ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Ράγιας

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
Καθηγητής Μάρκος Παπαγεωργίου

Οκτώβριος, 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ **1**
1.1 Οδικές μεταφορές . . . 1
1.2 Μέτρα ελέγχου της κυκλοφορίας αυτοκινητοδρόμων . . . 1
1.3 Στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας αυτοκινητοδρόμων . . . 2
1.4 Στόχος της εργασίας . . . 2

2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ **3**
2.1 Αιτίες κυκλοφοριακής συμφόρησης και υποβάθμιση των υποδομών . . . 3
2.2 Κίνητρα για την ανάπτυξη Ελέγχου Κυκλοφοριακής Ροής Αυτοκινητοδρόμων . . . 4
2.3 MTFC στο σύνολο του δικτύου . . . 5
2.4 Εφαρμογή MTFC με μέτρο ελέγχου τα VSL . . . 5
2.5 Επίδραση των VSL στον έλεγχο της κυκλοφοριακής ροής . . . 6
2.6 Γενική επισκόπηση μοντέλου . . . 7
2.7 Βασικές μεταβλητές της κυκλοφορίας . . . 8
2.8 Μοντέλο συνδέσμου . . . 8
2.8.1 *Σύνδεσμοι αυτοκινητοδρόμου* . . . 8
2.8.2 *Σύνδεσμοι προέλευσης και σύνδεσμοι μεταφοράς-αποθήκευσης* . . . 9
2.8.3 *Σύνδεσμοι προορισμού* . . . 10
2.8.4 *Εικονικοί σύνδεσμοι* . . . 10
2.9 Επίδραση των VSL στις μεταβλητές ελέγχου κάθε συνδέσμου . . . 10
2.10 Μοντέλο κόμβου . . . 10
2.10.1 *Ανάντη επιρροή της πυκνότητας* . . . 11
2.10.2 *Κατάντη επιρροή της ταχύτητας* . . . 11
2.11 Κυκλοφοριακές εισροές και ουρές αναμονής στους συνδέσμους προέλευσης . . . 11
2.12 Συνολικό Πρότυπο Κυκλοφορίας . . . 12
2.13 Χρησιμοποιούμενα δεδομένα . . . 12
2.13.1 Στατικά δεδομένα . . . 13
2.13.2 Δυναμικά δεδομένα . . . 13

3 METANET **14**
3.1 Κύρια χαρακτηριστικά . . . 14
3.2 Αρχεία εισόδου και εξόδου του METANET . . . 14
3.3 METAGRAF . . . 15
3.4 Κριτήρια απόδοσης . . . 16

4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ **19**
4.1 Εισαγωγή . . . 19
4.2 Μαθηματική προσσέγγιση . . . 19
4.2.1 Γενική διατύπωση . . . 19
4.2.2 Δυναμικά διανύσματα . . . 19
4.2.3 Το κριτήριο κόστους του AMOC . . . 20
4.3 Αριθμητική επίλυση . . . 21
4.4 Χρονικός Ορίζοντας . . . 22
4.5 Αρχεία Εισόδου/Εξόδου του AMOC . . . 23

5 MTFC ΣΕ ΣΥΓΧΩΝΕΥΟΜΕΝΟΥΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥΣ **25**
5.1 MTFC ανατροφοδότησης χρησιμοποιώντας VSL . . . 25
5.1.1 Πτυχές πρακτικής εφαρμογής . . . 26
5.2 Έλεγχος MTFC σε διπλό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων . . . 27
5.2.1 Χρόνος Ταξιδίου κατά μήκος ενός δρόμου . . . 29
5.2.2 Υπολογισμός των χρόνων καθυστέρησης . . . 30
5.2.3 Ισοστάθμιση των χρόνων καθυστερήσεων . . . 31

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ **32**
6.1 Μοντέλο χρησιμοποιούμενου δικτύου 32
6.2 Κυκλοφοριακά Σενάρια 34
6.2.1 No control 35
6.2.2 AMOC M1 37
6.2.3 AMOC M2 38
6.2.4 AMOC M1 και M2 40
6.2.5 Έλεγχος ανατροφοδότησης στον M1(Feedback M1) 41
6.2.6 Έλεγχος ανατροφοδότησης στον M2(Feedback M2) 43
6.2.7 Έλεγχος ανατροφοδότησης στον M1 και τον M2(Feedback M1 and M2) 46

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ **49**

Α ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ **50**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **54**

ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

1 Ενεργό σημείο δυσχερειών. . . . 3
2 Τοπικό σημείο εφαρμοφής MTFC. . . . 5
3 Διάγραμμα διαφορετικών ποσοστών VSL. . . . 7
4 Βασικές μεταβλητές της κυκλοφορίας σε σύνδεσμο αυτοκινητοδρόμου. . . . 8
5 Ικανότητα ροής σε σχέση με την πυκνότητα. . . . 12
6 Αρχεία εισόδου-εξόδου του METANET. . . . 14
7 Τροχιές ελέγχου. . . . 22
8 Στρατηγική ελέγχου του AMOC. . . . 22
9 Διαδικασία ελέγχου. . . . 23
10 Αρχεία εισόδου-εξόδου του AMOC. . . . 23
11 Τοπικό σημείο εφαρμοφής MTFC. . . . 25
12 Ελεγκτής ανατροφοδότησης. . . . 26
13 MTFC σε διπλό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων. . . . 28
14 Ελεγκτής ανατροφοδότησης σε διπλό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων. . . . 28
15 Χρόνος Ταξιδίου τ προερχόμενος από τις συσσωρευμένες εισροές και εκροές ενός τμήματος αυτοκινητοδρόμου. . . . 29
16 Τοπολογία του εξεταζόμενου δικτύου. . . . 32
17 Προφίλ ζήτησης και ποσοστά εξόδου. . . . 34
18 Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, No control. . . . 35
19 (α) Χρόνοι καθυστέρησης, No control, (β) Διαφορές χρόνων καθυστερήσεων ,No control 36
20 Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, AMOC M1. . . . 37
21 Ποσοστά VSL, AMOC M1. . . . 38
22 (α) Χρόνοι καθυστέρησης, AMOC M1, (β) Διαφορές χρόνων καθυστερήσεων ,AMOC M1 38
23 Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, AMOC M2. . . . 39
24 Ποσοστά VSL, AMOC M2. . . . 39
25 (α) Χρόνοι καθυστέρησης, AMOC M2, (β) Διαφορές χρόνων καθυστερήσεων ,AMOC M2 40
26 Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, AMOC M1 M2. . . . 41
27 (α) Ποσοστά VSL στον M1, AMOC M2 , (β) Ποσοστά VSL στον M2, AMOC M2. . . . 41
28 Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, Feedback M1. . . . 42
29 Ποσοστά VSL, Feedback M1. . . . 43
30 (α) Χρόνοι καθυστέρησης, Feedback M1, (β) Διαφορές χρόνων καθυστέρησης, Feedback M1 . . . 43
31 Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, Feedback M2. . . . 44
32 Ποσοστά VSL, Feedback M2. . . . 45
33 (α) Χρόνοι καθυστέρησης, Feedback M2, (β) Διαφορές χρόνων καθυστέρησης, Feedback M2 . . . 45
34 Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, Feedback M1 M2. . . . 46
35 Ποσοστά VSL στον M1, Feedback M1 M2 47
36 Ποσοστά VSL στον M2, Feedback M1 M2. . . . 48
37 (α) Χρόνοι καθυστέρησης, Feedback M1 M2, (β) Διαφορές χρόνων καθυστέρησης, Feedback M1 M2 49

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Οδικές μεταφορές

Τα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων και γενικότερα τα οδικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για να ικανοποιήσουν την ανάγκη για κίνηση από τους οδηγούς-χρήστες. Η συνεχής όμως ποσοτική αύξηση των αυτοκινήτων έχει οδηγήσει στη συνεχώς αυξανόμενη εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης σε οδικά δίκτυα εντός μεγάλων πόλεων και εκτός αυτών, σε οδικά δίκτυα με χαμηλή και υψηλή ικανότητα. Τα αποτελέσματα της κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι η αύξηση του συνολικού χρόνου ταξιδιού και της κατανάλωσης βενζίνης για τους οδηγούς. Επιπλέον μειώνεται η οδική ασφάλεια και, ως αποτέλεσμα της υψηλότερης κατανάλωσης βενζίνης, η ατμοσφαιρική ρύπανση γίνεται ολοένα και εντονότερη. Οι συνεχείς επεκτάσεις του μήκους ή της ικανότητας των αυτοκινητοδρόμων δεν είναι ικανές από μόνες τους να εξαλείψουν ή έστω να μειώσουν αισθητά την εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης στους διάφορους αυτοκινητοδρόμους που είναι αναγκαίο να συμβεί προς όφελος των οδηγών και της κοινωνίας γενικότερα.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος αυτού αναφέρονται σε σύγχρονες μορφές ελέγχου και διαχείρισης της κυκλοφοριακής ροής των αυτοκινητοδρόμων μετά την πρόοδο στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την δυναμική αυτών. Πιο συγκεκριμένα, Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και μεθοδολογίες βέλτιστου ελέγχου αποτελούν κύρια εργαλεία στην προσπάθεια επίλυσης των κυκλοφοριακών προβλημάτων. Η παρούσα εργασία σκοπό έχει την εφαρμογή πρώτιστα και την ανάλυση των αποτελεσμάτων έπειτα, βέλτιστου ελέγχου και ελέγχου ανατροφοδότησης της κυκλοφοριακής ροής σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα αυτοκινητοδρόμων. Η εφαρμογή αυτή έλαβε χώρα σε δύο υποθετικά τμήματα συγχωνευόμενων αυτοκινητοδρόμων M1 και M2.

1.2 Μέτρα ελέγχου της κυκλοφορίας αυτοκινητοδρόμων

Τα μέτρα ελέγχου της κυκλοφορίας που μπορούν να εφαρμοστούν σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων για να μειώσουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες. Αυτές είναι:

- ramp metering (RM)
- route guidance (RG)
- variable speed limits (VSL)
- emerging vehicle-infrastructure integration systems (VII)

Ramp metering: Αυτό το μέτρο ελέγχου χρησιμοποιεί φωτεινούς σηματοδότες στις ράμπες εισόδου των αυτοκινητοδρόμων με σκοπό να διατηρηθεί η ικανότητα ροής και να αποφευχθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Route guidance: Αυτό το μέτρο ελέγχου είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις περιστατικών ή άλλων γεγονότων που επηρεάζουν απρόβλεπτα την κατάσταση της κυκλοφορίας για τους οδηγούς. Η εφαρμογή RG ψάχνει για διαθεσιμότητα εναλλακτικών διαδρομών με επαρκείς χωρητικότητες.

Variable speed limits: Εφαρμόζονται με την τοποθέτηση μεταβλητών πινακίδων σήμανσης (Variable Message Signs - VMS), στις πλευρές του δρόμου με σκοπό να διατηρούν την κατάσταση της κυκλοφορίας σε αναλόγως επιθυμητά επίπεδα. Αποτελεί ένα συνεχώς αυξανόμενα δημοφιλές μέτρο ελέγχου της κυκλοφορίας. Το τυπικό εύρος των μεταβλητών ορίων ταχυτήτων ποικίλει από τα 120 km/h έως τα 20km/h και οι χαμηλές τιμές μεταβλητών ορίων ταχυτήτων (π.χ.τα 20 km/h) χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις (π.χ. εμφάνιση ατυχημάτων). Μια κύρια επίδραση των VSL στην κυκλοφορία του αυτοκινητοδρόμου αναφέρεται στην ενίσχυση της ασφάλειας, αφού ομογενοποιεί την ταχύτητα των οχημάτων που βρίσκονται σε διαφορετικές λωρίδες κυκλοφορίας με αποτέλεσμα την μείωση του κινδύνου ατυχήματος. Απ' την άλλη δεν υπάρχει αξιολόγηση της επίδρασης των VSL στις διαθέσιμες εγκαταστάσεις που θα αποδείκνυε μια μετρήσιμη και συνεπή βελτίωση της κυκλοφοριακής αποδοτικότητας, π.χ. με την έννοια της μείωσης του συνολικού χρόνου ταξιδίου.

Vehicle-infrastructure integration: Στα συστήματα αυτά τα οχήματα ελέγχονται για την θέση τους, την ταχύτητα και τις αποστάσεις μεταξύ τους κάθε στιγμή, μέσω δορυφόρων. Επίσης τα οχήματα αυτά μπορούν να

επικοινωνήσουν μεταξύ τους και με το κέντρο ελέγχου μέσω τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας. Τέλος τα μηνύματα που ανταλλάσουν περιλαμβάνουν πληροφορίες για την κίνηση , προειδοποιήσεις για ένα ενδεχόμενο ατύχημα αλλά και διαταγές για την ταχύτητα που πρέπει να έχουν.

1.3 Στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας αυτοκινητοδρόμων

Η εκτίμηση της κυκλοφοριακής κατάστασης και η πρόβλεψη των μεταβλητών ποσοτήτων της κυκλοφορίας εκτελείται βασισμένη σε πραγματικού χρόνου (real-time) μετρήσεις της κυκλοφοριακής διαδικασίας, που τροφοδοτούν την στρατηγική ελέγχου που εφαρμόζεται. Η στρατηγική ελέγχου καθορίζει τα κατάλληλα δεδομένα ελέγχου που τροφοδοτούνται στην κυκλοφοριακή διαδικασία προκειμένου να αποφασίσει τον τρόπο με τον οποίο θα επηρεαστεί η διαδικασία προς μια επιθυμητή κατεύθυνση. Πολλές είναι οι προσεγγίσεις που έχουν προταθεί για το σχεδιασμό της στρατηγικής ελέγχου, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται :

- Έμπειρα συστήματα (expert systems). Περιλαμβάνουν κανόνες απόφασης που περιγράφουν επαρκώς την συμπεριφορά ενός πραγματικού ή εικονικού χειριστή της κυκλοφορίας χωρίς να χρησιμοποιούν αναλυτικά μοντέλα.

- Νευρωνικά δίκτυα (neural networks) . Δεν απαιτούν μοντέλο διαδικασίας. Η εκπαίδευσή τους όμως γίνεται μέσω της δημιουργίας παραδειγμάτων εκμάθησης. Ένα μοντέλο της διαδικασίας απαιτείται συνήθως για τη δημιουργία παραδειγμάτων εκπαίδευσης, με τις βέλτιστες τιμές ελέγχου να πρέπει να καθοριστούν.

- Ελεγκτές ανατροφοδότησης (feedback controllers). Έχουν σχεδιαστεί βάσει της κλασικής θεωρίας ελέγχου. Χρειάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο διαδικασίας, το οποίο συνήθως γραμμικοποιείται για το σχεδιασμό του ελέγχου. Επειδή το μοντέλο δεν χρησιμοποιείται γραμμικοποιημένο (αλλά μόνο στη διαδικασία του σχεδιασμού ανάδρασης), οι απαιτήσεις ακρίβειάς του είναι περιορισμένες.

- Μη γραμμικοποιημένος βέλτιστος έλεγχος (non-linear optimal control). Απαιτεί ένα αναλυτικό μοντέλο κυκλοφορίας και είναι το μοναδικό μοντέλο που παρέχεται από την αυτόματη θεωρία ελέγχου που είναι σε θέση να:

  – ασχολείται ευθέως με σημαντικά μη γραμμικοποιημένα χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής διαδικασίας.
  – βασίζεται σε αποφάσεις ελέγχου για την ελαχιστοποίηση ενός αυθαίρετου κριτηρίου κόστους και όχι στη ρύθμιση προς μια ορισμένη κατάσταση της διαδικασίας (σημείο ρύθμισης του βρόγχου ελέγχου ανάδρασης).
  – εξετάσει ρητά τα προβλήματα ελέγχου.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι, προκειμένου να αναπτυχθούν αποτελεσματικές στρατηγικές ελέγχου, είναι απαραίτητα αναλυτικά μοντέλα κυκλοφοριακής ροής που παρέχονται από την θεωρία κυκλοφοριακής ροής.

1.4 Στόχος της εργασίας

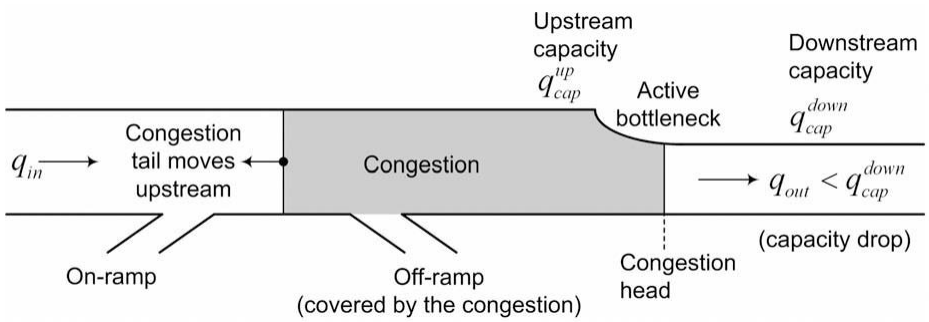
Στόχος της εργασίας είναι να εφαρμόσουμε την στρατηγική ελέγχου ανατροφοδότησης μέσω της εφαρμογής μεταβλητών ορίων ταχυτήτων(VSL) ως μέτρου ελέγχου και τη στρατηγική μη γραμμικοποιημένου βέλτιστου ελέγχου μέσω επίσης της εφαρμογής μεταβλητών ορίων ταχυτήτων(VSL), για τους αυτοκινητοδρόμους M1 και M2 του προαναφερόμενου υποθετικού δικτύου. Από τα προαναφερόμενα του κεφαλαίου 1.3 για τις στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας αυτοκινητοδρόμων, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη ενός μοντέλου κυκλοφοριακής ροής και για τις δύο στρατηγικές. Το εργαλείο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το μακροσκοπικό εργαλείο METANET, το οποίο προσομοιώνει δίκτυα αυτοκινητοδρόμων.

2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

2.1 Αιτίες κυκλοφοριακής συμφόρησης και υποβάθμιση των υποδομών

Η περιοχή δυσχερειών σε έναν αυτοκινητόδρομο είναι μια θέση όπου η ικανότητα ροής q_{in} είναι υψηλότερη προς τα ανάντη από την ικανότητα ροής q_{cap}^{down} προς τα κατάντη της θέσης δυσχερειών (Γράφημα 1). Οι δυσχέρειες μπορούν να οφείλονται σε διάφορους λόγους,όπως :

- η πλευρική εισροή από τις ράμπες εισόδου είναι ο πιό κοινός λόγος.
- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υποδομής, όπως η ελλάτωση λωρίδων, η σήραγγα, η κυρτότητα. Σημειώστε ότι η συγχώνευση των ραμπών εισόδου (όπως προαναφέρθηκε παραπάνω) μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση της ελλάτωσης λωρίδων.
- συγκεκριμένοι όροι κυκλοφορίας, π.χ., ισχυρή ύφανση των ρευμάτων κυκλοφορίας με διαφορετικούς τοπικές προελεύσεις ή προορισμούς.
- ρυθμιστικά μέτρα, π.χ., όρια ταχύτητας στα συγκεκριμένα τμήματα αυτοκινητόδρομων.
- εξωτερικά γεγονότα που συμβάλλουν στην μείωση της ικανότητας ροής όπως η 'εκχύλιση' ραμπών εξόδου ή ατυχήματα.



Γράφημα 1: Ενεργό σημείο δυσχερειών.

Η ονομαστική ικανότητα ροής της περιοχή δυσχερειών q_{cap}^{down}, είναι η μέγιστη κυκλοφοριακή ροή που μπορεί να διατηρηθεί στη θέση δυσχερειών εάν η κυκλοφοριακή ροή q_{in} που φθάνει από τα ανάντη συμβαίνει (ή ελέγχεται) να είναι ίση με το q_{cap}^{down}. Από την άλλη πλευρά, εάν η εισερχόμενη ροή q_{in} (για την οποία ισχύει $q_{in} \leq q_{cap}^{down}$) είναι υψηλότερη από την q_{cap}^{down}, η περιοχή δυσχερειών ενεργοποιείται, δηλ. σχηματίζεται κυκλοφοριακή συμφόρηση, της οποίας το 'κεφάλι' βρίσκεται στην περιοχή δυσχερειών, ενώ η ουρά της κυκλοφοριακής συμφόρησης κινείται προς τα πίσω όσο η ανάντη φθάνουσα ροή είναι αρκετά μεγάλη. Χαρακτηριστικά, πολλαπλάσια ενεργά σημεία δυσχερειών είναι παρόντα ταυτόχρονα σε ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμων κατά τη διάρκεια της περιόδου αιχμής, ενώ το συσσωρευμένο μήκος της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε ολόκληρο το δίκτυο μπορεί να επεκταθεί πέρα από μερικές δεκάδες χιλιομέτρων. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση που διαμορφώνει σε μια ενεργό θέση δυσχερειών έχει δύο είδη καταστρεπτικών αποτελεσμάτων στην ικανότητα και την απόδοση των αυτοκινητόδρομων :

- Πτώση ικανότητας ροής (Capacity Drop, CD) στο κεφάλι της κυκλοφοριακής συμφόρησης: Για τους περισσότερους τύπους θέσεων δυσχερειών που προαναφέρθηκαν, η ενεργοποίηση μιας θέσης δυσχερειών οδηγεί σε μια διακοπή της ταχύτητας προς τα ανάντη της θέσης δυσχερειών, οπότε σάυτή την περίπτωση τα διερχόμενα οχήματα πρέπει να επιταχύνουν από χαμηλότερες ταχύτητες (μέσα στη διαμορφωμένη κυκλοφοριακή συμφόρηση) σε υψηλότερες ταχύτητες (προς τα κατάντη της θέσης δυσχερειών): έτσι οδηγούμαστε σε CD, δηλ., σε μια ενεργή εκροή q_{out} της θέσης δυσχερειών που μπορεί να είναι 5-20% χαμηλότερη από την ονομαστική ικανότητα q_{cap}^{down} (Γράφημα 1). Διάφορες εμπειρικές έρευνες με πραγματικά στοιχεία (συνήθως από τις περιοχές δυσχερειών με ράμπες εισόδου) έχουν επιβεβαιώσει το φαινόμενο πτώσης της ικανότητας. Η

πτώση ικανότητας οδηγεί προφανώς σε μια αντίστοιχη σοβαρή υποβάθμιση της τοπικής υποδομής αυτοκινητόδρομων. Η αποφυγή του CD στις ενεργές περιοχές δυσχερειών θα αύξανε την απόδοση των αυτοκινητόδρομων αναλόγως.

- Φραγή ραμπών εξόδου (Blocking off-ramps, BOR): Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ουρά οποιασδήποτε διαμορφωμένης κυκλοφοριακής συμφόρησης διαδίδεται προς τα ανάντη για αρκετά χιλιόμετρα και καλύπτει διάφορες ράμπες εισόδου και εξόδου προς τα ανάντη της θέσης δυσχέρειας (Σχ. 1). Επειδή η κυκλοφοριακή ροή κατά μήκος της κορεσμένης περιοχής είναι χαμηλότερη από την ονομαστική ικανότητα (λόγω της κυκλοφοριακής συμφόρησης και των πρόσθετων κυκλοφοριακών ροών των ραμπών εισόδου), οι ροές των ραμπών εξόδου μειώνονται αναλόγως και κατά συνέπεια, τα οχήματα που κατευθύνονται προς τα ανάντη της ενεργού θέσης δυσχέρειας, καθυστερούν επίσης λόγω της κυκλοφοριακής συμφόρησης και συμβάλλουν στην πραγματικότητα σε μια επιταχυνόμενη χωρική αύξηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Αυτή η καταστρεπτική επίδραση ενισχύεται όλο και περισσότερο δεδομένου ότι η κυκλοφοριακή συμφόρηση αυξάνεται περισσότερο και καλύπτει όλο και περισσότερες ράμπες εξόδου. Σημειώστε ότι η επίδραση BOR είναι ανεξάρτητη από την επίδραση του CD και οδηγεί σε μια πρόσθετη μείωση της απόδοσης τν αυτοκινητόδρομων, δηλ., απεικονίζει μια πρόσθετη πηγή υποβάθμισης της εκάστοτε υποδομής. Οποιαδήποτε μείωση της χωρικής ή χρονικής έκτασης της κυκλοφοριακής συμφόρησης θα οδηγούσε σε αντίστοιχες βελτιώσεις της απόδοσης.

2.2 Κίνητρα για την ανάπτυξη Ελέγχου Κυκλοφοριακής Ροής Αυτοκινητοδρόμων

Η κυκλοφορία στους σημερινούς αυτοκινητοδρόμους, συνοψίζοντας και από τα προαναφερόμενα του προηγούμενου κεφαλαίου, έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Η τρέχουσα κατάσταση της κυκλοφορίας στους μητροπολιτικούς αυτοκινητοδρόμους χαρακτηρίζεται από την έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση κατά τη διάρκεια των ωρών κυκλοφοριακής αιχμής, και το σχετικό κόστος για την οικονομική και κοινωνική ζωή στις μητροπολιτικές περιοχές είναι πολύ υψηλό.

- Η ακριβή υποδομή των αυτοκινητοδρόμων οφείλεται στην υποχρησιμοποίησή τους εξαιτίας της κυκλοφοριακής συμφόρησης.

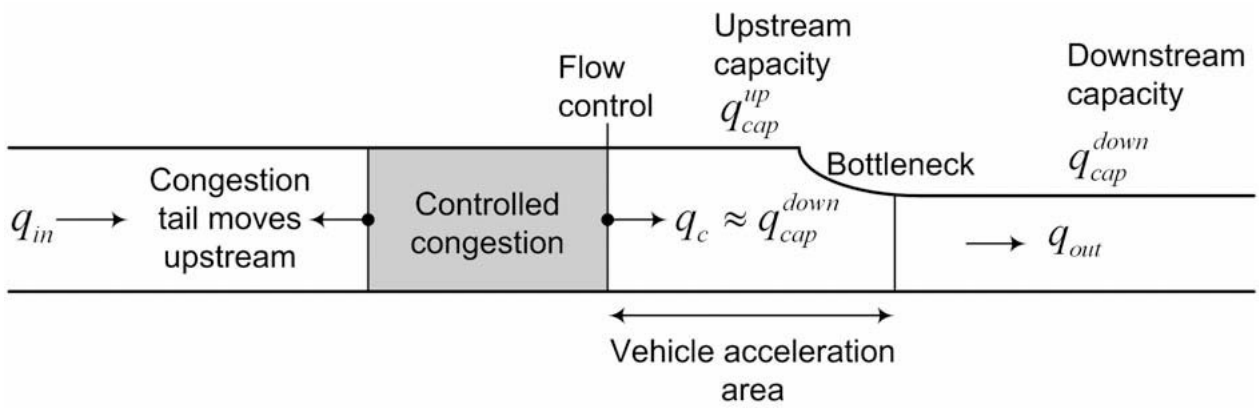
- Οι παρατηρηθείσες έντονες κυκλοφοριακές συμφορήσεις οφείλονται μόνο στην εν μέρει υψηλή ζήτηση. Εάν τα οχήματα επιτρέπονται να χρησιμοποιήσουν την υποδομή κατά τη βούλησή τους(δηλ., χωρίς μέτρα ελέγχου), οι περιορισμένες αρχικές κυκλοφοριακές συμφορήσεις κλιμακώνονται και οδηγούν σε εκτεταμένες περιοχές κυκλοφοριακής κατάρρευσης και επομένως στη σοβαρή υποβάθμιση της ακριβής υποδομής. Έτσι,γίνεται εμφανές ότι οι αυτοκινητόδρομοι πρέπει να ελεγχθούν για τη μέγιστη αποδοτικότητα που συσχετίζεται συνήθως με τη βελτιωμένη ασφάλεια κυκλοφορίας και τη μειωμένη περιβαλλοντική επίδραση.

Η βασική ιδέα που εφαρμόζει ο Έλεγχος Κυκλοφοριακής Ροής Αυτοκινητοδρόμων (MTFC) είναι να ελεγχθεί η επικρατούσα κυκλοφοριακή ροή σε επιλεγμένες θέσεις του δικτύου (π.χ. προς τα ανάντη του σημείου στενέματος του δικτύου-περιοχή συσχερειών) για να πάρει τις τιμές που δίνονται από μια κατάλληλη στρατηγική ελέγχου προκειμένου να καθιερωθεί η βέλτιστη κατάσταση της κυκλοφορίας (μέγιστη αποδοτικότητα) για οποιαδήποτε εμφανιζόμενη ζήτηση. Μια τοπική διάσταση αυτής της ιδέας απεικονίζεται στο Γράφημα 2 για την καλύτερη εκτίμηση της ποιοτικής επίδρασης του MTFC. Δεν παρουσιάζεται κατάρρευση της κυκλοφορίας στο σημείο στενέματος του δικτύου (και δεν εφαρμόζεται έλεγχος MTFC) εάν $q_{in} < q_{cap}^{down}$,που σε αυτη την περίπτωση έχουμε $q_{in} \approx q_{out}$.Εάν το q_{in} είναι μεγαλύτερο από την ικανότητα στην περιοχή στενέματος του δικτύου q_{cap}^{down}, τότε η περιοχή αυτή των δυσχερειών θα ενεργοποιούνταν με την απουσία εφαρμογής ελέγχου και το q_{out} θα μειωνόταν λόγω της μειωμένης ικανότητας εκροής (capacity-drop),ενώ ο έλεγχος MTFC μπορεί να παρέχει μια ελεγχόμενη εκροή q_c η οποία είναι ίση με την ικανότητα της περιοχής στενέματος του δικτύου. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση όμως δεν μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή MTFC επειδή $q_{in} > q_{cap}^{down}$,αλλά:

- Η εκροή κυκλοφοριακής συμφόρησης στην περίπτωση MTFC είναι υψηλότερη απ΄ό, τι στην περίπτωση μη-ελέγχου επειδή η μείωση της ικανότητας εκροής αποφεύγεται· αυτό εξαλείφει τα καταστρεπτικά αποτελέσματα της μείωσης της ικανότητας εκροής στην υποβαθμισμένη υποδομή.

- Για τον ίδιο λόγο (υψηλότερη εκροή με εφαρμογή MTFC), η δημιουργούμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση στην περίπτωση εφαρμογής MTFC (α) έχει μια υψηλότερη εσωτερική ταχύτητα και (β) είναι μικρότερου μήκους απ΄

ό, τι στην περίπτωση μη-ελέγχου. Κατά συνέπεια ο έλεγχος MTFC οδηγεί σε μια πιό σύντομη και ελαφρύτερη επικρατούσα κυκλοφοριακή συμφόρηση και ως εκ τούτου σε μικρότερου μεγέθους φραγή λιγότερων ραμπών εξόδου.



Γράφημα 2: Τοπικό σημείο εφαρμοφής MTFC.

2.3 MTFC στο σύνολο του δικτύου

Οι τοπικές πτυχές εφαρμογής που συζητούνται με το Γράφημα 2 αποκαλύπτουν μόνο ένα μέρος του αντίκτυπου της εφαρμογής MTFC. Στην πραγματικότητα, η αυξημένη εκροή από την περιοχή στενέματος του δικτύου στην περίπτωση MTFC αντιστοιχεί σε μια αυξημένη εισροή για την επόμενη κατάντη περιοχή στενέματος και μπορεί να ενεργοποιήσει μια (λανθάνουσα) περιοχή δυσχερειών που δεν είχε εμφανισθεί στην περίπτωση μη-ελέγχου. Επιπλέον, μια ελεγχόμενη με MTFC ουρά αναμονής μιας ενεργοποιημένης περιοχής δυσχερειών που διαδίδεται προς τα ανάντη, μπορεί να φθάσει στην επόμενη προς τα ανάντη ενεργοποιημένη περιοχή δυσχερειών και να την απενεργοποιήσει, από τη στιγμή που και οι δύο σχετικές κυκλοφοριακές συμφορήσεις θα ενσωματωθούν σε μια ενιαία μεγαλύτερη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Με άλλα λόγια, το δίκτυο αυτοκινητόδρομων είναι μια μοναδική οντότητα και πρέπει επομένως να εξεταστεί από μια και μοναδική ενσωματωμένη στρατηγική MTFC για το σύνολο του δικτύου, προκειμένου να έχουμε τα μέγιστα οφέλη. Αν και μια εντελώς αποκεντρωμένη στρατηγική ελέγχου θα βελτίωνε την κατάσταση της κυκλοφορίας μη-ελέγχου χάρι στην αποφυγή της μείωσης της ικανότητας εκροής, μπορεί να είναι μη-βέλτιστη υπό την ευρεία έννοια του συνόλου του δικτύου υπό ορισμένες συνθήκες. Πιό συγκεκριμένα, συγκρατώντας την κυκλοφορία σε μερικές ελεγχόμενες περιοχές στενέματος (δηλ., $q_c < q_{down}^{cap}$) μπορεί να παρέχει περισσότερα οφέλη για την κυκλοφοριακή ροή προς τα κατάντη του δικτύου.

2.4 Εφαρμογή MTFC με μέτρο ελέγχου τα VSL

Τα μεταβλητά όρια ταχυτήτων (VSL) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιβραδύνουν την κυκλοφοριακή ροή αυτοκινητόδρομων προκειμένου να δημιουργηθεί μια επιθυμητή και ελεγχόμενη τιμή q_c επικρατούσας ροής. Όπως αναφέρεται νωρίτερα, η σειρά χρησιμοποιημένου VSL στις περισσότερες τρέχουσες εγκαταστάσεις δεν υπερβαίνει όριο των $[60, 120]$ km/h που δεν είναι ικανοποιητικό για την εφαρμογή μικρών ελεγχόμενων τιμών ροών q_c . Επομένως, το χαμηλότερο όριο του συνηθισμένου εύρους εφαρμογής VSL πρέπει να ελλατωθεί στα 40 km/h ή ακόμη λιγότερο για την περίπτωση εφαρμογής MTFC.
Με την εφαρμογή MTFC, μια επικρατούσα κυκλοφοριακή συμφόρηση θα διαμορφωθεί προς τα ανάντη της θέσης εφαρμογής MTFC, όπως υποδεικνύεται στο Γράφημα 2, και τα οχήματα που βγαίνουν από αυτήν την περιοχή κυκλοφοριακής συμφόρησης θα έχουν σχετικά χαμηλή ταχύτητα (ανάλογα με την ελεγχόμενη επικρατούσα τιμή q_c της ροής), η οποία είναι πιθανό να είναι χαμηλότερη από την κρίσιμη ταχύτητα πετυχαίνοντας έτσι την ικανότητα ροής της περιοχής δυσχερειών q_{down}^{cap}. Κατά συνέπεια, προκειμένου να επιτευχθεί η ικανότητα ροής q_{down}^{cap} στην περιοχή στενέματος του δικτύου (δηλ., για να αποφευχθεί πραγματικά η μείωση ικανότητας), πρέπει να επιτραπεί στα οχήματα να επιταχύνουν στην κρίσιμη ταχύτητα v_{cr} (περίπου 70 km/h), ενώ αυτά περνούν τη θέση δυσχερειών. Για αυτόν τον λόγο, το 'κεφάλι' της σκόπιμα δημιουργημένης επικρατούσας κυκλοφοριακής συμφόρησης (δηλ., η

θέση ελέγχου της επικρατούσας ροής) πρέπει να τοποθετηθεί αρκετά προς τα ανάντη της εξεταζόμενης περιοχής δυσχερειών· μια απόσταση περίπου 700 μ πρέπει να είναι επαρκής για τα οχήματα για να επιταχύνουν από τις χαμηλές ταχύτητες στα 70 km/h.

Οι ενεργοποιητές VSL πρέπει να παραμείνουν ανενεργοποίητοι για όσο χρονικό διάστημα δεν απαιτείται έλεγχος MTFC (π.χ., στην εκτός των ωρών αιχμής περίοδο). Μια περίοδος προθέρμανσης με τα κατάλληλα προ-σήματα και μηνύματα (στις πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων) προς τα ανάντη της περιοχής εφαρμογής MTFC πρέπει να εφαρμοστεί πριν από την πραγματική ενεργοποίηση των VSL (π.χ., στην έναρξη της περιόδου αιχμής) προκειμένου να προειδοποιηθούν οι οδηγοί που φτάνουν για την επικείμενη ενεργοποίηση. Αλλά και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας MTFC, τα ίδια προ-σήματα και VMS πρέπει να συνεχίσουν να προειδοποιούν τους οδηγούς που φθάνουν για τον εφαρμοζόμενο έλεγχο της επικρατούσας κυκλοφορίας προς τα κατάντη. Ο έλεγχος MTFC, από τη φύση του, δημιουργεί περιοχές με οχήματα που κινούνται με χαμηλές ταχύτητες προς τα ανάντη (μερικών) περιοχών στενέματος του δικτύου που μπορούν να κριθούν ως ένας κίνδυνος ασφάλειας για τα οχήματα που πλησιάζουν με μεγαλύτερες ταχύτητες την ουρά της περιοχής χαμηλής-ταχύτητας. Φυσικά, το επίπεδο ταχύτητας στις υπό εφαρμογή MTFC περιοχές θα είναι πιό υψηλό απ΄ό, τι στις περιοχές κυκλοφοριακής συμφόρησης στις οποίες δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος, και τα προαναφερθέντα VMS θα προειδοποιήσει έγκαιρα τους πλησιάζοντες οδηγούς. Εντούτοις, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος για τα οχήματα που φτάνουν στην περιοχή με τις χαμηλές ταχύτητες, VSL μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μεταξύ των ελεγχόμενων περιοχών δυσχερειών για να μειώσει βαθμιαία την ταχύτητα των οχημάτων άφιξης στο επίπεδο που απαιτείται σε κάθε ιδιαίτερη περιοχή δυσχερειών.

2.5 Επίδραση των VSL στον έλεγχο της κυκλοφοριακής ροής

Η επίδραση των VSL στη συνολική συμπεριφορά της κυκλοφοριακής ροής σε αυτοκινητοδρόμους συνοψίζεται παρακάτω:

- Όταν τα όρια ταχυτήτων εφαρμόζονται σε πυκνότητες κάτω του κρίσιμου ορίου,επιδρούν στη μείωση της κλίσης της καμπύλης του διαγράμματος ροής-πυκνότητας. Επιπλέον, όσο μικρότερα όρια ταχυτήτων επιβάλλονται, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της κλίσης της καμπύλης του διαγράμματος ροής-πυκνότητας. Αυτή η επίδραση μπορεί να αξιοποιηθεί για την προσωρινή συγκράτηση της κυκλοφοριακής ροής ώστε να επιβραδύνουν την συμφόρηση κατάντη των σημείων συμφόρησης

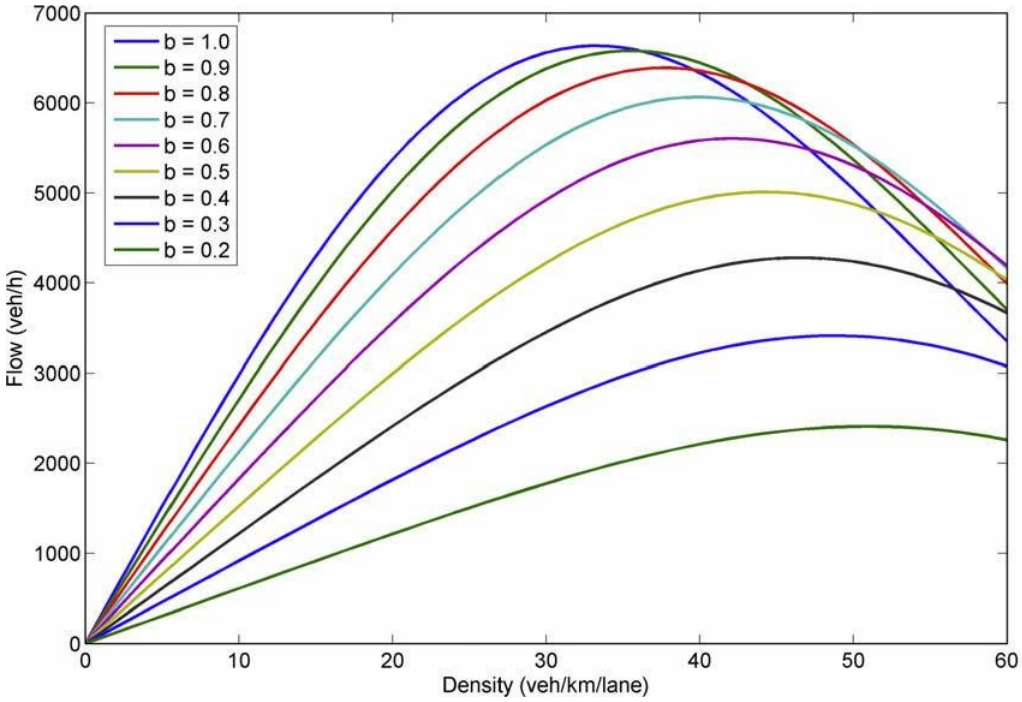
- Η επηρεαζόμενη από τα μεταβλητά όρια ταχυτήτων καμπύλη του διαγράμματος διασταυρώνεται με την καμπύλη χωρίς εφαρμογή των VSL,μετατοπίζοντας την κρίσιμη πυκνότητα σε υψηλότερες τιμές στο διάγραμμα ροής-πυκνότητας. Τα μεγάλα σημεία διαστάυρωσης βρίσκονται γύρω ή πέρα από την κρίσιμη πυκνότητα του διαγράμματος χωρίς την εφαρμογή VSL. Αυτή η επίπτωση μπορεί να αξιοποιηθεί με σκοπό να κρατήσουμε περισσότερα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο χωρίς να εμπίπτει κυκλοφοριακή συμφόρηση.

- Όσον αφορά την ποιοτική αύξηση της ικανότητας ροής,τα διαθέσιμα στοιχεία σήμερα είναι μάλλον ασαφή. Μια μικρή αύξηση της ικανότητας ροής είναι πράγματι ορατή σε ορισμένες περιοχές και για ορισμένες τιμές VSL, ενώ σε άλλες περιοχές δεν μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση της ικανότητας για οποιεσδήποτε τιμές των VSL. Σε περιοχές όπου τα VSL παρέχουν πράγματι μια αύξηση της ικανότητας ροής,αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί απο κατάλληλα σχεδιασμένες στρατηγικές ελέγχου για την αύξηση της διακίνησης οχημάτων.

- Ανεξαρτήτως από το αν η ικανότητα πραγματικά αυξάνεται για κάποιες τιμές VSL ή όχι, αρκετά χαμηλές τιμές VSL οδηγούν σε αναλόγως μικρότερη ικανότητα ροής στα θεμελιώδη διαγράμματα σε σχέση με την περίπτωση της μη εφαρμογής VSL.

- Ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαπίστωσης συνεπάγεται ότι εάν η ζήτηση της κυρίως ροής q_{in} που φτάνει από τα ανάντη της ροής,είναι υψηλότερη από την ικανότητα ροής που επέφερε η εφαρμογή των VSL τότε η περιοχή που εφαρμόζονται τα VSL γίνεται ένα ενεργό μέρος κυκλοφοριακής συμφόρησης που οριοθετεί την εκροή q_{out} που αντιστοιχούν σε τιμές με την χαμηλότερη ικανότητα εκροής που επιφέρει η εφαρμογή των μεταβλητών ορίων ταχυτήτων. Αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία μιας σκοπίμως ελέγξιμης συμφόρησης της κύριας ροής πριν από ένα προκαθορισμένο σημείο αυτοκινητοδρόμου που δημιουργείται κυκλοφοριακή συμφόρηση (π.χ. μια περιοχή συγχώνευσης του αυτοκινητοδρόμου με μια ράμπα εισόδου),προκειμένου να αποφευχθεί η δραστηριοποίησή της και η σχετική μείωση διακίνησης των οχημάτων λόγω της μείωσης της ικανότητας ροής.

Η εφαρμογή των VSL συνήθως υπόκειται σε περιορισμούς όσον αφορά τις μέγιστες επιτρεπόμενες χρονικές και χωρικές αλλαγές των εμφανιζόμενων τιμών των VSL, προκειμένου να αποφευχθεί η σύγχηση του οδηγού και να αυξηθεί η συμμόρφωσή του. Για παράδειγμα, δεν μπορεί να επιτρέπεται για τους οδηγούς να αντιμετωπίζουν συνεχόμενα μεταβλητές πινακίδες σήμανσης (VMS), οι οποίες εφαρμόζουν τα μεταβλητά όρια ταχυτήτων, που διαφέρουν περισσότερο από 20 km/h. Επομένως, η βασική έκταση που εφαρμόζονται τα VSL και η οποία είναι υπεύθυνη για μια ελεγχόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση της κύριας ροής, ενδέχεται να πρέπει να συμπληρωθεί με δύο ακόμη περιοχές εφαρμογής VSL ανάντη και κατάντη,αντίστοιχα, προκειμένου να συμμορφωθεί με τους προαναφερόμενους περιορισμούς για την εφαρμογή των VSL.



Γράφημα 3: Διάγραμμα διαφορετικών ποσοστών VSL.

2.6 Γενική επισκόπηση μοντέλου

Το χρησιμοποιούμενο υποθετικό δίκτυο μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο κυκλοφοριακής ροής METANET. Το METANET είναι ένα ντετερμινιστικό μακροσκοπικό εργαλείο μοντελοποίησης για την προσομοίωση των φαινομένων της κυκλοφοριακής ροής σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων αυθαίρετης τοπολογίας και χαρακτηριστικών, συμπεριλαμβανομένων των διακλαδώσεων-διασταυρώσεων και των ραμπών εισόδου και εξόδου του αυτοκινητοδρόμου. Αυτή η προσέγγιση του μοντέλου επιτρέπει την προσομοίωση όλων των ειδών κυκλοφοριακής κατάστασης του δικτύου (με ή χωρίς κυκλοφοριακή συμφόρηση) και των γεγονότων που μειώνουν την ικανότητα του αυτοκινητοδρόμου (π.χ. ατυχήματα). Το METANET επίσης ενσωματώνει και μέτρα ελέγχου της κυκλοφορίας όπως η φωτεινή σηματοδότηση (RM) και η καθοδήγηση πορείας (RG).

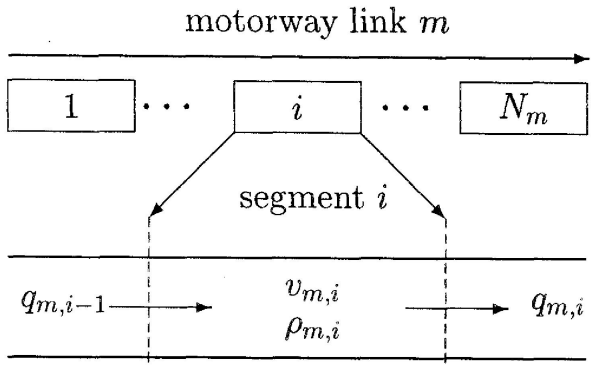
Το METANET έχει δύο διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας (mode). Όταν η διαδρομή που θα ακολουθήσουν οι οδηγοί δεν θεωρείται δεδομένη, τότε δραστηριοποιείται η επιλογή του μη προσανατολισμένου προορισμού (non destination - oriented mode). Διαφορετικά δραστηριοποιείται η επιλογή του προσανατολισμένου προορισμού(destination-oriented mode). Στην περίπτωση που εξετάζουμε έχουμε non destination oriented mode.

Το δίκτυο αυτοκινητοδρόμου αναπαρίσταται από ένα γραφικό διάγραμμα. Στην αναπαράσταση αυτή οι **σύνδεσμοι** του γραφήματος αντιπροσωπεύουν ομοιογενείς εκτάσεις του αυτοκινητοδρόμου ενώ οι **κόμβοι** του γραφήματος αντιπροσωπεύουν τους κόμβους διακλάδωσης και τις ράμπες εισόδου και εξόδου.

2.7 Βασικές μεταβλητές της κυκλοφορίας

Οι μεταβλητές αυτές εκφράζουν τις μέσες τιμές κατάστασης που χαρακτηρίζουν το δίκτυο σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο. Κάθε σύνδεσμος του γραφήματος υποδιαιρείται σε τμήματα (segments) τα μήκη των οποίων κυμαίνονται από 300 έως 800 μέτρα. Επίσης, ο χρόνος διακριτοποιείται, με το χρονικό βήμα να συμβολίζεται με T. Κατά την διάρκεια του χρονικού βήματος οι τιμές των μεταβλητών είναι σταθερές για κάθε τμήμα, όπως είναι σταθερές για κάθε λωρίδα του τμήματος. Οι μεταβλητές αυτές είναι:

- *Πυκνότητα* $\rho_{m,i}(k)$: είναι ο αριθμός των οχημάτων στο τμήμα i του συνδέσμου m τη χρονική στιγμή kT διαιρεμένος με το μήκος του τμήματος L_m και τον αριθμό των λωρίδων l_m.
- *Μέση ταχύτητα* $u_{m,i}(k)$: είναι η μέση ταχύτητα των οχημάτων στο τμήμα i του συνδέσμου m τη χρονική στιγμή kT.
- *Κυκλοφοριακή ένταση ή ροή* $q_{m,i}(k)$: είναι ο αριθμός των οχημάτων που φεύγουν από το τμήμα i του συνδέσμου m κατά το χρονικό διάστημα $(kT, (k+1)T)$ διαιρεμένος με το χρόνο T.
- *Μερική πυκνότητα* $\rho_{m,i}(k)$: είναι η πυκνότητα των οχημάτων στο τμήμα i του συνδέσμου m τη χρονική στιγμή kT που έχουν προορισμό το $j \epsilon J_m$ όπου το J_m είναι το σύνολο των προορισμών που μπορούν να προσεγγιστούν από τον σύνδεσμο m.
- *Ποσοστό σύνθεσης* $\gamma_{m,i,j}(k), 0 \leq \gamma_{m,i,j}(k) \leq 1$: είναι το μέρος της κυκλοφοριακής ροής $q_{m,i}(k)$ η οποία κατευθύνεται στο $j \epsilon J_m$.



Γράφημα 4: Βασικές μεταβλητές της κυκλοφορίας σε σύνδεσμο αυτοκινητοδρόμου.

2.8 Μοντέλο συνδέσμου

2.8.1 *Σύνδεσμοι αυτοκινητοδρόμου*

Χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν ομογενοποιημένες εκτάσεις του αυτοκινητοδρόμου. Η κυκλοφοριακή κατάσταση σε αυτούς περιγράφονται από τις προαναφερόμενες μεταβλητές της κυκλοφορίας. Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι μεταβλητές κυκλοφορίας για τον μη προσδιορισμένου προσανατολισμού τρόπο λειτουργίας είναι :

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

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) u_{m,i}(k) \lambda_m \tag{2}$$

$$
\begin{aligned}
u_{m,i}(k+1) = u_{m,i}(k) &+ \frac{T}{\tau}[V(r_{m,i}(k)) - u_{m,i}(k)] \\
&+ \frac{T}{L_m} u_{m,i}(k)[u_{m,i-1}(k) - u_{m,i}(k)] \\
&- \frac{\nu T}{\tau L_m} \\
&- \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa}
\end{aligned} \tag{3}
$$

$$
V(\rho_{m,i}(k)) = u_{f,m} exp[-\frac{1}{\alpha_m}(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}})^{\alpha_m}] \tag{4}
$$

Επιπλέον, για τον προσδιορισμένου προσανατολισμού τρόπο λειτουργίας η πυκνότητα βρίσκεται από :

$$
\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \lambda_m}[\gamma_{m,i}(k) q_{m,i-1}(k) - \gamma_{m,i,j}(k) q_{m,i}(k)] \tag{5}
$$

$$
\gamma_{m,i,j}(k) = \frac{\rho_{m,i,j}(k)}{\rho_{m,i}(k)} \tag{6}
$$

2.8.2 *Σύνδεσμοι προέλευσης και σύνδεσμοι μεταφοράς-αποθήκευσης*

Αυτό που κάνουν οι σύνδεσμοι προέλευσης είναι να λαμβάνουν την κυκλοφορία εκτός του εξεταζόμενου αυτοκινητοδρόμου και να την διοχετεύουν σε αυτόν. Γι' αυτό το είδος συνδέσμων χρησιμοποιείται ένα απλό πρότυπο ουράς, το οποίο βρίσκει εφαρμογή και στους συνδέσμους μεταφοράς-αποθήκευσης. Οι σύνδεσμοι αυτοί χαρακτηρίζονται από την χωρητικότητά τους. Αν για οποιοδήποτε λόγο (π.χ. ύπαρξη φωτεινών σηματοδοτών) η απαίτηση για εξυπηρέτηση των συνδέσμων αυτών υπερβεί την δυνατότητα εκροής τους, δηλαδή τη συνολική χωρητικότητά τους, τότε θα δημιουργηθούν σειρές αναμονής σε αυτούς τους συνδέσμους. Η εκροή $q_o(k)$ του συνδέσμου προέλευσης o και η μέγιστη εκροή $q_{max,o}(k)$ δίνονται από :

$$
q_o(k) = r_o(k) min[d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, q_{max,o}(k)] \tag{7}
$$

$$
q_{max,o}(k) = \begin{cases} Q_o & \text{αν } \rho_{\mu,1} \leq \rho_{cr,\mu} \\ Q_o p(k) & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{8}
$$

όπου $d_o(k)$ είναι η απαίτηση ροής τη χρονική στιγμή k στον σύνδεσμο o, $w_o(k)$ είναι το μήκος σε αυτοκίνητα μιας πιθανής υπάρχουσας ουράς στον σύνδεσμο o,$q_{max,o}(k)$ είναι η ικανότητα του συνδέσμου o τη χρονική στιγμή k, το $r_o(k) \epsilon [r_{min}, 1]$ είναι το ποσοστό ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης που εφαρμόζεται στον σύνδεσμο o (1 εάν δεν εφαρμόζεται), Q_o είναι η σταθερή ικανότητα του συνδέσμου και $p(k)$ είναι το μέρος του Q_o μπορεί να διοχετευθεί στον σύνδεσμο μ με :

$$
p(k) = \frac{\rho_{max} + \rho_{\mu,1}(k)}{\rho_{max} + \rho_{cr,m}} \tag{9}
$$

και με ρ_{max} την μέγιστη πιθανή πυκνότητα που μπορεί να εμφανισθεί στον εκάστοτε σύνδεσμο του δικτύου. Η καταστατική εξίσωση για έναν σύνδεσμο προορισμού είναι:

$$
w_o(k+1) = w_o(k) + T[d_o(k) - q_o(k)] \tag{10}
$$

Για τον προσδιορισμένου προσανατολισμού τρόπο λειτουργίας η καταστατική εξίσωση είναι :

$$
w_{o,j}(k+1) = w_{o,j}(k) + T[j_{o,j}(k) d_{o,j}(k) + \gamma_{o,j}(k) q_o(k)] \tag{11}
$$

με $w_{o,j}(k)$ να είναι ο αριθμός των αυτοκινήτων στην ουρά αναμονής του συνδέσμου προέλευσης o με προορισμό το j και $j_{o,j}(k)$ είναι το μέρος της ζήτησης προερχόμενη από τον σύνδεσμο o έχοντας ως κατεύθυνση το j.

2.8.3 *Σύνδεσμοι προορισμού*

Οι σύνδεσμοι προορισμού αντιπροσωπεύουν τις περιοχές που τα αυτοκίνητα φεύγουν από το προσομοιωμένο κομμάτι του δικτύου, δηλαδή τις εξόδους του δικτύου. Η κυκλοφοριακή ροή σ' αυτούς τους συνδέσμους επηρεάζεται από την κυκλοφοριακή κατάσταση στους κατάντη συνδέσμους του δικτύου (π.χ. διαρροή της κυκλοφοριακής συμφόρησης προς τα πίσω). Έτσι, αν η πυκνότητα στους συνδέσμους αυτούς είναι διαθέσιμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει την δυνατότητα εκροής σύμφωνα με την κυκλοφοριακή κατάσταση στους κατάντη συνδέσμους.

2.8.4 *Εικονικοί σύνδεσμοι*

Δύο κόμβοι του δικτύου μπορεί να είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Σ' αυτήν την περίπτωση, αν οι επιδράσεις της κυκλοφοριακής κατάστασης μέσα στα μικρά αυτά κομμάτια του δικτύου είναι ελάσσονος σημασίας, μπορούν να αναπαρασταθούν ως εικονικοί σύνδεσμοι μηδενικού μήκους.

2.9 Επίδραση των VSL στις μεταβλητές ελέγχου κάθε συνδέσμου

Το μοντέλο συνδέσμου που περιγράφθηκε παραπάνω,επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει την επίδραση στη συμπεριφορά της κυκλοφορίας των τιμών VSL που εφαρμόζονται, βάση της υπόθεσης ότι μια ενιαία τιμή VSL (αν αυτή υπάρχει) εμφανίζεται σε κάθε σύνδεσμο. Συγκεκριμένες τιμές VSL αντικατοπτρίζονται στα συγκεκριμένου συνδέσμου ποσοστά VSL $b_m(k)$ που επικρατούν,εξ ορισμού,κατά τη διάρκεια $[kT,(k+1)T]$. Τα ποσοστά VSL είναι φυσικές μεταβλητές ελέγχου με ένα επιτρεπτό εύρος $b_m(k)\epsilon[b_{min,m},1]$ όπου $b_{min}\epsilon(0,1)$ είναι το κατώτερο επιτρεπτό όριο για τα ποσοστά VSL.

Τα ποσοστά VSL περιλήφθηκαν στο μοντέλο συνδέσμου (1)-(4) καθιστώντας τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της πυκνότητας,στην εξίσωση (4),εξαρτώμενη του b_m. Αυτό γίνεται με τη χρήση των παρακάτω εξισώσεων:

$$v_{f,m}[b_m(k)] = v^*_{f,m} b_m(k) \tag{12}$$

$$\rho_{cr,m}[b_m(k)] = \rho^*_{cr,m}[1 + A_m[1 - b_m(k)]] \tag{13}$$

$$\alpha_m[b_m(k)] = \alpha^*_m[E_m - (E_m - 1)b_m(k)] \tag{14}$$

όπου $v_{f,m}, \rho^*_{cr,m}, \alpha^*_m$ υποδηλώνουν τις συγκεκριμένες τιμές χωρίς την εφαρμογή VSL για αυτές τις παραμέτρους,ενώ τα A_m, E_m είναι σταθερές παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν βασιζόμενες σε πραγματικά δεδομένα.

Όπως φαίνεται στην εξίσωση (12),το b_m είναι ίσο με το $v_{f,m}$ όταν εφαρμόζονται VSL, διαιρούμενο με το $v^*_{f,m}$ όταν δεν εφαρμόζονται τα VSL, ή περίπου ίσο με τις εφαρμοζόμενες τιμές VSL διαιρούμενες με τα νόμιμα όρια ταχυτήτων χωρίς την εφαρμογή των VSL. Όμως,αν $b_m(k) = 1$,δεν εφαρμόζονται VSL,και αν $b_m(k) < 1$, και για $b_m(k) = 1$, όλες οι παράμετροι που περιέχονται στις εξισώσεις (12)-(14) θεωρείται ότι κρατούν τις αντίστοιχες χωρίς εφαρμογή VSL τιμές τους. Οι εξισώσεις (13) και (14) υποδηλώνουν ότι, για $A_m > 0$ και $E_m > 1, \rho_{cr,m}$ και α_m είναι αυξανόμενες γραμμικές συναρτήσεις για φθίνουσες τιμές b_m, ξεκινώντας με τις συνηθισμένες τιμές της μη εφαρμογής VSL για $b_m(k) = 1$.

2.10 Μοντέλο κόμβου

Όπως προείπαμε οι διακλαδώσεις και οι ράμπες εισόδου και εξόδου του αυτοκινητοδρόμου αναπαρίστανται από τους κόμβους κατά την μοντελοποίηση του δικτύου. Η κυκλοφορία εισέρχεται σε έναν κόμβο n μέσω ενός αριθμού εισερχόμενων συνδέσμων και διανέμεται σε έναν αριθμό εξερχόμενων από τον κόμβο συνδέσμων. Σε αντίθεση με την μοντελοποίηση των συνδέσμων, η μοντελοποίηση των κόμβων δεν έχει οποιαδήποτε δυναμική συμπεριφορά. Έστω $Q_n(k)$ είναι ο συνολικός όγκος κυκλοφορίας που εισέρχεται στον κόμβο n του προσομοιωμένου δικτύου αυτοκινητοδρόμων την χρονική περίοδο k. Επίσης το ποσοστό στροφής (turning rate) β^m_n είναι το μέρος του κυκλοφοριακού όγκου $Q_n(k)$ που αφήνει τον κόμβο n τη χρονική περίοδο k μέσω του συνδέσμου $m\epsilon O_n$, με O_n το σύνολο των συνδέσμων που αφήνουν τον κόμβο n. Έστω I_n το σύνολο των συνδέσμων που εισέρχονται στον κόμβο n. Οι ακόλουθες εξισώσεις θα ισχύουν :

$$Q_n(k) = \sum_{m\epsilon I} q_{m,Nm}(k) \forall n \tag{15}$$

$$q_{m,o}(k) = \beta_n^m(k) Q_n(k) \forall m \epsilon O_n \tag{16}$$

όπου $q_{m,o}(k)$ είναι ο κυκλοφοριακός όγκος που φεύγει από τον κόμβο n μέσω του συνδέσμου m, με τις παραπάνω εξισώσεις να βρίσκουν το $q_{m,o}(k)$ που χρειάζεται στην εξίσωση 1 για $i = 1$. Στον προσδιορισμένου προορισμού τρόπο λειτουργίας η έννοια του ποσοστού στροφής γενικεύεται στην έννοια του ποσοστού διαχωρισμού (splitting rate) της κυκλοφοριακής ροής. Έστω $Q_{n,j}(k)$ είναι ο συνολικός όγκος κυκλοφορίας που εισέρχεται στον κόμβο n του προσομοιωμένου δικτύου αυτοκινητοδρόμων την χρονική περίοδο k με προορισμό το j. Επίσης το ποσοστό διαχωρισμού $\beta_{n,j}^m$ είναι το μέρος του κυκλοφοριακού όγκου $Q_{n,j}(k)$ που αφήνει τον κόμβο n τη χρονική περίοδο k μέσω του συνδέσμου $m \epsilon O_n$. Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν το σημείο προορισμού j δεν είναι προσεγγίσιμο από τον κόμβο n τότε το αντίστοιχο ποσοστό διαχωρισμού της ροής είναι μηδέν, και σε κάθε άλλη περίπτωση βρίσκεται στο διάστημα $[0, 1]$. Εάν το σημείο προορισμού j είναι προσεγγίσιμο από τον κόμβο n τότε :

$$\sum_{m \epsilon O_n} \beta_{n,j}(k) = 1 \tag{17}$$

Για τον προσδιορισμένου προσανατολισμού τρόπο λειτουργίας ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις :

$$Q_n(k) = \sum_{\mu \epsilon I} q_{\mu,N_\mu}(k) \gamma_{\mu,N_\mu,j}(k) \forall (n, j) \tag{18}$$

$$q_{m,o}(k) = \beta_{n,j}^m(k) Q_{n,j}(k) \forall m \epsilon O_n \tag{19}$$

$$\gamma_{m,O,j}(k) = \frac{\beta_{n,j}^m(k) Q_{n,j}(k)}{q_{n,O}(k)} \forall m \epsilon O_n, \forall j \epsilon J_m \tag{20}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις παρέχουν τα $q_{m,o}(k)$ και $\gamma_{m,O_j}(k)$ που χρειάζονται στην εξίσωση 5.

2.10.1 *Ανάντη επιρροή της πυκνότητας*

Όταν ένας κόμβος n έχει περισσότερους από έναν εξερχόμενους κόμβους τότε η ανάντη επιρροή της πυκνότητας πρέπει να συνυπολογιστεί στο τελευταίο τμήμα του εισερχόμενου συνδέσμου. Αυτό γίνεται παίρνοντας τη μέση τιμή της, δηλαδή:

$$\rho_{m,N_{m+1}} = \frac{\sum_{\mu \epsilon O_n} \rho_{\mu,1}^2(k)}{\sum_{\mu \epsilon O_n} \rho_{\mu,1}(k)} \tag{21}$$

όπου $\rho_{m,N_{m+1}}(k)$ είναι η εικονική πυκνότητα κατάντη του εισερχόμενου συνδέσμου m που χρησιμοποιείται στην εξίσωση 3 για $i = N_m$, και $\rho_{\mu,1}$ είναι η πυκνότητα του πρώτου τμήματος του εξερχόμενου κόμβου m.

2.10.2 *Κατάντη επιρροή της ταχύτητας*

Όταν ένας κόμβος n έχει περισσότερους από έναν εισερχόμενους κόμβους τότε η κατάντη επιρροή της ταχύτητας πρέπει να συνυπολογιστεί. Η μέση τιμή της ταχύτητας θα είναι :

$$u_{m,o} = \frac{\sum_{\mu \epsilon O_n} u_{\mu,N_\mu}(k) q_{\mu,N_\mu}(k)}{\sum_{\mu \epsilon O_n} q_{\mu,N_\mu}(k)} \tag{22}$$

όπου $u_{m,o}$ είναι η εικονική ταχύτητα ανάντη του εξερχόμενου κόμβου m που χρειάζεται στην 3 για $i = 1$.

2.11 Κυκλοφοριακές εισροές και ουρές αναμονής στους συνδέσμους προέλευσης

Με σκοπό να αποφύγουμε μη ρεαλιστικά υψηλές τιμές κυκλοφοριακής εισροής στο δίκτυο,ειδικά στις περιπτώσεις που εμφανίζεται διαρροή της κυκλοφοριακής συμφόρησης προς τα πίσω,οριοθετούμε τον όγκο των κυκλοφοριακών εισροών με ένα μοντέλο σειράς αναμονής. Η ροή q_o από έναν σύνδεσμο προορισμού o μοντελοποιείται όπως παρακάτω:

$$q_o = min(q_{max,o}, r_o) \tag{23}$$

με

$$q_{max,o} = min(q_{demand,o} + w_o/T, q_{poss,o}) \tag{24}$$

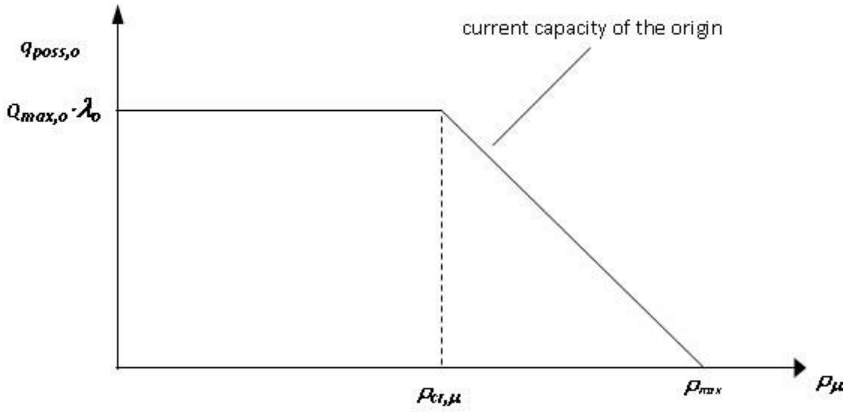
όπου $q_{demand,o}$ είναι η ζήτηση ροής στον σύνδεσμο προέλευσης o σύμφωνα με τα εισαγόμενα κυκλοφοριακά δεδομένα,w_o είναι το μήκος (σε οχήματα) μιας πιθανώς υπάρχουσας ουράς αναμονής στον σύνδεσμο προέλευσης o,$q_{max,o}$ είναι η προσωρινή μέγιστη ροή από τον σύνδεσμο προέλευσης ενώ $q_{poss,o}$ είναι η προσωρινή ικανότητα ροής του συνδέσμου προέλευσης o,και r_o είναι το ποσοστό μέτρησης (σε οχήματα ανά ώρα) του συνδέσμου o. Υπό καταστάσεις ελεύθερης κυκλοφοριακής ροής, η τρέχουσα ικανότητα $q_{poss,o}$ είναι ίση με τη γεωμετρική ικανότητα $Q_{max,o}$. Αν η πυκνότητα ρ_μ κατάντη του συνδέσμου προέλευσης ξεπερνάει την κρίσιμη, δηλαδή $\rho_\mu \geq \rho_{cr,\mu}$, η τρέχουσα ικανότητα μειώνεται ανάλογα με την πυκνότητα ρ_μ όπως απεικονίζεται στο Γράφημα 5.

$$q_{poss,o} = \begin{cases} Q_{max,o}\lambda_o & \text{αν } \rho_\mu \leq \rho_{cr,\mu} \\ Q_{max,o}\lambda_o p & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{25}$$

Έτσι δημιουργείται μια σειρά αναμονής όπως η παρακάτω:

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T[q_{demand,o}(k) - q_o(k)]. \tag{26}$$

Η γενική παράμετρος ρ_{max},αντιπροσωπεύει τη μέγιστη αποδεχτή τιμή κυκλοφοριακής πυκνότητας, καθώς διαβάζονται οι συκεκριμένοι παράμετροι $Q_{max,o}$ (ικανότητα) και λ_o(λωρίδες) του συνδέσμου προέλευσης από το αρχείο περιγραφής του δικτύου (.nwd).



Γράφημα 5: Ικανότητα ροής σε σχέση με την πυκνότητα.

2.12 Συνολικό Πρότυπο Κυκλοφορίας

Συνολικά η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κυκλοφοριακής κατάστασης μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό ορίζοντα στο προσομοιωμένο δίκτυο μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός μη γραμμικού δυναμικού καταστατικού μοντέλου της μορφής :

$$x(k+1) = f[x(k), c(k), d(k)] \tag{27}$$

με αρχική κατάσταση $x(0) = x_0$ · μπορεί να περιληφθεί για ολόκληρο το προσομοιωμένο δίκτυο αυτοκινητοδρόμου, όπου το x είναι το διάνυσμα κατάστασης, c το διάνυσμα ελέγχου και d το διάνυσμα διαταραχής. Οι μεταβλητές της κυκλοφορίας μπορούν να συσχετιστούν με αυτά τα διανύσματα, με το διάνυσμα κατάστασης να αποτελείται από τις πυκνότητες $\rho_{m,i}$, τις μέσες ταχύτητες $u_{m,i}$ κάθε τμήματος i κάθε συνδέσμου m, και τις ουρές αναμονής w_o κάθε συνδέσμου προέλευσης και μεταφοράς-αποθήκευσης o. Το διάνυσμα ελέγχου αποτελείται από το ποσοστό r_o κάθε ράμπας εισόδου και κάθε συνδέσμου μεταφοράς-αποθήκευσης. Τέλος το διάνυσμα διαταραχής αποτελείται από τη ζήτηση d_o κάθε συνδέσμου προέλευσης o και τα ποσοστά στροφής β_n^m κάθε διακλαδωμένου κόμβου n. Στην περίπτωση του προσδιορισμένου τρόπου λειτουργίας γίνεται η ανάλογη τροποποίηση.

2.13 Χρησιμοποιούμενα δεδομένα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το METANET χρησιμοποιεί ποικιλία στατικών και δυναμικών στοιχείων για την προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων για ένα δεδομένο

χρονικό διάστημα. Ο στόχος αυτής της ενότητας είναι να περιγράψει αυτά τα δεδομένα, τα οποία παρέχονται στο METANET μέσω κατάλληλα τροποποιημένων αρχείων (όπως θα τα δούμε παρακάτω) για την προσομοίωση του προαναφερόμενου δικτύου.

2.13.1 Στατικά δεδομένα

Τα στατικά δεδομένα που απαιτούνται για την προσομοίωση αφορούν κυρίως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντελοποιημένων αυτοκινητοδρόμων. Είναι το μήκος του αυτοκινητοδρόμου,τα σημεία εισόδου ή εξόδου των ραμπών εισόδου ή εξόδου αντίστοιχα,και τα σημεία που υπάρχει στένεμα του αυτοκινητοδρόμου με ελλάτωση του αριθμού των λωρίδων. Επίσης, τα σημεία όπου υπάρχει μια σημαντική αλλαγή της γεωμετρίας του δικτύου. Όταν χρησιμοποιούνται μετρήσεις από ένα συγκεκριμένο σημείο του δικτύου,το σημείο αυτό πρέπει να είναι γνωστό. Ακόμη, ο αριθμός των λωρίδων κάθε συνδέσμου που συμπεριλαμβάνεται στο δίκτυο πρέπει να είναι γνωστός.

Τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να χαρακτηριστούν ως γεωμετρικά δεδομένα. Εκτός από αυτά ,υπάρχουν στατικά δεδομένα που περιγράφουν την υποδομή του συστήματος όσον αφορά την κυκλοφορία από μηχανικής απόψεως. Αυτά τα δεδομένα είναι η κρίσιμη πυκνότητα και η ελεύθερη ταχύτητα κάθε συνδέσμου του αυτοκινητοδρόμου. Τέλος, άλλα στατικά δεδομένα είναι οι γενικές παράμετροι του μοντέλου.

2.13.2 Δυναμικά δεδομένα

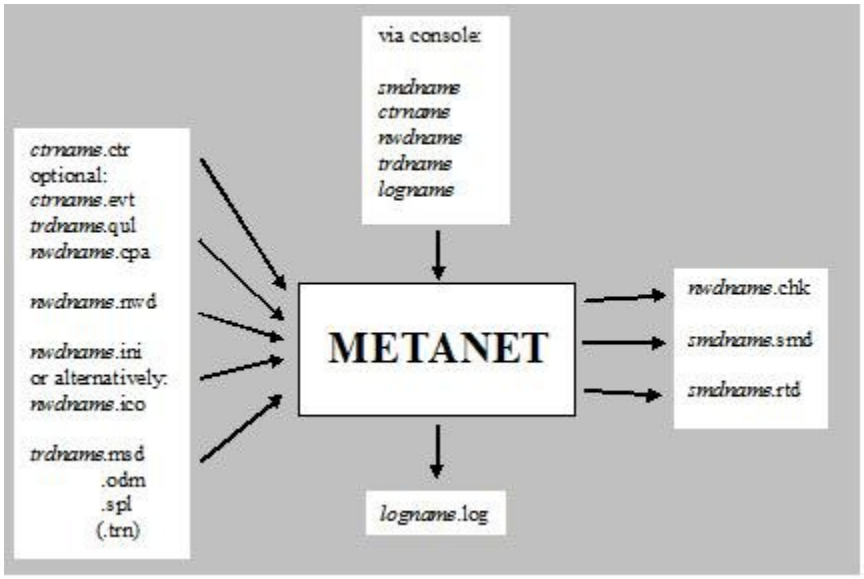
Τα δυναμικά δεδομένα αλλάζουν καθώς η προσομοίωση προχωράει. Σε αυτά περιλαμβάνονται ο κυκλοφοριακός όγκος που εισέρχεται στο δίκτυο μέσω των συνδέσμων προέλευσης, και προαιρετικά η μέση ταχύτητα των συνδέσμων προέλευσης και η κυκλοφοριακή πυκνότητα των συνδέσμων προορισμού. Η συμπεριφορά του οδηγού (π.χ. η πορεία που θα ακολουθήσει μέσα στο δίκτυο) περιλαμβάνεται στα δυναμικά δεδομένα. Αυτό γίνεται με την χρησιμοποίηση των ποσοστών στροφής (turning rates) αν έχουμε μη προσανατολισμένου προορισμού τρόπο λειτουργίας και διαφορετικά (δηλ. στον προσανατολισμένου προορισμού τρόπο λειτουργίας) με τη χρησιμοποίηση των ποσοστών διαχωρισμού (splitting rates).

3 METANET

3.1 Κύρια χαρακτηριστικά

Το METANET όπως προείπαμε είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης για δίκτυα αυτοκινητοδρόμων με αυθαίρετη τοπολογία και γεωμετρικά χαρακτηριστικά βασισμένο σε μια καθαρώς μακροσκοπική θεώρηση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρέχονται από κάποιες μακροσκοπικές μεταβλητές,οι οποίες αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.7.Με σκοπό να αξιολογηθεί και να συγκριθεί η αποδοτικότητα διάφορων μέτρων ελέγχου της κυκλοφορίας και/ή στρατηγικών ελέγχου υπολογίζονται κάποια *κριτήρια απόδοσης*. Τα κριτήρια απόδοσης που εξετάζει και υπολογίζει το METANET είναι ο συνολικός χρόνος ταξιδιού,η συνολική κατανάλωση καυσίμου,η συνολική απόσταση ταξιδιού και η συνολική απώλεια καθοδήγησης για τους ταξιδιώτες. Κατ΄ ουσίαν η προσομοίωση τροφοδοτείται με την ζήτηση στις περιοχές των ορίων του δικτύου(εισροές) συν τις πληροφορίες για τους συνδέσμους προορισμού και προέλευσης(εάν είναι αναγκαίο).

3.2 Αρχεία εισόδου και εξόδου του METANET



Γράφημα 6: Αρχεία εισόδου-εξόδου του METANET.

Αρχεία Εισόδου

Τα αρχεία εισόδου του METANET που πρέπει να δημιουργηθούν είναι τα εξης:

- *ctrname.ctr*. Σε αυτό το αρχείο ελέγχου προσομοίωσης ο χρήστης διευκρινίζει το χρονικό βήμα προσομοίωσης T,τον τρόπο λειτουργίας της προσομοίωσης(mode), τη χρήση των εισαγόμενων κυκλοφοριακών δεδομένων, τη μοντελοποίηση των γεγονότων(π.χ. ατυχήματα) και προεραιτικά εκχώρεί τις δυναμικές παραμέτρους της κυκλοφορίας.

- *nwdname.nwd*. Αυτό το αρχείο περιέχει τις γενικές παραμέτρους του δικτύου,τις λίστες των συνδέσμων προέλευσης,προορισμού,αυτικινητοδρόμου και και τα χαρακτηριστικά τους(όπως το μήκος και τον αριθμό των λωρίδων αυτών,τη χωρητικότητά τους, τα ελεύθερα όρια ταχυτήτων σε αυτούς κλπ.) και επίσης μία λίστα με τους κόμβους του δικτύου και τις πληροφορίες διασύνδεσης και τοπολογίας σε σχέση με τους συνδέσμους.

- *nwdname.ini*(προαιρετικά) ή *nwdname.ico*. Σε αυτά τα αρχεία περιέχονται πληροφορίες για την αρχική (με την έννοια του χρονικού ορίζοντα της προσομοίωσης) κατάσταση της κυκλοφορίας όπως η πυκνότητα και η μέση ταχύτητα,αλλά και λίστα με τις ουρές αναμονής στους συνδέσμους προέλευσης.

- trdname.msd. Αυτό το αρχείο περιέχει τις πραγματικές ή υποθετικές μετρήσεις για τα συνοριακά κυκλοφοριακά δεδομένα.

Επιπλέον,για προσανατολισμένου προορισμού τρόπο λειτουργίας έχουμε τα:

- *trdname.odm*,το οποίο παρέχει πληροφορίες για την ποσόστοση των πιθανών κατευθήνσεων από τα σημεία προέλευσης στους πιθανούς προορισμούς.
- *trdname.spl*,που περιέχει την ποσόστοση της πιθανής επιλογής της κατεύθυνσης ανάμεσα στους δύο συνδέσμους-προορισμούς ,βρισκόμενοι σε ένα κόμβο του δικτύου και με στόχο τον τελικό προορισμό.

Εναλλακτικά για το τελευταίο αρχείο,στην περίπτωση του μη προσανατολισμένου προορισμού τρόπου λειτουργίας έχουμε το αρχείο:

- *trdname.trn*,το οποίο περιέχει την ποσόστοση της πιθανής επιλογής της κατεύθυνσης ανάμεσα στους δύο συνδέσμους-προορισμούς ,βρισκόμενοι σε ένα κόμβο του δικτύου και χωρίς προαποφασισμένο τελικό προορισμό.

Αρχεία Εξόδου

Τα αρχεία εξόδου του METANET που παράγονται είναι τα εξης:

- *nwdname.chk*. Αυτό το αρχείο περιέχει μια λίστα με τα δεδομένα που έχουν διαβαστεί από το nwdname.nwd και nwdname.ini αρχείο εισόδου. Επίσης περιέχει τις αρχικές τιμές κατάστασης του δικτύου και στοιχεία που προέρχονται από τις ρουτίνες έναρξης των αρχικών δεδομένων εισόδου.
- *smdname.smd*. Είναι το αρχείο δεδομένων της προσομοίωσης, δηλαδή περιέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.Σε αυτό εμπεριέχονται οι μεταβλητές της κυκλοφορίας (ροή,πυκνότητα,μέση ταχύτητα) για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Στο τέλος του αρχείου εμφανίζονται με αριθμούς οι δείκτες απόδοσης (όπως ο συνολικός χρόνος ταξιδίου), αν είναι ενεργοποιημένη η δυναμική εκχώρηση της κυκλοφορίας (Dynamic Traffic Assignment-DTA).
- *smdname.rtd*. Όπως θα δούμε παρακάτω το γραφικό περιβάλλον METAGRAF εμπεριέχει οπτικοποιημένα αποτελέσματα της προσομοίωσης με σχεδίαση της τιμής των μεταβλητών καθ΄ όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το συγκεκριμένο αρχείο περιέχει αυτά τα αποτελέσματα όχι όμως απεικονίζοντάς τα γραφικά,αλλά ως αυτούσια μαθηματικά νούμερα.
- *logname.log*. Είναι το αρχείο ημερολογίου της προσομοίωσης το οποίο περιέχει όλα τα μηνύματα λάθους και τις προειδοποιήσεις όπως αναγράφονται στην οθόνη. Αυτό είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου έχει διακοπεί η προσομοίωση και πρέπει να διαβαστεί το λάθος που έγινε για να διορθωθεί.Αυτό το μήνυμα βρίσκεται στο αρχείο logname.log.

3.3 METAGRAF

Το METAGRAF χρησιμοποιείται προκειμένου να απεικονίσουμε τα κυκλοφοριακά στοιχεία που παράγονται ή χρησιμοποιούνται από το METANET σε μια διαφανή μορφή. Το επιπλέον αρχείο που χρειαζόμαστε είναι το *nwdname.dpa* και είναι το αρχείο παραμέτρων απεικόνισης. Αυτό το αρχείο ελέγχει τις αναλογίες των στοιχείων τοπολογίας του δικτύου και της προαιρετικής επισήμανσής τους στην οθόνη. Οι προδιαγραφές του μεγέθους πρέπει να δοθούν σε εκατοστά. Για την οθόνη, αυτό μπορεί να αντιστοιχεί όχι ακριβώς στα πραγματικά μεγέθη. Ωστόσο, η χρήση αυτού του γραφικού περιβάλλοντος είναι ένας καλός συμβιβασμός μεταξύ της φορητότητας και της διαφάνειας. Το γραφικό περιβάλλον METAGRAF προσφέρει τέσσερις κύριες επιλογές:

- Γραφική αναπαράσταση της τοπολογίας του δικτύου όπως έχει περιγραφεί στο αρχείο περιγραφής του δικτύου(nwdname.nwd). Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή από το μενού επιλογών του στοιχείου NETWORK-PREVIEW.
  Όταν εκτελούμε αυτή την επιλογή,χρειάζεται μόνο ένα έγκυρο αρχείο περιγραφής δικτύου (.nwd). Έτσι σχεδιάζεται το γράφημα του δικτύου όπως αυτό περιγράφεται στο συγκεκριμένο αρχείο. Προβάλλονται όλοι οι κόμβοι,οι σύνδεσμοι και η διασύνδεση μεταξύ αυτών. Οι κόμβοι αναπαρίστανται ως οι κύκλοι του γραφήματος και οι σύνδεσμοι ως γραμμές,με τις σημειωμένες τελείες να ξεχωρίζουν τα τμήματα (segments) των συνδέσμων μεταξύ τους.

- Γενική επισκόπηση της κυκλοφορίας του δικτύου σε δεδομένες χρονικές περιόδους.Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή NETWORKPLOT απ΄ το μενού επιλογών. Σε αυτή τη γραφική απεικόνιση αναπαρίστανται η κυκλοφοριακή κατάσταση σε ολόκληρο το δίκτυο,όπως αυτή ισχύει σε μια δεδομένη χρονική στιγμή της διάρκειας της προσομοίωσης. Για την εκτέλεση αυτής της επιλογής χρειάζεται εκτός του αρχείου περιγραφής του δικτύου (.nwd),το αρχείο δεδομένων της προσομοίωσης (.smd).

  Τα διαφορετικά χρώματα αντανακλούν την κυκλοφοριακή κατάσταση ενός συγκεκριμένου τμήματος συνδέσμου. Υπάρχει η δυνατότητα η χρωματική απεικόνιση να αναπαριστά τιμές της ροής,της ταχύτητας και της πυκνότητας. Έτσι, στην περίπτωση της κλίμακας ροής το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί σε ελεύθερη ροή στο συγκεκριμένο τμήμα συνδέσμου,το κίτρινο σε αυξημένη κυκλοφορία και το κόκκινο σε ροή κυκλοφοριακής συμφόρησης. Για την ταχύτητα το πράσινο χρώμα δείχνει ότι οι μέσες ταχύτητες των οχημάτων τη δεδομένη χρονική στιγμή ειναι άνω των 50km/h,το κίτρινο μας υποδεικνύει ότι οι ταχύτητες κυμένονται στα 20 με 50km/h και το κόκκινο ότι οι ταχύτητες βρίσκονται κάτω του ορίου των 20km/h. Όσον αφορά την πυκνότητα,το πράσι-νο χρώμα υποδεικνύει ότι η πυκνότητα στο συγκεκριμένο τμήμα συνδέσμου κάποια δεδομένη χρονική στιγμή είναι κάτω του ορίου των 17 veh/km/m,το κίτρινο μας δείχνει ότι η πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ των 17 και 35 veh/km/m ενώ το κόκκινο μας δείχνει ότι η πυκνότητα είναι ιδιαιτέρως υψηλή,ήτοι άνω των 35 veh/km/m. Επιπλέον,το πλάτος κάθε τμήματος συνδέσμου απεικονίζει το μέγεθος της τρέχουσας κυκλοφοριακής ροής. Κάθε χιλιοστόγραμμο αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο ποσό οχημάτων ανά ώρα. Η προκαθορισμένη τιμή για αυτήν την παράμετρο ειναι 1 χιλιοστόγραμμο ανά 1000 οχήματα ανά ώρα.

- Γραφικές παραστάσεις των κυκλοφοριακών ροών,ταχυτήτων, μηκών σειρών αναμονής, πυκνοτήτων και των ποσοστών σύνθεσης κατά τη διάρκεια της χρόνου προσομοίωσης σε επιλεγμένους συνδέσμους. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή από το μενού επιλογών του στοιχείου LINK VARIABLES. Και σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται τα αρχείο περιγραφής του δικτύου και το αρχείο δεδομένων της προσομοίωσης. Υπάρχει η δυνατότητα για γραφικές παραστάσεις των μεταβλητών της κυκλοφορίας κάθε συνδέσμου σύμφωνα είτε με τις προσομοιωμένες τιμές, είτε με τις τιμές των υποθετικών ή πραγματικών μετρήσεων(με την αναγκαία ύπαρξη του αρχείου .msd) καθώς και γραφικές παραστάσεις που να συγκρίνουν τις μεταβλητές της κυκλοφορίας κάθε συνδέσμου είτε ανάμεσα σε δύο προσομοιώσεις είτε ανάμεσα στις προσομοιωμένες και στις μετρημένες τιμές των μεταβλητών.

- Γραφικές απεικονίσεις των ποσοστών διαχωρισμού της ροής,των χρόνων ταξιδίου και των τιμών της απώλειας χρόνου κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης για τα επιλεγμένα (n,j)-ζευγάρια,όπως αυτά έχουν οριστεί στα αρχεία εισόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή NODE VARIABLES απ΄ το μενού επιλογών. Το αρχείο από το οποίο προέρχονται οι πηγές δεδομένων για αυτές τις γραφικές απεικονίσεις και που είναι απαραίτητο να υπάρχει στο ίδιο directory,είναι το αρχείο δεδομένων πορείας (.rtd). Οι χρόνοι διαδρομής και απώλειας χρόνου καθορίζονται για τη δυναμικά κοντύτερη διαδρομή από τον κόμβο διακλάδωσης στον προορισμό μέσω του καθορισμένου συνδέσμου εξόδου.

Η χρονική στιγμή για την οποία παρουσιάζονται οι διάφορες μεταβλητές της κυκλοφορίας και γενικότερα η κατάσταση του δικτύου επιδεικνύεται από ένα ρολόι στην κάτω αριστερή γωνία της οθόνης.

3.4 Κριτήρια απόδοσης

Τα κριτήρια απόδοσης που ακολουθούν,υπολογίζονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης και αναφέρονται όλα στο αρχείο προσομοίωσης δεδομένων.smd.

Συνολικός χρόνος ταξιδίου(Total Travel Time,TTT) τ_G(σε οχήματα επί ώρα):

$$\tau_G = \tau_{G,N} + \tau_{G,SAF} \tag{28}$$

όπου $\tau_{G,N}$ και $\tau_{G,SAF}$ αναπαριστούν το συνολικό χρόνο ταξιδίου των οχημάτων στους συνδέσμους αυτοκινητοδρόμου και μεταφοράς-αποθήκευσης,αντίστοιχα,και υπολογίζονται όπως παρακάτω:

$$\tau_{G,N} = T \sum_k \sum_m L_m \lambda_m \sum_i \rho_{m,i}(k) \tag{29}$$

$$\tau_{G,SAF} = T \sum_{k} \sum_{saf} n_{d,saf} \tag{30}$$

όπου το $n_{d,saf}$ αντιπροσωπεύει τον αριθμό των οχημάτων που έχουν ήδη εισέλθει στο σύνδεσμο μεταφοράς-αποθήκευσης αλλά,λόγω εσωτερικού χρόνου ταξιδίου,δεν έχουν ακόμα φτάσει στην ουρά αναμονής.

Αυτό το κριτήριο αναπαριστά το συνολικό χρόνο ταξιδίου όλων των οχημάτων στο δίκτυο που δεν βρίσκονται σε ουρά αναμονής,κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης.

Συνολικός χρόνος αναμονής στους συνδέσμους προέλευσης του δικτύου $\tau_{W,O}$(σε οχήματα επί ώρα):

$$\tau_{W,O} = T \sum_{k} \sum_{o} w_o(k) o = 1, 2, 3, ..., O \tag{31}$$

όπου O είναι ο συνολικός αριθμός των συνδέσμων προέλευσης του δικτύου. Αυτό το κριτήριο αναπαριστά τους χρόνους αναμονής σε όλους τους συνδέσμους προέλευσης του δικτύου κατά τη διάρκεια του συνολικού χρόνου προσομοίωσης.

Συνολικός χρόνος αναμονής στους συνδέσμους μεταφοράς- αποθήκευσης του δικτύου $\tau_{W,SAF}$(σε οχήματα επί ώρα):

$$\tau_{W,SAF} = T \sum_{k} \sum_{saf} w_{saf}(k) saf = 1, 2, 3, ..., SAF \tag{32}$$

όπου το SAF είναι ο συνολικός αριθμός των συνδέσμων μεταφοράς-αποθήκευσης στο δίκτυο. Αυτό το κριτήριο αναπαριστά τους συνολικούς χρόνους αναμονής σε όλους τους συνδέσμους μεταφοράς-αποθήκευσης του δικτύου κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης.

Ο χρόνος αναμονής σε ένα σύνδεσμο προέλευσης ή μεταφοράς αποθήκευσης εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της ύπαρξης μιας ουράς αναμονής. Μια ουρά μπορεί να εμφανιστεί λόγω περιορισμένης ικανότητας και/ή διαρροής της κυκλοφοριακής συμφόρησης από το κατάντη κομμάτι του δικτύου και/ή μέτρων ελέγχου της κυκλοφορίας,τα οποία μειώνουν τις εισροές στο δίκτυο σε τιμές χαμηλότερες από τη ζήτηση που αποδίδεται σε αυτόν τον σύνδεσμο προέλευσης ή μεταφοράς-αποθήκευσης.

Συνολικός δαπανούμενος χρόνος(Total Time Spent,TTS) τ_S(σε οχήματα επί ώρα) που είναι το άθροισμα του Συνολικού Χρόνου Ταξιδίου και του Συνολικού Χρόνου Αναμονής στους συνδέσμους προέλευσης και μεταφοράς αποθήκευσης:

$$\tau_S = \tau_G + (\tau_{W.O} + \tau_{W,SAF}) \tag{33}$$

Συνολική απόσταση ταξιδίου L_G(σε οχήματα επί χιλιόμετρα):

$$L_G = L_{G,N} + L_{G,SAF} \tag{34}$$

όπου το $L_{G,N}$ και το $L_{G,SAF}$ αναπαριστούν την συνολική απόσταση ταξιδίου από όλα τα οχήματα στους συνδέσμους αυτοκινητοδρόμου και μεταφοράς- αποθήκευσης, αντίστοιχα, και υπολογίζονται σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$L_{G,N} = \sum_{k} T \sum_{m} \sum_{i} q_{mi}(k) L_m \tag{35}$$

$$L_{G,SAF} = \sum_{k} T \sum_{saf} q_{saf}(k) L_{saf} \tag{36}$$

Αυτό είναι το άθροισμα της συνολικής απόστασης ταξιδίου από όλα τα οχήματα κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης. Το q_{saf} είναι ο όγκος της ροής της κυκλοφορίας που εισέρχεται σε σύνδεσμο μεταφοράς-αποθήκευσης.

Συνολική ποσότητα καταναλωμένης βενζίνης V_G(σε οχήματα επί λίτρα):

$$V_G = V_{G,N} + V_{G,O} + V_{G,SAF} \tag{37}$$

όπου τα $V_{G,N}, V_{G,O}$ και $V_{G,SAF}$ αναπαριστούν την κατανάλωση καυσίμου στους συνδέσμους αυτοκινητοδρόμου,προέλευσης κα μεταφοράς- αποθήκευσης, αντίστοιχα, και υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$V_{G,N} = \sum_k \frac{T}{100} \sum_m L_m \sum_i q_{m,i}(k) \begin{cases} b + \frac{c}{v_{m,i}(k)}, & v_{m,i}(k) \leq 60 \\ b + \frac{c}{v_{m,i}(k)} + \alpha(v_{m,i}(k) - 60)^2, & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{38}$$

$$V_{G,O} = \sum_k \frac{T}{100} \sum_o w_o(k) v_o(k) \begin{cases} b + \frac{c}{v_o(k)}, & \text{αν } v_o(k) \leq 60 \\ b + \frac{c}{v_o(k)} + \alpha(v_o(k) - 60)^2, & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{39}$$

όπου v_o είναι μια εικονική τιμή της ταχύτητας η οποία υπολογίζεται υπό την υπόθεση μιας δεδομένης τιμής πυκνότητας της ουράς ρ_{queue} της τάξης των 100 οχημάτων/χιλιόμετρο. Από την γενική σχέση $q = \rho \cdot v \cdot \lambda$,μπορεί να προκύψει η $v_o(k) = q_o(k)/(\rho_{queue}\lambda_o)$. Τελικώς έχουμε:

$$V_{G,SAF} = \sum_k \frac{T}{100} \sum_{saf} b q_{saf}(k) L_{saf} + c w_{saf} \tag{40}$$

Οι συντελεστές α, b και c που χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω εξισώσεις έχουν την ακόλουθη σημασιολογία:

- Το α είναι από άποψη κατανάλωσης εξαρτόμενο της ταχύτητας ανά χιλιόμετρο, έχει μονάδες τα λίτρα / χιλιόμετρο / όχημα επί $(\text{km/h})^{-2}$ επί 100 και έχει τιμή 0.0016
- Το b είναι μη-εξαρτόμενο της ταχύτητας ανά χιλιόμετρο, έχει μονάδες τα λίτρα / χιλιόμετρο / όχημα επί 100 και έχει τιμή 4.49
- Τέλος το c είναι κατανάλωση ανά ώρα(αναμονής), έχει μονάδες τα λίτρα / ώρα / όχημα επί 100 και έχει την τιμή 122.0

Το κριτήριο απώλειας χρόνου χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει το βαθμό προσσέγγισης της δυναμικής ισσοροπίας του χρήστη.

4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο έχει σκοπό να περιγράψει τα χαρακτηριστικά και τη χρήση του εργαλείου λογισμικού για τον έλεγχο αυτοκινητοδρόμων AMOC (Advanced Motorway Optimal Control), το οποίο αποσκοπεί στον καθορισμό συντονισμένων και ολοκληρωμένων στρατηγικών ελέγχου για αυθαίρετης τοπολογίας δίκτυα αυτοκινητοδρόμων. Ο όρος συντονισμένος έλεγχος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τις στρατηγικές ελέγχου που λαμβάνουν υπό εξέταση διάφορα μέτρα ελέγχου του ίδιου είδους. Απ΄ την άλλη πλευρά,ο όρος ολοκληρωμένος έλεγχος εντάσσεται στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικού είδους μέτρα ελέγχου για λόγους κυκλοφοριακού ελέγχου. Για παράδειγμα η ταυτόχρονη εξέταση των Variable Message Signs με Ramp Metering προς ένα κοινό στόχο ορίζεται ως *ολοκληρωμένος ελέγχος*.

Οι περιορισμοί ελέγχου εισήχθησαν προκειμένου να ληφθούν υπόψη σε ένα πλήρως συστηματικό τρόπο για τους περιορισμούς των τιμών μέτρησης που οφείλονται σε:

- περιορισμός του μήκους ουράς.
- διαρροή προς τα πίσω κατάντη της ράμπας.
- χαμηλή ζήτηση στη ράμπα.

Επιπλέον,οι βελτιώσεις του μοντέλου που εισήχθησαν τα τελευταία χρόνια στο METANET,εντάχθηκαν και στο AMOC.

4.2 Μαθηματική προσσέγγιση

4.2.1 Γενική διατύπωση

Στο AMOC, το πρόβλημα ελέγχου μετασχηματίζεται σε πρόβλημα δυναμικού βέλτιστου ελέγχου με περιορισμούς μεταβλητών ελέγχου $u(k)$ οι οποίες μπορούν να λυθούν αριθμητικά για δοσμένες καταστάσεις στα όρια του συστήματος $d(k)$, για δεδομένο χρονικό ορίζοντα. Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση ένα κατάλληλο κριτήριο κόστους πρέπει να ελαχιστοποιηθεί,της μορφής:

$$J = \vartheta[x(K)] + \sum_{k=0}^{K-1} \varphi[x(k), u(k), d(k)] \tag{41}$$

ενός δυναμικού συστήματος:

$$x(k+1) = f[x(k), u(k), d(k)] \tag{42}$$

υπό τους περιορισμούς μεταβλητών ελέγχου:

$$h[x_(k), u_(k), k] \leq 0 \tag{43}$$

και τους περιορισμούς ανισότητας ελέγχου:

$$u_{i,min} \leq u_i(k) \leq u_{i,max} \tag{44}$$

όπου K είναι ο χρονικός ορίζοντας, $x \epsilon \Re^n$ το διάνυσμα κατάστασης και $u \epsilon \Re^n$ το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου.Το n είναι ο αριθμός των μεταβλητών κατάστασης και p ο αριθμός των μεταβλητών ελέγχου. Οι ϑ, φ είναι μη γραμμικές συναρτήσεις κόστους. Το ϑ λογίζεται ως η τελική κατάσταση στο τέλος του χρονικού ορίζοντα,ενώ το φ λογίζεται ως η εξέλιξη της κατάστασης κατά τη διάρκεια του χρόνου. Το h είναι ένα διάνυσμα συναρτήσεων το οποίο έχει τόσα μέλη όσοι είναι οι περιορισμοί ελέγχου καταστάσεως που πρέπει να εκπληρωθούν.

4.2.2 Δυναμικά διανύσματα

Στην συγκεκριμένη περίπτωση του AMOC, το $\mathbf{f}$ αντιστοιχεί στη μοντελοποίηση του METANET. Αυτό σημαίνει πως το γενικό διάνυσμα $\mathbf{x}$ αποτελείται από τις γνωστές από το METANET μεταβλητές κατάστασης $\rho_{m,i}, v_{m,i}$(κάθε τμήματος i κάθε συνδέσμου m) και w_o (κάθε προορισμό o). Το γενικό διάνυσμα ελέγχου $\mathbf{u}$ αποτελείται από τις

εισαγόμενες στο METANET μεταβλητές β_n^m(κάθε κόμβου απόφασης n προς τον σύνδεσμο εξόδου m) και r_o(εδώ σε οχήματα ανά ώρα,κάθε ράμπας εισόδου o). Τα ποσοστά στροφής β_n^m ως μεταβλητές ελέγχου λογίζονται για την επίδραση των *μεταβλητών ορίων ταχυτήτων (VMS)*,ενώ τα ποσοστά μέτρησης r_o είναι οι εισαγόμενες τιμές ελέγχου του ramp metering. Το διάνυσμα τιμών στα όρια του συστήματος $\mathbf{d}$ συνίσταται από την κυκλοφοριακή ζήτηση $d_o(k)$ σε όλους τους συνδέσμους προέλευσης καθώς και σε ορισμένες άλλες μεταβλητές όπως των πυκνοτήτων λόγω διαρροής προς τα πίσω στους συνδέσμους προορισμού και των ποσοστών στροφής ή διαχωρισμού(εφ΄ όσον δεν υπόκεινται επίσης σε βελτιστοποίηση).

Το διάνυσμα $\mathbf{h}$ συνίσταται από στοιχεία που αναπαριστούν για κάθε θέση μέτρησης o τους ακόλουθους περιορισμούς εξαρτομένης της καταστάσεως:

- από τη χαμηλή ζήτηση (συμπεριλαμβανομένης της μείωσης του μήκους της ουράς)

$$r_o(k) \leq d_o(k) + w_o(k)/T \tag{45}$$

  δηλαδή

$$h_{low,o} = r_o(k) - (d_o(k) + w_o(k)/T) \tag{46}$$

- από την ικανότητα του συνδέσμου προέλευσης, πιθανώς μειωμένη από τη διαρροή προς τα πίσω της κατάντη πυκνότητας ρ_{down}:

$$r_o(k) \leq min(Q_{max,o}, f_{decrease}(\rho_{down,o})) \tag{47}$$

  δηλαδή

$$h_{spill,o} = r_o(k) - min(Q_{max,o}, f_{decrease}(\rho_{down,o})) \tag{48}$$

- από τον ειδικώς εισαγόμενο εξαρτώμενο καταστάσεως περιορισμό μήκους ουράς στο w_{max}:

$$r_o(k) \geq (w_o(k) - w_{max,o})/T + d_o(k), \tag{49}$$

  δηλαδή

$$h_{queue,o} = (w_o(k) - w_{max,o})/T + d_o(k) - r_o(k). \tag{50}$$

Τα ποσοστά στροφής β_n^m είναι απλώς περιορισμένα. Τα τροποποιημένα ελάχιστα $u_{i,min}$ είναι 0 για όλες τις μεταβλητές ελέγχου. Για τα ποσοστά του άνω φυσικού ορίου $u_{i,max}$ είναι $Q_{max,o}$ ενώ για τα ποσοστά στροφής είναι 1. Αν και δεν είναι εξαρτώμενα της κατάστασης,τα τροποποιημένα όρια μπορούν να διαχειριστούν όπως στις παραπάνω τρεις περιπτώσεις,αυξάνοντας τον αριθμό των στοιχείων του $\mathbf{h}$ ανάλογα.

4.2.3 Το κριτήριο κόστους του AMOC

Το κριτήριο κόστους του AMOC που έχει επιλεγεί είναι:

$$J = T \sum_{k=0}^{K-1} \{ \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m + \sum_o w_o(k) + a_f \sum_o [r_o(k) - r_o(k-1)]^2 \}$$
$$+ \sum_{k=0}^{K-1} \{ a_w \sum_o [max(w_o(k) - w_{max,o}, 0]^2 \}$$

το οποίο έχει σκοπό πρωτίστως να ελαχιστοποιήσει το κριτήριο απόδοσης *Total Time Spent* όλων των οχημάτων που βρίσκονται στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται από τον όρο $\sum_m \sum_i \rho_{m,i} L_m \lambda_m$ συν τον όρο $\sum_o w_o(k)$.Οι επόμενοι όροι περιλαμβάνουν τον χρόνο αναμονής στις ράμπες εισόδου. Ο όρος $a_f \sum_o [r_o(k) - r_o(k-1)]^2$ προσθαίτεται στο κριτήριο του κόστους ώστε να καταστείλει ταλαντώσεις υψυλής συχνότητας των διαδρομών ελέγχου. Ο τελευταίος επιλέον όρος $a_w \sum_o [max(w_o(k) - w_{max,o}, 0)]^2$ είναι όρος τιμωρίας ο οποίος ενεργεί προς τον περιορισμό των μηκών των ουρών στις ράμπες εισόδου. Δεν υπάρχει όρος ο οποίος να λογίζεται την τελική κατάσταση του χρονικού ορίζοντα K, δηλαδή είναι $\vartheta = 0$.

4.3 Αριθμητική επίλυση

Ο αριθμητικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου,παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο.
Το κριτήριο κόστους J είναι μια συνάρτηση του $\mathbf{x}$(k),k=0,...,K-1 (τροχιές κατάστασης) και $\mathbf{u}$(k),k=0,...,K-1 (τροχιές βελτιστοποίησης υποκείμενες σε βελτιστοποίηση). Παρατηρώντας την εξίσωση 42 βλέπουμε ότι οι τροχιές κατάστασης είναι εξαρτώμενες από τις τροχιές ελέγχου. Επομένως το Θ μπορεί να θεωρηθεί εξαρτώμενο μόνο από τις μεταβλητές ελέγχου,δηλαδή $J = \bar{J}(u)$. Η κλίση,δηλαδή η ευαισθησία της τιμής του κόστους προς τις αλλαγές που προκύπτουν από τον έλεγχο,

$$g(k) = \vartheta\bar{J}/\vartheta u(k) = [\vartheta f/\vartheta u(k)]^T\lambda(k+1) + [\vartheta h/\vartheta u(k)]^T\mu(k) \tag{51}$$

μπορεί να υπολογιστεί, όπου $\lambda\epsilon\Re^n$.Το $\lambda(k)$ αναπαριστά την ευαισθησία της τιμής κόστους J ενάντια σε αλλγές των τιμών κατάστασης στο k. Μπορεί να προσδιοριστεί από:

$$\lambda(k) = \vartheta\theta/\vartheta x(k) \tag{52}$$

$$\lambda(k) = \vartheta\phi/\vartheta x(k) = [\vartheta f/\vartheta x(k)]^T\lambda(k+1) + [\vartheta h/\vartheta x(k)]^T\mu(k), k = K-1, ..., 0 \tag{53}$$

δηλαδή υπολογίζοντας το $\boldsymbol{\lambda}$ αρχικά από την εξίσωση 52 και εφρμόζοντας ένα βρόγχο επανάληψης όπου το k είναι διακριτοποιημένο μέχρι το 0 (αντίστροφη ολοκλήρωση).

Το $\mu\epsilon\Re^q$ είναι το διάνυσμα των λεγόμενων *πολλαπλασιαστών Kuhn-Tucker*. Αυτοί οι πολλαπλασιαστές είναι απαραίτητοι για να συνυπολογιστεί η επίδραση των εξαρτομένης καταστάσεως περιορισμών. Πρέπει να επιλεχθούν κατάλληλα για να εκπληρώσουν τις καταστάσεις:

$$\mu(k)h[x(k), u(k), k] = 0 \tag{54}$$

$$\mu(k) \geq 0 \tag{55}$$

Όπου υπάρχει επίδραση των περιορισμών,τα ανάλογα στοιχεία της κλίσης $\mathbf{g}$(k) γίνονται ίσα με το 0.
Οι παραπάνω εξισώσεις (51) έως (55) δεν παρέχουν απευθείας επίλυση για τον υπολογισμό των βέλτιστων τροχιών ελέγχου . Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν σε μια επαναληπτική διαδικασία για την προσσέγγιση της βέλτιστης λύσης. Σε αυτό το πλαίσιο η κλίση δίνει την πληροφόρηση για το ποιας κατέθυνσης μερικές μη- βέλτιστες τροχιές πρέπει να τροποποιηθούν, με σκοπό να πάμε προς την βέλτιστη τροχιά, δηλαδή σε μικρότερες τιμές του κόστους.

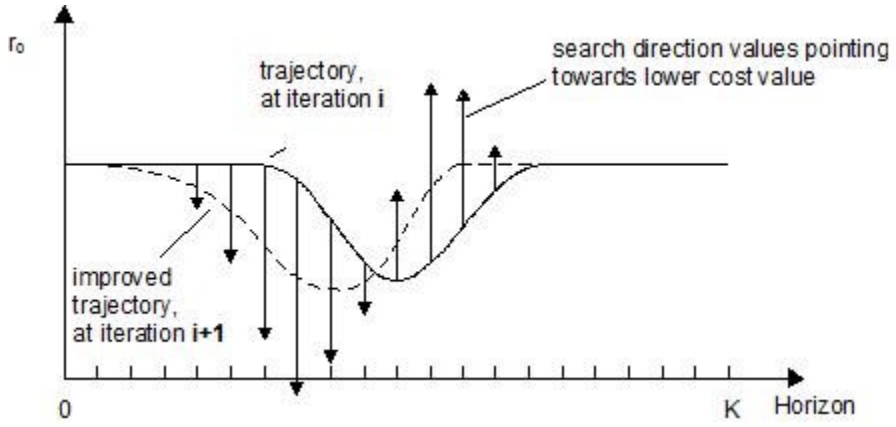
Αλγόριθμος

Εστω το l υποδηλώνει το βήμα επανάληψης και το $u^{(l)}$ την τροχιά ελέγχου για k=0,...,K-1 η οποία βρέθηκε για το βήμα l. Η επαναληπτική επίλυση του αλγορίθμου περιγράφεται παρακάτω:

- *Βήμα 1*: Επέλεξε αποδεκτές(αλλά όχι απαραίτητα βέλτιστες) τροχιές ελέγχου $u^{(0)}$,π.χ. σταθερές αποδεκτές τιμές. Θέσε το βήμα επανάληψης ίσο με μηδέν ($l = 0$).
- *Βήμα 2*: Τρέξε τον αλγόριθμο,δηλαδή υπολόγισε την εξίσωση (42) σε έναν βρόγχο χρονικού διαστήματος από $k = 0, ..., K-1$. Ξεκίνα τον αλγόριθμο προσομοίωσης πάντα με την ίδια αρχική τιμή κατάστασης x_0 και τροφοδότησέ τον με τις ίδιες γνωστές ή εκτιμημένες τιμές στα όρια του συστήματος $d(k)$. Επιπλέον υπολόγισε την κλίση $g^{(l)}$ εφαρμόζοντας στις εξισώσεις (51),(52) και (53) έναν αντίστροφο βρόγχο επανάληψης από το $k = K-1, ..., 0$.
- *Βήμα 3*: Όρισε μια κατέυθυνση αναζήτησης $s^{(l)}$ από την κλίση $g^{(l)}$ και αν είναι δυνατό,επιπλέον από την $g^{(l-1)}$,$g^{(l-2)}$...
- *Βήμα 4*: Εκτέλεσε μία μονοδιάστατη αναζήτηση κατά μήκος της $s^{(l)}$ κατέυθυνσης προκειμένου να βρεθούν καινούριες βελτιωμένες τροχιές ελέγχου $u^{(l+1)}$.
- *Βήμα 5*: Αν η περεταίρω ποιοτική βελτίωση των λαμβανομένων ήδη τροχιών είναι κάτω ενός δεδομένου ορίου ϵ σταμάτησε με τις περίπου βέλτιστες τροχιές ελέγχου, αλλιώς θέσε $l = l + 1$ και πήγαινε ξανά στο βήμα 2.

Στο AMOC πραγματοποιούνται αρκετοί τύποι για τον καθορισμό της κατεύθυνσης αναζήτησης (βλέπε το βήμα 3), όπως οι μέθοδοι Σχεδόν-Newton, Συζυγούς κλίσης, και της κατάβασης.

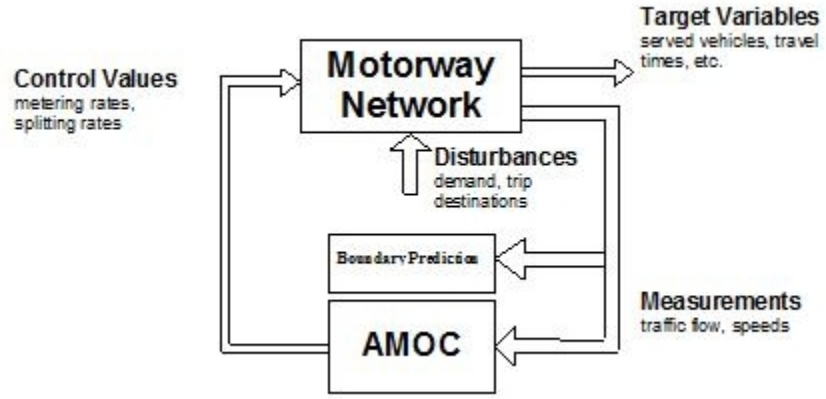
Η επόμενη εικόνα απεικονίζει τη βελτίωση των τροχιών μιας εισόδου ελέγχου.



Γράφημα 7: Τροχιές ελέγχου.

4.4 Χρονικός Ορίζοντας

Εκτός από τον σκοπό της μελέτης του AMOC στο πλαίσιο της μελέτης της προσομοίωσης, προορίζεται να εφαρμοστεί και ως στρατηγική ελέγχου σε κλειστό βρόγχο προσομοίωσης (βλ. το Γράφημα 8).



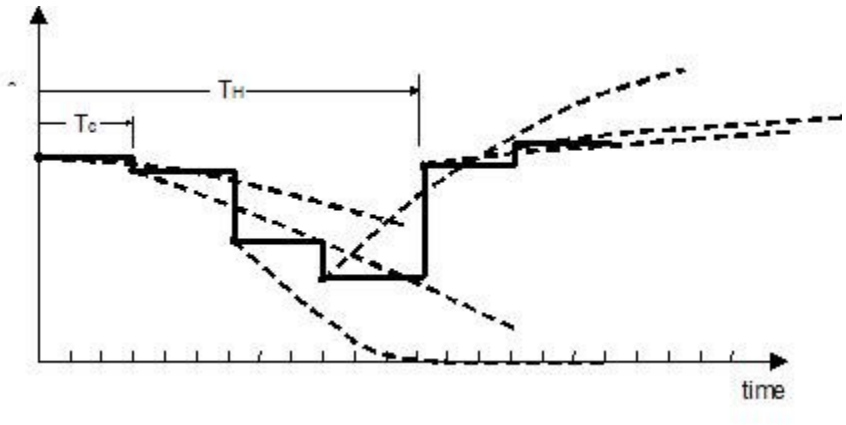
Γράφημα 8: Στρατηγική ελέγχου του AMOC.

Σε κάθε χρονικό διάστημα ελέγχου T_C, πρέπει να υπολογιστούν καινούριες τιμές ελέγχου οι οποίες πρέπει να είναι βασισμένες στα πιο πρόσφατα δεδομένα των μετρήσεων. Επιπλέον οι διαταραχές (δηλ. οι τιμές στα όρια του προσομοιωμένου συστήματος) κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προσομοίωσης χρειάζονται (βλ. βήμα 2) στον παραπάνω αλγόριθμο. Σε καταστάσεις επί-γραμμής,αυτές οι τιμές πρέπει να προβλεφθούν.

Η ιδέα της χρήσης του βέλτιστου ελέγχου σε κλειστό βρόγχο επανάληψης, βασίζεται στην επανάληψη της όλης διαδικασίας βελτιστοποίησης σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης όπου οι προβλεψεις των διαταραχών και η αρχική κατάσταση ενημερώνονται κάθε φορά σύμφωνα με τις τρέχουσες μετρήσεις. Ο χρονικός ορίζοντας $T_H >> T_C$ επιλέγεται αρκετά μεγάλος ώστε να εξεταστούν όλες οι μελλοντικές επιπτώσεις στα ισχύοντα μέτρα ελέγχου. Αν και οι τροχιές ελέγχου υπολογίζονται για όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα,μόνο το πρώτο μέρος,το οποίο καλύπτει μόνο το αμέσως επόμενο βήμα ελέγχου,εφαρμόζεται στη διαδικασία.

Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την χρησιμοποίηση των τρεχουσών μετρήσεων με σκοπό να μειωθούν τα λάθη πρόβλεψης και μοντελοποίησης. Επιπλέον λαμβάνει την μελλοντική εξέλιξη της κατάστασης της διαδικασίας ως αντίδραση στις τρέχουσες αποφάσεις ελέγχου. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως '*Κυλιόμενος ορίζοντας*' ή '*Κυλιόμενο παράθυρο*' κλπ..

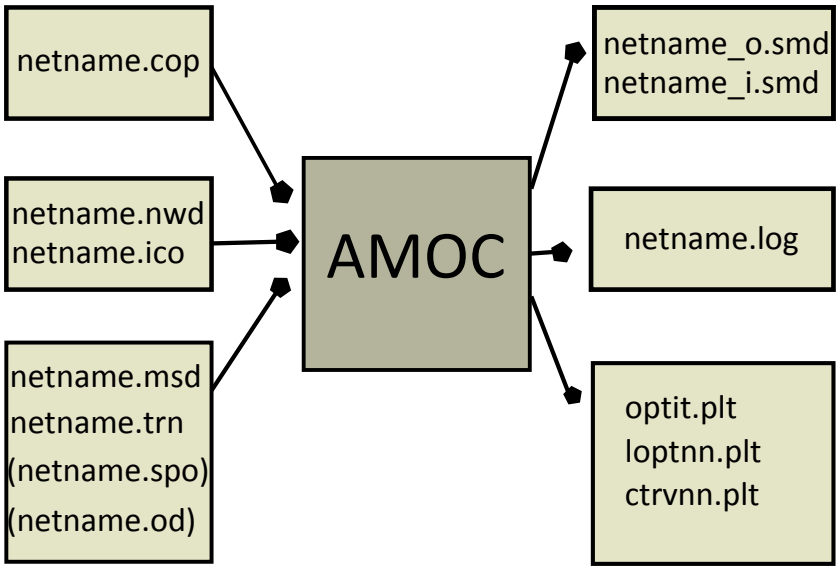
Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την διαδικασία. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τις τροχιές όπως αυτές υπολογίστηκαν για ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα ελέγχου. Η σταθερή γραμμή δείχνει την προκύπτουσα καμπύλη ελέγχου,όπως αυτή εφαρμόστηκε στη διαδικασία.



Γράφημα 9: Διαδικασία ελέγχου.

4.5 Αρχεία Εισόδου/Εξόδου του AMOC

Προκειμένου να τρέξει το AMOC τα επόμενα αρχεία πρέπει να προετοιμαστούν:



Γράφημα 10: Αρχεία εισόδου-εξόδου του AMOC.

Αρχεία εισόδου:

- *netname.cop*: Σε αυτό το αρχείο προσομοίωσης ο χρήστης μπορεί να αποσαφηνίσει το χρονικό βήμα προσομοίωσης T, τον ορίζοντα προσομοίωσης, τον τρόπο λειτουργείας της προσομοίωσης, τη χρήση των εισαγόμενων κυκλοφοριακών δεδομένων, τη μοντελοποίηση περιστατικών, τις παραμέτρους βελτιστοποίησης, τα μέτρα ελέγχου που εμπλέκονται, κλπ. .
- *netname.nwd*: Αυτό το αρχείο περιέχει τις γενικές παραμέτρους του συστήματος,τη λίστα των συνδέσμων προέλευσης,προορισμού,αυτοκινητοδρόμου και τα χαρακτηριστικά τους (μήκος, αριθμός λωρίδων, όρια ελεύ-

θερης ταχύτητας, κρίσιμη πυκνότητα, ικανότητα, κλπ.) και μια λίστα των κόμβων με τις πληροφορίες για την διασύνδεσή τους με τους κόμβους (ίδιο όπως στο METANET).

- *netname.ico*: Είναι το αρχείο μετις αρχικές καταστάσεις της κυκλοφορίας (ίδιο όπως στο METANET).
- Τα ακόλουθα αρχεία δεδομένων κυκλοφορίας:
  - *netname.msd*: Αρχείο υποθετικών ή πραγματικών δεδομένων κυκλοφορίας (ίδιο όπως στο METANET). Επίσης, στην περίπτωση του μη προσανατολισμένου προορισμού τρόπο λειτουργίας:
  - *netname.trn*: Περιέχει τα ποσοστά στροφής σε όλους τους κόμβους του δικτύου. ή στην περίπτωση του προσανατολισμένου τρόπου λειτουργίας:
  - *netname.odm*: Περιέχει πληροφορίες για του συνδέσμους προέλευσης και προορισμού.
  - *netname.spl*: Περιέχει τα ποσοστά διαχωρισμού σε συγκεκριμένους κόμβους του δικτύου.

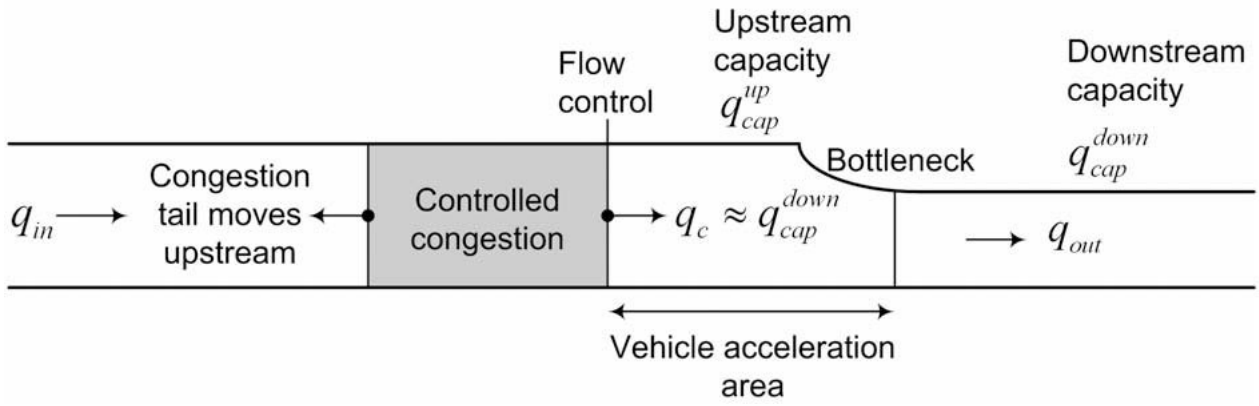
Από την στιγμή που θα ξεκινήσει το πρόγραμμα πρέπει να προβλεφθεί το όνομα *netname*. Αυτό γίνεται διδραστικά από την κονσόλα εισόδου. Στην έκδοση PC αυτό το όνομα μπορεί να προσδιοριστεί στην γραμμή διαχείρησης με την οποία αρχίζει να λειτουργεί το AMOC.

Αρχεία εξόδου:

- *netname_i.smd*: Περιέχει τα δεδομένα της προσωμοίωσης,δηλαδή τα αρχικά αποτελέσματα πριν εφαρμοστεί η βελτιστοποίηση.
- *netname_o.smd*: Περιέχει τα βελτιστοποιημένα αποτελέσματα αφού εφαρμοστεί η βελτιστοποίηση. Το περιεχόμενο και η δομή των παραπάνω αρχείων είναι ίδια όπως στο METANET.
- *netname.log*: Περιέχει πληροφορίες και μηνύματα λάθους της διάρκειας της προσομοίωσης.
- Αρχεία που επιτρέπουν την αναλυτική κρίση της επαναληπτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης:
  - *optit.plt*:για την επιτυχία της βελτιστοποίησης από βήμα σε βήμα,
  - lopt*nn*.plt:για την συμπεριφορά βελτιστοποίησης κατά γραμμή στην *nn*-ιοστή επανάληψη,
  - ctrv*nn*.plt:για τιις τροχιές των τιμών ελέγχου μετά την *nn*-ιοστή επανάληψη.

5 MTFC ΣΕ ΣΥΓΧΩΝΕΥΟΜΕΝΟΥΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥΣ

Το παρών κεφάλαιο σκοπό έχει να εξετάσει την εφαρμογή MTFC που συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 2 σε δύο υπό συγχώνευση αυτοκινητοδρόμους. Αρχικά εξετάζεται η εφαρμογή MTFC σε ελεγκτή ανατροφοδότησης που αναπτύχθηκε από [3] για ένα και μόνο αυτοκινητόδρομο. Έπειτα αναπτύσσονται οι προσαρμογές που απαιτούνται για την εφαρμογή του σε δύο υπό συγχώνευση αυτοκινητοδρόμους. Παρακάτω παρατίθεται Γράφημα με ένα τοπικό σημείο εφαρμογής MTFC σε μεμονομένο αυτοκινητόδρομο.



Γράφημα 11: Τοπικό σημείο εφαρμοφής MTFC.

5.1 MTFC ανατροφοδότησης χρησιμοποιώντας VSL

Η βάση για το σχεδιασμό ανάδρασης MTFC χρησιμοποιώντας VSL ως μέτρο ελέγχου είναι ένα διακριτού χρόνου γραμμικό μοντέλο που δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{\Delta\rho_{out}(z)}{\Delta b(z)} = KK'\frac{\tau}{z+\tau-1}\frac{z-\alpha}{z-\beta} \tag{56}$$

με $\alpha, \beta, \tau > 0, K' > 0$ και $K > 0$ είναι παράμετροι μοντελοποίησης που πρέπει να προσδιοριστούν και $0 < \beta < \alpha \leq 1$ (βλ. [3]). $\Delta\rho_{out}$ είναι η διακύμανση της πυκνότητας στην περιοχή στενέματος του δικτύου εξαιτίας της μεταβολής του ποσοστού VSL. Οι τιμές α, β, τ, K' και K μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα των καταστάσεων εφαρμογής της κάθε εγκατάστασης και των συνθηκών εφαρμογής.

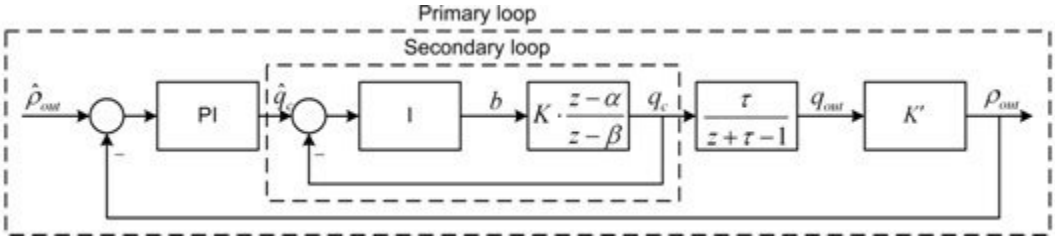
Το Γράφημα 12 απεικονίζει τη δομή του ελέγχου MTFC ανατροφοδότησης που σχεδιάστηκε από [3],με τις μεταβλητές και τη συσχέτηση της συνάρτησης μεταφοράς να ανταποκρίνονται στο γραμμικό μοντέλο που περιγράφθηκε παραπάνω. Στο Γράφημα 12 ο δευτερεύων βρόχος επηρεάζεται από το ποσοστό VSL b το οποίο δίνεται από τον δευτερεύων βρόγχο το οποίο θα καθορίσει την εκροή q_c του Γραφήματος 11. Η λήψη της μέτρησης αυτής της ροής γίνεται κατάντη της περιοχής εφρμογής και είναι συνεχώς ανατροφοδοτούμενη σε σύγκριση με την επιθυμητή ροή (αυτή της γραμμής αναφοράς) που δίνεται από τον πρωτεύοντα ελεγκτή. Ο πρωτεύων βρόχος χρησιμοποιεί την μέτρηση της πυκνότητας ρ_{out} στην περιοχή στενέματος του δικτύου και τη συγκρίνει με το σημείο αναφοράς (set-point) της πυκνότητας $\hat{\rho}_{out}$ που ορίστηκε από τον χειριστή του συστήματος (η οποία θα πρέπει να είναι ίση με την ρ_c για μεγιστοποίηση της απόδοσης).

Ο δευτερεύων ελεγκτής του Γραφήματος 12 σχεδιάστηκε ως ολοκληρωτικός ελεγκτής με συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{b(z)}{e_q(z)} = \frac{K_I}{z-1}, \tag{57}$$

ή,στο πεδίο του χρόνου:

$$b(k) = b(k-1) + K_I e_q(k) \tag{58}$$



Γράφημα 12: Ελεγκτής ανατροφοδότησης.

με K_I την ολοκληρωτική παράμετρο του ελεγκτή και $e_q(\cdot) = \hat{q}_c(\cdot) - q_c(\cdot)$ είναι το σφάλμα ελέγχου της ροής ανά λωρίδα. Ο βρόχος του πρωταρχικού ελεγκτή προσδιορίσθηκε να είναι Αναλογικός-Ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής (Γράφημα 12) που έχει ως εξής:

$$\frac{\hat{q}_c(z)}{e_\rho(z)} = \frac{(K_P + K_I')z - K_P}{z - 1} \tag{59}$$

ή εναλλακτικά:

$$\hat{q}_c(k) = \hat{q}_c(k-1) + (K_P + K_I')e_\rho(k) - K_P e_\rho(k-1) \tag{60}$$

όπου K_I' και K_P είναι η ολοκληρωτική κα αναλογική πράμετρος του ελεγκτή, αντίστοιχα,και $e_\rho(\cdot) = \hat{\rho}_{out} - \rho_{out}(\cdot)$ είναι το σφάλμα πυκνότητας του ελεγκτή. Για περισσότερες λεπτομέριες για τον σχεδιασμό,την ρύθμιση και την λειτουργία του ελεγκτή ο χρήστης παραπέμπεται [3].

5.1.1 Πτυχές πρακτικής εφαρμογής

Στον τομέα εφαρμογής ελέγχου MTFC με την χρησιμοποίηση VSL απαιτείται η εξέταση των πρακτικών πτυχών εφαρμογής.

- *Διακριτά VSL*
  Ο προβλεπόμενος ρυθμιστής ανατροφοδότησης προσφέρει πραγματικές τιμές ποσοστών VSL ενώ μόνο διακριτές τιμές VSL, μέσα από ένα προδιευκρινισμένο σύνολο τέτοιων τιμών, μπορούν να επιδειχθούν στην πράξη. Παραδείγματος χάριν, ένα πιθανό σύνολο ορίων ταχυτήων θα μπορούσε να είναι το $VSL \in \{40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120\}$ km/h, αλλά, για λόγους ευκολίας, καθορίζουμε ένα σύνολο επιτρεπόμενων διακριτών ποσοστών VSL $b \in \{0, 2\ ,\ 0.3\ ,\ 0.4\ ,\ 0.5\ ,\ 0.6\ ,\ 0.7\ ,\ 0.8\ ,\ 0.9\ ,\ 1.0\}$ για την χρησιμοποίηση στις ερευνούμενες προσομοιώσεις. Κατά συνέπεια,το ποσοστό VSL που εφαρμόζεται λαμβάνεται με την στρογγυλοποίηση του ποσοστού VSL $b(k)$ που δίνεται από την στρατηγική ελέγχου προς το κοντυνότερο επιτρεπόμενο ποσοστό VSL. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η στργγυλευμένη τιμή $b(k)$ χρησιμοποιείται μόνο για την επίδειξη,και όχι όπως $b(k-1)$ στην (58).

- *VSL περιορισμένης διακύμανσης χρόνου*
  Η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών ορίων ταχύτητας στην ίδια πινακίδα VSL μπορεί να περιοριστεί σε μια προ-διευκρινισμένη τιμή, π.χ. 20 km/h. Πάλι, η παραλλαγή ποσοστού VSL περιορίζεται αντ΄ αυτού, με την απαγόρευση μιας διαφοράς μεγαλύτερης από 0,2. Παρόμοια με όταν χρησιμοποιούνται οι διακριτές τιμές VSL, η περιορισμένη τιμή $b(k)$ χρησιμοποιείται για την επίδειξη και μόνο.

- *VSL περιορισμένης διακύμανσης χώρου*
  Ο προβλεπόμενος ρυθμιστής ανατροφοδότησης δίνει κατάλληλη τιμή έκθεσης VSL αρκετά ανάντη της περιοχής στενέματος του δικτύου, ώστε να δημιουργηθεί μια κατάλληλη επικρατούσα ροή σύμφωνα με το Γράφημα 11. Αυτό δημιουργεί μια ελεγχόμενη συμφόρηση (Γράφημα 11) της οποίας η ουρά μπορεί να διαδωθεί προς τα ανάντη. Κατά συνέπεια, τα οχήματα που φθάνουν στην ουρά συμφόρησης θα πρέπει να επιβραδυνθούν για να ενωθούν με τα προπορευόμενα οχήματα της κυκλοφοριακής συμφόρησης, γεγονός το οποίο μπορεί να θεωρηθεί επικίνδυνο για την ασφάλεια. Αν και (για λόγους που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2) η σχετική κλίση ταχύτητας (και ως εκ τούτου ο κίνδυνος ασφάλειας) είναι χαμηλότερη στην περίπτωση ελέγχου MTFC έναντι της «φυσικής» συμφόρησης χωρίς κάποια εφαρμογή ελέγχου, συνίσταται να μειωθεί περαιτέρω ο κίνδυνος ασφάλειας με την κατάλληλη ενεργοποίηση των VSL προς τα ανάντη της ελεγχόμενης κυκλοφοριακής συμφόρησης. Σαφώς, αυτό απαιτεί τη διαθεσιμότητα των πινακίδων VSL σε λογικό διάστημα μεταξύ τους(π.χ.,

κάθε 1-2 km) στο ανάντη μέρος του αυτοκινητόδρομου, δηλ., ανάντη των 1-2 πινακίδων που εφαρμόζουν τις αποφάσεις του ρυθμιστή των VSL. Η βασική ιδέα της λειτουργίας αυτών των ανάντη VSL είναι να περιοριστούν οι χωρικές/χρονικές κλίσεις των ταχυτήτων των οχημάτων ανάντη της περιοχής ελεγχόμενης κυκλοφοριακής συμφόρησης για να μειώσει τον κίνδυνο ασφάλειας. Οι ακόλουθοι κανόνες μπορούν να εφαρμοστούν στα ανάντη VSL μέσω ενός αντίστοιχου αλγορίθμου:

- καμία πινακίδα δεν επιδεικνύει μία χαμηλότερη τιμή VSL από αυτήν της επόμενης κατάντη πινακίδας. Η διαφορά μεταξύ των τιμών VSL που επιδεικνύονται σε δύο διαδοχικές πινακίδες είναι περιορισμένη, π.χ., σε 20 km/h.
- η τιμή VSL που επιδείκνεται δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλότερη από την (μετρημένη) μέση ταχύτητα γύρω από την αντίστοιχη πινακίδα. Αυτό γίνεται προκειμένου να αποφευχθούν οι καταστάσεις όπου οι οδηγοί αναγκάζονται (λόγω της ελεγχόμενης κυκλοφοριακής συμφόρησης) να οδηγήσουν σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες αντιμετωπίζοντας τα πολύ υψηλότερα όρια ταχύτητας που επιδεικνύονται.
- ξεκινώντας από την τιμή VSL του ρυθμιστή και προχωρώντας στην προς τα ανάντη κατεύθυνση, η τιμή VSL κάθε πινακίδας αυξάνεται, σε σύγκριση με την τιμή VSL της επόμενης κατάντη πινακίδας, από, π.χ., 20 km/h, εκτός αν ένα απο τα προηγούμενα δύο ισχύουν.

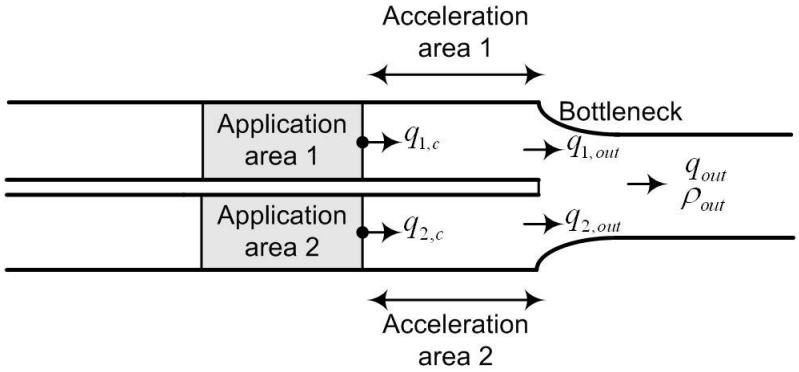
Αυτοί οι κανόνες οδηγούν σε ίσες τιμές επίδειξης VSL κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου που υπάρχει η ελεγχόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση,ενώ τα οχήματα που οδηγούν προς την περιοχή κυκλοφοριακής συμφόρησης θα αντιμετωπίσουν βαθμιαία μία μείωση τιμών VSL που θα τα «καθοδηγήσουν» σε μια ασφαλή ένωση με την ελεγχόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση.

- *Τιμές VSL κατάντη της περιοχής εφαρμογής*
  Τα οχήματα που βγαίνουν από την περιοχή ελεγχόμενης κυκλοφοριακής συμφόρησης πρέπει να επιταχύνουν και να διασχίσουν την κατάντη περιοχή στενέματος του δικτύου με μια σταθερή ταχύτητα. Για να «καθοδηγήσει» τους οδηγούς αναλόγως,μία τιμή VSL θα μπορούσε να ενεργοποιηθεί στις περιοχές επιτάχυνσης και στενέματος του δικτύου. Παραδείγματος χάριν, ένα σταθερό ποσοστό VSL 0,9 μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτές τις περιοχές, όποτε το MTFC VSL είναι ενεργό.

- *Περίοδος ελέγχου των VSL*
  Για τον έλεγχο MTFC με VSL, η επιλογή της περιόδου ελέγχου καθορίζει τη συχνότητα των αλλαγών των τιμών VSL που, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2 πρέπει να είναι περιορισμένη. Σε αυτό το έγγραφο, η περίοδος ελέγχου επιλέγεται ως $T_c = 60$ s. Αυτή η περίοδος ελέγχου φαίνεται να είναι κατάλληλη για πρακτικούς λόγους δεδομένου ότι είναι αρκετά διαδεδομένη στις τρέχουσες εγκαταστάσεις ρυθμιστών VSL σε διάφορες χώρες. Στην πραγματικότητα, ακόμα κι αν μια πινακίδα VSL είναι ορατή από μερικά εκατοντάδες μέτρα νωρίτερα, είναι πολύ απίθανο ένας οδηγός να δει στην ίδια πινακίδα αν αλλάζει το όριο ταχύτητας περισσότερο από μία φορά, κάτι που θα μπορούσε να επιφέρει σύγχυση στους οδηγούς.

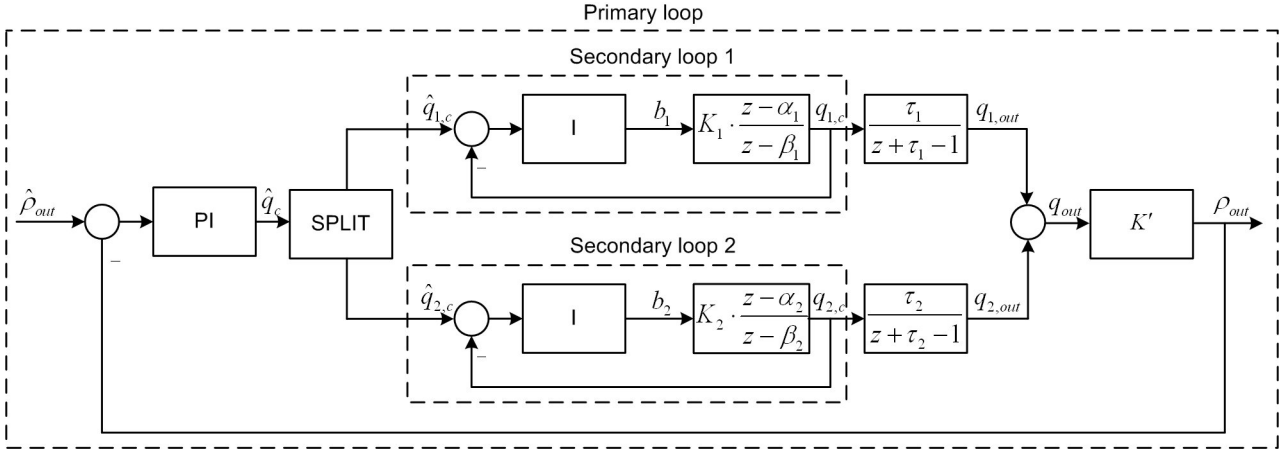
5.2 Έλεγχος MTFC σε διπλό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων

Η εφαρμογή MTFC σε δύο συγχωνευόμενους αυτοκινητόδρομους είναι απλή. Η έννοια MTFC που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2 επεκτείνεται και για τον άλλο αυτοκινητόδρομο. Επομένως κάθε αυτοκινητόδρομος θα έχει προς τα ανάντη της κοινής περιοχής στενέματος μία περιοχή εφαρμογής και μια περιοχή επιτάχυνσης όπως φαίνεται στο Γράφημα 13.



Γράφημα 13: MTFC σε διπλό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων.

Μετά την γενική ιδέα ελέγχου MTFC για έναν ενιαίο αυτοκινητόδρομο, επιθυμούμε να διατάξουμε τις τιμές ροής $q_{1,c}$ και $q_{2,c}$ προς τα ανάντη της περιοχής στενέματος του δικτύου προκειμένου να καθιερωθούν οι βέλτιστες καταστάσεις της κυκλοφορίας. Για την περίπτωση ανατροφοδότησης ο στόχος του ελέγχου παραμένει να κρατήσει την πυκνότητα στην περιοχή στενέματος του δικτύου κοντά στην κρίσιμη πυκνότητα. Για αυτόν τον σκοπό η δομή του ελέγχου ανατροφοδότησης που παρουσιάζεται στο Γράφημα 12,επεκτείνεται για να είναι σε θέση να εξετάσει δύο τομείς εφαρμογής, και έτσι δύο ποσοστά VSL. Η προκύπτουσα δομή ελέγχου απεικονίζεται στο Γράφημα 14. Η ερμηνεία αυτής της δομής ελέγχου είναι παρόμοια με αυτήν που παρουσιάζεται στο Γράφημα 12. Στο Γράφημα 14, υπάρχουν δύο δευτεροβάθμιοι βρόχοι. Ο πρώτος επηρεάζεται από το ποσοστό VSL b_1 που δίνεται από το δευτεροβάθμιο ελεγκτή 1 που θα καθορίσει την εκροή $q_{1,c}$ του Γραφήματος 13. Αυτή η ροή μετριέται προς τα ανάντη του τομέα εφαρμογής και ανατροφοδοτείται και συγκρίνεται με την επιθυμητή ροή (αναφοράς) $\hat{q}_{1,c}$ που δίνεται από μια κατάλληλη λογική η οποία διαχωρίζει την επιθυμητή ροή $\hat{q}_c$ που δίνεται από τον αρχικό ελεγκτή, ο οποίος εξετάζεται μετέπειτα. Ο δεύτερος βρόχος συμπεριφέρεται ανάλογα. Ο αρχικός βρόχος χρησιμοποιεί τη μετρημένη πυκνότητα ρ_{out} (ή την κατάληψη) στην περιοχή στενέματος του δικτύου και την συγκρίνει με την πυκνότητα του σημείου ρύθμισης $\hat{\rho}_{out}$ που καθορίζεται από το χειριστή του συστήματος (που πρέπει να τεθεί ίση με ρ_{cr} για τη μεγιστοποίηση του ρυθμού απόδοσης).



Γράφημα 14: Ελεγκτής ανατροφοδότησης σε διπλό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων.

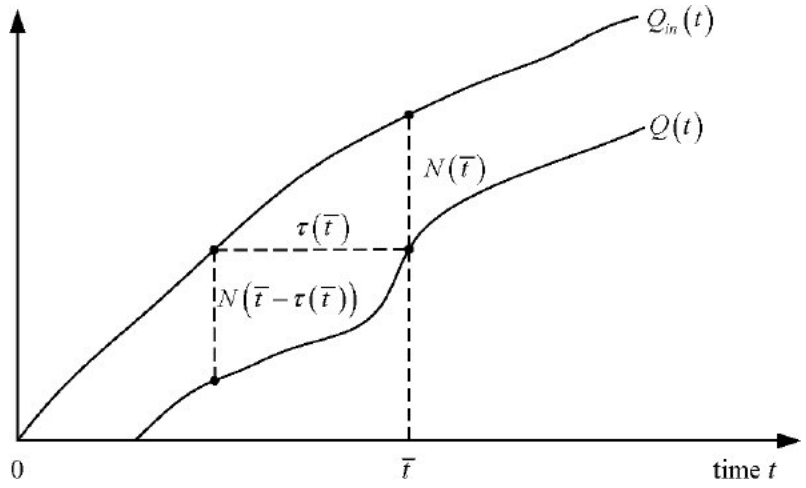
Η επιλογή στο πώς να χωριστεί η επιθυμητή ροή $\hat{q}_c$ σε $\hat{q}_{1,c}$ και σε $\hat{q}_{2,c}$ εξαρτάται από τα κριτήρια που ορίζονται από τους χειριστές κυκλοφορίας. Παραδείγματος χάριν, κάποιος μπορεί να επιλέξει να χωρίσει την επιθυμητή ροή $\hat{q}_c$ σύμφωνα με τον αριθμό λωρίδων κάθε αυτοκινητόδρομου. Σε αυτήν την εργασία επιλέγουμε να χωρίσουμε την επιθυμητή ροή $\hat{q}_c$ κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο χρόνος αναμονής και στους δύο κλάδους να είναι ισορροπημένος.

5.2.1 Χρόνος Ταξιδίου κατά μήκος ενός δρόμου

Εξετάζουμε ένα τμήμα δρόμου (π.χ. διακλάδωση μίας ράμπας εισόδου) χωρίς ενδιάμεσες πηγές ή καταβόθρες οχημάτων. Υποθέτουμε ότι το τμήμα δρόμου είναι άδειο την χρονική στιγμή t=0 και ότι τα οχήματα εξέρχονται και εισέρχονται σύμφωνα με τον κανόνα FIFO (first-in-first-out) ο οποίος ακολουθάται εάν δεν πραγματοποιούνται προσπεράσεις μέσα στο τμήμα αυτό του δρόμου. Έστω q_{in} είναι η ροή εισόδου και q η ροή εξόδου από το εξεταζόμενο κομμάτι δρόμου.Οι αντίστοιχες χρονικά-συσσωρευμένες ροές ορίζονται ως :

$$Q_{in}(t) = \int_0^t q_{in}\mathrm{d}z, Q(t) = \int_0^t q\mathrm{d}z \tag{61}$$

και εμφανίζονται στο Γράφημα 15. Σκεφτείται μία συγκεκριμένη τιμή $t = \tau$. Είναι γνωστό, και μπορεί εύκολα να αποδειχθεί σύμφωνα με την αρχή διατήρησης των οχημάτων,ότι ο κάθετος διαχωρισμός και των δύο καμπυλών χρονικά-συσσωρευμένης ροής σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή t(π.χ. για $t = \tau$ στο Γράφημα 15) είναι ίσο με $N(t)$, δηλαδή με τον αριθμό των οχημάτων που περιλαμβάνονται στο τμήμα αυτό την χρονική στιγμή t. Για να το κατανοήσουμε αυτό, σκεφτείται το πρώτο-πρώτο όχημα που μπήκε στο τμήμα του δρόμου τη χρονική στιγμή t=0. Πότε βγήκε αυτό·λόγω της θεώρησης FIFO,το όχημα αυτό ήταν το πρώτο για έξοδο,δηλαδή ο χρόνος ταξιδίου του είναι ίσος με το χρόνο που πέρασε μέχρι η καμπύλη $Q(t)$ να γίνει μη μηδενική, δηλαδή μέχρι $Q(t) = 1$ veh.Άρα ο οριζόντιος διαχωρισμός και των δύο καμπυλών κατά τον άξονα του χρόνου του Γραφήματος 15 ισούται με το χρόνο ταξιδίου του πρώτου-πρώτου οχήματος. Αλλά το ίδιο ισχύει (εξαιτίας του κανόνα FIFO) ακόμα και για το δεύτερο και για το τρίτο και για όλα τα οχήματα που ακολουθούν από τη στιγμή που ο οριζόντιος διαχωρισμός και των δύο καμπυλών ισούται με το χρόνο ταξιδίου των εξερχόμενων οχημάτων σε οποιαδήποτε στιγμή t.



Γράφημα 15: Χρόνος Ταξιδίου τ προερχόμενος από τις συσσωρευμένες εισροές και εκροές ενός τμήματος αυτοκινητοδρόμου.

Η γνώση των εισροών και εκροών ενός τμήματος δρόμου παρέχει την θεωρητική πιθανότητα να βρούμε και τον αριθμό των αυτοκινήτων $N(t)$ αλλά και του χρόνου ταξιδίου $\tau(t)$. Όμως,αυτή η θεωρητική πιθανότητα έχει δύσκολη και πρακτική συσχέτιση επειδή οι μετρήσεις των εισροών και των εκροών περιέχουν αναπόφευκτα λάθη τα οποία συσσωρεύονται με το πέρασμα του χρόνου μέσω της (61) και ίσως σύντομα οδηγήσουν σε μή αποδεκτές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές των $N(t)$ και $\tau(t)$.

Η ανάλυση που ακολουθεί παράγει την εκτίμηση των χρόνων ταξιδίου βασισμένη στην τωρινή ουρά αναμονής και των παρελθοντικών εισροών ή στην παρελθοντική ουρά αναμονής και τις παρελθοντικές εκροές. Παρά την δυνατότητα εφαρμογής αυτής της μεθόδου στην πράξη, θα χρησιμοποιήσουμε μια άλλη μέθοδο που εξηγείται μετέπειτα και χρησιμοποιεί την βασισμένη στις λωρίδες διανομή της κυκλοφορίας για την ανάπτυξη ενός μοντέλου ελέγχου με σκοπό τον σχεδιασμό ενός ελεγκτή ισοστάθμισης των χρόνων καθυστέρησης.

Βασισμένες στο Γράφημα 15, οι ακόθουθες εξισώσεις,οι οποίες είναι χρήσιμες για κάθε στιγμή t,μπορούν αμέσως

να παραχθούν

$$N(t) = Q_{in}(t) - Q(t) = Q_{in}(t) - Q_{in}(t-\tau(t)) = \int_{t-\tau(t)}^{t} q_{in}(z)\mathrm{d}z \tag{62}$$

$$N(t-\tau(t)) = Q_{in}(t-\tau(t)) - Q(t-\tau(t)) = Q(t) - Q(t-\tau(t)) = \int_{t-\tau(t)}^{t} q(z)\mathrm{d}z \tag{63}$$

Η εξίσωση (62) παρέχει την πιθανότητα υπολογισμού των χρόνων αναμονής ταξιδίου $\tau(t)$ των οχημάτων που τη στιγμή εκείνη εξέρχονται εάν η ουρά $N(t)$ εκείνη τη στιγμή και οι προηγούμενες τιμές των εισροών $q_{in}(t)$, $t-\tau(t) \leq z \leq t$ είναι γνωστά,ενώ η εξίσωση (63) χρησιμοποιεί τον υπολογισμό του ίδιου χρόνου ταξιδίου $\tau(t)$ βασισμένο στη γνώση της προηγούμενης ουράς $N(t-\tau(t))$ και των προηγούμενων εκροών $q(z)$, $t-\tau(t) \leq z \leq t$.

Όταν εισάγεται μια μικρή μεταβολή χρόνου δt εισάγεται στην (66) τότε:

$$N(t+\Delta t) = \int_{t+\Delta t-\tau(t+\Delta t)}^{t+\Delta t} q_{in}(z)dz \tag{64}$$

και έτσι,δεδομένου ότι $\Delta N(t) = N(t+\Delta t) - N(t)$,έχουμε

$$\Delta N(t) = \int_{t}^{t+\Delta t} q_{in}(z)dz - \int_{t-\tau(t)}^{t+\Delta t-\tau(t+\Delta t)} q_{in}(z)dz \tag{65}$$

και για $\Delta t \to dt$ και $\Delta\tau(t) = \tau(t+\Delta t) - \tau(t) \to d\tau(t)$

$$\mathrm{d}N(t) = q_{in}dt - q_{in}(t-\tau(t))(dt - d\tau(t)) \Leftrightarrow \dot{N}(t) = q_{in}(t) - q_{in}(t-\tau(t))(1-\dot{\tau}(t)) \tag{66}$$

και αντικαθιστώντας την εξίσωση διατήρησης $\dot{N}(t) = q_{in}(t) - q(t)$ ως εκ τούτου έχουμε

$$\dot{\tau}(t) = -\frac{q(t)}{q_{in}(t-\tau(t))} \tag{67}$$

Αυτή η εξίσωση περιγράφει το χρόνο ταξιδίου $\tau(t)$ στην εξέλιξη του χρόνου σε εξάρτηση με την τρέχουσα εκροή $q(t)$ και μια περασμένη τιμή εισροής $q_{in}(t-\tau(t))$.

5.2.2 Υπολογισμός των χρόνων καθυστέρησης

Ο χρόνος καθυστέρησης υπολογίζεται για τα προκαθορισμένα κομμάτια του δικτύου αυτοκινητόδρομων. Η δομή του METANET υιοθετείται εδώ, επομένως ένα κομμάτι του δικτύου διαμορφώνεται από τους συνδέσμους, και οι σύνδεσμοι διαιρούνται σε τμήματα (βλ. Κεφάλαιο 3). Υποτίθεται ότι κάθε τμήμα έχει έναν ανιχνευτή που μετρά τη μέση ταχύτητα και η ταχύτητα είναι ομοιογενής κατά μήκος του τμήματος. Το μήκος και η ταχύτητα ελεύθερης ροής κάθε τμήματος και το χρονικό διάστημα προσομοίωσης είναι γνωστά. Για κάθε κομμάτι του δικτύου δημιουργείται ένας πίνακας που αποθηκεύει τις μέσες τιμές ταχύτητας . Ο πίνακας έχει τόσες στήλες όσος ο αριθμός τμημάτων (ανιχνευτών) στο κομμάτι αυτό και τέτοιο αριθμό σειρών που αντιστοιχούν σε έναν προ-διευκρινισμένο αριθμό χρονικών περιόδων προσομοίωσης που αποθηκεύονται. Ο αριθμός σειρών και στηλών παραμένουν σταθεροί κατά τη διάρκεια ολόκληρης της προσομοίωσης. Σε κάθε βήμα προσομοίωσης η πρώτη σειρά με τις παλαιότερες τιμές της μέσης ταχύτητας κάθε τμήματος διαγράφεται και μια νέα σειρά με τις νέες μέσες τιμές ταχύτητας προστίθεται στο τέλος του πίνακα. Σε κάθε περίοδο ελέγχου υπολογίζεται ο χρόνος καθυστέρησης που βιώνει το όχημα που είναι έτοιμο να αφήσει το κομμάτι αυτό του δικτύου. Ξεκινώντας από την πιό πρόσφατη μέση ταχύτητα του πιό κατάντη τμήματος του κομματιού αυτού, ο πίνακας διαβαίνει στην προς τα ανάντη κατεύθυνση και προς τα πίσω στο χρόνο έως ότου φτάσει στην αρχή του κομματιού. Για κάθε τμήμα υπολογίζεται ο χρόνος ταξιδιού έως ότου φτάσουμε στο πιο ανάντη τμήμα. Ο αλγόριθμος στο δείχνει πώς υπολογίζεται ο χρόνος ταξιδιού. Οι λεπτομέρειες για τη λήξη του αλγορίθμου και οι εξαιρέσεις παραλείπονται χάριν της απλότητας.

Το παράδειγμα στο παράρτημα επεξηγεί πώς χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος. Σημειώστε ότι σε αυτό το παράδειγμα ο αριθμός βημάτων προσομοίωσης που αποθηκεύονται δεν είναι επαρκής για να φθάσει στο πιό ανάντη κομμάτι του δικτύου υπό τις τρέχουσες καταστάσεις της κυκλοφορίας.

Μετά από τον υπολογισμό του χρόνου ταξιδιού, η ταχύτητα ελεύθερης ροής κάθε τμήματος αφαιρείται από την τελική τιμή για να λάβει τον χρόνο καθυστέρησης που βιώνει το όχημα που είναι έτοιμο να αφήσει το δίκτυο.

5.2.3 Ισοστάθμιση των χρόνων καθυστερήσεων

Προκειμένου να ισοσταθμίσουμε τους χρόνους καθυστερήσεων και στα δύο τμήματα του αυτοκινητοδρόμου με περισσότερη ακρίβεια,ο υπολογισμός των ροών $\hat{q}_{i,c}(k)$ κάθε τμήματος i μπορεί να βασισθεί σε πιο ακριβείς προηγούμενες πληροφορίες και σε έναν PI-τύπου ρυθμιστή.

Έστω ότι $DT_i(k)$ είναι ο χρόνος καθυστέρησης (ως ένας ακέραιος αριθμός βημάτων ελέγχου) των πρώτων οδηγών που σταμάτησαν μπροστά από τους φωτεινούς σηματοδότες του τμήματος i·τότε μέσω μίας διακριτού-χρόνου εκδοχής της (62) προτείνεται ότι η ακόλουθη ανισότητα πρέπει να είναι σωστή

$$\hat{N}(k) - T \sum_{\kappa=k-\hat{DT}_i(k)}^{k-1} q_{i,c}(\kappa) \leq 0, i = 1, 2 \tag{68}$$

όπου μια εκτίμηση του μήκους της ουράς καθυστέρησης χρησιμοποιείται. Μία εκτίμηση του χρόνου καθυστέρησης $\hat{DT}_i$(όπου $\hat{DT}_i$ είναι ένας ακέραιος από τη στιγμή που ο χρόνος καθυστέρησης μετριέται ανά T περιόδους) είναι ο μικρότερος αριθμός βημάτων ελέγχου για τον οποίο η παραπάνω ανισότητα είναι αληθής. Προκειμένου να καθορίσουμε αυτόν τον αριθμό,η ανισότητα μπορεί να ελεγχθεί για $\hat{DT}_i(k) = 1, 2, ...$ (χρησιμοποιώντας περασμένες μετρήσεις εισροών $q_{i,c}(\kappa), \kappa = k-1, k-2$) μέχρι τον πρώτο ακέραιο που την επαληθεύει.

Καθορίζοντας τη διαφορά των χρόνων καθυστέρησης στα δύο τμήματα του αυτοκινητοδρόμου $\Delta\hat{DT}(k) = T[\hat{DT}_1(k) - \hat{DT}_2(k)]$ το έργο του ελεγκτή των ποσοστών διαχωρισμού της ροής είναι να προσδιορίσει κατάλληλες τιμές για τις εκροές $\hat{q}_{1,c}(k), \hat{q}_{2,c}(k)$ έτσι ώστε η διαφορά των χρόνων καθυστέρησης να κρατηθεί γύρω από το μηδέν. Βασιζόμενοι στην εξίσωση (67) έχουμε:

$$\Delta\dot{DT}(t) = \dot{DT}_1(k) - \dot{DT}_2(k) = \frac{\hat{q}_{2,c}(k)}{q_{2,c}(t - DT_2(t))} - \frac{\hat{q}_{1,c}(k)}{q_{1,c}(t - DT_1(t))} \tag{69}$$

και αντικαθιστώντας $\hat{q}_{2,c} = \hat{q}_c - \hat{q}_{1,c}$ οδηγούμαστε στην παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta\dot{DT}(t) = A(t) - B(t)\hat{q}_{1,c}(t) \tag{70}$$

όπου

$$A(t) = \hat{q}_c(t)/q_{2,c}(t - DT_2(t)), \tag{71}$$

και

$$B(t) = [q_{1,c}(t - DT_1(t)) + q_{2,c}(t - DT_2(t))]/[q_{1,c}(t - DT_1(t))q_{2,c}(t - DT_2(t))] \tag{72}$$

μπορούν να θεωρηθούν παράμετροι μεταβλητού χρόνου. Η εξίσωση (70) υποδεικνύει ότι η διαφορά του χρόνου ταξιδίου ΔDT εξελίσσεται στο χρόνο ως μία γραμμική ολοκλήρωση μεταβλητού χρόνου εξαρτώμενη από την εκροή q_1 του τμήματος-1. Έτσι,ο ακόλουθος PI-τύπου ρυθμιστής είναι κατάλληλος για τον υπολογισμό της ροής $\hat{q}_{1,c}(k)$ έτσι ώστε να εξισωθούν οι χρόνοι ταξιδίου και στα δύο τμήματα του δρόμου, δηλαδή με σημείο ρύθμισης το $\Delta\tilde{DT} = 0$

$$\hat{q}'_{1,c}(k) = \hat{q}'_{1,c}(k-1) + (\bar{K}_P + \bar{K}_I)(\Delta DT(k)) - \bar{K}_P(\Delta DT(k-1)) \tag{73}$$

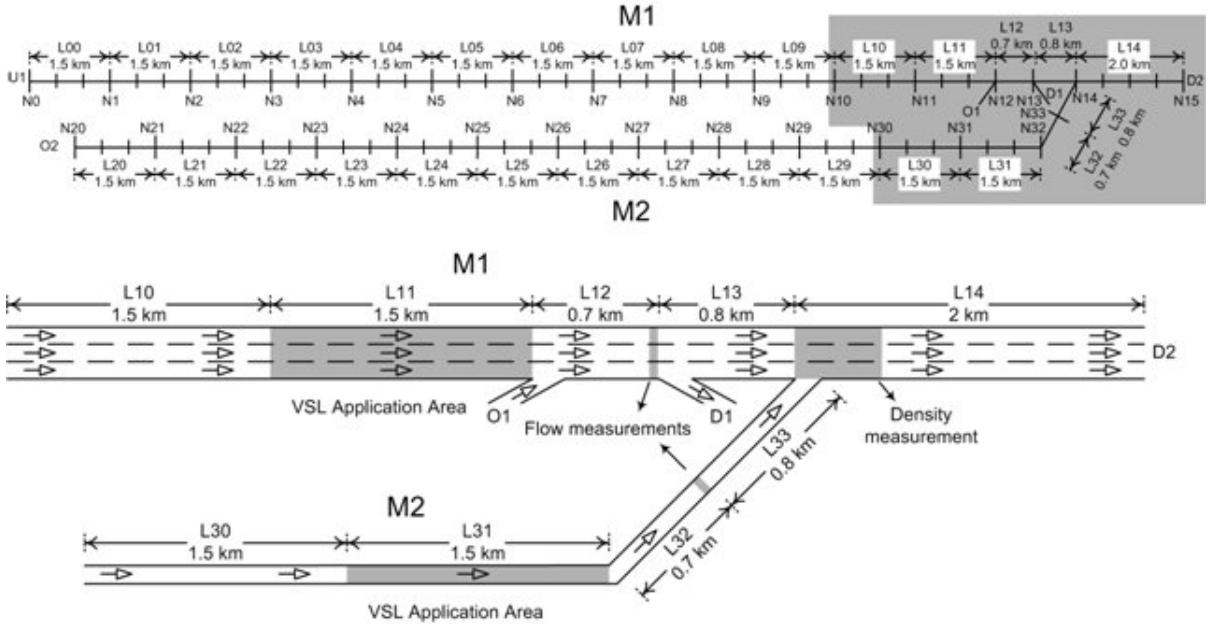
$$\hat{q}_{1,c}(k) = \hat{q}_c \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \hat{q}'_{1,c} \tag{74}$$

όπου $K_P = 3600\cdot$ veh/s^2 είναι ο αναλογικός συντελεστής κέρδους (gain factor) και $K_I = 14400\cdot$ veh/s^2 είναι ο ολοκληρωτικός συντελεστής κέρδους της PI- στρατηγικής ελέγχου ανατροφοδότησης. Σημειώνουμε ότι ο PI-ρυθμιστής χρησιμοποιεί την βασισμένη στις λωρίδες διανομή της κυκλοφορίας ως ονομαστική τιμή της εκροής η οποία αναμένεται να οδηγήσει σε μικρότερες διακυμάνσεις του $\Delta\hat{DT}$ γύρω από το μηδέν.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

6.1 Μοντέλο χρησιμοποιούμενου δικτύου

Το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι να περιγράψει το υπό έλεγχο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων. Μία αναπαράσταση του εν λόγω δικτύου παρουσιάζεται στο Γράφημα 16.



Γράφημα 16: Τοπολογία του εξεταζόμενου δικτύου.

Το δίκτυο αποτελείται από δύο αυτοκινητοδρόμους,τον M1 και τον M2,με μήκος 21 χλμ. και 19,5 χλμ. αντίστοιχα,οι οποίοι συγχωνεύονται στο χιλιόμετρο 19,5 και οι δύο. Ο αυτοκινητόδρομος M1 χωρίζεται σε συνολικά 14 συνδέσμους αυτοκινητοδρόμου ($L00 - L13$),ο καθένας με τρεις λωρίδες. Ενάμιση χιλιόμετρο πριν την συγχώνευση με τον αυτοκινητόδρομο M2,ο αυτοκινητόδρομος M1 έχει μια ράμπα εισόδου ($O1$) ακολουθούμενη από μια ράμπα εξόδου 700 μέτρα κατάντη της ροής. Ο αυτοκινητόδρομος M2 χωρίζεται και αυτός σε 14 συνδέσμους αυτοκινητοδρόμου ($L20 - L33$) οι οποίοι έχουν μία λωρίδα όλοι τους και δεν υπάρχουν ράμπες εισόδου ή εξόδου. Ο σύνδεσμος αμέσως πριν τον οποίο συγχωνεύονται οι δύο αυτοκινητόδρομοι,δηλαδή ο $L14$, έχει 2 χιλιόμετρα μήκος και έχει 3 λωρίδες. Η περιοχή στην οποία σχηματίζεται κυκλοφοριακή συμφόρηση και εφαρμόζεται Έλεγχος Ροής της Κυκλοφορίας Αυτοκινητοδρόμων (MTFC) απεικονίζεται μεγενθυμένη στο κάτω μέρος του Γραφήματος 16. Στο ίδιο μέρος του σχήματος υποδεικνύονται οι περιοχές εφαρμογής των VSL, όπως και οι περιοχές μέτρησης της ροής και της πυκνότητας της κυκλοφορίας. Τα ζεύγη συνδέσμων αυτοκινητοδρόμου L12- L13 και L32-L33 είναι οι περιοχές επιτάχυνσης των αυτοκινητοδρόμων M1 και M2 αντίστοιχα.

Παρακάτω παρατίθονται πίνακες με τον αριθμό των λωρίδων και των τμημάτων κάθε συνδέσμου του αυτοκινητοδρόμου M1 και M2 αντίστοιχα:

Πίνακας 6.1

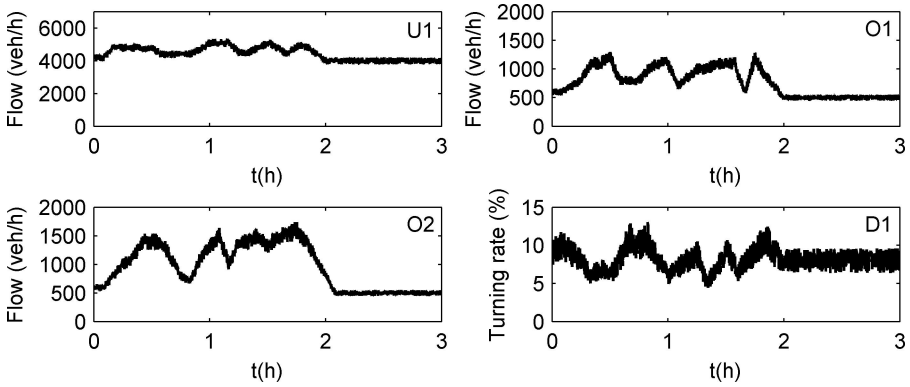
Σύνδεσμος	Λωρίδες	Αριθμός τμημάτων
L00	3	3
L01	3	3
L02	3	3
L03	3	3
L04	3	3
L05	3	3
L06	3	3
L07	3	3
L08	3	3
L09	3	3
L10	3	3
L11	3	3
L12	3	1
L13	3	1
L14	3	4

Πίνακας 6.2

Σύνδεσμος	Λωρίδες	Αριθμός τμημάτων
L20	1	3
L21	1	3
L22	1	3
L23	1	3
L24	1	3
L25	1	3
L26	1	3
L27	1	3
L28	1	3
L29	1	3
L30	1	3
L31	1	3
L32	1	1
L33	1	1

Η ελεύθερη ταχύτητα σε όλους τους παραπάνω συνδέσμους είναι 115km/h και η ικανότητα κάθε λωρίδας είναι 2036 veh/lane.

Τα προφίλ της ζήτησης τα οποία απεικονίζονται στο Γράφημα 17 χρησιμοποιούνται για τις εισόδους στο σύστημα (U1 και O2) και για την ράμπα εισόδου (O1) και εκτείνονται επί 3-ωρών ορίζοντα προσομοίωσης. Το ποσοστό εξόδου της ροής που εξέρχεται από τον αυτοκινητόδρομο μέσω της ράμπας εξόδου D1,αναπαριστάται επίσης στο Γράφημα 17. Η τελευταία ώρα της περιόδου προσομοίωσης αναπαριστά μία περίοδο χαμηλής κυκλοφορίας με μειωμένες ροές στις εισόδους του δικτύου και σταθερές ροές στις εξόδους,με αποτέλεσμα να πάρουμε συκρίσιμες τιμές στο κριτήριο απόδοσης Συνολικού Δαπανώμενου Χρόνου (TTS) για όλα τα διερευνούμενα σενάρια.



Γράφημα 17: Προφίλ ζήτησης και ποσοστά εξόδου.

Προκειμένου να προχωρήσουμε με τις προσομοιώσεις πρέπει να καθοριστούν κάποιοι παράμετροι του μοντέλου. Έτσι,το χρονικό βήμα του μοντέλου είναι $T = 10s$,ενώ το χρονικό βήμα ελέγχου είναι $T_c = 60$ s. Η κατώτερη επιτρεπόμενη τιμή VSL είναι $b_{min,m} = 0,2$. Οι παράμετροι μοντελοποίησης πάρθηκαν από [3]. Οι χρόνοι καθυστέρησης υπολογίζονται (όπως έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 5) για το συγκεκριμένο δίκτυο από τον σύνδεσμο αυτοκινητοδρόμου L01 έως τον L11 στον M1 και από τον L21 έως τον L31 στον αυτοκινητόδρομο M2.

6.2 Κυκλοφοριακά Σενάρια

Προκειμένου να εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα του ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής σε μεγάλης έκτασης δίκτυο αυτοκινητοδρόμων μέσω της εφαρμογής μεταβλητών ορίων ταχυτήτων,έγινε εφαρμογή του ελέγχου αυτού στους αυτοκινητοδρόμους M1 και M2 . Τα κυκλοφοριακά σενάρια αφορούν την εφαρμογή ή όχι και σε ποιούς αυτοκινητοδρόμους, των μεταβλητών ορίων ταχυτήτων και μέσω ποιας στρατηγικής ελέγχου,κάθε ένα σενάριο για χρονικό ορίζοντα 3 ωρών. Το εργαλείο προσομοίωσης METANET χρησιμοποιείται για την περίπτωση του μη-ελέγχου(no-control) και του ελέγχου ανατροφοδότησης (feedback control),ενώ το εργαλείο προσομοίωσης AMOC χρησιμοποιείται για την περίπτωση εφαρμογής βέλτιστου ελέγχου. Αρχικά το δίκτυο προσομοιώνεται για την περίπτωση του μη-ελέγχου. Έπειτα,το δίκτυο προσομοιώνεται για την περίπτωση του βέλτιστου ελέγ-χου, με την εφαρμογή ελέγχου στους αυτοκινητόδρομους M1 και M2 ξεχωριστά κάθε φορά και με την εφαρμογή ελέγχου και στους δύο αυτοκινητοδρόμους M1 και M2 έπειτα,με την ίδια διαδικασία να επαναλαμβάνεται για την περίπτωση του ελέγχου ανατροφοδότησης. Τα κυκλοφοριακά σενάρια συνοψίζονται παρακάτω:

- Περίπτωση μη εφαρμογής ελέγχου (No control).
- Εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου μόνο στον M1 αυτοκινητόδρομο (AMOC M1).
- Εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου μόνο στον M2 αυτοκινητόδρομο (AMOC M2).
- Εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου στους αυτοκινητοδρόμους M1 και M2 (AMOC M1 και M2).
- Εφαρμογή ελέγχου ανατροφοδότησης μόνο στον M1 αυτοκινητόδρομο (Feedback M1).
- Εφαρμογή ελέγχου ανατροφοδότησης μόνο στον M2 αυτοκινητόδρομο (Feedback M2).
- Εφαρμογή ελέγχου ανατροφοδότησης στους αυτοκινητοδρόμους M1 και M2 (Feedback M1 και M2).

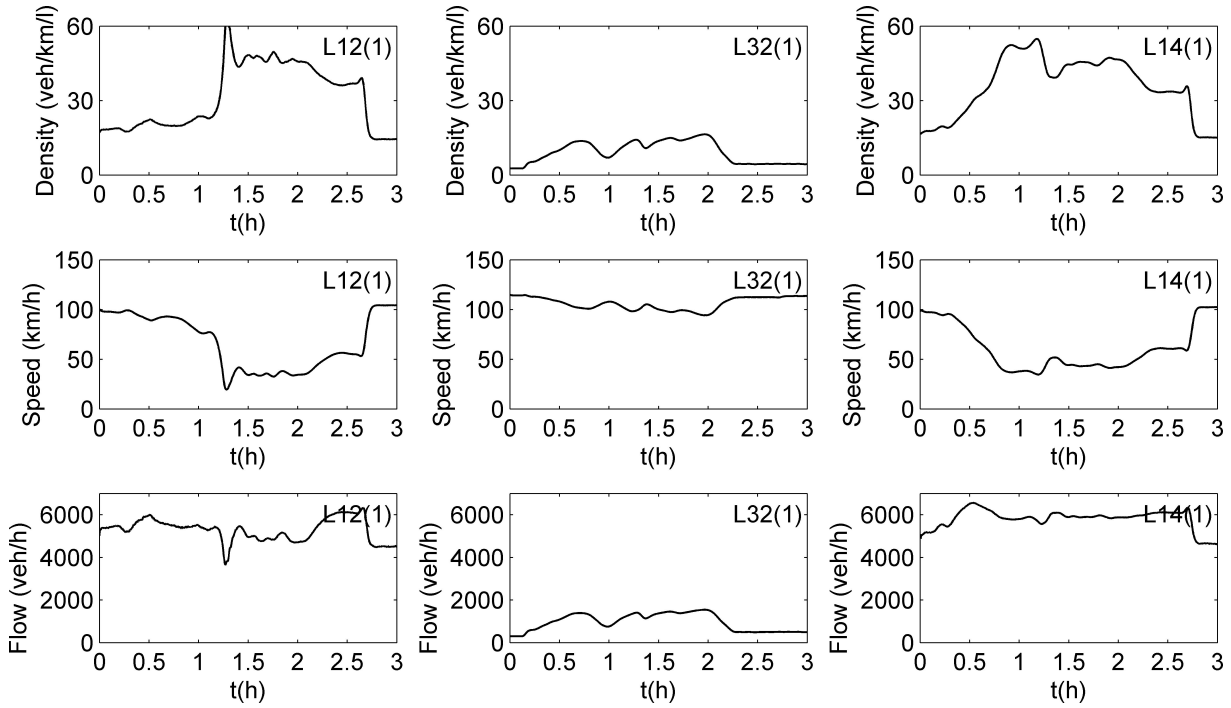
Οι αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου TTS συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.3

Σενάριο	TTS	%
No Control	4501	-
AMOC M1	3823	-15.1
AMOC M2	4025	-10.6
AMOC M1 και M2	3823	-15.1
Feedback Control M1	3846	-14.6
Feedback Control M2	3957	-12.1
Feedback Control M1 και M2	3881	-13.8

6.2.1 No control

Τα προφίλ της πυκνότητας,της ταχύτητας και της ροής επιλεγμένων τοποθεσιών (τμημάτων) του δικτύου όταν δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος εμφανίζονται στο Γράφημα 18. L12(1) είναι το πρώτο τμήμα του συνδέσμου L12 του αυτοκινητοδρόμου M1,του οποίου τμήματος μετριέται η τιμή της ροής για τον δευτερεύοντα ελεγκτή 1 στο Γράφημα 14. Παρομοίως,L32(1) είναι το πρώτο τμήμα του συνδέσμου L32 του αυτοκινητοδρόμου M2,του οποίου τμήματος μετριέται η τιμή της ροής για τον δευτερεύων ελεγκτή 2 στο Γράφημα 14. Η μέτρηση της πυκνότητας για τον πρωταρχικό ελεγκτή γίνεται στην συγχώνευση των δύο αυτοκινητοδρόμων,δηλαδή στο τμήμα L14(1).

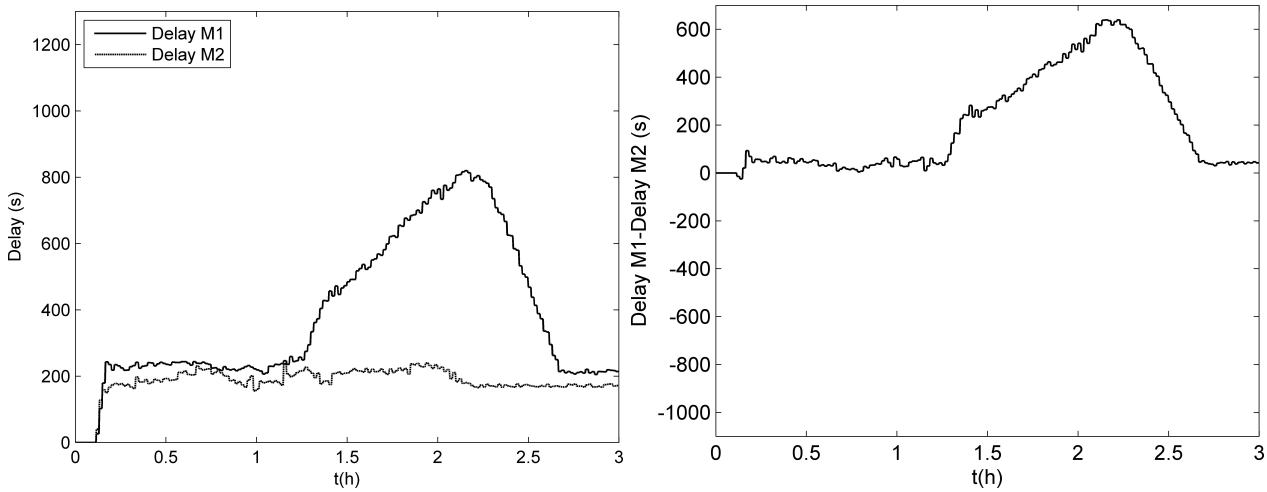


Γράφημα 18: Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, No control.

Η τιμή της ροής των οχημάτων στην περιοχή συγχώνευσης (L14(1)) φαίνεται να φτάνει την ονομαστική τιμή της ικανότητας του τμήματος αυτού του συνδέσμου την ώρα $t = 0.5$h,αλλά,παρά την απότομη μείωση της ροής στους συνδέσμους προέλευσης O1 και O2 και την αύξηση των ποσοστών εξόδου στον σύνδεσμο προορισμού D ο οποίος ακολουθεί,εμφανίζεται κυκλοφοριακή συμφόρηση στις $t = 0.6$h και διαρκεί για τις επόμενες δύο ώρες. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μία εμφανή μείωση της ροής στην περιοχή συγχώνευσης (capacity-drop). Η κυκλοφοριακή συμφόρηση που δημιουργείται (ωστικό-κύμα) ταξιδεύει προς ανάντη του M1 και φτάνει στο τμήμα L12(1) γύρω στις $t = 1.2$h, δημιουργώντας και εκεί εμφανείς μειώσεις της ταχύτητας και της ροής. Η ζήτηση στον αυτοκινητόδρομο M2 είναι κατά πολύ χαμηλότερη από ότι στον M1 και η κυκλοφοριακή συμφόρηση που δημιουργείται δεν

εξαπλώνεται προς τα πίσω. Παρατηρούμε επίσης ότι παρά την πολύ χαμηλή ζήτηση που εισέρχεται στο δίκτυο από τον αυτοκινητόδρομο M2 μετά από $t = 2.0$h (βλ. Γράφημα 17), η κυκλοφοριακή συμφόρηση στον σύνδεσμο L14 απορροφάται μετά από περίπου 15 λεπτά. Η προκύπτουσα τιμή TTS είναι ίση με 4501 οχηματοώρες(veh·h).

Το Γράφημα ;; αναπαριστά τους χρόνους καθυστέρησης (delay times) που εμφανίζονται και στους δύο αυτοκινητοδρόμους. Μετά από $t = 0.2$h,όταν και ο υπολογισμός του χρόνου καθυστέρησης περιέχει αρκετές πληροφορίες ώστε να αρχίσει να υπολογίζει τους χρόνους καθυστέρησης, φαίνεται ότι το Delay M2 (χρόνος καθυστέρησης στον M2) παραμένει γύρω στα 200s για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης. Απ΄ την άλλη πλευρά, τα οχήματα στον αυτοκινητόδρομο M1 φαίνεται να βιώνουν μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης αφότου η κυκλοφοριακή συμφόρηση εξαπλώνεται ανάντη του τμήματος L12(1), περίπου στις $t = 1.3$h.



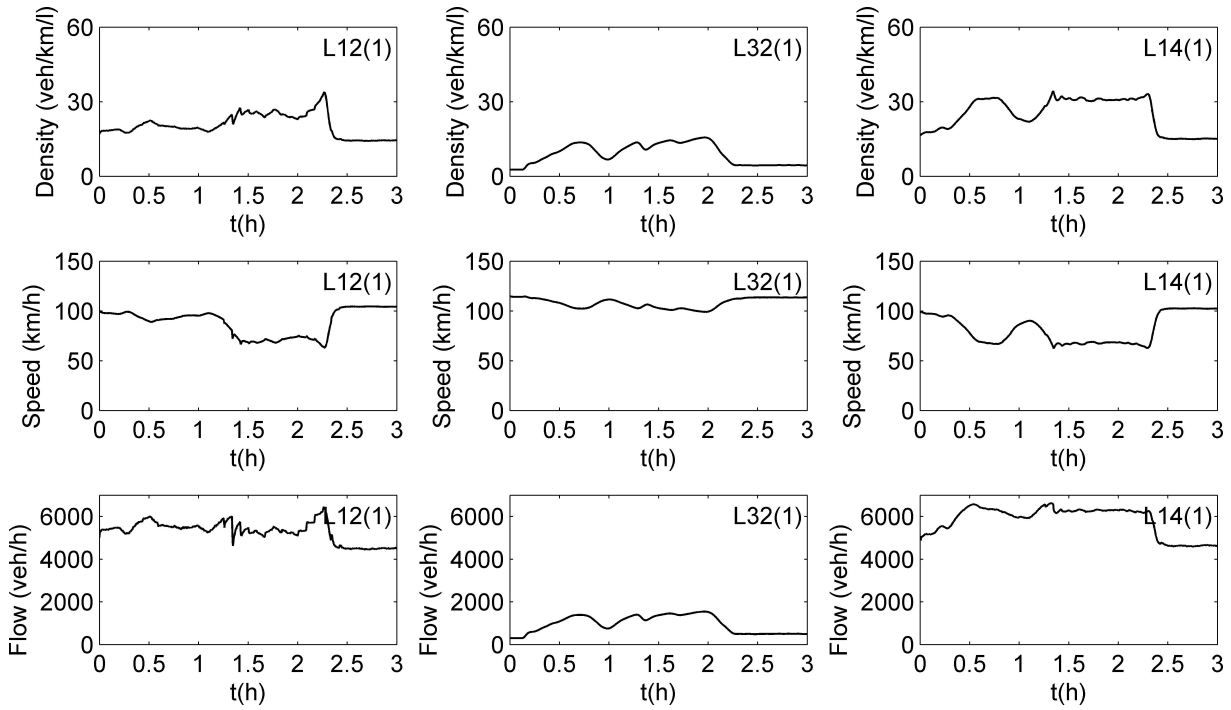
Γράφημα 19: (α) Χρόνοι καθυστέρησης, No control, (β) Διαφορές χρόνων καθυστερήσεων ,No control

6.2.2 AMOC M1

Για την εφαρμογή Ελέγχου της Ροής Κυκλοφορίας Αυτοκινητοδρόμων (MTFC) μέσω της εφαρμογής VSL χρησιμοποιώντας βέλτιστο έλεγχο λαμβάνουμε πρώτα υπ΄ όψην μας ότι MTFC θα εφαρμοσθεί μόνο στον αυτοκινητόδρομο M1. Η υποφαινόμενη περιοχή της κυρίως ροής που λαμβάνεται υπ΄ όψην χωρίζεται σε τρία συμπλέγματα συνδέσμων. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τον L11,η δεύτερη από τους συνδέσμους L12 και L13,και η τρίτη ομάδα αποτελείται από τον σύνδεσμο στον οποίο συγχωνεύονται οι δύο αυτοκινητόδρομοι,δηλαδή τον L14.Σε όλους τους υπόλοιπους συνδέσμους,είτε από τον M1 είτε από τον M2,δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος.

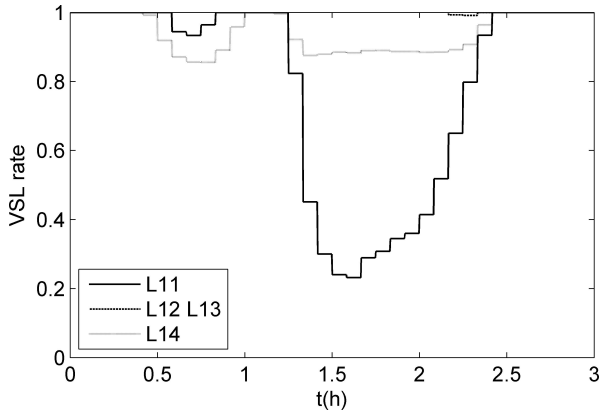
Η προκύπτουσα τιμή TTS για αυτό το σενάριο είναι 3823 veh·h,η οποία είναι 15.1% βελτιωμένη σε σύγκριση με την τιμή TTS της περίπτωσης μη εφαρμογής ελέγχου (No control). Τα προφίλ της πυκνότητας,της ταχύτητας και της ροής για τα επιλεγμένα τμήματα συνδέσμων παρουσιάζονται στο Γράφημα 20,ενώ τα ποσοστά των VSL παρουσιάζονται στο Γράφημα 21.

Η κατάσταση στο δίκτυο είναι ολόιδια με την περίπτωση No control μέχρι την στιγμή $t = 0.5$h,όταν και VSL ενεργοποιούνται στον L14, έτσι ώστε να αυξηθεί η κρίσιμη πυκνότητα,και μερικά λεπτά αργότερα στον L11 για την παρωδική μείωση της ροής που φτάνει στο στένεμα του δικτύου. Παρατηρούμε ότι αυτή η μικρής διάρκειας και μεγέθους δράση των VSL είναι ικανή ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία κυκλοφοριακής συμφόρησης και να μην εφαρμοσθούν VSL για τα επόμενα 30 περίπου λεπτά,κατά τη διάρκεια της περιόδου που υπάρχει έλλειψη ζήτησης. Ξαναθυμίζουμε ότι στην περίπτωση No control η πρώτη περίοδος αυξημένης ζήτησης δημιουργεί κυκλοφοριακή συμφόρηση που διαρκεί για τις επόμενες δύο ώρες από την εμφάνισή της παρά την μείωση στη ζήτηση μετέπειτα. Μια δεύτερη περίοδος δράσης των VSL αρχίζει λίγο πριν την στιγμή $t = 1.3$h, δυνατότερη και μεγαλύτερης διάρκειας αυτή τη φορά,οδηγώντας σε ποσοστά VSL χαμηλότερα από 0.3. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση στο στένεμα του δικτύου και πάλι αποφεύγεται και η τιμή της εκροής διατηρείται κοντά στην τιμή της ικανότητας (Γράφημα 20).



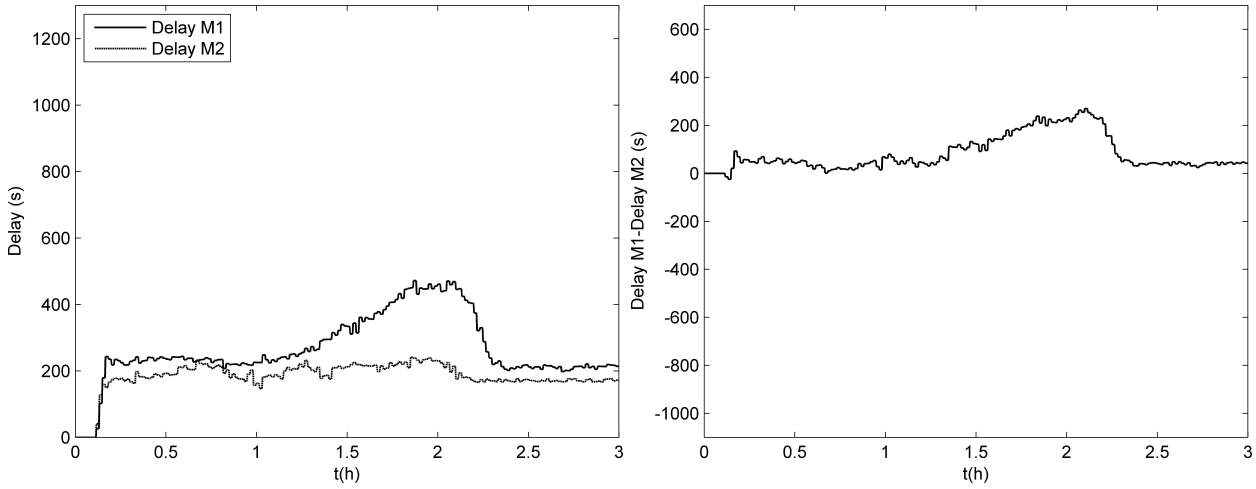
Γράφημα 20: Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, AMOC M1.

Το Γράφημα 22(α) απεικονίζει τους χρόνους καθυστέρησης και στους δύο αυτοκινητοδρόμους στα επιλεγμένα κομμάτια του δικτύου. Μετά από τη στιγμή $t = 0.2$h, όταν και ο αλγόριθμος υπολογισμού των χρόνων καθυστέρησης έχει αρκετές πληροφορίες για να αρχίσει να υπολογίζει τους χρόνους καθυστέρησης, βλέπουμε ότι ο Delay M2(χρόνος καθυστέρησης στον M2) μένει γύρω στα 200s για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης,όπως



Γράφημα 21: Ποσοστά VSL, AMOC M1.

και στην περίπτωση No control. Από την άλλη πλευρά τα οχήματα του αυτοκινητοδρόμου M1 φαίνεται να βιώνουν μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης αφότου ξεκινήσει η δεύτερη δραστηριοποίηση ελέγχου την χρονική περίπου στιγμή $t = 1.3$h. Εξαιτίας της αποφυγής της δημιουργίας κυκλοφοριακής συμφόρησης οι χρόνοι καθυστέρησης στον M1 είναι κατά πολύ λιγότεροι απ΄ ότι στην περίπτωση μη εφαρμογής ελέγχου. Υπάρχει ακόμα μεγάλη διαφορά ανάμεσα στους χρόνους καθυστέρησης και οι οδηγοί στον M1 πρέπει να περιμένουν 300s περισσότερο στην ελεγχόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση σε σχέση με τους οδηγούς στον M2 (βλέπε Γράφημα 22(β)).



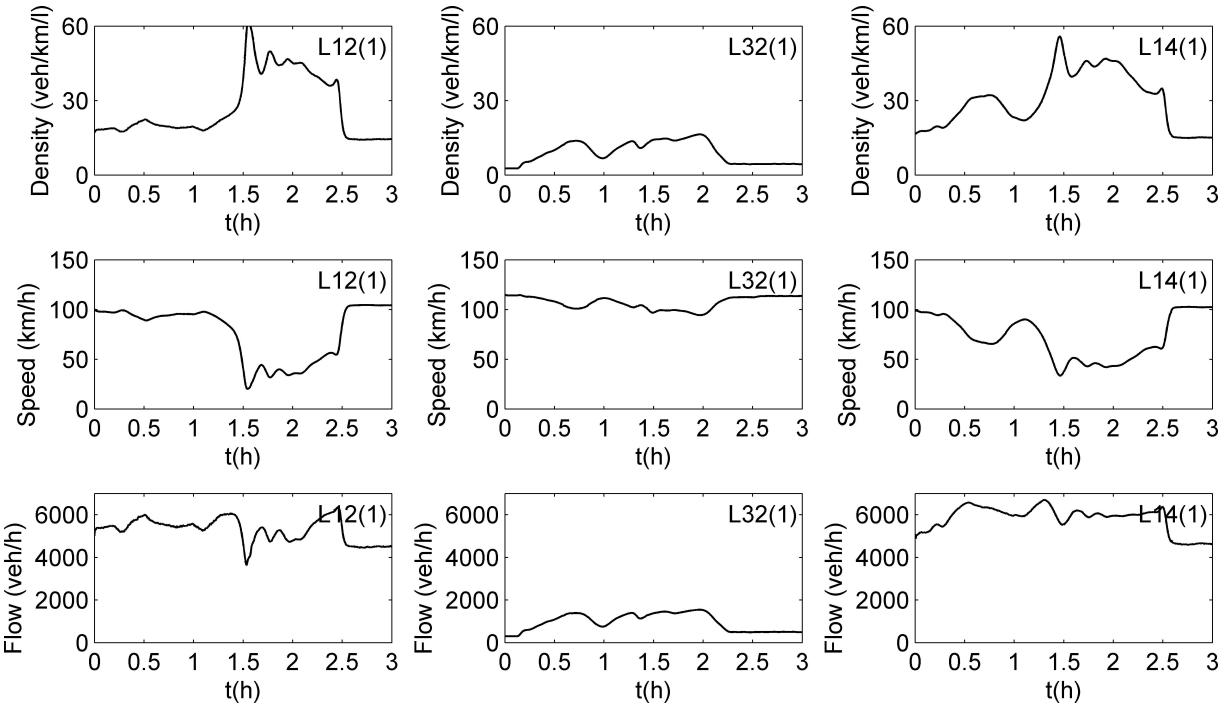
Γράφημα 22: (α) Χρόνοι καθυστέρησης, AMOC M1, (β) Διαφορές χρόνων καθυστερήσεων ,AMOC M1

6.2.3 AMOC M2

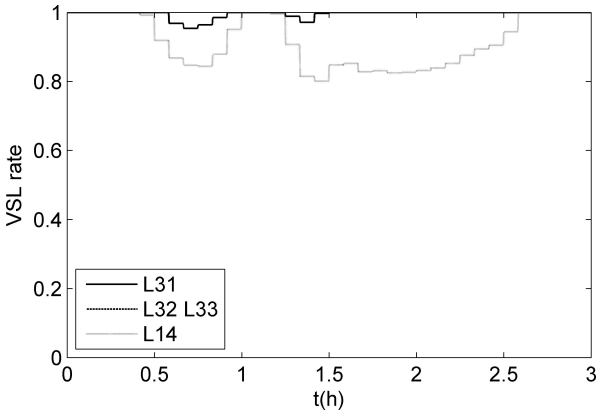
Αυτή τη φορά εφαρμόζεται βέλτιστος έλεγχος μόνο στον αυτοκινητόδρομο M2. Η υποφαινόμενη περιοχή στο Γράφημα 16 χωρίζεται ξανά σε τρία συμπλέγματα συνδέσμων. Το πρώτο σύμπλεγμα αποτελείται από τον σύνδεσμο L31,το δεύτερο από τους συνδέσμους L32 και L33,και το τρίτο αποτελείται από τον σύνδεσμο συγχώνευσης L34. Σε όλους τους υπόλοιπους συνδέσμους είτε του M1 είτε του M2 δεν εφαρμόζεται έλεγχος.

Η προκύπτουσα τιμή TTS για αυτό το σενάριο είναι 4025 veh·h,η οποία είναι 10.6% βελτιωμένη σε σύγκριση με την τιμή TTS της περίπτωσης μη εφαρμογής ελέγχου(no control). Τα προφίλ της πυκνότητας,της ταχύτητας και της ροής για τα επιλεγμένα τμήματα συνδέσμων παρουσιάζονται στο Γράφημα 23, ενώ τα ποσοστά των VSL παρουσιάζονται στο Γράφημα 24.

Σε αυτό το σενάριο η κυκλοφοριακή κατάσταση είναι παρόμοια με αυτή του σεναρίου AMOC M1 μέχρι περίπου την στιγμή $t = 1.2$ veh·h, με την διαφορά να βρίσκεται στο ότι τα VSL ενεργοποιούνται (Γράφημα 24) στους συνδέσμους L31 και L14 αυτή τη φορά,απφεύγοντας έτσι την δημιουργία-ξεκίνημα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Μια δεύτερη περίοδος δραστηριοποίησης και ελέγχου ξεκινά την στιγμή $t = 1.3$h αλλά,σε σύγκριση με το προηγούμενο σενάριο, είναι περιορισμένη σε υψηλά ποσοστά VSL κυρίως στον σύνδεσμο L14. Έτσι,η κυκλοφοριακή συμφόρηση δεν αποφεύγεται και μια μείωση της ροής παρατηρείται λίγο πριν την στιγμή $t = 1.5$h. Η αιτία για αυτό το γεγονός είναι ότι ακόμα και εάν το ποσοστό VSL ήταν τόσο χαμηλό όσο ίσο με 0,2 στον L31, δεν θα κρατούσε αρκετά οχήματα ώστε να αποφευχθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση και τα κόστη που εμπλέκονται με τις διαφοροποιήσεις των VSL δεν θα ανταποκρίνονταν σε μειωμένες τιμές του κριτηρίου TTS. Αυτό το γεγονός θα συζητηθεί και αργότερα στο σενάριο ελέγχου ανατροφοδότησης στον αυτοκινητόδρομο M2 (Feedback M2).



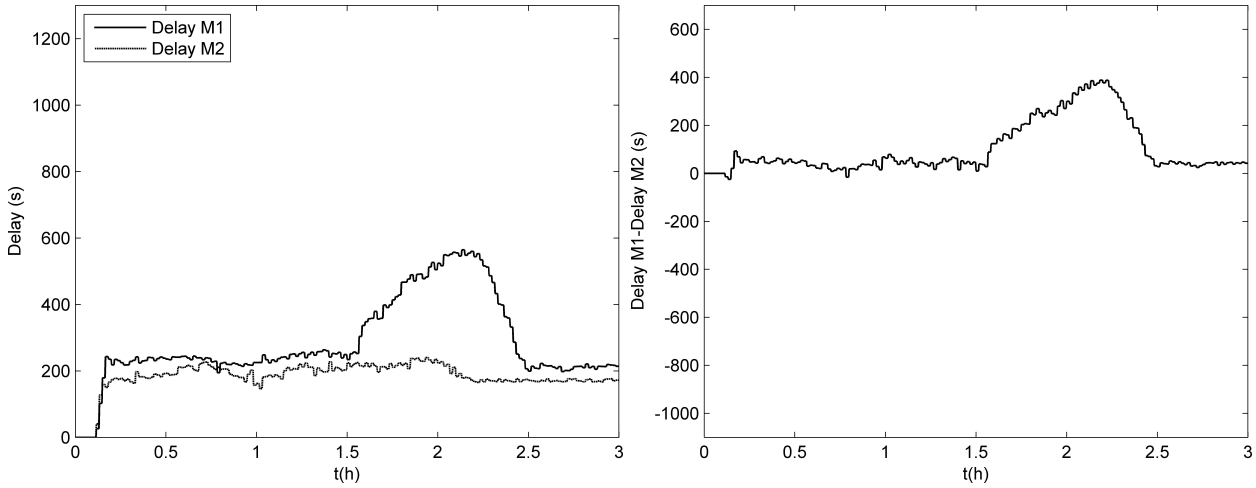
Γράφημα 23: Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, AMOC M2.



Γράφημα 24: Ποσοστά VSL, AMOC M2.

Το γράφημα 25(α) απεικονίζει τους χρόνους καθυστέρησης και στους δύο αυτοκινητοδρόμους στα επιλεγμένα κομμάτια του δικτύου. Μετά από τη στιγμή $t = 0.2$h, όταν και ο αλγόριθμος υπολογισμού των χρόνων κα-

θυστέρησης έχει αρκετές πληροφορίες για να αρχίσει να υπολογίζει τους χρόνους καθυστέρησης, βλέπουμε ότι ο Delay M2 (χρόνος καθυστέρησης στον M2) μένει γύρω στα 200s για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης. Από την άλλη πλευρά τα οχήματα του αυτοκινητοδρόμου M1 φαίνεται να βιώνουν μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης αφότου ξεκινήσει η δεύτερη περίοδος δράσης ελέγχου την χρονική περίπου στιγμή $t = 1.5$h. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε από το Γράφημα 23 ότι μετά την χρονική στιγμή $t = 1.5$h δημιουργείται κυκλοφοριακή συμφόρηση στον M1 που έχει ως αντίκτυπο την αύξηση των χρόνων καθυστέρησης. Οι χρόνοι καθυστέρησης στον M1 είναι μικρότεροι από αυτούς του σεναρίου No control αλλά μεγαλύτεροι από αυτούς του σεναρίου εφαρμογής AMOC M1. Υπάρχει διαφορά ανάμεσα στους χρόνους καθυστέρησης και οι οδηγοί στον M1 πρέπει να περιμένουν 400s περισσότερο στην ελεγχόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση σε σχέση με τους οδηγούς στον M2 (βλέπε γράφημα 25(β)).



Γράφημα 25: (α) Χρόνοι καθυστέρησης, AMOC M2, (β) Διαφορές χρόνων καθυστερήσεων ,AMOC M2

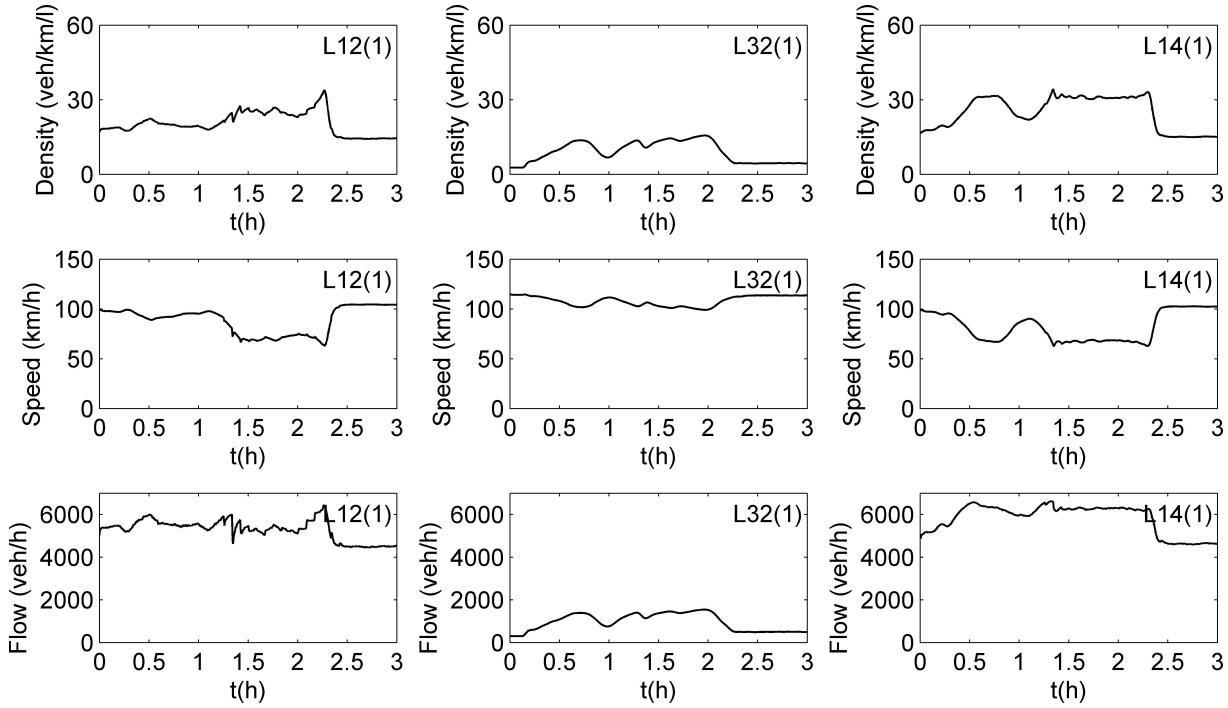
6.2.4 AMOC M1 και M2

Αυτή την φορά εφαρμόζεται βέλτιστος έλεγχος στους αυτοκινητοδρόμους M1 και M2 ταυτόχρονα. Τα ίδια συμπλέγματα συνδέσμων ελέγχου όπως και στα προηγούμενα σενάρια χρησιμοποιούνται,δηλαδή L11,L12-L13,L14,L31 και L32-L33.

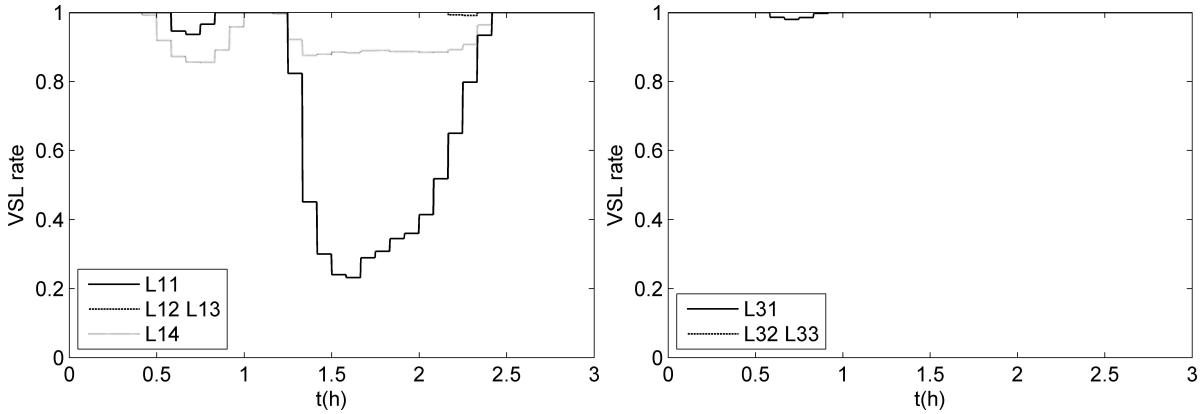
Η προκύπτουσα τιμή TTS για αυτό το σενάριο είναι 3823 veh·h, η οποία είναι 15.1% βελτιωμένη σε σύγκριση με την τιμή TTS της περίπτωσης μη εφαρμογής ελέγχου (No control) και ίδια με αυτή του σεναρίου εφαρμογής AMOC M1. Έτσι, η σχετιζόμενες τιμές της πυκνότητας, της ταχύτητας και της ροής είναι παρόμοιες από τη στιγμή που δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές ανάμεσα σε αυτά τα δύο σενάρια. Τα ποσοστά VSL στους συνδέσμους L11,L12-L13 και L14 είναι επίσης ίδια με αυτά του σεναρίου εφαρμογής AMOC M1, ενώ τα ποσοστά VSL στους συνδέσμους L31 και L32-L33 είναι πανομοιότυπα όπως φαίνεται στο Γράφημα 27.

Υπάρχουν δύο λόγοι για τους οποίους το AMOC δεν εφαρμόζει VSL στον αυτοκινητόδρομο M2. Ο πρώτος λόγος είναι το γεγονός ότι μια μείωση των ποσοστών VSL στον M2 είναι τρεις φορές λιγότερο αποτελεσματική απ΄ ότι μια ίδια μείωση στον M1 εξαιτίας του αριθμού των λωρίδων σε κάθε αυτοκινητόδρομο. Επομένως, η διαφοροποίηση των VSL στον M1 κοστίζει λιγότερο μιας και προκύπτει χαμηλότερη τιμή του κριτηρίου TTS. Ένας δεύτερος λόγος είναι η συνύπαρξη ραμπας εισόδου και εξόδου στα εξεταζόμενα κομμάτια του δικτύου. Έτσι το AMOC δεν έχει να ανησυχίσει με το μπλοκάρισμα που δημιουργεί η ράμπα εξόδου εξαιτίας του μεγαλύτερου μήκους ελέγχου κυκλοφοριακής συμφόρησης στον έναν ή στον άλλο αυτοκινητόδρομο.

Οι χρόνοι καθυστέρησης στους αυτοκινητοδρόμους του M1 και M2 είναι σχεδόν ίσοι με αυτούς του σεναρίου εφαρμογής AMOC M1, από την στιγμή που ο έλεγχος που εφαρμόζεται σε αυτά τα δύο σενάρια είναι σχεδόν ο ίδιος. Για αυτόν τον λόγο, παραλείπεται η επίδειξη των γραφημάτων των χρόνων καθυστέρησης και των διαφορών τους.



Γράφημα 26: Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, AMOC M1 M2.



Γράφημα 27: (α) Ποσοστά VSL στον M1, AMOC M2 , (β) Ποσοστά VSL στον M2, AMOC M2.

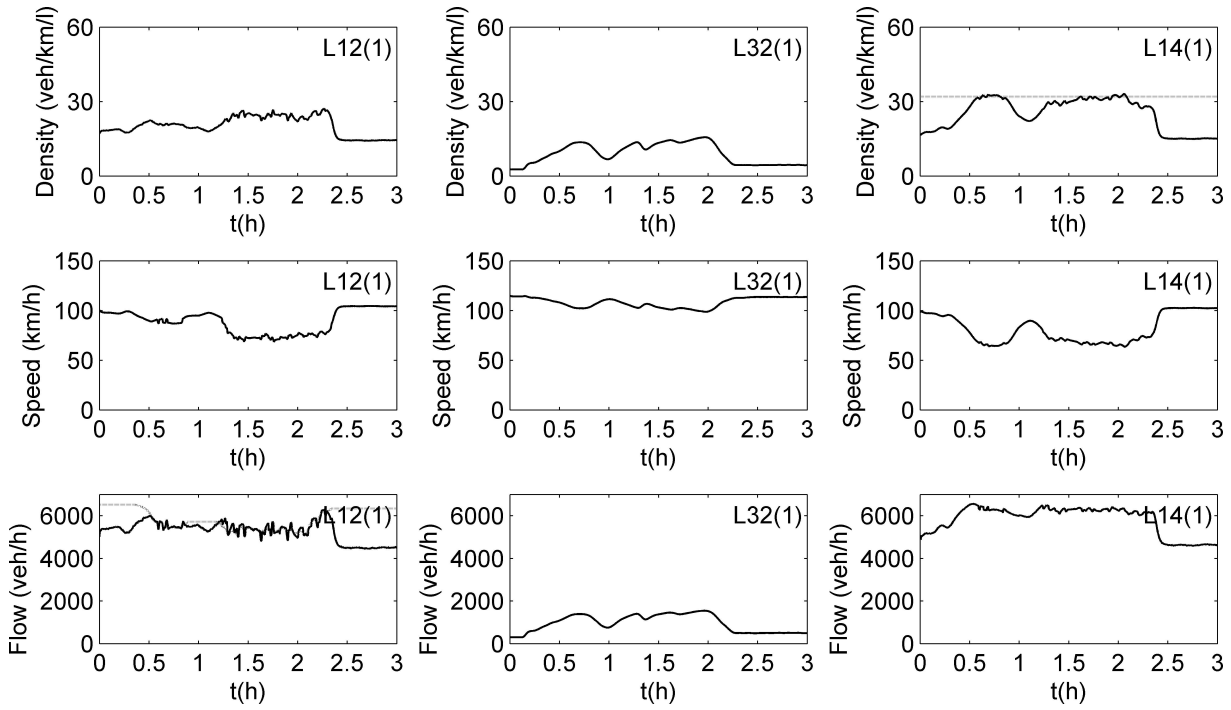
6.2.5 Έλεγχος ανατροφοδότησης στον M1(Feedback M1)

Σε αυτό το σενάριο εφαρμόζεται έλεγχος ανατροφοδότησης στον M1 λαμβάνοντας υπόψην τους περιορισμούς πρακτικών θεμάτων που συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η περιοχή εφαρμογής είναι ο σύνδεσμος L11, με το σύμπλεγμα συνδέσμων L12-L13 να είναι η περιοχή επιτάχυνσης και να σχηματίζει επίσης ένα σύμπλεγμα με τον σύνδεσμο L14. Η δομή του ελέγχου παρουσιάζεται στο Γράφημα 16 . Το σημείο ρύθμισης (set-point) του πρωταρχικού ελεγκτή είναι $\hat{\rho}_{out} = 32$ veh / km / lane. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται όπως φαίνονται στο Γράφημα 16, εκτός της μέτρησης της ροής του M2 που δεν χρησιμοποιείται σε αυτό το σενάριο. Οι παράμετροι του ελεγκτή πάρθηκαν από [3] και είναι $K_t = 0.0007$ h / veh / lane για τον δευτερεύων ελεγκτή και $K_t' = 3.0$ km / h / lane και $K_p = 50.0$ km / h / lane για τον πρωταρχικό ελεγκτή.

Η προκύπτουσα τιμή TTS για αυτό το σενάριο είναι 3846 veh·h, η οποία είναι 15.1% βελτιωμένη σε σύγκριση με την τιμή TTS της περίπτωσης μη εφαρμογής ελέγχου(no control) και πολύ κοντά σε αυτή του αντίστοιχου σεναρίου

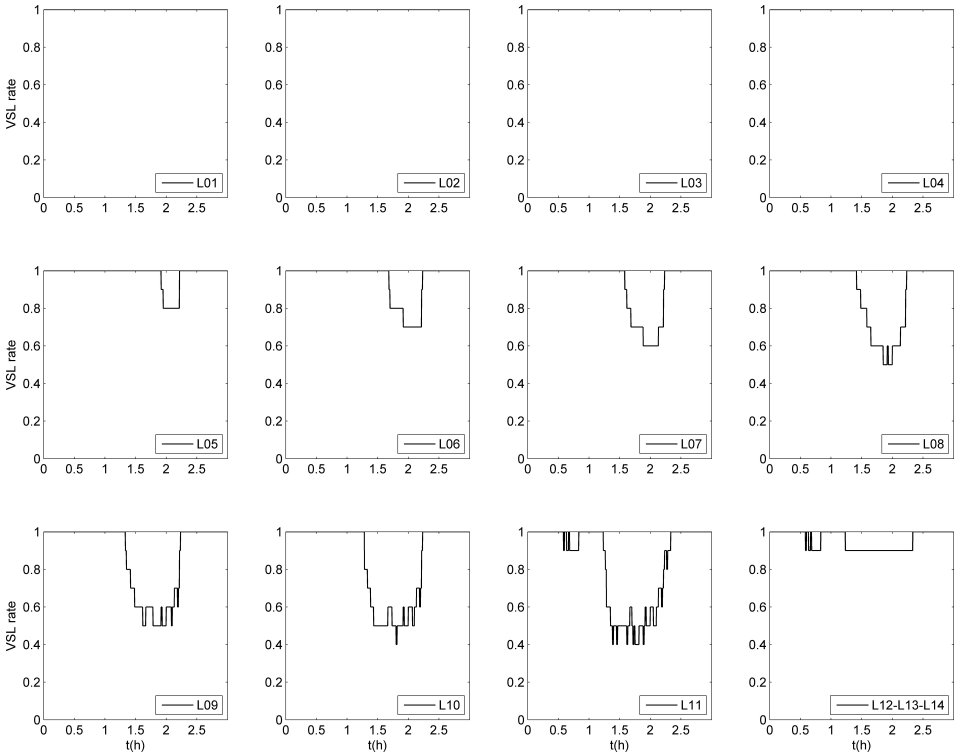
εφαρμογής βέλτιστου ελέγχου στον αυτοκινητόδρομο M1. Τα προφίλ της πυκνότητας,της ταχύτητας και της ροής για τα επιλεγμένα τμήματα συνδέσμων παρουσιάζονται στο Γράφημα 28,ενώ τα ποσοστά ανατροφοδότησης VSL παρουσιάζονται στο Γράφημα 29.

Η ερμηνεία αυτού του σεναρίου είναι παρόμοια με αυτή για το σενάριο AMOC M1. Οι γραμμές αναφοράς και για τον πρωταρχικό ελεγκτή (η γραμμή με τις βούλες στο γράφημα ροής του συνδέσμου L12(1) του Γραφήματος 28) αλλά και για τον δευτερεύων ελεγκτή (η γραμμή με τις βούλες στο γράφημα της πυκνότητας του τμήματος L14(1) στο Γράφημα 28) φαίνεται να συμπίπτουν-ακολουθούν την γραμμή αναφοράς. Μία πτώση των τιμών της γραμμής αναφοράς παρατηρείται περίπου τη στιγμή $t = 1.0$h εξαιτίας της έλλειψης ζήτησης.

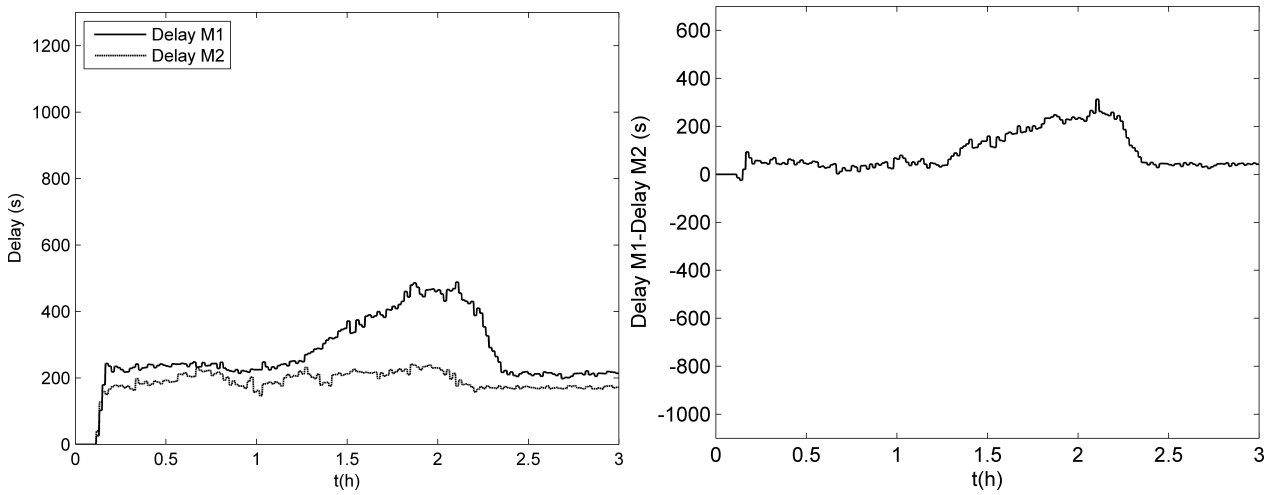


Γράφημα 28: Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, Feedback M1.

Το Γράφημα 30(α) απεικονίζει τους χρόνους καθυστέρησης και στους δύο αυτοκινητοδρόμους στα επιλεγμένα κομμάτια του δικτύου. Η ερμηνεία των χρόνων καθυστέρησης είναι παρόμοια με αυτή του σεναρίου AMOC M1. Μετά από τη στιγμή $t = 0.2$h,όταν και ο αλγόριθμος υπολογισμού των χρόνων αναμονής έχει αρκετές πληροφορίες για να αρχίσει να υπολογίζει τους χρόνους καθυστέρησης,βλέπουμε ότι ο Delay M2(χρόνος καθυστέρησης στον M2) μένει γύρω στα 200s για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης,όπως και στην περίπτωση no control. Από την άλλη πλευρά τα οχήματα του αυτοκινητοδρόμου M1 φαίνεται να βιώνουν μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης αφότου ξεκινήσει η δεύτερη δραστηριοποίηση ελέγχου την χρονική περίπου στιγμή $t = 1.3$h. Εξαιτίας της αποφυγής της δημιουργίας κυκλοφοριακής συμφόρησης οι χρόνοι καθυστέρησης στον M1 είναι κατά πολύ λιγότεροι απ΄ ότι στην περίπτωση μη εφαρμογής ελέγχου. Υπάρχει ακόμα μεγάλη διαφορά ανάμεσα στους χρόνους καθυστέρησης και οι οδηγοί στον M1 πρέπει να περιμένουν 300s περισσότερο στην ελεγχόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση σε σχέση με τους οδηγούς στον M2 (βλέπε Γράφημα 30(β)).



Γράφημα 29: Ποσοστά VSL, Feedback M1.

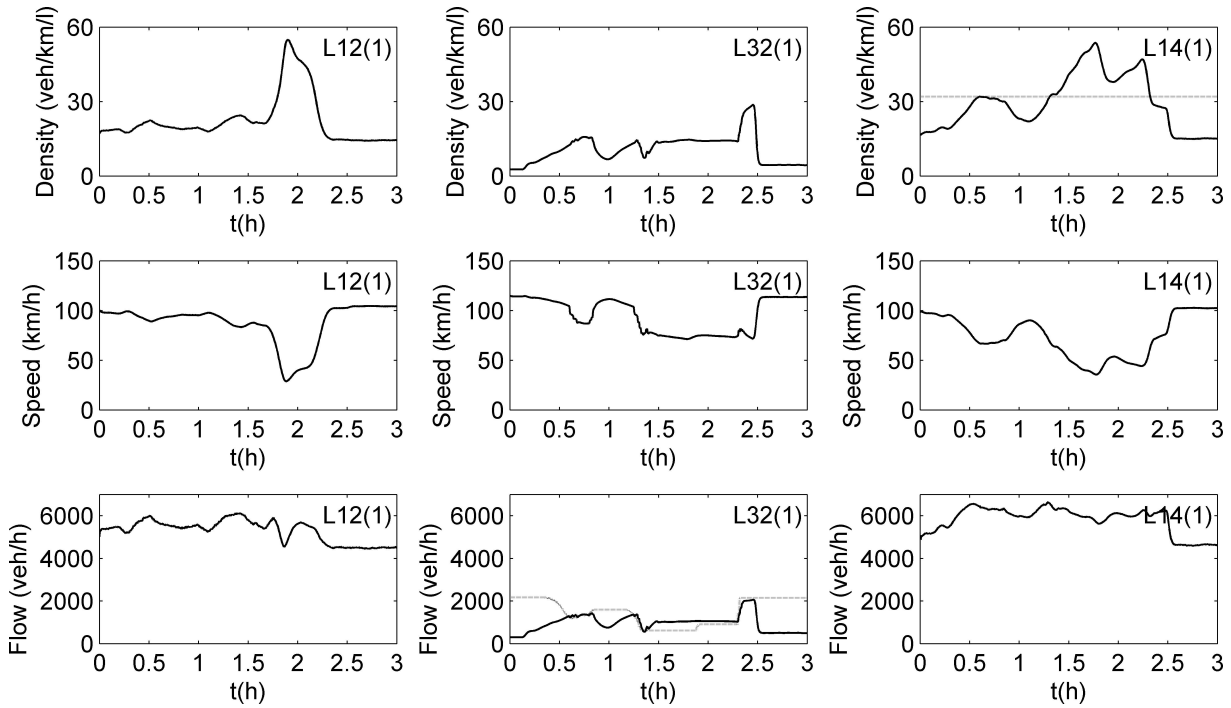


Γράφημα 30: (α) Χρόνοι καθυστέρησης, Feedback M1, (β) Διαφορές χρόνων καθυστέρησης, Feedback M1

6.2.6 Έλεγχος ανατροφοδότησης στον M2(Feedback M2)

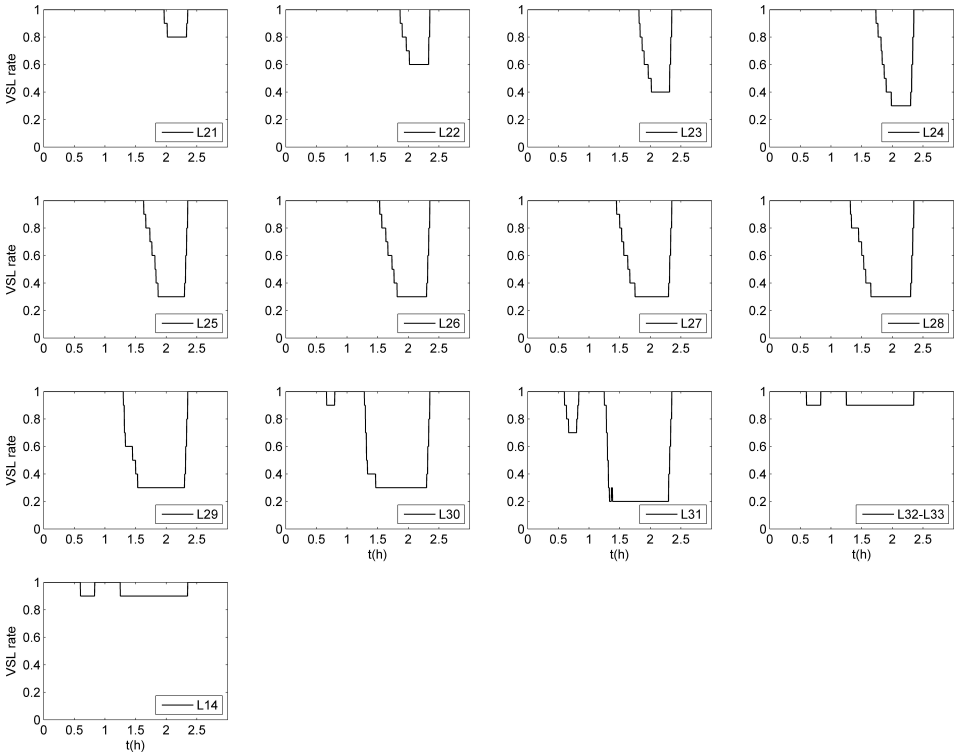
Σε αυτό το σενάριο εφαρμόζεται έλεγχος ανατροφοδότησης στον αυτοκινητόδρομο M2 λαμβάνοντας υπόψην τους περιορισμούς πρακτικών θεμάτων που συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η περιοχή εφαρμογής είναι ο σύνδεσμος L31,η περιοχή επιτάχυνσης είναι οι σύνδεσμοι L32-L33 και σχηματίζουν ένα σύμπλεγμα με τον L14. Η δομή ελέγχου είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Γράφημα16. Το σημείο ρύθμισης του πρωταρχικού ελεγκτή είναι $\hat{\rho}_{out} = 32$ veh/km/lane.Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται όπως φαίνοται στο Γραφημα 16,εκτός της μέτρησης της ροής του M1 που δεν χρησιμοποιείται σε αυτό το σενάριο. Οι παράμετροι του ελεγκτή πάρθηκαν από [3] και είναι $K_t = 0.0007$ h/veh/lane για τον δευτερεύων ελεγκτή και $K_t' = 9.0$ km/h/lane και $K_p = 150.0$ km/h/lane

για τον πρωταρχικό ελεγκτή.
Η προκύπτουσα τιμή TTS για αυτό το σενάριο είναι 3957 veh·h,η οποία είναι 12.1% βελτιωμένη σε σύγκριση με την τιμή TTS της περίπτωσης μη εφαρμογής ελέγχου(no control). Είναι αξιοσημείωτο ότι αυτό το σενάριο παρέχει μεγαλύτερη βελτίωση σε σύγκριση με το αντίστοιχο σενάριο εφαρμογής βέλτιστου ελέγχου,αλλά παραμένει χειρότερο απ΄ ότι το σενάριο εφαρμογής AMOC M1. Πρόκειται να δειχθεί αργότερα ότι ο έλεγχος ανατροφοδότησης εφαρμόζει έντονα VSL κατά την διάρκεια και αναβάλλει την δημιουργία κυκλοφοριακής συμφόρησης σε αντίθεση με το AMOC. Τα προφίλ της πυκνότητας,της ταχύτητας και της ροής για τα επιλεγμένα τμήματα συνδέσμων παρουσιάζονται στο Γράφημα 31, ενώ τα ποσοστά ανατροφοδότησης VSL παρουσιάζονται στο Γράφημα 32.
Η ερμηνεία αυτού του σεναρίου είναι πολύ παρόμοια με αυτήν του σεναρίου εφαρμογής AMOC στον M2 μέχρι περίπου την χρονική στιγμή $t = 1.3$h,εκτός του γεγονότος ότι παρατηρείται έντονη εφαρμογή VSL στον σύνδεσμο L31.Η πρώτη αυτή περίοδος δράσης του ελέγχου αποτρέπει την εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης και κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου οι γραμμές αναφοράς και των δύο ελεγκτών φαίνεται να ακολουθούνται πιστά(διάγραμμα ροής του τμήματος L32(1) και το διάγραμμα πυκνότητας του τμήματος L14(1) στο Γράφημα 31). Λίγο πριν την χρονική στιγμή $t = 1.3$h η δεύτερη δράση ελέγχου ξεκινά στον σύνδεσμο L31 και διατηρεί την κρίσιμη πυκνότητα στη περιοχή συγχώνευσης για λίγα λεπτά. Το ποσοστό VSL όμως φτάνει το χαμηλότερο όριο του 0.2,και το κράτημα της ροής της κυκλοφορίας δεν είναι επαρκές για να αποφευχθεί η εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης.



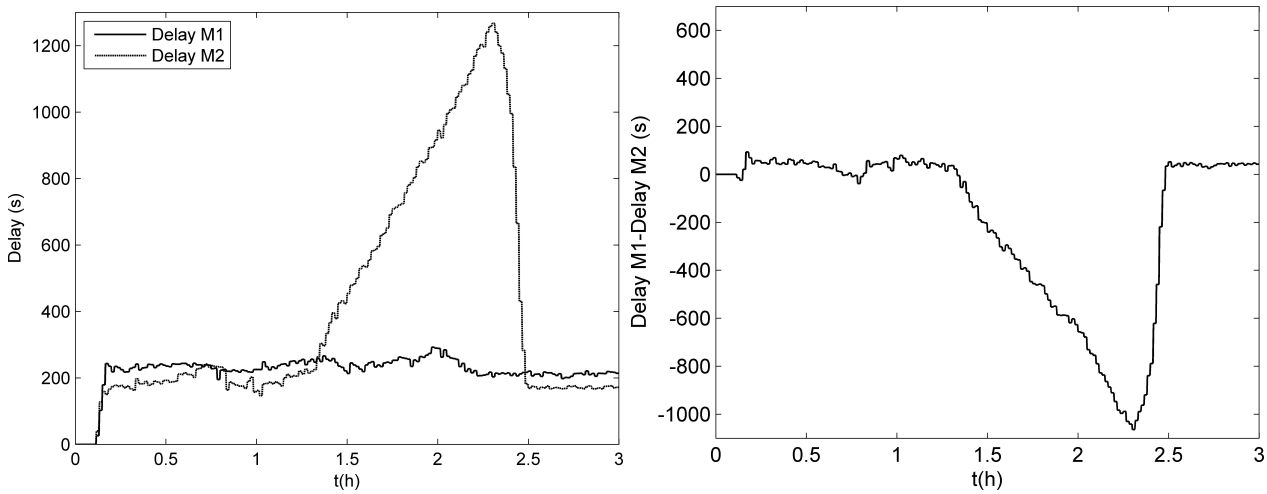
Γράφημα 31: Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, Feedback M2.

Το Γράφημα 33(α) απεικονίζει τους χρόνους καθυστέρησης και στους δύο αυτοκινητοδρόμους στα επιλεγμένα κομμάτια του δικτύου. Μετά από τη στιγμή $t = 0.2$h, όταν και ο αλγόριθμος υπολογισμού των χρόνων καθυστέρησης έχει αρκετές πληροφορίες για να αρχίσει να υπολογίζει τους χρόνους καθυστέρησης,βλέπουμε ότι ο Delay M1 (χρόνος καθυστέρησης στον M1) μένει γύρω στα 200s για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης. Από την άλλη πλευρά τα οχήματα του αυτοκινητοδρόμου M2 φαίνεται να βιώνουν μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης αφότου ξεκινήσει η δεύτερη περίοδος δράσης ελέγχου την χρονική περίπου στιγμή $t = 1.3$h, οι οποίοι είναι ακόμα μεγαλυτεροι απ΄ ότι στην περίπτωση μη εφαρμογής ελέγχου. Επίσης, οι χρόνοι καθυστέρησης στον M2 είναι εμφανώς μεγαλύτεροι σε σύγκριση με αυτούς του σεναρίου εφαρμογής AMOC M2 επειδή το AMOC επιλέγει να μην εφαρμόσει έντονα VSL, σε αντίθεση με αυτό το σενάριο, όπως βλέπουμε και στο Γράφημα 32. Αν και όπως φαίνεται στο Γράφημα 31 έχουμε αυξημένη πυκνότητα στον σύνδεσμο L12 του M1 την χρονική στιγμή γύρω από $t = 2$h, παρατηρώντας τις ταχύτητες και τις πυκνότητες των υπόλοιπων συνδέσμων του M1 μέσω του METAGRAF δεν εμφανίζεται κυκλοφοριακή συμφόρηση σε αυτούς (εκτός από τον L11 που εμφανίζεται) και ως εκ τούτου δεν



Γράφημα 32: Ποσοστά VSL, Feedback M2.

έχουμε μεγάλους χρόνους καθυστέρησης στον M1. Οι επιδράσεις στις ταχύτητες και στην πυκνότητα των δύο αυτών συνδέσμων του M1 (δηλ., L11 και L12) είναι και η αιτία που βλέπουμε μια μικρή αύξηση στους χρόνους καθυστέρησης του M1 που αρχίζει την χρονική στιγμή $t = 1.8$h και κορυφώνεται την χρονική στιγμή $t = 2.0$h. Υπάρχει ακόμα μεγάλη διαφορά ανάμεσα στους χρόνους καθυστέρησης και οι οδηγοί στον M2 πρέπει να περιμένουν 1000s περισσότερο στην ελεγχόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση σε σχέση με τους οδηγούς στον M1 (βλέπε Γράφημα 33(β)).



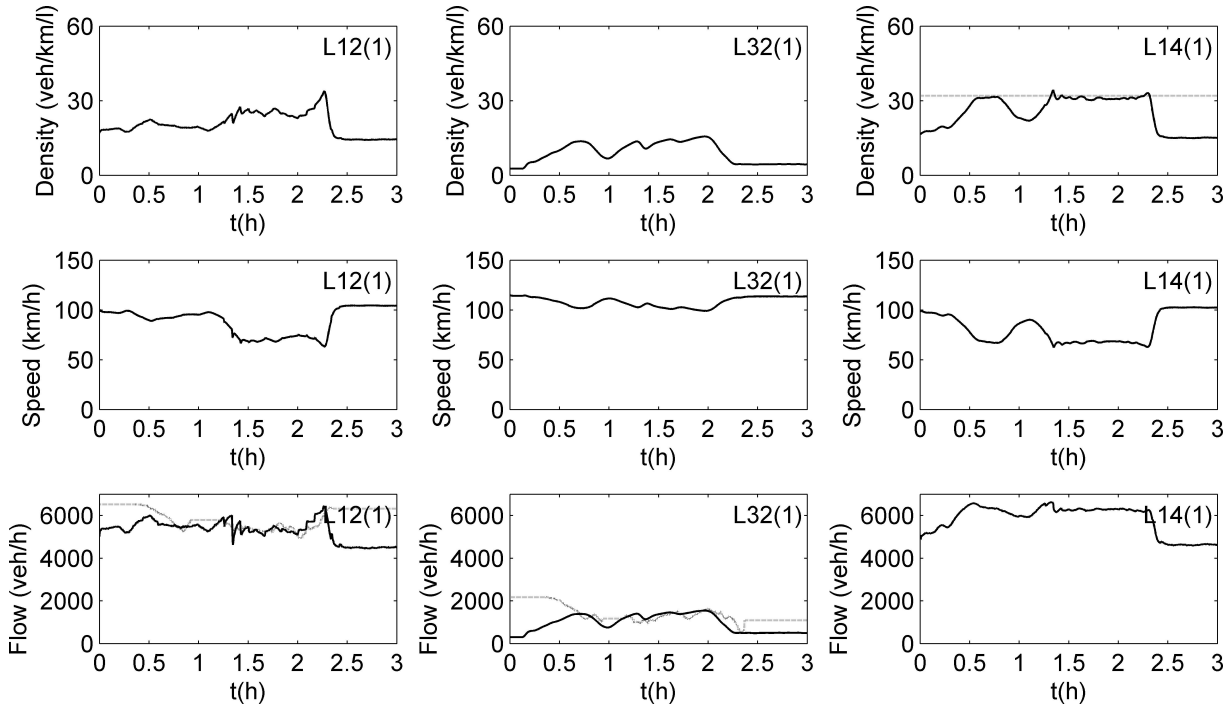
Γράφημα 33: (α) Χρόνοι καθυστέρησης, Feedback M2, (β) Διαφορές χρόνων καθυστέρησης, Feedback M2

6.2.7 Έλεγχος ανατροφοδότησης στον M1 και τον M2(Feedback M1 and M2)

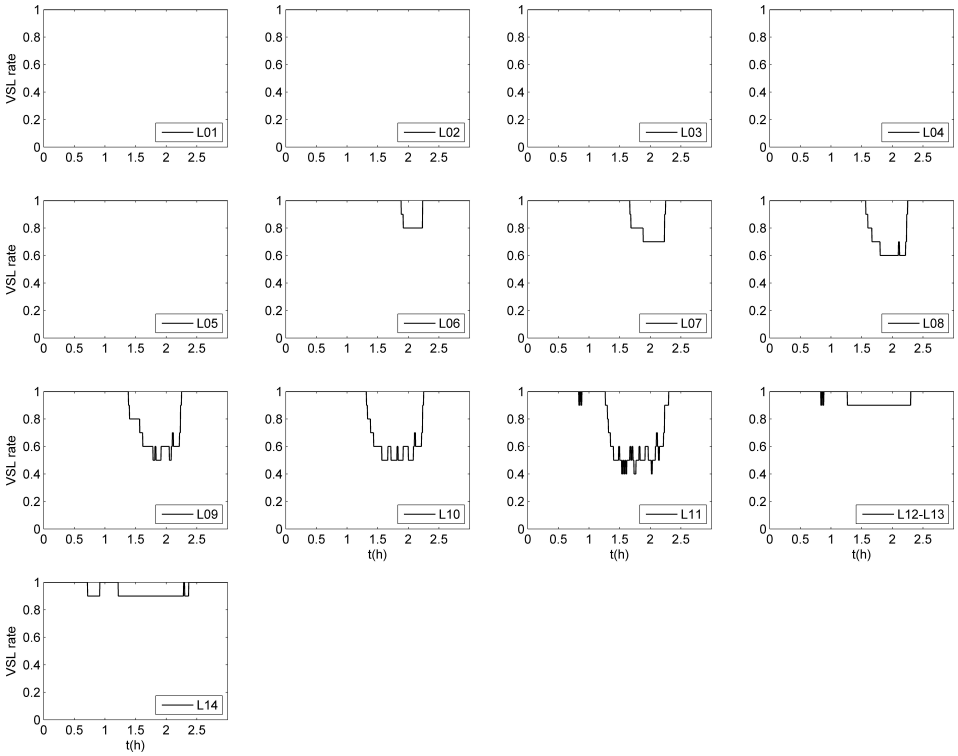
Σε αυτό το σενάριο εφαρμόζεται έλεγχος ανατροφοδότησης στους αυτοκινητοδρόμους M1 και M2 λαμβάνοντας υπόψην τους περιορισμούς πρακτικών θεμάτων που συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Οι περιοχές εφαρμογής είναι οι ίδιες με τα προηγούμενα σενάρια. Το σημείο ρύθμισης του πρωταρχικού ελεγκτή του πρωταρχικού ελεγκτή είναι $\hat{\rho}_{out} = 32$ veh/km/lane.Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται όπως φαίνοται στο Γραφημα 16. Ο διαχωρισμός της γραμμής αναφοράς της ροής ανάμεσα στους δύο δευτερεύοντες ελεγκτές εκτελέστηκε όπως περιγράφθηκε στο Κεφάλαιο 5 με τέτοιον τρόπο που η διαφορά ανάμεσα στους χρόνους καθυστέρησης των δύο αυτοκινητοδρόμων κρατήθηκε γύρω από το μηδέν. Οι παράμετροι του ελεγκτή πάρθηκαν από [3],αλλά και πάλι μετασχηματίστηκαν για να λάβουν υπόψην τον διαφορετικό αριθμό των εισερχόμενων λωρίδων και είναι $K_t = 0.0007$ h / veh/ lane και για τους δύο δευτερεύοντες ελεγκτές και $\hat{K}_t' = 2.25$ km / h / lane και $K_P = 37.5$ km /h /lane για τον πρωταρχικό ελεγκτή.

Η προκύπτουσα τιμή TTS για αυτό το σενάριο είναι 3881 veh·h,η οποία είναι 13.8% βελτιωμένη σε σύγκριση με την τιμή TTS της περίπτωσης μη εφαρμογής ελέγχου (No control) και ελαφρώς χειρότερη σε σχέση με το αντίστοιχο σενάριο εφαρμογής βέλτιστου ελέγχου και του σεναρίου εφαρμογής ελέγχου ανατροφοδότησης στον M1 μόνο. Τα προφίλ της πυκνότητας,της ταχύτητας και της ροής για τα επιλεγμένα τμήματα συνδέσμων παρουσιάζονται στο Γράφημα 34,ενώ τα ποσοστά ανατροφοδότησης VSL παρουσιάζονται στο Γράφημα 35 και 36.

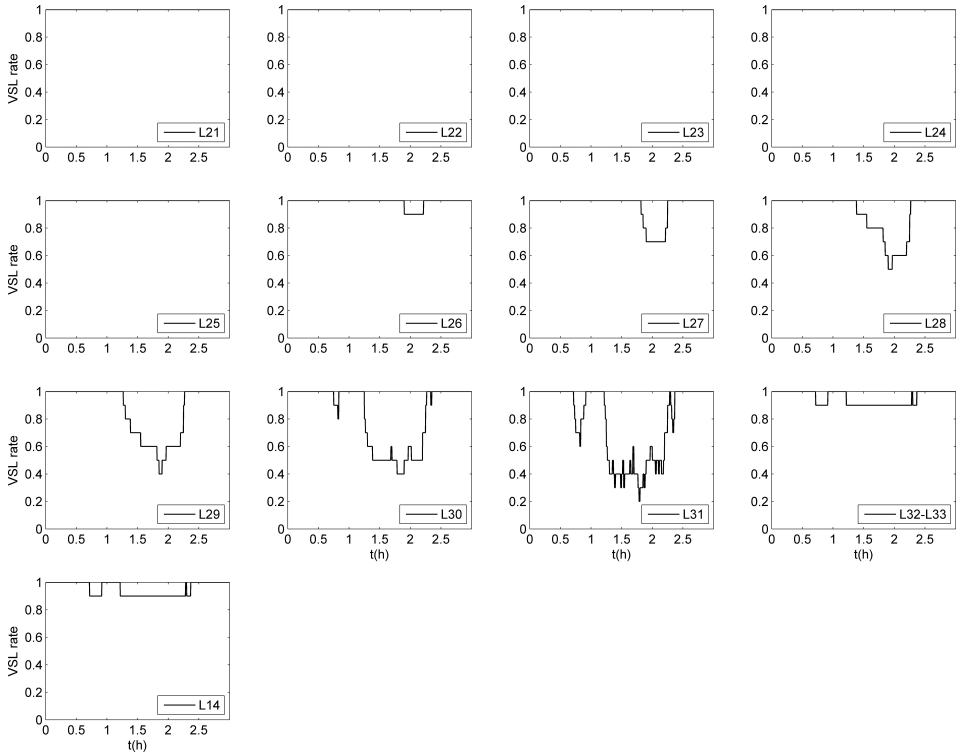
Ανεξάρτητα του γεγονότος ότι εφαρμόζονται ποσοστά VSL και στους δύο αυτοκινητοδρόμους η ερμήνευση της κυκλοφοριακής κατάστασης είναι παρόμοια με αυτή του σεναρίου εφαρμογής AMOC στον M1 και M2. Αποφεύγεται πλήρως η δημιουργία κυκλοφοριακής συμφόρησης και οι μεταβλητές ελέγχου ακολουθούν αρκετά τις αντίστοιχες γραμμές αναφοράς όπως μπορείνα φανεί στο Γράφημα 34 (διάγραμμα ροής του τμήματος L12(1), διάγραμμα ροής του τμήματος L32(1) και διάγραμμα πυκνότητας του τμήματος L14(1)).



Γράφημα 34: Διάγραμμα πυκνοτήτων - ταχυτήτων - ροών, Feedback M1 M2.

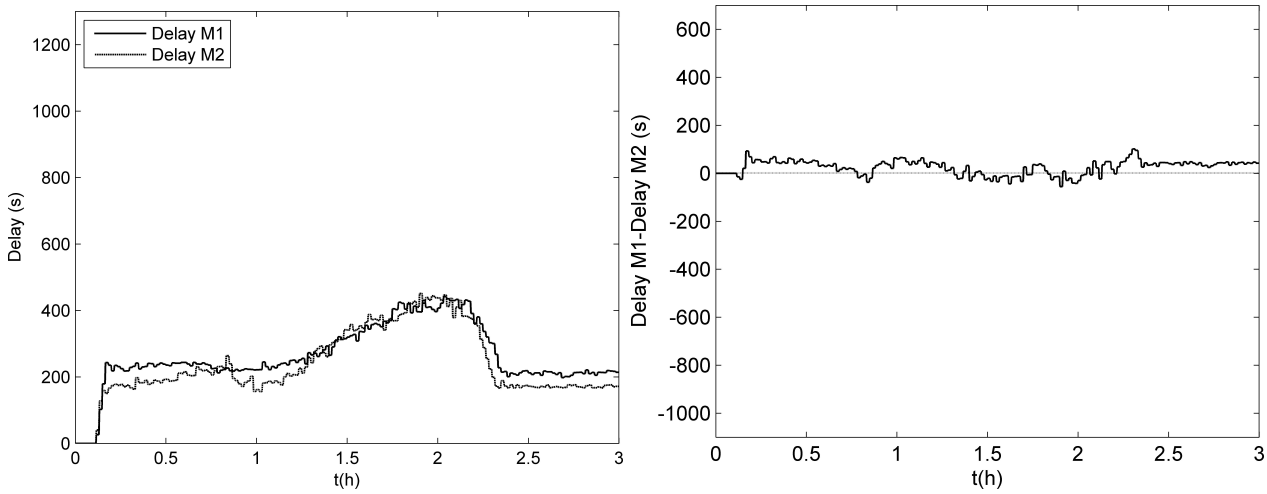


Γράφημα 35: Ποσοστά VSL στον M1, Feedback M1 M2 .



Γράφημα 36: Ποσοστά VSL στον M2, Feedback M1 M2.

Η δράση του ελέγχου είναι ισχυρότερη στον αυτοκινητόδρομο M1 απ΄ ότι στον M2 την περισσότερη χρονική διάρκεια που εφαρμόζεται ο έλεγχος (Γράφημα 35-36). Αυτό είναι αναμενόμενο,από τη στιγμή που οι χρόνοι καθυστέρησης στον M1 τείνουν να είναι υψηλότεροι απ΄ ότι στον M2 εξαιτίας της υψηλότερης ζήτησης που υπάρχει σε αυτόν τον αυτοκινητόδρομο. Το Γράφημα 37 (α) απεικονίζει τους χρόνους καθυστέρησης και στους δύο αυτοκινητόδρομους. Πριν από τη χρονική στιγμή $t = 0.7$h δεν είναι αναγκαίο να εφαρμοσθεί MTFC και οι χρόνοι καθυστέρησης είναι άνισοι μεταξύ τους. Μετά από αυτή τη χρονική στιγμή οι καμπύλες του χρόνου καθυστέρησης των δύο αυτοκινητοδρόμων προσεγγίζουν η μία την άλλη. Η υψηλότερη δράση ελέγχου στον M2 αυξάνει τους χρόνους καθυστέρησης σε αυτό το κομμάτι του δικτύου σε σχέση με αυτό του M1. Εξαιτίας της έλλειψης ζήτησης η εφαρμογή MTFC δεν είναι πλέον αναγκαία μερικά μόλις λεπτά αργότερα και οι καμπύλες των χρόνων καθυστέρησης φαίνεται να ξεφεύγουν η μία από την άλλη. Την χρονική περίπου στιγμή $t = 1.3$h η δεύτερη περίοδος δράσης ελέγχου ξεκινά πρώτα στον M2 και έπειτα στον M1. Κατά τη διάρκεια της δράσης αυτής ελέγχου η διαφορά ανάμεσα στους χρόνους καθυστέρησης παραμένει σχεδόν μηδενική χωρίς να υπερβαίνει το χρονικό διάστημα $[-50, 50]$s (Γράφημα 37(β)). Τέλος, σημειώνουμε ότι οι χρόνοι καθυστέρησης στους δύο αυτοκινητοδρόμους είναι ίσοι σε αντίθεση με το αντίστοιχο σενάριο εφαρμογής AMOC, όπου δεν επιχειρείται ισοστάθμιση των χρόνων καθυστέρησης.



Γράφημα 37: (α) Χρόνοι καθυστέρησης, Feedback M1 M2, (β) Διαφορές χρόνων καθυστέρησης, Feedback M1 M2

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία εφαρμόστηκε η έννοια MTFC σε δύο συγχωνευόμενους αυτοκινητοδρόμους. Ο έλεγχος εφαρμόστηκε σε κάθε έναν από τους αυτοκινητοδρόμους ξεχωριστά, και έπειτα εφαρμόστηκε και στους δύο ταυτόχρονα. Η δομή του ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση εφαρμογής ελέγχου σε μεμονωμένο αυτοκινητόδρομο, επεκτάθηκε για την εφαρμογή του στους δύο προαναφερθέντες συγχωνευόμενους αυτοκινητοδρόμους. Η διανομή της δράσης του ελέγχου (με μέτρο ελέγχου τα VSL) βασίστηκε στην ισοστάθμιση των καθυστερήσεων των οδηγών σε κάθε αυτοκινητόδρομο. Η νέα στρατηγική ελέγχου εφαρμόστηκε επιτυχώς στο υποθετικό αυτό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων με δύο συγχωνευόμενους αυτοκινητόδρομους, ενώ τα αποτελέσματα του ελέγχου ανατροφοδότησης προσέγγισαν την απόδοση του βέλτιστου ελέγχου. Στις ιδέες για μελλοντική εργασία περιλαμβάνεται η αποφυγή του μπλοκαρίσματος των ραμπών εξόδου ανάντη της περιοχής εφαρμογής του ελέγχου με την χρησιμοποίηση ενός σχεδίου ελέγχου διαχείρησης των ουρών αναμονής.

A ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ALGORITHM FOR THE CALCULATION OF THE TOTAL TRAVEL TIME (TTT) IN ONE STRETCH BY TRACING BACK THE RECORDED AVERAGE SPEEDS IN THE SEGMENTS

Assume a matrix with dimension $K \times N$, where K is the number of recorded time steps and N the number of segments contained in the stretch being considered.

The first line of the matrix contains the oldest speed measurements and the last line the most recent speed measurements. The first column of the matrix contains the speed measurements for the most downstream segment of the stretch, while the last column contains the measurement of the most upstream segment of the stretch.

Let:

I the set of segments in the stretch; $\dim(I) = N$;

k the discrete normalized time step index; $0 < k < K$;

T the simulation time step length [s];

$v_i(k)$ the speed at segment $i \in I$ at time instant kT [m/s];

l_i the length of segment $i \in I$ [m];

TTT the total travel time [s];

and:

t auxiliary variable for time [s];

d_i auxiliary variable for distance [m];

l_i auxiliary variable for length [m];

01:	$k \leftarrow K$	% Initialization of variables
02:	$i \leftarrow N$	
03:	$l_i \leftarrow l_i$	
04:		
05:	$t \leftarrow T$	
06:	$TTT \leftarrow 0$	
07:	while $k \geq 0$ and $i \geq 0$	% Portion of segment i covered during t.
08:	$d \leftarrow v_i(k) \cdot t$	% If positive, remaining portion of segment i to
09:	$d_i \leftarrow l_i - d$	be covered. If negative, distance that exceeds
10:		the length of segment i.
11:		% Computation of the total travel time.
12:		% Remaining portion of segment i was precisely
13:	$TTT \leftarrow TTT + t$	covered during t.
14:	if $d_i = 0$	% Use simulation time step T as t for the next
15:		period.
16:		
17:	$t \leftarrow T$	% Move one simulation time step backwards.

18:		% Move to the next upstream segment.
19:	$k \leftarrow k-1$	% Use the length of the new segment.
20:	$i \leftarrow i-1$	% Segment i was not completely covered during t.
21:	$l_i \leftarrow l_i$	
22:		
23:	else if $d_i > 0$	% Use the remaining portion of the segment as the length.
24:	$t \leftarrow T$	
25:	$k \leftarrow k-1$	% Segment i was covered in less time than t.
26:	$l_i \leftarrow d_i$	% Portion of the current t to be used in the next iteration.
27:		
28:		
29:	else if $d_i < 0$	
30:	$t \leftarrow -d_i / v_i(k)$	% The desired stop condition is to reach the upstream end of the stretch.
31:		
	$i \leftarrow i-1$	
	$l_i \leftarrow l_i$	
	if $k < 0$ and $i \geq 0$	
	'Warning: not enough'	
	'recorded time steps'	

Initialization $k \leftarrow K = 3$ $i \leftarrow N = 3$ $l_i \leftarrow l_3 = 500$ $t \leftarrow T = 10$ $TTT \leftarrow 0$	0 $(k = 3 \geq 0$ **and** $i = 3 \geq 0)$ $d \leftarrow v_3(3) \cdot t = 25 \cdot 10 = 250$ $d_i \leftarrow l_i - d = 500 - 250 = 250$ $TTT \leftarrow TTT + t = 10 + 0 = 10$ $(d_i = 250 > 0)$ $t \leftarrow T = 10$ $k \leftarrow k - 1 = 3 - 1 = 2$ $l_i \leftarrow d_i = 250$
1 $(k = 2 \geq 0$ **and** $i = 3 \geq 0)$ $d \leftarrow v_3(2) \cdot t = 25 \cdot 10 = 250$ $d_i \leftarrow l_i - d = 250 - 250 = 0$ $TTT \leftarrow TTT + t = 10 + 10 = 20$ $(d_i = 0)$ $t \leftarrow T = 10$ $k \leftarrow k - 1 = 2 - 1 = 1$ $i \leftarrow i - 1 = 3 - 1 = 2$ $l_i \leftarrow l_2 = 500$	2 $(k = 1 \geq 0$ **and** $i = 2 \geq 0)$ $d \leftarrow v_2(1) \cdot t = 30 \cdot 10 = 300$ $d_i \leftarrow l_i - d = 500 - 300 = 200$ $TTT \leftarrow TTT + t = 20 + 10 = 30$ $(d_i = 200 > 0)$ $t \leftarrow T = 10$ $k \leftarrow k - 1 = 1 - 1 = 0$ $l_i \leftarrow d_i = 200$
3 $(k = 0 \geq 0$ **and** $i = 2 \geq 0)$ $d \leftarrow v_2(0) \cdot t = 30 \cdot 10 = 300$ $d_i \leftarrow l_i - d = 200 - 300 = -100$ $TTT \leftarrow TTT + t = 30 + 10 = 40$ $(d_i = -100 < 0)$ $t \leftarrow -d_i / v_2(0) = -(-100)/30 = 3.33$ $i \leftarrow i - 1 = 2 - 1 = 1$ $l_i \leftarrow l_2 = 500$	4 $(k = 0 \geq 0$ **and** $i = 2 \geq 0)$ $d \leftarrow v_1(0) \cdot t = 20 \cdot 3.33 = 66.6$ $d_i \leftarrow l_i - d = 500 - 66.6 = 433.4$ $TTT \leftarrow TTT + t = 40 + 3.33 = 43.33$ $(d_i = 433.4 > 0)$ $t \leftarrow T = 10$ $k \leftarrow k - 1 = 0 - 1 = -1$ $l_i \leftarrow d_i = 433.4$

5

$(k=-1<0)$

$(k=-1<0$ and $i=1\geq 0)$

'Warning: not enough'

'recorded time steps'

	i	$N=3$	2	1	0
	l_i [m]	500	500	500	500
k	$v_i(k)$ [m/s]				
0		20	30 3	20 4	15
1		20	30 2	15	15
2		25 1	35	15	15
$K=3$		25 0	35	15	15

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Carlson, R. C., Papamichail, I., Papageorgiou, M., Messmer, A., 2010. *Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks, Transportation Research,pp. 193-212.*

[2] Kotsialos, A.,Papageorgiou, M.,Diakaki, C., Pavlis, Y.,Middelham, F.,2002. *Traffic Flow Modeling of Large-Scale Motorway Networks Using the Macroscopic Modeling Tool METANET, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.*

[3] Carlson, R. C., Papamichail, I., Papageorgiou, M. . *Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.

[4] Technical University of Crete, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Messmer, A. . *METANET,a simulation program for motorway networks.*

[5] Carlson, R. C., Papamichail, I., Papageorgiou, M., Messmer, A., 2010. *Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering*,Transportation Science 44 (2),pp. 238-253.

[6] Papageorgiou, M., Haj-Salem, H., Blosseville, J. M., 1991. *ALINEA: a local feedback control law for on-ramp metering.*,Transportation Research Record 1320,pp. 58-64..

[7] Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., Papamichail, I., 2008. *Effects of variable speed limits on motorway traffic flow.*Transportation Research Record 2047,pp. 37-48.

[8] Papamichail, I., Kampitaki, K., Papageorgiou, M., Messmer, A., 2008. *Integrated ramp metering and variable speed limit control of motorway traffic flow.* In: Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, pp. 14084-14089 (CD-ROM).