



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Έλεγχος κυκλοφορίας σε
αυτοκινητόδρομους μεγάλης κλίμακας
υπό συνθήκες αυξημένης ζήτησης**

Διπλωματική

Υπό

Χρήστο-Δανιήλ Μιχαλόπουλο

Χανιά, Μάρτιος 2008

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την εκτίμησή μου στον καθηγητή Μάρκο Παπαγεωργίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτή την ενδιαφέρουσα εργασία. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον λέκτορα Ιωάννη Παπαμιχαήλ για την συνεχή βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και για την άψογη μα πάνω απ' όλα φιλική του αντιμετώπιση.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς, φίλους, συγγενείς, συμφοιτητές και άλλους, οι οποίοι με τον τρόπο τους μου συμπαραστάθηκαν και με βοήθησαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ.....	4
1.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	5
1.3 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	7
2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	8
2.1 ΜΕΤΑΝΕΤ – ΓΕΝΙΚΑ	10
2.2 ΕΙΔΗ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ	11
2.2.1. Απλοί σύνδεσμοι αυτοκινητοδρόμων.....	11
2.2.2. Ψευδοσύνδεσμοι.....	13
2.2.3. Σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης	13
2.2.4. Σύνδεσμοι Εισόδου (ράμπες εισόδου).....	14
2.2.5. Σύνδεσμοι εξόδου	16
2.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	16
2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	17
3. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	19
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	19
3.2 ΑΛΙΝΕΑ.....	20
3.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ (ΑΜΟC)	23
4. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΤΟΥ ΑΜΣΤΕΡΝΤΑΜ.....	25
4.1 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	25
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	28
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΛΙΝΕΑ – ΑΜΟC	29
5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	29
5.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΖΗΤΗΣΗΣ	29
5.3 ΣΕΝΑΡΙΑ.....	37
5.3.1 Βασικό Σενάριο ζήτησης.....	38
Σενάριο 0	39
Σενάριο 1	43
Σενάριο 3	51
Σενάριο 5	59
5.3.2 Αυξημένη ζήτηση κατά 5%.....	63
Σενάριο 7	63
Σενάριο 8	67
Σενάριο 10.....	75
Σενάριο 12	83
Σενάριο 13	87
5.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	91
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	95
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	95
6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	97

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Αριθμός αυτοκινήτων ανά 100 άτομα.....	6
Σχήμα 1.2 Χάρτης-βαρόμετρο των κατά κεφαλήν αυτοκινήτων.....	6
Σχήμα.2.1 Διακριτοποιημένος σύνδεσμος.....	10
Σχήμα 2.2 Θεμελιώδες διάγραμμα.....	12
Σχήμα.2.3 Ράμπα εισόδου.....	14
Σχήμα.2.4 Επίδραση στην εκροή της ράμπας από συμφόρηση κατάντη αυτής.....	16
Σχήμα.3.1 Θεμελιώδες διάγραμμα.....	20
Σχήμα.3.2 Εφαρμογή ελέγχου ALINEA σε ράμπα εισόδου.....	21
Σχήμα.4.1 Περιστατικός δακτύλιος του Άμστερνταμ – Τοπολογία ραμπών εισόδου/εξόδου.....	25
Σχήμα.4.2 Αυτοκινητιστικό δίκτυο του Άμστερνταμ – Λήψη από δορυφόρο.....	27
Σχήμα 5.1 Ζήτηση (υπό την μορφή ροής, οχήματα/ώρα) στη ράμπα Ο4 με επισημασμένες τις διάφορες περιοχές.....	32
Σχήμα 5.2 Ζήτηση (υπό την μορφή ροής, οχήματα/ώρα) στη ράμπα ΟΑ4 με επισημασμένες τις διάφορες περιοχές.....	33
Σχήμα 5.3 Συνολική Ζήτηση (υπό την μορφή ροής, οχήματα/ώρα).....	34
Σχήμα 5.4 TTS-Μεταβολή ζήτησης.....	36
Σχήμα 5.5 Σενάριο 0 – Διάγραμμα Πυκνότητας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	40
Σχήμα 5.6 Σενάριο 0 – Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	41
Σχήμα 5.7 Σενάριο 0 – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	42
Σχήμα 5.8 Σενάριο 1 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	44
Σχήμα 5.9 Σενάριο 1 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	45
Σχήμα 5.10 Σενάριο 1 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	46
Σχήμα 5.11 Σενάριο 1 – AMOC - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	48
Σχήμα 5.12 Σενάριο 1 – AMOC - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	49
Σχήμα 5.13 Σενάριο 1 – AMOC – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	50
Σχήμα 5.14 Σενάριο 3 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	52
Σχήμα 5.15 Σενάριο 3 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	53
Σχήμα 5.16 Σενάριο 3 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	54
Σχήμα 5.17 Σενάριο 3 – AMOC - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	56
Σχήμα 5.18 Σενάριο 3 – AMOC - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	57
Σχήμα 5.19 Σενάριο 3 – AMOC – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	58
Σχήμα 5.20 Σενάριο 5 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	60
Σχήμα 5.21 Σενάριο 5 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	61
Σχήμα 5.22 Σενάριο 5 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	62
Σχήμα 5.23 Σενάριο 7 – Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	64
Σχήμα 5.24 Σενάριο 7 - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	65
Σχήμα 5.25 Σενάριο 7 – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	66
Σχήμα 5.26 Σενάριο 8 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	68
Σχήμα 5.27 Σενάριο 8 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	69
Σχήμα 5.28 Σενάριο 8 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	70
Σχήμα 5.29 Σενάριο 8 – AMOC - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	72
Σχήμα 5.30 Σενάριο 8 – AMOC - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	73
Σχήμα 5.31 Σενάριο 8 – AMOC – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω).....	74

Σχήμα 5.32 Σενάριο 10 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	76
Σχήμα 5.33 Σενάριο 10 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	77
Σχήμα 5.34 Σενάριο 10 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)	78
Σχήμα 5.35 Σενάριο 10 – AMOC - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	80
Σχήμα 5.36 Σενάριο 10 – AMOC - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	81
Σχήμα 5.37 Σενάριο 10 – AMOC – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)	82
Σχήμα 5.38 Σενάριο 12 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	84
Σχήμα 5.39 Σενάριο 12 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	85
Σχήμα 5.40 Σενάριο 12 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)	86
Σχήμα 5.41 Σενάριο 13 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10).....	88
Σχήμα 5.42 Σενάριο 13 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10).....	89
Σχήμα 5.43 Σενάριο 13 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Χώρες με τα περισσότερα (αριστερά) και τα λιγότερα (δεξιά) κατά κεφαλήν αυτοκίνητα	7
Πίνακας 4.1 Ποσοστά στροφής για κάθε ράμπα εξόδου	28
Πίνακας 5.1 Αυξημένη ζήτηση ανά ράμπα και περιοχή ζήτησης	31
Πίνακας 5.2 Μειωμένη ζήτηση ανά ράμπα και περιοχή ζήτησης	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 5.3 Σύγκριση για 3 βασικά σενάρια ζήτησης και 3 σενάρια για μήκη ουρών	36
Πίνακας 5.4 Εναλλακτικά σενάρια	38
Πίνακας 5.5 TTS ανά σενάριο για AMOC και ALINEA	91

Περίληψη

Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των οχημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη σύγχρονων οδικών αρτηριών, όπως είναι οι οδοί ταχείας κυκλοφορίας και οι αυτοκινητόδρομοι, προκειμένου να λυθούν οποιαδήποτε προβλήματα συμφόρησης είχαν προκύψει. Σήμερα, οι υπάρχουσες αυτές υποδομές φαίνεται να μην αρκούν. Αυτό οφείλεται τόσο στον μεγάλο όγκο οχημάτων που καλούνται να εξυπηρετήσουν, όσο και στην μη επαρκή εκμετάλλευσή τους. Πριν αναβαθμιστούν όμως από άποψη δυναμικότητας θα ήταν λογικό και απαραίτητο να γίνει όσο το δυνατό μεγαλύτερη αξιοποίηση της υπάρχουσας δυναμικότητάς. Σε αυτό εστιάζει και η παρούσα εργασία, και πιο συγκεκριμένα στην εφαρμογή ελέγχου της εισερχόμενης ζήτησης στον περιαστικό αυτοκινητόδρομο του Άμστερνταμ με σκοπό την ομαλότερη και αποτελεσματικότερη λειτουργία του.

Ένας έλεγχος τέτοιου είδους αποτελεί μέρος μιας διαδικασίας προσομοίωσης και δεδομένης της υπολογιστικής δυνατότητας των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών, θεωρήθηκε αναγκαία η χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου που ενώ θα έχει μικρούς χρόνους εκτέλεσης, δεν θα στερείται ακρίβειας. Έτσι, επιλέχθηκε ένα μακροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης, το METANET.

Στο μοντέλο αυτό, τα οχήματα παριστούνται ως ρευστά και χαρακτηρίζονται ως τέτοια από μεγέθη όπως η πυκνότητα, η ροή και η ταχύτητα. Το κριτήριο βάσει του οποίου γίνεται η αξιολόγηση του αποτελέσματος της προσομοίωσης, είναι ο Συνολικός χρόνος στο δίκτυο (TTS) που αποτελείται από τον Συνολικό χρόνο διαδρομής (TTT) και τον Συνολικό χρόνο αναμονής στις ράμπες εισόδου (TWT).

Προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου διαδρομής πρέπει να γίνει χρήση κάποιου ελεγκτή, ο οποίος θα προσπαθεί να διατηρήσει της ροή εντός του δικτύου κοντά σε μία επιθυμητή τιμή. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζονται δύο είδη ελεγκτών, η ALINEA και το AMOC. Η ALINEA αποτελεί έναν τοπικό αλγόριθμο, ελέγχου κλειστού βρόγχου της εισερχόμενης ζήτησης. Προσπαθεί να διατηρήσει την πυκνότητα σε τιμές κοντά σε μια επιθυμητή, αυξάνοντας τον ρυθμό εισόδου όταν βρίσκεται κάτω από αυτήν και μειώνοντας τον ρυθμό εισόδου όταν έχει ξεπεραστεί η τιμή. Η ζήτηση

στην οποία αποτρέπεται η είσοδος αποθηκεύεται προσωρινά σε ουρές στις ράμπες εισόδου. Η λύση που παράγεται από το AMOC είναι αποτέλεσμα βέλτιστου ελέγχου ανοιχτού βρόγχου. Το τροφοδοτούμε δηλαδή με ένα διάνυμα αρχικής κατάστασης $x(0)$ και βάσει αυτού υπολογίζεται η βέλτιστη στρατηγική σε κάθε χρονική στιγμή έχοντας ως δεδομένες τις ζητήσεις στις εισόδους του δικτύου.

Ο περιαστικός αυτοκινητόδρομος του Άμστερνταμ A10 είναι ιδιαίτερης σημασίας επειδή όχι μόνο εξυπηρετεί τους κατοίκους της πόλης ως δακτύλιος, αλλά συμβάλει με άλλους αυτοκινητόδρομους καθιστώντας τον κομβικό σημείο για το Ολλανδικό εθνικό δίκτυο. Είναι λοιπόν λογικό επόμενο να δέχεται μεγάλη ποσότητα αυτοκινήτων και συνεπώς να παρατηρούνται συχνά φαινόμενα συμφόρησης. Η συμφόρηση είναι μάλιστα τέτοια που πολλές φορές αποτρέπει την είσοδο των οδηγών στο δίκτυο.

Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του αυτοκινητόδρομου A10 ώστε να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση της δυναμικότητάς του, προσομοιώνεται για ένα σύνολο εναλλακτικών σεναρίων τόσο με χρήση της ALINEA όσο και του AMOC. Κατά την διάρκεια της ανάλυσης των αποτελεσμάτων της ALINEA παράλληλα με τα αποτελέσματα του AMOC, θεωρούμε τα δεύτερα ως την βέλτιστη λύση που μπορεί να επιτευχθεί, και αυτό επειδή το AMOC γνωρίζει εκ των προτέρων πως θα εξελιχθεί η κίνηση, ενώ η ALINEA απλά αντιδρά ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση.

Τα σενάρια που χρησιμοποιούνται αφορούν στην μεταβολή του μέγιστου δυνατού μήκους των ουρών στις συνδέσεις με αυτοκινητόδρομους, ενώ τα μήκη στις ράμπες που τροφοδοτούν τον A10 με κίνηση από το αστικό δίκτυο είναι της τάξης των 30 οχημάτων.

Παράλληλα εξετάζονται και δύο διαφορετικά σενάρια ζήτησης. Το πρώτο αφορά σε πραγματικές μετρήσεις και αποτελεί το βασικό σενάριο ζήτησης, ενώ το δεύτερο εξετάζει την περίπτωση όπου η κίνηση αυξάνεται κατά 5 ποσοστιαίες μονάδες. Η αύξηση έγινε θεωρώντας ότι οι οδηγοί θα προσαρμόζονταν την αύξηση της κίνησης, μετατοπίζοντας τις ώρες που εισέρχονται στον αυτοκινητόδρομο, αποφεύγοντας έτσι τις ώρες αιχμής.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για το βασικό σενάριο ζήτησης, δείχνουν σχετικά καλή συμπεριφορά της ALINEA όταν γίνεται χρήση ραμπών μήκους 30 οχημάτων στις συνδέσεις του A10 με το αστικό δίκτυο και 200-300

οχημάτων στις συνδέσεις με αυτοκινητόδρομους. Ενώ στην περίπτωση αυξημένης ζήτησης η ALINEA δυσκολεύεται να συντονίσει την κίνηση. Το AMOC από την άλλη καταφέρει να συγκλίνει στην βέλτιστη τιμή του ήδη και στα δύο σενάρια ζήτησης με χρήση ραμπών μήκους 30 οχημάτων στις συνδέσεις του Α10 με το αστικό δίκτυο και 200 οχημάτων στις συνδέσεις με αυτοκινητόδρομους.

1. Εισαγωγή

1.1 Κυκλοφοριακή συμφόρηση

Αντίθετα με ότι πιστεύει ο περισσότερος κόσμος, ο όρος της κυκλοφορικής συμφόρησης είχε γίνει αντιληπτός και πριν την μαζική εισαγωγή αυτοκινήτων. Τα δεδομένα ταχύτητας και αδράνειας των ζώηλατων οχημάτων που τότε χρησιμοποιούνταν καθώς και τα φτωχά τεχνικά μέσα, δεν επέτρεπαν την εισαγωγή κάποιας ουσιαστικής βελτίωσης.

Η βιομηχανική επανάσταση και πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη του κλάδου της αυτοκινητοβιομηχανίας συνέβαλε σημαντικά στη ζωή μας, αλλάζοντας ριζικά τις κλασικές μεθόδους μεταφοράς και αυξάνοντας συγχρόνως το βιοτικό μας επίπεδο. Ο ανταγωνισμός όμως καθώς και μια σειρά άλλων ιστορικών συγκυριών εξέλιξαν τον κλάδο ενώ παράλληλα οι τιμές των οχημάτων γίνονταν όλο και πιο ελκυστικές στο ευρύ κοινό με αποτέλεσμα ο αριθμός των κατά κεφαλήν αυτοκινήτων αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό.

Ο μεγάλος αριθμός αυτοκινήτων προκάλεσε τεράστια προβλήματα στα αστικά κέντρα, στα οποία εφαρμόστηκαν πληθώρα μέτρων, όπως είναι η αναλυτική σήμανση, η μονοδρόμηση, η φωτεινή σηματοδότηση, η δημιουργία οδών ταχείας κυκλοφορίας κ.α. Το πρόβλημα όμως με τα χρόνια επιδεινώθηκε και η συμφόρηση μεταφέρθηκε σε πολλές περιπτώσεις από το αστικό δίκτυο τόσο στις οδούς ταχείας κυκλοφορίας, όσο και στους αυτοκινητόδρομους.

Εμφανίζεται έτσι η ανάγκη ακριβούς ρύθμισης της κυκλοφορίας και εφόσον η τεχνολογία των οχημάτων θεωρείται δεδομένη, αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω σύνθετων κυκλωμάτων ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής. Σε αυτό εστιάζει και η παρούσα εργασία και πιο συγκεκριμένα στην ιδιαίτερη από πολλές απόψεις περίπτωση του περιαστικού αυτοκινητόδρομου του Άμστερνταμ.

1.2 Στατιστικά στοιχεία

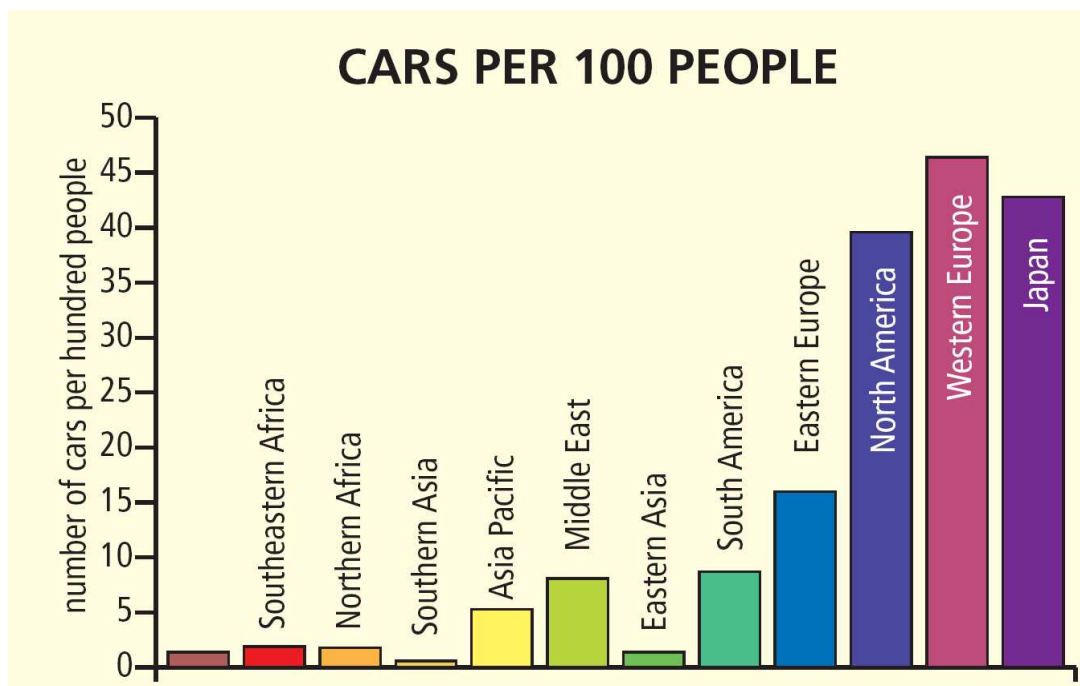
Θέλοντας να μελετήσουμε ορθά το φαινόμενο, πρέπει να εστιάσουμε στα στατιστικά στοιχεία που το διέπουν. Πιο συγκεκριμένα από έρευνα που πραγματοποιήθηκε από την Beca Carter Hollings & Ferner Ltd για χάρη της Smartgrowth [1], προκύπτει ότι όπως κάθε αγορά, έτσι και αυτή του αυτοκινήτου μπορεί να φθάσει σε κάποιο σημείο κορεσμού, οπότε και θα επιβραδυνθεί η αύξηση του αριθμού των αυτοκινήτων. Περίπτωση κορεσμού θα παρατηρούνταν είτε από μια γενικότερη επιβράδυνση της οικονομίας (υπολογισμός βάσει κατά κεφαλήν ΑΕΠ), είτε από αύξηση των τιμών των αυτοκινήτων.

Θεωρώντας σταθερή την τιμή των αυτοκινήτων και ένα μετριοπαθές σενάριο μέσης ετήσιας αύξησης του κατά κεφαλήν ΑΕΠ της τάξης του 1.2%, έως το 2031 θα είχαμε αύξηση των οχημάτων κατά 28% σε σχέση με το 1996 φθάνοντας έτσι την τιμή των 0.632 οχημάτων/άτομο από 0.493 οχήματα/άτομο που ήταν το 1996.

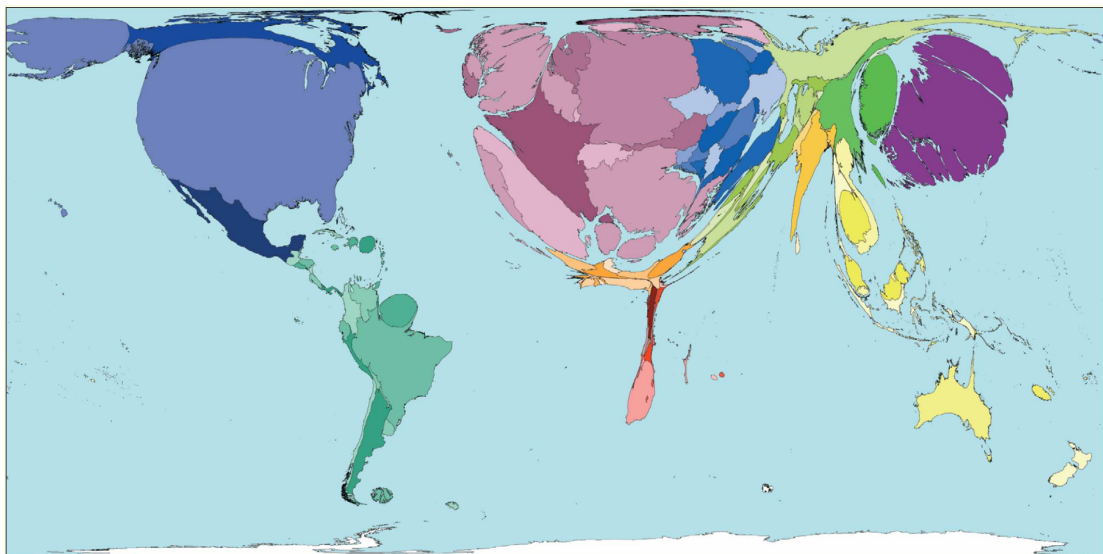
Υποθέτοντας γραμμική συμπεριφορά στο διάστημα αυτό, υπολογίζουμε ότι το 2008 θα αντιστοιχούν 0.54 οχήματα/άτομο και το 2018, 0.58 οχήματα/άτομο, ποσοστιαία μεταβολή της τάξης του 7.4%. Είναι λογικό να υποτεθεί πως δεν θα συμβάλει ολόκληρο το ποσοστό ως ζήτηση στους δρόμους λόγω της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς ή της κοινής χρήσης αυτοκινήτου από περισσότερους κατόχους για κάποιες μετακινήσεις.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1 [2], βάσει δεδομένων του 2002 οι περιοχές με την μεγαλύτερη αναλογία οχημάτων/άτομο είναι με φθίνουσα σειρά, η Δυτική Ευρώπη, η Ιαπωνία, οι ΗΠΑ (με τιμές στην περιοχή 0.4-0.46 οχήματα/άτομο) και με διαφορά ακολουθούν Ανατολική Ευρώπη, Νότια Αμερική και Μέση Ανατολή (με τιμές στην περιοχή 0.08-0.16 οχήματα/άτομο).

Τα παραπάνω δίδονται πιο παραστατικά, στο χάρτη του Σχήματος 1.2, ο οποίος αποτελεί ένα βαρόμετρο των κατά κεφαλήν αυτοκινήτων. Όσο περισσότερα αυτοκίνητα αντιστοιχούν σε κάθε πολίτη της εκάστοτε χώρας, τόσο πιο διογκωμένη εμφανίζεται αυτή στο χάρτη [2].



Σχήμα 1.1 Αριθμός αυτοκινήτων ανά 100 άτομα



Σχήμα 1.2 Χάρτης-βαρόμετρο των κατά κεφαλήν αυτοκινήτων

Στον Πίνακα 1.1 [2] συγκεντρώνονται οι χώρες με τα περισσότερα και λιγότερα κατά κεφαλήν αυτοκίνητα.

Πίνακας 1.1 Χώρες με τα περισσότερα (αριστερά) και τα λιγότερα (δεξιά) κατά κεφαλήν αυτοκίνητα

MOST AND FEWEST CARS					
Rank	Territory	Value	Rank	Territory	Value
1	New Zealand	61.3	191	Afghanistan	0.16
2	Luxembourg	57.6	192	Chad	0.15
3	Iceland	56.1	193	Nepal	0.10
4	Canada	55.9	194	Ethiopia	0.10
5	Italy	54.2	195	Armenia	0.09
6	Germany	51.6	196	Somalia	0.08
7	Switzerland	50.7	197	Myanmar	0.06
8	Malta	50.5	198	Central African Republic	0.05
9	Austria	49.4	199	Bangladesh	0.05
10	Australia	49.3	200	Tajikistan	0.04

passenger cars per hundred people

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, καταλήγουμε στο ότι παγκοσμίως τα αυτοκίνητα συγκεντρώνονται στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες. Ανάμεσά τους, πρωτοστατούν οι χώρες της Δυτικής Ευρώπης και ο Καναδάς, ενώ ακολουθεί η Αυστραλία. Ιδιαίτερα μεγάλο αριθμό κατά κεφαλήν αυτοκινήτων παρουσιάζει η Νέα Ζηλανδία που βρίσκεται και πρώτη στην κατάταξη. Εάν τώρα, ληφθεί υπόψη και η πληθυσμιακή πυκνότητα των χωρών αυτών, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το ποιες ανάμεσά τους ενδέχεται να παρουσιάζουν φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης και κατ' επέκταση ποιες είναι αυτές που στο μέλλον θα χρειαστούν να εφαρμόσουν μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού.

1.3 Περιεχόμενο της εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα είδη των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης και στην συνέχεια παρουσιάζεται το μακροσκοπικό μοντέλο METANET. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι στρατηγικές ελέγχου ALINEA και AMOC. Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται σύντομα το υπ' εξέταση δίκτυο ως προς την μορφολογία και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Στο πέμπτο κεφάλαιο εφαρμόζονται οι προαναφερθείσες στρατηγικές ελέγχου για τα δύο σενάρια ζήτησης και αναλύονται επιλεκτικά κάποια σενάρια. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα.

2. Μαθηματικά Μοντέλα προσομοίωσης

Όταν βρισκόμαστε αντιμέτωποι με ένα πρόβλημα προσομοίωσης πρέπει να επιλέξουμε πρωτίστως ένα μοντέλο για την ανάλυσή του [3], [4]. Για την επιλογή του μοντέλου πρέπει να ληφθούν υπ' όψη τα ακόλουθα στοιχεία:

- η **ακρίβεια** με την οποία αναλύονται τα κύρια στοιχεία του φαινομένου
- οι **αλληλεπιδράσεις** που τυχόν εμφανίζουν
- ο **υπολογιστικός φόρτος** που απαιτείται για την υλοποίηση του μοντέλου αυτού

Ο τελευταίος παράγοντας είναι ο σημαντικότερος στην λήψη της τελικής απόφασης για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου και αυτό επειδή ένα μοντέλο που κάνει χρήση μεγάλης ακρίβειας, θα χρειάζεται και έναν αντίστοιχα μεγάλο χρόνο εκτέλεσης προκειμένου να ανευρεθεί λύση.

Η ακρίβεια είναι και αυτή ιδιαίτερα σημαντική ως παράγοντας, επειδή όσο αυτή αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και ο χρόνος εκτέλεσης, δίνοντας έτσι πιο αναλυτικά αποτελέσματα, τα οποία ωθούν όμως σε υψηλότερες ανάγκες επεξεργασίας.

Όσο αφορά στην περίπτωση ενός δικτύου αυτοκινητόδρομου υπάρχουν 3 κύρια μοντέλα που δύνανται να χρησιμοποιηθούν:

- Μικροσκοπικό
- Μεσοσκοπικό
- Μακροσκοπικό

Το πρώτο θεωρεί και αναλύει την συμπεριφορά κάθε ενός ξεχωριστού αυτοκινήτου που βρίσκεται στο δίκτυο, λαμβάνοντας υπ' όψη παράγοντες όπως η συμπεριφορά του οδηγού, το μέγεθος και η ταχύτητα του οχήματος. Περιγράφει την μετακίνηση των οχημάτων τόσο οριζόντια, όσο και κάθετα (αλλαγή λωρίδας). Για ένα δίκτυο όπως αυτό του Άμστερνταμ όπου ο αριθμός των αυτοκινήτων θα ήταν της τάξης των μερικών χιλιάδων, ο χρόνος εκτέλεσης θα ήταν απαγορευτικός, κυρίως αν χρειάζονται περισσότερα από ένα τρεξίματα του προγράμματος.

Τα μεσοσκοπικά μοντέλα ομαδοποιούν ορισμένα από τα οχήματα βάσει κάποιων κοινών φυσιολογικών και κινησιολογικών ιδιοτήτων.

Τα μακροσκοπικά ωστόσο, αντιμετωπίζουν το πρόβλημα από μια αρκετά διαφορετική οπτική γωνία. Τα οχήματα παριστούνται ως ρευστά και χαρακτηρίζονται ως τέτοια από μεγέθη όπως η πυκνότητα, η ροή και η ταχύτητα.

Λόγω του μεγάλου βαθμού απλοποίησης του προβλήματος, στα μακροσκοπικά μοντέλα, ο υπολογιστικός φόρτος μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα γρήγορο και ευέλικτο μοντέλο το οποίο δεν στερείται σε ορθότητα αποτελεσμάτων. Είναι αυτές οι ιδιότητες που καθιστούν τα μακροσκοπικά μοντέλα κατάλληλα για αναπαράσταση προβλημάτων όπως είναι ο έλεγχος ροής σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων.

Ανά τα χρόνια, έχει αναπτυχθεί ένα σύνολο δυναμικών μακροσκοπικών μοντέλων με την μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων. Τα μοντέλα πρώτης τάξης περιέχουν μια σταθερή σχέση ταχύτητας-πυκνότητας, ενώ τα δεύτερης τάξης κάνουν χρήση μιας δυναμικής της μέσης ταχύτητας με αποτέλεσμα την πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση του προβλήματος.

Ένα άλλο θέμα που συνδέεται με την χρήση μακροσκοπικών μοντέλων, είναι η διακριτοποίηση χρόνου-χώρου των σχετικών μερικών διαφορικών εξισώσεων που είναι απαραίτητη προκειμένου να είναι εφικτή η αριθμητική επίλυση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτές οι προσεγγίσεις απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό φόρτο εξαιτίας της σύνθετης μορφής τους ενώ παράλληλα δεν παράγουν ιδιαίτερα ορθά αποτελέσματα. Εναλλακτικά, μια πιο εφαρμόσιμη προσέγγιση είναι η στήριξη της διακριτοποίησης των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε πιο απλές υπολογιστικές μεθόδους που θα οδηγήσουν σε αναλυτικά μοντέλα κατάστασης-χώρου που είναι και άμεσα επικυρώσιμα. Το κύριο μειονέκτημά τους, είναι ότι η όποια θεωρητική εμβάθυνση και τα όποια αποτελέσματα που παράγονται από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις, δεν ανάγονται άμεσα στα διακριτοποιημένα μοντέλα.

2.1 METANET – Γενικά

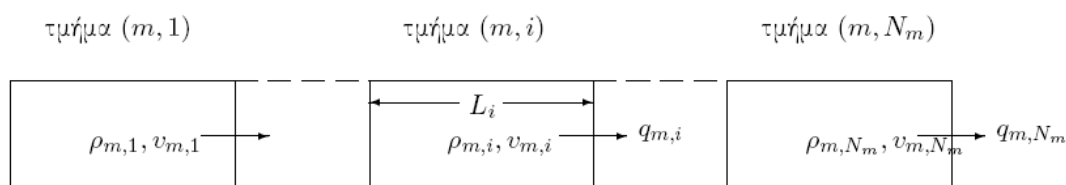
Το μοντέλο METANET [3], [5], [6] είναι ένα δευτέρας τάξης μακροσκοπικό αιτιοκρατικό μοντέλο προσομοίωσης ροής σε αυτοκινητιστικά δίκτυα, όπου η κυκλοφοριακή κατάσταση περιγράφεται από την πυκνότητα, τη μέση ταχύτητα, και τις ουρές των οχημάτων και λαμβάνει υπόψη του τις διαταραχές που επιδρούν στην κυκλοφορία.

Το METANET αποτελεί ένα πρόγραμμα μακροσκοπικής προσομοίωσης ροής σε οδικά δίκτυα. Είναι κατάλληλο για εφαρμογή τόσο σε καταστάσεις ελεύθερης, κρίσιμης, αλλά και συμφορημένης ροής. Περιλαμβάνει επίσης τη δυνατότητα μοντελοποίησης γεγονότων που μειώνουν την δυναμικότητα του δικτύου, όπως είναι τα ατυχήματα. Ακόμη, μπορεί να λάβει υπόψη του έλεγχο στις ράμπες εισόδου, και στις συνδέσεις με άλλους αυτοκινητόδρομους καθώς και καθοδήγηση πορείας. Έχει δύο μεθόδους λειτουργίας:

1. **Προσανατολισμένη**, όταν γίνεται χρήση καθοδήγησης της κίνησης και
2. **Μη προσανατολισμένη**, όταν δεν γίνεται χρήση καθοδήγησης της κίνησης.

Ο αυτοκινητόδρομος εμφανίζεται ως ένας προσανατολισμένος γράφος του οποίου οι σύνδεσμοι αντιστοιχούν σε τμήματα αυτοκινητόδρομου. Κάθε σύνδεσμος έχει ομοιόμορφα χαρακτηριστικά. Σε περίπτωση που αλλάζει σημαντικά η γεωμετρία ή υπάρχει ράμπα εισόδου/εξόδου ή συμβολή αυτοκινητόδρομου με άλλο δίκτυο, γίνεται χρήση κόμβων.

Η μοντελοποίηση ακολουθεί την εξής λογική: το δίκτυο χωρίζεται σε τμήματα (σύνδεσμοι) τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με κόμβους όπου υπάρχει αλληλεπίδραση με κάποιο άλλο μέρος αυτού ή άλλου δικτύου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης κόμβων είναι πριν και μετά τις ράμπες εισόδου/εξόδου. Οι σύνδεσμοι υποδιαιρούνται σε στοιχειώδη τμήματα (*segments*) μήκους 300-800m. Ο m -σύνδεσμος του αυτοκινητόδρομου διακριτοποιείται σε N_m **τέτοια τμήματα** ίσου μήκους μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 [7].



Σχήμα.2.1 Διακριτοποιημένος σύνδεσμος

Η διακριτοποίηση του χρόνου αφορά σε ολόκληρη την διάρκεια της προσομοίωσης και λαμβάνει **βήμα** T . Αυτό ισχύει για κάθε **τμήμα** i , κάθε **συνδέσμου** m , σε κάθε **χρονική στιγμή** $t = k \cdot T$, $k = 0, 1, \dots, K$, όπου K ο **χρονικός ορίζοντας**.

Οι μακροσκοπικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

- **Πυκνότητα** $\rho_{m,i}(k)$ – *Εξίσωση της συνέχειας* (οχήματα/km/λωρίδα)

Συμβολίζει τον αριθμό των αυτοκινήτων στο τμήμα i του συνδέσμου m κατά την χρονική στιγμή $k \cdot T$ διαιρεμένο κατά το **μήκος του συνδέσμου** L_m και τον **αριθμό των λωρίδων** λ_m .

- **Μέση ταχύτητα** $v_{m,i}(k)$ (km/h)

Είναι η μέση ταχύτητα που αναπτύσσεται από τα οχήματα που βρίσκονται στο τμήμα i του συνδέσμου m κατά την χρονική στιγμή $k \cdot T$.

- **Ροή ή όγκος κίνησης** $q_{m,i}(k)$ (οχήματα/h)

Συμβολίζει τον αριθμό των αυτοκινήτων που εξέρχονται του τμήματος i του συνδέσμου m κατά το χρονικό διάστημα $[k \cdot T, (k+1) \cdot T)$ διαιρεμένο κατά T .

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε τα είδη των συνδέσμων που χρησιμοποιούνται από το METANET.

2.2 Είδη συνδέσμων αυτοκινητοδρόμων

2.2.1. Απλοί σύνδεσμοι αυτοκινητοδρόμων

Οι σύνδεσμοι, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου και απαρτίζονται από μικρότερα τμήματα μήκους που κυμαίνεται μεταξύ 300 και 800 μέτρων (Σχήμα 2.1).

Χαρακτηρίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

- **Πυκνότητα** ρ – *Εξίσωση της συνέχειας* (οχήματα/km/λωρίδα)

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

- **Μέση ταχύτητα v (km/h)**

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} [V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)] + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) \cdot [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] - \frac{\nu T [\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)]}{\tau L_m [\rho_{m,i}(k) + \kappa]}$$

- **Ροή ή όγκος κίνησης q (οχήματα/h)**

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) \cdot v_{m,i}(k) \cdot \lambda_m$$

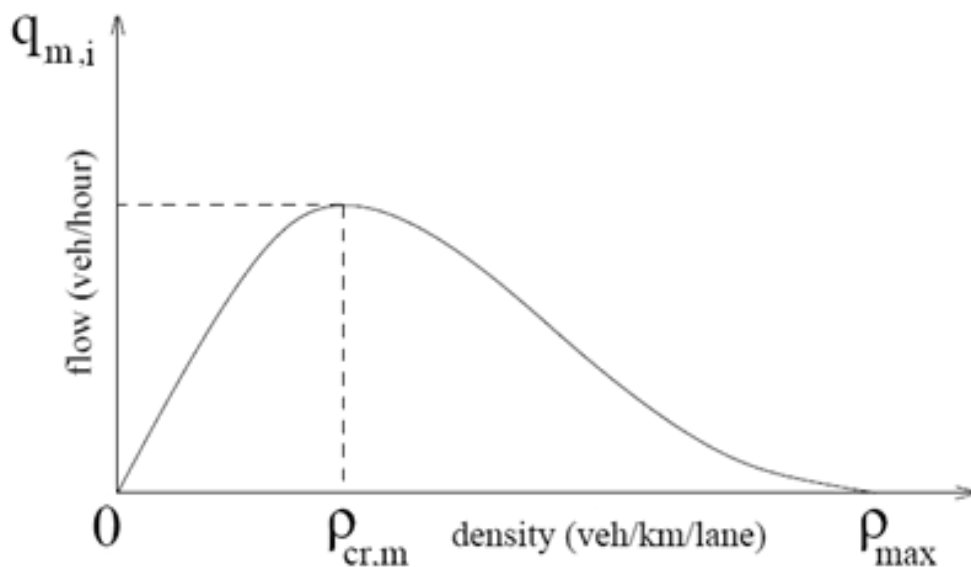
- **Θεμελιώδες διάγραμμα (Σχήμα 2.2)**

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

Όπου:

- $v_{f,m}$ συμβολίζει την ταχύτητα ελεύθερης ροής του συνδέσμου m
- $\rho_{cr,m}$ η κρίσιμη πυκνότητα ανά λωρίδα του συνδέσμου m (η πυκνότητα όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή της ροής)
- a_m μία παράμετρος του θεμελιώδους διαγράμματος του συνδέσμου m
- τ, ν, κ σταθερές ίδιες για κάθε σύνδεσμο

Οι παραπάνω αποτελούν μέρος των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του κυκλοφοριακού συστήματος και οι τιμές τους εξαρτώνται από την γεωμετρία του δρόμου, την συμπεριφορά των οδηγών, την γεωμετρία των οχημάτων κ.τ.λ.



Σχήμα 2.2 Θεμελιώδες διάγραμμα

Η κίνηση εντός των απλών συνδέσμων ορίζεται κατά βάση από το θεμελιώδες διάγραμμα. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η V παραμένει σταθερή εντός του συνδέσμου εφόσον επικρατούν συνθήκες σταθερής κατάστασης και χωρικής ομοιογένειας. Η μορφή του θεμελιώδους διαγράμματος ορίζεται από την ελεύθερη ταχύτητα ροής $v_{f,m}$, την κρίσιμη πυκνότητα $\rho_{cr,m}$ και την παράμετρο a_m .

Οι τιμές των μεταβλητών που ορίζουν κάθε τμήμα στον ορίζοντα του χρόνου, υπολογίζονται, ξεκινώντας από κάποιες αρχικές τιμές και κάνοντας χρήση γνωστών διαφορικών και αλγεβρικών σχέσεων. Αυτό πραγματοποιείται σε κάθε επανάληψη της μεθόδου.

2.2.2. Ψευδοσύνδεσμοι

Όταν δύο πραγματικοί κόμβοι βρίσκονται πολύ κοντά και ο σύνδεσμος που τους ενώνει δεν συνεισφέρει αισθητά στο σύστημα, μπορεί αυτό να αντικατασταθεί από έναν ψευδοσύνδεσμο για τον οποίο δεν πραγματοποιούνται υπολογισμοί και απλά αποθηκεύει τα δεδομένα των ανάντη και κατάντη κόμβων στα σημεία σύνδεσής τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, αφού η προσομοίωση θα απαιτούσε να χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα μικρό χρονικό βήμα, αυξάνοντας έτσι τον χρόνο εκτέλεσης.

2.2.3. Σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης

Οι σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης περιγράφουν με μικρότερη ακρίβεια την κυκλοφοριακή ροή σε σχέση με τους απλούς συνδέσμους. Χρησιμοποιούνται στις συμβολές του αυτοκινητόδρομου με άλλους αυτοκινητόδρομους ή και αστικά δίκτυα και γενικά έχουν μικρό μήκος. Αποφεύγεται όμως η χρήση ψευδοσυνδέσμων λόγω των σημαντικών αλληλεπιδράσεων που πραγματοποιούνται μέσα σε αυτούς αλλά και της αδυναμίας των ψευδοσυνδέσμων να τις περιγράψουν. Ενώ από την άλλη, η χρήση απλών συνδέσμων θα απαιτούσε μεγαλύτερο υπολογιστικό φόρτο καθώς και θα παρέλειπε σημαντικές πληροφορίες όπως είναι οι ουρές, οι επιθυμητοί και πραγματικοί όγκοι κλ.

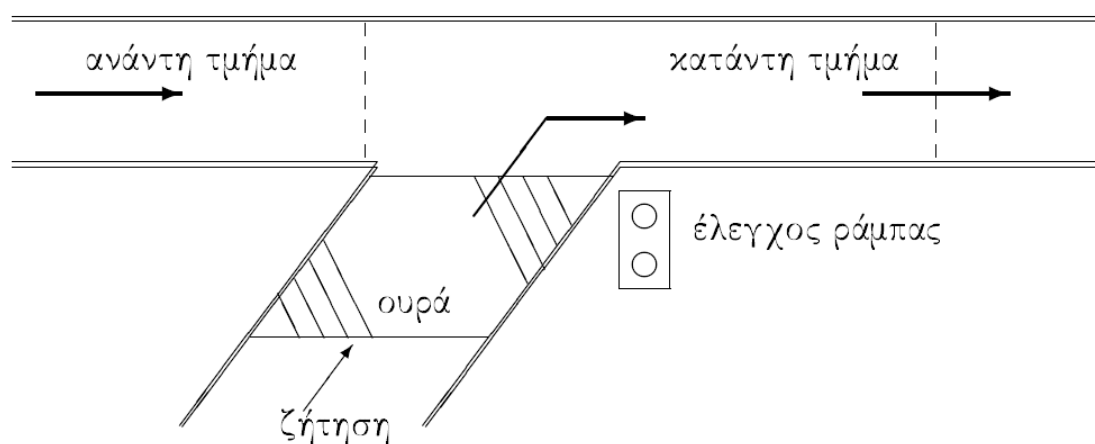
Όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται και για σύνδεση με αστικά δίκτυα σε περιπτώσεις όπου υπάρχει περιορισμένη χωρητικότητα.

Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι η σύνδεση του αυτοκινητόδρομου με κάποιο παρακείμενο δίκτυο του οποίου ένα μέρος περιγράφεται από τους συνδέσμους αποθήκευσης και προώθησης.

Εφαρμογή αυτών των συνδέσμων γίνεται και στην περίπτωση όπου υπάρχει κάποιος φωτεινός σηματοδότης πριν μια ράμπα εισόδου ή μετά μια ράμπα εξόδου. Τότε, εάν τα φανάρια κατευθύνουν την κίνηση βάσει ελέγχου ανοιχτού βρόγχου, οι σύνδεσμοι ρυθμίζονται στον αντίστοιχο ρυθμό εισόδου/εξόδου. Εάν από την άλλη πρόκειται για σηματοδότες που λειτουργούν βάσει ελέγχου κλειστού βρόγχου, αντιδρώντας έτσι στις διακυμάνσεις της κίνησης, οι σύνδεσμοι μπορούν να προσαρμόζουν τους ρυθμούς εισόδου/εξόδου αντίστοιχα.

Εν γένει, η προσομοίωση των συνδέσμων αποθήκευσης και προώθησης βασίζεται σε μια σταθερή χρονική τιμή που αφορά χρόνο διαδρομής, καθώς και στην χωρητικότητά τους, αφού εάν αυτή ξεπεραστεί η κίνηση μεταφέρεται μέσα στο δίκτυο του αυτοκινητόδρομου.

2.2.4. Σύνδεσμοι Εισόδου (ράμπες εισόδου)



Σχήμα.2.3 Ράμπα εισόδου

Οι σύνδεσμοι εισόδου (Σχήμα 2.3 [7]) είναι το μέσω τροφοδοσίας του δικτύου με αυτοκίνητα. Είναι μέσω αυτών που πραγματοποιείται η μετάβαση από ένα παρακείμενο δίκτυο προς τον αυτοκινητόδρομο. Χαρακτηρίζονται από τρεις μεταβλητές που αφορούν στην εισροή (d), σχηματιζόμενη ουρά (w) και εκροή (q) αντίστοιχα. Ουρά σχηματίζεται όταν η εισροή είναι μεγαλύτερη της εκροής. Αυτό

ενδέχεται να συμβεί είτε στην περίπτωση που γίνεται χρήση ελέγχου της κίνησης με κάποιο σηματοδότη, είτε όταν συμφόρηση εντός του δικτύου αποτρέπει την είσοδο οχημάτων σε αυτό.

Η εκροή q_o δίνεται από τον τύπο:

$$q_o(k) = r_o(k) \cdot \min \left\{ d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, q_{\max,o}(k) \right\}$$

Όπου:

- $d_o(k)$ η εισερχόμενη ζήτηση την χρονική στιγμή k στην ράμπα o
- $w_o(k)$ το μήκος (σε οχήματα) της ουράς την χρονική στιγμή k στην ράμπα o
- $q_{\max,o}(k)$ η ικανότητα ροής την χρονική στιγμή k στην ράμπα o
- $r_o(k)$ ο ρυθμός εισόδου, με $r_o(k) \in [r_{\min}, 1]$. Αν $r_o(k) = 1$ δεν εφαρμόζεται έλεγχος, ενώ εφαρμόζεται για τιμές μικρότερες της μονάδας.

Η ικανότητα ροής επηρεάζεται από την κατάσταση εντός του δικτύου, κατάντη του κόμβου εισόδου μ με τον ακόλουθο τρόπο:

$$q_{\max,o}(k) = \begin{cases} Q_o & \text{αν } \rho_{\mu,1}(k) < \rho_{cr,\mu} \\ Q_o \cdot p(k) & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Όπου:

- Q_o η ικανότητα ροής της ράμπας και λαμβάνει σταθερή τιμή
- $p(k)$ το μέρος της Q_o που μπορεί να εισέλθει στον σύνδεσμο μ .

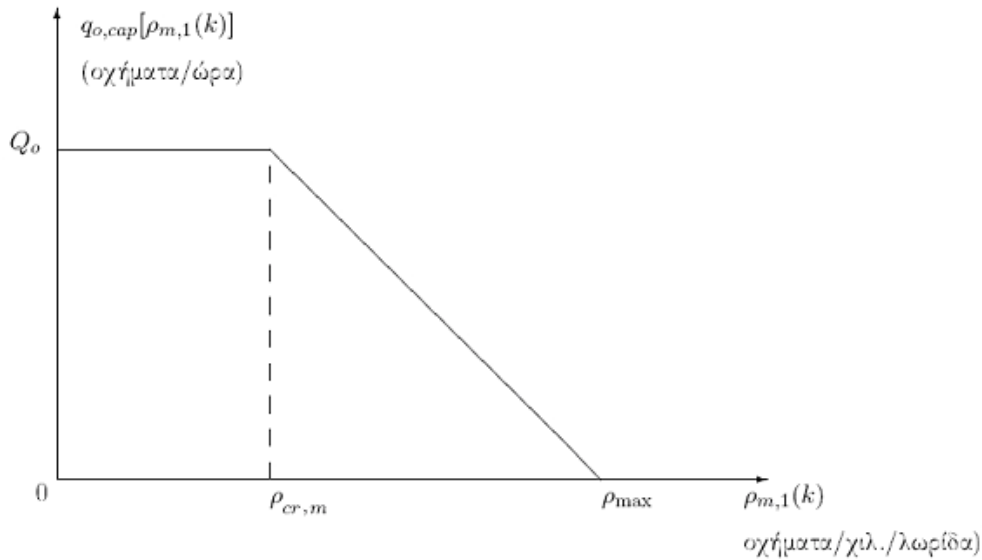
$$p(k) = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\mu,1}(k)}{\rho_{\max} - \rho_{cr,\mu}}$$

με $\rho_{\max}$ να συμβολίζει την μέγιστη δυνατή τιμή πυκνότητας εντός του συνδέσμου του δικτύου.

Η εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή στην ουρά της ράμπας εισόδου έχει ως ακολούθως:

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

Στο Σχήμα 2.4 [7], φαίνεται πως μπορεί η κίνηση μέσα στο αυτοκινητόδρομο να επηρεάσει τον ρυθμό εξόδου από την ράμπα.



Σχήμα.2.4 Επίδραση στην εκροή της ράμπας από συμφόρηση κατάντη αυτής

2.2.5. Σύνδεσμοι εξόδου

Οι σύνδεσμοι εξόδου, αντιστοιχούν στην εκροή του συστήματος, είναι δηλαδή το κύριο μέσο εξόδου των οχημάτων από το δίκτυο. Όπως ισχύει και για τους συνδέσμους αποθήκευσης και προώθησης, ο ρυθμός εξόδου μπορεί να επηρεαστεί από το παρακείμενο αστικό ή άλλο δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της εξόδου, έχοντας υπόψη ότι η συμφόρηση θα μπορούσε να μεταφερθεί εντός του αυτοκινητοδρόμου.

2.3 Μοντελοποίηση κόμβων του δικτύου

Οι κόμβοι αναπαριστούν διακλαδώσεις και συμβολές αρτηριών του δικτύου. Γενικά ένας κόμβος δέχεται κίνηση από ένα σύνολο συνδέσεων εισόδου και την διαθέτει σε ένα σύνολο συνδέσεων εξόδου. Η μερική ροή προς έναν σύνδεσμο εξόδου υπολογίζεται βάσει του συνόλου της κίνησης καθώς και του ποσοστού που επιλέγει να εξέλθει από αυτόν τον σύνδεσμο, το ποσοστό αυτό, ονομάζεται **ποσοστό στροφής (turning rate)** και συμβολίζεται με β_n^m .

Αν $Q_n(k)$ η συνολική εισερχόμενη ζήτηση σε έναν κόμβο, τότε το β_n^m είναι το μέρος της $Q_n(k)$ που φεύγει από τον κόμβο n την χρονική στιγμή k μέσω του

συνδέσμου $m \in O_n$, όπου O_n το σύνολο των συνδέσμων στην έξοδο του κόμβου n .

Έστω I_n το σύνολο των συνδέσμων στην είσοδο του κόμβου n , τότε:

$$Q_n(k) = \sum_{\mu \in I_n} q_{\mu, N_\mu}(k) \quad \forall n$$

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

Όπου:

- $q_{m,0}(k)$ η εκροή από τον κόμβο n προς τον σύνδεσμο m
- ο δείκτης μ υποδεικνύει το πρώτο τμήμα του επόμενου συνδέσμου.

Όταν σε ένα κόμβο υπάρχουν περισσότεροι από έναν εξερχόμενοι σύνδεσμοι, τότε η ανάντη επιρροή της πυκνότητας, λαμβάνεται υπόψη στο τελευταίο τμήμα του συνδέσμου εισόδου. Αυτό γίνεται ως ακολούθως:

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

Όπου $\rho_{n, N_m+1}(k)$ η εικονική πυκνότητα κατάντη του συνδέσμου εισόδου m .

Γίνεται χρήση τετραγώνου της πυκνότητας, προκειμένου να δοθεί βαρύτητα στο γεγονός ότι ένας και μόνο σύνδεσμος εξόδου μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση ανάντη του κόμβου, την στιγμή που στους άλλους συνδέσμους εξόδου, επικρατούν συνθήκες ελεύθερης ροής.

Όταν σε ένα κόμβο υπάρχουν περισσότεροι από έναν εισερχόμενοι σύνδεσμοι, τότε η κατάντη επιρροή της ταχύτητας πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η μέση ταχύτητα υπολογίζεται από:

$$v_{m,0}(k) = \frac{\sum_{\mu \in O_n} v_{\mu, N_\mu}(k) \cdot q_{\mu, N_\mu}(k)}{\sum_{\mu \in O_n} q_{\mu, N_\mu}(k)}$$

Όπου $v_{m,0}(k)$ η εικονική ταχύτητα ανάντη του συνδέσμου εξόδου m .

2.4 Υπολογισμός ολικών κριτηρίων απόδοσης

Προκειμένου να εκτιμηθεί το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων και να γίνει δυνατή η σύγκριση της αποτελεσματικότητας των διαφόρων μεθόδων ελέγχου, εισήχθησαν διάφορα κριτήρια που εφαρμόζονται για το σύνολο του χρόνου προσομοίωσης.

- Συνολικός χρόνος διαδρομή (*TTT: Total Travel Time*)

- Συνολικός χρόνος αναμονής στις ράμπες εισόδου (*TWT: Total Waiting time*)
- Συνολική διανυθείσα απόσταση (*Total Distance Traveled*)
- Συνολική κατανάλωση καυσίμου (*Total Amount of Fuel Consumption*)
- Συνολικό κόστος κατευθυνόμενων οδηγών (*Total disbenefit of routed drivers*)

Από το άθροισμα των δύο πρώτων προκύπτει ο **συνολικός χρόνος** στο δίκτυο για όλους τους οδηγούς (**TTS: Total Time Spent**) και στην παρούσα εργασία αποτελεί και το κατά βάση κριτήριο αξιολόγησης.

$$\mathbf{TTS = TTT + TWT}$$

3. Στρατηγικές Ελέγχου

3.1 Γενικά

Το φαινόμενο της κυκλοφοριακής ροής σε αυτοκινητόδρομους περιέχει ένα σύνολο τυχαίων και απρόβλεπτων παραγόντων. Γι' αυτό τον λόγο θα ήταν μάταιο να επιχειρηθεί η πρόβλεψή ή/και η μοντελοποίησή τους. Κινούμενοι σε αυτά τα πλαίσια [9], θεωρούμε το φαινόμενο ως αιτιοκρατικό, το οποίο όμως επηρεάζεται από ένα σύνολο στοχαστικών παραμέτρων οι οποίες επιδρούν σε αυτό με την μορφή διακυμάνσεων.

Τα άνωθεν, οδηγούν στη ανάγκη χρήσης ενός ελεγκτή που να είναι ικανός να ελέγχει την κυκλοφορία σε πραγματικό χρόνο. Κάθε στρατηγική ελέγχου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα:

- Η ροή εντός του δικτύου πρέπει να διατηρείται κοντά στην επιθυμητή τιμή, προκειμένου να αξιοποιείται στο μέγιστο η δυναμικότητά του.
- Να κάνει σωστή χρήση των ραμπών εισόδου προκειμένου να διαθέσει τόσο την αρχική, όσο και την εισερχόμενη ζήτηση με τον καλύτερο τρόπο εντός του δικτύου, ελαχιστοποιώντας έτσι τον συνολικό χρόνο διαδρομής των οδηγών.
- Επειδή το δίκτυο χρησιμοποιείται σε καθημερινή βάση από τους οδηγούς, πρέπει να γίνει ομοιόμορφη κατανομή τόσο των καθυστερήσεων, όσο και της ικανότητας του δικτύου ανάμεσα στις ράμπες.

Κατά την υλοποίηση της διαδικασίας ελέγχου σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, είναι απαραίτητα όργανα μέτρησης/αισθητήρες, προκειμένου να υπολογιστούν οι μεταβλητές ελέγχου (*πυκνότητα* - ρ , *μέση ταχύτητα* - v , *ροή* - q , *ουρές στις εισόδους* - w) με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ακρίβεια των οργάνων αυτών είναι ιδιαίτερης σημασίας και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο έχει αναπτυχθεί πληθώρα μεθόδων και εργαλείων [7].

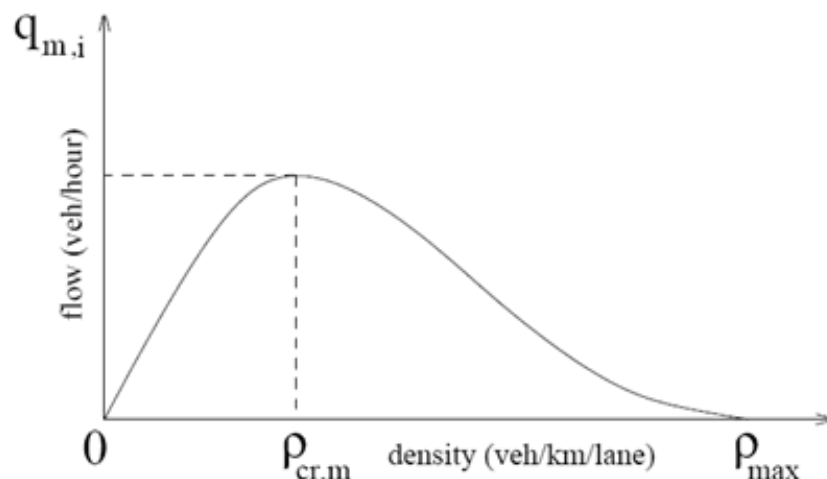
Ενδεικτικά θα αναφερθούν:

- **Φωρατές** που τοποθετούνται στο οδόστρωμα και μετρούν τη μέση ταχύτητα και το ποσοστό κατάληψης του οδοστρώματος από οχήματα
- **Κάμερες** σε συνδυασμό με λογισμικό επεξεργασίας εικόνας που υπολογίζουν το σύνολο των μεταβλητών ελέγχου εντός του αυτοκινητόδρομου
- Αισθητήρες **laser** και **υπερήχων**, που υπολογίζουν μέση ταχύτητα και ροή.

3.2 ALINEA

Η ALINEA [10] αποτελεί έναν τοπικό αλγόριθμο, ελέγχου κλειστού βρόγχου της εισερχόμενης ζήτησης. Προσπαθεί να διατηρήσει την πυκνότητα σε τιμές κοντά σε μια επιθυμητή, στην περίπτωση μας δηλαδή κοντά στην κρίσιμη πυκνότητα $\rho_{cr,m}$, αυξάνοντας τον ρυθμό εισόδου όταν βρίσκεται κάτω από την $\rho_{cr,m}$ και μειώνοντας τον ρυθμό εισόδου όταν έχει ξεπεραστεί η τιμή αυτή.

Στο θεμελιώδες διάγραμμα (Σχήμα 3.1), μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως υπάρχει μια τιμή της πυκνότητας ($\rho_{cr,m}$) που δίνει την μέγιστη ροή στο δίκτυο. Είναι αυτή ακριβώς η πυκνότητα που προσπαθούμε να διατηρήσουμε, εφαρμόζοντας έλεγχο τύπου **I-ελεγκτή** με χρήση της ALINEA.



Σχήμα.3.1 Θεμελιώδες διάγραμμα

Η συνάρτηση ελέγχου είναι η ακόλουθη:

$$r(k) = r(k-1) - K_{AL} \cdot [\rho_{out}(k) - \hat{\rho}]$$

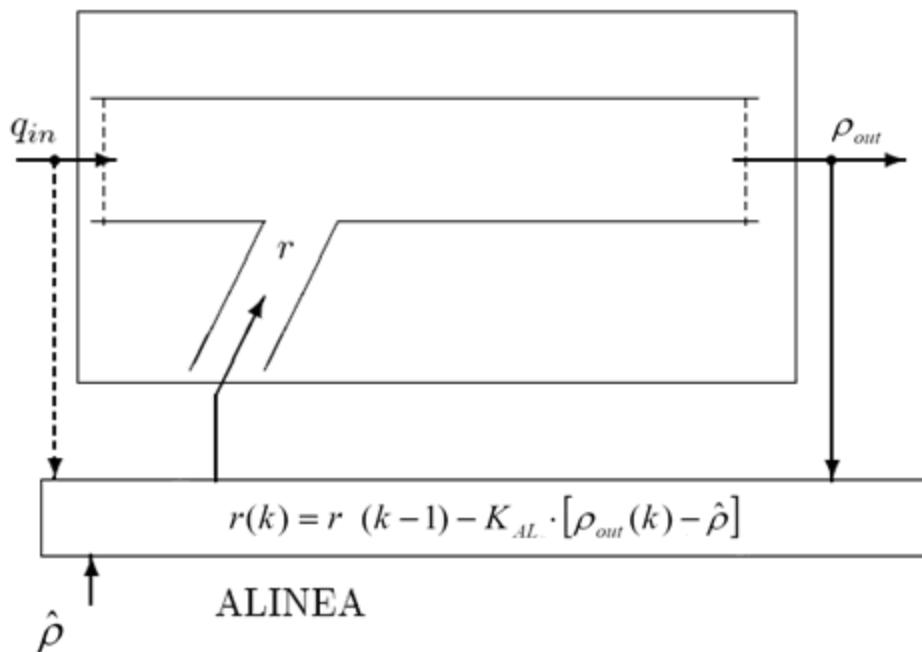
όπου,

- $r(k)$: ο επιθυμητός όγκος εξόδου από τη ράμπα κατά την χρονική στιγμή k
- ρ_{out} : η πυκνότητα κατάντη της ράμπας
- K_{AL} : σταθερή θετική παράμετρος ελέγχου
- $\hat{\rho}$: επιθυμητή τιμή πυκνότητας

Σημειώνεται ότι:

- Ορίζεται μια τιμή ρ_{min} ώστε σε περίπτωση που η τιμή της πυκνότητας κατάντη της ράμπας είναι μικρότερη από αυτήν να απενεργοποιείται ο έλεγχος.
- Η συνάρτηση οριοθετείται στο διάστημα $[r_{min}, r_{max}]$, όπου η r_{max} συνιστά την μέγιστη δυνατή ροή από την ράμπα προς το δίκτυο.

Η λειτουργία της ALINEA φαίνεται πιο παραστατικά στο Σχήμα 3.2 [8].



Σχήμα.3.2 Εφαρμογή ελέγχου ALINEA σε ράμπα εισόδου

Ένα από τα κύρια προτερήματα της ALINEA είναι η ομαλή και ήπια αντίδραση σε μικρές διακυμάνσεις του $[\rho_{out}(k) - \hat{\rho}]$, πράγμα που διευκολύνει την σταθεροποίηση της κατάντη ροής σε υψηλό επίπεδο.

Η τροφοδότηση ενός δικτύου, πραγματοποιείται από κίνηση που εξέρχεται από κάποιο παρακείμενο δίκτυο και εισέρχεται σε αυτό μέσω κάποιας ράμπας εισόδου. Εξαιτίας συμφόρησης εντός του δικτύου ή έντονης ζήτησης στη ράμπα εισόδου, το μήκος της ουράς (w_o) που σχηματίζεται σε αυτήν, ενδέχεται να υπερβεί το ανώτατο όριό της ($w_{max,o}$). Για την αποφυγή αυτού ακριβώς του φαινομένου, γίνεται χρήση μιας πολιτικής ελέγχου της ουράς:

$$r'(k) = -\frac{1}{T} [w_{max} - w(k)] + d(k-1)$$

Όπου, $r'(k)$ η ροή που εισέρχεται στον αυτοκινητόδρομο. Ο τόνος χρησιμεύει για να ξεχωρίζει από τον επιθυμητό όγκο εξόδου όπως αυτός αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου.

Η τελικός όγκος εξόδου της ράμπας o , θα δίνεται από:

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

Λόγω του πεπερασμένου μεγέθους των ραμπών, δημιουργείται η ανάγκη περιορισμού της ουράς, προκειμένου να μην επηρεαστεί το παρακείμενο δίκτυο. Ορίζεται, λοιπόν, κάποιο κρίσιμο μήκος ουράς, προκειμένου να πραγματοποιείται αύξηση του ρυθμού εξόδου όταν επιτυγχάνεται το μήκος αυτό.

Η καθαρή υπεροχή του ελεγκτή της ALINEA σε σχέση με αντίστοιχους ελεγκτές που εφαρμόζονται, όπως αυτός της Ζήτησης-Χωρητικότητας ή αυτός της Κατάληψης, φαίνεται από συγκριτική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε [7], αποδεικνύοντας ότι η ALINEA παράγει αποτελέσματα (βάσει Συνολικού Χρόνου Διαδρομής) από 480% έως 4000% βελτιωμένα σε σχέση με τους άλλους ελεγκτές. Δεν μειώνει μόνο τον Συνολικό χρόνο διαδρομής, αλλά υποδιπλασιάζει σε σχέση με την περίπτωση απουσίας ελέγχου, τη Μέση Διάρκεια Συμφόρησης για τις πρωινές ώρες υψηλής ζήτησης (07:00-10:00).

3.3 Βέλτιστος Έλεγχος (AMOC)

Προκειμένου να μπορεί να αξιολογηθεί οποιοδήποτε αποτέλεσμα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μέτρου σύγκρισης το οποίο να παράγει λύσεις που να βρίσκονται κοντά στο βέλτιστο.

Η λύση που παράγεται από το AMOC [9] είναι αποτέλεσμα βέλτιστου ελέγχου ανοιχτού βρόγχου. Το τροφοδοτούμε δηλαδή με ένα διάνυσμα αρχικής κατάστασης $\mathbf{x}(\mathbf{0})$ και βάσει αυτού υπολογίζει την βέλτιστη στρατηγική σε κάθε χρονική στιγμή.

Στην στρατηγική AMOC, το πρόβλημα συνδυασμένου ελέγχου πραγματώνεται ως πρόβλημα βέλτιστου δυναμικού ελέγχου με περιορισμένες μεταβλητές ελέγχου. Το πρόβλημα δύναται να λυθεί αριθμητικά, με δεδομένα ζήτηση και ποσοστό στροφής. Η έκφραση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου, είναι η ακόλουθη:

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

υ.π.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)], \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$$

$$u_{i,\min} \leq u_i(k) \leq u_{i,\max} \quad \forall i = 1, \dots, m$$

όπου:

- **K**: ο χρονικός ορίζοντας
- **x**: το διάνυσμα κατάστασης
- **u**: το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου
- **d**: το διάνυσμα των διαταραχών
- **φ, θ**: διπλά παραγωγίσιμες, μη-γραμμικές συναρτήσεις κόστους
- **f**: μη-γραμμική συνάρτηση που μπορεί να σχηματιστεί με την χρήση των εξισώσεων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια

Αφότου η στρατηγική του AMOC βασίζεται στο μοντέλο METANET, όπως αυτό περιγράφηκε, είναι λογικό το **διάνυσμα κατάστασης x** να περιλαμβάνει τις *πυκνότητες (ρ)* και *μέσες ταχύτητες (v)* για κάθε σύνδεσμο καθώς και τις *ουρές (w)* στις εισόδους.

Το **διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου u** , συνίσταται από τους *ρυθμούς εισόδου (r_o)* στις ράμπες, υπό τον περιορισμό $r_{o,\min} \leq r_o(k) \leq 1.0$. Όπου $r_{o,\min}$ καθιστά τον ελάχιστο επιτρεπτό ρυθμό εισόδου.

Το **διάνυσμα των διαταραχών d** , περιλαμβάνει όλες τις *ζητήσεις* σε κάθε είσοδο του δικτύου καθώς και όλα τα *ποσοστά στροφής* στις διάφορες διακλαδώσεις.

Το κριτήριο κόστους του AMOC, βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του **Συνολικού χρόνου (TTS)** που ξοδεύουν οι οδηγοί στο δίκτυο, επειδή αυτό περιλαμβάνει τόσο τον *χρόνο αναμονής* στις εισόδους, όσο και τον *χρόνο διαδρομής*.

$$J = T \sum_k \left\{ \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m + \sum_o w_o(k) + a_f \sum_o [r_o(k) - r_o(k-1)]^2 + a_w \sum_o \psi[w_o(k)]^2 \right\}$$

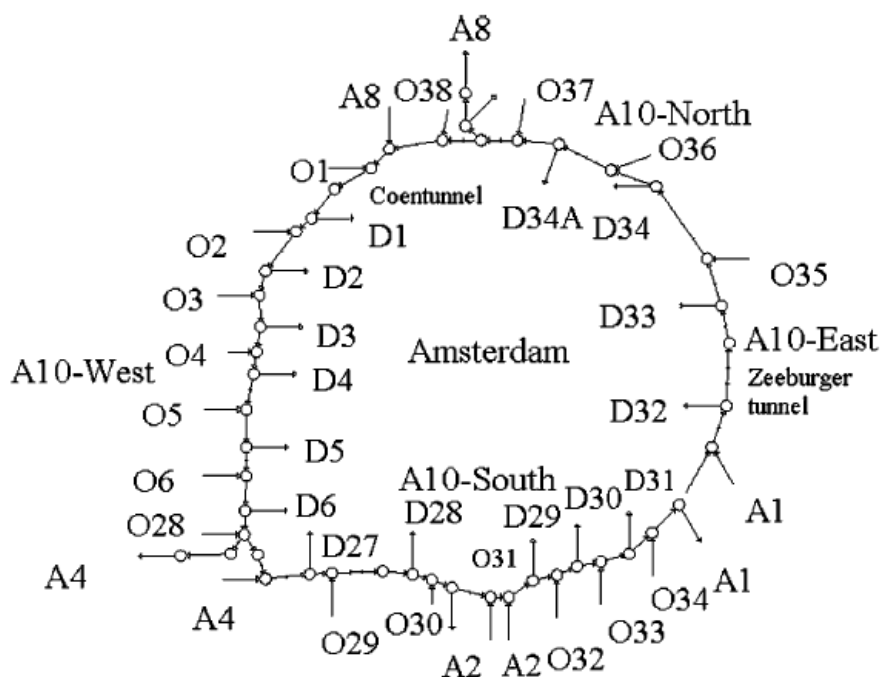
όπου:

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

- **Οι πρώτοι 2 όροι** είναι ενδεικτικοί της αποτελεσματικότητας του δικτύου και αντιστοιχούν στο **TTS**.
- **Ο συντελεστής a_f** , στοχεύει στην μείωση των διακυμάνσεων των τροχιών ελέγχου που εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα.
- **Ο συντελεστής a_w** , είναι αναγκαίος προκειμένου να περιοριστούν οι ουρές στις εισόδους σε επιθυμητά επίπεδα.
- **Οι παράμετροι $w_{o,\max}$** , είναι σταθερές που ορίζονται κατά την μοντελοποίηση του δικτύου και εκφράζουν το μέγιστο δυνατό αριθμό οχημάτων στην ουρά της εισόδου ο.

4. Περιφερειακός Δακτύλιος του Άμστερνταμ

4.1 Τοπολογία - Περιγραφή του δικτύου



Σχήμα.4.1 Περιφερειακός δακτύλιος του Άμστερνταμ – Τοπολογία ραμπών εισόδου/εξόδου

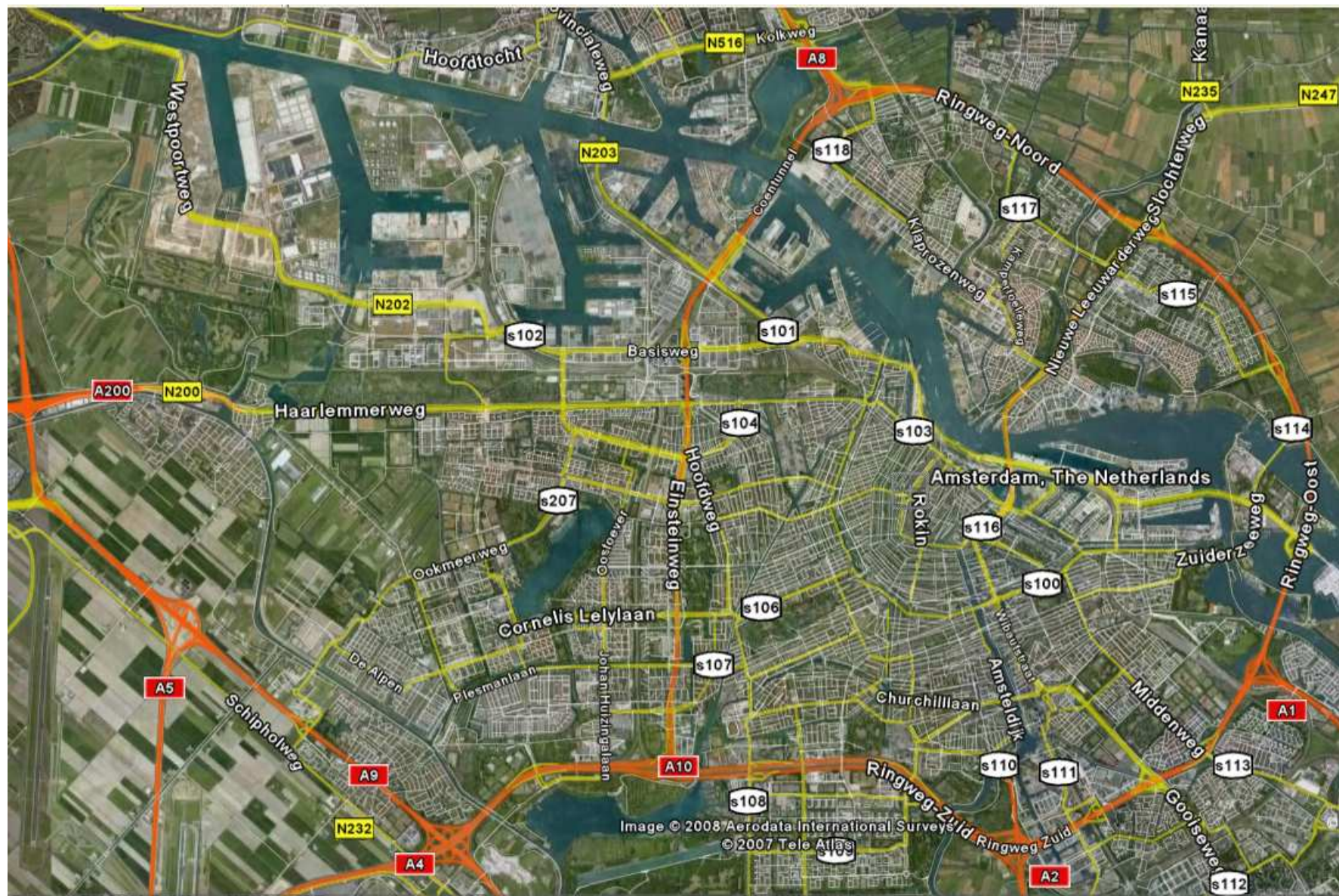
Προκειμένου να μοντελοποιηθεί σωστά ένα δίκτυο καθώς και για να γίνει ορθή επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση αυτού, πρέπει να έχει προηγηθεί προσεκτική ανάλυσή της δομής του. Αυτό θα επιχειρήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

Το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων του Άμστερνταμ περιλαμβάνει πληθώρα αρτηριών με πιο σημαντική, αυτή του Περιφερειακού Δακτυλίου A10 (Σχήμα 4.1 [9]) που λαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης, λόγω της μεγάλης ποικιλίας σε προορισμούς, μεταξύ αυτών και το διεθνές αεροδρόμιο στο Σχίπολ. Είναι λοιπόν, λογικό επόμενο να παρατηρείται σε αυτόν έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση, κυρίως κατά τις ώρες αιχμής και έτσι να δημιουργείται η ανάγκη ελέγχου της ροής σε αυτόν. Σε δύο σημεία του Δακτυλίου υπάρχουν υποθαλάσσιες σήραγγες, την Coentunnel και την Zeeburgertunnel κάτι που χωρίζει τον A10 σε δύο νοητά μέρη.

Οι σημαντικότερες εισροές στον Δακτύλιο φθάνουν από συμβαλλόμενους αυτοκινητόδρομους και πιο συγκεκριμένα, από:

- A8: βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του Άμστερνταμ και τροφοδοτεί τον Δακτύλιο με κίνηση από την Βόρεια Ολλανδία
- A4: εισέρχεται από τα νοτιοδυτικά και κατευθύνεται προς Σχίπολ, Ρότερνταμ, Χάγη.
- A9: συμβάλλει με τον Δακτύλιο στο νότιο-δυτικό τμήμα του και οδηγεί στο κέντρο της Ολλανδίας
- Από νότια και νοτιο-ανατολικά, συμβάλλουν οι A2 και A1 αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 4.2 [11], παρατηρούμε το Άμστερνταμ όπως φαίνεται από δορυφόρο με επισημασμένες τις κύριες οδικές αρτηρίες της πόλης.



Σχήμα.4.2 Αυτοκινητιστικό δίκτυο του Άμστερνταμ – Λήψη από δορυφόρο

4.2 Μοντελοποίηση του δικτύου

Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη μόνο η μία κατεύθυνση του Δακτυλίου Α10, η οποία περιλαμβάνει 21 ράμπες εισόδου και 20 ράμπες εξόδου. Τόσο στις εισόδους, όσο και στις εξόδους, συμπεριλαμβάνονται οι συμβολές με τους Α8, Α4, Α2, Α1. Η ζήτηση προήλθε από μετρήσεις ροής στις ράμπες εισόδου, ενώ τα ποσοστά στροφής, τα οποία θεωρούνται σταθερά κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, βασίζονται στις τιμές του ακόλουθου πίνακα [9]:

Πίνακας 4.1 Ποσοστά στροφής για κάθε ράμπα εξόδου

Off-ramp turning rates			
Off-ramp	Turning rate	Off-ramp	Turning rate
D1	0.14	D29	0.11
D2	0.29	D30	0.10
D3	0.10	D31	0.10
D4	0.12	DA1	0.26
D5	0.20	D32	0.07
D6	0.09	D33	0.10
DA4	0.58	D34	0.31
D27	0.19	D34A	0.08
D28	0.15	N106	0.86
DA2	0.29		

Ας σημειωθεί, ότι το ποσοστό στροφής του Ν106 ουσιαστικά αφορά στον Α8.

Το μοντέλο έχει ρυθμιστεί βάσει πραγματικών δεδομένων εισόδου [3]. Από την μοντελοποίηση, προκύπτει ένα πρόβλημα με διάνυσμα κατάστασης 173 διαστάσεων. Το δίκτυο, χωρίστηκε σε 76 τμήματα με μέσο μήκος 421m, παράγοντας ένα διάνυσμα ελέγχου 21 διαστάσεων (μία για κάθε ράμπα εισόδου) και ένα διάνυσμα διαταραχών 43 διαστάσεων. Ακόμη ορίστηκε $K=1440$. Η προσομοίωση έχει χρονικό ορίζοντα 4 ωρών και βήμα 10 δευτερολέπτων. Τα δεδομένα προέρχονται από μετρήσεις που άρχισαν στις 16:00 και συνεχίστηκαν για 4 ώρες, έως τις 20:00, ενώ λαμβάνονταν με βήμα 1 λεπτού.

5. Εφαρμογή και σύγκριση ALINEA – AMOC

5.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ALINEA και του AMOC τόσο για το *Βασικό Σενάριο* ζήτησης που βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις, όσο και για ένα θεωρητικό σενάριο αυξημένης ζήτηση κατά 5%. Εξετάζεται σύντομα και ένα ακόμη σενάριο μείωσης της ζήτησης κατά 5%, λόγω όμως της μικρής πιθανότητας να πραγματοποιηθεί αυτό, δεν εμβαθύνουμε.

Παρακάτω αναλύονται η μέθοδος και η λογική βάσει των οποίων παράχθηκαν τα νέα δεδομένα, προκειμένου να αντανakλούν όσο γίνεται σε μεγαλύτερο βαθμό την πραγματική μορφή που θα λάμβανε η ζήτηση σε μία τέτοια περίπτωση.

Το κριτήριο που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της σύγκρισης, είναι ο *Συνολικός Χρόνος (TTS)* που ξοδεύουν οι οδηγοί στο δίκτυο. Αποτελεί καλό κριτήριο επειδή περιλαμβάνει και τον χρόνο αναμονής στις ράμπες κατά την είσοδο.

5.2 Μεταβολή δεδομένων ζήτησης

Έχοντας εξετάσει την συμπεριφορά της ALINEA σε συνθήκες πραγματικής ζήτησης, ανακύπτει το ερώτημα του κατά το πόσο και με ποιο τρόπο θα αντιδρούσε σε μια ενδεχόμενη αύξηση ή μείωση της ζήτησης αυτής. Λαμβάνοντας υπόψη τα στατιστικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στην Εισαγωγή, θεωρήθηκε πως μια αύξηση της τάξης του 5% στην ζήτηση του αυτοκινητόδρομου θα ήταν ικανοποιητική προκειμένου να προσομοιωθεί μια μελλοντική κατάσταση. Ενδεικτικά υπολογίστηκε και η αντίθετη περίπτωση μείωσης κατά 5%.

Εξετάζοντας το φαινόμενο πιο προσεκτικά και προκειμένου τα παραγόμενα δεδομένα να αντιπροσωπεύουν όσο γίνεται περισσότερο μια πραγματική μελλοντική κατάσταση, αποφασίστηκε η δημιουργία ενός μη-ομοιόμορφου προφίλ αυξημένης ζήτησης.

Η λογική που ακολουθήθηκε είναι ιδιαίτερα απλή:

- επιλέχθηκαν όλες οι ράμπες εκτός από μία λόγω της χαμηλής ζήτησης σε αυτήν
- διακριτοποιήθηκε ο χρονικός ορίζοντας τμήματα 15 λεπτών
- ορίστηκαν περιοχές τριών ειδών ανάλογα με την ποσότητα ζήτησης (*χαμηλή, μεσαία, υψηλή*)
- για κάθε περιοχή θεωρήθηκε διαφορετικό ποσοστό αύξησης προσέχοντας να διατηρηθεί η συνολική αύξηση κοντά στο 5%. Πιο συγκεκριμένα οι μέσες τιμές αύξησης είναι:
 - *Χαμηλή: 9.18%* (εύρος τιμών: 5.0 – 11.8)
 - *Μεσαία: 4.67%* (εύρος τιμών: 3.7 – 7.0)
 - *Υψηλή: 2.00%* (εύρος τιμών: 1.7 – 2.2)
 - *Συνολική Αύξηση: 5.03%* (εύρος τιμών: 4.96 – 5.07)

Η παραπάνω διαδικασία στηρίχθηκε στο γεγονός ότι λόγω της ήδη υπάρχουσας συμφόρησης, ο μέσος οδηγός θα αποφύγει να ταξιδέψει τις ώρες αιχμής και θα επιλέξει κάποια παραπλήσια ώρα.

Είναι λογικό επομένως να θεωρηθεί ότι η κίνηση θα μεταφερθεί περισσότερο στις ώρες χαμηλής ζήτησης και λιγότερο σε αυτές μεσαίας και υψηλής.

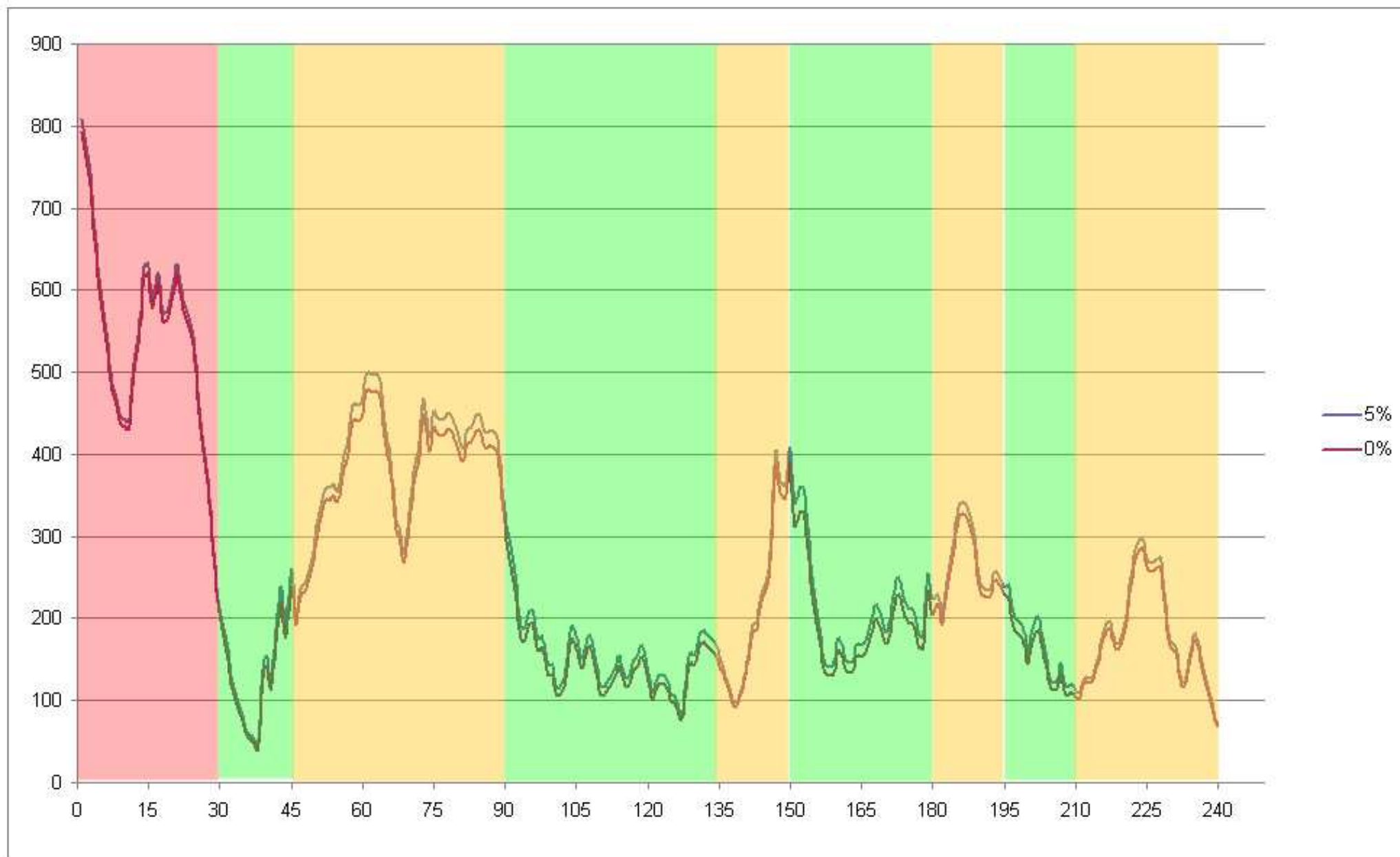
Αναλυτικότερα τα ποσοστά μεταβολής ανά ράμπα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1 Αυξημένη ζήτηση ανά ράμπα και περιοχή ζήτησης

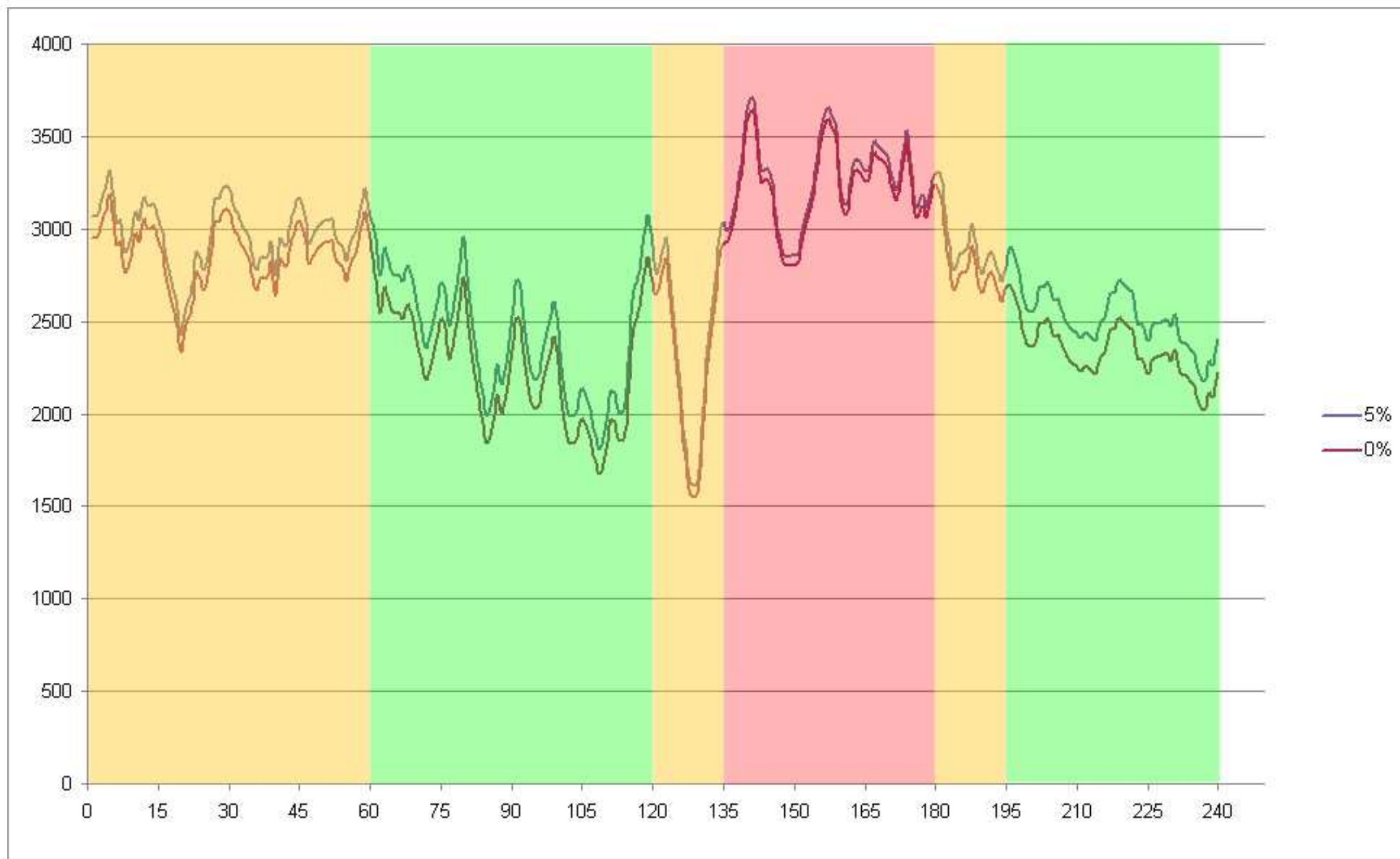
ΠΕΡΙΟΧΗ				
Ράμπα	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή	Συν. Μεταβολή
ΟΑ1	9.00%	4.50%	1.80%	5.04%
ΟΑ2	10.00%	5.30%	2.10%	5.07%
Ο1	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
Ο2	7.00%	4.10%	0.00%	5.04%
Ο3	10.00%	5.50%	2.20%	5.03%
Ο4	9.00%	4.40%	2.00%	5.00%
Ο5	9.00%	4.80%	2.00%	5.06%
Ο33	11.00%	5.30%	2.00%	5.00%
Ο34	7.40%	3.70%	2.00%	5.04%
Ο32	10.50%	5.10%	2.00%	5.02%
Ο31	11.00%	7.00%	1.70%	5.00%
Ο29	8.80%	4.00%	2.00%	5.05%
Ο30	11.80%	5.90%	2.00%	5.05%
Ο35	8.50%	3.80%	1.90%	4.98%
Ο36	9.90%	4.00%	1.90%	5.03%
Ο37	8.20%	3.70%	2.00%	5.02%
Ο38	8.00%	3.80%	1.80%	5.03%
Ο6	11.00%	5.00%	1.90%	4.96%
Ο28	8.60%	3.80%	1.90%	5.05%
ΟΑ8	11.00%	5.30%	2.00%	5.06%
ΟΑ4	8.00%	4.00%	1.80%	5.05%
Μέση Μεταβολή	9.18%	4.67%	2.00%	5.03%

Ακολουθούν δύο διαγράμματα (Σχήμα 5.1 και Σχήμα 5.2) όπου γίνεται αντιληπτός ο τρόπος που επιλέχθηκαν οι περιοχές χαμηλή, μεσαίας και υψηλής ζήτησης.

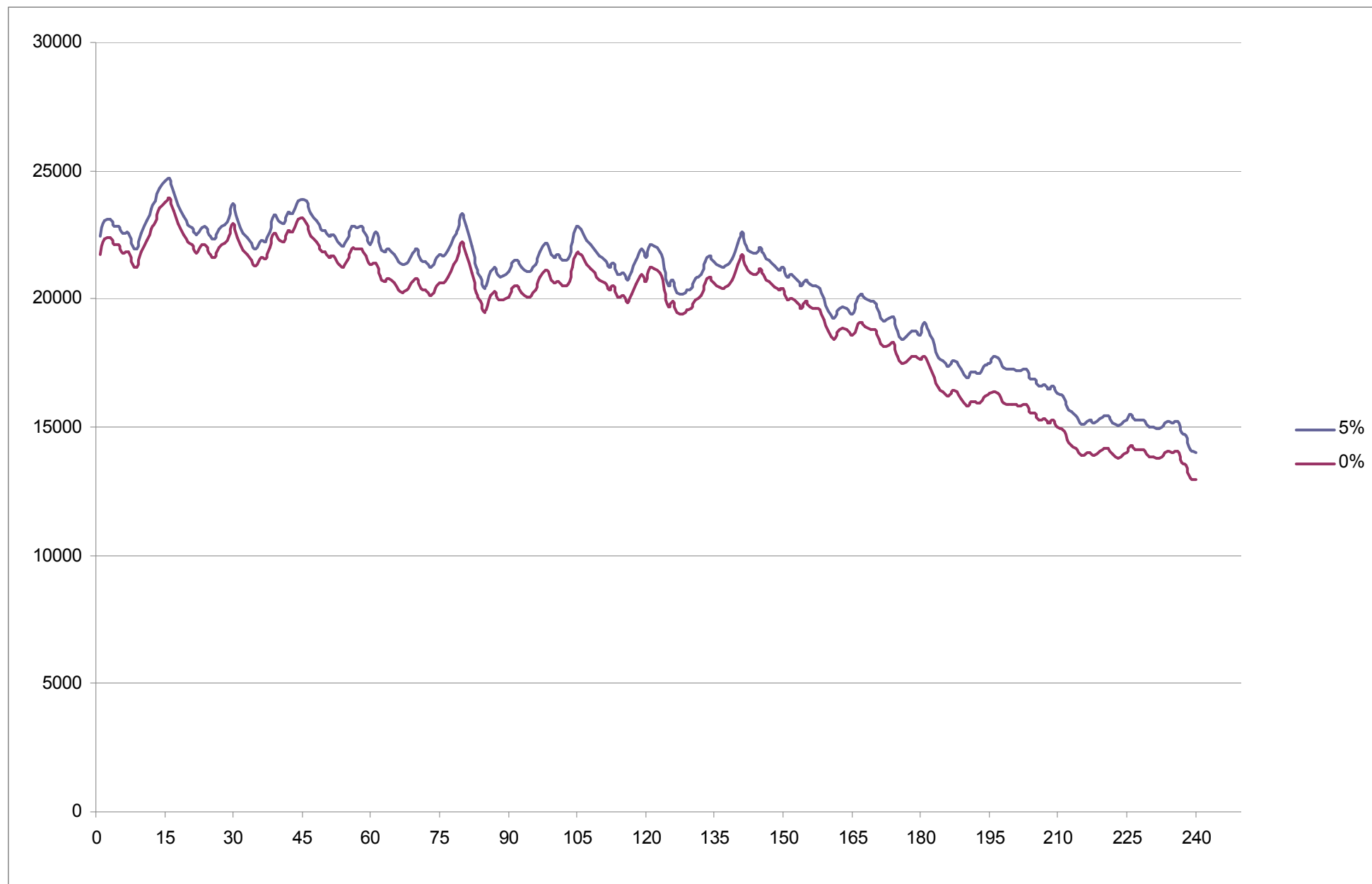
Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται πως μεταβλήθηκε η συνολική ζήτηση όταν το προφίλ της ζήτησης αυξήθηκε ανομοιόμορφα βάσει της λογικής που αναλύθηκε παραπάνω.



Σχήμα 5.1 Ζήτηση (υπό την μορφή ροής, οχήματα/ώρα) – Χρόνος στη ράμπα Ο4 με επισημασμένες τις διάφορες περιοχές



Σχήμα 5.2 Ζήτηση (υπό την μορφή ροής, οχήματα/ώρα) – Χρόνος στη ράμπα ΟΑ4 με επισημασμένες τις διάφορες περιοχές



Σχήμα 5.3 Συνολική Ζήτηση (υπό την μορφή ροής, οχήματα/ώρα)

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την περίπτωση μείωσης κατά 5%. Τα ποσοστά μεταβολής σε κάθε ράμπα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.2 Μειωμένη ζήτηση ανά ράμπα και περιοχή ζήτησης

ΠΕΡΙΟΧΗ				
Ράμπα	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή	Συν. Μεταβολή
ΟΑ1	9.00%	4.50%	1.80%	-5.04%
ΟΑ2	10.00%	5.30%	2.10%	-5.07%
Ο1	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
Ο2	7.00%	4.10%	0.00%	-5.04%
Ο3	10.00%	5.50%	2.20%	-5.03%
Ο4	9.00%	4.40%	2.00%	-5.00%
Ο5	9.00%	4.80%	2.00%	-5.06%
Ο33	11.00%	5.30%	2.00%	-5.00%
Ο34	7.40%	3.70%	2.00%	-5.04%
Ο32	10.50%	5.10%	2.00%	-5.02%
Ο31	11.00%	7.00%	1.70%	-5.00%
Ο29	8.80%	4.00%	2.00%	-5.05%
Ο30	11.80%	5.90%	2.00%	-5.05%
Ο35	8.50%	3.80%	1.90%	-4.98%
Ο36	9.90%	4.00%	1.90%	-5.03%
Ο37	8.20%	3.70%	2.00%	-5.02%
Ο38	8.00%	3.80%	1.80%	-5.03%
Ο6	11.00%	5.00%	1.90%	-4.96%
Ο28	8.60%	3.80%	1.90%	-5.05%
ΟΑ8	11.00%	5.30%	2.00%	-5.06%
ΟΑ4	8.00%	4.00%	1.80%	-5.05%
Μέση Μεταβολή	9.18%	4.67%	2.00%	-5.04%

Οι μέσες τιμές μείωσης είναι:

- *Χαμηλή*: **-9.18%** (εύρος τιμών: -5.0 – -11.8)
- *Μεσαία*: **-4.67%** (εύρος τιμών: -3.7 – -7.0)
- *Υψηλή*: **-2.00%** (εύρος τιμών: -1.7 – -2.2)
- *Συνολική Μείωση*: **-5.03%** (εύρος τιμών: -4.96 – -5.07)

Θέλοντας να συγκρίνουμε την συμπεριφορά του δικτύου σε κάθε περίπτωση, θεωρούμε 3 διαφορετικές περιπτώσεις:

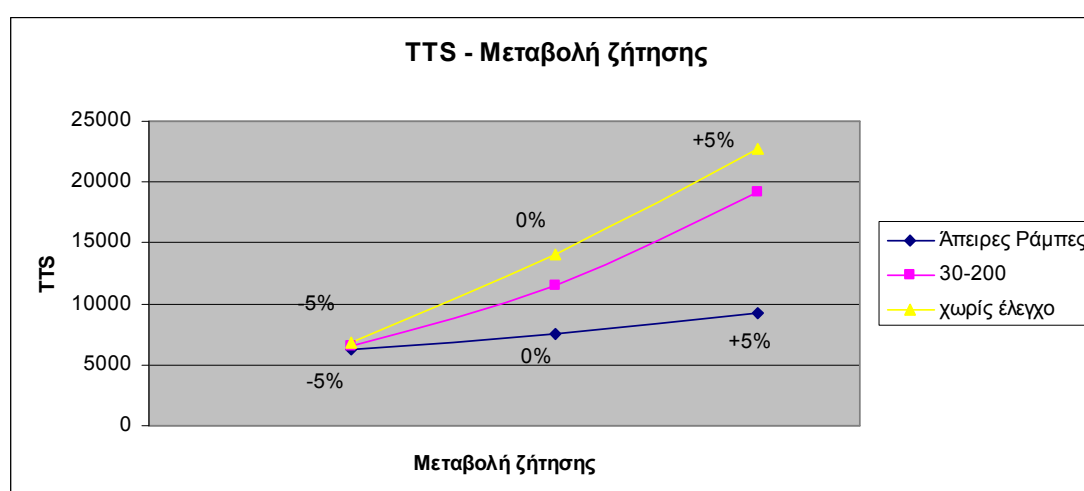
1. Χωρίς εφαρμογή ελέγχου
2. Εφαρμογή της ALINEA για ράμπες άπειρης χωρητικότητας, τόσο για αυτές από το αστικό δίκτυο, όσο για αυτές από τους αυτοκινητόδρομους
3. Εφαρμογή της ALINEA για χωρητικότητα ραμπών από αστικό δίκτυο ίση με 30 και από αυτοκινητόδρομο ίση με 200

Τα αποτελέσματα τα συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.3 Σύγκριση για 3 βασικά σενάρια ζήτησης και 3 σενάρια για μήκη ουρών

		TTS (οχ.·ώρες)	Συνολικός Χρόνος αναμονής (οχ.·χιλ)	Ποσοστιαία Μεταβολή TTS σε σχέση με "χωρίς έλεγχο"
+5%	Άπειρες ράμπες	9273.07	2740.28	-59.20%
	30-200	19211.85	6602.46	-15.47%
	χωρίς έλεγχο	22727.89	7308.12	
0%	Άπειρες ράμπες	7563.38	1393.44	-46.34%
	30-200	11517.13	2498.52	-18.29%
	χωρίς έλεγχο	14094.96	2549.66	
-5%	Άπειρες ράμπες	6308.18	509.74	-7.11%
	30-200	6472.4	524.59	-4.70%
	χωρίς έλεγχο	6791.3	103.9	

Από τα παραπάνω προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 5.4 TTS-Μεταβολή ζήτησης

Από τα παραπάνω, παρατηρούμε πως στην περίπτωση μείωσης της κίνησης κατά 5 ποσοστιαίες μονάδες, η βελτίωση που έχουμε στην ιδανική περίπτωση

ραμπών άπειρου μήκους, είναι της τάξης του 4.7%. Συγκρινόμενο με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που λαμβάνουμε για το βασικό και το αυξημένο σενάριο ζήτησης, το 4.7% μπορεί να θεωρηθεί σχετικά μικρό ποσοστό, συνεπώς δεν θα εμβαθύνουμε στο μειωμένο σενάριο ζήτησης.

Για το βασικό σενάριο, όπου δεν παρατηρείται μεταβολή στη ζήτηση, η εφαρμογή ελέγχου 30-200 βελτιώνει τον στόχο, ενώ προκύπτει ότι θα παράγονταν πάνω από διπλάσια βελτίωση με χρήση ραμπών άπειρου μήκους.

Στην περίπτωση όπου η ζήτηση αυξάνεται, η ψαλίδα μεταξύ ελέγχου 30-200 και άπειρων ραμπών, ανοίγει, προκαλώντας ερωτηματικά για την ικανότητα του ελέγχου 30-200 να αποφέρει ουσιαστικά αποτελέσματα.

Αξίζει να σημειωθεί πως η κλίση της μεταβολής του Συνολικού Χρόνου (TTS) για την περίπτωση ελέγχου 30-200 σχεδόν ακολουθεί αυτήν της περίπτωσης χωρίς έλεγχο, ενώ η καμπύλη που αφορά στην χρήση άπειρων ραμπών, επηρεάζεται πολύ λιγότερο από την ποσότητα οχημάτων με την οποία τροφοδοτείται.

Από τα παραπάνω, προκύπτει πως, για την ALINEA, το πρόβλημα στην ουσία συνίσταται στη δυνατότητα ή μη αποθήκευσης μεγάλου αριθμού οχημάτων στις ράμπες εισόδου. Εάν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, τότε η ALINEA μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα.

5.3 Σενάρια

Έχοντας κάνει μια αρχική γενική εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ALINEA, επιλέγουμε ένα σύνολο εναλλακτικών σεναρίων στα οποία μεταβάλλεται η χωρητικότητα των ραμπών από αυτοκινητόδρομους τόσο για το Βασικό Σενάριο ζήτησης, όσο και για το αυξημένο κατά 5% Σενάριο ζήτησης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σενάριο μειωμένης ζήτησης, αγνοείται λόγω της εξαιρετικά μικρής πιθανότητας πραγματοποίησής του.

Τα διαφορετικά σενάρια που προσομοιώθηκαν, συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4 Εναλλακτικά σενάρια

Σενάριο		Χωρητικότητα ράμπας	
		Αστικών	Αυτοκινητόδρομων
Βασικό Σενάριο ζήτησης	Σενάριο 0	χωρίς έλεγχο	χωρίς έλεγχο
	Σενάριο 1	30	χωρίς έλεγχο
	Σενάριο 2	30	100
	Σενάριο 3	30	200
	Σενάριο 4	30	300
	Σενάριο 5	30	400
	Σενάριο 6	30	άπειρες
Προσαυξημένο κατά 5% Σενάριο ζήτησης	Σενάριο 7	χωρίς έλεγχο	χωρίς έλεγχο
	Σενάριο 8	30	χωρίς έλεγχο
	Σενάριο 9	30	100
	Σενάριο 10	30	200
	Σενάριο 11	30	300
	Σενάριο 12	30	400
	Σενάριο 13	30	άπειρες

5.3.1 Βασικό Σενάριο ζήτησης

Στο *Βασικό Σενάριο*, κάνουμε χρήση πραγματικών μετρήσεων από τον αυτοκινητόδρομο Α10 του Άμστερνταμ [3]. Γίνεται παράλληλη παρουσίαση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης της ALINEA και του AMOC, προκειμένου να φανούν οι διαφορές και να καταδειχθούν τα περιθώρια βελτίωσης στα αποτελέσματα της ALINEA.

Σε πρώτη φάση ελέγχουμε την συμπεριφορά του δικτύου απουσία ελέγχου, κατάσταση που αντιστοιχεί στην πραγματικότητα και βάσει αυτού του σεναρίου (*Σενάριο 0*), αξιολογούμε τα αποτελέσματα που επιστρέφουν οι διάφορες προσομοιώσεις.

Σε όλα τα σενάρια, εκτός από το 0 και το 7, θεωρείται χωρητικότητα στις ράμπες από το αστικό δίκτυο ίση με 30, ενώ μεταβάλλεται αυτή των αυτοκινητοδρόμων από 100 έως 400. Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση άπειρης χωρητικότητας στις ράμπες αυτοκινητοδρόμων προκειμένου να αναδειχθούν τα περιθώρια βελτίωσης με χρήση της εκάστοτε μεθόδου.

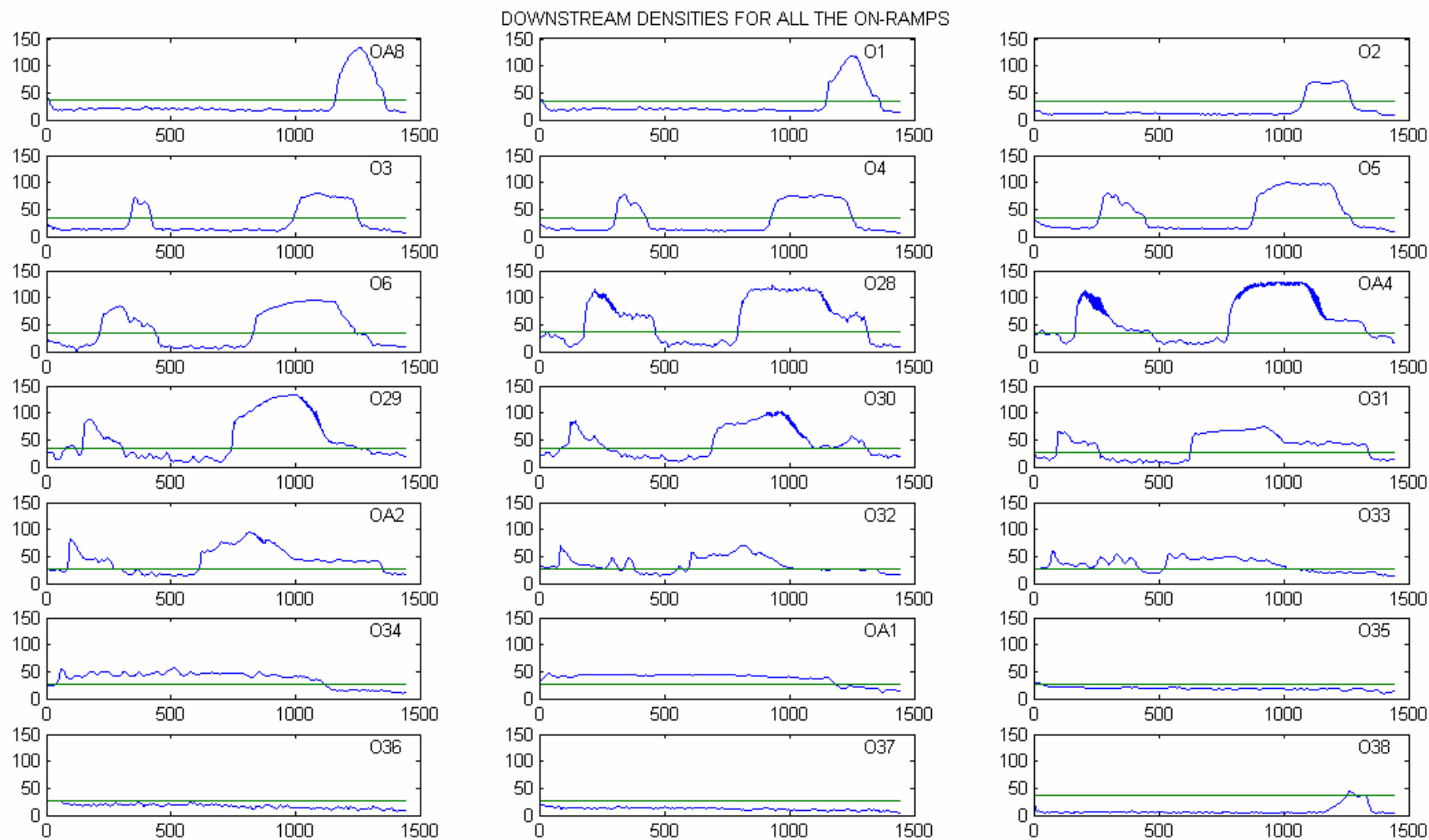
Παρακάτω θα αναλυθούν τα αποτελέσματα για κάποια από τα σενάρια αυτά.

Σενάριο 0

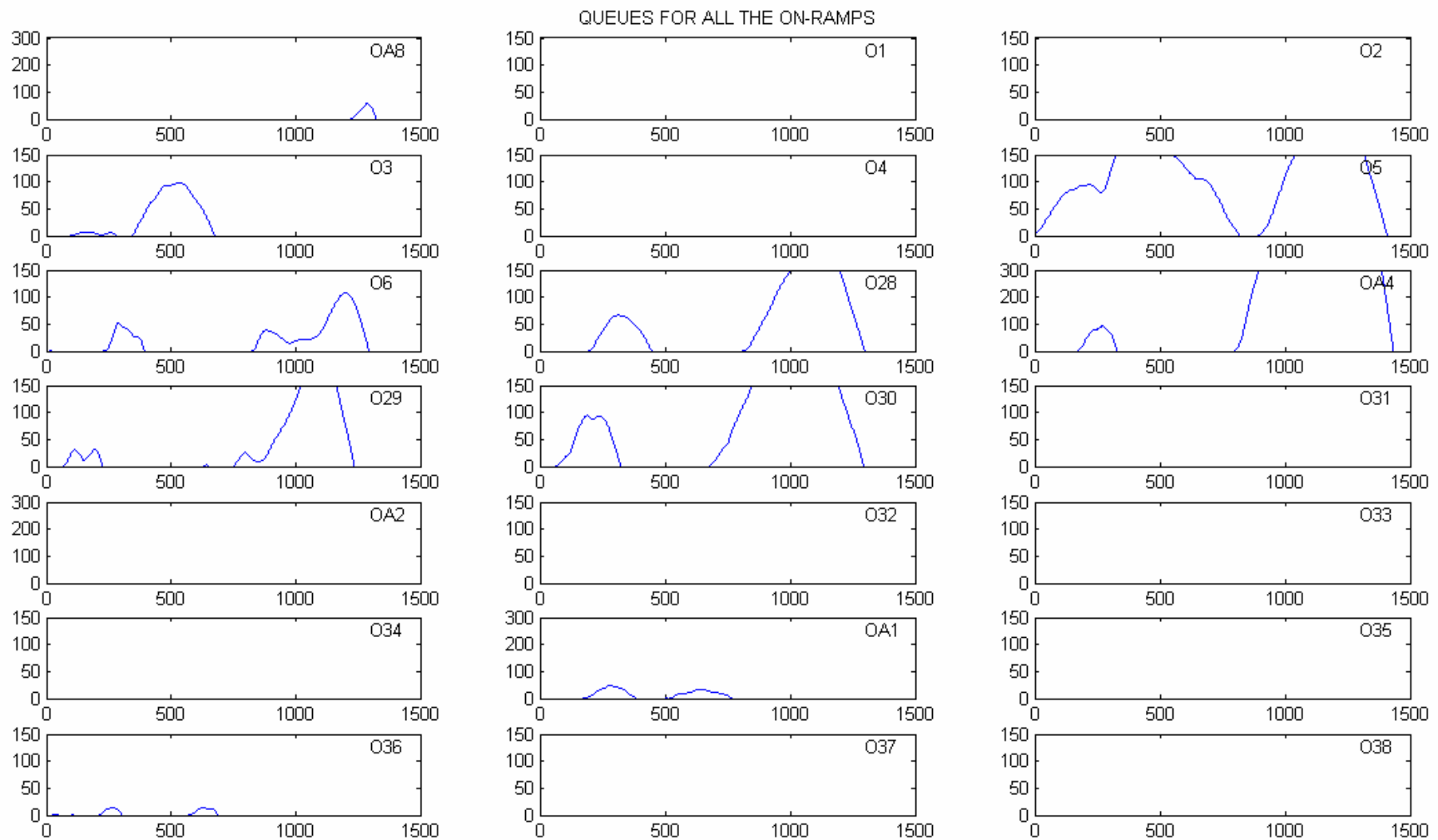
Στο Σενάριο 0 πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, απουσίας ελέγχου. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.5-5.7, η κίνηση δημιουργείται στην συμβολή με τον Α1, όπου η πυκνότητα λαμβάνει σχετικά υψηλές τιμές σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Είναι εμφανές πως η κίνηση μεταφέρεται προς τα πίσω και συναντά την εισροή από τον Α2, οπότε και αυξάνεται ραγδαία. Το φαινόμενο, συνεχώς αυξανόμενο, μεταφέρεται προς την έξοδο του Α4 όπου και ενισχύεται περαιτέρω. Τα μεγάλα επίπεδα πυκνότητας που παρατηρούνται σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους, δημιουργώντας δύο όρη, αντιπροσωπεύουν τα δύο κύματα ζήτησης, σε αυτές που θα μπορούσαν να αποκαλεστούν ώρες αιχμής.

Προκειμένου να φανεί το μέγεθος του προβλήματος, αρκεί να κοιτάξουμε τις ουρές που σχηματίζονται. Πιο συγκεκριμένα, στην έξοδο του Α1 όπου δεν εφαρμόζεται έλεγχος κατά την είσοδο, παρατηρούμε να δημιουργείται ουρά δύο φορές. Αυτό σημαίνει ότι η ζήτηση στη ράμπα εισόδου από τον Α1 είναι μεγαλύτερη της ικανότητας ροής της, σχηματίζοντας έτσι ουρά. Κάτι αντίστοιχο αλλά σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα παρατηρείται και στον Α4 όπου η ουρά που δημιουργείται είναι υπερβολικά μεγάλη και αγγίζει τα 1200 οχήματα.

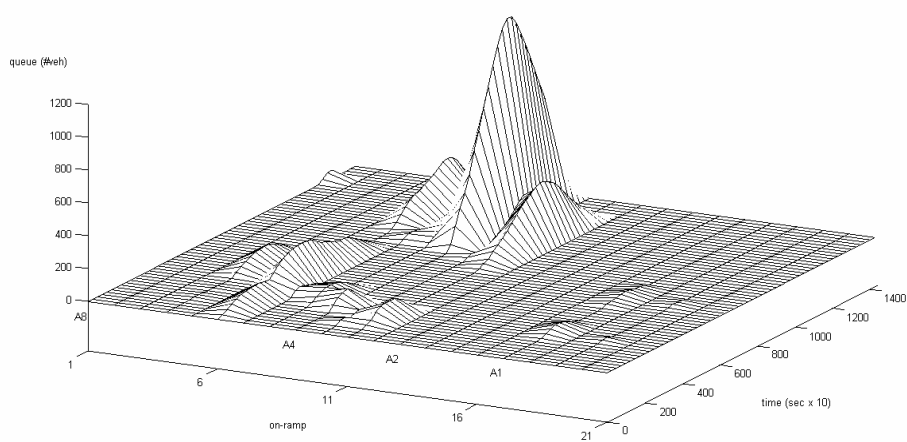
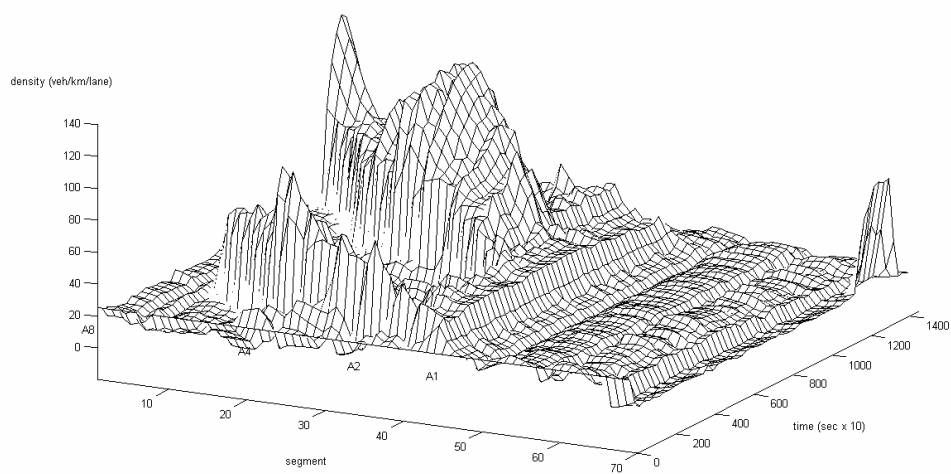
Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν τα οχήματα στο δίκτυο (συμπεριλαμβανομένων και των χρόνων αναμονής στις ράμπες) είναι 14095 οχ. ώρες.



Σχήμα 5.5 Σενάριο 0 – Διάγραμμα Πυκνότητας κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.6 Σενάριο 0 – Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.7 Σενάριο 0 – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

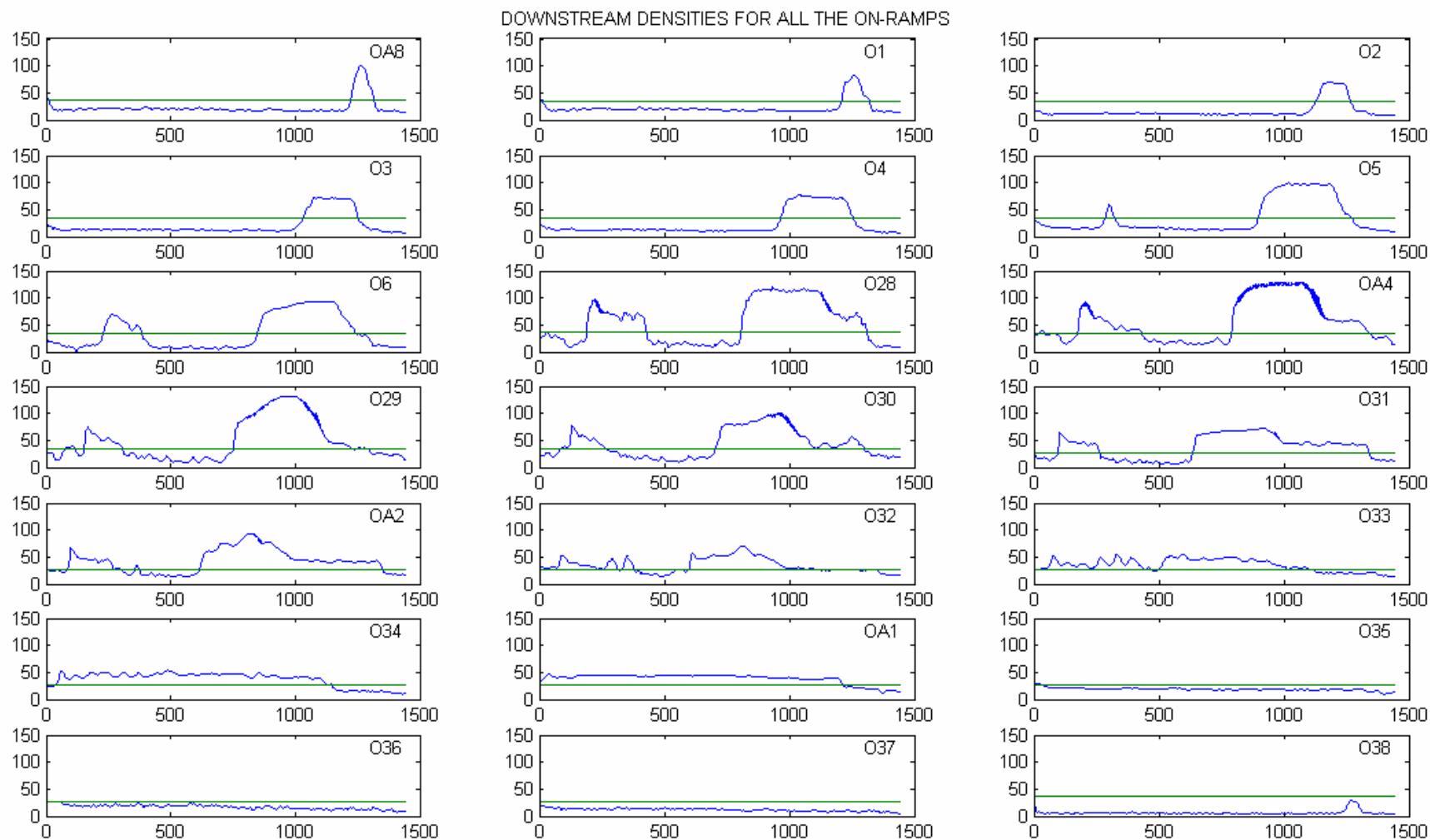
Σενάριο 1

ALINEA

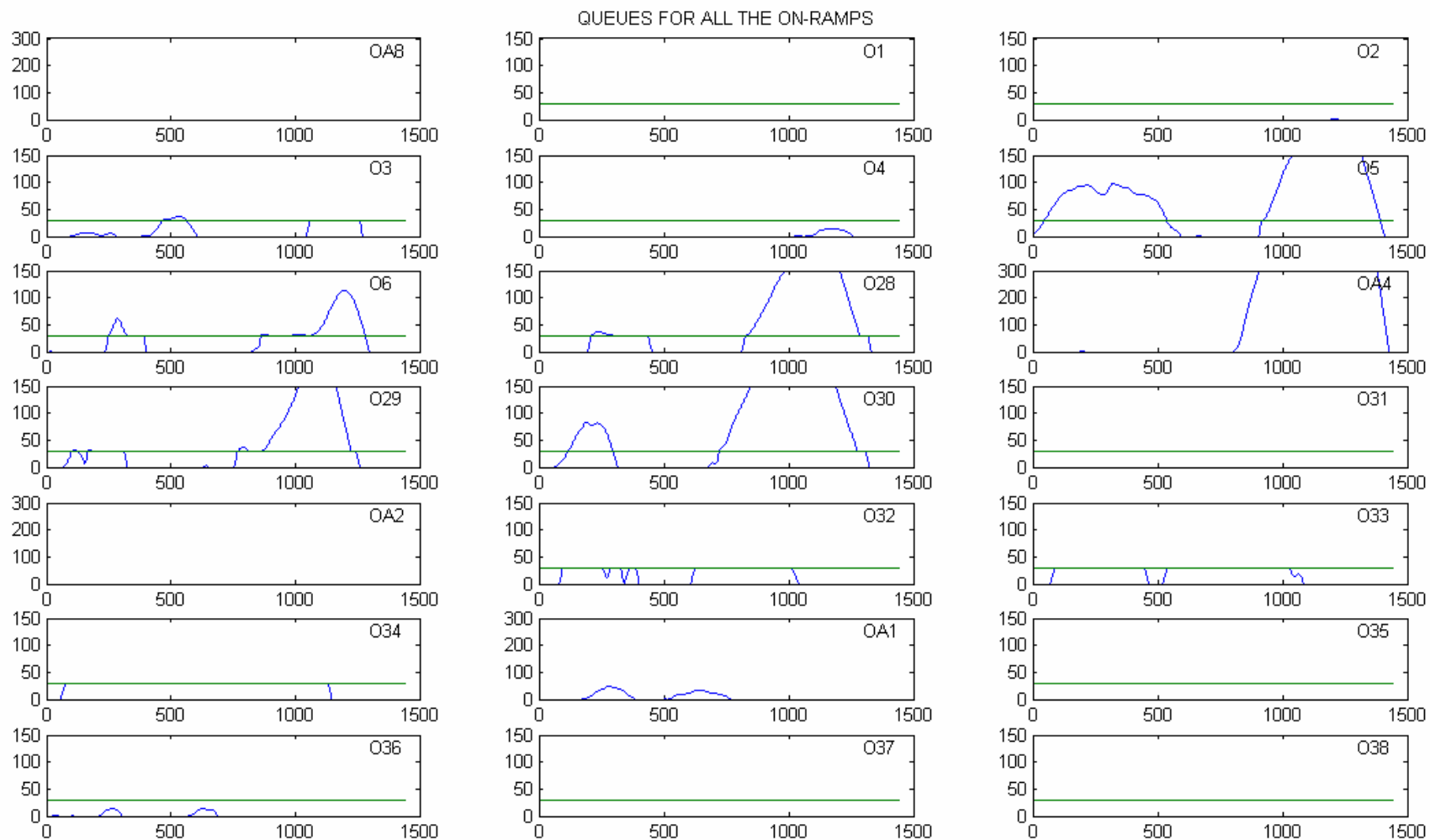
Κάνοντας χρήση ελέγχου μόνο στις ράμπες που τροφοδοτούν τον Α10 από το αστικό δίκτυο, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη βελτίωση. Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 13394 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 4.97% σε σχέση με το Σενάριο 0. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.8-5.10, οι ώρες εμφάνισης και τα μεγέθη της συμφόρησης δεν μεταβάλλονται σχεδόν καθόλου.

Πέραν των προβλημάτων στις ράμπες από αυτοκινητόδρομους, όπως αυτά περιγράφηκαν για το βασικό σενάριο, προβλήματα παρατηρούνται, σε μικρότερο όμως βαθμό, και στις εισόδους από αστικά δίκτυα που βρίσκονται ανάντη του Α1, λόγω της μεγάλης εισερχόμενης κίνησης από αυτόν. Ο έλεγχος μέχρι τον Α2 μπορεί στοιχειωδώς να λειτουργήσει γεμίζοντας τις ράμπες εισόδου με τον μέγιστο αριθμό αυτοκινήτων. Λόγω όμως της ρύθμισης του ελεγκτή, όταν το μήκος της ουράς στην ράμπα, φθάσει το μέγιστο μήκος, όπως αυτό έχει οριστεί κατά την μοντελοποίηση, η εκροή της ράμπας ορίζεται στο μέγιστο. Αυτό παρατηρείται μέχρι τον Α2, ενώ για τις ράμπες που τον ακολουθούν (με εξαίρεση την Ο31 όπου η ζήτηση είναι μικρή), λόγω της ζήτησης που εισέρχεται μέσω αυτών αλλά και λόγω της κατάντη υψηλής πυκνότητας, δημιουργούνται ουρές που υπερβαίνουν τα 200 οχήματα. Το φαινόμενο συνεχίζεται και μετά τον Α4, αφού και αυτός προσθέτει ένα σημαντικό μερίδιο κίνησης.

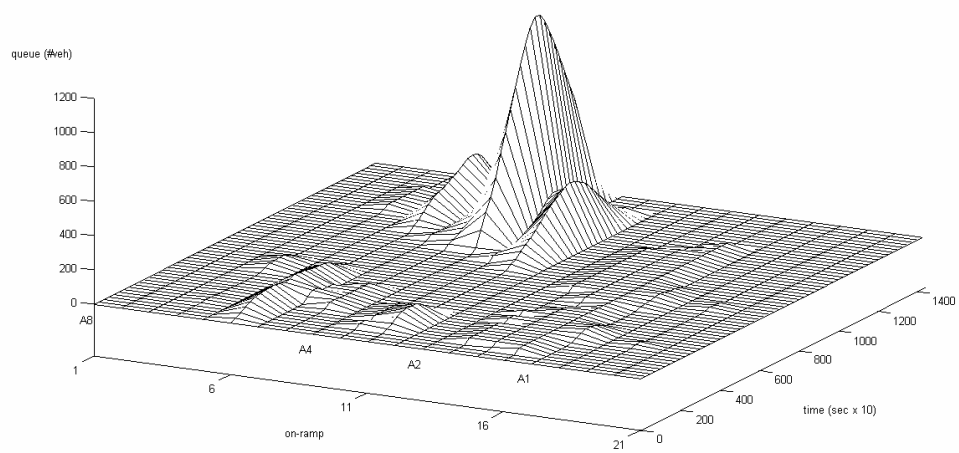
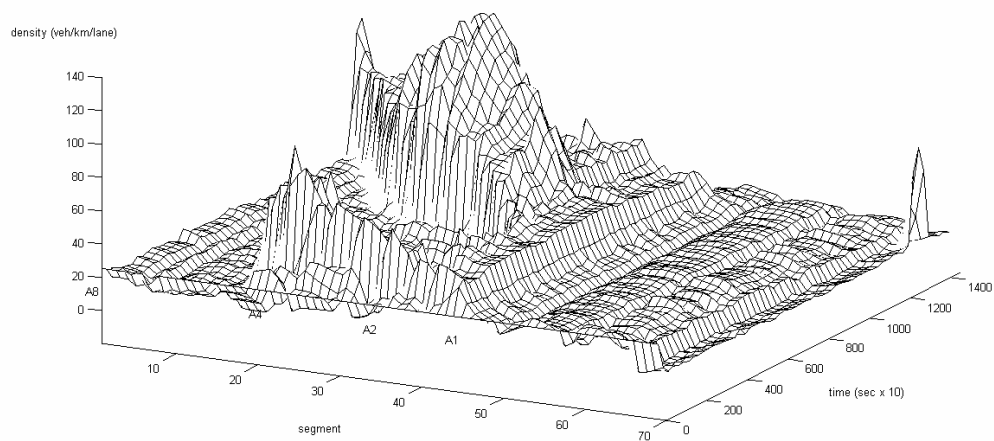
Παρατηρούμε λοιπόν πως είναι οι αυτοκινητόδρομοι που συμβάλλουν περισσότερο στην δημιουργία συμφόρησης εντός του δικτύου, επομένως είναι ξεκάθαρο ότι χρειάζεται η εφαρμογή ελέγχου στις εισόδους των αυτοκινητοδρόμων.



Σχήμα 5.8 Σενάριο 1 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατόντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνον (sec x 10)



Σχήμα 5.9 Σενάριο 1 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



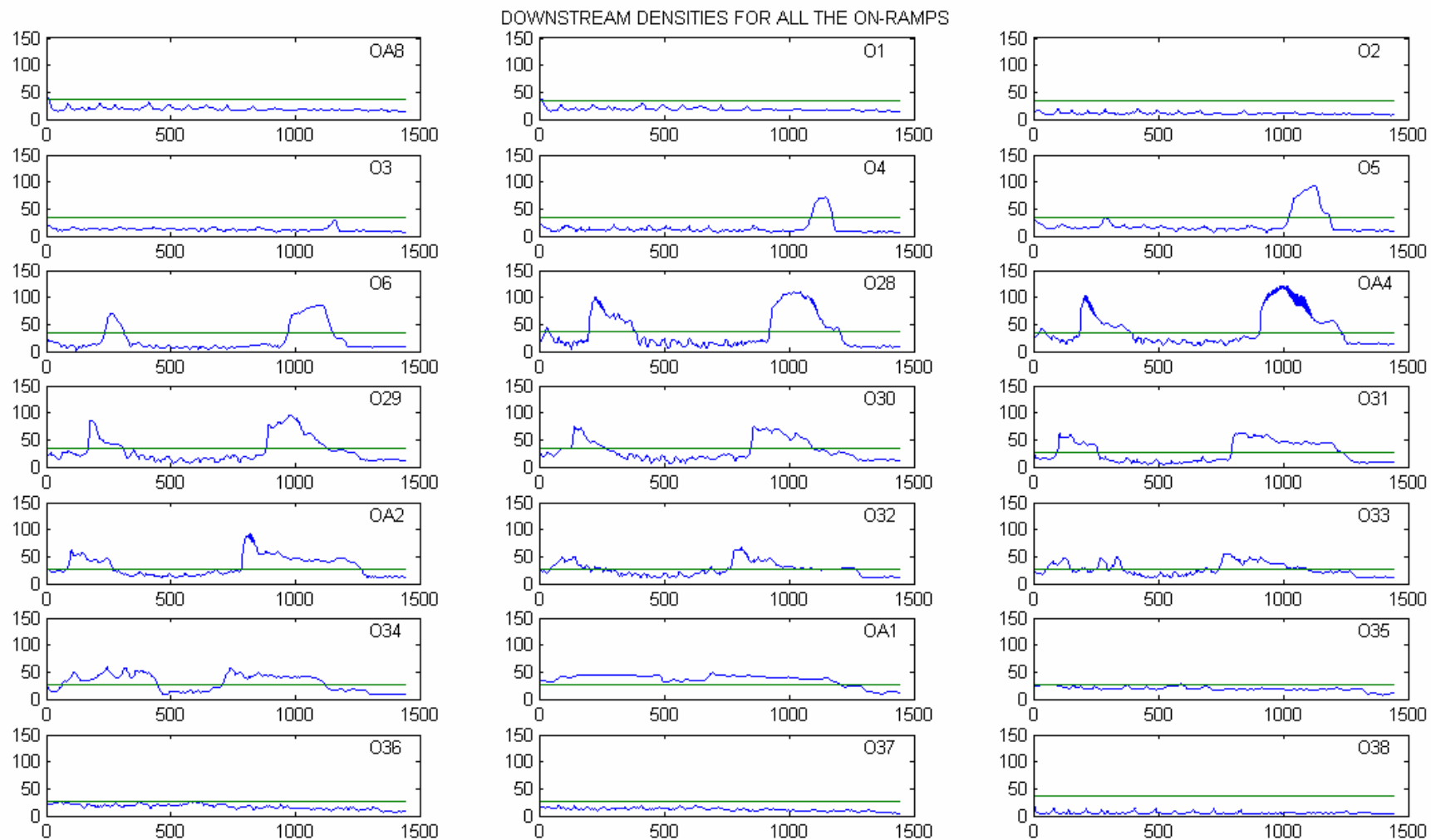
Σχήμα 5.10 Σενάριο 1 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

AMOC

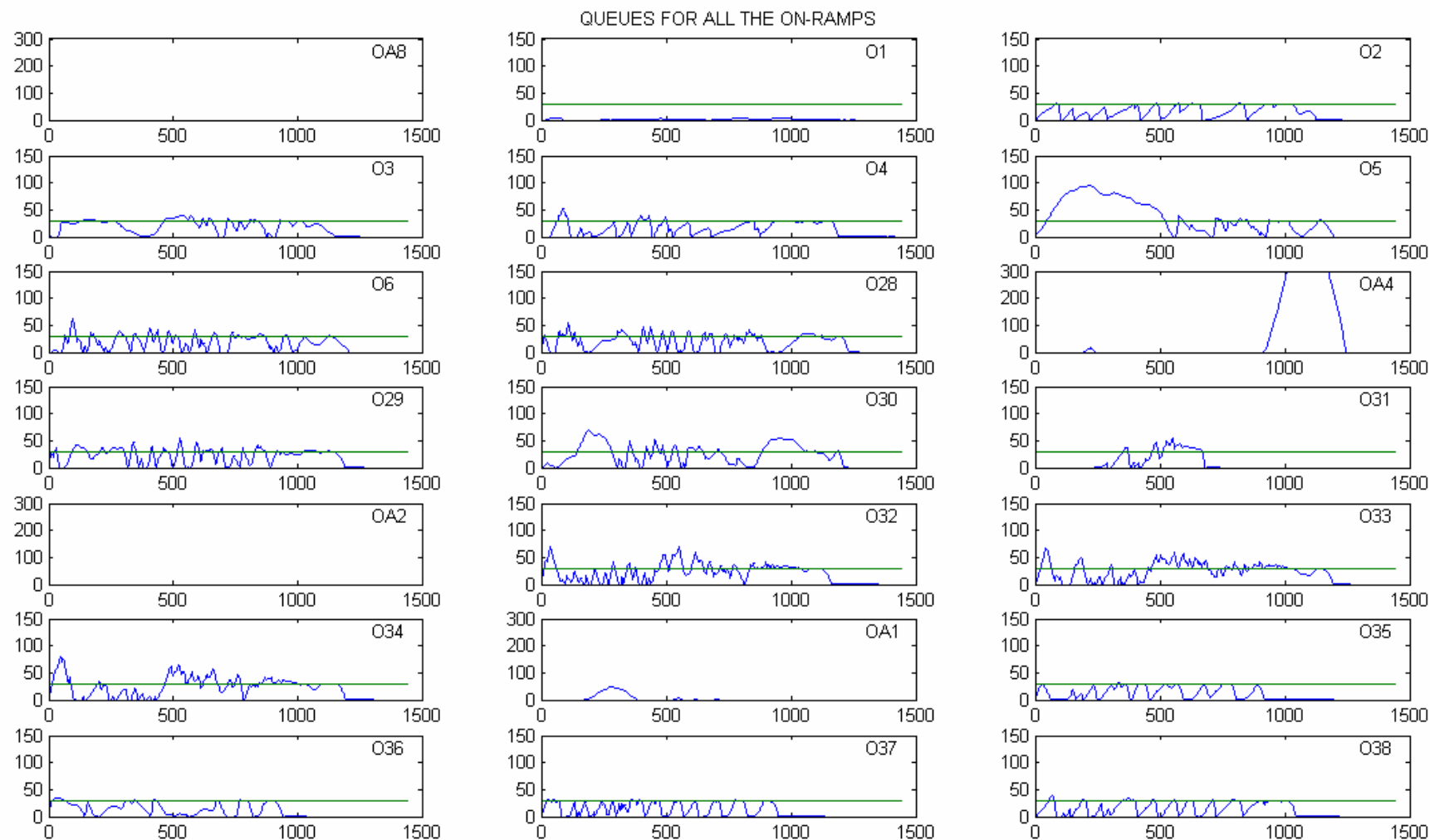
Με εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου του AMOC, τα αποτελέσματα είναι σημαντικά βελτιωμένα σε σχέση με αυτά της ALINEA. Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 9686 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 31.28% σε σχέση με το *Σενάριο 0*. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.11-5.13, τα όρη της πυκνότητας στο τρισδιάστατο γράφημα, είναι αισθητά μικρότερου όγκου. Ακόμα όμως και σε αυτή την περίπτωση, δεν είναι δυνατή η αποφυγή της συμφόρησης. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το γεγονός ότι στο δεύτερο κύμα κίνησης, στην συμβολή με τον Α4 δημιουργείται ουρά που ξεπερνά τα 300 αυτοκίνητα λόγω της μεγάλης πυκνότητας που επικρατεί εντός του δικτύου. Το θετικό είναι πως στο πρώτο κύμα κίνησης, δεν παρατηρείται δημιουργία ουράς εξαιτίας συμφόρησης αν και οι τιμές της πυκνότητας εντός του Α10 είναι σχετικά υψηλές.

Είναι χαρακτηριστικό πως και σε αυτή την περίπτωση, η έλλειψη ελέγχου στις ράμπες των αυτοκινητοδρόμων δημιουργεί την συμφόρηση, ξεκινώντας από τον Α1 αλλά κυρίως στον Α2 όπου παρατηρείται ραγδαία αύξηση στις τιμές της πυκνότητας. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ο Α4 μπορεί μόνο να προσθέσει στην κίνηση καταλήγοντας στην κορυφή των περίπου 140 οχημάτων/km/λωρίδα.

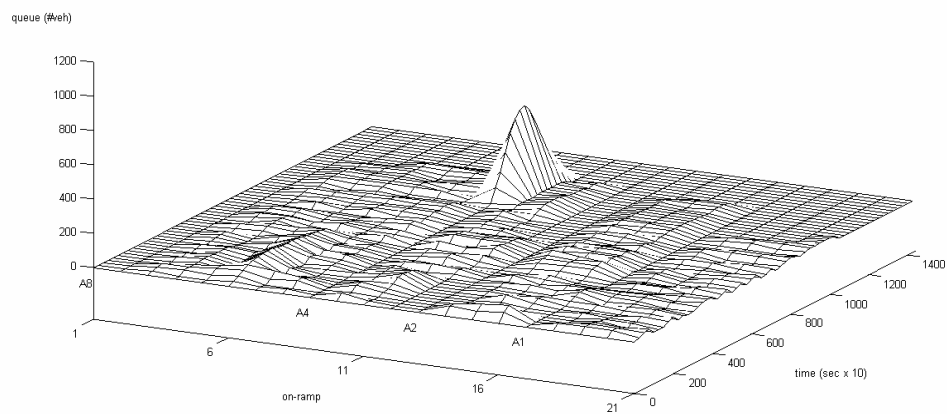
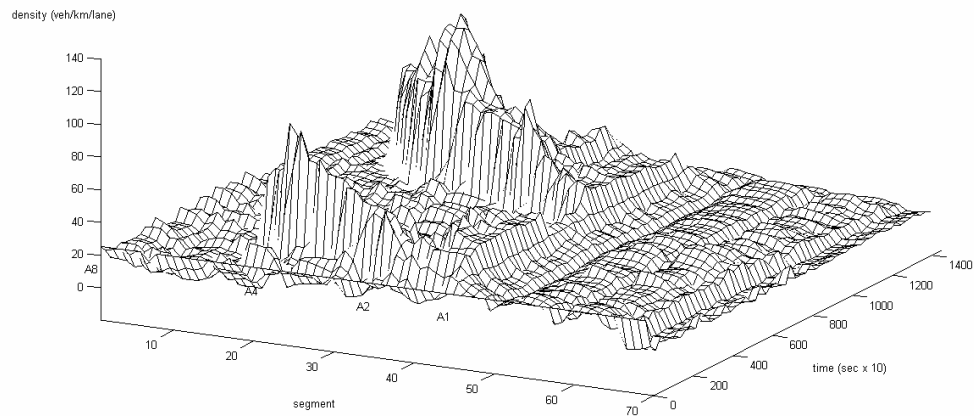
Συμπεραίνουμε πως ακόμα και ο βέλτιστος έλεγχος, αδυνατεί να συντονίσει αποτελεσματικά την κίνηση. Αυτό οφείλεται στην ανυπαρξία ελέγχου στις συμβολές του Α10 με τους άλλους αυτοκινητόδρομους. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η εφαρμογή ελέγχου και στις ράμπες αυτές.



Σχήμα 5.11 Σενάριο 1 – ΑΜΟC - Διάγραμμα Πυκνότητα κατόντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνον (sec x 10)



Σχήμα 5.12 Σενάριο 1 – ΑΜΟC - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.13 Σενάριο 1 – ΑΜΟC – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

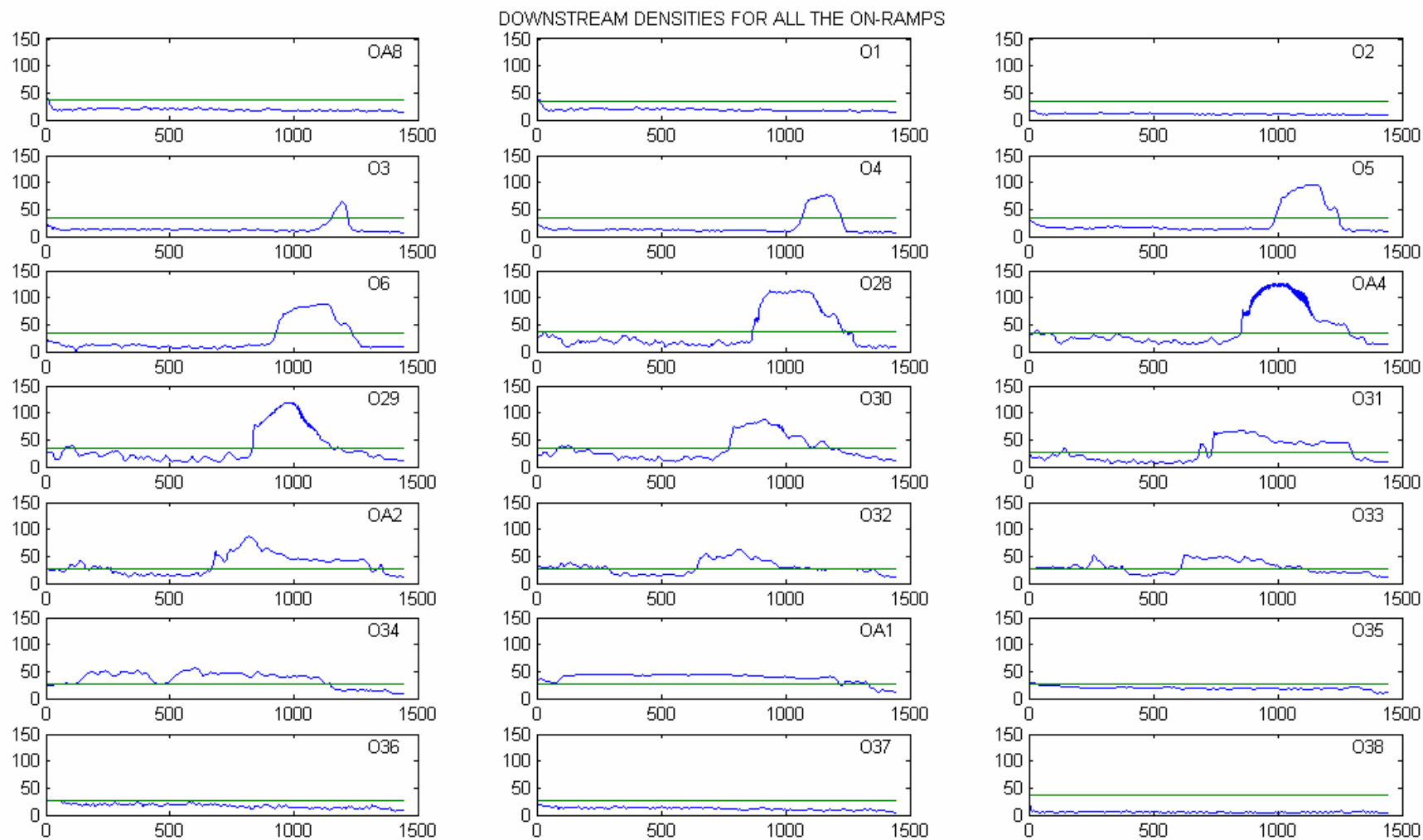
Σενάριο 3

ALINEA

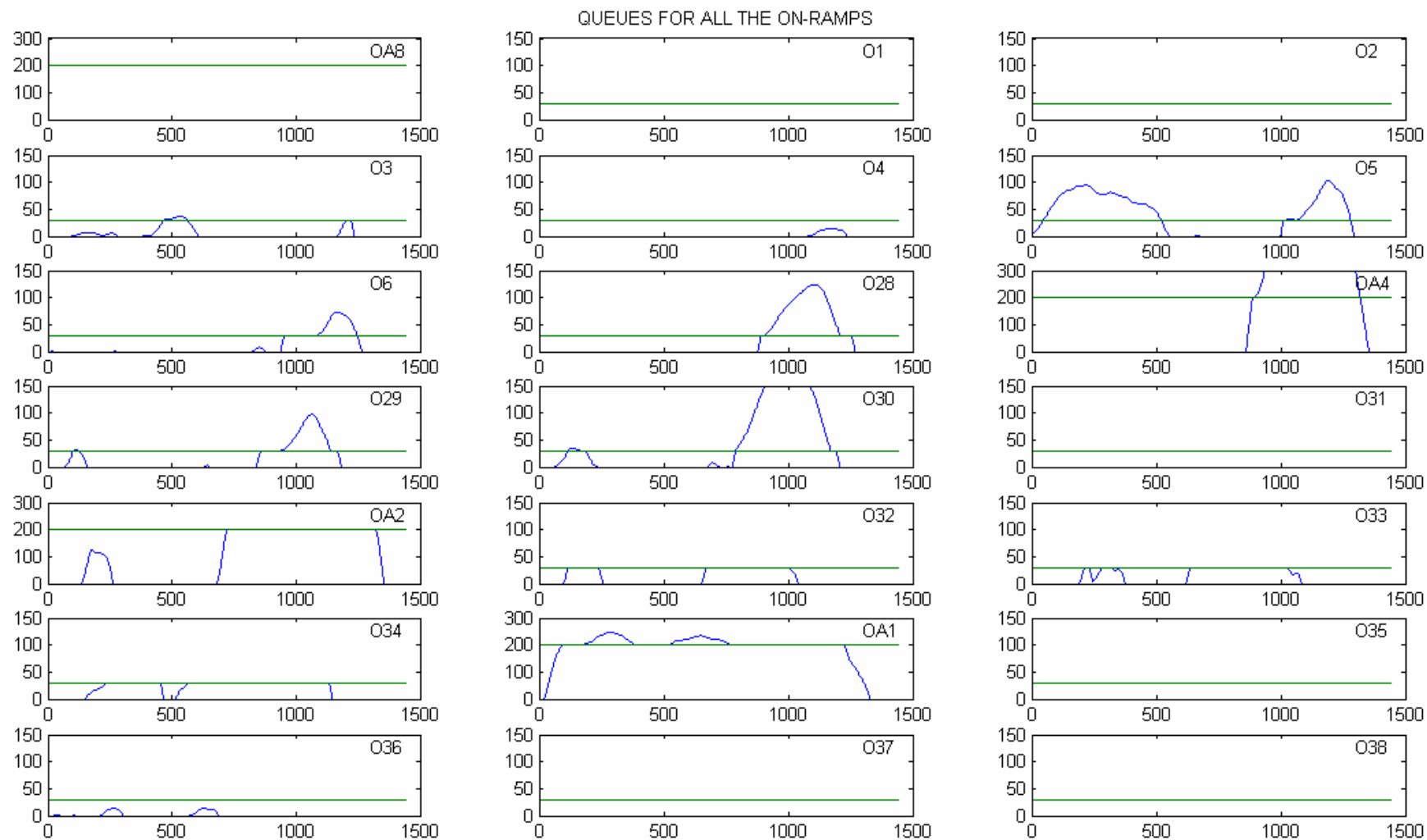
Στο *Σενάριο 3* πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, με χρήση ραμπών μήκους 30 οχημάτων για τις ράμπες από το αστικό δίκτυο και 200 οχημάτων για αυτές από αυτοκινητόδρομους.

Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 11517 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 18.29% σε σχέση με το *Σενάριο 0*. Όπως και κατά την εφαρμογή της ALINEA στο *Σενάριο 2*, έτσι και εδώ οι τιμές της πυκνότητας λαμβάνουν τιμές κοντά στα 140 οχ/km/ώρα στα ίδια τμήματα του αυτοκινητόδρομου, για μικρότερο όμως χρονικό διάστημα.

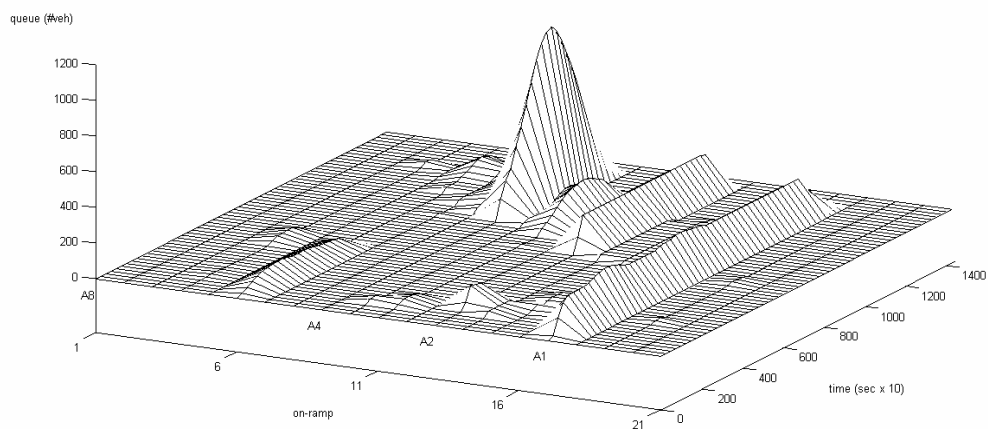
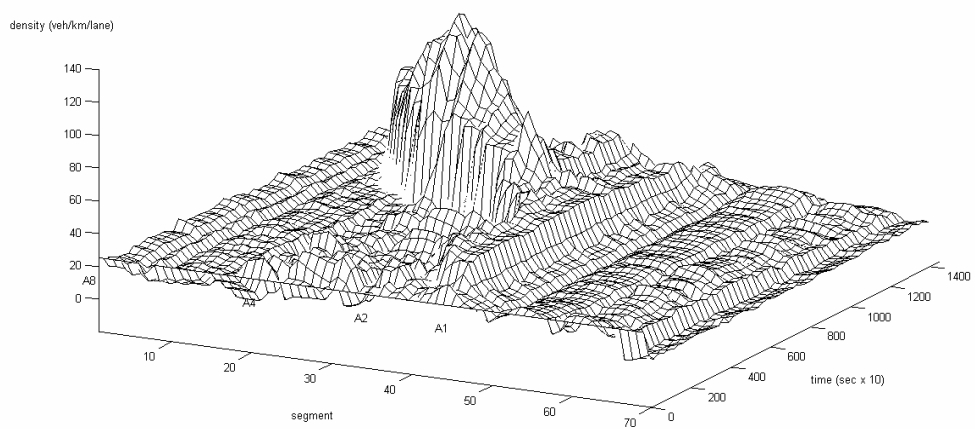
Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.14-5.16, οι ουρές στον A4 φθάνουν και σε αυτό το σενάριο σε πολύ υψηλές τιμές. Στους A1 και A2, οι ουρές διατηρούνται στα 200 οχήματα, ενώ αυτό δεν είναι δυνατό στον A8. Εξετάζοντας τις τιμές της πυκνότητας στον A10 κατάντη της ράμπας εισόδου από τον A8 παρατηρούμε πως η τιμή της πυκνότητας είναι χαμηλότερη της επιθυμητής κάτι που σημαίνει πως το δίκτυο υπολειτουργεί. Το αντίθετο παρατηρείται στις ράμπες από τον A1 και A2, όπου οι τιμές της πυκνότητας κατάντη των ραμπών λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες της επιθυμητής.



Σχήμα 5.14 Σενάριο 3 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατόντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.15 Σενάριο 3 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



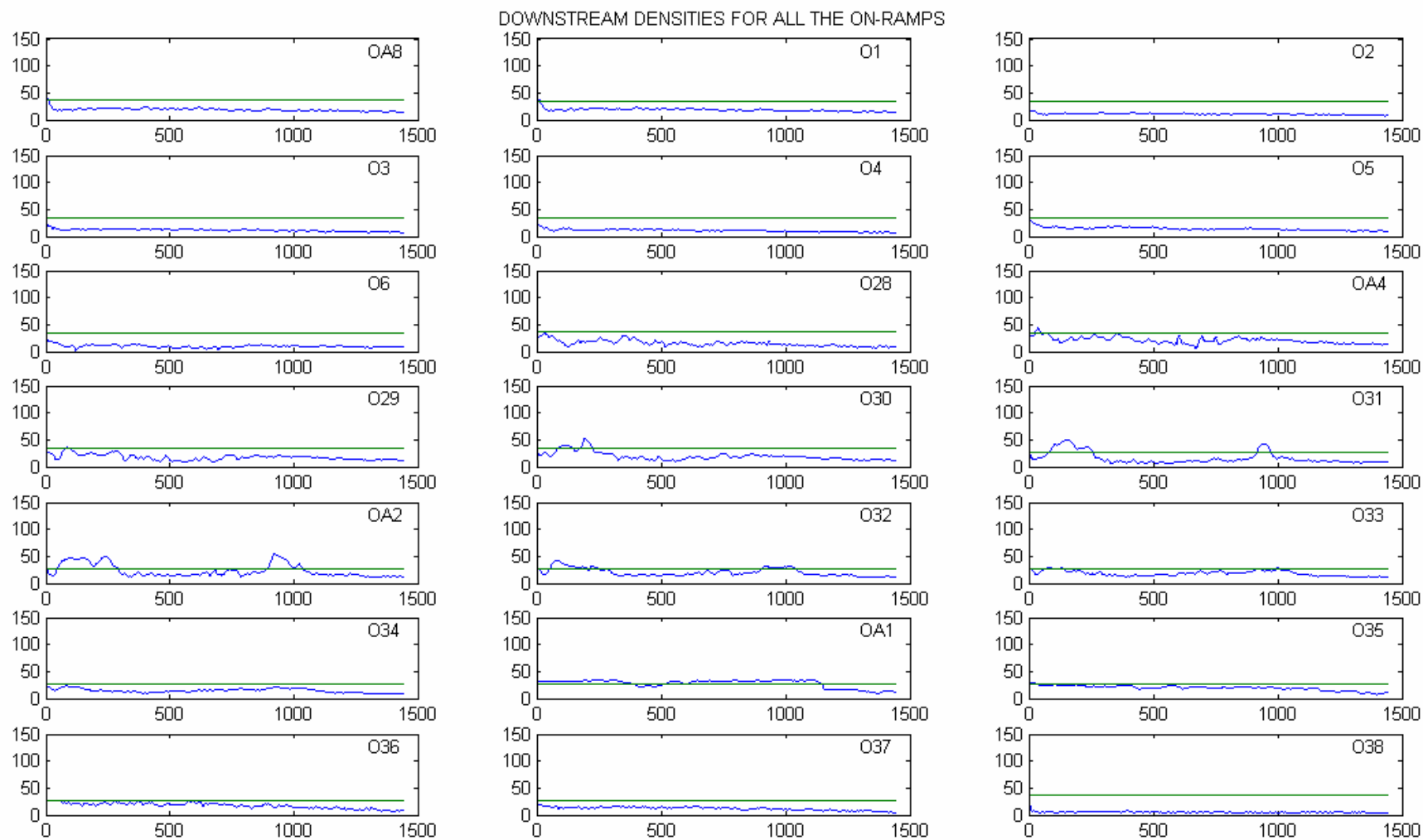
Σχήμα 5.16 Σενάριο 3 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

AMOC

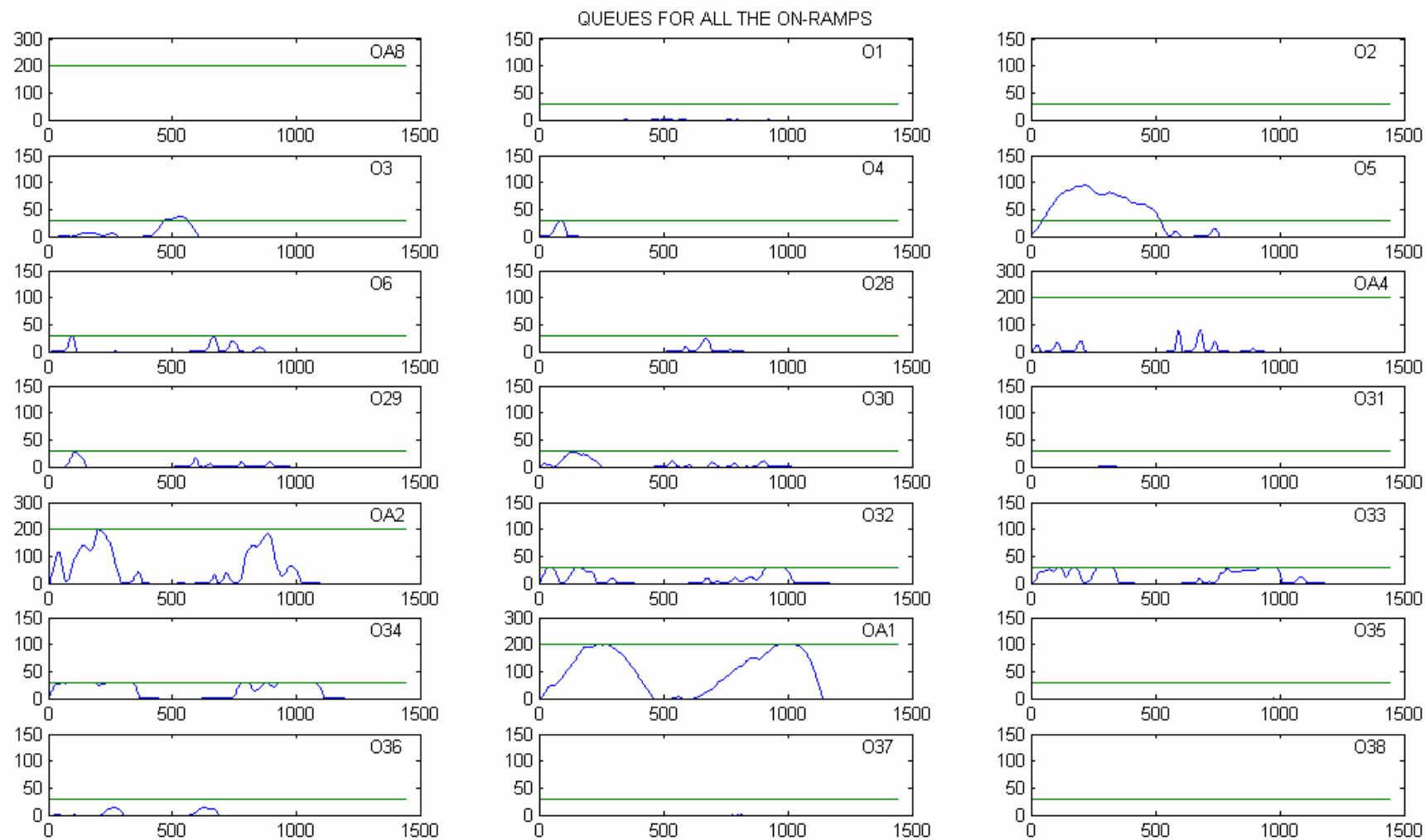
Το μήκος των 200 οχημάτων στις ράμπες εισόδου από τους αυτοκινητόδρομους, φαίνεται να αρκεί στο AMOC. Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 7029 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 50.13% σε σχέση με το *Σενάριο 0*. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.7-5.19, τα αποτελέσματα που παράγονται είναι ιδιαίτερα καλά, με τις ουρές να μην ξεπερνούν τα όρια, με εξαίρεση την ράμπα από αστικό δίκτυο Ο5. Ενώ σε λίγες περιπτώσεις και για μικρά χρονικά διαστήματα παρατηρούνται γεμάτες ράμπες.

Σημειώνεται πως για το βασικό σενάριο ζήτησης, αυτή η λύση αποτελεί και την βέλτιστη για το AMOC, το οποίο δεν επηρεάζεται από περαιτέρω αύξηση του μήκους των ραμπών στις συνδέσεις με άλλους αυτοκινητόδρομους.

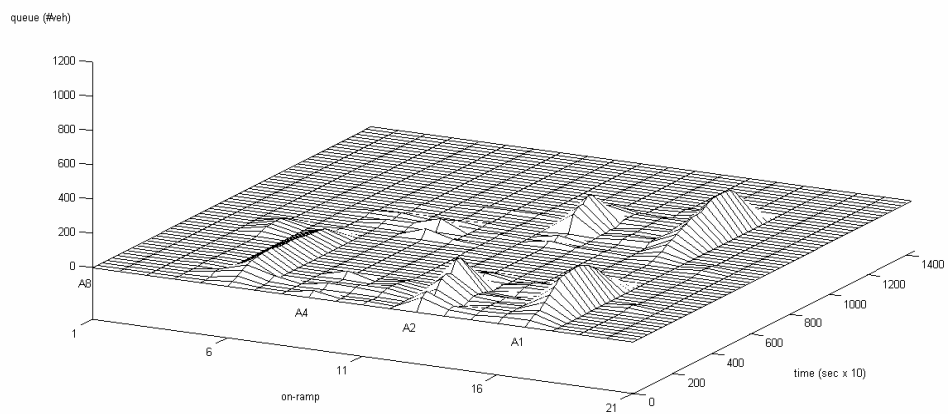
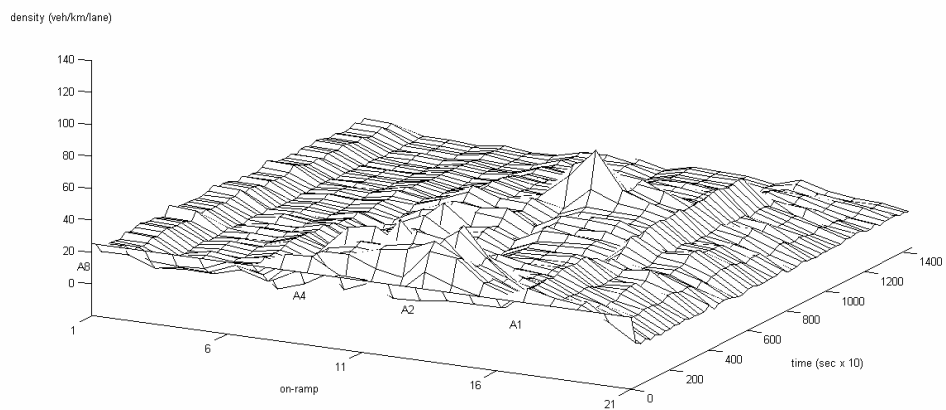
Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ουρές που σχηματίζονται στην ράμπα Ο5 οφείλονται στην έντονη εισερχόμενη ζήτηση και όχι σε συνθήκες κορεσμού εντός του δικτύου.



Σχήμα 5.17 Σενάριο 3 – ΑΜΟC - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.18 Σενάριο 3 – ΑΜΟC - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.19 Σενάριο 3 – ΑΜΟC – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

Σενάριο 5

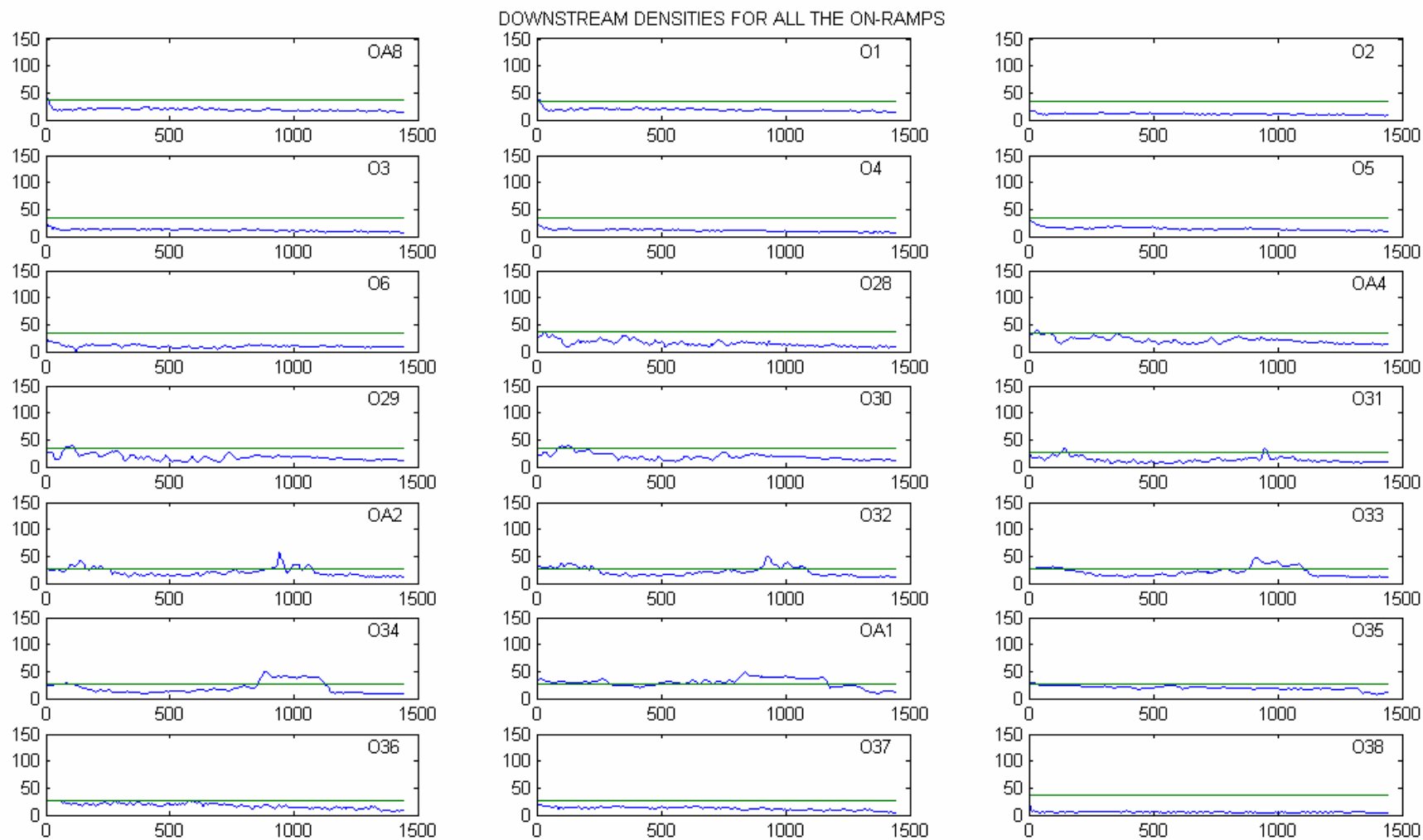
ALINEA

Στο Σενάριο 5 πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, με χρήση ραμπών μήκους 30 οχημάτων για τις ράμπες από το αστικό δίκτυο και 400 οχημάτων για αυτές από αυτοκινητόδρομους.

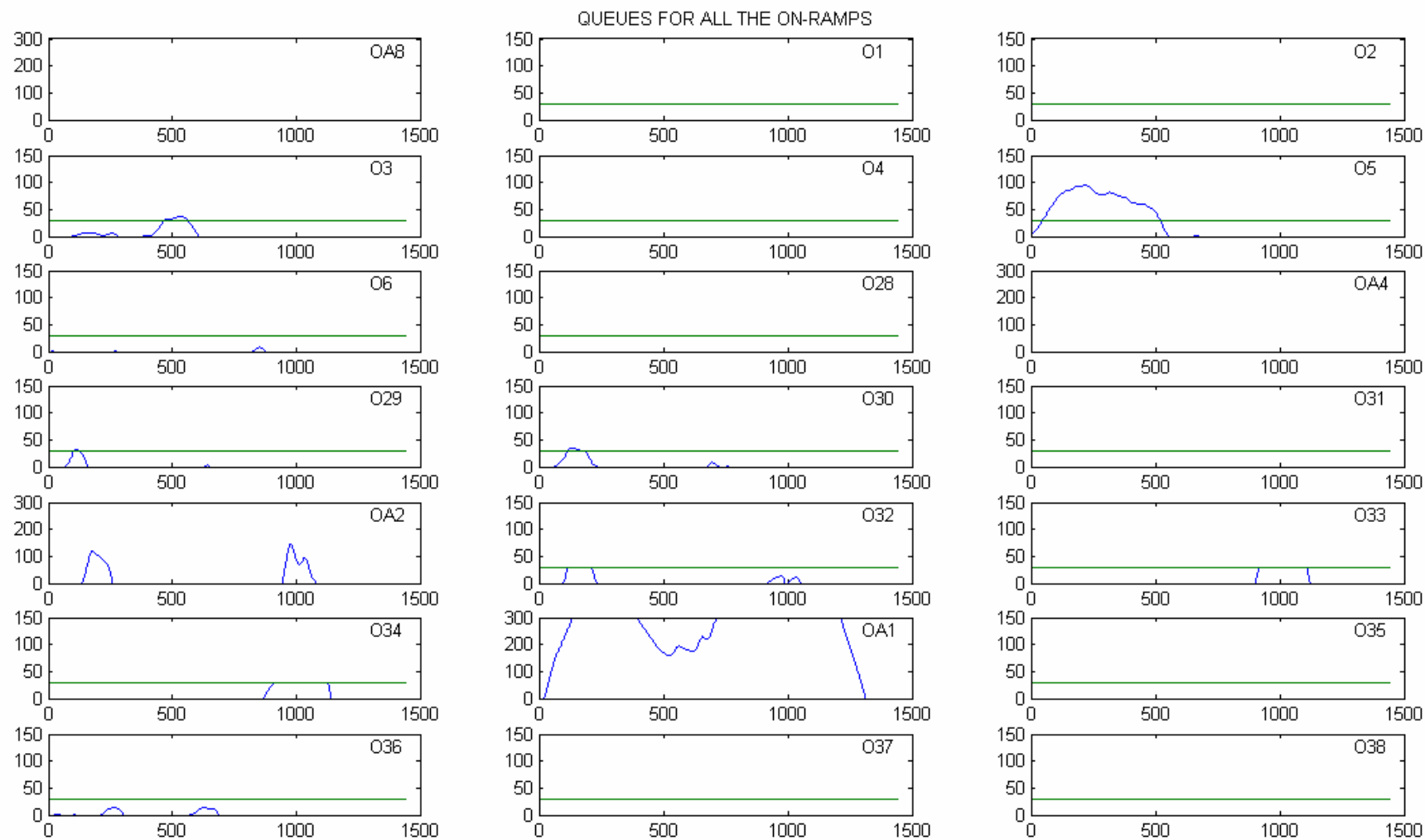
Σχετικά μικρή είναι η βελτίωση σε σχέση με τα αποτελέσματα του Σεναρίου 4. Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 7708 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 45.31% σε σχέση με το Σενάριο 0. Συγκρίνοντας και με το βέλτιστο του AMOC (50.13%) μπορεί να υποτεθεί ότι η ALINEA βρίσκεται κοντά στο βέλτιστό της.

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.20-5.22, οι ουρές όμως που σχηματίζονται στη ράμπα του A1 αναλογικά με αυτές των άλλων αυτοκινητοδρόμων, είναι και σε αυτή την περίπτωση πολύ μεγαλύτερες.

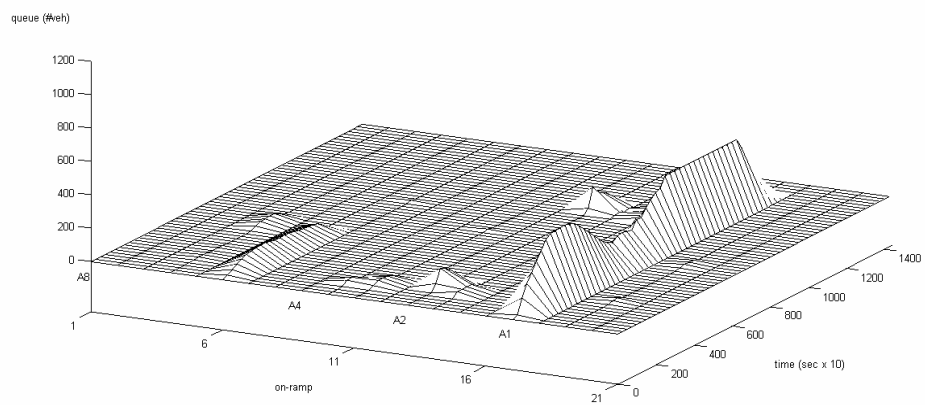
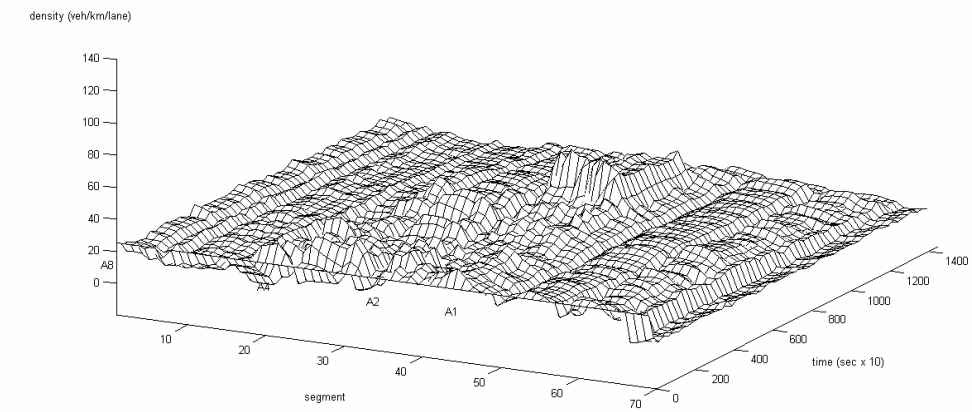
Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση βρίσκονται πολύ κοντά σε εκείνα του AMOC με μόνη διαφορά ότι η υλοποίηση του δεύτερου κάνει πολύ καλύτερη διαχείριση των ραμπών, αποφεύγοντας τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 5.20 Σενάριο 5 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατόντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.21 Σενάριο 5 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.22 Σενάριο 5 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

5.3.2 Αυξημένη ζήτηση κατά 5%

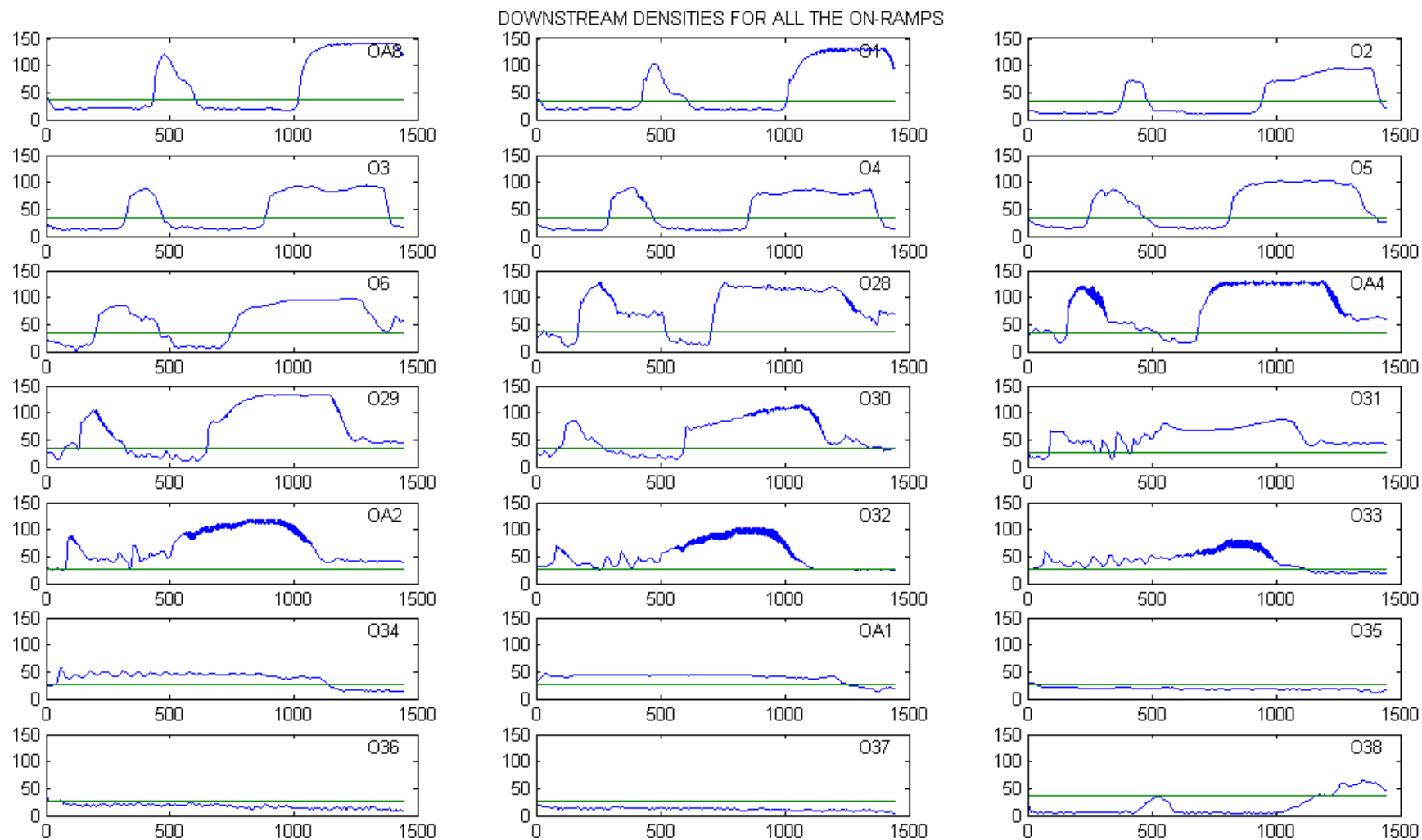
Στο κεφάλαιο αυτό ελέγχουμε τα αποτελέσματα τόσο της ALINEA, όσο και του AMOC σε συνθήκες αυξημένης ζήτησης κατά 5% σε σχέση με το βασικό σενάριο.

Ακολουθείται η ίδια λογική με αυτήν που εφαρμόστηκε για το βασικό σενάριο ζήτησης. Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση απουσίας ελέγχου (Σενάριο 7, Πίνακας 5.4) που χρησιμοποιείται και πάλι ως μέτρο σύγκρισης και στην συνέχεια τα διάφορα σενάρια για τις χωρητικότητες στις ράμπες των αυτοκινητοδρόμων.

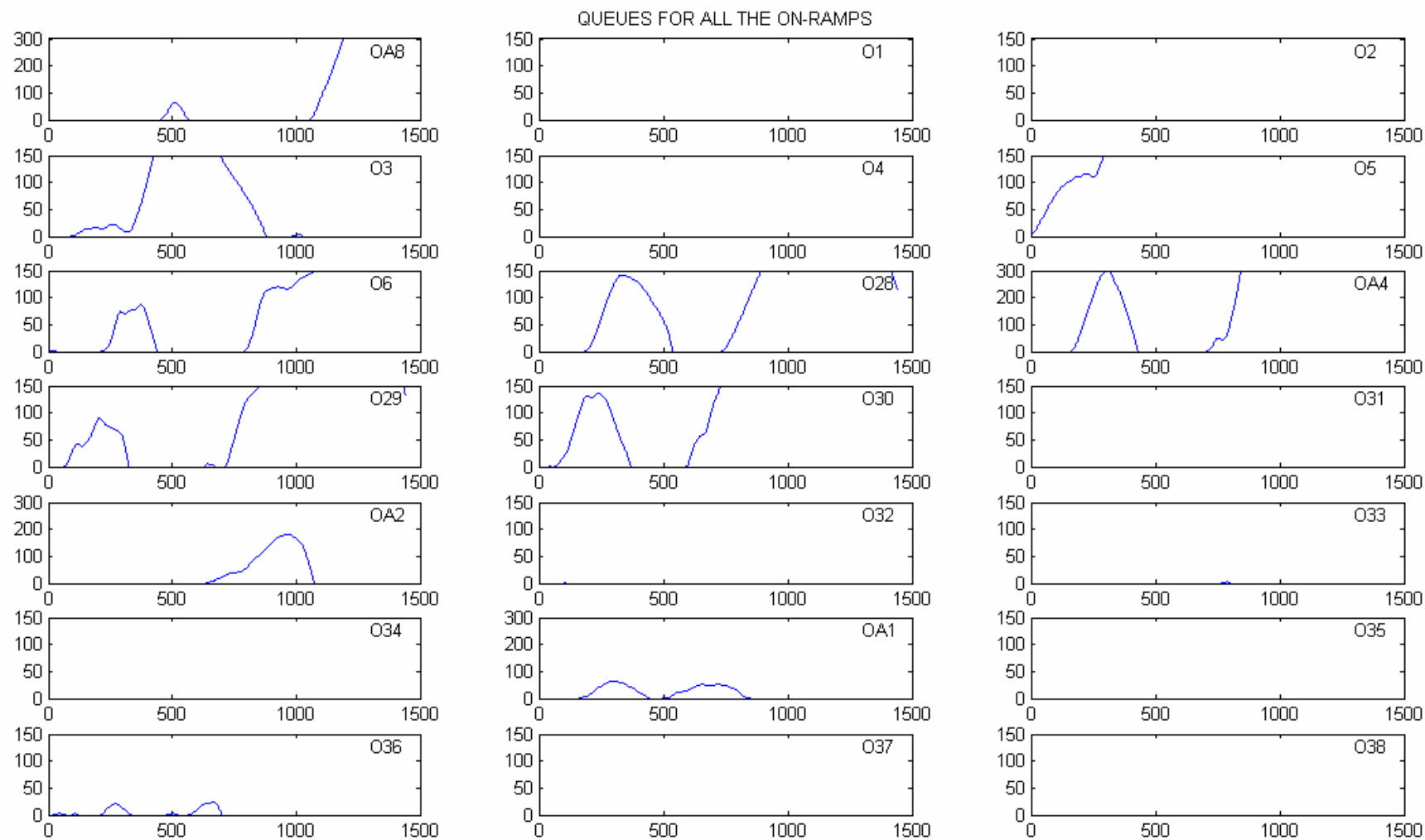
Σενάριο 7

Στο Σενάριο 7 πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, απουσίας ελέγχου για την περίπτωση αυξημένης ζήτησης. Η εικόνα που παρατηρείται από την αύξηση της κίνησης είναι πραγματικά απογοητευτική. Το δίκτυο του A10 δεν μπορεί στο μεγαλύτερο μέρος του να εξυπηρετήσει αποτελεσματικά την ζήτηση από μόνο του, και το πρόβλημα αυτό, παρουσιάζεται καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 22728 οχ.ώρες.

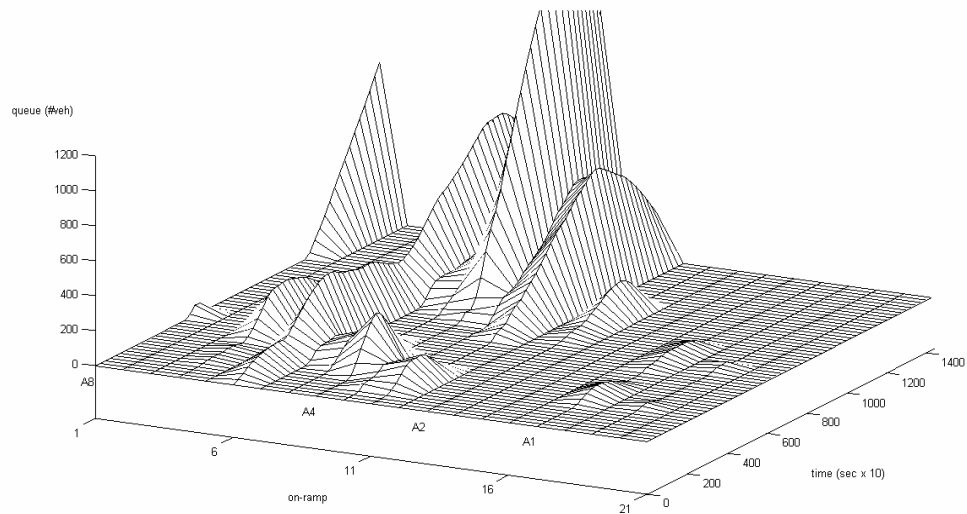
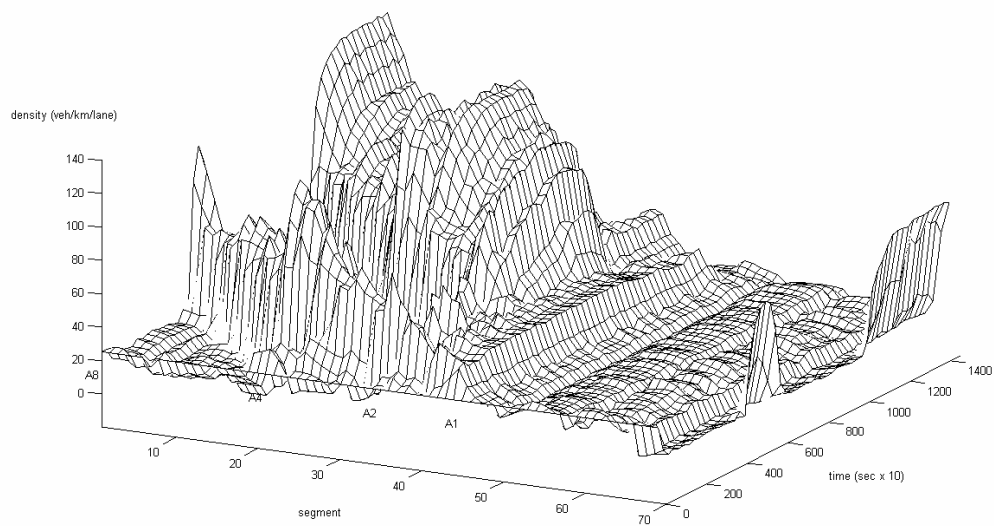
Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.23-5.25, η συμφόρηση ξεκινάει και πάλι από την συμβολή του A10 με τον A1, πλέον όμως, φθάνει μέχρι την συμβολή του με τον A8. Όλες οι ράμπες από του O30 έως του O5 ξεπερνούν τα όρια των ουρών τους εξαιτίας της συμφόρησης που ξεκίνησε στην συμβολή με τον A1. Οι ουρές που σχηματίζονται ξεπερνούν στον A4 τα 1200 οχήματα, ενώ στις O30, O29 και O5 οι ουρές αγγίζουν τα 600 οχήματα. Το γεγονός ότι οι τελευταίες αποτελούν ράμπες εισόδου από αστικό δίκτυο, σημαίνει πως η συμφόρηση εντός του A10 μεταφέρεται στο αστικό δίκτυο. Αυτό ενδέχεται να προκαλέσει σωρεία προβλημάτων στην λειτουργία του αστικού δικτύου όπως μεταφορά της συμφόρησης σε παρακείμενους στη ράμπα δρόμους, απρόβλεπτη συμπεριφορά των οδηγών, κ.α.



Σχήμα 5.23 Σενάριο 7 – Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.24 Σενάριο 7 - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



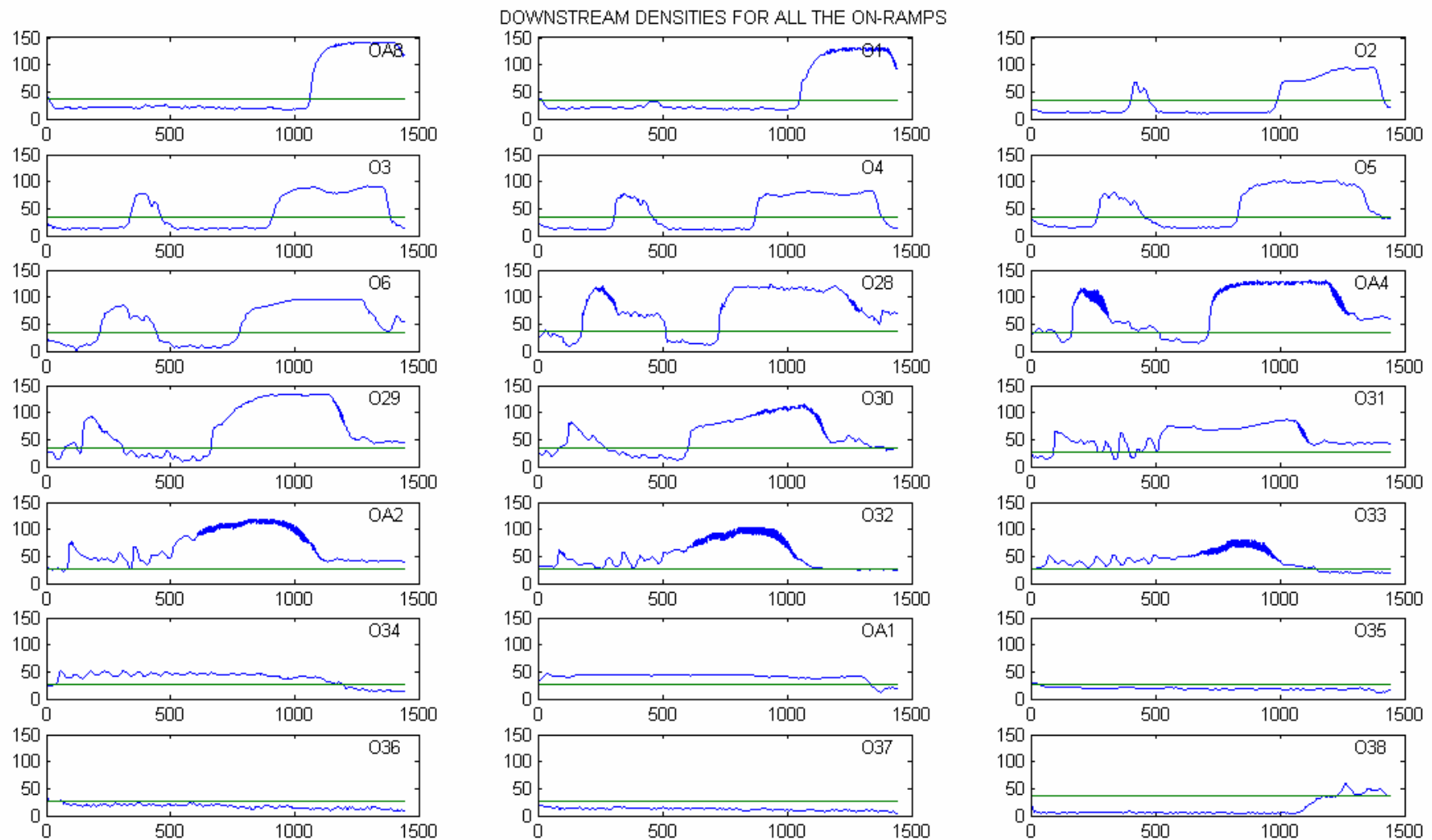
Σχήμα 5.25 Σενάριο 7 – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

Σενάριο 8

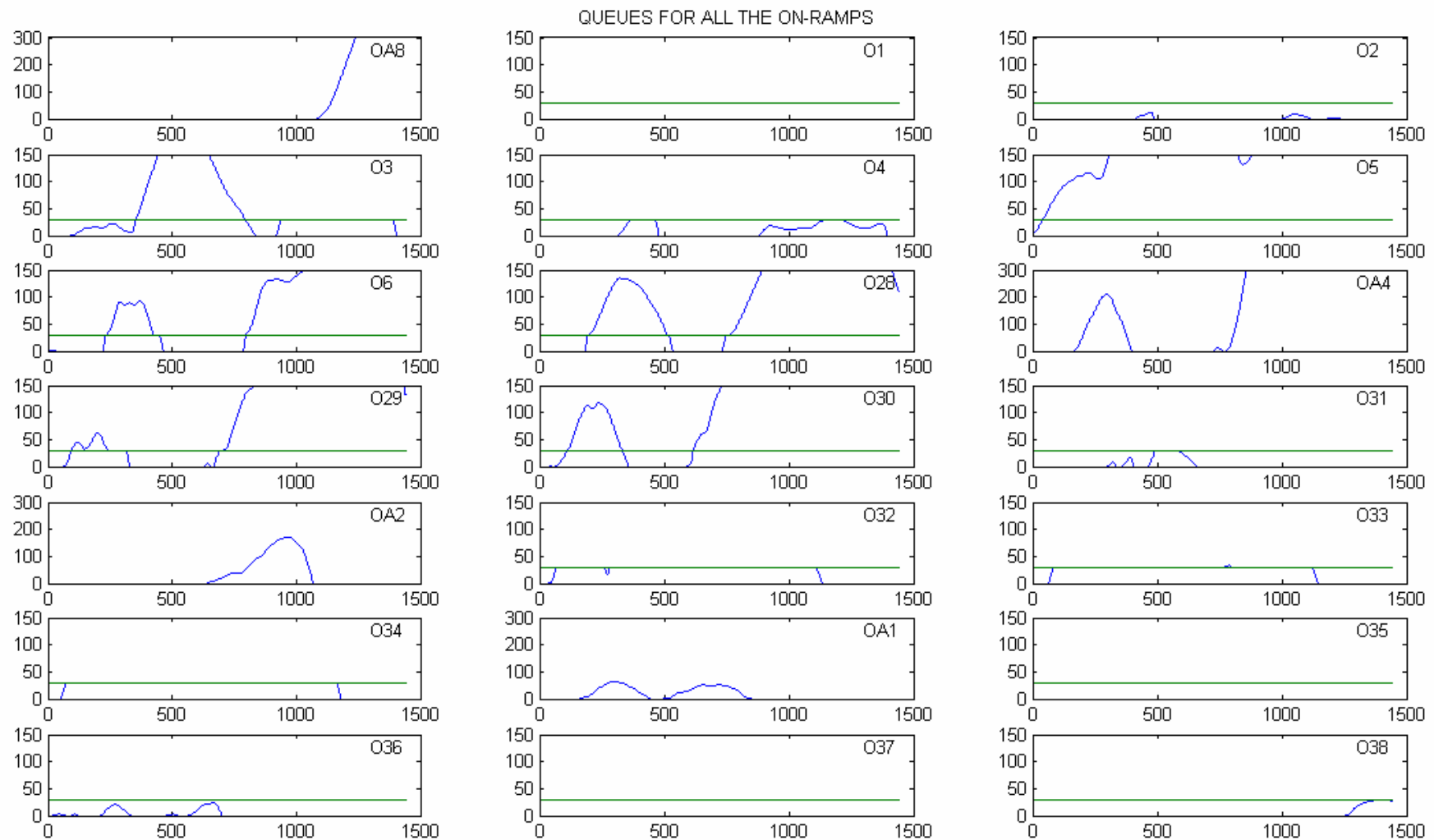
ALINEA

Στο *Σενάριο 8* πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου κάνοντας χρήση ελέγχου μόνο στις ράμπες που τροφοδοτούν τον Α10 από το αστικό δίκτυο.

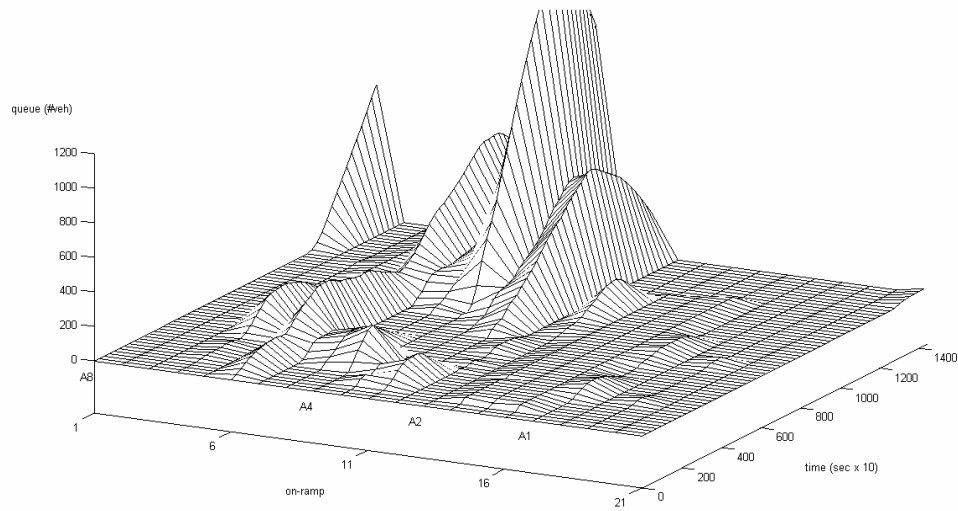
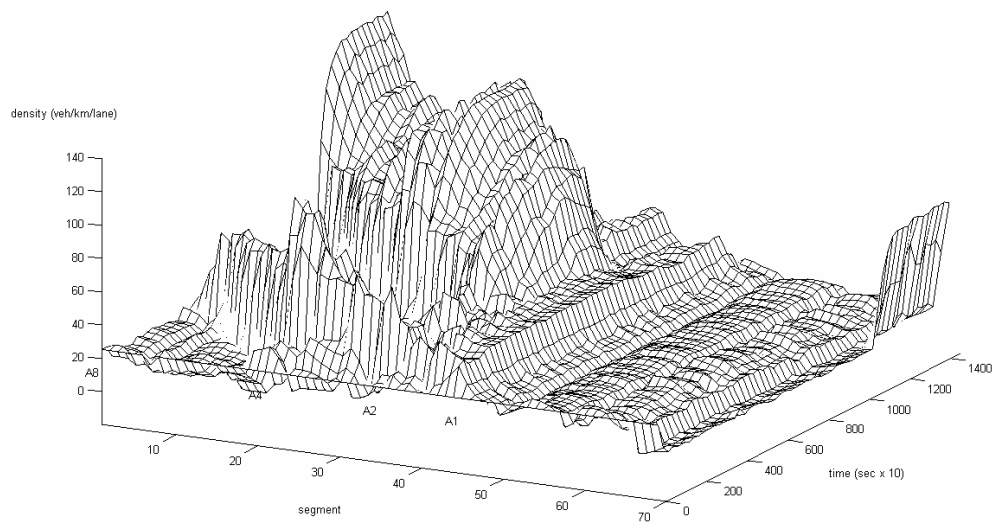
Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 21689 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 4.57% σε σχέση με το *Σενάριο 7*. Όπως παρατηρήθηκε και στο *Σενάριο 1*, έτσι και εδώ η εφαρμογή ελέγχου μόνο στις ράμπες από αστικά δίκτυα δεν αρκεί για να επηρεάσει ουσιαστικά το φαινόμενο, καθιστώντας για άλλη μια φορά απαραίτητη την εφαρμογή του στις ράμπες από αυτοκινητόδρομους. Η συμπεριφορά του δικτύου περιγράφεται από τα διαγράμματα 5.26-5.28,



Σχήμα 5.26 Σενάριο 8 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.27 Σενάριο 8 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)

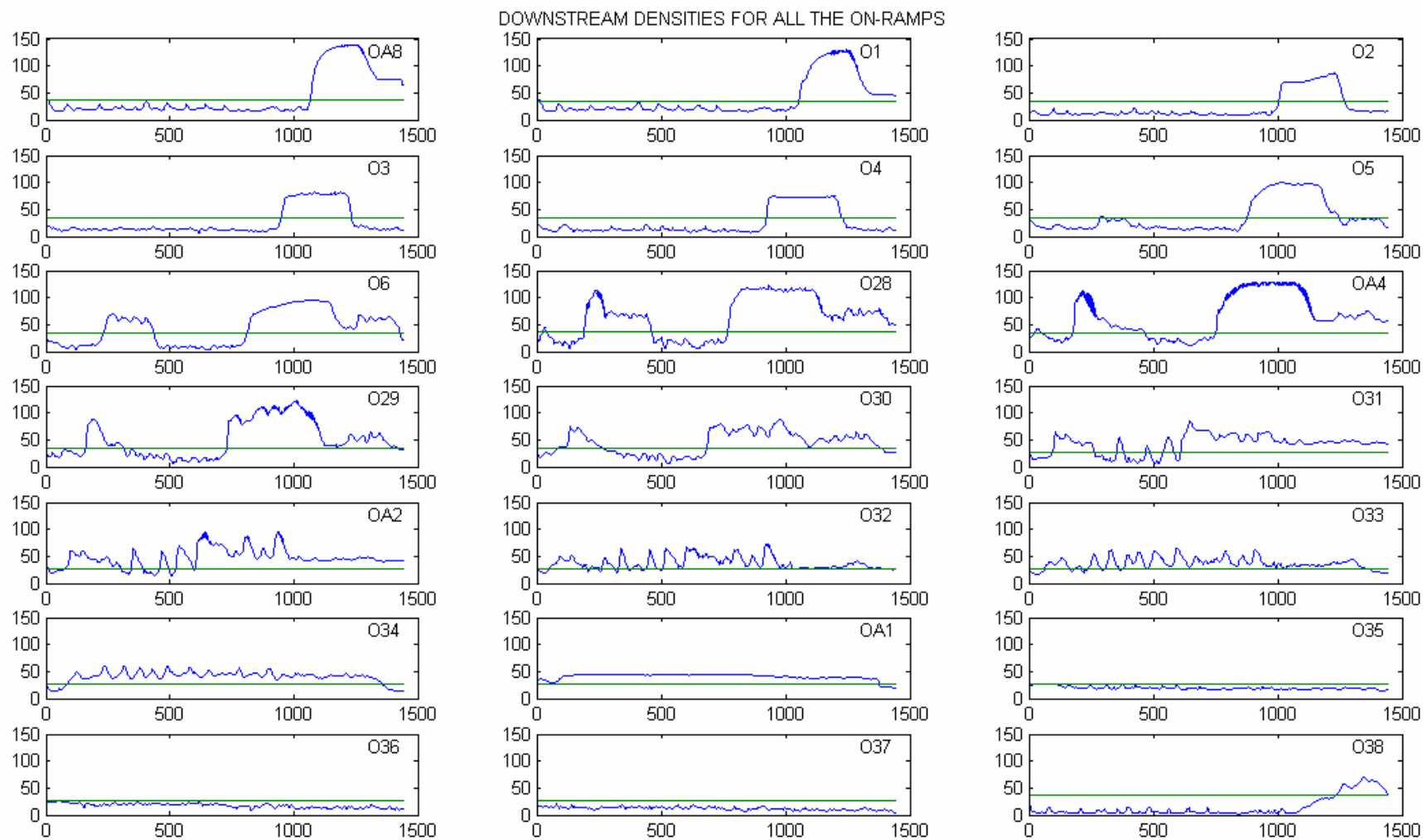


Σχήμα 5.28 Σενάριο 8 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

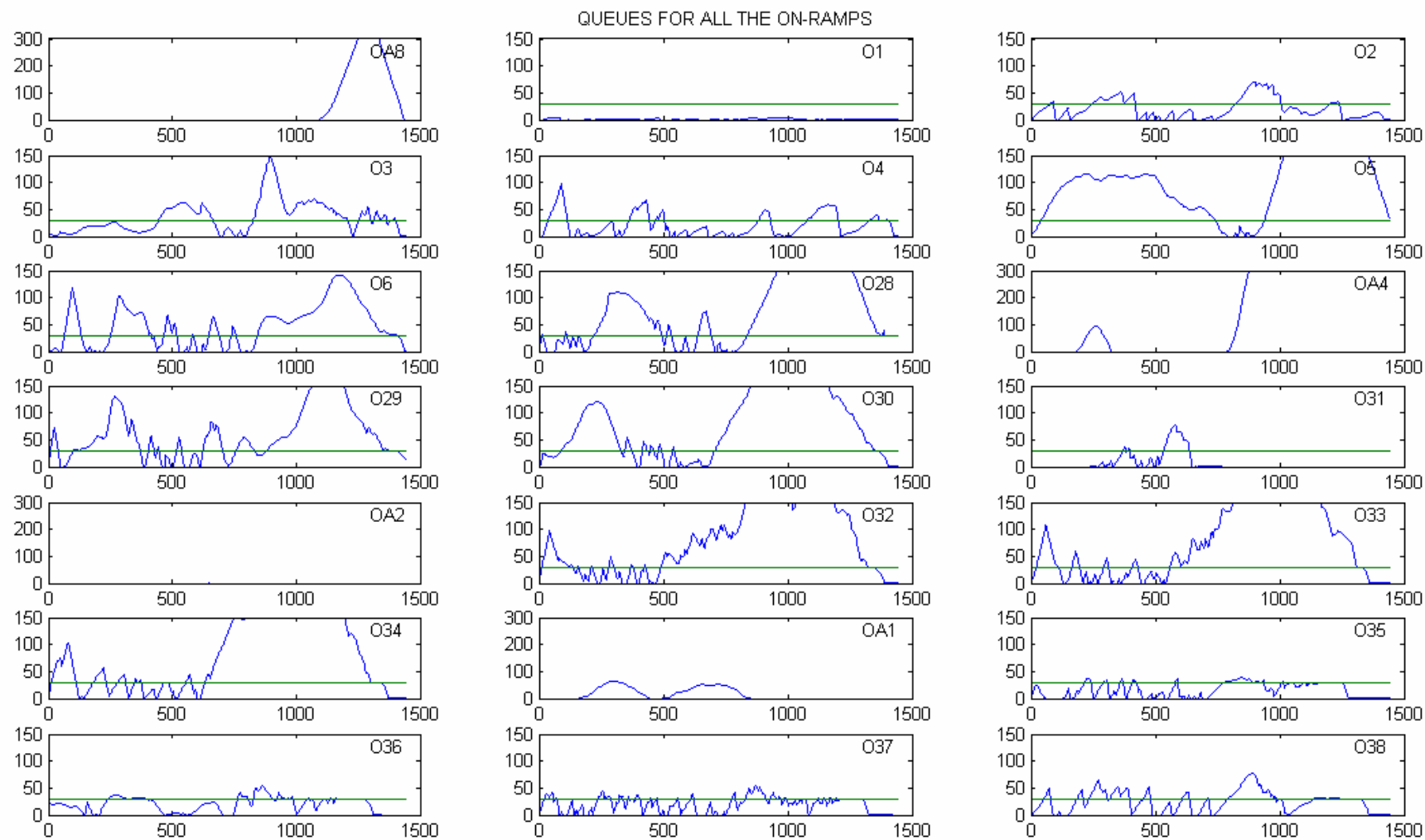
AMOC

Η συμπεριφορά του AMOC είναι σαφώς καλύτερη, ελέγχοντας σε μεγαλύτερο βαθμό το πρώτο κύμα ζήτησης και περιορίζοντας το πρόβλημα στο δεύτερο. Η κατάσταση παρόλα αυτά παραμένει χαώδης στο μεγαλύτερο μέρος του δικτύου σχεδόν για ολόκληρη την διάρκεια της προσομοίωσης. Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 17074 οχ. ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 24.88% σε σχέση με το *Σενάριο 7*.

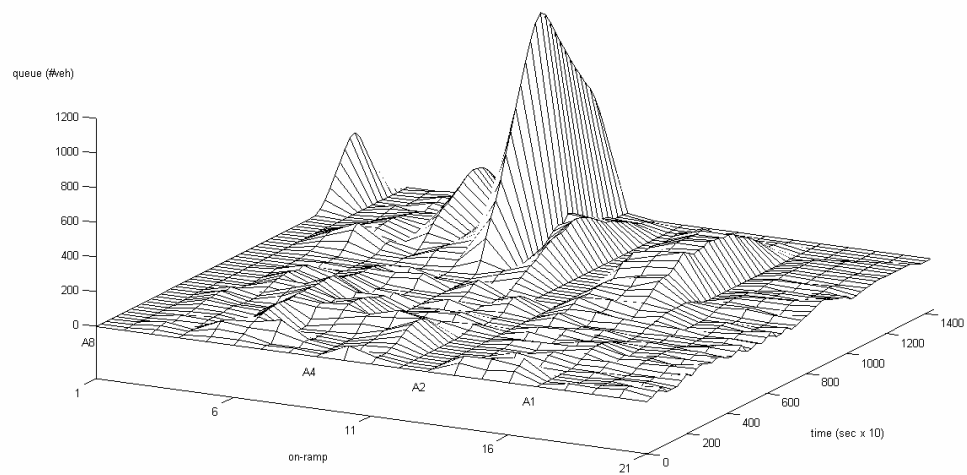
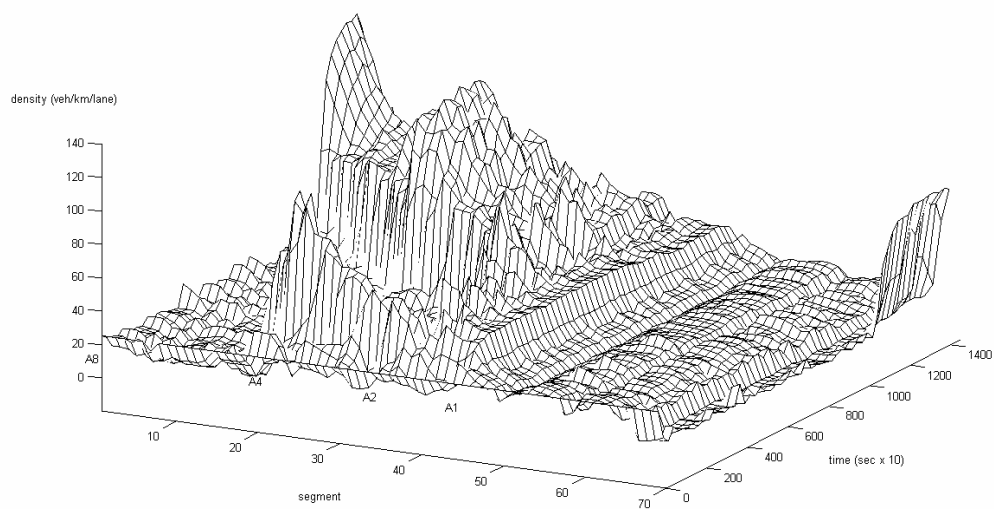
Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.29-5.31, οι ουρές που σχηματίζονται είναι πολύ μικρότερες κυρίως στις ράμπες που τροφοδοτούνται από αστικά δίκτυα. Το γεγονός αυτό, καταδεικνύει την αναγκαιότητα του ελέγχου έστω και μόνο στις ράμπες αυτές, προκειμένου να μην εμφανιστούν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως στα αστικά δίκτυα.



Σχήμα 5.29 Σενάριο 8 – ΑΜΟC - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.30 Σενάριο 8 – ΑΜΟC - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



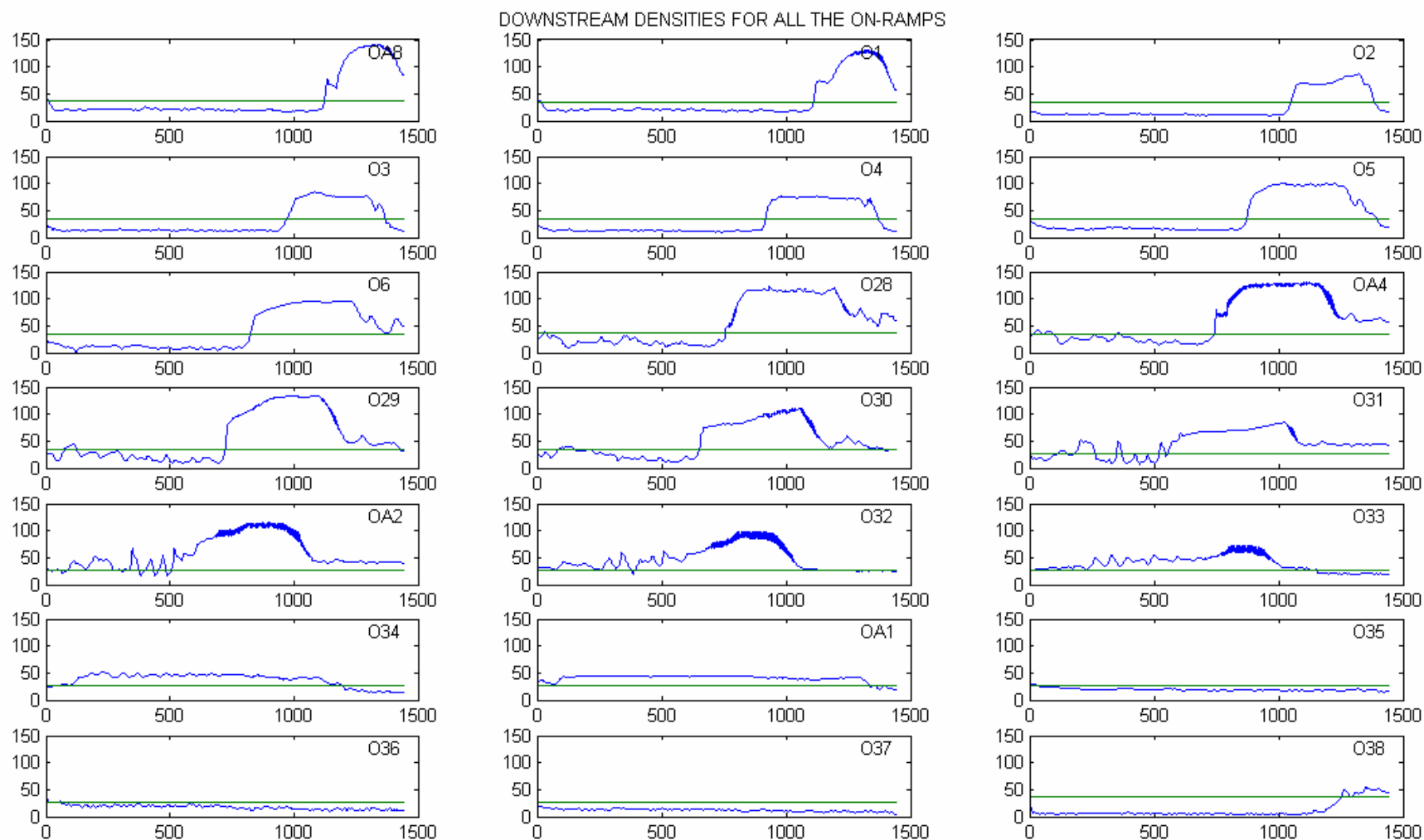
Σχήμα 5.31 Σενάριο 8 – ΑΜΟC – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

Σενάριο 10

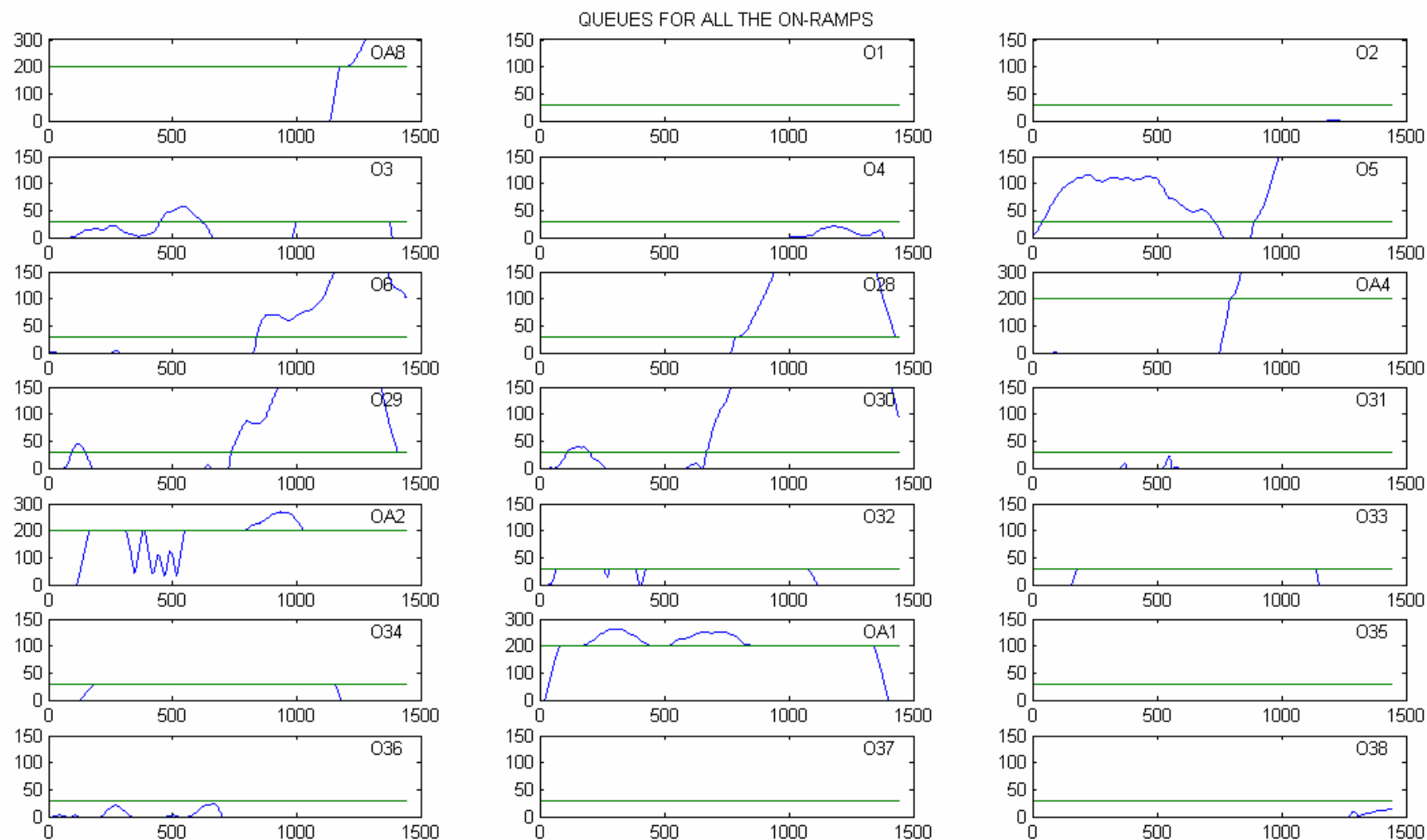
ALINEA

Στο *Σενάριο 10* πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, με χρήση ραμπών μήκους 30 οχημάτων για τις ράμπες από το αστικό δίκτυο και 200 οχημάτων για αυτές από αυτοκινητόδρομους.

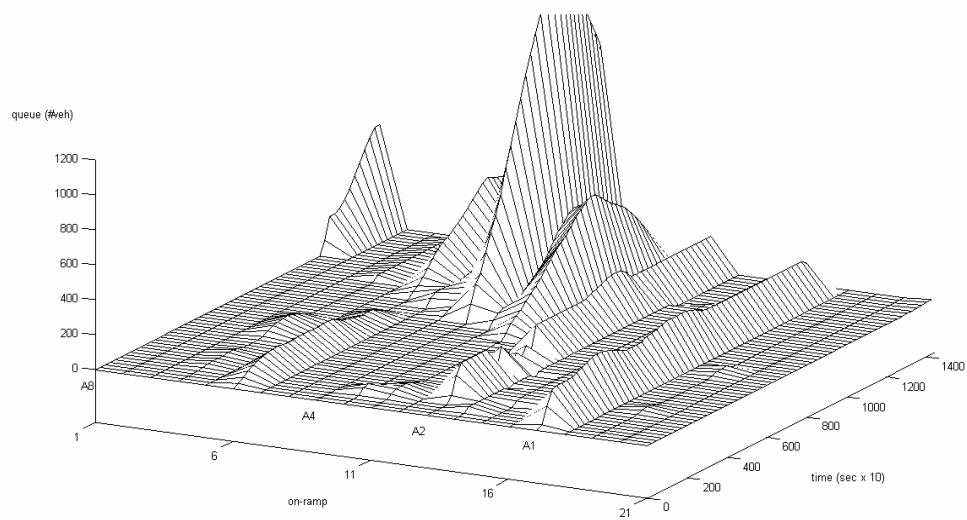
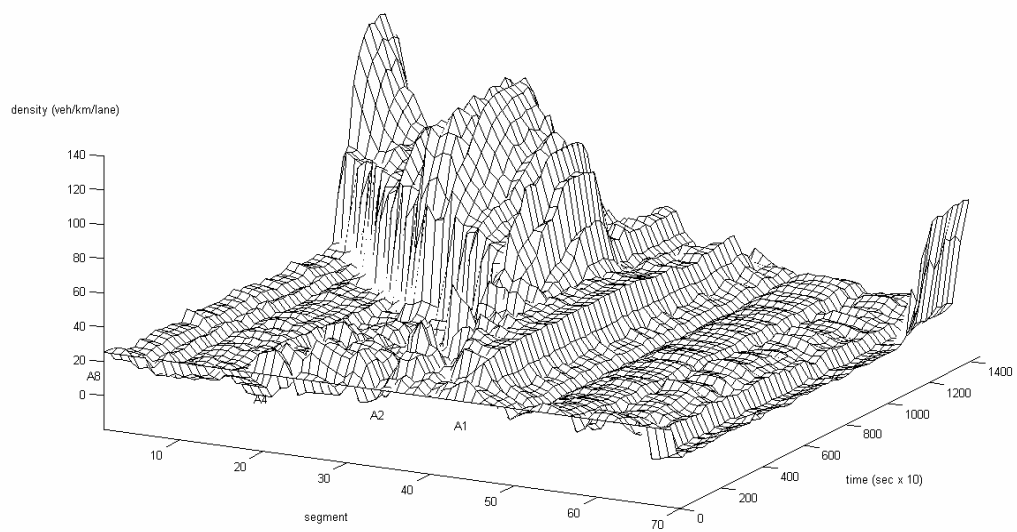
Μικρή βελτίωση σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο και σε αυτή την περίπτωση. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.32-5.34, υπάρχει μια γενικότερη αδυναμία της ALINEA να ελέγξει την εισερχόμενη κίνηση παρά την αύξηση του μέγιστου μήκους ουρών. Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 19212 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 15.47% σε σχέση με το *Σενάριο 7*. Η ALINEA, συνεπώς, αδυνατεί να εκμεταλλευτεί αποτελεσματικά την ουρά στις ράμπες των αυτοκινητόδρομων



Σχήμα 5.32 Σενάριο 10 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.33 Σενάριο 10 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)

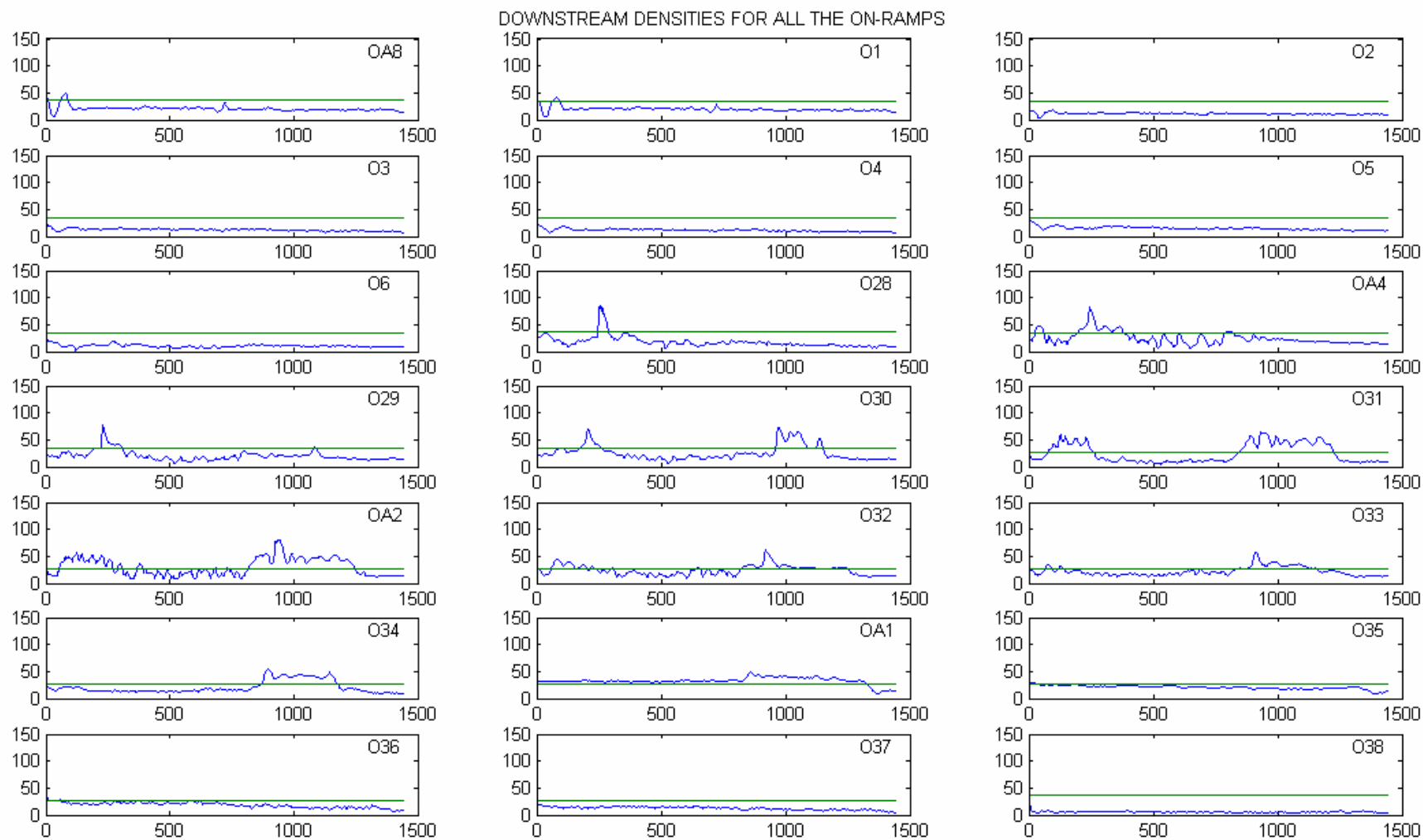


Σχήμα 5.34 Σενάριο 10 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

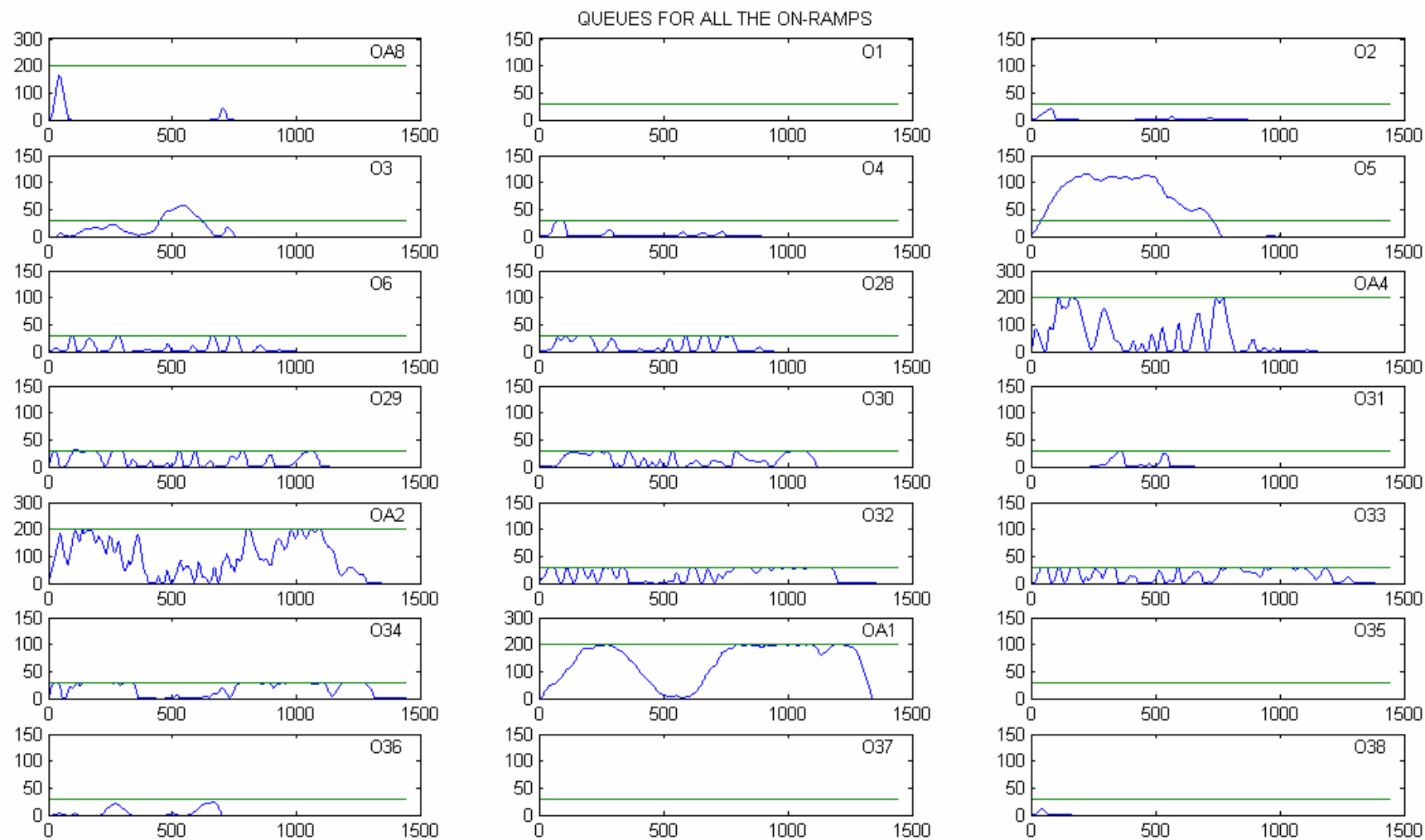
AMOC

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.35-5.37, σχετικά βελτιωμένο εμφανίζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του AMOC όσο αφορά στις πυκνότητες εντός του Α10, ενώ αρκετά ικανοποιητικό είναι το γεγονός ότι στις περισσότερες ράμπες εισόδου δεν δημιουργούνται ουρές εξαιτίας συμφόρησης εντός του αυτοκινητόδρομου. Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 8775 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 61.39% σε σχέση με το Σενάριο 7.

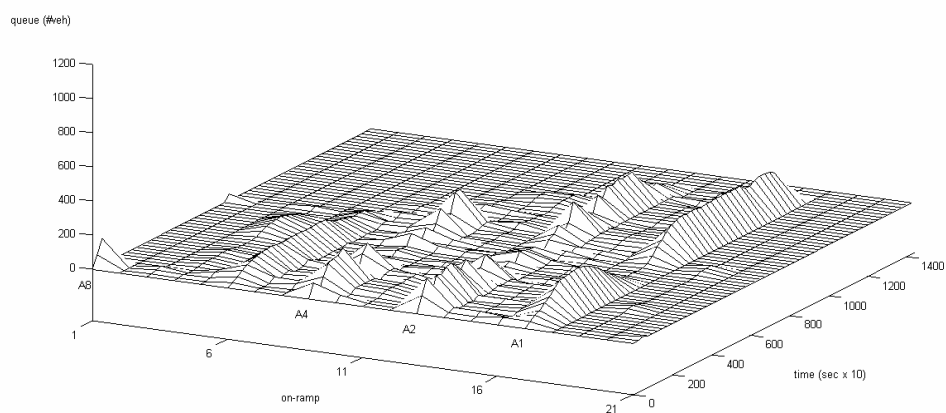
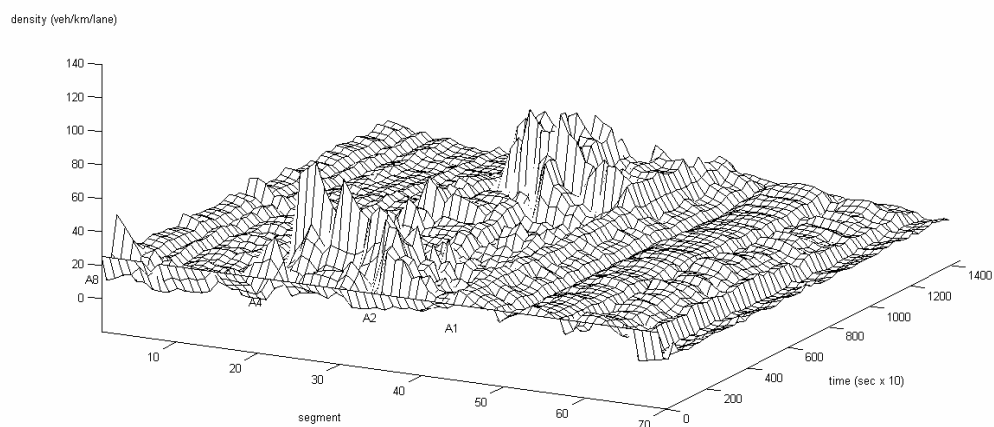
Ας σημειωθεί ότι η παραπάνω τιμή αποτελεί και την βέλτιστη για το AMOC. Όπως και στο βασικό σενάριο ζήτησης, έτσι και σε αυτό στο AMOC αρκούν οι ράμπες μήκους 200 οχημάτων προκειμένου να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση.



Σχήμα 5.35 Σενάριο 10 – ΑΜΟC - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.36 Σενάριο 10 – AMOC - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.37 Σενάριο 10 – ΑΜΟC – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

Σενάριο 12

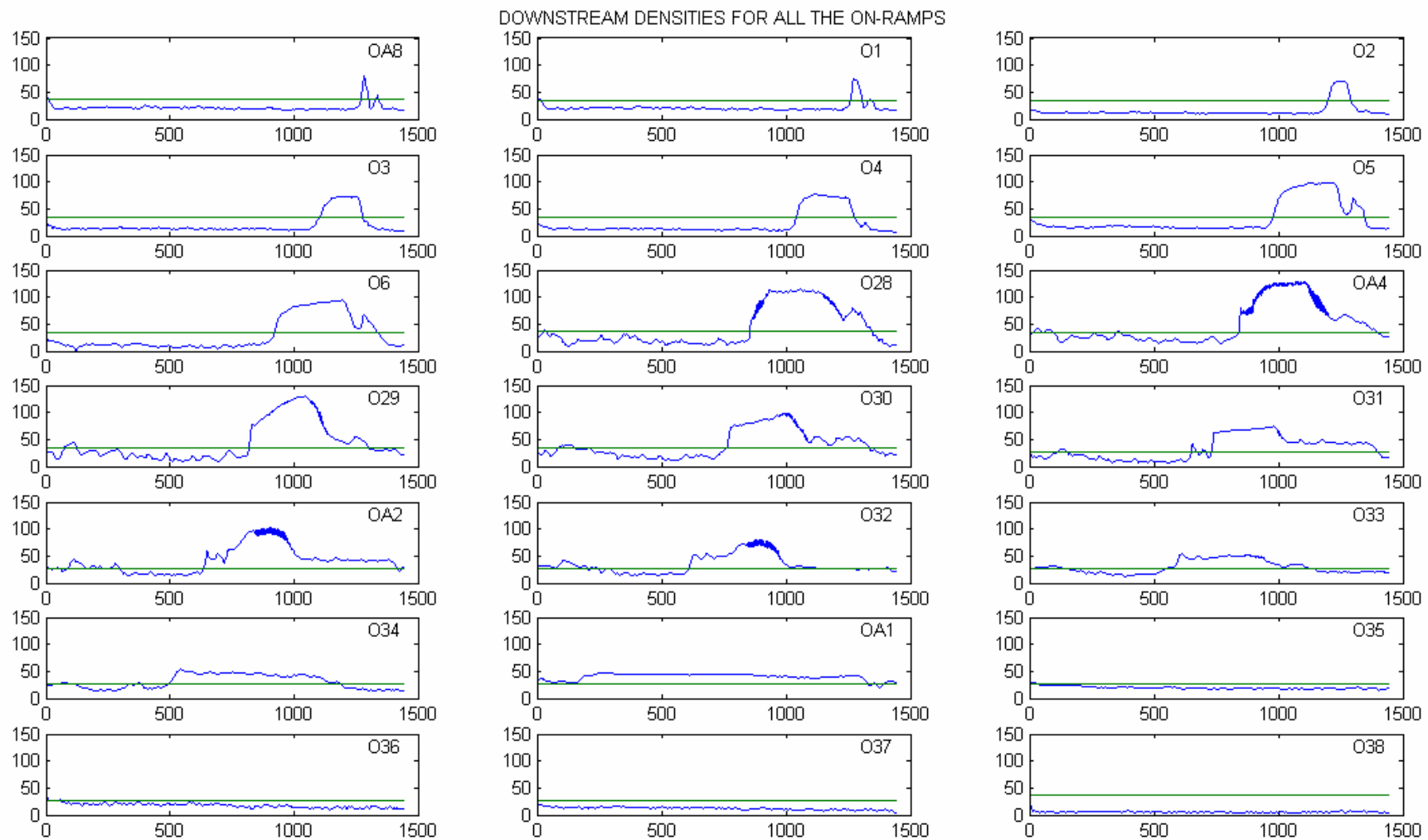
ALINEA

Στο Σενάριο 12 πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, με χρήση ραμπών μήκους 30 οχημάτων για τις ράμπες από το αστικό δίκτυο και 400 οχημάτων για αυτές από αυτοκινητόδρομους.

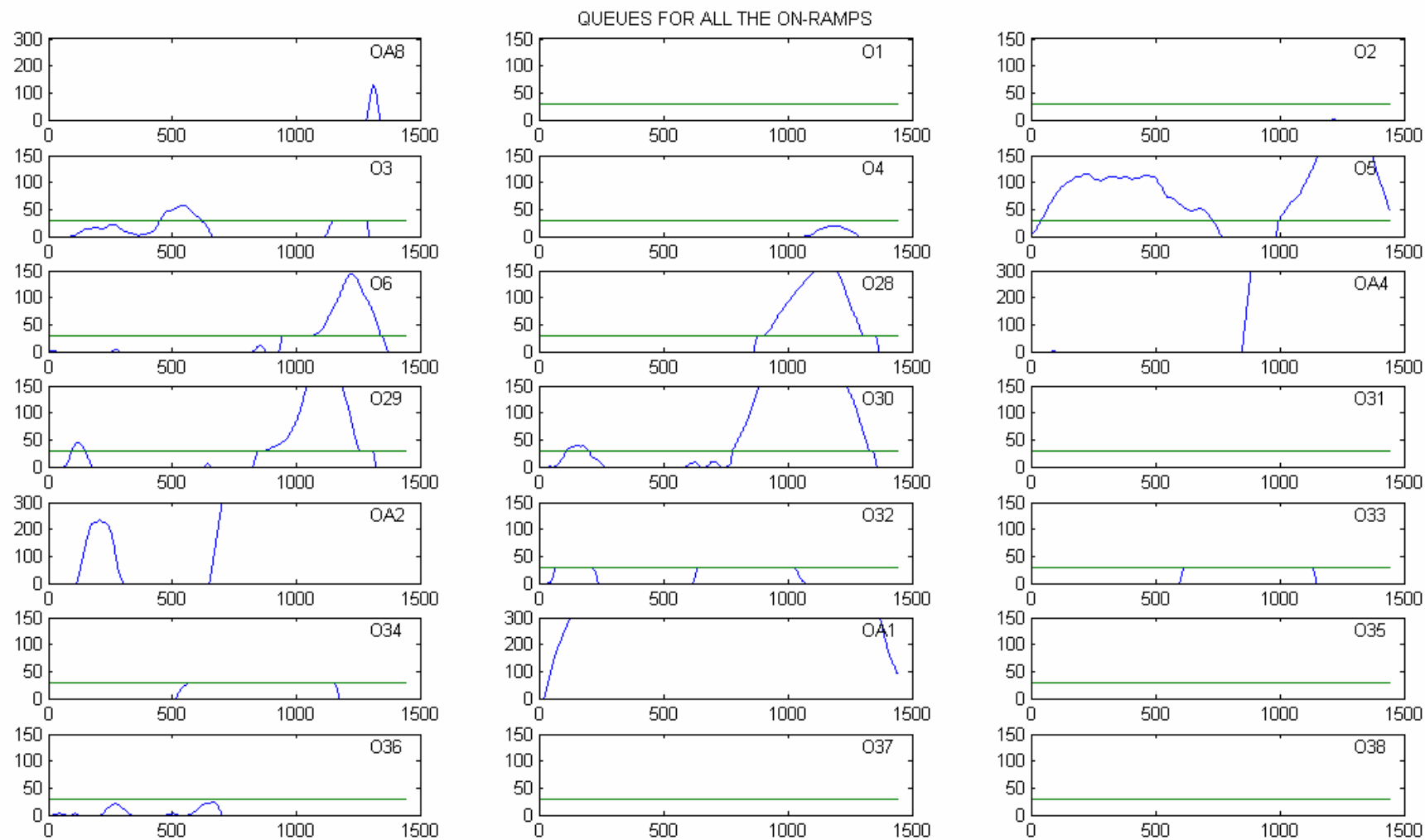
Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 15242 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 32.94% σε σχέση με το Σενάριο 7. Για άλλη μια φορά η κατάσταση δεν ελέγχεται αποτελεσματικά, με μόνη διαφορά ότι μειώνεται σχετικά το μέγεθος και η διάρκεια της συμφόρησης.

Συγκρίνοντας με τα προηγούμενα σενάρια, γίνεται αντιληπτή μια τάση αύξησης της αποτελεσματικότητας σε σχέση με το μήκος των ραμπών από αυτοκινητόδρομους. Αυτό αντανakλάται, Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.38-5.40, και στις δημιουργούμενες ουρές λόγω της συμφόρησης εντός του Α10, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική μείωση, κυρίως στις ράμπες από το αστικό δίκτυο.

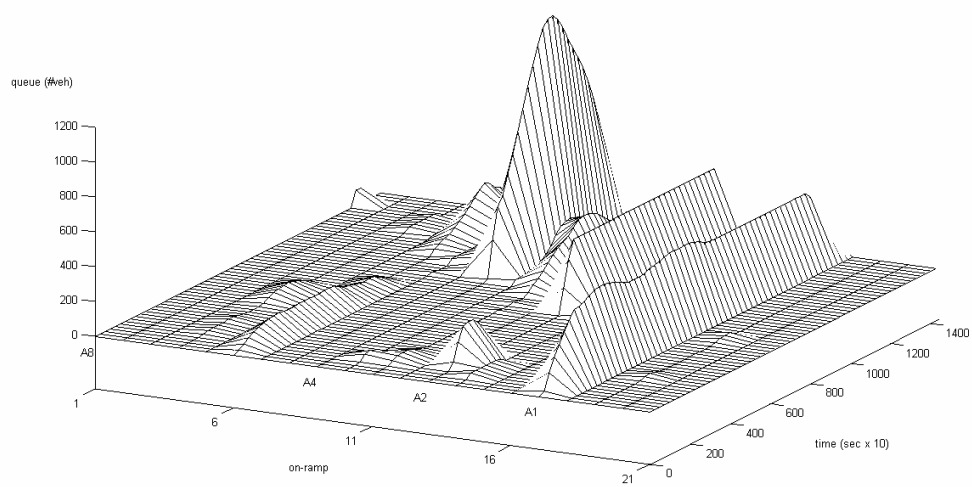
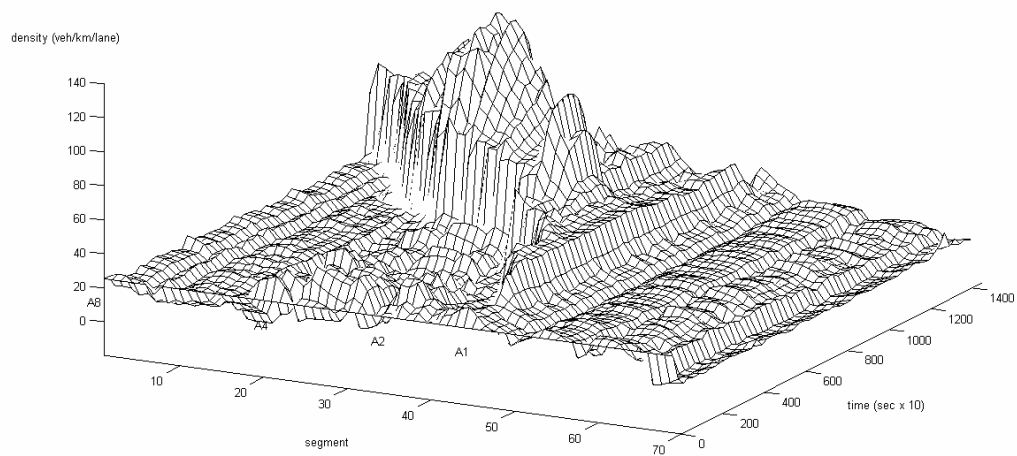
Παρόλα αυτά όμως, παρατηρούμε πως η ALINEA αργεί να συγκλίνει με την βέλτιστη λύση του AMOC, αλλά κυρίως δυσκολεύεται να ελέγξει το δεύτερο κύμα εισερχόμενης ζήτησης το οποίο προκαλεί έντονη συμφόρηση και κατ' επέκταση μεγάλες ουρές, τόσο σε ράμπες από το αστικό δίκτυο, όσο και σε ράμπες από αυτοκινητόδρομους.



Σχήμα 5.38 Σενάριο 12 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.39 Σενάριο 12 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνον (sec x 10)



Σχήμα 5.40 Σενάριο 12 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

Σενάριο 13

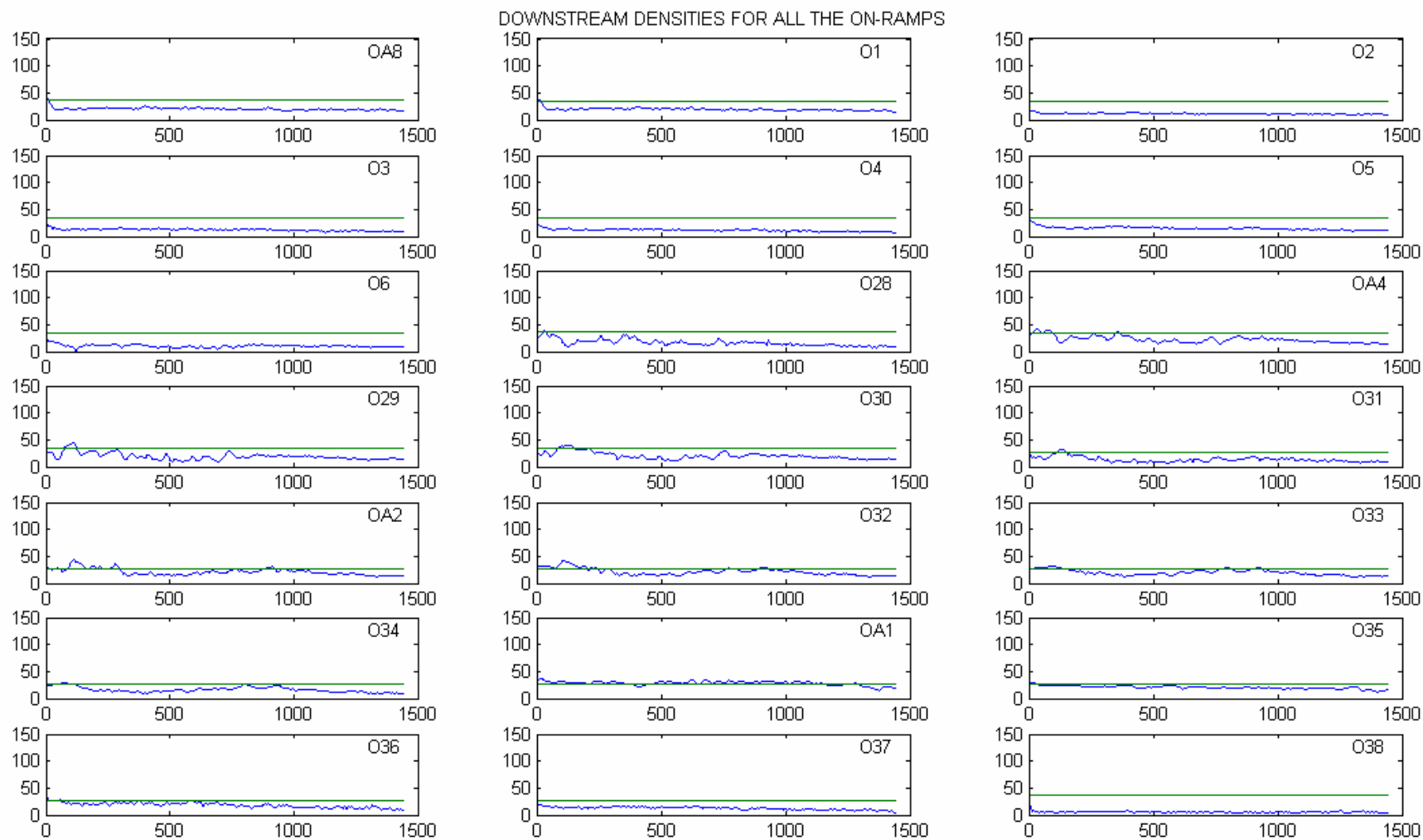
ALINEA

Στο Σενάριο 13 πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου, με χρήση ραμπών μήκους 30 οχημάτων για τις ράμπες από το αστικό δίκτυο και ράμπες άπειρου μήκους στις συνδέσεις με αυτοκινητόδρομους.

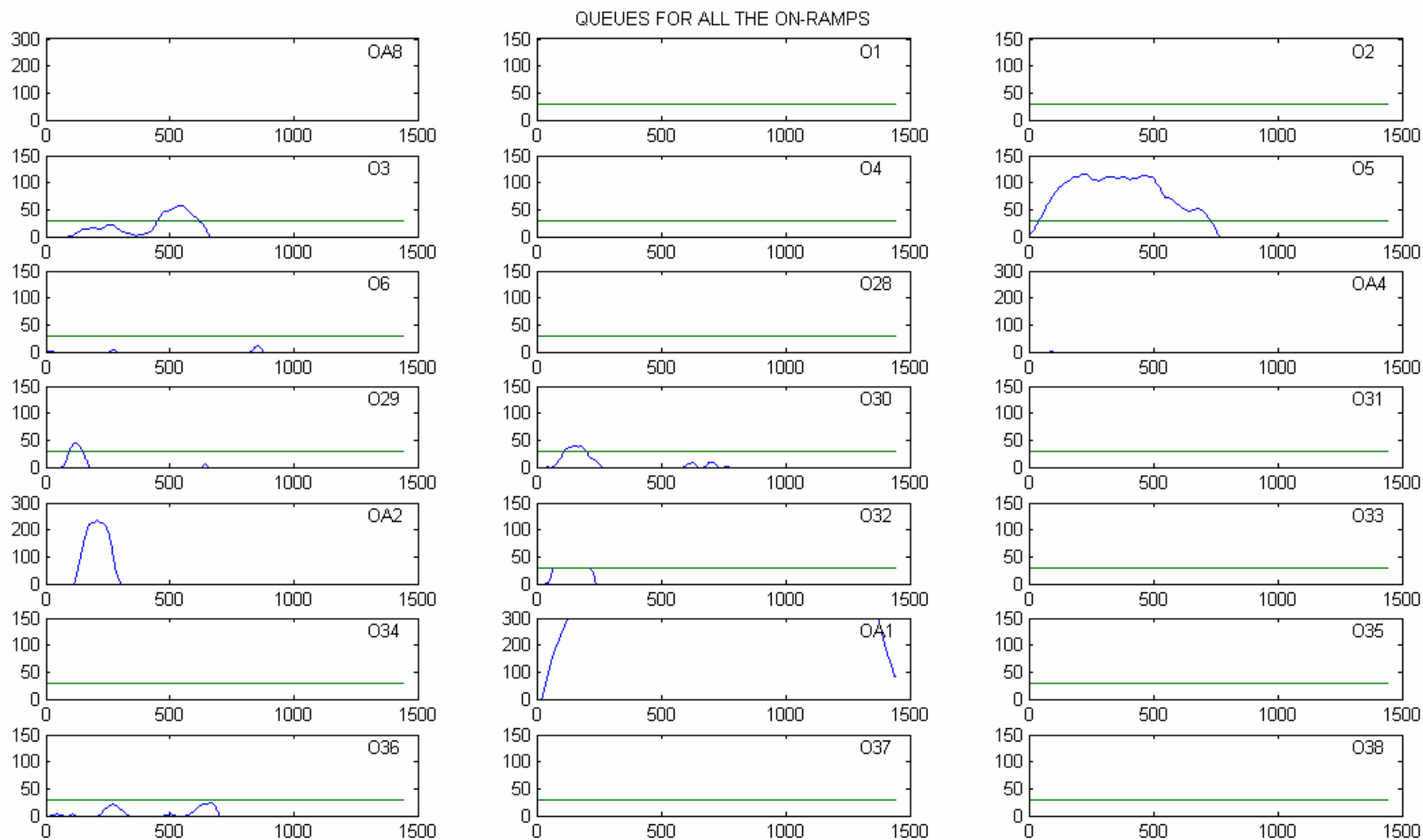
Ο συνολικός χρόνος που ξόδεψαν οι οδηγοί στο δίκτυο είναι 9242 οχ.ώρες, βελτίωση δηλαδή της τάξης του 59.34% σε σχέση με το Σενάριο 7. Δίνοντας την δυνατότητα στην ALINEA να χρησιμοποιήσει άπειρες ράμπες, παράγει τέλειο αποτέλεσμα ως προς την πυκνότητα εντός του δικτύου, όπως φαίνεται όμως από τα διαγράμματα 5.41-5.43, παρατηρείται το ίδιο πρόβλημα που εμφανίστηκε και στο Σενάριο 6, όπου αυτό γίνονταν εις βάρος των οδηγών που εισέρχονταν από την συμβολή με το αυτοκινητόδρομο Α1.

Μια τέτοια αδικία εις βάρος αυτών και μόνο των οδηγών, θα μπορούσε να προκαλέσει απρόσμενα αποτελέσματα, όπως είναι η χρήση προηγούμενης εξόδου και η είσοδος στον Α10 από κάποια άλλη ράμπα, αλλάζοντας τα δεδομένα και καθιστώντας άγνωστο το αποτέλεσμα. Αυτό, σε συνδυασμό με τον λογικό εκνευρισμό των οδηγών καθώς και τον κίνδυνο ατυχήματος επί του Α1, καθιστούν μάλλον λανθασμένη μια τέτοια εφαρμογή της ALINEA.

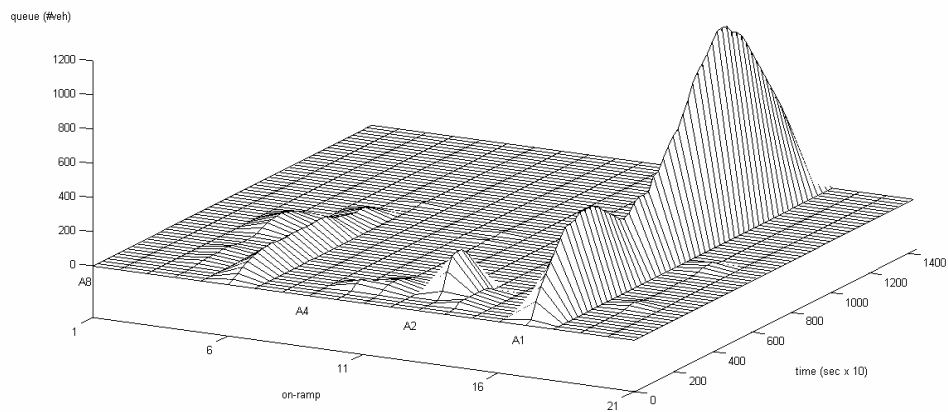
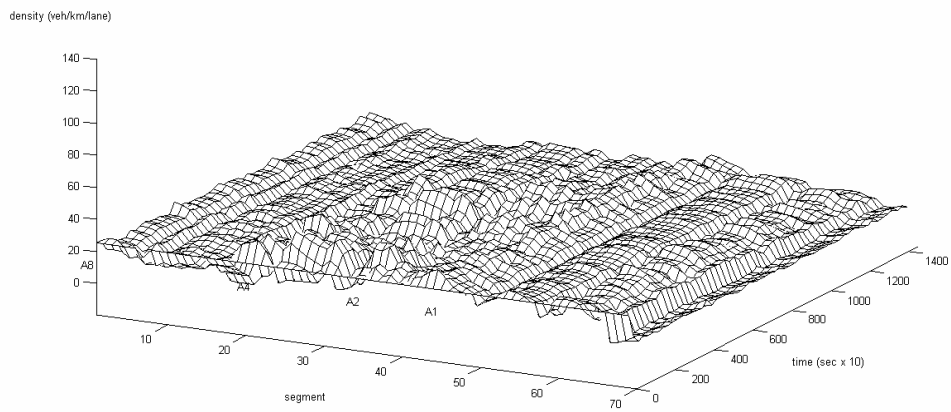
Θα έπρεπε είτε να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δικαιότερη η κατανομή της καθυστέρησης στις ράμπες, είτε να γίνει χρήση μιας πιο αποτελεσματικής και συγχρόνως δίκαιης μεθόδου ελέγχου.



Σχήμα 5.41 Σενάριο 13 – ALINEA - Διάγραμμα Πυκνότητα κατάντη της ράμπας (οχήματα/km/λωρίδα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.42 Σενάριο 13 – ALINEA - Διάγραμμα Ουράς (οχήματα) - Χρόνου (sec x 10)



Σχήμα 5.43 Σενάριο 13 – ALINEA – Διαγράμματα Πυκνότητας-Χρόνου (πάνω) και Ουράς-Χρόνου (κάτω)

5.4 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων

Στον παρακάτω πίνακα, συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα που αφορούν στο Συνολικό Χρόνο που ξόδεψαν εντός του δικτύου οι οδηγοί, καθώς και η ποσοστιαία βελτίωση σε σχέση με το Σενάριο απουσίας ελέγχου (Σενάριο 0 και Σενάριο 7 αντίστοιχα).

Πίνακας 5.5 TTS ανά σενάριο για AMOC και ALINEA

		TTS (οχ.-ώρες)		% Βελτίωση σε σχέση με «χωρίς έλεγχο»	
Σενάριο		ALINEA	AMOC	ALINEA	AMOC
Βασικό	Σενάριο 0	14095			
	Σενάριο 1	13394	9686	4.97%	31.28%
	Σενάριο 2	12583	7610	10.73%	46.01%
	Σενάριο 3	11517	7029	18.29%	50.13%
	Σενάριο 4	8625	7040	38.81%	50.05%
	Σενάριο 5	7708	7003	45.31%	50.32%
	Σενάριο 6	7543	7056	46.48%	49.94%
+5%	Σενάριο 7	22728			
	Σενάριο 8	21689	17074	4.57%	24.88%
	Σενάριο 9	20169	10610	11.26%	53.32%
	Σενάριο 10	19212	8775	15.47%	61.39%
	Σενάριο 11	17421	8748	23.35%	61.51%
	Σενάριο 12	15242	8511	32.94%	62.55%
	Σενάριο 13	9242	8377	59.34%	63.14%

Παρατηρώντας τα παραπάνω δεδομένα, προκύπτει ότι η ALINEA αποδίδει καλύτερα όσο αυξάνονται τα μήκη στις ράμπες, ενώ ειδικότερα για το βασικό σενάριο ζήτησης, παρουσιάζει αισθητή βελτίωση στο Σενάριο 4 με συνολικό χρόνο μειωμένο κατά 38.81%. Το AMOC από την άλλη, πετυχαίνει βελτίωση της τάξης του 46.01% ήδη από το Σενάριο 2.

Η μέγιστη βελτίωση που επιτυγχάνει η ALINEA είναι 46.48% στο Σενάριο 6 και βρίσκεται πολύ κοντά στο αποτέλεσμα του AMOC για το ίδιο σενάριο, το AMOC όμως έχει πετύχει αυτό το αποτέλεσμα ήδη από το Σενάριο 3. Είναι επίσης σαφές πως το AMOC αποφέρει πολύ καλά αποτελέσματα ακόμα και όταν εφαρμόζεται μόνο στις αστικές ράμπες (Σενάριο 1 και Σενάριο 8).

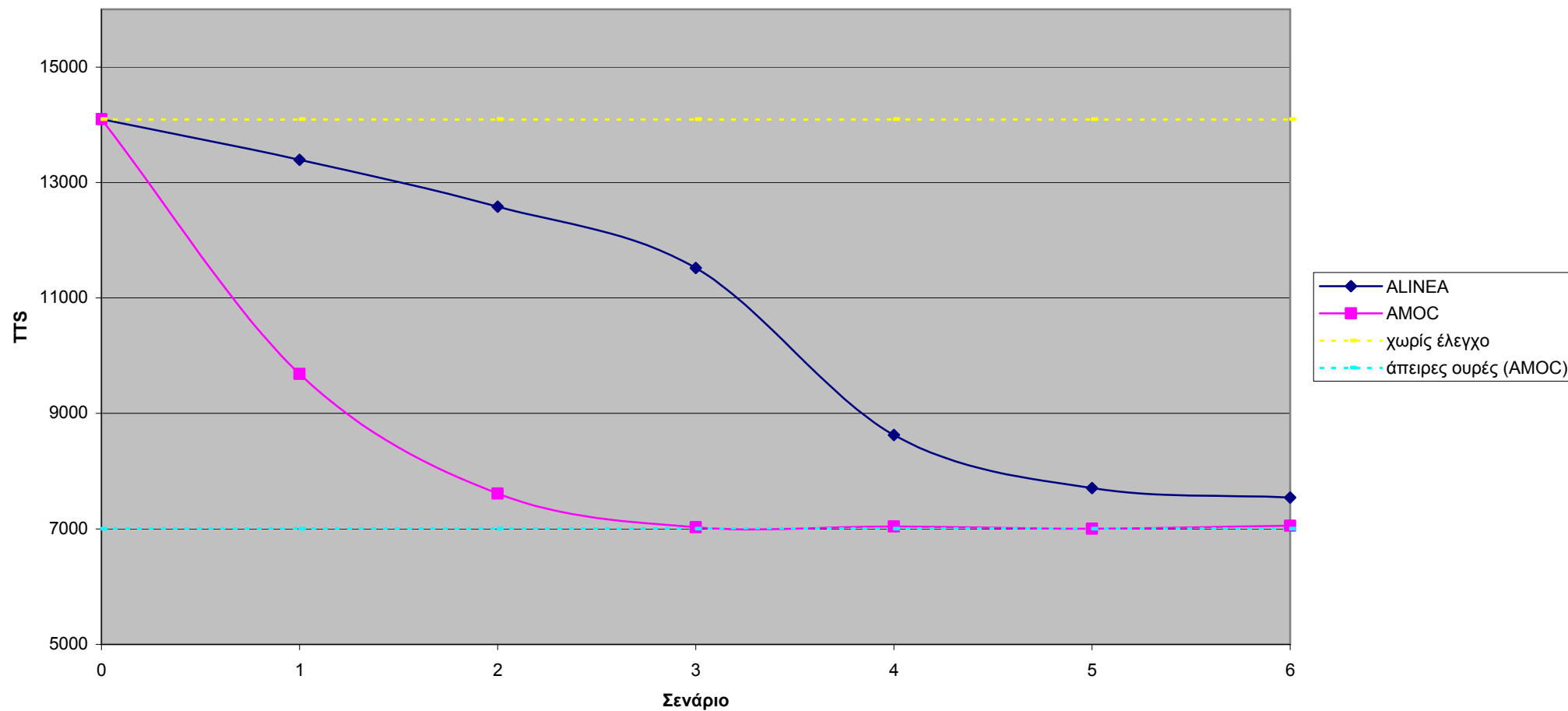
Όσο αφορά στο σενάριο αυξημένης ζήτησης παρατηρείται πως η ALINEA αργεί πολύ περισσότερο να συγκλίνει με το αποτέλεσμα του AMOC. Παρόλα αυτά

υπάρχει αισθητά μεγαλύτερη επίτευξη του στόχου για την ALINEA που βελτιώνει κατά 46.48% στο *Σενάριο 6*, ενώ φθάνει το 59.34% στο *Σενάριο 13*.

Τα παραπάνω, γίνονται περισσότερο αντιληπτά στο ακόλουθα διαγράμματα (Σχήματα 5.5 – 5.6), όπου φαίνεται η ALINEA να συγκλίνει απότομα στο *Σενάριο 4*, ενώ για το σενάριο αυξημένης ζήτησης η σύγκλιση φαίνεται να είναι αρκετά αργή. Συμπεραίνουμε δηλαδή πως σε περίπτωση που η ποσότητα εισερχόμενης ζήτησης αυξηθεί κατά 5%, η ALINEA χρειάζεται ράμπες πολύ μεγάλων διαστάσεων.

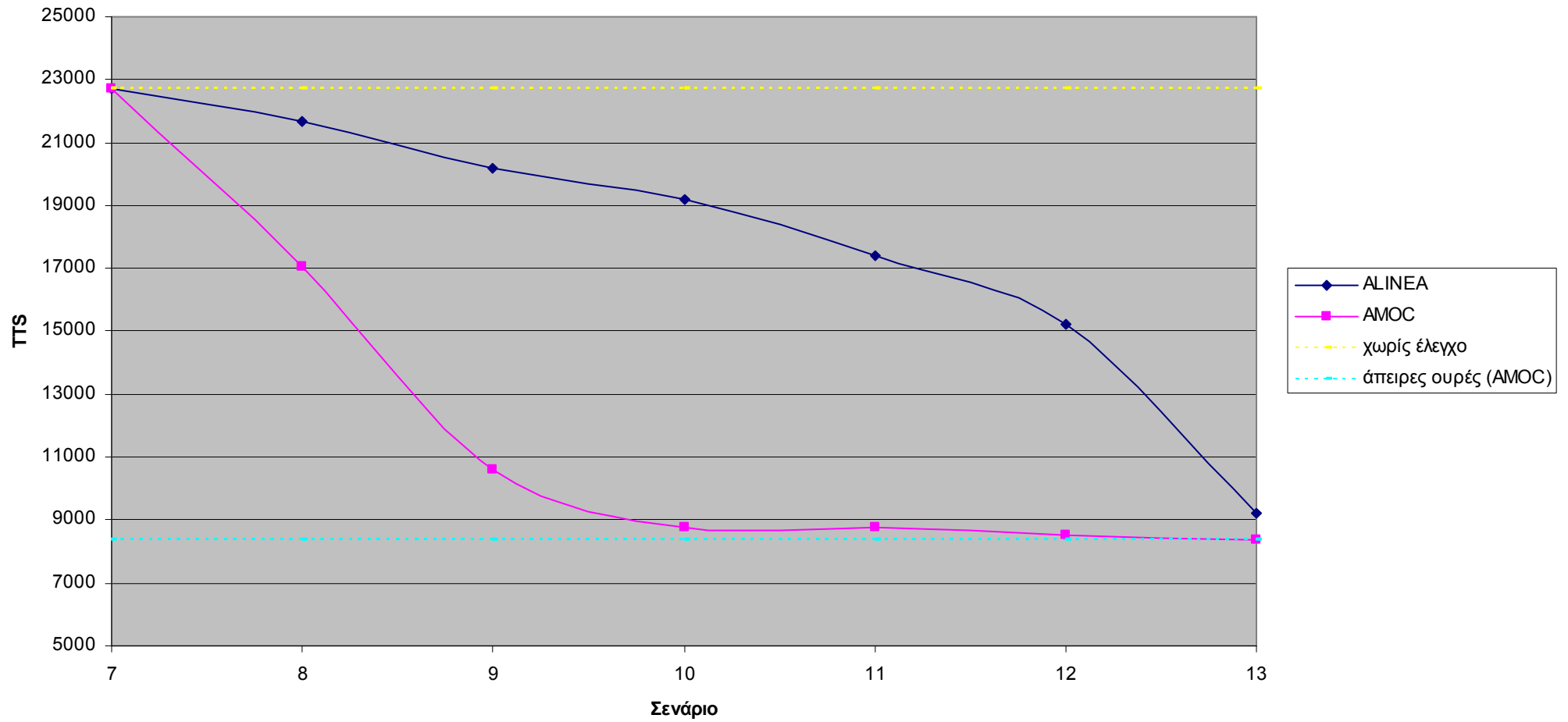
Αυτό που είναι εμφανές από τα διαγράμματα, είναι η σταθερότητα του AMOC στο να παράγει πολύ καλό αποτέλεσμα, τόσο στο βασικό όσο και στο αυξημένο σενάριο ζήτησης, με χρήση ράμπας μήκους διακοσίων οχημάτων στις εισόδους από αυτοκινητόδρομους (*Σενάρια 4 και 10*). Επιπλέον, σε περίπτωση που τροφοδοτηθεί με ράμπες χωρητικότητας τριακοσίων οχημάτων, επιλύει το πρόβλημα και στις δύο περιπτώσεις ζήτησης.

TTS για Βασικό σενάριο



Σχήμα 5.5 TTS – σενάριο για βασικό σενάριο ζήτησης

TTS για Αυξημένη ζήτηση +5%



Σχήμα 5.6 TTS – σενάριο για αυξημένη ζήτηση

6. Συμπεράσματα και Μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

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

- 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).
- Οι στρατηγικές βέλτιστου ελέγχου του AMOC βασίζονται στη πλήρη γνώση των διαταραχών του συστήματος. Αυτό είναι πρακτικά ανέφικτο, καθιστώντας έτσι απλά ένα μέτρο σύγκριση που καταδεικνύει τα περιθώρια βελτίωσης.
- Η έλλειψη ελέγχου στις εισόδους του υπ' εξέταση αυτοκινητόδρομου, ουσιαστικά 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 του AMOC.
- Το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης μπορεί να επιλυθεί, αρκεί να υπάρχει αρκετά μεγάλος αποθηκευτικός χώρος στις ράμπες εισόδου προκειμένου να μπορεί να διατηρηθεί η επιθυμητή πυκνότητα εντός του δικτύου. Αυτό όμως αδικεί το μέρος των οδηγών που θα εισέρχονταν από κάποιες ράμπες όπου θα σχηματίζονταν μεγάλες ουρές, καθιστώντας απρόβλεπτη την συμπεριφορά των οδηγών.

- Το AMOC πετυχαίνει να ελέγξει πλήρως την κίνηση, άσχετα με την αύξηση της ζήτησης, με ράμπες μήκους 30 οχημάτων για αυτές που τροφοδοτούν τον Α10 από το αστικό δίκτυο και 200 για αυτές που τον τροφοδοτούν από αυτοκινητόδρομους.

6.2 Μελλοντική εργασία

Ελέγχοντας τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες προτάσεις για μελλοντική εργασία:

- Εξαιτίας της σύνθετης μορφής της λήψης απόφασης για το μέγεθος των ραμπών, καθώς αυτή δεν επηρεάζεται μόνο από την γεωμετρία τους, αλλά και από διάφορους κοινωνικούς και πολιτικούς παράγοντες, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ενδεχόμενη μεταβολή του μήκους και των ραμπών από το αστικό δίκτυο.
- Λόγω του μεγάλου ρυθμού αύξησης των κατά κεφαλήν αυτοκινήτων, θα ήταν ορθό να διερευνηθεί η συμπεριφορά των ελεγκτών και σε συνθήκες ακόμα μεγαλύτερης ζήτησης, βασιζόμενη σε ίδια ή αντίστοιχη λογική μεταβολής των δεδομένων. Αυτό θα συνεισέφερε και στην βελτίωση των ελεγκτών, προκειμένου να είναι έτοιμοι να λειτουργήσουν καλύτερα σε διαφορετικές συνθήκες ζήτησης.
- Χρήση και αξιολόγηση μιας άλλης στρατηγικής βέλτιστου ελέγχου η οποία ενδεχομένως να υποδεικνύει ακόμα μεγαλύτερα περιθώρια βελτίωσης, όπως είναι αυτή του AMOC βασισμένο σε λογική κυλιόμενου ορίζοντα.
- Χρήση μιας πιο δίκαιης μεθόδου ελέγχου, η οποία να κάνει καλύτερη κατανομή του χρόνου αναμονής ανάμεσα στους οδηγούς που εισέρχονται από διαφορετικές ράμπες.
- Χρήση μιας πιο σύνθετης στρατηγικής συντονισμένου ελέγχου η οποία να συγκλίνει στις τιμές του βέλτιστου ελέγχου ταχύτερα (με χρήση δηλαδή όσο το δυνατόν μικρότερου μήκους ραμπών), επιτυγχάνοντας έτσι μια λύση πιο αποτελεσματική και παράλληλα πιο εφαρμόσιμη.

Βιβλιογραφία

- [1] Beca Carter Hollings & Ferner Ltd. Smartgrowth - Car ownership forecasting, 2003.
- [2] www.wordmapper.org. Passenger Cars. SASI Group (University of Sheffield), Mark Newman (University of Michigan), 2006.
- [3] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, C. Diakaki, Y. Pavlis, F. Middelham. Traffic Flow Modeling of Large-Scale Motorway Networks Using the Macroscopic Modeling Tool METANET. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, vol. 3, No. 4, pp. 282-292, 2002.
- [4] I. Papamichail, M. Papageorgiou, Y. Wang, Motorway traffic surveillance control. European Journal of Control, vol. 13, pp. 297-319, 2007.
- [5] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, M. Mangeas, H. Haj-Salem. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control. Transportation Research Part C, vol. 10, pp. 65-84, 2000.
- [6] Technical University of Crete, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Dr.-Ing. A. Messmer. METANET documentation. June 2006.
- [7] Α. Κότσιαλος. Μοντελοποίηση και βέλτιστος έλεγχος κυκλοφορίας δικτύων αυτοκινητοδρόμων ευρείας κλίμακας. Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2004.
- [8] M. Papageorgiou, C. Diakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialow, Y. Wang. Review of Road Traffic Control Strategies. Proceedings of the IEEE, vol. 91, No. 12, pp. 2043-2067, 2003.
- [9] A. Kotsialos, M. Papageorgiou. Efficiency and equity properties of freeway network-wide ramp metering with AMOC. Transportation Research Part C, vol. 12, pp. 401-420, 2003.
- [10] E. Smaragdis, M. Papageorgiou. Series of New Local Ramp Metering Strategies. Transportation Research Record, 1856, pp. 74-86.
- [11] Google Earth.