγχου για τη χρονική περίοδο των τεσσαρων ωρών που εξετάζουμε, ο ΣΧ γίνεται ίσος με 14.167,67 οχ.\*ώρες. Η χωρική και η χρονική εξέλιξη της κυκλοφοριακής πυκνότητας μέσα στον αυτοκινητόδρομο και των ουρών στις ράμπες εισόδου φαίνονται στα σχήματα 5.1 και 5.2, αντίστοιχα.

## 5.3 Εφαρμογή Τοπικού Ελέγχου

Σ' αυτήν την ενότητα θα εξεταστεί η εφαρμογή της ALINEA σ' όλες τις ράμπες εισόδου. Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 3 η ALINEA είναι μία τοπική αναδραστική στρατηγική ελέγχου ραμπών εισόδου. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη θεωρούμε ότι δεν εφαρμόζεται έλεγχος των ουρών στο πνεύμα της εξίσωσης (3.22), και άρα δεν υπάρχουν περιορισμοί μεγίστων ουρών. Στη δεύτερη περίπτωση θεωρούμε ότι υπάρχουν περιορισμοί μεγίστης ουράς και άρα η σχέση (3.22) ισχύει.

Η εφαρμογή της ALINEA χωρίς έλεγχο ουράς οδηγεί στη σημαντική βελτίωση του ΣΧ, που γίνεται ίσος με 7.924,62 οχ.\*ώρες, που είναι μία βελτίωση της τάξης του 44% σε σχέση με την περίπτωση που δεν ασκείται έλεγχος. Στο σχήμα 5.3 απεικονίζεται η πυκνότητα στον αυτοκινητόδρομο ενώ στο σχήμα 5.4 οι ουρές των ραμπών εισόδου. Είναι χαρακτηριστικό ότι το γράφημα της πυκνότητας είναι σχεδόν επίπεδο κάτι που δείχνει την αποτελεσματικότητα της ALINEA ως τοπικού ελεγκτή. Το κρίσιμο σημείο βρίσκεται στο διάγραμμα των ουρών που σχηματίζονται στις ράμπες εισόδου. Στο σχή-





Σχήμα 5.2: Ουρές ραμπών εισόδου χωρίς εφαρμογή ελέγχου.

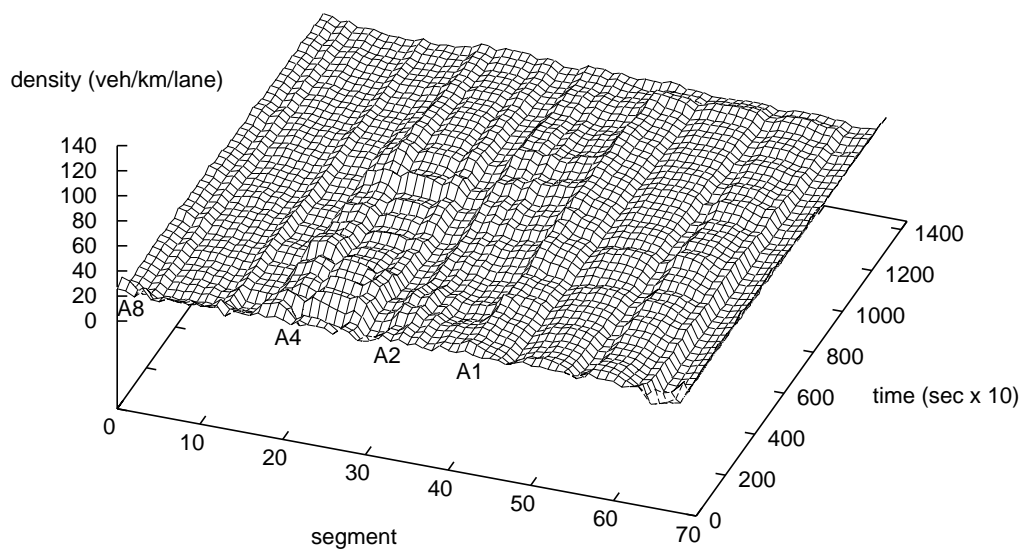
μα 5.4 φαίνεται ότι ο τοπικός έλεγχος οδηγεί στο σχηματισμό μιας τεράστιας ουράς στον αυτοκινητόδρομο A1. Με το σχηματισμό αυτής της ουράς, η ζήτηση του A1 δεν δημιουργεί συμφόρηση αμέσως κατάντη της διασταύρωσης του A1 με τον A10. Εξετάζοντας το σχήμα 5.1, βλέπουμε ότι και οι δύο συμφορήσεις που εμφανίζονται όταν δεν εφαρμόζεται έλεγχος, δημιουργούνται στη διασταύρωση του A1 με τον A10. Η ALINEA κρατά τη ζήτηση του A1 έξω από τον αυτοκινητόδρομο, ακριβώς όσο απαιτείται, έτσι ώστε οι κυκλοφοριακές συνθήκες κατάντη του A1 παραμένουν γύρω από την κρίσιμη πυκνότητα του A10, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5. Το γεγονός αυτό παρεμποδίζει το σχηματισμό συμφόρησης στην κρίσιμη περιοχή κι έτσι δε σχηματίζεται κάποιο κύμα συμφόρησης που διαδίδεται προς τα πίσω, έτσι όπως γίνεται στην περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος (σχήμα 5.1). Στις περιπτώσεις που αρχίζουν να σχηματίζονται κρίσιμες κυκλοφοριακές συνθήκες κατάντη κάποιων ραμπών, η ALINEA αντιδρά σχηματίζοντας τις αντίστοιχες ουρές. Το μήκος και η διάρκεια αυτών των ουρών είναι σχετικά μικρά συγκρινόμενα με το μήκος και τη διάρκεια της ουράς που σχηματίζεται στον A1. Αυτή η συμπεριφορά έρχεται προς επίρωση του συμπεράσματος του κεφαλαίου 4, σχετικά με τη χωρικότητα αποθήκευσης των οχημάτων των ραμπών εισόδου και την αποτελεσματικότητα μιας στρατηγικής ελέγχου όταν εφαρμόζεται πολύ κοντά στα σημεία όπου πρωτοεμφανίζεται η συμφόρηση. Θεωρώντας ότι οι μέγιστες επιτρεπτές ουρές κάθε ράμπας εισόδου είναι άπειρες, ο τοπικός έλεγχος είναι ικανός να δημιουργήσει εξαιρετικές κυκλοφοριακές συνθήκες μέσα στον αυτοκινητόδρομο. Το βάρος όμως αυτής της βελτίωσης πέφτει πάνω σε μία και μόνο ράμπα εισόδου που βρίσκεται αμέσως ανάντι του σημείου που δημιουργείται συμφόρηση. Στην πραγματικότητα αυτή η στρατηγική δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην πράξη γιατί ο σχηματισμός της τεράστιας ουράς στον A1 θα παρακινούσε τους οδηγούς, βλέποντάς την μπροστά τους, να αλλάξουν διαδρομή και να εισέλθουν στον αυτοκινητόδρομο από κάποια άλλη ράμπα εισόδου. Με άλλα λόγια, ο τοπικός έλεγχος είναι αποτελεσματικός αλλά δεν είναι δίκαιος προς όλους τους οδηγούς.

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, ένας έμμεσος τρόπος για να συμπεριφέρεται μία στρα-

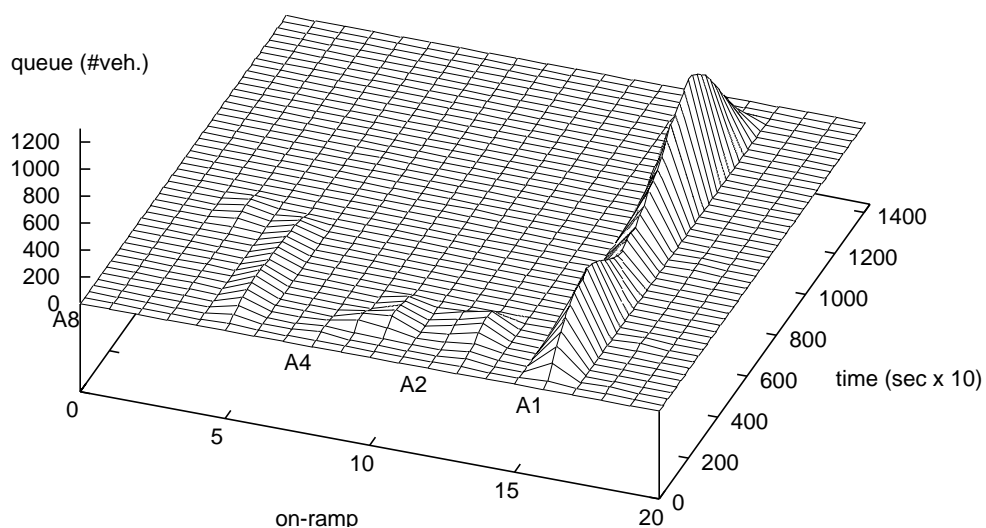
τηγική πιο δίκαια προς τους οδηγούς είναι η επιβολή περιορισμών μέγιστης ουράς. Για την περίπτωση της ALINEA, οι περιορισμοί μέγιστης ουράς λαμβάνονται υπόψη μέσω της εξίσωσης (3.22). Εφαρμόζοντας τώρα ALINEA με έλεγχο ουράς και θεωρώντας ότι το μέγιστο μήκος ουράς πρέπει να είναι 100 οχήματα για τις κανονικές ράμπες εισόδου και 200 οχήματα για τις εισόδους των αυτοκινητοδρόμων, ο ΣΧ γίνεται 10.478,82 οχ.\*ώρες, δηλαδή υπάρχει μείωση κατά 26% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εξασκείται κανένας έλεγχος. Στο σχήμα 5.5 φαίνεται το γράφημα της κυκλοφοριακής πυκνότητας ενώ στο σχήμα 5.7 το γράφημα των ουρών. Η μείωση της αποτελεσματικότητας του τοπικού ελέγχου, από 44% στο 26%, απεικονίζεται στο γράφημα της πυκνότητας, που τώρα πλέον παύει να είναι επίπεδο, όπως στο σχήμα 5.3. Αντίθετα, εμφανίζεται συμφόρηση στον αυτοκινητόδρομο στο δεύτερο μισό του χρονικού ορίζοντα προσομοίωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιβολή άνω ορίων στο μέγεθος των ουρών. Παρατηρώντας το σχήμα 5.7, είναι φανερό ότι η ουρά στον Α1 διατηρείται στο μέγιστο για το μεγαλύτερο μέρος του χρονικού ορίζοντα. Η τάση της στρατηγικής ελέγχου είναι να δημιουργήσει στον Α1 μεγάλες ουρές, αλλά παρεμποδίζεται από τον περιορισμό μέγιστης ουράς στον Α1 (200 οχήματα). Μετά το σχηματισμό της μέγιστης ουράς, η ζήτηση του Α1 εισέρχεται πλέον ανεμπόδιστη στον Α10 και δημιουργεί αύξηση της πυκνότητας. Το κύμα συμφόρησης προωθείται ανάντη επί του Α10 και ενεργοποιεί άλλους τοπικούς ελεγκτές με αποτέλεσμα το σχηματισμό και άλλων ουρών. Σημειώνουμε ότι ο τοπικός έλεγχος δεν έχει γνώση κάποιας πρόβλεψης της μελλοντικής ζήτησης και των μελλοντικών κυκλοφοριακών συνθηκών, αλλά μόνο των τρεχουσών κυκλοφοριακών συνθηκών αμέσως κατάντη της ράμπας εισόδου που ελέγχει. Έτσι, ο τοπικός έλεγχος απλώς αντιδρά στις τρέχουσες τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες, αγνοώντας οποιαδήποτε άλλη πληροφορία. Υπ' αυτές τις συνθήκες, ο σχηματισμός συμφόρησης είναι αναπόφευκτος. Είναι προφανές ότι το συνολικό αποτέλεσμα της στρατηγικής ελέγχου δεν είναι δίκαιο προς τους οδηγούς των οχημάτων του Α1. Αυτό φαίνεται και από το σχήμα 5.8 όπου εμφανίζεται ο μέσος χρόνος ταξιδιού για απόσταση 6,5 χλμ. κατάντη της κάθε ράμπας εισόδου. Ο έλεγχος ουρών κάνει τον τοπικό έλεγχο λίγο πιο ισότιμο σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν μέγιστες ουρές, εξακολουθεί όμως αυτός να είναι προβληματικός ως προς το χαρακτηριστικό της ισοτιμίας των οδηγών. Μικρότερες μέγιστες ουρές θα έκαναν τον τοπικό έλεγχο ακόμη πιο δίκαιο, αλλά αυτό θα ήταν ανισότροπα εις βάρος της αποτελεσματικότητας του ελέγχου. Γιαυτό και απαιτείται ένα άλλο σχήμα ελέγχου όπως αυτό που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, όπου ο τοπικός έλεγχος είναι ένα μόνο από τα στοιχεία που συνθέτουν τη συνολική δομή ελέγχου.

#### 5.4 Εφαρμογή Ιεραρχικού Ελέγχου και η Επίδραση των $H_P$ και $H_A$

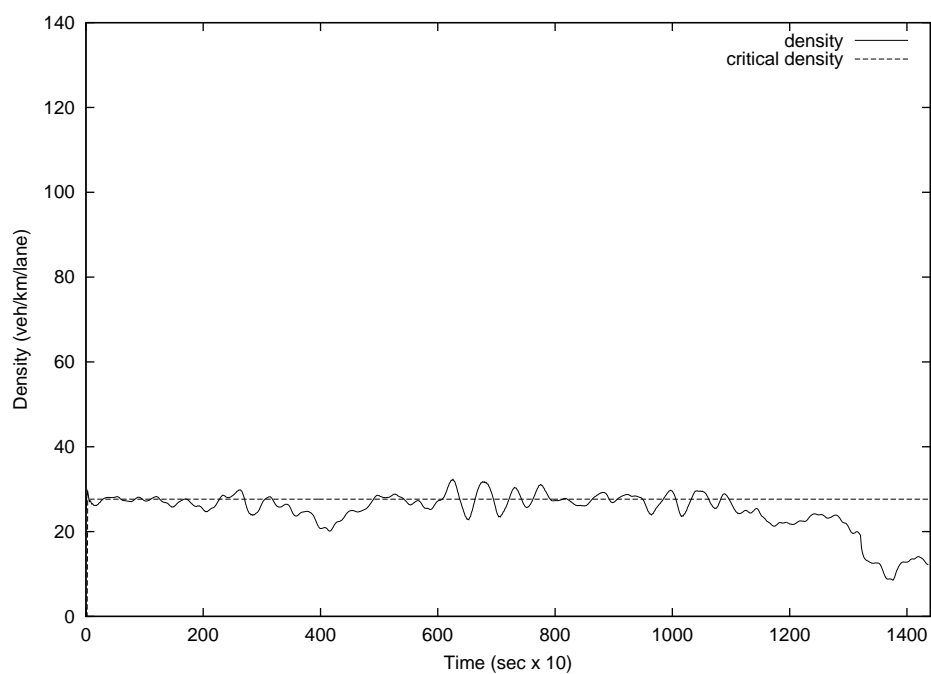
Προχωρούμε τώρα στη μελέτη της εφαρμογής του ιεραρχικού ελέγχου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 στο δίκτυο του Άμστερνταμ. Σαν πρώτη προσέγγιση θα θεωρήσουμε ότι οι διαταραχές που επενεργούν στο κυκλοφοριακό σύστημα είναι γνωστές με απόλυτη ακρίβεια, όπως επίσης και η κατάσταση του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή. Δηλαδή, το επίπεδο Εκτίμησης/Πρόβλεψης, του σχήματος 3.1, δίνει ακριβείς προβλέψεις της ζήτησης και των ποσοστών στροφής, ακριβείς εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου και ακριβή εκτίμηση της πυκνότητας και της ταχύτητας που επικρατούν στον αυτοκινητόδρομο καθώς και του μεγέθους των ουρών στις ράμπες εισόδου.



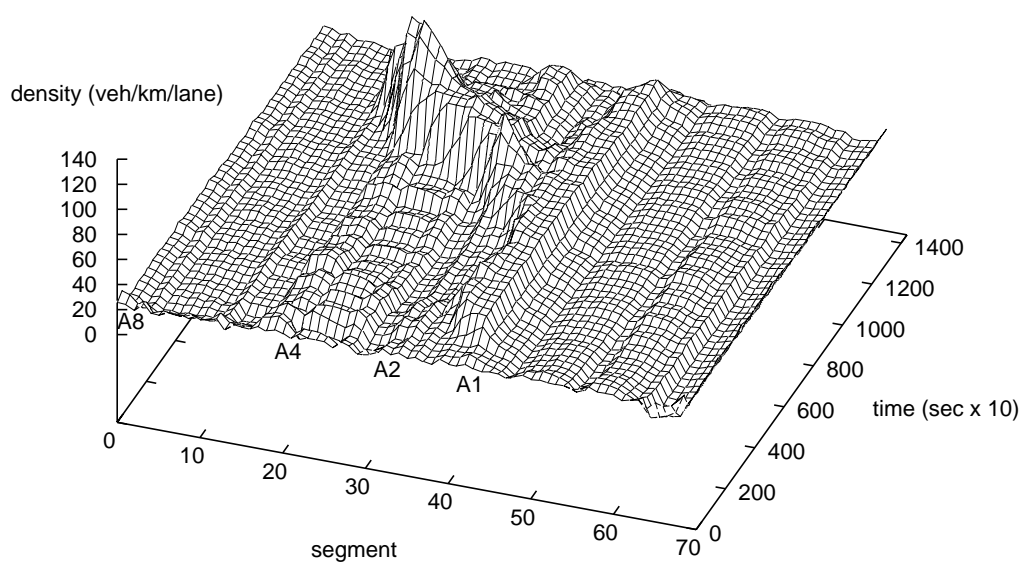
Σχήμα 5.3: Πυκνότητα κατά την εφαρμογή της ALINEA χωρίς έλεγχο ουράς.



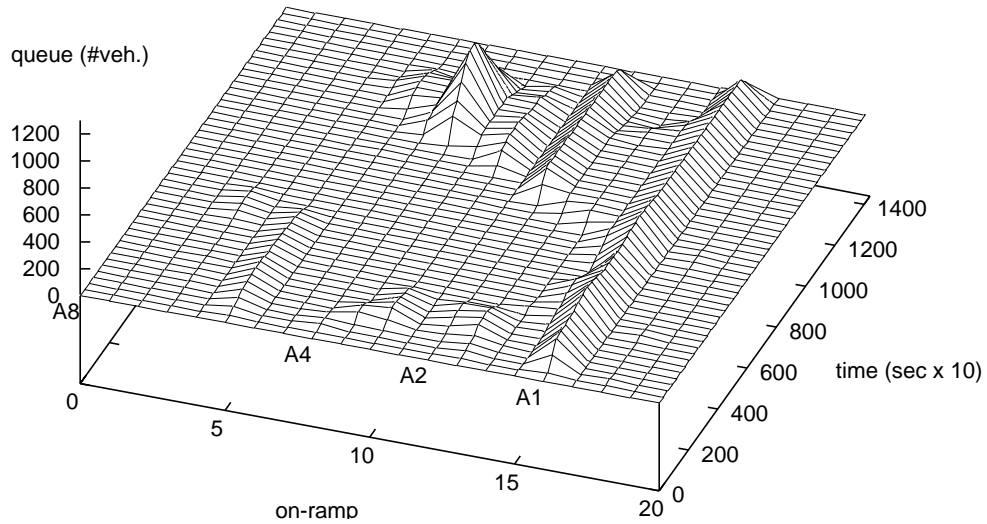
Σχήμα 5.4: Ουρές ραμπών εισόδου κατά την εφαρμογή της ALINEA χωρίς έλεγχο ουράς.



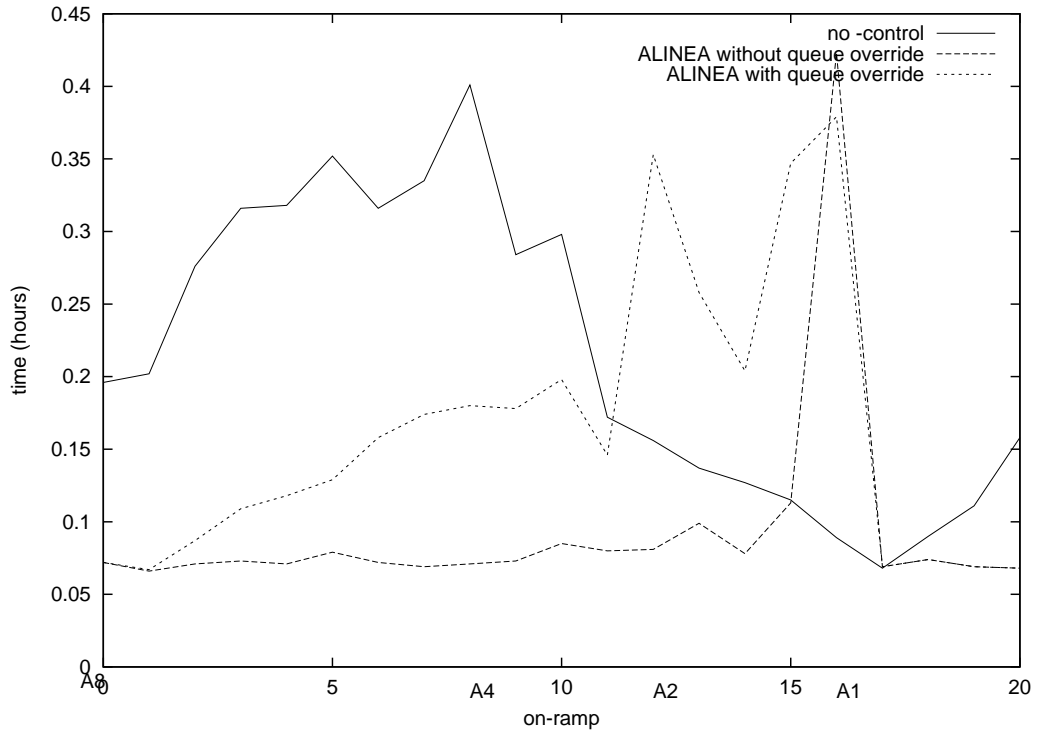
Σχήμα 5.5: Πυκνότητα κατόντη του A1 όταν εφαρμόζεται ALINEA χωρίς έλεγχο ουράς.



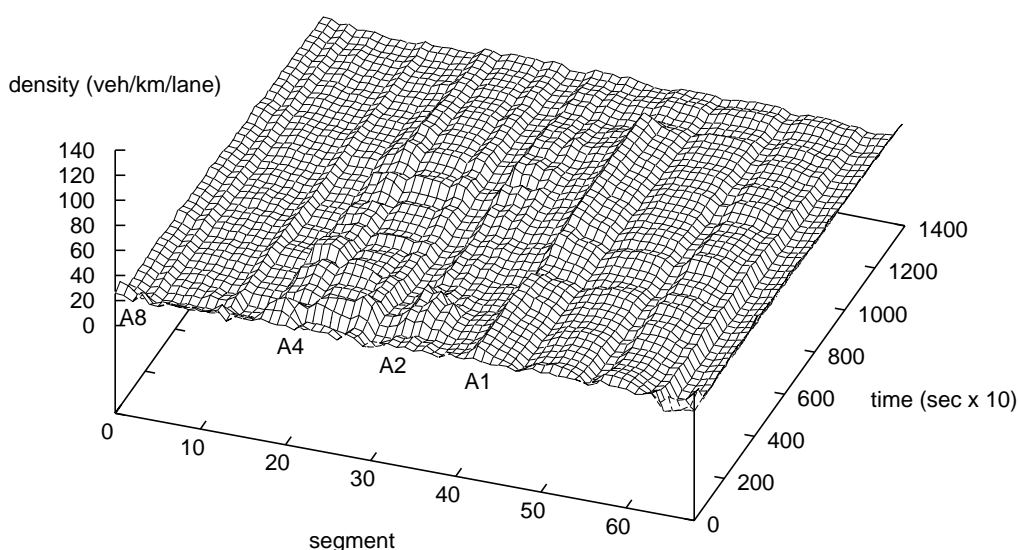
Σχήμα 5.6: Πυκνότητα κατά την εφαρμογή της ALINEA με έλεγχο ουράς.



Σχήμα 5.7: Ουρές ραμπών εισόδου κατά την εφαρμογή της ALINEA με έλεγχο ουράς.



Σχήμα 5.8: Μέσος χρόνος ταξιδιού για απόσταση 6,5 χλμ. κατάντη κάθε ράμπας εισόδου.

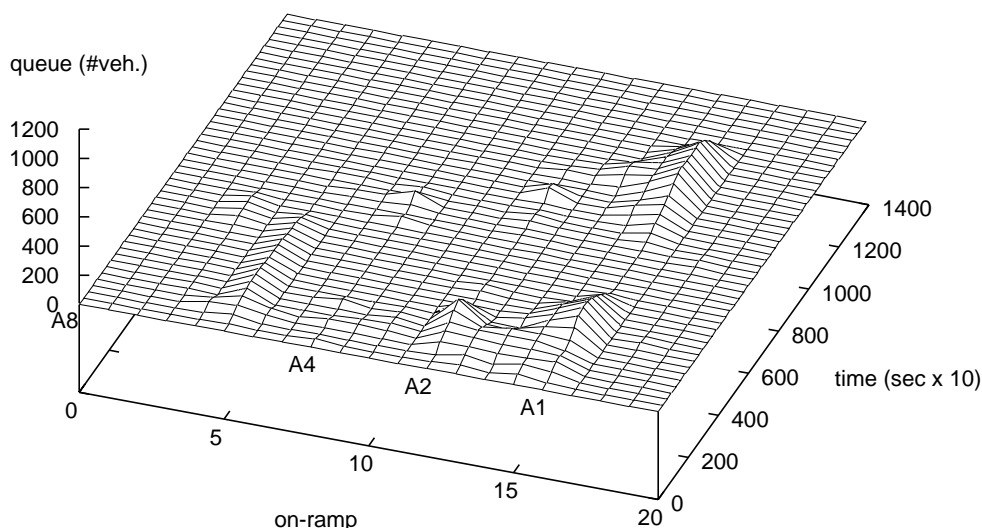


Σχήμα 5.9: Πυκνότητα μετά την εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου ( $H_p = H_A = 4$  ώρες).

Στο επίπεδο της Βελτιστοποίησης υπάρχει το AMOC, και αυτά που χαρακτηρίζουν την εφαρμογή ελέγχου κλειστού βρόχου είναι ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης  $H_P$ , για τον οποίο λύνεται το πρόβλημα βελτίστου ελέγχου χρησιμοποιώντας το λογισμικό του AMOC και ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής της βέλτιστης λύσης  $H_A$ . Ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης είναι 4 ώρες. Αν θεωρήσουμε ότι  $H_P = H_A = 4$  ώρες, τότε έχουμε την εφαρμογή ελέγχου ανοικτού βρόχου, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η εφαρμογή του βελτίστου ελέγχου ανοικτού βρόχου στο δίκτυο με γνωστές διαταραχές θα δώσει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Έτσι η βέλτιστη λύση του AMOC για όλον το χρονικό ορίζοντα των τεσσάρων ωρών με γνωστές τις διαταραχές αποτελεί ένα άνω όριο της βελτίωσης που μπορεί να επιφέρει το ιεραρχικό σχήμα ελέγχου. Θεωρώντας ότι οι μέγιστες επιτρεπτές ουρές για τις κανονικές ράμπες εισόδου είναι 100 οχήματα και για τις εισόδους των αυτοκινητοδρόμων είναι 200 οχήματα, οι κυκλοφοριακές συνθήκες για  $H_P = H_A = 4$  ώρες απεικονίζονται στα σχήματα 5.9 (πυκνότητα) και 5.10 (ουρές). Η αποτελεσματικότητα του AMOC φαίνεται και από την τιμή του ΣΧ, που είναι 6.974,29 οχ.\*ώρες, δηλαδή βελτίωση κατά 50.8%. Η υπεροχή του AMOC απέναντι στην ALINEA, τόσο χωρίς όσο και με έλεγχο ουρών, είναι φανερή και θα ήταν ακόμη μεγαλύτερη αν δεν υπήρχαν περιορισμοί ουράς. Το AMOC είναι ικανό χωρίς να προκαλεί εκτεταμένες ουρές, όπως αυτές των σχημάτων 5.4 και 5.7, να δημιουργεί κυκλοφοριακές συνθήκες χωρίς συμφόρηση.

Ο ιεραρχικός έλεγχος που βασίζεται στο σχήμα του κυλιόμενου ορίζοντα σκοπό έχει να διατηρήσει την κατάσταση του συστήματος κοντά στο βέλτιστο εν όψη αβεβαιοτήτων στις προβλέψεις των διαταραχών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 3, υπάρχει ανάγκη να προσδιοριστούν οι ορίζοντες  $H_P$  και  $H_A$  έτσι ώστε να μην απαιτείται μεγάλος υπολογιστικός φόρτος, χωρίς όμως αυτό να επιτυγχάνεται εις βάρος της αποτελεσματικότητας της στρατηγικής κλειστού βρόχου.

Στο βασικό σενάριο που θα χρησιμοποιήσουμε για να μελετήσουμε την επίδραση των  $H_P$  και  $H_A$  στον έλεγχο κυλιόμενου ορίζοντα κλειστού βρόχου, οι μέγιστες ουρές



Σχήμα 5.10: Ουρές ραμπών εισόδου μετά την εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου ( $H_P = H_A = 4$  ώρες).

των κανονικών ραμπών εισόδου είναι 100 οχήματα, ενώ για τις εισόδους των αυτοκινητοδρόμων είναι 200 οχήματα. Επίσης θεωρούμε ότι οι διαταραχές είναι γνωστές στο AMOC και το διάνυσμα κατάστασης είναι δεδομένο κάθε φορά που κλείνει ο βρόχος ελέγχου. Τέλος, επιλέγουμε να μην χρησιμοποιήσουμε τοπικό έλεγχο στο τελευταίο επίπεδο της ιεραρχικής δομής, αλλά να υλοποιήσουμε τη βέλτιστη λύση που προσδιορίζει το AMOC χρησιμοποιώντας κατευθείαν τα προσδιορισμένα ποσοστά μέτρησης ράμπας. Τα αποτελέσματα για διάφορα ζεύγη ( $H_P, H_A$ ) αναγράφονται στον πίνακα 5.1.

Στο πίνακα 5.1 αναγράφεται για κάθε ζεύγος ( $H_P, H_A$ ) ο ΣΧ, η ποσοστιαία βελτίωση που προκύπτει από την εφαρμογή του ελέγχου σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εξασκείται έλεγχος και, τέλος, η ποσοστιαία χειροτέρευση του ΣΧ ως προς το βέλτιστο που αντιπροσωπεύει ο βέλτιστος έλεγχος ανοικτού βρόχου. Παρατηρούμε ότι όσο ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης  $H_P$  είναι μεγαλύτερος της μίας ώρας (60 λεπτά) τότε δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στα αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου. Ο ΣΧ είναι περίπου ο ίδιος για όλα τα ζεύγη με  $H_P \geq 60$  λεπτά, ενώ για μικρότερους χρόνους πρόβλεψης τα αποτελέσματα χειροτερεύουν σημαντικά αποκλίνοντας σε μεγάλο βαθμό από το βέλτιστο δυνατό. Ακόμα και κάτω από τις ευνοϊκότερες προϋποθέσεις όταν  $H_P < 60$  λεπτών, η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής ελέγχου κάμπτεται σοβαρά, αν και βελτιώσεις της τάξης του 25% σαφώς και δεν είναι αμελητέες. Επίσης, παρατηρούμε ότι η συχνότητα των επαναλήψεων όπου κλείνει ο βρόχος ελέγχου, δηλαδή το μέγεθος του  $H_A$  δεν επιδρά ιδιαίτερα στα αποτελεσματικότητα της στρατηγικής. Το  $H_A$  αρχίζει να επιδρά περισσότερο στους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης μικρότερους της μίας ώρας. Έτσι, για  $H_P = 30$  λεπτά η μείωση του  $H_A$  στο μισό, από 30 λεπτά στα 15 λεπτά, βελτιώνει κατά 4.55% το ΣΧ. Το ίδιο συμβαίνει και όταν  $H_P = 20$  λεπτά, όπου η μείωση του  $H_A$  στο μισό, από 20 στα 10 λεπτά, επιφέρει μία βελτίωση της τάξης του 4.31% στον ΣΧ. Αυτή η βελτίωση είναι αναμενόμενη γιατί για δεδομένο ορίζοντα πρόβλεψης, όσο μικρότερος είναι ο ορίζοντας εφαρμογής, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα. Ο συχνός κλειστός βρόχος ( $H_A$  μικρό) είναι καλός

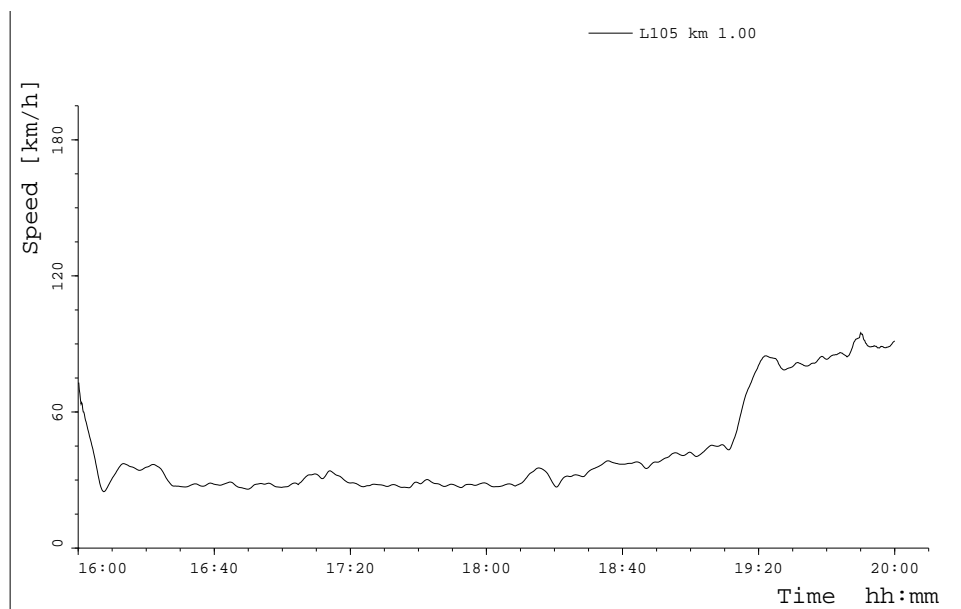
Πίνακας 5.1: ΣΧ για διάφορα ζεύγη ( $H_P, H_A$ ) με ακριβή γνώση διαταραχών

$\alpha/\alpha$	$H_P$	$H_A$	ΣΧ	Εκατοστιαία βελτίωση ως προς τον μη-έλεγχο	Εκατοστιαία χειροτέρευση ως προς το βέλτιστο έλεγχο ανοικτού βρόχου
	(λεπτά)	(λεπτά)	(οχ.*ώρες)	(%)	(%)
1	240	240	6.974,29	50,77	0,00
2	240	120	6.978,81	50,74	0,06
3	180	120	7.021,39	50,44	0,67
4	120	120	7.006,95	50,54	0,47
5	120	60	6.998,93	50,60	0,35
6	120	30	7.003,62	50,57	0,42
7	60	60	7.075,14	50,06	1,45
8	60	30	7.021,17	50,44	0,67
9	60	15	7.024,22	50,42	0,72
10	30	30	10.304,46	27,28	47,75
11	30	15	9.658,51	31,83	38,49
12	20	20	11.210,64	20,87	60,74
13	20	10	10.599,81	25,18	51,98

κυρίως για να περιορίζει την επίδραση των αβεβαιοτήτων.

Το ενδιαφέρον σημείο που παρουσιάζει ο πίνακας 5.1 είναι η μείωση της αποτελεσματικότητας της στρατηγικής για  $H_P < 60$  λεπτά. Το γεγονός αυτό δεν αντικατοπτρίζει κάποια γενική αρχή που διέπει το πρόβλημα, αλλά είναι συνέπεια συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του. Πιο συγκεκριμένα ας εξετάσουμε τι γίνεται στο δίκτυο όταν δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος. Η διασταύρωση του A10 με τον A1 είναι το σημείο όπου δημιουργείται η συμφόρηση και από εκεί μεταδίδεται προς τα πίσω σε μεγάλο μέρος του δικτύου. Στο σχήμα 5.11 φαίνεται η τροχιά της ταχύτητας πριν την είσοδο του A1 στον A10, όταν δεν ασκείται κανένας έλεγχος. Είναι εμφανής η συμφόρηση που επικρατεί στο σημείο αυτό για το μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης, αλλά στην πραγματικότητα υπάρχουν δύο διαφορετικά κύματα συμφόρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12 όπου απεικονίζεται η ταχύτητα κατάντη της εισόδου του A4 στον A10. Η πρώτη συμφόρηση αρχίζει περίπου μία ώρα μετά την αρχή της προσομοίωσης, και τελειώνει είκοσι λεπτά αργότερα στον δυτικό A10, σχήμα 5.13. Άρα η λύση που προσδιορίζει το AMOC για χρονικούς ορίζοντες μικρότερους μιας ώρας, όπως π.χ. για 30 ή 20 λεπτά, δεν λαμβάνει υπόψη της την πλήρη εξέλιξη των δυναμικών φαινομένων της κυκλοφοριακής ροής. Με χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης 30 ή 20 λεπτών, η εικόνα που σχηματίζει το AMOC για τη μελλοντική εξέλιξη της κυκλοφοριακής ροής δεν περιλαμβάνει την πλήρη πληροφορία για την έκταση της συμφόρησης. Στο τέλος του χρονικού ορίζοντα των 30 λεπτών υπάρχουν τμήματα του αυτοκινητοδρόμου όπου επικρατούν συνθήκες ελεύθερης ροής (που όμως σύντομα θα αλλάξουν προς το χειρότερο). Κατά συνέπεια η στρατηγική ελέγχου δεν έχει κανένα κίνητρο να προβεί σε οποιαδήποτε δράση ελέγχου που να στοχεύει στη μείωση της συμφόρησης αφού δεν τη «βλέπει» (μυωπικός έλεγχος). Αντίθετα, όταν ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης είναι τουλάχιστον μιας ώρας, τότε σχεδόν όλη η πρώτη συμφόρηση (και μέρος της δεύτερης) προβλέπεται από το



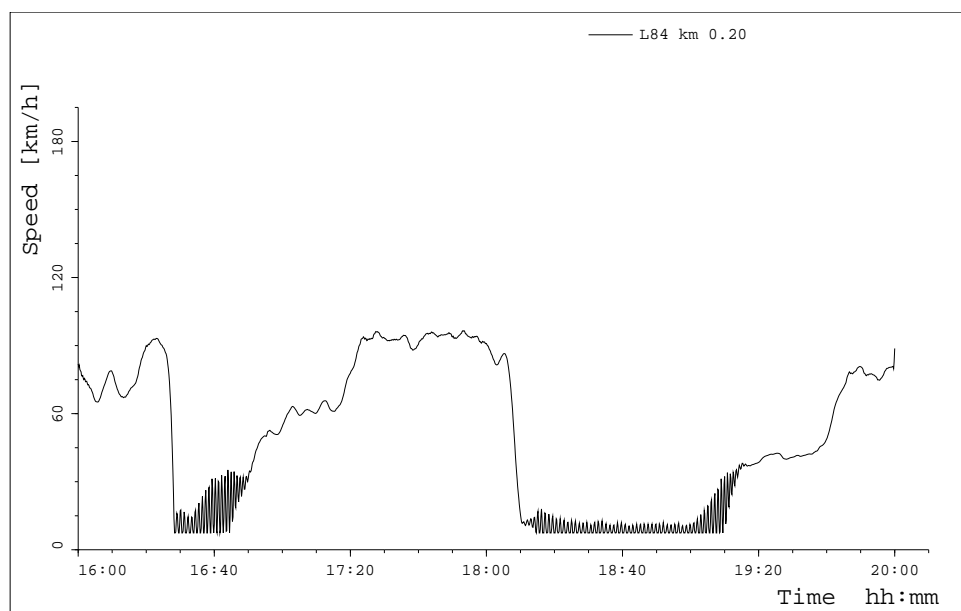


Σχήμα 5.11: Ταχύτητα ανάντι της διασταύρωσης του A10 με τον A1 χωρίς εφαρμογή ελέγχου.

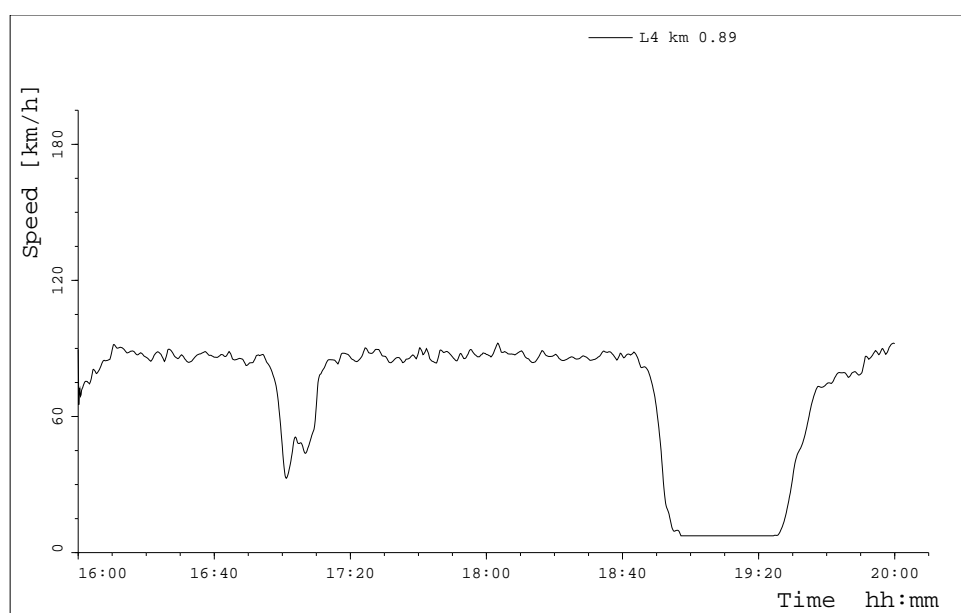
AMOC και κατά συνέπεια η λύση όπου καταλήγει τη λαμβάνει υπόψη της.

Αυτό έχει σαν συνέπεια να αντιδρά η στρατηγική ελέγχου έγκαιρα εν όψη της επερχόμενης συμφόρησης. Αυτό φαίνεται και από τις ουρές που σχηματίζονται όταν εφαρμόζεται έλεγχος για  $(H_P, H_A) = (60, 30)$ , σχήμα 5.14, και για  $(H_P, H_A) = (30, 30)$ , σχήμα 5.15. Στα δύο αυτά σχήματα φαίνεται η διαφορά της στρατηγικής στην αρχή του χρονικού ορίζοντα. Όταν  $H_P = 60$  λεπτά, σχηματίζονται ουρές στις ράμπες εισόδου ανάμεσα στους A2 και A1, από την αρχή της προσομοίωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το AMOC έχοντας επαρκώς μεγάλο χρόνο πρόβλεψης, προβλέπει τη συμφόρηση στην πλήρη έκταση της και δρα έτσι ώστε να δημιουργούνται ουρές νωρίτερα και στην έκταση που απαιτείται για να αντιμετωπιστεί το επερχόμενο πρόβλημα. Αντίθετα, όταν ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης είναι 30 λεπτά, τότε η στρατηγική ελέγχου αργεί να δημιουργήσει τις κατάλληλες ουρές ως αντίδραση στην προβλεπόμενη συμφόρηση. Με άλλα λόγια, το AMOC έχει λιγότερη πληροφορία ως προς τα δυναμικά φαινόμενα που θα λάβουν χώρα στο δίκτυο και γιαυτό η αντίδραση του είναι υποβέλτιστη σε σχέση με την πραγματικότητα (έτσι όπως αυτή προσομοιώνεται από το METANET). Στα σχήματα 5.16 και 5.17 φαίνονται οι προβλέψεις που κάνει το AMOC για την πυκνότητα της κυκλοφορίας όταν δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος για τις περιπτώσεις όπου  $(H_P, H_A) = (60, 30)$  και  $(H_P, H_A) = (30, 30)$ , αντίστοιχα. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο σχήματα είναι εμφανής και δείχνει πόσο λιγότερη πληροφορία επεξεργάζεται το AMOC για  $(H_P, H_A) = (30, 30)$  σε σχέση με την περίπτωση όπου  $(H_P, H_A) = (60, 30)$ .

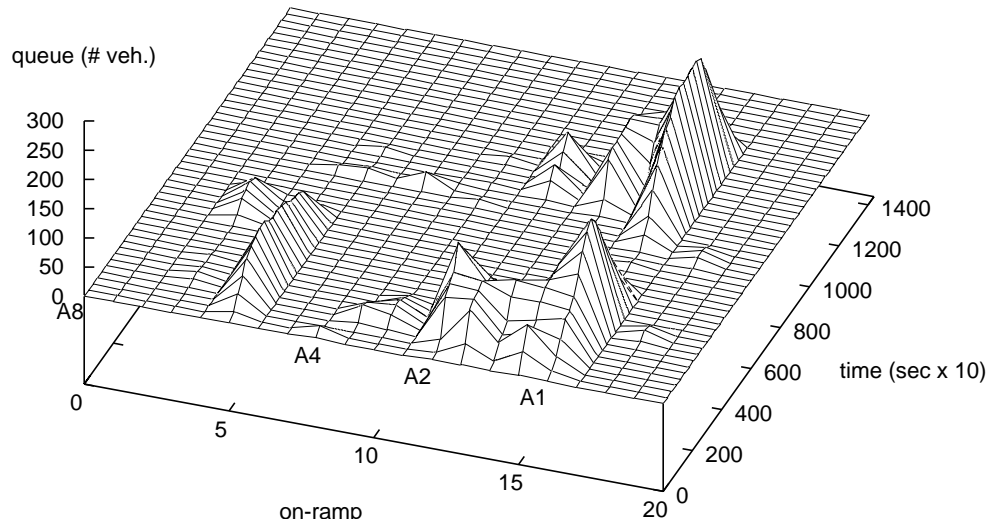
Σαν συμπέρασμα αυτής της ανάλυσης, μπορούμε να πούμε ότι η επιλογή των  $H_P$  και  $H_A$  πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να παρέχεται η αναγκαία πληροφορία σχετικά με τη δημιουργία και τη χωρική και χρονική επέκταση των φαινομένων συμφόρησης. Ο



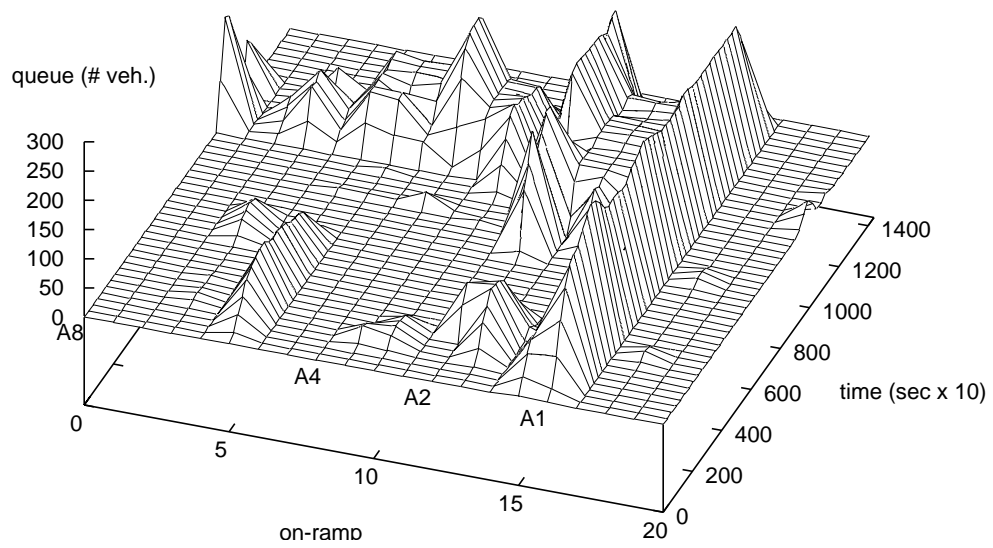
Σχήμα 5.12: Ταχύτητα κατάντη της εισόδου του Α4 στον Α10, χωρίς εφαρμογή ελέγχου.



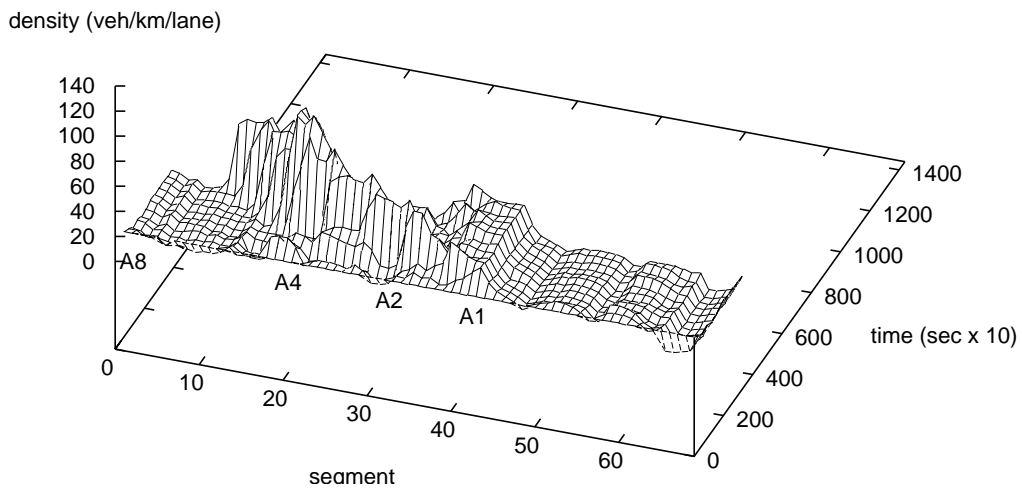
Σχήμα 5.13: Ταχύτητα στον δυτικό Α10 όπου τελειώνει η πρώτη συμφόρηση, χωρίς εφαρμογή ελέγχου.



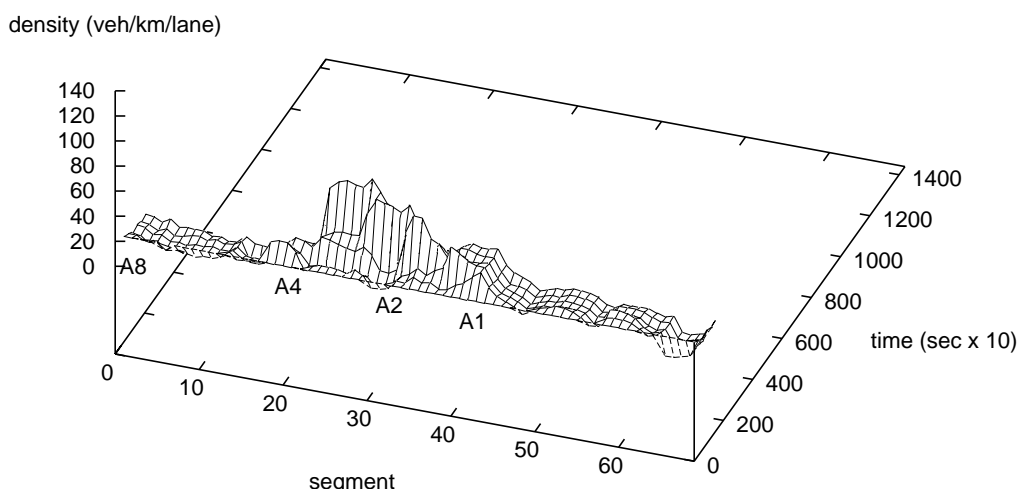
Σχήμα 5.14: Ουρές ραμπών εισόδου με  $(H_P, H_A) = (60, 30)$ .



Σχήμα 5.15: Ουρές ραμπών εισόδου με  $(H_P, H_A) = (30, 30)$ .



Σχήμα 5.16: Πρόβλεψη του AMOC της πυκνότητας χωρίς εφαρμογή ελέγχου όταν  $(H_P, H_A) = (60, 30)$ .



Σχήμα 5.17: Πρόβλεψη του AMOC της πυκνότητας χωρίς εφαρμογή ελέγχου όταν  $(H_P, H_A) = (30, 30)$ .

Πίνακας 5.2: ΣΧ για τα σενάρια 1 και 2 (επίδραση σφαλμάτων ποσοστών στροφής).

Σενάριο	AMOC + ALINEA	AMOC
#	(οχ.* ώρες)	(οχ.* ώρες)
1	7421,52	7005,14
2	7971,67	8244,27

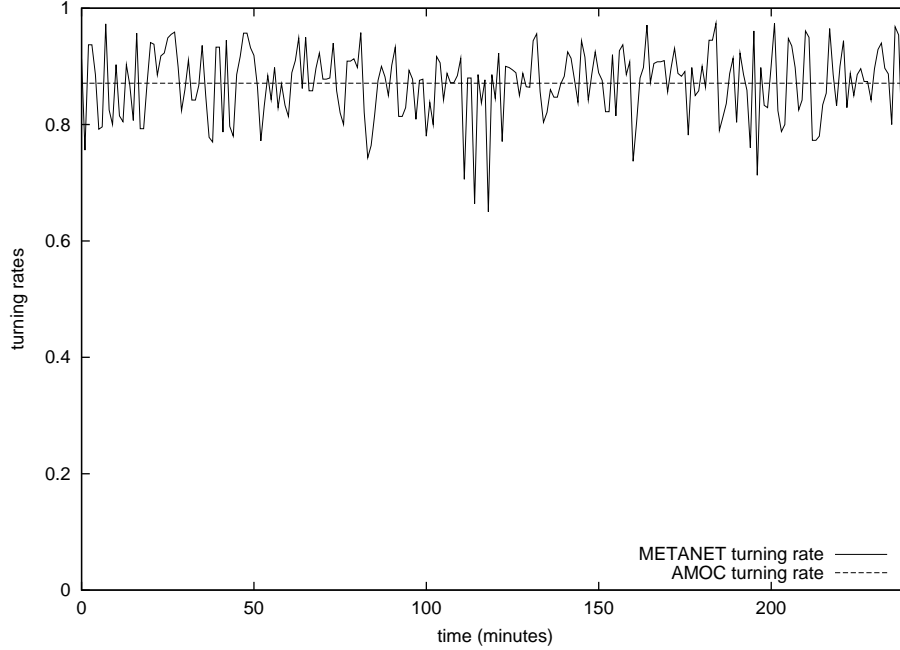
$H_P$  θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε να περιλαμβάνει την κατά το δυνατόν πλήρη εξέλιξη των κυμάτων συμφόρησης.

### 5.5 Επίδραση των Σφαλμάτων της Πρόβλεψης των Ποσοστών Στροφής

Σ' αυτήν την ενότητα θα ασχοληθούμε με την επίδραση των σφαλμάτων των προβλέψεων των ποσοστών στροφής στην αποτελεσματικότητα της στρατηγικής. Διακρίνουμε δύο σενάρια για τα οποία έχουμε ότι  $(H_P, H_A) = (60, 10)$  και οι μέγιστες ουρές για τις αστικές ράμπες και τις ράμπες αυτοκινητοδρόμων είναι 100 και 200 οχήματα αντίστοιχα. Στο πρώτο θεωρούμε ότι σε κάθε επανάληψη του κυλιόμενου ορίζοντα έχουμε πλήρη γνώση των διαταραχών, δηλαδή ποσοστά στροφής και ζητήσεις στις ράμπες εισόδου, ενώ στο δεύτερο θεωρούμε ότι έχουμε πλήρη γνώση μόνο των ζητήσεων, ενώ για τα ποσοστά στροφής έχουμε μόνο εκτιμήσεις των αντίστοιχων μέσων όρων τους. Στο σχήμα 5.18 φαίνεται ένα παράδειγμα των τροχιών ποσοστών στροφής στην έξοδο D1 που χρησιμοποιούνται το AMOC και το METANET.

Στον πίνακα 5.2 φαίνεται η τιμή του ΣΧ για τα δύο σενάρια υλοποίησης του επιπέδου Αποκεντρωμένου Ελέγχου. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του σεναρίου 1, όπου οι διαταραχές είναι γνωστές, όταν χρησιμοποιούνται οι βέλτιστες λύσεις χωρίς να παρεμβάλεται η ALINEA τα αποτελέσματα είναι καλύτερα, 7005,14 οχ.\*ώρες αντί 7421,52 οχ.\*ώρες. Αυτή η διαφορά οφείλεται ακριβώς στο γεγονός της πλήρους γνώσεως των διαταραχών. Οι βέλτιστες ροές που προσδιορίζει το AMOC ανταποκρίνονται πλήρως στις διαμορφούμενες κυκλοφοριακές συνθήκες. Όταν όμως τα ποσοστά στροφής δεν είναι γνωστά επακριβώς, κάτι που είναι και το αναμενόμενο, αλλά είναι γνωστοί μόνο οι μέσοι όροι τους για τη διάρκεια της προσομοίωσης (μία παραδοχή που χρησιμοποιήσαμε και στο Κεφάλαιο 2), τότε η παραμεμβολή της ALINEA σαφώς βελτιώνει τα αποτελέσματα. Τα σταθερά ποσοστά στροφής μειώνουν την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής, αλλά η χρήση της ALINEA επενεργεί ευεργετικά και διατηρεί τον ΣΧ σε χαμηλά επίπεδα αφού έχουμε μείωση του κατά 43,73% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν ασκείται κανένας έλεγχος.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που εφαρμόζονται απευθείας οι βέλτιστες ροές που προσδιορίζει το AMOC, υπάρχει μία χειρότερηση του ΣΧ κατά 17% όταν χρησιμοποιούνται σταθερά ποσοστά ροής σε σχέση με την απόδοση της στρατηγικής όταν χρησιμοποιούνται τα πραγματικά ποσοστά στροφής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο σενάριο 1 εφαρμόζεται ανάδραση μόνο κάθε φορά που υπάρχει ανανέωση της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος και των προβλέψεων των διαταραχών κάθε  $H_A$  βήματα. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιείται η ALINEA, υπάρχει ανάδραση σε μεγαλύτερη συχνότητα, κάθε  $z_a = 3$  βήματα, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα η συνολική στρατηγική να αντιδρά καλύτερα στα σφάλματα των ποσοστών στροφής, αφού η ALIN-



Σχήμα 5.18: Ποσοστά στροφής στην έξοδο D1 για το AMOC και το METANET.

ΕΑ επιχειρεί να υλοποιήσει στην πραγματικότητα τις βέλτιστες συνθήκες που παρέλαβε από το AMOC κι έτσι επικαλύπτει μερικώς τις συνέπειες του σφάλματος πρόβλεψης των ποσοστών στροφής.

Ένας άλλος λόγος για την αρνητική επίδραση αυτών των σφαλμάτων όταν χρησιμοποιούνται μόνο οι βέλτιστες ροές εισόδου του AMOC, είναι και το γεγονός ότι αυτά τα σφάλματα έχουν σαν άμεση συνέπεια σφάλματα στις ροές εξόδου από το σύστημα, με άλλα λόγια σφάλματα στις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.

Ας θεωρήσουμε γενικά ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμων για έναν χρονικό ορίζοντα  $K$  με  $N$  εισόδους, με ζήτηση  $d_i(k)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , η καθεμιά τη χρονική στιγμή  $t = kT$ , και  $M$  εξόδους με εκροές  $s_\ell(k)$ ,  $\ell = 1, \dots, M$ , σχήμα 5.19. Ας υποθέσουμε ότι τη χρονική στιγμή  $t = 0$  υπάρχουν  $A(0)$  οχήματα μέσα στο σύστημα. Τότε τη χρονική στιγμή  $t = kT$  θα υπάρχουν  $A(k)$  οχήματα με

$$A(k) = \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \Lambda_m + \sum_o w_o(k). \quad (5.1)$$

Από την αρχή διατήρησης των οχημάτων έχουμε ότι

$$A(k+1) = A(k) + T \left[ \sum_{j=1}^N d_j(k) - \sum_{\ell=1}^M s_\ell(k) \right] \quad (5.2)$$

που σημαίνει ότι

$$A(k) = A(0) + T \sum_{\kappa=0}^{k-1} \left[ \sum_{j=1}^N d_j(\kappa) - \sum_{\ell=1}^M s_\ell(\kappa) \right]. \quad (5.3)$$

Γνωρίζουμε ήδη ότι ο ΣΧ δίνεται από τη σχέση

$$\tau_{\Sigma X} = T \sum_{k=0}^K \left[ \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \Lambda_m + \sum_o w_o(k) \right] \quad (5.4)$$

και άρα με βάση τις (5.1) και (5.3) θα έχουμε

$$\tau_{\Sigma X} = T \sum_{k=1}^K \left[ A(0) + T \sum_{\kappa=0}^{k-1} \left[ \sum_{j=1}^N d_j(\kappa) - \sum_{\ell=1}^M s_{\ell}(\kappa) \right] \right]. \quad (5.5)$$

Επειδή ο έλεγχος στο κυκλοφοριακό σύστημα, δεν επηρεάζει τη ζήτηση  $d_j$ ,  $j = 1, \dots, N$ , της εισόδου  $j$ , ο βέλτιστος έλεγχος που ελαχιστοποιεί τον  $\Sigma X$  επηρεάζει μόνο τις εκροές  $s_{\ell}$ ,  $\ell = 1, \dots, M$  του συστήματος. Έτσι, έχουμε από την (5.5)

$$\min_{\mathbf{u}} \tau_{\Sigma X} \Leftrightarrow \max_{\mathbf{u}} S = \max_{\mathbf{u}} \sum_{k=1}^K \sum_{\kappa=0}^{k-1} \sum_{\ell=1}^M s_{\ell}(\kappa). \quad (5.6)$$

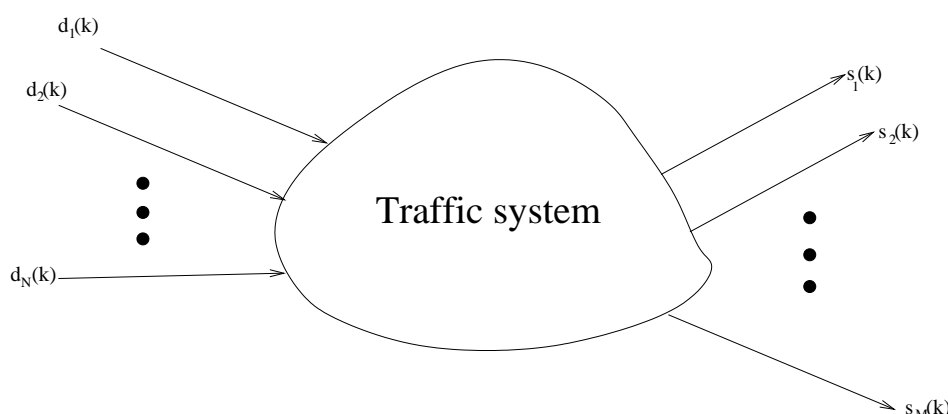
Αναλύοντας τα αθροίσματα παίρνουμε

$$S = \sum_{k=0}^K (K - k) \sum_{\ell=1}^M s_{\ell}(k) \quad (5.7)$$

που είναι το χρονικά σταθμισμένο άθροισμα των εκροών του συστήματος.

Κατά συνέπεια η ελαχιστοποίηση του  $\Sigma X$ , που είναι ο αντικειμενικός σκοπός του προβλήματος βελτιστοποίησης που επιλύει το AMOC, ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση του χρονικά σταθμισμένου αθροίσματος των εκροών. Οι εκροές του δικτύου επηρεάζονται από τα ποσοστά στροφής στις ράμπες εξόδου. Έτσι, ενώ το AMOC προβλέπει μία ροή εξόδου  $s_{\ell}^*$  για τη ράμπα εξόδου  $\ell$ , η πραγματική ροή εξόδου  $s_{\ell}$  θα είναι διαφορετική, ακόμη και στην περίπτωση που ανάντη της ράμπας εξόδου υπάρχει πλήρης συμφωνία ανάμεσα στο AMOC και στο METANET (πραγματικότητα), λόγω της διαφοράς ανάμεσα στα ποσοστά στροφής, σταθερά στο AMOC – μεταβαλλόμενα στο METANET. Αυτό έχει σαν βραχυπρόθεσμο αποτέλεσμα να αλλάζει το μέγεθος της ροής κατάντη της ράμπας εξόδου και κατ' αυτόν τον τρόπο να διαφοροποιούνται επιπλέον οι εκροές των κατάντη ραμπών εξόδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αθροιστική μετάδοση της διαφοράς ανάμεσα στη ροή που είχε προβλέψει το AMOC και στην πραγματική ροή του METANET. Έτσι, αν υποθέσουμε ότι σε μία από τις αρχικές ράμπες εξόδου, π.χ. στην D1 ή στην D2, έχουμε μία μεγάλη διαφορά ανάμεσα στην εκροή  $s_{\ell}^*$  και στην πραγματική εκροή  $s_{\ell}$  με  $s_{\ell} > s_{\ell}^*$ , τότε η διαφορά  $s_{\ell} - s_{\ell}^*$  συνεχίζει να κινείται μέσα στον αυτοκινητόδρομο προκαλώντας σταδιακά αντίστοιχες αυξήσεις της ροής στα κατάντη τμήματα. Βέβαια, επειδή τα ποσοστά στροφής του AMOC είναι και μεγαλύτερα και μικρότερα των αντίστοιχων πραγματικών, υπάρχει η πιθανότητα να αλληλοακυρωθούν μακροπρόθεσμα οι διαφορές στις εκροές, η βραχυπρόθεσμη όμως αλλαγή των εκροών επιδρά στον υπολογισμό του  $\Sigma X$ .

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται η ALINEA στο επίπεδο Αποκεντρωμένου Ελέγχου, τα σημεία ρύθμισης των τοπικών ελεγκτών δίνονται από το διάνυσμα της βέλτιστης κατάστασης  $\mathbf{x}^*$  όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Αυτό σημαίνει ότι κατάντη της ράμπας εισόδου θα υπάρχουν κυκλοφοριακές συνθήκες όμοιες, σε μεγάλο βαθμό, μ' αυτές που προβλέπει το AMOC. Άρα στο τμήμα κατάντη της ράμπας εισόδου μέχρι την επόμενη ράμπα εξόδου, θα υπάρχουν κυκλοφοριακές συνθήκες παρόμοιες με τις βέλτιστες. Άρα σ' αυτό το τμήμα η κυκλοφοριακή ροή θα είναι σχεδόν βέλτιστη ανεξάρτητα από τα σφάλματα των εκροών στις ανάντη ράμπες εισόδου. Κατά συνέπεια, η τοπική διαφορά ανάμεσα στη βέλτιστη εκροή και στην πραγματική θα οφείλεται μόνο στο σφάλμα του ποσοστού στροφής της αντίστοιχης ράμπας εξόδου και όχι και στα



Σχήμα 5.19: Γενικό κυκλοφοριακό σύστημα.

σφάλματα των ποσοστών στροφής των ανάντη ραμπών εξόδου. Με άλλα λόγια, οι τοπικοί ελεγκτές της ιεραρχικής δομής ελέγχου δεν επιτρέπουν την αθροιστική μετάδοση των σφαλμάτων των εκροών των ραμπών εξόδου κατά μήκος του δικτύου. Δεν μπορούν όμως να απαλείψουν τη διαφορά ανάμεσα στην βέλτιστη και στην πραγματική εκροή σε τοπικό επίπεδο λόγω των βραχυπρόθεσμα λανθασμένων ποσοστών στροφής.

Έτσι, στο σενάριο 2 ο ΣΧ είναι μεγαλύτερος όταν εφαρμόζεται τοπικός έλεγχος βασισμένος μόνο στις ροές του AMOC γιατί επιδρούν δύο επιβαρυντικοί παράγοντες. Όταν όμως εφαρμόζονται τοπικές στρατηγικές τύπου ALINEA τότε επιδρά μόνο ένας, γιατί και η καλύτερη απόδοση.

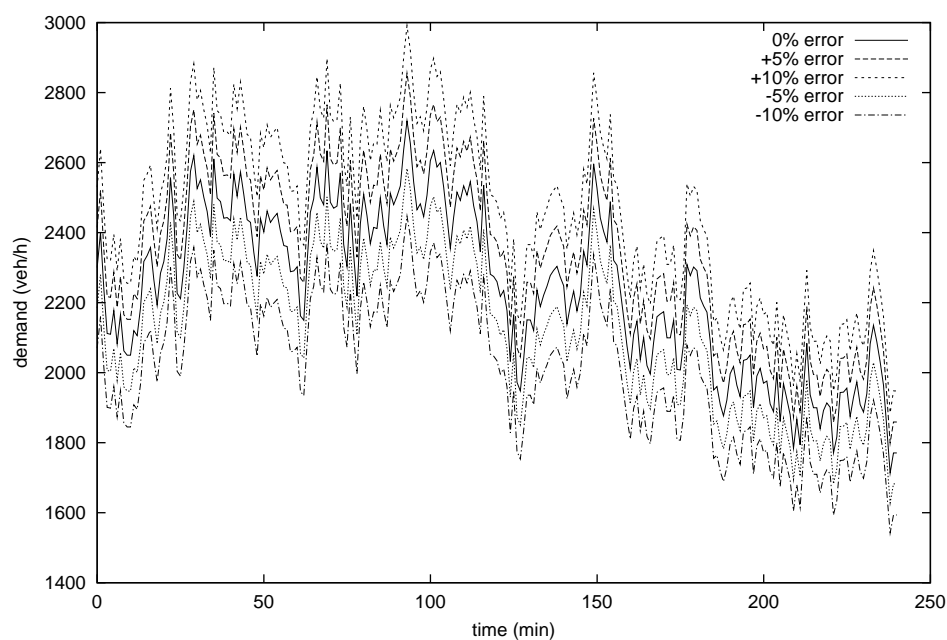
## 5.6 Επίδραση των Σφαλμάτων της Πρόβλεψης της Ζήτησης

Σ' αυτήν την ενότητα ενδιαφερόμαστε να προσδιορίσουμε την επίδραση που έχουν στον ελεγκτή, σφάλματα στις προβλέψεις της ζήτησης που χρησιμοποιεί το AMOC και με βάση τις οποίες προσδιορίζει τις βέλτιστες τροχιές ελέγχου. Στα σενάρια που θα εξετάσουμε, τα ποσοστά στροφής για το AMOC είναι ο μέσος όρος των ποσοστών ροής του METANET, και επίσης  $(H_P, H_A) = (60, 10)$ .

Θα εξετάσουμε πέντε σενάρια που διαφοροποιούνται ως προς το ποσοστό του λάθους που υπάρχει στις προβλέψεις των ζητήσεων. Στο σενάριο 1 θα θεωρήσουμε ότι η ζήτηση, για κάθε ράμπα εισόδου, στο AMOC είναι 5% επιπλέον της ζήτησης του METANET. Στο σενάριο 2 είναι 10%, ενώ στα σενάρια 3 και 4 είναι -5% και -10%, αντίστοιχα, δηλαδή μικρότερη. Στο σενάριο 5, θεωρούμε ότι το σφάλμα είναι 0%, δηλαδή έχουμε το σενάριο 2 της προηγούμενης ενότητας. Στο σχήμα 5.20 φαίνεται ένα παράδειγμα για τη ζήτηση στον A8 για κάθε σενάριο. Στον πίνακα 5.3 αναγράφεται ο ΣΧ για κάθε σενάριο για τις δύο δυνατότητες υλοποίησης του επιπέδου Αποκεντρωμένου Ελέγχου.

Στο σχήμα 5.21 φαίνεται η γραφική παράσταση του ΣΧ σε σχέση με το σφάλμα στην πρόβλεψη των ζητήσεων. Παρατηρούμε ότι η αποτελεσματικότητα της απλής ALINEA δεν εξαρτάται από το σφάλμα στη πρόβλεψη της ζήτησης, γιατί η ALINEA δεν κάνει χρήση αυτής της πρόβλεψης, αλλά μόνο των πραγματικών μετρήσεων.





Σχήμα 5.20: Ζήτηση στον Α8 για τις διάφορες τιμές σφάλματος.

Πίνακας 5.3: ΣΧ για τα σενάρια 1-5 (επίδραση σφαλμάτων ζήτησης).

Σενάριο	Σφάλμα	AMOC + ALINEA	AMOC
#	(%)	(οχ.* ώρες)	(οχ.* ώρες)
1	+5%	7841,88	8834,42
2	+10%	8486,30	8903,91
3	-5%	8443,75	10956,35
4	-10%	8722,20	11098,68
5	0%	7971,67	8244,27

Στην περίπτωση που η υλοποίηση του επιπέδου Αποκεντρωμένου Ελέγχου βασίζεται μόνο στις βέλτιστες ροές, η υποτίμηση της πραγματικής ροής έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη μείωση της αποτελεσματικότητας της στρατηγικής σε σχέση με την αντίστοιχη μείωση λόγω υπερτίμησης της ζήτησης. Επίσης, ο ρυθμός μεταβολής της αύξησης του ΣΧ είναι μεγαλύτερος όταν υποτιμάται η ζήτηση απ' ό,τι όταν υπερτιμάται.

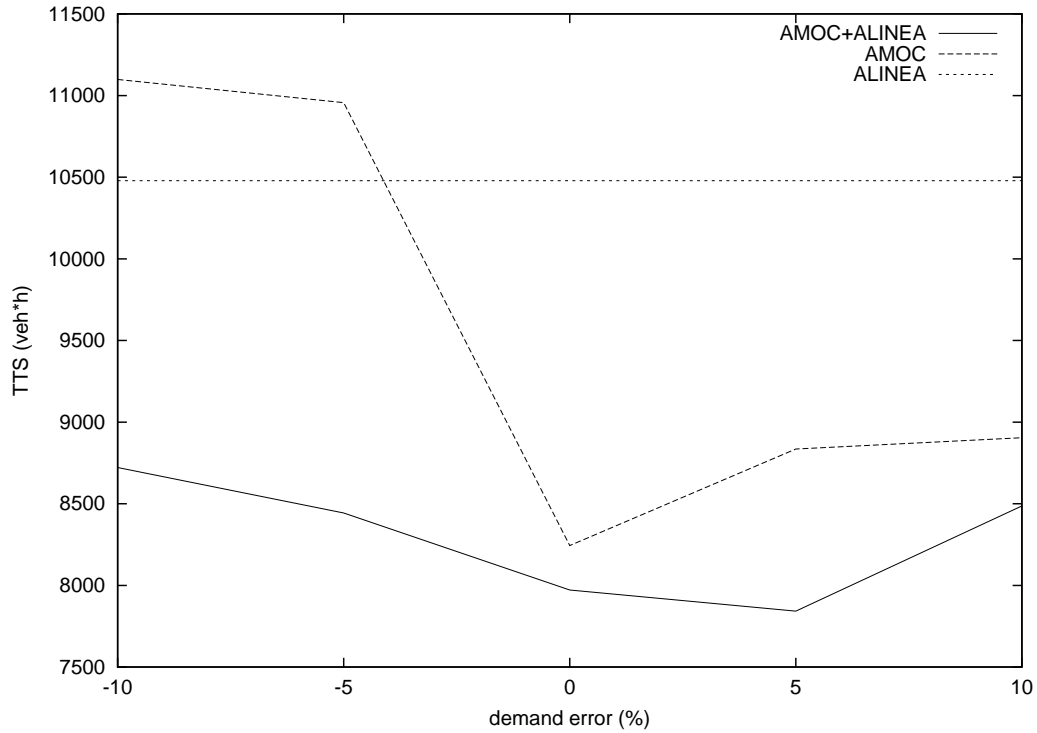
Όταν το επίπεδο Αποκεντρωμένου Ελέγχου υλοποιείται βάση των τοπικών στρατηγικών τύπου *ALINEA*, τότε παρατηρούμε ότι η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής αυξάνει και στις δύο περιπτώσεις όπου υπάρχει υποτίμηση ή υπερτίμηση της ζήτησης. Και σ' αυτήν την περίπτωση ο ρυθμός μεταβολής της αύξησης του ΣΧ είναι μεγαλύτερος όταν υποτιμάται η ζήτηση απ' ό,τι όταν υπερτιμάται.

Όταν υπάρχει ομοιότροπη *υπερεκτίμηση* της ζήτησης σε κάθε ράμπα εισόδου, τότε η βέλτιστη λύση που προσδιορίζει το *AMOC* ανταποκρίνεται σε μία μελλοντική κατάσταση πιο επιβαρυνμένη σε σχέση με την πραγματικότητα. Άρα οι βέλτιστες ροές εισόδου θα είναι πιο περιορισμένες σε σχέση μ' αυτές που θα έπρεπε και επίσης είναι πιθανό να θεωρείται βέλτιστο να σχηματιστούν κάποιες χωρικά και χρονικά προσδιορισμένες συμφόρησεις μέσα στον αυτοκινητόδρομο. Αυτό σημαίνει ότι το *AMOC* θα επιδιώξει να σχηματιστούν μεγαλύτερες ουρές και χειρότερες κυκλοφοριακές συνθήκες απ' ό,τι είναι πραγματικά αναγκαίο. Βέβαια, εφόσον όμως η πραγματική ζήτηση είναι μικρότερη της αναμενόμενης οι πραγματικές ουρές θα είναι μικρότερες από τις προβλεπόμενες για ροές εισόδου των ραμπών ίσες με τις βέλτιστες. Επιπλέον, στην περίπτωση που το *AMOC* κρίνει ότι είναι βέλτιστο να σχηματισθεί συμφόρηση σε κάποια περιοχή για κάποιο χρονικό διάστημα, θα πρέπει να υπάρχει κι ένα ικανό επίπεδο ροής στις γειτονικές ράμπες για να δημιουργηθεί εσκευμένα η συμφόρηση. Επειδή όμως το επίπεδο των ροών είναι υπερτιμημένο, είναι δυνατό να μην υπάρχει ικανή ζήτηση να δημιουργήσει την «βέλτιστη» συμφόρηση. Αυτό όμως εν τέλει είναι θετικό γιατί περισσότερα οχήματα εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο και ταξιδεύουν χωρίς συμφόρηση.

Όταν υπάρχει ομοιότροπη *υποεκτίμηση* της ζήτησης κάθε ράμπας εισόδου, τότε οι βέλτιστες ροές εισόδου θα είναι αντίστοιχα υποεκτιμημένες. Μικρότερη ζήτηση σημαίνει ότι απαιτούνται λιγότερο περιοριστικά μέτρα ελέγχου. Κατά συνέπεια ένας μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων επιτρέπεται να εισέλθει στον αυτοκινητόδρομο ακριβώς τη στιγμή που η πραγματική ζήτηση είναι μεγάλη και άρα περιοριστικά μέτρα ελέγχου θα έπρεπε να ληφθούν. Με άλλα λόγια, δεν ασκείται έλεγχος τη στιγμή που είναι αναγκαίος. Επί πλέον οι βέλτιστες εισροές του *AMOC* σε μη κρίσιμα σημεία του δικτύου εξυπηρετούν την υποεκτιμημένη ζήτησης και άρα κρατούν στις ράμπες εισόδου (χωρίς λόγο) την πραγματική (υψηλότερη) ζήτηση, αυξάνοντας αναίτια τις καθυστερήσεις. Γιαυτό παρατηρείται η ασυμμετρία του ΣΧ ως προς το σφάλμα στις προβλέψεις των ζητήσεων (σχήμα 5.21).

Έτσι, ο πίνακας 5.3 και το σχήμα 5.21 μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι ασφελέστερο να χρησιμοποιούνται προβλέψεις της ζήτησης που είναι σχετικά υπερτιμημένες ως προς τις πραγματικές ζητήσεις.

Ένα άλλο στοιχείο που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.21 είναι και η βελτίωση που επιφέρει η χρήση των τοπικών στρατηγικών τύπου *ALINEA* στο επίπεδο Αποκεντρωμένου Ελέγχου, είτε υπάρχει υπερεκτίμηση είτε υποεκτίμηση της ζήτησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τοπικές στρατηγικές τύπου *ALINEA* έχουν μεγαλύτερη συχνότητα στην ανάδρασή τους. Επί πλέον όταν οι εισροές ρυθμίζονται έτσι ώστε να δημιουργούνται οι βέλτιστες συνθήκες, τότε επιτυγχάνονται εν μέρει τα θετικά αποτελέσματα που προβλέπει το *AMOC*, καταλήγοντας έτσι σε καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.21: ΣΧ ως προς τα ποσοστά λάθους στις προβλέψεις των ζητήσεων.

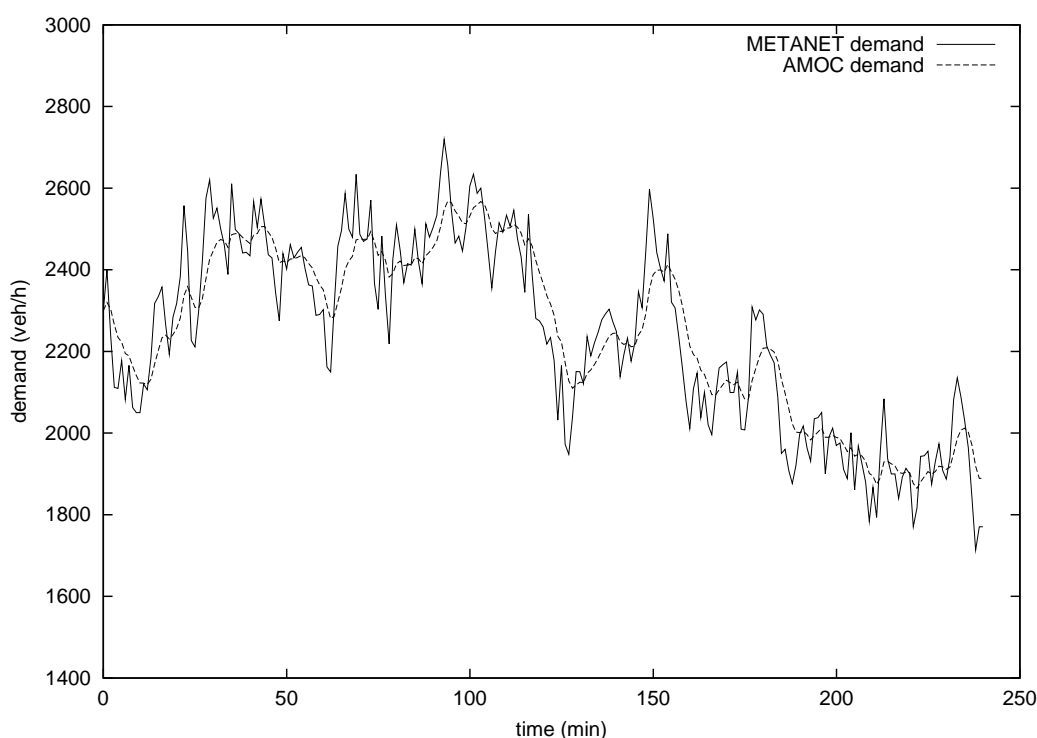
Άρα η χρήση των τοπικών ελεγκτών θα οδηγήσει το κυκλοφοριακό σύστημα σε μία υποβέλτιστη κατάσταση, αλλά αυτό είναι ότι καλύτερο μπορεί να γίνει εφόσον οι διαταραχές δεν είναι ακριβώς γνωστές εκ των προτέρων.

Στα προηγούμενα σενάρια θεωρήσαμε ότι γνωρίζαμε την ακριβή ζήτηση για κάθε ράμπα εισόδου και ανάλογα με το σενάριο γινόταν η αντίστοιχη αύξηση ή μείωσή της. Στην πραγματικότητα δεν πρόκειται ποτέ να έχουμε ακριβή γνώση της ζήτησης, μπορούμε όμως να υποθέσουμε ότι θα έχουμε μία καλή πρόβλεψη (π.χ. από ιστορικές μετρήσεις). Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι θα έχουμε στη διάθεσή μας καμπύλες της ζήτησης παρόμοιες κατά μέσο όρο με τις καμπύλες της πραγματικής ζήτησης. Για τις δικές μας διερευνήσεις τέτοιες καμπύλες μπορούν να προκύψουν με την εξομάλυνση των τροχιών της ζήτησης. Δεδομένης της ζήτησης που χρησιμοποιεί το METANET για οποιαδήποτε ράμπα εισόδου  $d_o^{MET}(k)$ , η ζήτηση που θα χρησιμοποιηθεί από το AMOC  $d_o^{AMOC}$  δίνεται από τη σχέση

$$d_o^{AMOC}(k) = 0.2d_o^{MET}(k) + 0.8d_o^{AMOC}(k-1). \quad (5.8)$$

Μ' αυτόν τον τρόπο έχουμε στη διάθεση μας τροχιές της ζήτησης που προσεγγίζουν τις πραγματικές μέσα στα όρια ενός αναμενόμενου σφάλματος. Στο σχήμα 5.22 φαίνεται η εξομαλυσμένη ζήτηση για τον Α8 μαζί με τη ζήτηση που χρησιμοποιεί το METANET.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι εξομαλυσμένες ζητήσεις για το AMOC και

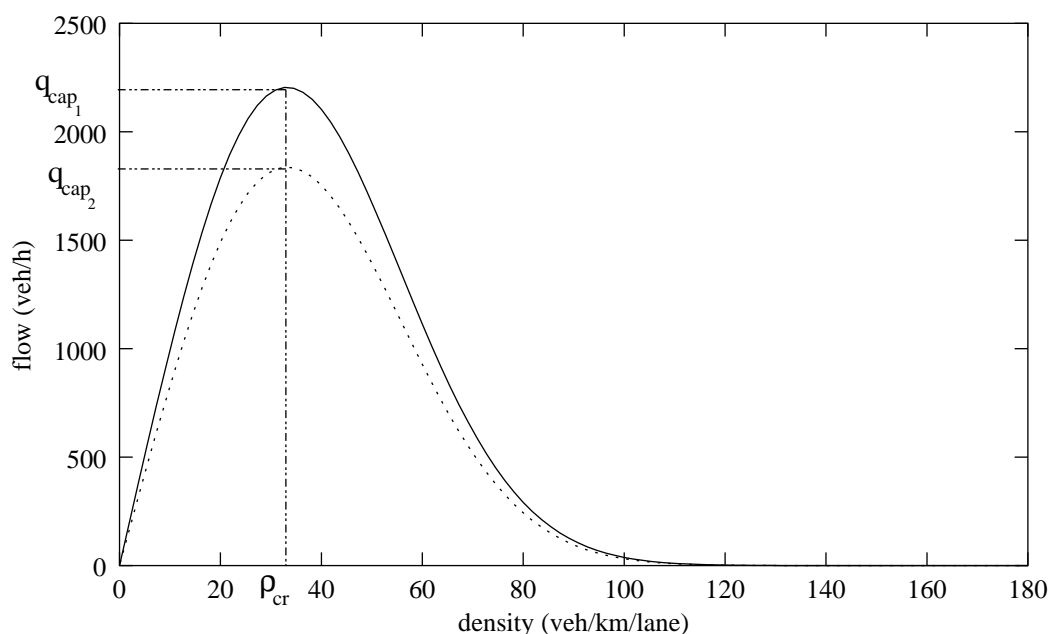


Σχήμα 5.22: Ομαλοποιημένη ζήτηση του A8.

σταθερά ποσοστά στροφής, ο ΣΧ γίνεται ίσος με 8085,78 οχ.\*ώρες που είναι μία βελτίωση κατά 43% σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν ασκείται έλεγχος. Αυτός ο ΣΧ είναι ελάχιστα χειρότερος από την αντίστοιχη περίπτωση όπου η ζήτηση είναι γνωστή επακριβώς.

## 5.7 Επίδραση Διαφορετικών Τιμών της $v_f$ στο METANET και στο AMOC

Σ' αυτήν την ενότητα θα εξετάσουμε την επίδραση που έχει στην αποτελεσματικότητα της στρατηγικής ελέγχου μία ασυμφωνία ανάμεσα στην ταχύτητα ελεύθερης ροής  $v_f$  που θεωρεί το AMOC ότι υπάρχει στο δίκτυο με αυτήν που πραγματικά είναι. Με άλλα λόγια, θέλουμε να δούμε ποιο είναι το αποτέλεσμα όταν η ταχύτητα ελεύθερης ροής του AMOC είναι διαφορετική από την ταχύτητα ελεύθερης ροής του METANET. Μία τέτοια διαφοροποίηση μπορεί να προκύψει αν υπάρχει βροχερός καιρός στον αυτοκινητόδρομο για τον οποίο δεν έχει πληροφορία το AMOC. Είναι γνωστό ότι η οδηγική συμπεριφορά μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και όταν βρέχει αναπτύσσονται μικρότερες ταχύτητες. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα ελεύθερης ροής μειώνεται κατά ένα ποσοστό. Η μείωση της  $v_f$  σημαίνει μία αντίστοιχη μείωση της ικανότητας των αυτοκινητοδρόμων. Στο σχήμα 5.23 φαίνεται η μείωση της ικανότητας όταν μειώνεται η ταχύτητα ελεύθερης ροής.



Σχήμα 5.23: Θεμελιώδες διάγραμμα για διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής.

Σε σχέση προς το σχήμα 5.23 ας θεωρήσουμε ότι κάτω από κανονικές συνθήκες η ταχύτητα ελεύθερης ροής είναι  $v_{f1}$ . Τότε με δεδομένη την κρίσιμη πυκνότητα  $\rho_{cr}$  ο αυτοκινητόδρομος έχει ταχύτητα ελεύθερης ροής ίση με  $v_{f1}$  η οποία είναι ίση με την εφαιπόμενη της κλίσης της ευθείας που εφάπτεται στο σημείο  $\rho_{m,i}$  τη αρχή των αξόνων με το σημείο της μέγιστης ροής  $(\rho_{cr}, q_{cap1})$ . Όταν μειωθεί η ταχύτητα ελεύθερης ροής και γίνει από  $v_{f1}$   $v_{f2}$  τότε αλλάζει και το θεμελιώδες διάγραμμα που χαρακτηρίζει τον αυτοκινητόδρομο και παρατηρείται και η αντίστοιχη μείωση της χωρητικότητας από  $q_{cap1}$  σε  $q_{cap2}$ .

Ας υποθέσουμε ότι κάτω από κανονικές συνθήκες η ταχύτητα ελεύθερης ροής είναι ίση με  $v_{f1}$  και αυτήν την τιμή χρησιμοποιεί και το AMOC. Λόγω κάποιου γεγονότος, ας υποθέσουμε ότι η ταχύτητα ελεύθερης ροής του δικτύου του Άμστερνταμ πέφτει για όλο το χρονικό ορίζοντα από 102 χιλ./ώρα στα 85 χιλ./ώρα στην περιοχή του δυτικού A10 από την περιοχή ανάντη της σύραγγας Κοέν μέχρι τη διασταύρωση του A10 με τον A4, που είναι μία απόσταση περίπου ίση με 9,5 χιλιόμετρα. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι η  $v_f$  ανεβαίνει στα 90 χλμ./ώρα για μία απόσταση 1,2 χιλιομέτρων, μετά γίνεται 95 χλμ./ώρα για μία απόσταση 1,1 χιλιομέτρων και τέλος παίρνει την κανονική της τιμή των 102 χλμ./ώρα για όλο το υπόλοιπο δίκτυο.

Πάνω σ' αυτό το βασικό σενάριο για τη διαφοροποίηση της  $v_f$  θα εξετάσουμε την απόδοση της ιεραρχικής δομής ελέγχου όταν τα ποσοστά στροφής είναι σταθερά, τα σφάλματα στις προβλέψεις των ζητήσεων είναι -5%, 0% και +5%, και  $(H_P, H_A) = (60, 10)$ . Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 5.4.

Στον πίνακα 5.4 παρατηρούμε ότι γενικά μειώνεται η αποδοτικότητα της στρατηγικής ελέγχου λόγω της λανθασμένης τιμής της ταχύτητας ελεύθερης ροής που χρησιμοποιεί το AMOC. Όπως είναι αναμενόμενο η χρήση των τοπικών αναδραστικών στρατηγικών βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της συνολικής στρατηγικής. Αυτό γίνεται γιατί η ALINEA χρησιμοποιεί μετρήσεις πυκνότητας και άρα αντιδρά καλύτερα

Πίνακας 5.4: ΣΧ για τα σενάρια 1-3 (επίδραση της διαφοράς των  $v_f$  και των σφαλμάτων ζήτησης).

Σενάριο	Σφάλμα	AMOC + ALINEA	AMOC
#	(%)	(οχ.* ώρες)	(οχ.* ώρες)
1	0%	8176,10	8648,77
2	+5%	8295,21	8740,49
3	-5%	8685,19	10860,51

όταν η κατάντη πυκνότητα μετράται σε επίπεδο διαφορετικό από το βέλτιστο. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιούνται μόνο οι βέλτιστες ροές τότε ένας επιπλέον παράγοντας που επιβαρύνει την απόδοση της στρατηγικής είναι το γεγονός ότι οι βέλτιστες ροές αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη ικανότητα του δικτύου και άρα το αποτέλεσμά τους δεν θα είναι το αναμενόμενο.

## 5.8 Επίδραση των Μέγιστων Ουρών

Σκοπός μας σ' αυτήν την ενότητα είναι να εξετάσουμε την επίδραση των περιορισμών μέγιστης ουράς. Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 4, αυτοί οι περιορισμοί οδηγούν στην έμμεση αντιμετώπιση του προβλήματος της ισότιμης συμπεριφοράς της στρατηγικής προς όλους τους οδηγούς που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο. Στο Κεφάλαιο 4 εξηγήσαμε ήδη τον τρόπο που επιδρούν οι περιορισμοί μέγιστης ουράς στην αποτελεσματικότητα και την ισοτιμία της στρατηγικής ανοικτού βρόχου. Εδώ θα εξετάσουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη στρατηγική κλειστού βρόχου.

Θα εξετάσουμε πέντε σενάρια ανάλογα με το μέγεθος της μέγιστης επιθυμητής ουράς σε κάθε ράμπα εισόδου. Στον πίνακα 5.5 φαίνεται για κάθε σενάριο η μέγιστη ουρά για κάθε αστική ράμπα εισόδου, η μέγιστη ουρά για κάθε ράμπα αυτοκινητοδρόμου, ενώ στον πίνακα 5.6 φαίνεται για κάθε σενάριο ο ΣΧ του βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου με πλήρη γνώση των διαταραχών, ο ΣΧ όταν εφαρμόζεται ιεραρχικός έλεγχος με χρήση τοπικών στρατηγικών τύπου ALINEA με  $(H_P, H_A) = (60, 10)$ , σταθερά ποσοστά στροφής και ομαλοποιημένες ζητήσεις για το AMOC, τα αντίστοιχα ποσοστά βελτίωσης σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται έλεγχος και τα ποσοστά χειροτέρευσης σε σχέση με τον έλεγχο ανοικτού βρόχου.

Από τον πίνακα 5.6 είναι φανερό ότι καθώς μειώνεται η χωρητικότητα αποθήκευσης των αστικών ραμπών εισόδου, μειώνεται κατά πολύ η αποτελεσματικότητα της ιεραρχικής στρατηγικής κλειστού βρόχου, παρόλο που η βέλτιστη στρατηγική ανοικτού βρόχου δεν επηρεάζεται στο ίδιο ποσοστό. Έτσι στο σενάριο 4 όπου η μέγιστη ουρά για τις αστικές ράμπες είναι 40 οχήματα και για τις ράμπες αυτοκινητοδρόμων είναι 80 οχήματα, ενώ ο βέλτιστος κανόνας ανοικτού βρόχου επιτυγχάνει ΣΧ ίσο με 7.692,57 οχ.\*ώρες, ο ιεραρχικός έλεγχος οδηγεί σε ΣΧ ίσο με 13.443,32 οχ.\*ώρες που αποτελεί μία πολύ μικρή βελτίωση ίση με 5,1%. Δηλαδή έχει πτώση της απόδοσης κατά 74,8% σε σχέση με το βέλτιστο έλεγχο ανοικτού βρόχου. Από το σενάριο 6, όμως, φαίνεται ότι όταν οι μέγιστες ουρές των αστικών ραμπών εισόδου είναι 25 οχήματα, δηλαδή πολύ μικρές, ενώ οι μέγιστες ουρές για τους αυτοκινητοδρόμους είναι 400 οχήματα, τότε η χωρητικότητα που προσφέρουν οι τέσσερις αυτοκινητόδρομοι (A8, A4, A2 και A1) είναι ικανή να βελτιώσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες κατά 44.5 %.

Πίνακας 5.5: Μέγιστες επιθυμητές ουρές ανά σενάριο.

Σενάριο	Μέγιστη επιτρεπτή ουρά των αστικών ραμπών α/α	Μέγιστη επιτρεπτή ουρά για τις ράμπες αυτοκινητοδρόμου (#) οχημάτων
1	100	200
2	100	150
3	80	100
4	40	80
5	40	200
6	25	400

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα για κάθε σενάριο (επίδραση μεγίστων ουρών).

Σενάριο	ΣΧ βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου α/α	ΣΧ ιεραρχικού ελέγχου κλειστού βρόχου οχ.*ώρες	Εκατοστιαία βελτίωση του ιεραρχικού ελέγχου ως προς το μη-έλεγχο %	Εκατοστιαία χειροτέρευση ως προς το βέλτιστο έλεγχο ανοικτού βρόχου %
1	6.974,29	8.085,78	42,9	15,9
2	7.001,76	8.175,93	42,3	16,8
3	7.323,55	12.127,56	14,4	65,6
4	7.692,57	13.443,32	5,1	74,8
5	7.167,03	11.868,21	16,2	65,6
6	7.359,72	7.859,17	44,5	6,8

Επειδή οι μέγιστες επιθυμητές ουρές μοντελοποιούνται σαν όροι τιμωρίας στο κριτήριο κόστους του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου που επιλύει το AMOC, όταν αυτές βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τη συνολική ζήτηση που υπάρχει στο δίκτυο, τότε η βέλτιστη λύση μπορεί να δημιουργήσει και ουρές μεγαλύτερες από αυτές. Με άλλα λόγια μπορεί να είναι βέλτιστο να υπάρχουν σε ορισμένες ράμπες και για ορισμένη χρονική περίοδο, ουρές μεγαλύτερες των μεγίστων. Όταν όμως υπάρχει υπέρβαση του μεγίστου ορίου, τότε στο επίπεδο Αποκεντρωμένου Ελέγχου ακυρώνεται η ροή που καθορίζει ο τοπικός ελεγκτής και η ροή που εισέρχεται είναι τόση ώστε να επιστρέψει η ουρά στα αποδεκτά όρια. Η συχνότητα με την οποία επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία μεγαλώνει καθώς μειώνονται οι μέγιστες ουρές. Κατά συνέπεια όσο μειώνονται οι μέγιστες ουρές τόσο μεγαλώνει και η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση που προβλέπει το AMOC και στην κατάσταση που διαμορφώνεται στο METANET, πράγμα που έχει αρνητική επίπτωση στην αποτελεσματικότητα του ιεραρχικού ελέγχου.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε πλήρη γνώση των διαταραχών, τότε η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.7. Έτσι ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει την επίδοση της στρατηγικής ελέγχου είναι και τα σφάλματα που υπάρχουν στις προβλέψεις των διαταραχών. Όσο μειώνεται η χωρητικότητα αποθήκευσης των οχημάτων τόσο πιο ευαίσθητη γίνεται η στρατηγική στα σφάλματα των προβλέψεων των διαταραχών.

Επίσης, όπως έχουμε δει και στο Κεφάλαιο 4, η αποτελεσματικότητα του βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου μειώνεται με τη μείωση των μεγίστων επιθυμητών ουρών.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα για κάθε σενάριο με ακριβή πρόβλεψη των διαταραχών (επίδραση μεγίστων ουρών).

Σενάριο	ΣΧ ιεραρχικού ελέγχου κλειστού βρόχου	Ποσοστιαία βελτίωση του ιεραρχικού ελέγχου ως προς το μη-έλεγχο	Ποσοστιαία χειροτέρευση ως προς το βέλτιστο έλεγχο ανοικτού βρόχου
α/α	οχ.*ώρες	%	%
1	7.338,41	48,2	5,2
2	7.435,02	47,5	6,2
3	7.709,78	45,6	5,3
4	8.695,67	38,6	13,1
5	7.368,23	48,0	2,8
6	7.669,19	45,7	4,2

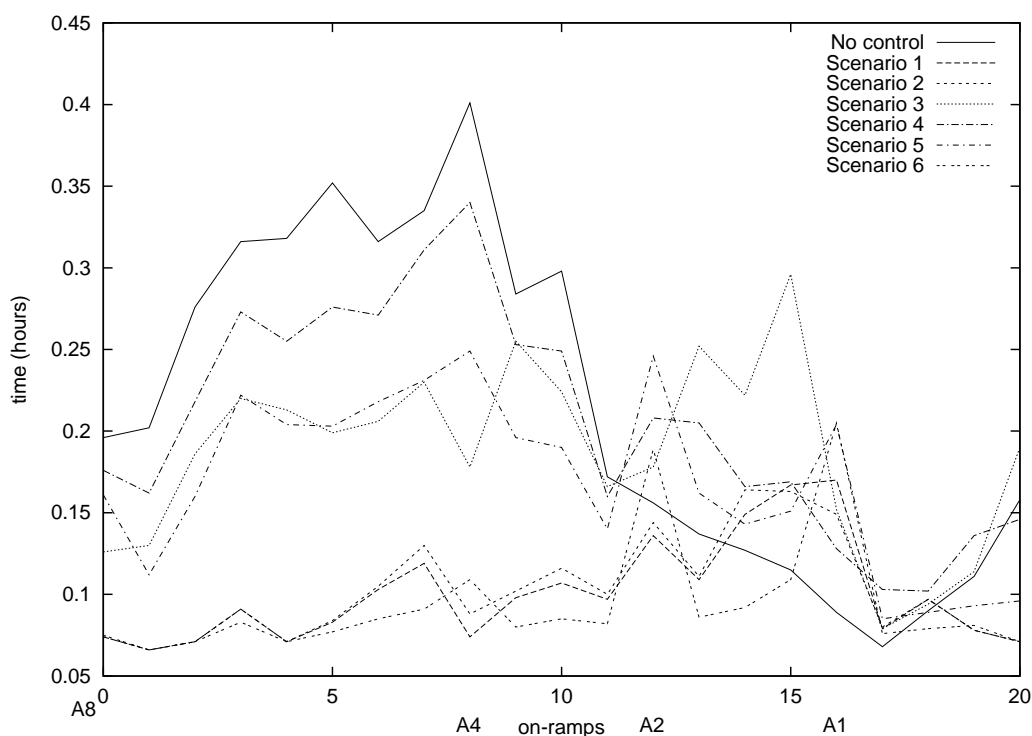
Αυτό σημαίνει ότι και στη βελτιστοποίηση που επαναλαμβάνεται διαδοχικά κάθε δέκα λεπτά με χρονικό ορίζοντα μιας ώρας, η αποτελεσματικότητα του βέλτιστου ελέγχου γιαυτό το συγκεκριμένο υποπρόβλημα θα μειώνεται. Έτσι πέραν των σφαλμάτων που υπάρχουν στις προβλέψεις των διαταραχών προστίθεται και η μείωση της αποτελεσματικότητας του AMOC λόγω των μικρών μεγίστων επιθυμητών ουρών στους παράγοντες που μειώνουν την αποτελεσματικότητα του ιεραρχικού ελέγχου.

Σε κάθε περίπτωση, όμως, οι περιορισμοί μεγίστης ουράς παίζουν έμμεσο ρόλο στην εξισορρόπηση ανάμεσα στην αποτελεσματικότητα και την ισοτιμία της συνολικής στρατηγικής, όπως και στην περίπτωση του βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου. Στο σχήμα 5.24 φαίνεται ο μέσος χρόνος ταξιδιού απόστασης 6,5 χλμ. κατάντη κάθε ράμπας εισόδου του δικτύου για όλα τα σενάρια, με σταθερά ποσοστά στροφής, και ομαλοποιημένες ζητήσεις για το AMOC. Παρατηρούμε ότι στα σενάρια 3, 4 και 5, το βάρος της μείωσης του ΣΧ κατανέμεται κυρίως στις ράμπες που βρίσκονται στον δυτικό Α10, ανάντη του Α4. Αντίθετα, για τα πιο αποτελεσματικά σενάρια 1 και 2, το βάρος αυτό κατανέμεται στις ράμπες ανάντη του Α1. Γιαυτά τα δύο σενάρια οι μέσοι χρόνοι είναι σχεδόν όμοιοι εκτός από μία μικρή διαφορά τους στις ράμπες ανάμεσα στον Α1 και στον Α4. Λόγω της μικρότερης χωρητικότητας αποθήκευσης του σεναρίου 2, οι μέσοι χρόνοι ταξιδιού είναι λίγο μεγαλύτεροι στις ράμπες ανάμεσα στον Α1 και στο Α4, από τους αντίστοιχους του σεναρίου 1. Στην περίπτωση του σεναρίου 6, το βάρος πέφτει στις δύο ράμπες των αυτοκινητοδρόμων Α2 και Α1 των οποίων η χωρητικότητα είναι αρκετή για την εξάλειψη της συμφόρησης.

## 5.9 Επίδραση Συμβάντων

Ένα άλλο είδος διαταραχής που μπορεί να υπάρξει σ' ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμων είναι η ύπαρξη ενός απρόβλεπτου συμβάντος (π.χ. ατυχήματος). Συνήθως, υπάρχουν συστήματα εντοπισμού των συμβάντων που βασίζονται σε κάμερες, φωρατές ή άλλου είδους αισθητήρες. Υπάρχει μία πληθώρα ενεργειών που λαμβάνουν χώρα όταν εντοπιστεί ένα συμβάν στον αυτοκινητόδρομο ανάλογα με τη σοβαρότητά του. Στο σενάριο που θα εξετάσουμε θα θεωρήσουμε ότι για κάποιο λόγο δεν έχει εντοπιστεί το συμβάν και η λειτουργία της στρατηγικής ελέγχου δεν διακόπτεται ούτε μεταβάλλεται λόγω αυτού.



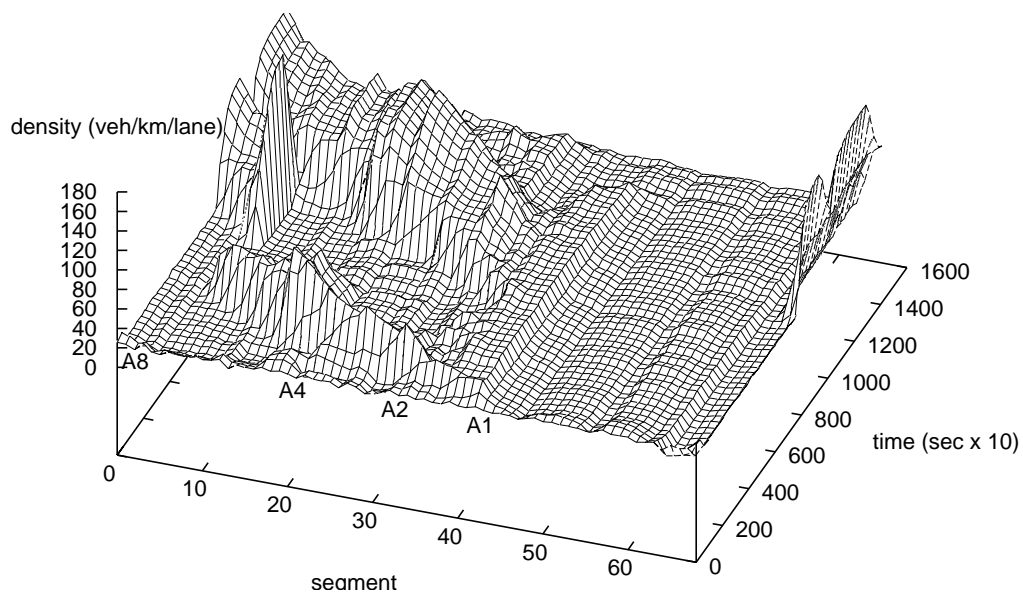


Σχήμα 5.24: Μέσοι χρόνοι ταξιδιού για κάθε ράμπα εισόδου.

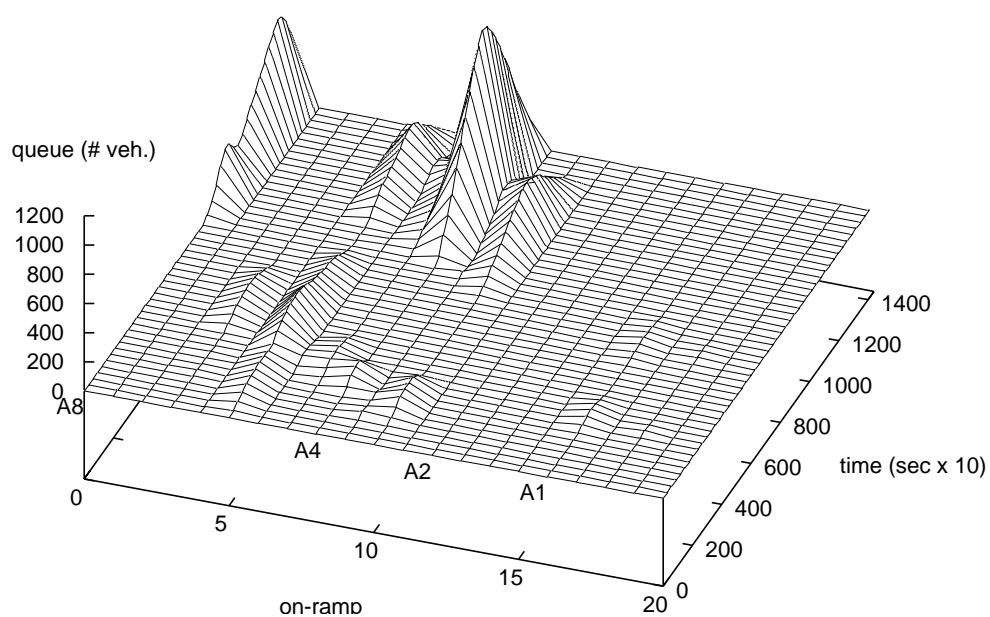
Στο βασικό σενάριο όπου δεν ασκείται κανένας έλεγχος, θεωρούμε ότι θα συμβεί ένα σοβαρό συμβάν μία ώρα και σαρανταπέντε λεπτά από την αρχή της προσομοίωσης στον δυτικό A10 ανάμεσα στη ράμπα εξόδου D2 και στη ράμπα εισόδου O3, που θα διαρκέσει τριάντα λεπτά. Στο σχήμα 5.25 φαίνεται το προφίλ της πυκνότητας όταν δεν εξασκείται έλεγχος και στο σχήμα 5.26 οι αντίστοιχες ουρές των ραμπών εισόδου. Όπως φαίνεται από τα δύο σχήματα, σαν συνέπεια του ατυχήματος δημιουργείται μεγάλη ουρά στον αυτοκινητόδρομο A8 και συμφόρηση σε μεγαλύτερη έκταση στη περιοχή γύρω από τη διαστάυρωση του A10 με τον A8. Ο ΣΧ όταν δεν εξασκείται έλεγχος είναι ίσος με 15.678,38 οχ.\*ώρες.

Στο παραπάνω σενάριο εφαρμόζουμε τον ιεραρχικό έλεγχο με  $(H_P, H_A) = (60, 10)$ , σταθερά ποσοστά στροφής, ομαλοποιημένες ζητήσεις για το AMOC, χρησιμοποιώντας τοπικές στρατηγικές τύπου ALINEA στο επίπεδο Αποκεντρωμένου Ελέγχου και θεωρώντας ότι οι μέγιστες επιτρεπτές ουρές των αστικών ραμπών εισόδου είναι 100 οχήματα, ενώ των αυτοκινητοδρόμων είναι 200 οχήματα. Σ' αυτήν την περίπτωση ο ΣΧ γίνεται ίσος με 8.926,57 οχ.\*ώρες που σημαίνει βελτίωση ίση με 43% σε σχέση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος. Στα σχήματα 5.27 και 5.28 απεικονίζονται η πυκνότητα στον αυτοκινητόδρομο και οι ουρές των ραμπών εισόδου, αντίστοιχα.

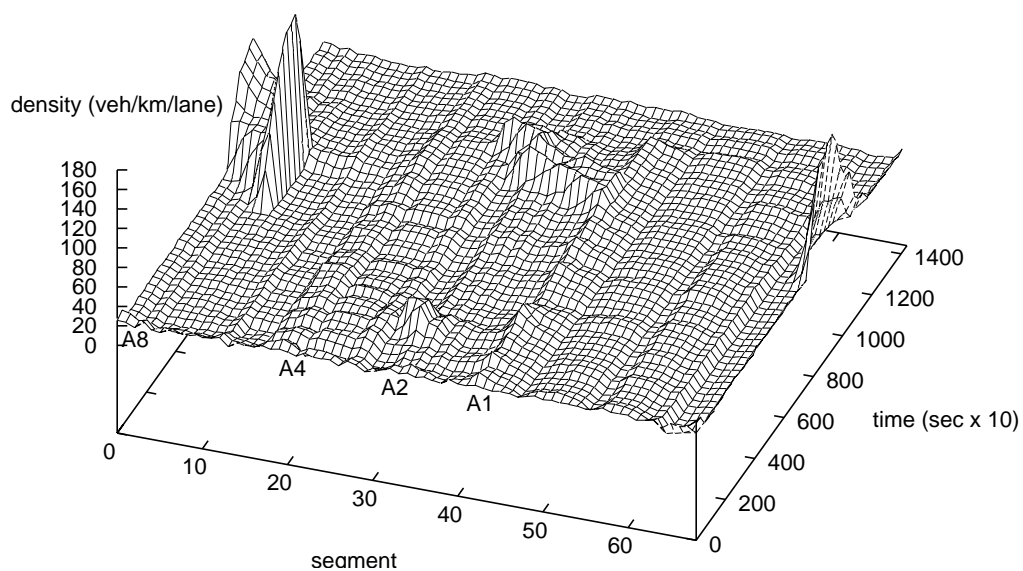
Παρατηρούμε ότι το γράφημα της πυκνότητας είναι σχεδόν επίπεδο για όλο το δίκτυο εκτός από την περιοχή όπου έχει γίνει το ατύχημα. Η στρατηγική ελέγχου



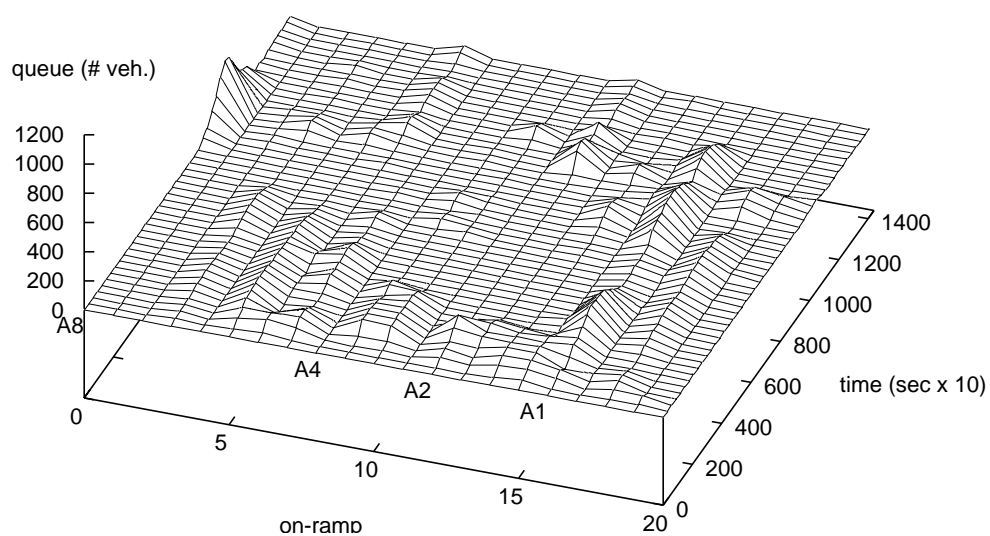
Σχήμα 5.25: Πυκνότητα στο δίκτυο με ατύχημα χωρίς εφαρμογή ελέγχου.



Σχήμα 5.26: Ουρές στο δίκτυο με ατύχημα χωρίς εφαρμογή ελέγχου.



Σχήμα 5.27: Πυκνότητα στο δίκτυο με ατύχημα και με εφαρμογή ελέγχου.



Σχήμα 5.28: Ουρές στο δίκτυο με ατύχημα και με εφαρμογή ελέγχου.

χρησιμοποιεί τη χωρητικότητα του A8 και των ανάντι ραμπών για να βελτιώσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες και να μην επιτρέψει τη συμφόρηση που δημιουργείται λόγω του ατυχήματος να επεκταθεί προς τα πίσω σε μεγάλο βαθμό. Με το να μειώνεται η ροή του αυτοκινητοδρόμου στην περιοχή του ατυχήματος, η στρατηγική είναι ικανή να αντιμετωπίσει τα αίτια της συμφόρησης στο νότιο τμήμα του A10. Με άλλα λόγια, το ατύχημα δρα σαν ένα είδος ελέγχου της ροής στον αυτοκινητόδρομο που επιτρέπει στη στρατηγική να ανταποκριθεί με επιτυχία στις κρίσιμες κυκλοφοριακές συνθήκες του νότιου A10 αφού εκεί υπάρχει μικρότερη ροή. Παρατηρούμε επίσης ότι η συχνότητα ανανέωσης των προβλέψεων των διαταραχών και της τρέχουσας κατάστασης της κυκλοφορίας των δέκα λεπτών είναι ικανή να δώσει πολύ καλά αποτελέσματα. Το AMOC παίρνει πληροφορία για το συμβάν μόνο στην εκτίμηση του διανύσματος αρχικής κατάστασης κάθε δέκα λεπτά. Στο επίπεδο Αποκεντρωμένου Ελέγχου, όμως, υπάρχει μεγαλύτερη συχνότητα στην ανάδραση των τοπικών ελεγκτών και άρα η τοπική στρατηγική ενημερώνεται με περισσότερη ακρίβεια για τις τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Ο συνδυασμός αυτός είναι ικανός να κάνει τη στρατηγική να φέρει τα σωστά αποτελέσματα.

### 5.10 Υπολογιστικός Φόρτος

Θα κλείσουμε το παρόν κεφάλαιο με μία αναφορά στον υπολογιστικό φόρτο που απαιτείται για την εφαρμογή του ιεραρχικού ελέγχου. Ο υπολογιστικός φόρτος της συνολικής δομής που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1 αφορά το χρόνο που απαιτείται για:

1. την εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου,
2. την πρόβλεψη των μελλοντικών διαταραχών, και
3. την επίλυση από το AMOC του προβλήματος βελτίστου ελέγχου.

Από τη στιγμή που τα αποτελέσματα του AMOC βρίσκονται στη διάθεση της στρατηγικής, τότε δεν απαιτείται ιδιαίτερος υπολογιστικός φόρτος από το επίπεδο Αποκεντρωμένου Ελέγχου για να λειτουργήσει. Μπορούν να υπάρχουν επιπλέον καθυστερήσεις που να οφείλονται στην ταχύτητα των επικοινωνιών μεταξύ των τοπικών ελεγκτών, των μετρήσεων και του κέντρου ελέγχου, αλλά αυτό το πρόβλημα είναι εκτός των πλαισίων αυτής της εργασίας. Σ' όλα τα σενάρια που εξετάσαμε, θεωρήσαμε ότι υπάρχει μηδενική καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων.

Τόσο το πρόβλημα της εκτίμησης της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου όσο και το πρόβλημα της πρόβλεψης των μελλοντικών διαταραχών δεν απαιτούν ιδιαίτερο υπολογιστικό φόρτο. Η εκτίμηση της κατάστασης μπορεί να γίνει πολύ γρήγορα, π.χ. με τη χρήση ενός επεκταμένου φίλτρου Kalman που βασίζεται στη μακροσκοπική μοντελοποίηση. Η πρόβλεψη των διαταραχών μπορεί επίσης να γίνει πολύ γρήγορα με χρήση, π.χ. χρονοσειρών που τις επεξεργάζεται ένα νευρωνικό δίκτυο ή που χρησιμοποιούνται από κάποια άλλη μέθοδο πρόβλεψης. Το βασικό υπολογιστικό κόστος αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται από το AMOC για να προσδιορίσει τη βέλτιστη λύση.

Ο χρόνος που απαιτείται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου επίλυσης εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του προβλήματος, δηλαδή από τη διάσταση των διανυσμάτων κατάστασης και ελέγχου. Από κει και ύστερα όμως, σημαντικό ρόλο παίζει ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η βελτιστοποίηση και πιο συγκεκριμένα ο τρόπος επιλογής της

μεθόδου προσδιορισμού του διανύσματος κατεύθυνσης κατά μήκος του οποίου πραγματοποιείται αναζήτηση επί γραμμής σε κάθε επανάληψη της βελτιστοποίησης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η πιο αποτελεσματική μέθοδος για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι το RPOP.

Στο σχήμα 5.29 φαίνεται ο χρόνος που απαιτείται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για κάποιες ενδεικτικές εφαρμογές του κυλιόμενου ορίζοντα. Οι καμπύλες αναφέρονται στην περίπτωση όπου  $(H_P, H_A) = (60, 10)$ , χρησιμοποιούνται ομαλοποιημένες προβλέψεις των ζητήσεων, σταθερά ποσοστά στροφής, οι μέγιστες ουρές είναι 100 και 200 οχήματα για τις αστικές ράμπες και τις ράμπες αυτοκινητοδρόμων, αντίστοιχα και χρησιμοποιείται το RPROP. Παρατηρούμε ότι για το πρόβλημα με χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης μίας ώρας, το AMOC έχει φτάσει στη βέλτιστη λύση που απαιτείται μέσα σε 30 δευτερόλεπτα για όλες τις επαναλήψεις. Επειδή αυτά τα αποτελέσματα βασίστηκαν σ' έναν υπολογιστή Pentium III με συχνότητα 1GHz, είναι αναμενόμενο να υπάρχει μείωση του υπολογιστικού φόρτου τουλάχιστον κατά 50% στους πιο σύγχρονους επεξεργαστές που λειτουργούν με συχνότητες της τάξεως των 2GHz. Συνεπώς η ιεραρχική στρατηγική ελέγχου που παρουσιάσθηκε είναι δυνατό να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο.

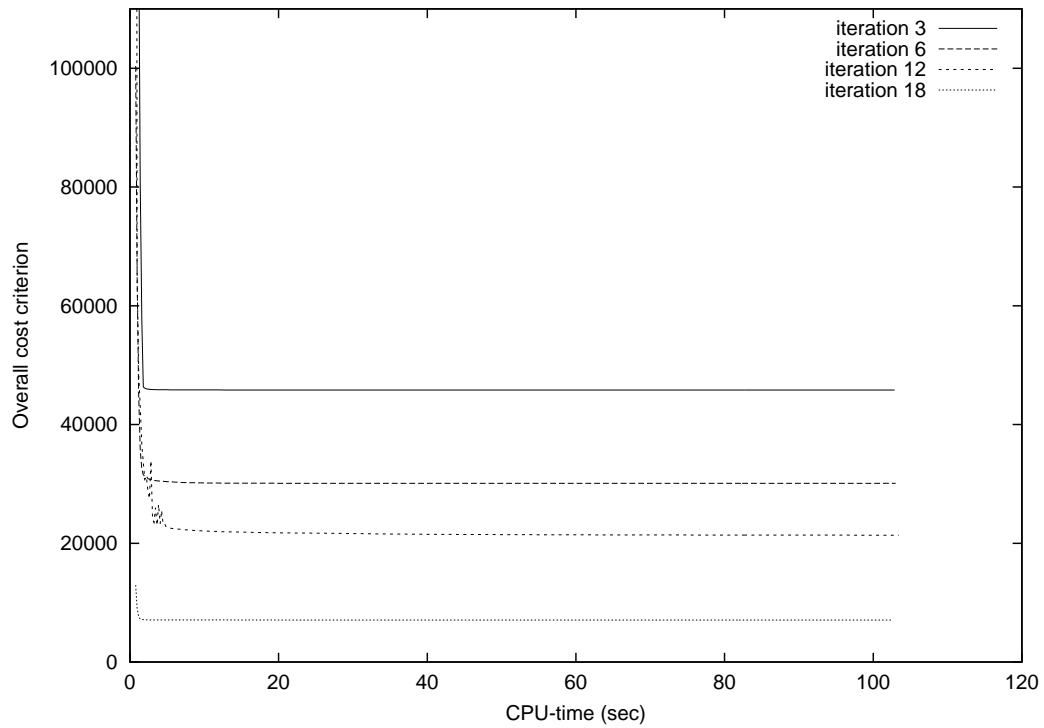
Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα σημαντικό στοιχείο που βελτιώνει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου μη-γραμμικής βελτιστοποίησης, είναι η επιλογή της αρχικής εφικτής τροχιάς ελέγχου. Σε κάθε εφαρμογή του AMOC χρησιμοποιείται η βέλτιστη τροχιά ελέγχου που έχει προσδιοριστεί από την προηγούμενη εφαρμογή. Μ' αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται μία αρχική τροχιά ελέγχου, για την τρέχουσα εφαρμογή του AMOC, που βρίσκεται πιο κοντά στη βέλτιστη από την τυπική αρχική τροχιά ελέγχου που αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου δεν ασκείται έλεγχος.

## 5.11 Σύνοψη

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η εφαρμογή της ιεραρχικής στρατηγικής ελέγχου του Κεφαλαίου 3 στο δίκτυο του Άμστερνταμ. Η βέλτιστη λύση ανοικτού βρόχου παρουσιάζει μείωση της αποτελεσματικότητάς της λόγω της αβεβαιότητας των διαταραχών του συστήματος. Γιαυτό το λόγο δημιουργήθηκε η ιεραρχική στρατηγική συντονισμένου ελέγχου των ραμπών εισόδου σαν μία στρατηγική κλειστού βρόχου βασισμένη στην τεχνική του κυκλιόμενου ορίζοντα. Με βάση τα σενάρια που παρουσιάστηκαν, αυτή η στρατηγική είναι ικανή να διατηρήσει τα θετικά χαρακτηριστικά της στρατηγικής ανοικτού βρόχου χωρίς ιδιαίτερη επιβάρυνση.

Η στρατηγική ανταποκρίνεται θετικά σε σφάλματα των διαταραχών καθώς και σε σφάλματα των παραμέτρων της κυκλοφοριακής ροής, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται τοπικές στρατηγικές τύπου ALINEA στο τελευταίο επίπεδό της. Οι τοπικές στρατηγικές τύπου ALINEA κάνουν τη συνολική στρατηγική πιο αποτελεσματική και λιγότερο ευαίσθητη στις διαταραχές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το γεγονός ότι ακόμα και με σφάλμα 10% στις προβλέψεις της ζήτησης η στρατηγική με τη χρήση και της ALINEA κατορθώνει να είναι αποτελεσματική.

Η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης οχημάτων στις ράμπες εισόδου. Όσο μικρότερη χωρητικότητα υπάρχει, τόσο λιγότερο αποτελεσματική είναι. Αυτό είναι ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στη μελέτη των ιδιοτήτων του βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου. Για να υλοποιηθούν τα δυνατά θετικά αποτελέσματα από τον έλεγχο της ροής



Σχήμα 5.29: Χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό των βέλτιστων λύσεων.

των ραμπών είναι απαραίτητο να υπάρξει αύξηση της χωρητικότητας των ραμπών αλλά και επιπλέον χρήση της χωρητικότητας των ίδιων των αυτοκινητοδρόμων.

Παρατηρήσαμε επίσης ότι η στρατηγική παρουσιάζει πολύ καλή απόδοση ακόμα και με ένα ατύχημα μέσα στον αυτοκινητόδρομο. Τέλος, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι εφικτή η εφαρμογή της σε πραγματικό χρόνο.

## Κεφάλαιο 6

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### 6.1 Συμπεράσματα

Με βάση τα προηγούμενα κεφάλαια μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 2, η μακροσκοπική μοντελοποίηση της κυκλοφορικής ροής δικτύων αυτοκινητοδρόμων ευρείας κλίμακας, είναι ικανοποιητική, ιδιαίτερα για την πρόβλεψη των μελλοντικών κυκλοφοριακών συνθηκών. Το METANET είναι ικανό να προσομοιώσει την κυκλοφορία του δικτύου με την ακρίβεια που απαιτείται προκειμένου να γίνουν αξιολογήσεις της αποτελεσματικότητας μιας στρατηγικής ελέγχου. Επίσης, το μοντέλο του METANET μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το σχεδιασμό μιας αποτελεσματικής στρατηγικής ελέγχου (AMOC).
- Η έλλειψη ελέγχου μέτρησης ράμπας σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων καθιστά αναποτελεσματική τη χρήση της οδικής υποδομής. Ακόμα και η χρήση μιας τοπικής στρατηγικής, όπως η ALINEA, οδηγεί σε βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών. Αυτή η βελτίωση γίνεται ακόμη μεγαλύτερη με τη χρήση πιο προηγμένων στρατηγικών, όπως αυτή που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.
- Η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα μιας στρατηγικής ελέγχου επιτυγχάνεται με τον εκτεταμένο έλεγχο των ραμπών εισόδου που βρίσκονται εγγύτερα στην κρίσιμη περιοχή αλλά με τίμημα τη δημιουργία εκτεταμένων ουρών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την άδικη αντιμετώπιση των οδηγών που προσπαθούν να εισέλθουν στο δίκτυο από ράμπες εισόδου που βρίσκονται στην κρίσιμη περιοχή.
- Μπορεί να υπάρξει μία ισορροπία της αποτελεσματικότητας και της ισοτιμίας της στρατηγικής AMOC που επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω της επιβολής περιορισμών μεγίστης ουράς στις ράμπες εισόδου.
- Οι στρατηγικές βέλτιστου ελέγχου, όπως το AMOC, βασίζονται στην υπόθεση της πλήρους γνώσεως των διαταραχών του συστήματος. Αυτή η υπόθεση δεν ευσταθεί στην πραγματικότητα και γιαυτό είναι αναπόφευκτο η βέλτιστη λύση να είναι τέλεια υποβέλτιστη. Καθίσταται έτσι αναγκαίο να προσδιοριστεί ένας τρόπος που να μειώνει το πρόβλημα αυτό. Η απάντηση είναι η ιεραρχική δομή

ελέγχου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Μέσα σ' αυτή τη δομή συνδιάζονται στοιχεία εκτίμησης, πρόβλεψης, συντονισμένου και τοπικού ελέγχου με συγκεκριμένο, σαφή και συνεπή τρόπο. Ο πυρήνας αυτής της δομής είναι το AMOC το οποίο καθοδηγεί τους τοπικούς ελεγκτές στη συμπεριφορά τους.

- Η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα επιτυγχάνεται όταν οι τοπικοί ελεγκτές ακολουθούν στρατηγικές τύπου *ALINEA*, δηλαδή *ALINEA* βασισμένη σε μετρήσεις πυκνότητας και *ALINEA* βασισμένη σε μετρήσεις ροής. Όταν οι τοπικοί ελεγκτές προσπαθούν να υλοποιήσουν τις βέλτιστες εισροές που έχουν προσδιοριστεί από το AMOC χωρίς χρήση τοπικών μετρήσεων, τότε η αποτελεσματικότητα της συνολικής στρατηγικής μειώνεται.
- Σε κάθε περίπτωση, ο βέλτιστος έλεγχος κλειστού βρόχου είναι ανώτερος από την περίπτωση που εφαρμόζεται μόνο τοπικός έλεγχος, χωρίς κάποιο ανώτερο επίπεδο συντονισμού, τόσο από πλευράς αποτελεσματικότητας όσο και από πλευράς ισοτιμίας.
- Οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την αποτελεσματικότητα του ελέγχου κλειστού βρόχου είναι:
  - Ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης  $H_P$  και ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής  $H_A$ . Όσο πιο μικρός είναι ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης τόσο μικρότερος γίνεται ο απαιτούμενος υπολογιστικός φόρτος αλλά και τόσο περισσότερο πιο μυωπικός γίνεται ο έλεγχος. Επίσης όσο πιο μικρός είναι ο ορίζοντας εφαρμογής, τόσο συχνότερη γίνεται η εφαρμογή του AMOC, πράγμα που σημαίνει και αυτό μεγαλύτερο υπολογιστικό φόρτο. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να εντοπίζεται το μήκος των  $H_P$  και  $H_A$  έτσι ώστε να μην υπάρχει σοβαρή μείωση της αποτελεσματικότητας αλλά και να είναι εφικτή η εφαρμογή του ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Σαν γενικό κανόνα μπορούμε να πούμε ότι θα πρέπει ο  $H_P$  να είναι τόσο μεγάλος ώστε η δυναμική της συμφοράς μέσα στο δίκτυο να καλύπτεται με όσο πιο πλήρη τρόπο γίνεται και κατά το δυνατόν μέχρι τη διάλυσή της.
  - Τα σφάλματα στην πρόβλεψη της ζήτησης. Τέτοιου είδους σφάλματα είναι αναπόφευκτο να υπάρχουν καθώς η πρόβλεψη της ζήτησης με απόλυτη ακρίβεια είναι από τη φύση της αδύνατη. Η ιεραρχική δομή ελέγχου δεν χάνει την αποτελεσματικότητά της σε μεγάλο βαθμό λόγω αυτών των σφαλμάτων, ιδιαίτερα όταν οι τοπικοί ελεγκτές χρησιμοποιούν στρατηγικές τύπου *ALINEA*. Σε κάθε περίπτωση, είναι προτιμότερο να υπάρχει υπερεκτίμηση της ζήτησης παρά υποτίμηση. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 5, η στρατηγική κλειστού βρόχου χάνει την αποτελεσματικότητά της σε μικρότερο βαθμό όταν υπάρχει υπερεκτίμηση της ζήτησης, πράγμα που δίνει την κατεύθυνση προς την οποία θα πρέπει να οδηγηθούν οι μέθοδοι πρόβλεψης. Είναι προτιμότερο να υπερτιμηθεί παρά να υποτιμηθεί η ζήτηση.
  - Σφάλματα στην πρόβλεψη των ποσοστών στροφής. Για τους λόγους που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 5.5, η στρατηγική κλειστού βρόχου είναι σχετικά ευαίσθητη στα σφάλματα των ποσοστών στροφής. Με δεδομένο ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου αιχμής δεν μεταβάλλεται σημαντικά η συμπεριφορά πλοήγησης των οδηγών (π.χ. κατά τη διάρκεια της πρωινής αιχμής), μέθοδοι καλύτερες από τον υπολογισμό ενός μέσου όρου με βάση ιστορικά



στοιχεία, μπορούν να εφαρμοστούν. Ακόμη όμως και αν χρησιμοποιείται ο μέσος όρος, η στρατηγική μπορεί και ανταποκρίνεται χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα.

- Διαφορές ανάμεσα στις παραμέτρους του μοντέλου μ' αυτές της πραγματικότητας. Τέτοιες διαφορές μπορεί να υπάρξουν για διάφορους λόγους, π.χ. επειδή δεν έγινε καλή εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου ή επειδή έχει αλλάξει η οδηγική συμπεριφορά των οδηγών. Και σ' αυτήν την περίπτωση όμως η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής δεν μειώθηκε ιδιαίτερα. Παρόλα αυτά, όσο πιο σωστές είναι οι παράμετροι του μοντέλου τόσο προτιμότερο είναι. Η εκτίμηση αυτών των παραμέτρων γίνεται με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.
- Ύπαρξη περιορισμών μέγιστων ουρών. Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 4, οι περιορισμοί μέγιστης ουράς χρησιμοποιούνται για την έμμεση αντιμετώπιση του προβλήματος της ισοτιμίας. Όταν όμως υπάρχει περιορισμένη διαθεσιμότητα αποθήκευσης οχημάτων λόγω μικρών μέγιστων επιτρεπτών ουρών, ιδιαίτερα στις αστικές ράμπες εισόδου, τότε η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής μειώνεται σε μεγάλο βαθμό. Σ' αυτήν την περίπτωση είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί η χωρητικότητα αποθήκευσης των αυτοκινητοδρόμων.
- Ύπαρξη συμβάντων. Όταν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στον αυτοκινητόδρομο που δημιουργεί συμφόρηση (π.χ. κάποιο ατύχημα) τότε θα πρέπει να υπάρχει αρκετά συχνή επανάληψη των εφαρμογών του AMOC, δηλαδή ο ορίζοντας εφαρμογής  $H_A$  να είναι μικρός. Στην περίπτωση που δεν παρεμβαίνει κάποιο σύστημα διαχείρισης του συμβάντος που παρακάμπτει το σύστημα ελέγχου, τότε η στρατηγική είναι ικανή να βελτιώσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες.
- Η εφαρμογή της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου σε πραγματικές συνθήκες είναι εφικτή λόγω του μικρού χρόνου που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου. Οι σημερινές υπολογιστικές δυνατότητες επαρκούν για την εφαρμογή της στρατηγικής σε πραγματικό χρόνο.

## 6.2 Μελλοντική Εργασία

Η μελλοντική ερευνητική εργασία σε συνέχεια των όσων παρουσιάστηκαν στην παρούσα μελέτη μπορεί να ακολουθήσει τις ακόλουθες γραμμές:

- Το μοντέλο του δικτύου του Άμστερνταμ που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 μπορεί να γίνει πιο λεπτομερές προχωρώντας σε μοντελοποίηση προσανατολισμένη προς τους προορισμούς. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη στρατηγικών καθοδήγησης πορείας.
- Η ιεραρχική δομή ελέγχου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 μπορεί να συμπληρωθεί μ' ένα επιπλέον επίπεδο ανάμεσα στο επίπεδο Ανάθεσης Καθηκόντων και στο επίπεδο των Τοπικών Ελεγκτών, το οποίο το ονομάζουμε επίπεδο «Εκτίμησης Αποτελεσμάτων και Μετατροπών». Σκοπός αυτού του επιπέδου είναι να προβαίνει σε αλλαγές στα αποτελέσματα που παραδίδει το επίπεδο Ανάθεσης Καθηκόντων με βάση τις μετρήσεις που λαμβάνει από τον αυτοκινητόδρομο. Για

παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι το επίπεδο Ανάθεσης Καθηκόντων έχει αποφασίσει να εφαρμοστεί ALINEA με κάποιο σημείο ρύθμισης βάση κάποιας πρόβλεψης της ζήτησης της ράμπας. Εάν η πραγματική ζήτηση είναι μικρότερη της αναμενόμενης, τότε είναι πιθανό να μην υπάρχει ικανή ζήτηση για να φτάσει η πυκνότητα κατάντη της ράμπας στο αναμενόμενο επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περίσσειμα ικανότητας στον αυτοκινητόδρομο που μένει ανεκμετάλλευτο. Σ' αυτήν την περίπτωση το επίπεδο Εκτίμησης Αποτελεσμάτων και Μετατροπών θα προσπαθούσε να αυξήσει την εισροή από ανάντη ράμπες εισόδου εξυπηρετώντας έτσι περισσότερους οδηγούς. Αυτό μπορεί να γίνει αν πραγματοποιηθούν κατάλληλες μετατροπές στους αντίστοιχους τοπικούς ελεγκτές. Η συνολική δομή αυτού του επιπέδου βασίζεται στη λογική και πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις περιπτώσεις και δυνατούς συνδυασμούς καθώς και τις αντίστοιχες αντιδράσεις με γνώμονα τη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών.

- Στο επίπεδο των Τοπικών Ελεγκτών χρησιμοποιούνται δύο παραλλαγές των στρατηγικών τύπου ALINEA, ALINEA βασισμένη σε κατάντη μετρήσεις πυκνότητας και ALINEA βασισμένη σε κατάντη μετρήσεις ροής. Σ' αυτές μπορεί να προστεθεί και η προσαρμοστική ALINEA (adaptive ALINEA) (βλ. [41]) η οποία έχει την ιδιότητα να πραγματοποιεί και την εκτίμηση της κρίσιμης πυκνότητας σε πραγματικό χρόνο. Είναι γνωστό ότι όταν σχηματιστεί συμφόρηση στον αυτοκινητόδρομο τότε υπάρχει και πτώση της χωρητικότητας του αυτοκινητοδρόμου. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό στη βιβλιογραφία σαν «πτώση ικανότητας» (capacity drop).
- Σε μία πραγματική εφαρμογή είναι πιθανό να μην υπάρχουν αισθητήρες κατάντη των ραμπών εισόδου προκειμένου να χρησιμοποιηθούν από τους τοπικούς ελεγκτές. Γιαυτό το λόγο θα πρέπει να ενταχθούν στη βιβλιοθήκη των τοπικών ελεγκτών και στρατηγικές τύπου ALINEA που κάνουν χρήση ανάντη μετρήσεων. Τέτοιες στρατηγικές περιγράφονται στο [40].
- Μία εναλλακτική προσέγγιση για το επίπεδο τοπικού ελέγχου είναι να αντικατασταθεί από μία άλλη αναδραστική στρατηγική συντονισμένου ελέγχου, όπως είναι π.χ. η METALINE. Αυτό μπορεί να γίνει αν γραμμικοποιηθεί το μοντέλο του AMOC γύρω από τη βέλτιστη τροχιά κατάστασης και εφαρμοστεί γραμμικός τετραγωνικός έλεγχος για όλο το δίκτυο.
- Η μεθοδολογία του βέλτιστου ελέγχου είναι αρκετά ευέλικτη και μπορεί να λάβει υπόψη της και άλλα μέτρα ελέγχου όπως είναι ο έλεγχος καθοδήγησης πορείας (βλ. [23]) και τα μεταβλητά όρια ταχύτητας. Σ' αυτήν την περίπτωση θα έχουμε μία στρατηγική ολοκληρωμένου ελέγχου η οποία θα έχει όμοια δομή με αυτή του σχήματος 3.1.
- Το κριτήριο κόστους που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ΣΧ. Ελαχιστοποιώντας το ΣΧ επιδιώκουμε κυκλοφοριακές συνθήκες που είναι γνωστές στη βιβλιογραφία ως βέλτιστο του συστήματος. Εναλλακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα άλλο κριτήριο του οποίου η ελαχιστοποίηση οδηγεί στο λεγόμενο βέλτιστο του χρήστη. Κάτω από τέτοιες συνθήκες οι οδηγοί δεν έχουν κίνητρο να επιλέξουν εναλλακτικές διαδρομές προς τον προορισμό τους από αυτές που τους δίνονται μέσω του ελέγχου καθοδήγησης πορείας. Γιαυτό και μία τέτοια μελέτη μπορεί να γίνει μόνο όταν εφαρμόζεται έλεγχος καθοδήγησης πορείας.

- Σε σχέση με τον αλγόριθμο μη-γραμμικής βελτιστοποίησης που επιλύει το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου επιπλέον έρευνα μπορεί να γίνει στον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζονται οι περιορισμοί μέγιστης ουράς. Στην προσέγγιση μας χρησιμοποιήσαμε παράγοντες τιμωρίας στο κριτήριο κόστους. Αυτοί οι περιορισμοί που εξαρτώνται από το διάνυσμα κατάστασης είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη απευθείας από τον αλγόριθμο επίλυσης, βλ. [35].

# Βιβλιογραφία

- [1] M. Athans, P.K. Houp, D. Looze, D. Orlhac, S.B. Gershwin, and J.L. Speyer. Stochastic control of freeway corridor systems. In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pages 676–685, 1975.
- [2] A.M. Bayen, R.L. Raffard, and C.J. Tomlin. Network congestion alleviation using adjoint hybrid control: Application to highways. In R. Alur and G.J. Pappas, editors, *HSCC 2004*, LNCS, pages 95–110. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- [3] T. Bellemans. *Traffic control on motorways*. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, May 2003.
- [4] L. Benmohamed and S.M. Meerkov. Feedback control of highway congestion be a fair on-ramp metering. In *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, volume 3, pages 2437–2442, Lake Buena Vista, Florida, USA, 1994.
- [5] N. Bhouiri. *Commande d'un Système de Traffic Autoroutier: Application au Boulevard Périphérique de Paris*. Ph.D. Dissertation, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, France, 1991.
- [6] N. Bhouiri, M. Papageorgiou, and J.M. Blosseville. Optimal control of traffic flow on periurban ringways with application to the Boulevard Périphérique in Paris. *Preprints 11th IFAC World Congress*, Vol. 10:236–243, Tallinn, Estonia 1990.
- [7] M. Blinkin. Problem of optimal control of traffic flow on highways. *Automation and Remote Control*, 37:662–667, 1976.
- [8] M.J. Box. A new method of constrained optimization and a comparison with other methods. *Computer Journal*, 8:42–52, 1965.
- [9] T.-H. Chang and Z.-Y. Li. Optimization of mainline metering via an adaptive co-ordinated ramp metering control model with dynamic OD estimation. *Transportation Research C*, 10:99–120, 2002.
- [10] O. Chen, A. Hotz, and M. Ben-Akiva. Development and evaluation of a dynamic metering control model. In M. Papageorgiou and A. Pouliezios, editors, *Preprints of 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems*, pages 1162–1168, Chania, Greece, 1997.

- [11] I.C. Cheng, J.B. Gruz, and J.G. Paquet. Entrance ramp control for travel rate maximization in expressways. *Transportation Research*, 8:503–508, 1974.
- [12] M. Cremer. A state feedback approach to freeway traffic control. In *Preprints of the 7th IFAC World Congress*, pages 1575–1582, Helsinki, Finland, 1978.
- [13] C. Diakaki and M. Papageorgiou. *Design and Simulation Test of Coordinated Ramp Metering Control (METALINE) for A10-West in Amsterdam*. Internal Report 1994-2, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, Chania, Greece, 1994.
- [14] N.B. Goldstein and K.S.P. Kumar. A decentralized control strategy for freeway regulation. *Transportation Research B*, 16:279–290, 1982.
- [15] A. Hegyi. *Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures*. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2004.
- [16] L. Isaksen and H.J. Payne. Suboptimal control of linear systems by augmentation with application to freeway traffic regulation. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 18:210–219, 1973.
- [17] J.C. Jurvillier. Simulation de temps de parcours et modèle de consommation sur une autoroute urbaine. Technical report, Institute National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, DART, Arcueil, France, 1982.
- [18] A. Kaya. Computer and optimization techniques for efficient utilization of urban freeway systems. In *Proceedings of the 5th IFAC World Congress*, Paris, France, 1972. paper 12.1.
- [19] C.H. Knapp. Traffic estimation and control at bottlenecks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Society*, pages 469–472, Washington, D.C., USA, 1972.
- [20] A. Kotsialos and M. Papageorgiou. The importance of traffic flow modeling for motorway traffic control. *Networks and Spatial Economics*, 1:179–203, 2001.
- [21] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, H. Haj-Salem, S. Manfredi, J. van Schuppen, J. Taylor, and M. Westerman. *Co-ordinated Control Strategies*. Deliverable D06.1 of DACCORD project (TR1017). European Commission, Brussels, Belgium, 1997.
- [22] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, M. Mangeas, and H. Haj-Salem. Coordinated and integrated control of motorway networks via nonlinear optimal control. *Transportation Research C*, 10(1):65–84, 2002.
- [23] Α. Κότσιαλος. *Ολοκληρωμένος Έλεγχος Κυκλοφορίας Δικτύων Αυτοκινητοδρόμων*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 1998 .
- [24] W.-H. Lin. A Gaussian maximum likelihood formulation for short-term forecasting of traffic flow. In *Proc. of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Oakland, U.S.A., 2001.

- [25] D.P. Looze, P.K. Houpt, N.R. Sandell, and M. Athans. On decentralized estimation and control with application to freeway ramp metering. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 23:268–275, 1978.
- [26] D.P. Masher, D.W. Ross, P.J. Wong, P.L. Tuan, Zeidler, and S. Peracek. Guidelines for design and operating of ramp control systems. Technical Report NCHRP 3-22, SRI Project 3340, Stanford Research Institute, SRI, Menid Park, California, USA, 1975.
- [27] A. Messmer and M. Papageorgiou. METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. *Traffic Engineering and Control*, 31(8/9):466–470; 549, 1990.
- [28] I. Okutani and Y.J. Stephanedes. Dynamic prediction of traffic volume through Kalman filtering theory. *Transportation Research B*, 18(1):1–11, 1984.
- [29] M. Papageorgiou. A new approach to time-of-day control based on a dynamic freeway traffic model. *Transportation Research*, 14B:349–360, 1980.
- [30] M. Papageorgiou. *Application of Automatic Control Concepts in Traffic Flow Modelling and Control*. Springer Verlag, N. York, USA, 1983.
- [31] M. Papageorgiou. Multilayer control system design applied to freeway traffic. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-29(6):482–490, 1984.
- [32] M. Papageorgiou. Automatic control methods in traffic and transportation. In P. Toint, M. Labbe, K. Tanczos, and G. Laporte, editors, *Operations Research and Decision Aid Methodologies in Traffic and Transportation Management*, pages 46–83. Springer Verlag, New York, 1998.
- [33] M. Papageorgiou, J.M. Blosseville, and H. Hadj-Salem. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Périphérique in Paris. Part II: Coordinated on-ramp metering. *Transportation Research*, 24A:361–370, 1990.
- [34] M. Papageorgiou, H. Haj-Salem, and J.M. Blosseville. ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record*, 1320:58–64, 1991.
- [35] M. Papageorgiou and M. Marinaki. *A Feasible Direction Algorithm for the Numerical Solution of Optimal Control Problems*. Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, Chania, Greece, 1995.
- [36] M. Papageorgiou and R. Mayr. Optimal decomposition methods applied to motorway traffic control. *International Journal of Control*, 35:269–280, 1982.
- [37] H.J. Payne, W.S. Meisel, and M.D. Teener. Ramp control to relieve freeway congestion caused by traffic disturbances. *Highway Research Record*, 469:52–64, 1973.
- [38] M. Riedmiller and H. Braun. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. In H. Ruspini, editor, *Proceedings of*

- the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN)*, pages 586 – 591, San Francisco, 1993.
- [39] S.C. Schwartz and H.H. Tan. Integrated control of freeway entrance ramps by threshold regulation. In *Proceedings IEEE Conference of Decision and Control*, pages 984–986, 1977.
- [40] E. Smaragdis and M. Papageorgiou. A series of new local ramp metering strategies. In *Proceedings of 82nd TRB Annual Meeting*, Washington, D.C., USA, 2003.
- [41] E. Smaragdis, M. Papageorgiou, and E. Kosmatopoulos. A flow-maximizing adaptive local ramp metering strategy. *Transportation Research B*, 38:251–270, 2004.
- [42] B.L. Smith, B.M. Williams, and R.K. Oswald. Comparison of parametric and nonparametric models for traffic flow forecasting. *Transportation Research C*, 10:303–321, 2002.
- [43] Y. Stephanedes and K.K. Chang. Optimal control of freeway corridors. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 119:504–514, 1993.
- [44] D. Tabac. A linear programming model of highway traffic control. In *Proceedings of the 6th Annual Princeton Conference on Information Science and Systems*, pages 568–570, Princeton, New Jersey, USA, 1972.
- [45] C.F. Wang. On a ramp-flow assignment problem. *Transportation Science*, 6:114–130, 1972.
- [46] J.J. Wang and A.D. May. Computer model for optimal freeway on-ramp control. *Highway Research Record*, 469:16–25, 1973.
- [47] Y. Wang and M. Papageorgiou. Real-time freeway traffic state estimation based on extended kalman filter: a general approach. *Transportation Research B*, 2003. submitted.
- [48] J.A. Wattleworth. Peak-period analysis and control of a freeway system. *Highway Research Record*, 157:1–21, 1965.
- [49] L.S. Yuan and J.B. Kreer. An optimal control algorithm for ramp metering of urban freeways. In *Proceedings of the 6th IEEE Annual Allerton Conference on Circuit and System Theory*, Allerton, Illinois, USA, 1968.
- [50] L.S. Yuan and J.B. Kreer. Adjustment of freeway ramp metering rates to balance entrance ramp queues. *Transportation Research*, 5:127–133, 1971.
- [51] H. Zhang, S. Ritchie, and W. Recker. Some general results on the optimal ramp metering control problem. *Transportation Research C*, 4:51–69, 1996.
- [52] H.M. Zhang and W.W. Recker. On optimal freeway ramp control policies for congested traffic corridors. *Transportation Research B*, 33(6):417–436, 1999.

- [53] H.M. Zhang, S.G. Ritchie, and R. Jayakrishnan. Coordinated traffic-responsive ramp control via nonlinear state feedback. *Transportation Research C*, 9(5):337–352, 2001.