



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

**ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ
ΡΟΗΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ ΜΕΣΩ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΑΜΠΩΝ
ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΟΡΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ**

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης.

Υπό
Αικατερίνη Καμπιτάκη

Χανιά, 2008

© Copyright Αικατερίνη Καμπιτάκη, 2008

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή της Αικατερίνης Καμπιτάκης εγκρίθηκε από:

1. Λέκτ. Ιωάννης Παπαμιχαήλ (επιβλέπων):.....
2. Καθ. Μάρκος Παπαγεωργίου:.....
3. Επικ. Καθ. Ηλίας Κοσματόπουλος:.....

Σύντομο Βιογραφικό Σημείωμα

Η Αικατερίνη Καμπιτάκη γεννήθηκε στο Ηράκλειο Κρήτης τον Ιανουάριο του 1980. Το 2004 αποφοίτησε από το Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η διπλωματική της εργασία είχε τίτλο «Εφοδιαστική Διαχείριση-Η περίπτωση της εμπορικής εταιρίας “ΤΟΥΟΤΑ-ΤΗΛΕΜΑΧΟΣ Α.Ε.”». Συνέχισε της σπουδές της στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος στον τομέα της Επιχειρησιακής Έρευνας. Κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών της εργάστηκε στο εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης σαν επιστημονικός συνεργάτης.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Λέκτ. Ιωάννη Παπαμιχαήλ για την πολύτιμη βοήθεια του, τις γνώσεις που μου παρείχε και την υπομονή που επέδειξε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθ. Μάρκο Παπαγεωργίου για την σημαντική καθοδήγηση και βοήθεια που παρείχε, καθώς και όλα τα μέλη του εργαστηρίου Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1	Κυκλοφοριακή συμφόρηση.....	12
1.2	Το θεμελιώδες διάγραμμα (fundamental diagram).....	14
1.3	Μέτρα ελέγχου της κυκλοφορίας.....	14
1.4	Έλεγχος ραμπών εισόδου.....	15
1.4.1	Στρατηγικές ελέγχου των ραμπών εισόδου.....	17
1.5	Μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας.....	19
1.6	Μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής.....	24
2	ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ Μ42.....	26
2.1	Περιγραφή του δικτύου.....	26
2.2	Διαθέσιμα δεδομένα.....	27
2.3	Επεξεργασία των δεδομένων.....	28
2.3.1	Γραφική απεικόνιση δεδομένων.....	28
2.3.2	Καμπύλη ροής-ποσοστού κάλυψης (θεμελιώδες διάγραμμα - fundamental diagram).....	32
2.3.3	Επεξεργασία των παραμέτρων των θεμελιωδών διαγραμμάτων.....	34
2.4	Το προτεινόμενο μοντέλο.....	38
2.4.1	Επεξεργασία των νέων παραμέτρων του προτεινόμενου μοντέλου... ..	45
3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ.....	47
3.1	Εισαγωγή.....	47
3.2	Ο μακροσκοπικός προσομοιωτής METANET.....	47
3.2.1	Μοντελοποίηση του δικτύου.....	47
3.2.2	Μοντελοποίηση συνδέσμων.....	48
3.2.3	Μοντελοποίηση των κόμβων του δικτύου.....	55
3.2.4	Υπολογιζόμενα κριτήρια.....	56
3.3	Το λογισμικό AMOC.....	58
3.3.1	Η στρατηγική ελέγχου AMOC.....	59
4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	62
4.1	Περιγραφή του δικτύου.....	62
4.2	Περιγραφή σεναρίων.....	64
4.3	Σενάριο 0.....	64
4.4	Σενάριο 1.....	65

4.5	Σενάριο 2.....	66
4.6	Σενάριο 3.....	68
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Ένα κυκλοφοριακό δίκτυο [2]	11
Σχήμα 1-2: Θεμελιώδες διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης (α) Θεμελιώδες διάγραμμα ταχύτητας-ροής (b)	14
Σχήμα 1-3: Κυκλοφοριακή ροή με έλεγχο [4]	15
Σχήμα 1-4: Ράμπα Εισόδου	16
Σχήμα 1-5: Μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας	20
Σχήμα 1-6: Επίδραση των VSL στην διαμόρφωση της ταχύτητας των οχημάτων ένα αυτοκινητόδρομων δύο λωρίδων όπως αυτό μελετήθηκε από τον (Zackor, 1991) [8].	21
Σχήμα 1-7: Οι διαφορές στο θεμελιώδες διάγραμμα για διαφορετικά όρια ταχύτητας	22
Σχήμα 1-8: Το μοντέλο του Cremer για την επίδραση των VSL όπου το $b=1, 0.8, 0.6$ αναφέρεται στις περιπτώσεις χωρίς όριο ταχύτητας, με $VSL=0.7v_f$ και σε $VSL=0.6v_f$ αντίστοιχα.	22
Σχήμα 1-9: Το μοντέλο του Hegyi για την επίδραση των VSL.	23
Σχήμα 2-1: Γραφική αναπαράσταση όλων των μετρήσεων από μια ημέρα, την 2 Μαρτίου 2006.	29
Σχήμα 2-2: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για $VSL=40mph$	29
Σχήμα 2-3: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για $VSL=50mph$	30
Σχήμα 2-4: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για $VSL=60mph$	30
Σχήμα 2-5: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για $VSL=70mph$	31
Σχήμα 2-6: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για όλα τα VSL $40mph, 50mph, 60mph$ και $70mph$	31
Σχήμα 2-7: Θεμελιώδες διάγραμμα για $VSL=40mph$	32
Σχήμα 2-8: Θεμελιώδες διάγραμμα για $VSL=50 mph$	33
Σχήμα 2-9: Θεμελιώδες διάγραμμα για $VSL=60 mph$	33
Σχήμα 2-10: Θεμελιώδες διάγραμμα για $VSL=70 mph$	34
Σχήμα 2-11: Διάγραμμα $v_{free}(veh/h/\%)-b$	35

Σχήμα 2-12: Διάγραμμα $v_{free}(mph)-b$	36
Σχήμα 2-13: Διάγραμμα $occ_{cr}-b$	36
Σχήμα 2-14: Διάγραμμα $a-b$	37
Σχήμα 2-15: Διάγραμμα $capacity-b$	37
Σχήμα 2-16: Προσαρμογή των γραμμικών σχέσεων στις τιμές των παραμέτρων.....	40
Σχήμα 2-17: Νέο βασικό διάγραμμα για το $VSL=40 mph$ και σύγκριση του με το αρχικό θεμελιώδες διάγραμμα.....	41
Σχήμα 2-18: Νέο βασικό διάγραμμα για το $VSL=50 mph$ και σύγκριση του με το αρχικό θεμελιώδες διάγραμμα.....	42
Σχήμα 2-19: Νέο βασικό διάγραμμα για το $VSL=60 mph$ και σύγκριση του με το αρχικό θεμελιώδες διάγραμμα.....	43
Σχήμα 2-20: Νέο βασικό διάγραμμα για το $VSL=70 mph$ και σύγκριση του με το αρχικό θεμελιώδες διάγραμμα.....	44
Σχήμα 2-21: Γραφική αναπαράσταση του $capacity$ του προτεινόμενου μοντέλου, συναρτήσει του b	45
Σχήμα 2-22: Σχετική μεταβολή της ικανότητας ($capacity$) του προτεινόμενου μοντέλου	46
Σχήμα 3-1 Διακριτά τμήματα ενός συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου	48
Σχήμα 3-2: Θεμελιώδη διαγράμματα για διαφορετικά VSL	50
Σχήμα 3-3: Δυνατή εκροή από μια ράμπα συναρτήσει των κυκλοφοριακών συνθηκών του αυτοκινητοδρόμου.....	52
Σχήμα 4-1: Ο τριών λωρίδων αυτοκινητόδρομος	63
Σχήμα 4-2: Η τραπεζοειδής μορφή της ζήτησης στις ράμπες εισόδου O1 και O2	63
Σχήμα 4-3: χωρίς έλεγχο	64
Σχήμα 4-4: Συντονισμένος έλεγχος στις ράμπες.....	66
Σχήμα 4-5: Έλεγχος με VSL	67
Σχήμα 4-6: Οι βέλτιστες τροχιές των μεταβολών του VSL για κάθε ομάδα τμημάτων , στην περίπτωση του ελέγχου μόνο με VSL	67
Σχήμα 4-7: Ολοκληρωμένος έλεγχος	68
Σχήμα 4-8: Οι βέλτιστες τροχιές των μεταβολών του VSL για κάθε ομάδα τμημάτων , στην περίπτωση του ολοκληρωμένου ελέγχου.....	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Τα δεδομένα από τον M42	28
Πίνακας 2: Οι τιμές των παραμέτρων για $VSL=40\text{ mph}$	41
Πίνακας 3: Οι τιμές των παραμέτρων για $VSL=50\text{ mph}$	42
Πίνακας 4: Οι τιμές των παραμέτρων για $VSL=60\text{ mph}$	43
Πίνακας 5: Οι τιμές των παραμέτρων για $VSL=70\text{ mph}$	44

Κεφάλαιο 1

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες η δραματική αύξηση των οχημάτων ιδιωτικής χρήσεως οδήγησε στην εμφάνιση φαινομένων, περιοδικών και μη, κυκλοφοριακής συμφόρησης στους περιαστικούς αυτοκινητόδρομους. Η (περιοδική) κυκλοφοριακή συμφόρηση έχει ως αποτέλεσμα τη μη αξιοποίηση της ικανότητας, και την υποβάθμιση της πολυδάπανης υποδομής των αυτοκινητόδρομων ειδικότερα κατά τις ώρες αιχμής, προκαλώντας αύξηση του μέσου χρόνου ταξιδιού, μείωση της ασφάλειας και αύξηση των ρύπων. Τα ίδια φαινόμενα έχουμε και στην περίπτωση των μη περιοδικών κυκλοφοριακών συμφορήσεων που προκαλούνται από τυχαία συμβάντα όπως ατυχήματα, εργασίες στον δρόμο κτλ [1].

Πλέον έχει αποδειχθεί ότι η επέκταση των αυτοκινητοδρόμων και η αύξηση επομένως της ικανότητας τους δεν εξαλείφει πλήρως το πρόβλημα. Για την επίτευξη βέλτιστων κυκλοφοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη η πλήρης αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής με την ανάπτυξη και την υλοποίηση σύγχρονων μεθόδων ελέγχου και διαχείρισης, μια εναλλακτική που εφαρμόζεται μέσω της επιστήμης της τηλεματικής και η οποία δέχθηκε ισχυρή ώθηση με τις αλματώδεις εξελίξεις στην τεχνολογία των επικοινωνιών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών.



Σχήμα 1-1: Ένα κυκλοφοριακό δίκτυο [2]

Στην παρούσα διατριβή θα διερευνηθεί η ρύθμιση της κυκλοφοριακής ροής αυτοκινητοδρόμων με την εφαρμογή μεταβαλλόμενων ορίων ταχύτητας (Variable Speed Limits, VSL) και ελέγχου της ροής στις ράμπες εισόδου (Ramp Metering).

Ο έλεγχος της ροής εισόδου στις ράμπες εισόδου του αυτοκινητοδρόμου έχει σαν αποτέλεσμα την συσσώρευση αυτοκινήτων σε αυτές, έτσι ώστε να αποφευχθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση στον αυτοκινητόδρομο οδηγώντας σε μείωση του συνολικού χρόνου αναμονής. Η συγκεκριμένη μέθοδος ρύθμισης εφαρμόζεται μέσω μεταβλητών ελέγχου στο μοντέλο που χρησιμοποιείται από τον μακροσκοπικό προσομοιωτή κυκλοφοριακής ροής METANET, και στο λογισμικό AMOC το οποίο κάνει χρήση μεθόδων βέλτιστου ελέγχου για τη ρύθμιση της κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομους.

Τα μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας έχουν εφαρμοστεί ήδη σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο. Η βασική τους επίδραση στην κυκλοφοριακή ροή είναι η μείωση της μέσης ταχύτητας και η ομοιογενοποίηση των ταχυτήτων, για παράδειγμα η μείωση της διαφοράς των ταχυτήτων μεταξύ των οχημάτων και των μέσων ταχυτήτων μεταξύ των λωρίδων του αυτοκινητόδρομου. Η επίδραση των μεταβαλλόμενων ορίων ταχύτητας στην κυκλοφοριακή ροή θα παρουσιαστεί μέσω ενός ποσοτικού μοντέλου το οποίο προτείνεται για πρώτη φορά. Το μοντέλο αυτό θα επικυρωθεί με χρήση μετρήσεων από τον αυτοκινητόδρομο M42 του Ηνωμένου Βασιλείου και θα ενσωματωθεί στο μακροσκοπικό μοντέλο που χρησιμοποιείται από το METANET και το AMOC. Για το σκοπό αυτό θα εισαχθούν τα μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας μέσω καινούργιων μεταβλητών ελέγχου.

Συγκεκριμένα στο *πρώτο κεφάλαιο* θα δοθούν γενικές πληροφορίες που αφορούν την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τα μέτρα ελέγχου αυτής. Στο *δεύτερο κεφάλαιο* θα αναλυθούν οι μετρήσεις από τον αυτοκινητόδρομο M42, που χρησιμοποιήθηκαν για την επικύρωση του ποσοτικού μοντέλου που προτείνεται. Στο *τρίτο κεφάλαιο* θα παρουσιαστούν ο μακροσκοπικός προσομοιωτής METANET και το λογισμικό AMOC. Στο *τέταρτο κεφάλαιο* θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου σε δίκτυο αυτοκινητοδρόμου. Τέλος στο *πέμπτο κεφάλαιο* θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα από την παρούσα μελέτη.

1.1 Κυκλοφοριακή συμφόρηση

Κυκλοφοριακή συμφόρηση παρουσιάζεται όταν μεγάλος αριθμός οχημάτων προσπαθεί να χρησιμοποιήσει μια κοινή υποδομή μετακίνησης με περιορισμένη ικανότητα. Τα κορεσμένα κυκλοφοριακά συστήματα έχουν πολλές αρνητικές

επιπτώσεις όπως είναι η αύξηση του απαιτούμενου χρόνου ταξιδιού, η ψυχολογική πίεση στους οδηγούς, η μειωμένη οδική ασφάλεια, η αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και η σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση.

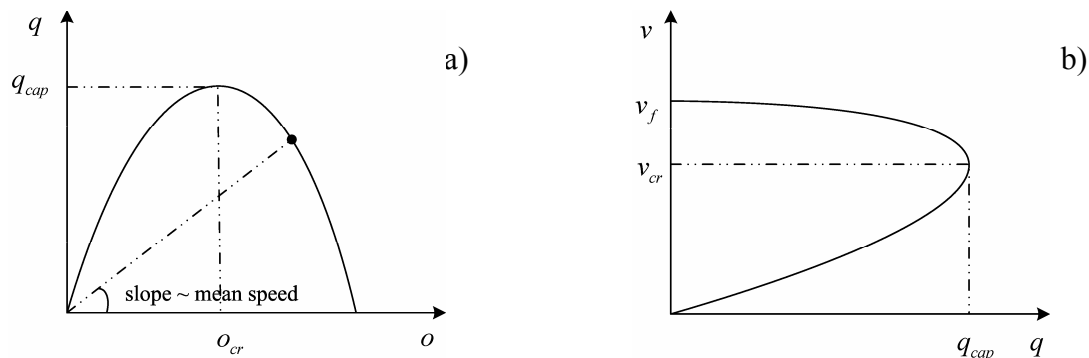
Η κυκλοφοριακή συμφόρηση συνήθως αποδίδεται σε ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω φαινόμενα [2]:

- Η υψηλή ροή από τις ράμπες εισόδου σε συνδυασμό με την ροή στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητόδρομου (mainstream flow) έχει σαν αποτέλεσμα την υπέρβαση της ικανότητας του αυτοκινητοδρόμου και επομένως τη δημιουργία συμφόρησης λίγα μέτρα κατάντη της ράμπας εισόδου.
- Η μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας (bottleneck) σε διάφορες περιοχές, που μπορεί να οφείλεται στην ελάττωση των λωρίδων κυκλοφορίας (στένωση του δρόμου), σε υψηλή καμπυλότητα ή κλίση του δρόμου, σε τούνελ, σε περιοχή με όριο ταχύτητας κτλ, μπορεί να επιφέρει την εκδήλωση συμφόρησης όταν η ροή είναι μεγαλύτερη από την ικανότητα του δρόμου στις περιοχές αυτές.
- Συμφόρηση (congestion spillback) μπορεί να εμφανιστεί όταν η ροή εξόδου από ένα αυτοκινητόδρομο (μέσω ραμπών εξόδου για παράδειγμα) δεν μπορεί εξυπηρετηθεί από το δίκτυο που καταλήγει η έξοδος αυτή, ή όταν ο αριθμός των οχημάτων που εγκαταλείπουν τον αυτοκινητόδρομο υπερβαίνει την ικανότητα της ράμπας εξόδου.
- Διάφορα συμβάντα, όπως για παράδειγμα κάποιο ατύχημα ένα χαλασμένο ή ένα πολύ αργό όχημα, ή ακόμα και άσχημα καιρικά φαινόμενα, έχουν ως αποτέλεσμα την εκδήλωση μη περιοδικών συμφορήσεων.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της κυκλοφοριακής συμφόρησης υπάρχουν δύο προσεγγίσεις σε στρατηγικό επίπεδο σχεδιασμού. Η πρώτη είναι η αύξηση της ικανότητας με την κατασκευή καινούργιων δρόμων, ενώ η δεύτερη είναι προσπάθεια ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής με διάφορες μεθόδους του αυτομάτου ελέγχου έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη χρήση της υποδομής αυτής. Είναι εμφανές ότι με τον κατάλληλο συνδυασμό των στρατηγικών αυτών μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση ή και εξάλειψη των κυκλοφοριακών συμφορήσεων και των αρνητικών συνεπειών τους.

1.2 Το θεμελιώδες διάγραμμα (fundamental diagram)

Με την υπόθεση ότι η χωρική και χρονική εξέλιξη των κυκλοφοριακών συνθηκών δεν μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου, η κατάσταση της κυκλοφοριακής ροής είναι δυνατόν να προσεγγιστεί βάση ενός διαγράμματος [3]. Το διάγραμμα αυτό είναι γνωστό ως *θεμελιώδες διάγραμμα (fundamental diagram)* και μπορεί να είναι διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης, ή διάγραμμα ροής-ταχύτητας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-2.



Σχήμα 1-2: Θεμελιώδες διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης (α) Θεμελιώδες διάγραμμα ταχύτητας-ροής (β)

Όπου (Σχήμα 1-2) q είναι η κυκλοφορική ροή (veh/h), o είναι το ποσοστό κατάληψης (%), v είναι η μέση ταχύτητα (km/h), q_{cap} είναι η ικανότητα του δικτύου, o_{cr} είναι το κρίσιμο ποσοστό κατάληψης όπου η ροή του αυτοκινητόδρομου γίνεται μέγιστη, v_f είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής και v_{cr} είναι η κρίσιμη μέση ταχύτητα.

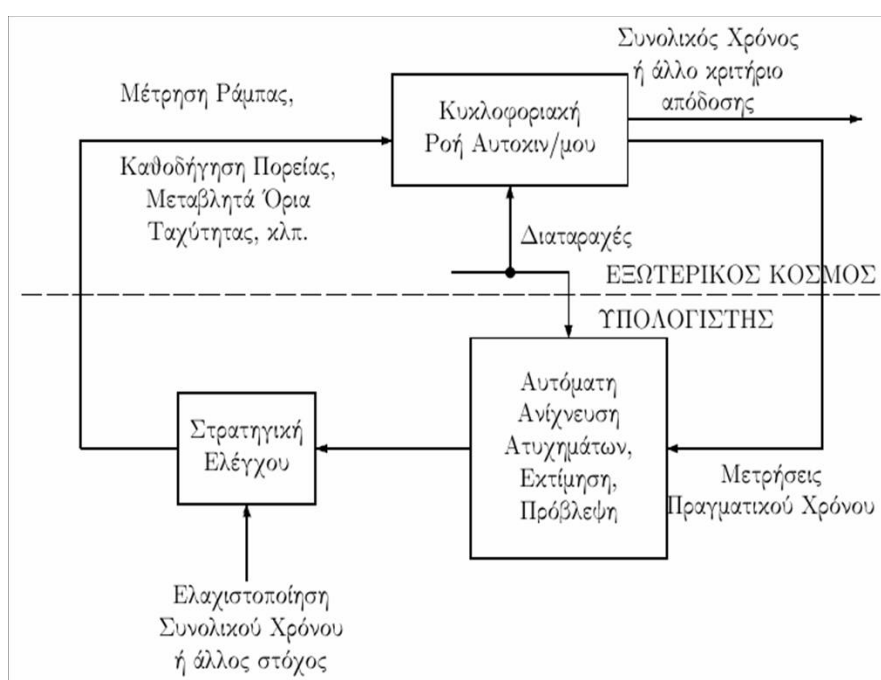
1.3 Μέτρα ελέγχου της κυκλοφορίας

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ζητούμενη παρέμβαση στο φαινόμενο της κυκλοφοριακής ροής, απαιτούνται μηχανισμοί και μέθοδοι παρέμβασης (Σχήμα 1-3) ικανές να επηρεάσουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες με τρόπο συστηματικό και συνεκτικό [4]. Τα κύρια μέτρα ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα δίκτυο αυτοκινητόδρομων είναι η ρύθμιση της ροής στις ράμπες εισόδου (ramp metering), η καθοδήγηση πορείας (route guidance), τα μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας (variable

speed limits), ο έλεγχος ροής από αυτοκινητόδρομο σε αυτοκινητόδρομο και οι πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων (variable message sign).

Ο συντονισμός των μέτρων ελέγχου αποτελεί ιδιότητα μιας συνολικής στρατηγικής ελέγχου που έχει υπό την εποπτεία της μέτρα ελέγχου του ίδιου ή διαφορετικού είδους. Κατά σύμβαση ονομάζουμε τον έλεγχο που παρέχεται από μια στρατηγική ελέγχου, που λαμβάνει υπόψη της μέτρα ελέγχου του ίδιου είδους, συντονισμένο έλεγχο, ενώ όταν υπάρχουν διαφορετικού είδους μέτρα ελέγχου, λέμε ότι έχουμε ολοκληρωμένο έλεγχο.

Στην συγκεκριμένη εργασία θα εφαρμόσουμε στρατηγική που παρέχει ολοκληρωμένο έλεγχο με δυο διαφορετικού είδους μέτρα όπως ήδη αναφέρθηκε, την ρύθμιση της ροής στις ράμπες εισόδου και τα μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας. Στις δύο παραγράφους που ακολουθούν θα δοθούν πληροφορίες για τα δύο αυτά μέτρα.



Σχήμα 1-3: Κυκλοφοριακή ροή με έλεγχο [4]

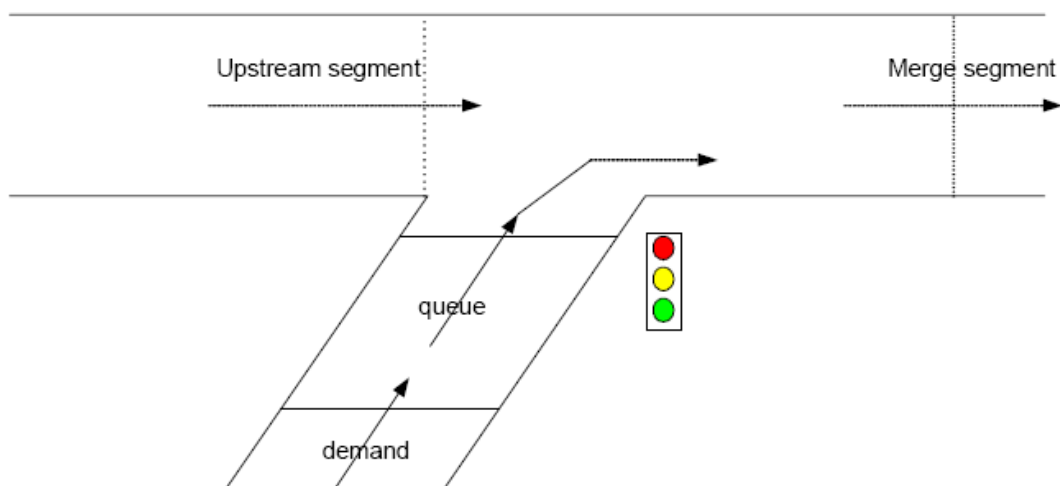
1.4 Έλεγχος ραμπών εισόδου

Ο έλεγχος της ράμπας εισόδου είναι ένα από τα βασικά και πλέον αποτελεσματικά μέτρα ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων. Η βασική αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στη συνεχή ρύθμιση, με βάση κάποιο προαποφασισμένο κανόνα, που ονομάζεται στρατηγική ελέγχου. Η στρατηγική ελέγχου έχει να κάνει με την απόφαση του αριθμού των οχημάτων που επιτρέπεται να

εισέλθουν στο κυρίως ρεύμα της κυκλοφοριακής ροής του αυτοκινητοδρόμου μέσω των ραμπών εισόδου.

Καθώς η ικανότητα της ράμπας μειώνεται, αλλά και για λόγους ισοτιμίας ο έλεγχος ραμπών μπορεί να εφαρμοστεί σε περισσότερες από μια ράμπες εισόδου (συντονισμένος έλεγχος ραμπών), επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό μέγιστη αποδοτικότητα. Συντονισμένος έλεγχος ραμπών εισόδου με την χρησιμοποίηση βέλτιστου ελέγχου, έχει εκτενώς μελετηθεί στο παρελθόν (βλέπε [1], [5]).

Στο Σχήμα 1-4 φαίνεται μια ράμπα εισόδου μέσω της οποίας εισέρχονται οχήματα στον αυτοκινητόδρομο [4]. Ο αυτοκινητόδρομος χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα ανάντη της ράμπας (upstream) και ένα κατάντη της ράμπας (merge). Η κυκλοφοριακή ζήτηση (demand) που εμφανίζεται στην αρχή της ράμπας εισόδου, είτε από κάποιο αστικό δίκτυο, είτε από κάποιον άλλο αυτοκινητόδρομο, αναμιγνύεται με τη ροή του αυτοκινητοδρόμου που κατέρχεται από το ανάντη τμήμα και προωθείται στο κατάντη τμήμα του αυτοκινητόδρομου.



Σχήμα 1-4: Ράμπα Εισόδου

Όπως είναι φανερό η ζήτηση της ράμπας ικανοποιείται εις βάρος της πεπερασμένης ικανότητας του αυτοκινητοδρόμου. Επίσης η διαδικασία μίξης των οχημάτων της ανάντη ροής με τη ροή της ράμπας, οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας στην περιοχή γύρω από τη ράμπα. Αυτή η μείωση μεγιστοποιείται, όταν η είσοδος της ράμπας δεν είναι ελεγχόμενη.

Προκειμένου να αποφευχθεί η άναρχη είσοδος των οχημάτων της ράμπας στον αυτοκινητόδρομο, τοποθετείται φωτεινός σηματοδότης στην διασταύρωση της

ράμπας με τον αυτοκινητόδρομο. Η στρατηγική ελέγχου προσδιορίζει τη λειτουργία του φωτεινού σηματοδότη έτσι ώστε να ρυθμίζεται η είσοδος των οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο, σύμφωνα με τα κριτήρια και τους στόχους σχεδιασμού της.

Η λειτουργία ενός φωτεινού σηματοδότη έχει προκαθορισμένες μορφές. Μια πολιτική είναι αυτή που επιτρέπει την είσοδο μόνο ενός αυτοκινήτου κάθε φορά που ανάβει πράσινο (one-car-per-green). Μια δεύτερη πολιτική είναι αυτή που κάνει χρήση της περιόδου φωτεινής σηματοδότησης, όπως δηλαδή και στα αστικά δίκτυα (cycle time). Και μια τρίτη είναι αυτή των μεταβαλλόμενων διακριτών ροών εισόδου (discrete release rates).

1.4.1 Στρατηγικές ελέγχου των ραμπών εισόδου

Οι στρατηγικές ελέγχου των ραμπών εισόδου στοχεύουν στον προσδιορισμό της κυκλοφοριακής ροής που θα πρέπει να εισέλθει από την ουρά της ράμπας στην κυκλοφορία κατά τη διάρκεια ενός διακριτού βήματος ελέγχου [1].

Στρατηγικές Σταθερού χρόνου (fixed-time ramp metering strategies)

Στις στρατηγικές αυτές οι αναγκαίοι υπολογισμοί δεν γίνονται σε πραγματικό χρόνο αλλά χρησιμοποιούνται παλαιότερα δεδομένα και βασίζονται σε απλά στατικά μοντέλα, όπου οι σηματοδότες ρυθμίζονται ανάλογα με την ώρα. Το ότι οι στρατηγικές αυτές βασίζονται σε παλαιότερα δεδομένα και όχι σε δεδομένα της τρέχουσας κυκλοφοριακής κατάστασης αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα τους καθώς οδηγεί σε υπεραπλούστευση του προβλήματος ελέγχου εξαιτίας των παρακάτω:

- Η ζήτηση δεν είναι σταθερή μέσα στη μέρα και μπορεί να μεταβάλλεται από μέρα σε μέρα.
- Το πλήθος των οχημάτων που εγκαταλείπουν τον αυτοκινητόδρομο μεταβάλλεται ανάλογα.
- Τα ιστορικά δεδομένα παρουσιάζουν το φαινόμενο της γήρανσης, κάτι που κάνει και τα βελτιστοποιημένα πλάνα ξεπερασμένα με τον καιρό.
- Ατυχήματα και άλλα απρόβλεπτα συμβάντα μπορεί να διαταράσσουν την κυκλοφορία και για τα οποία δεν μπορεί να προσδιορισθεί η πρότερη αντίδραση της στρατηγικής εκ των προτέρων και χωρίς την χρήση πραγματικών μετρήσεων.

Ο έλεγχος ροής λοιπόν με ρύθμιση στις ράμπες εισόδου είναι μια αποτελεσματική μέθοδος αλλά αν δεν είναι ακριβής τότε οι κυκλοφοριακές συμφορήσεις δύσκολα εξαλείφονται και η ικανότητα του αυτοκινητόδρομου δεν αξιοποιείται πλήρως. Οι στρατηγικές που ακολουθούν κάνουν χρήση μετρήσεων πραγματικού χρόνου.

Φωρατές-Μετρήσεις πραγματικού χρόνου

Οι στρατηγικές αυτές βασίζονται σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου. Ο φωρατής είναι η πιο διαδεδομένη μορφή αισθητήρα σε οδικά δίκτυα, πρόκειται για ένα ορθογώνιο πλαίσιο που τοποθετείται σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας. Με τους φωρατές είναι δυνατή η μέτρηση των οχημάτων που περνούν πάνω από αυτούς καθώς και η ταχύτητα αυτών. Οι στρατηγικές αυτές χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες όπως αυτές παρουσιάζονται στην συνέχεια

α) Τοπικές στρατηγικές (local ramp metering)

Οι στρατηγικές αυτές χρησιμοποιούν μετρήσεις που λαμβάνονται από αισθητήρες που βρίσκονται τοποθετημένοι στην περιοχή γύρω από την ελεγχόμενη ράμπα. Οι πιο γνωστές στρατηγικές τοπικού ελέγχου είναι η στρατηγική ζήτησης-ικανότητας (demand-capacity) και η στρατηγική ποσοστού κατάληψης. Η στρατηγική ζήτησης-ικανότητας επιχειρεί να προσθέσει στη ροή που μετράτε ανάντη, τόση ροή όση είναι αναγκαία έτσι ώστε η κατάντη ροή να φτάσει την ικανότητα του αυτοκινητοδρόμου. Αν όμως η κατάντη ροή γίνει μεγαλύτερη της κρίσιμης, τότε η ροή της ράμπας γίνεται ίση με την ελάχιστη δυνατή προκειμένου να αποφευχθεί μια συμφόρηση στο κατάντη τμήμα. Η στρατηγική ποσοστού κατάληψης βασίζεται στην ίδια φιλοσοφία με την στρατηγική ζήτησης-ικανότητας, με την διαφορά ότι χρησιμοποιεί μια εκτίμηση της ροής εισόδου στο δίκτυο, που επιτυγχάνεται με την χρήση μετρήσεων του ποσοστού κατάληψης στο ανάντη τμήμα του αυτοκινητοδρόμου.

Οι τοπικές στρατηγικές εφαρμόζουν μια διαδικασία ανοικτού βρόγχου, η οποία όπως είναι γνωστό είναι αρκετά ευαίσθητη στις μη μετρήσιμες διαταραχές. Ωστόσο έχει προταθεί μια εναλλακτική τοπική στρατηγική ελέγχου με ανατροφοδότηση (κλειστού βρόχου) η ALINEA.

β) Πολυμεταβλητές στρατηγικές ρύθμισης (Multivariable Regulator strategies)

Οι στρατηγικές αυτές χρησιμοποιούν μετρήσεις που λαμβάνονται από ένα μεγάλο τμήμα του αυτοκινητοδρόμου. Ενώ λοιπόν ο τοπικός έλεγχος εφαρμόζεται ξεχωριστά και ανεξάρτητα για κάθε ράμπα, ο πολυμεταβλητός έλεγχος κάνει χρήση όλων των διαθέσιμων μετρήσεων του δικτύου προκειμένου να γίνει ρύθμιση των ροών σε όλες

τις ελεγχόμενες ράμπες εισόδου. Η πολυμεταβλητή στρατηγική METALINE μπορεί να θεωρηθεί σαν μια επέκταση της τοπικής στρατηγικής ALINEA.

Στρατηγικές μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου (nonlinear Optimal ramp metering strategies)

Οι στρατηγικές αυτές εφαρμόζουν την κατάλληλη ρύθμιση στο δίκτυο έτσι ώστε να γίνει ελαχιστοποίηση ενός αντικειμενικού κριτηρίου όπως ο συνολικός χρόνος ταξιδιού μέσα στον αυτοκινητόδρομο. Είναι υπέρτερες των υπολοίπων γιατί βασίζονται σε ρεαλιστικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους τα παρακάτω:

- την ισχύουσα κατάσταση κυκλοφορίας και στο δίκτυο και στις ράμπες εισόδου
- τις ενδείξεις ζήτησης για ένα χρονικό ορίζοντα μεγάλης διάρκειας
- τους περιορισμούς ικανότητας στις ράμπες εισόδου
- την έντονη μη γραμμική φύση της κυκλοφοριακής ροής χωρίς να καταφεύγουν σε κάποια προσέγγιση (π.χ. νευρωνικά δίκτυα) ή σε κάποια γραμμικοποίηση γύρω από ένα σημείο, συμπεριλαμβανομένου και της περιορισμένης ικανότητας της υποδομής
- οποιοδήποτε τυχαίο συμβάν για παράδειγμα κάποιο ατύχημα, άσχημες καιρικές συνθήκες κ.α.

Μια στρατηγική αυτού του είδους είναι και το AMOC, που αποτελεί βασικό κομμάτι της στρατηγικής που εφαρμόστηκε στην συγκεκριμένη εργασία. Για το AMOC θα αναφερθούμε εκτενώς στην συνέχεια.

Στρατηγικές ολοκληρωμένου ελέγχου

Τα νέα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων περιλαμβάνουν πολλά διαφορετικά είδη μέτρων ελέγχου. Ανταγωνιστικές συμπεριφορές μεταξύ των διαφορετικών μέτρων ελέγχου εφαρμοζόμενων στο ίδιο δίκτυο συναντώνται συχνά προκαλώντας διάφορα προβλήματα, ο συντονισμός των μέτρων ελέγχου είναι η χαρακτηριστική ιδιότητα των στρατηγικών αυτών.

1.5 Μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας

Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη της τεχνολογίας και της τηλεματικής, σε συνδυασμό με την υιοθέτηση της φιλοσοφίας διαχείρισης των οδικών δικτύων, επέτρεψαν την ανάπτυξη νέων συστημάτων κάθετης σήμανσης, που έρχονται να λειτουργήσουν

συμπληρωματικά στο πεδίο των σταθερών πινακίδων, ικανοποιώντας την ανάγκη για, κατά περίπτωση, πιο ευέλικτη και πιο καίρια σήμανση [6]. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως Συστήματα Μεταβλητής Σήμανσης, οι δε πινακίδες ως Πινακίδες Μεταβλητών Μηνυμάτων (Variable Message Signs). Τα μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας (Variable Speeds Limits, VSL) προβάλλονται μέσω τέτοιων πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων και έχουν ήδη εφαρμοστεί σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο. Η βασική τους επίδραση στην κυκλοφοριακή ροή είναι η μείωση της μέσης ταχύτητας και η ομοιογενοποίηση των ταχυτήτων, για παράδειγμα η μείωση της διαφοράς των ταχυτήτων μεταξύ των οχημάτων και των μέσων ταχυτήτων μεταξύ των λωρίδων του αυτοκινητόδρομου. Η εφαρμογή των VSL στις οδικές αρτηρίες είχε ως επακόλουθο την ασφαλέστερη οδήγηση, μειώνοντας σημαντικά την συχνότητα εμφάνισης ατυχημάτων. Στο Σχήμα 1-5 παρουσιάζεται μια πινακίδα σήμανσης μεταβαλλόμενων ορίων ταχύτητας όπως αυτά εφαρμόστηκαν στον περιαστικό αυτοκινητόδρομο M25 του Ηνωμένου Βασιλείου.

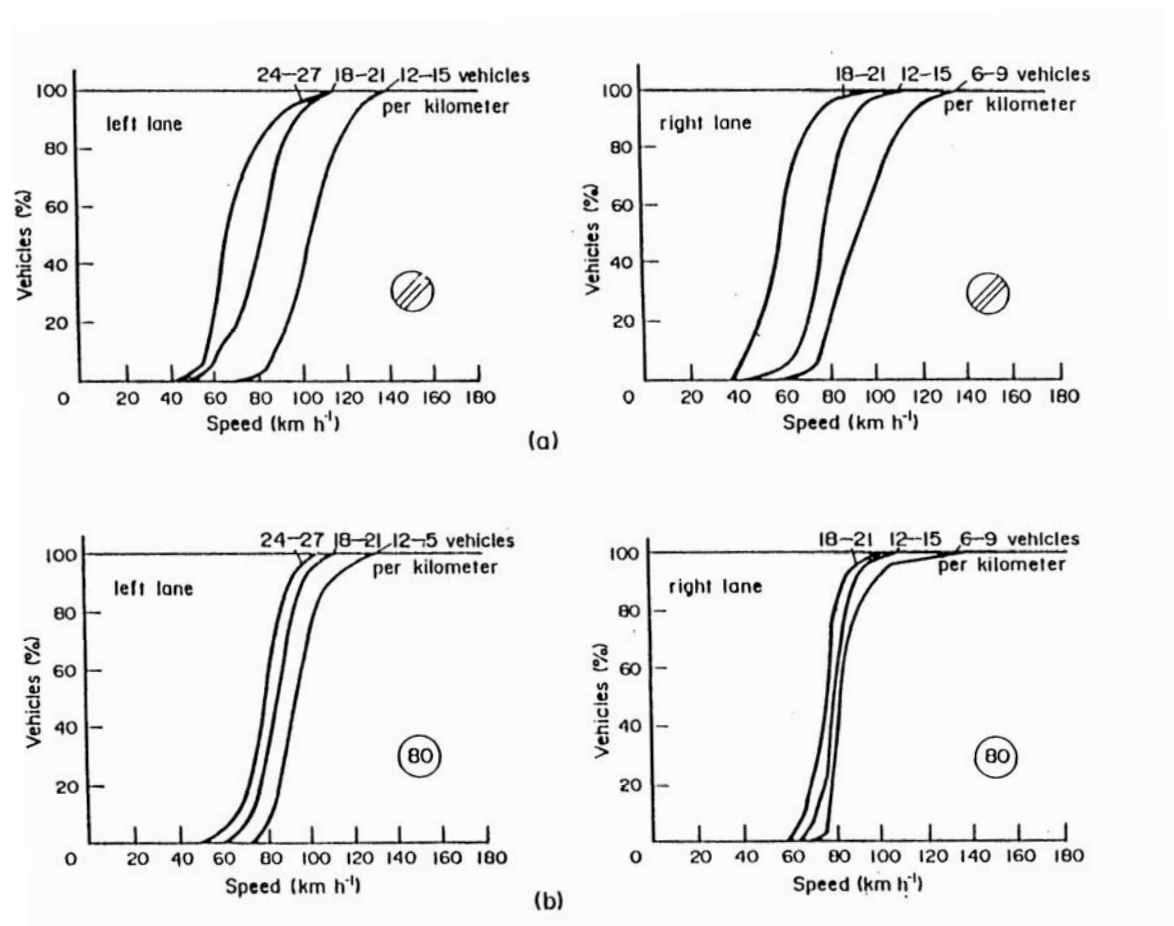
Μετά από μελέτες αρκετών χρόνων πάνω στην οδική ασφάλεια έχει αποδειχθεί μείωση κατά 20-30% των ατυχημάτων μετά την εφαρμογή των VSL. Από την άλλη δεν υπάρχουν ενδείξεις ότι η εφαρμογή των VSL έχει ως επακόλουθο την βελτίωση των συνθηκών της κυκλοφοριακής ροής, όπως είναι η μείωση του χρόνου ταξιδιού. Η μελέτη σχετικών στρατηγικών ελέγχου οι οποίες ενδέχεται να αυξάνουν την αποδοτικότητα της κυκλοφοριακής ροής, απαιτούν μια ακριβή περιγραφή της επίδρασης των VSL στις κυκλοφοριακές συνθήκες.



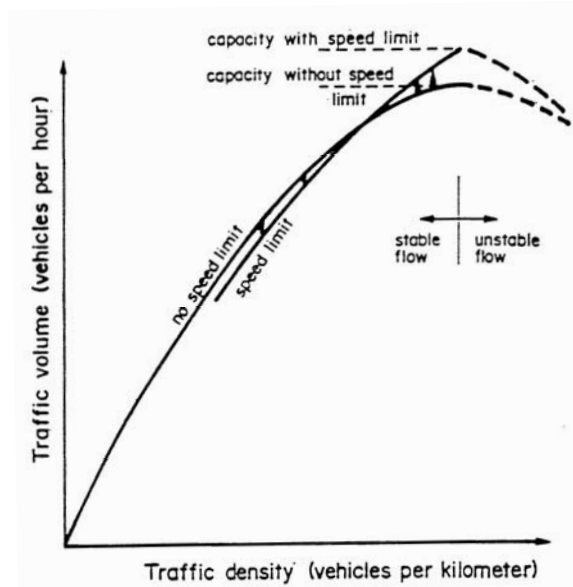
Σχήμα 1-5: Μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας

Έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες έρευνες στο παρελθόν όσον αφορά την ακριβή επίδραση των VSL στην συμπεριφορά της κυκλοφορικής ροής, για παράδειγμα στο θεμελιώδες διάγραμμα. Στο Σχήμα 1-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που

αναφέρθηκαν από τον Zackor [7] και συνοψίστηκαν από τον ίδιο [8], και αναφέρονται σε μετρήσεις που ελήφθησαν από ένα γερμανικό αυτοκινητόδρομο δύο λωρίδων πριν και μετά την εφαρμογή VSL. Σύμφωνα με τον Zackor τα VSL οδηγούν σε μικρότερες διαφορές στις ταχύτητες των οχημάτων για διαφορετικές πυκνότητες. Αυτό είναι εμφανές στο Σχήμα 1-6 καθώς οι τρεις καμπύλες στα διαγράμματα με VSL πλησιάζουν περισσότερο η μια την άλλη σε σχέση με αυτές στα διαγράμματα χωρίς VSL. Παρατηρούμε ακόμα ότι οι καμπύλες στα διαγράμματα με VSL είναι απότομες που σημαίνει ότι έχουμε πιο ομοιογενή κατανομή στις ταχύτητες των οχημάτων. Τέλος, είναι εμφανές στα διαγράμματα με VSL, ότι οι τιμές των μέσων ταχυτήτων των οχημάτων στις δύο λωρίδες είναι πιο κοντά πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει ομοιογενοποίηση των ταχυτήτων και μεταξύ των λωρίδων του αυτοκινητοδρόμου. Ο ίδιος ισχυρίζεται ότι σε περιπτώσεις με αυξημένη κυκλοφορία (αυτοκίνητα/ώρα) έχουμε και υψηλότερες μέσες ταχύτητες (βλέπε Σχήμα 1-7).

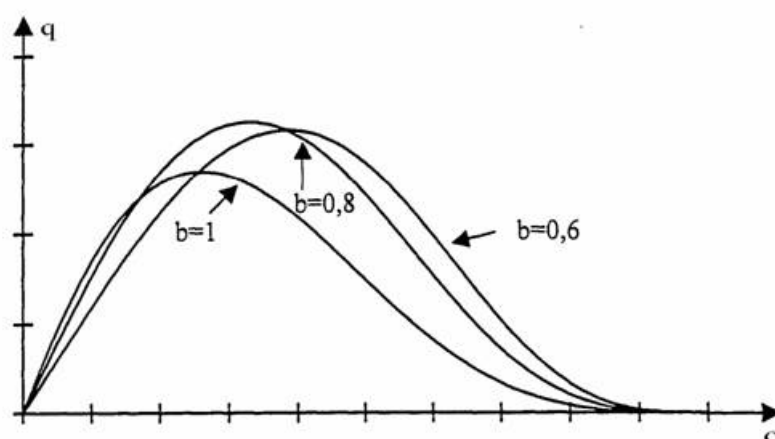


Σχήμα 1-6: Επίδραση των VSL στην διαμόρφωση της ταχύτητας των οχημάτων ένα αυτοκινητόδρομων δύο λωρίδων όπως αυτό μελετήθηκε από τον (Zackor, 1991) [8].



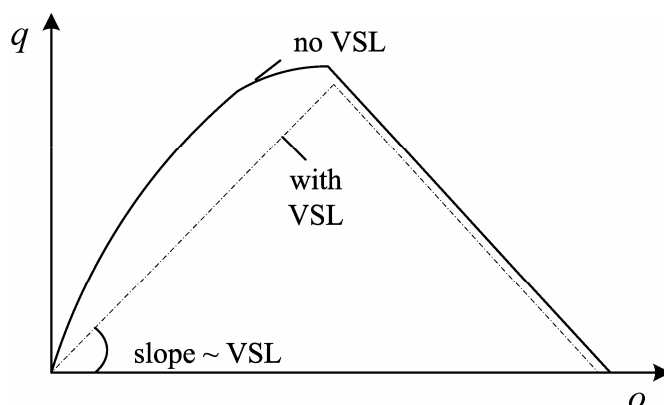
Σχήμα 1-7: Οι διαφορές στο θεμελιώδες διάγραμμα για διαφορετικά όρια ταχύτητας

Τα αποτελέσματα του Zackor ήταν η βάση για τον Cremer [9] να προτείνει ένα ποσοτικό μοντέλο για τις αλλαγές που προκαλούν τα VSL στο θεμελιώδες διάγραμμα (διάγραμμα ροής-πυκνότητας), βλέπε Σχήμα 1-8. Ωστόσο η αύξηση της ικανότητας που προτείνει ο Cremer στην μελέτη του είναι μάλλον υπερβολική, στην πραγματικότητα καμία έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση δεν απέδειξε ότι υφίσταται κάποια αύξηση στην ικανότητα που να οφείλεται σε επίδραση των VSL [10]. Στην συνέχεια το μοντέλο αυτό του Cremer συμπεριλήφθηκε σε ένα γενικό δυναμικό μοντέλο (βλέπε [9]).



Σχήμα 1-8: Το μοντέλο του Cremer για την επίδραση των VSL όπου το $b=1, 0.8, 0.6$ αναφέρεται στις περιπτώσεις χωρίς όριο ταχύτητας, με $VSL=0.7v_f$ και σε $VSL=0.6v_f$ αντίστοιχα.

Ο Hegyi [11] το 2004, σε μια έρευνα για την επίδραση των VSL, αντικατέστησε μερικά το αριστερό μέρος του θεμελιώδους διαγράμματος με μια ευθεία γραμμή η κλίση της οποίας αντιστοιχεί στο όριο ταχύτητας που αντιπροσωπεύει (βλέπε Σχήμα 1-9).



Σχήμα 1-9: Το μοντέλο του Hegyi για την επίδραση των VSL.

Πρόσφατα το 2006, η επίδραση των VSL στην συμπεριφορά της κυκλοφοριακής ροής (συγκεκριμένα στο διάγραμμα ροής-πυκνότητας) ερευνήθηκε σε σχετική μελέτη από τον Παπαγεωργίου κ.α. (βλέπε [5]), η οποία βασίστηκε σε δεδομένα που ελήφθησαν από τον αυτοκινητόδρομο M42 του Ηνωμένου Βασιλείου και στην οποία χρησιμοποιήθηκε ένα αλγόριθμος ελέγχου βασισμένος σε περιορισμούς ροής/ταχύτητας. Τα βασικότερα συμπεράσματα της έρευνας είναι τα εξής:

- Τα Όρια Ταχύτητας όταν εφαρμόζονται σε υποκρίσιμες πυκνότητες έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνεται η κλίση της καμπύλης του διαγράμματος ροής-πυκνότητας. Επιπλέον, το μικρότερο εφαρμοζόμενο όριο ταχύτητας οδηγεί στην μεγαλύτερη μείωση της κλίσης της καμπύλης του ίδιου διαγράμματος. Είναι λοιπόν δυνατόν να περιοριστεί η ροή, καθυστερώντας την εμφάνιση συμφόρησης, στα σημεία με μειωμένη ικανότητα. (βλέπε [11]).
- Οι καμπύλες ροής-πυκνότητας με την εφαρμογή VSL, τέμνουν (τουλάχιστον για μερικά VSL) την καμπύλη χωρίς την εφαρμογή VSL, μετακινώντας την κρίσιμη πυκνότητα σε υψηλότερες τιμές στο διάγραμμα. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατόν να παραμείνουν περισσότερα αυτοκίνητα στον αυτοκινητόδρομο χωρίς να δημιουργηθεί συμφόρηση.

- Όσον αφορά την ενδεχόμενη αύξηση της ροής, με βάση τα δεδομένα που αναλύθηκαν, μια μικρή αύξηση της ικανότητας ήταν εμφανής σε μερικά σημεία ενώ σε άλλα δεν παρουσιάστηκε καμία αύξηση. Αυτή η αύξηση της ικανότητας, όπου αυτή παρουσιάστηκε, είναι δυνατόν να συμβάλει στην δημιουργία μιας κατάλληλης στρατηγικής ελέγχου που να έχει ως στόχο την αύξηση της ροής.

1.6 Μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής

Η μαθηματική αναπαράσταση ενός φυσικού φαινομένου είναι αναγκαία για τη συστηματική και επισταμένη μελέτη του. Η λεπτομέρεια με την οποία αναλύονται τα βασικά συστατικά στοιχεία του φαινομένου, οι αλληλεπιδράσεις τους και η δυναμική τους εξαρτάται από το πλαίσιο μέσα στο οποίο εντάσσεται αυτό το μοντέλο. Για να ικανοποιηθούν διαφορετικές ανάγκες, μπορούν να αναπτυχθούν διαφορετικά μοντέλα του ίδιου φαινομένου. Το κύριο χαρακτηριστικό που επηρεάζει την επιλογή του μοντέλου είναι ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτεί.

Δύο βασικές μοντελοποιήσεις λαμβάνουν χώρα στο φαινόμενο της κυκλοφοριακής ροής σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων ευρείας κλίμακας, η μικροσκοπική η οποία παρακολουθεί την ατομική κίνηση καθενός οχήματος ξεχωριστά καθώς ταξιδεύει μέσα στο δίκτυο, και η μακροσκοπική μοντελοποίηση η οποία περιγράφει την κυκλοφοριακή ροή σαν ένα ρευστό που χαρακτηρίζεται από μακροσκοπικές μεταβλητές όπως είναι η κυκλοφοριακή ροή, η πυκνότητα και η μέση ταχύτητα των οχημάτων [5].

Τα μικροσκοπικά μοντέλα είναι πολύπλοκα, δεν είναι αναλυτικά και έχουν υψηλό υπολογιστικό κόστος, ενώ η καταλληλότητα τους για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κυκλοφορίας είναι περιορισμένη. Σε αντίθεση με αυτά, τα μακροσκοπικά μοντέλα είναι πιο αναλυτικά, και πιο κατάλληλα για την εφαρμογή κυκλοφοριακού ελέγχου πραγματικού χρόνου καθώς έχουν μικρότερο υπολογιστικό κόστος.

Ποικίλα δυναμικά μακροσκοπικά μοντέλα, με την φόρμα των μερικών διαφορικών εξισώσεων, έχουν προταθεί στις δεκάδες των ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα αυτό. Αν και υπάρχει τεράστια βιβλιογραφία όσον αφορά την μακροσκοπική μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής, το υλικό που αφορά τα

μοντέλα που χρησιμοποιούν δεδομένα πραγματικού χρόνου είναι αρκετά περιορισμένο.

Στην παρούσα μελέτη, για την μοντελοποίηση της κυκλοφορίας χρησιμοποιείται το λογισμικό μακροσκοπικής προσομοίωσης METANET. Το METANET χρησιμοποιείται τόσο σαν προσομοιωτής της κυκλοφοριακής ροής όσο και σαν βάση σχεδιασμού στρατηγικής ελέγχου. Στα επόμενα κεφάλαια θα υπάρξει αναλυτικότερη περιγραφή του λογισμικού METANET.

Κεφάλαιο 2

2 ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ Μ42

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα γίνει περιγραφή του αυτοκινητοδρόμου Μ42 του Ηνωμένου Βασιλείου, δεδομένα από τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν για την επικύρωση του μοντέλου που θα παρουσιαστεί στην παρούσα εργασία. Θα ακολουθήσει παρουσίαση και επεξεργασία των δεδομένων αυτών. Τέλος, θα προταθεί το νέο μοντέλο.

2.1 Περιγραφή του δικτύου

Το τμήμα του αυτοκινητόδρομου Μ42 που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της επίδρασης των VSL είναι 3 λωρίδων και εκτείνεται μεταξύ των διασταυρώσεων 3α και 7. Φωρατές είναι εγκατεστημένοι ανά 500 μέτρα κατά μήκος του δρόμου παρέχοντας μετρήσεις για το ποσοστό κάλυψης, την ροή και την ταχύτητα. Από τους χειριστές της κυκλοφορίας του Μ42 (Active Traffic Management, ATM) χρησιμοποιείται ένα σύστημα ελέγχου της κυκλοφορίας με μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας, καθορίζοντας τα όρια ταχύτητας και προβάλλοντας τα μέσω πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων. Σε αυτό το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος ανάδρασης που βασίζεται τόσο στην ροή όσο και στα όρια ταχύτητας, όπως αναλύεται διεξοδικά στα ATKINS Κυκλοφοριακά Συστήματα (ATKINS Transport Systems, 2005, 2006 βλέπε [12] και [13]). Οι τιμές των ορίων που εφαρμόστηκαν αρχικά, ορίστηκαν από μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Highways Agency το 2004 (Mouchelparkman/TRL, 2004 βλέπε [14]). Μετά από εντατικές εργασίες βέλτιστης επιλογής των παραμέτρων (fine tuning) για την καλή απόδοση του συστήματος ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν από τον Ιανουάριο του 2006 νέες διορθωμένες τιμές ορίων.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί δεδομένα ροής-ταχύτητας με συχνότητα ενός λεπτού, όπως αυτά λαμβάνονται από τους φωρατές.

Το όριο ταχύτητας ελαττώνεται αν:

- η ροή περάσει ένα προκαθορισμένο πάνω όριο ροής ή αν
- η ταχύτητα πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο κάτω όριο ταχύτητας

αντίστοιχα το όριο ταχύτητας αυξάνεται αν:

- η ροή πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο κάτω όριο ροής ή αν

- η ταχύτητα περάσει ένα προκαθορισμένο πάνω όριο ταχύτητας

Αρχικά τα όρια υπολογίστηκαν όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε έρευνα, με μια μεθοδολογία που χρησιμοποιεί τα δεδομένα του διαγράμματος ροής-ταχύτητας για μια ενδεικτική ημέρα στην οποία είχαν εφαρμοστεί τα VSL προς κάθε κατεύθυνση (βλέπε [12] και [13]). Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι τα όρια που ορίζονται είναι ανάλογα με την κατεύθυνση. Η μεθοδολογία όμως αυτή έχει δύο μειονεκτήματα (βλέπε [12] και [13]):

- Βασίζεται σε ένα δείγμα ημερήσιων κυκλοφοριακών δεδομένων από κάποιες ημέρες. Λόγω της δυναμικής και της στοχαστικής φύσης της κυκλοφοριακής ροής είναι πολύ απίθανο οι τιμές των ορίων να είναι κατάλληλες για όλες τις κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Σε πολλές περιπτώσεις το διάγραμμα ροής-ταχύτητας παράγεται από δεδομένα μετρήσεων, τα οποία δεν είναι εφοδιασμένα με ένα πλήρες διάγραμμα για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ροής-ταχύτητας, των οποίων οι τιμές των ορίων είναι αδύνατο να υπολογιστούν.

Όπως αναφέρθηκε για την τροποποίηση των αρχικών ορίων πραγματοποιήθηκαν εργασίες βέλτιστης επιλογής των παραμέτρων, και ο αλγόριθμος ελέγχου με VSL με τις νέες τιμές τέθηκε σε λειτουργία από τον Ιανουάριο του 2006. Αυτή η τροποποίηση των ορίων διαφοροποίησε σημαντικά την συμπεριφορά του αλγορίθμου ελέγχου, για παράδειγμα είχε ως συνέπεια την συχνότερη ενεργοποίηση των ορίων ταχύτητας.

2.2 Διαθέσιμα δεδομένα

Τα δεδομένα που ελήφθησαν από τον αυτοκινητόδρομο M42 αφορούσαν την εφαρμογή VSL 40mph, 50mph, 60mph, υπήρχαν επίσης και μετρήσεις στις οποίες δεν υπήρχε VSL, στις περιπτώσεις αυτές το όριο ταχύτητας θεωρήθηκε ίσο με 70mph, καθώς 70mph είναι το από τον νόμο οριζόμενο όριο ταχύτητας στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της επικύρωσης υπήρχαν στην διάθεση μας μετρήσεις από 22 ημέρες από δύο διαφορετικές περιόδους:

- από το έτος 2005 (Απρίλιος και Σεπτέμβριος) όπου δεν ήταν υποχρεωτική η συμμόρφωση των οδηγών με τα VSL και
- από το έτος 2006 (Μάρτιος) όπου η συμμόρφωση των οδηγών με τα VSL ήταν υποχρεωτική.

Από τις ημέρες αυτές οι 5 ήταν βροχερές και οι 17 μη βροχερές. Έγινε διαχωρισμός αυτών και στην επεξεργασία συμπεριλήφθηκαν μόνο η μη βροχερές ημέρες, έτσι ώστε να έχουμε την όσο το δυνατόν μικρότερη επίδραση των εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών. Από τις 17 μη βροχερές ημέρες οι 5 ανήκουν στο έτος 2005 και οι 12 στο 2006. Συγκεκριμένα για το 2005 επειδή δεν ήταν υποχρεωτική η συμμόρφωση των οδηγών με τα VSL επιλέχθηκαν τα δεδομένα χωρίς VSL, στα οποία όπως αναφέρθηκε θεωρήθηκε όριο ταχύτητας ίσο με *70mph*.

Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέρες από τις οποίες ελήφθησαν οι μετρήσεις καθώς επίσης και ποιες από αυτές ήταν μη βροχερές δηλαδή αυτές που τελικά συμπεριλήφθηκαν στην επεξεργασία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Πίνακας 2-1: Τα δεδομένα από τον M42

no	Day	No rainy	no	Day	No rainy
1	4 Απριλίου 2005	√	13	13 Μαρτίου 2006	√
2	5 Σεπτεμβρίου 2005	√	14	14 Μαρτίου 2006	√
3	12 Σεπτεμβρίου 2005	√	15	15 Μαρτίου 2006	√
4	13 Σεπτεμβρίου 2005	√	16	17 Μαρτίου 2006	√
5	21 Απριλίου 2005	√	17	23 Μαρτίου 2006	√
6	2 Μαρτίου 2006	√	18	24 Μαρτίου 2006	√
7	3 Μαρτίου 2006	√	19	27 Μαρτίου 2006	√
8	6 Μαρτίου 2006	√	20	28 Μαρτίου 2006	
9	7 Μαρτίου 2006		21	29 Μαρτίου 2006	√
10	8 Μαρτίου 2006	√	22	30 Μαρτίου 2006	
11	9 Μαρτίου 2006				
12	10 Μαρτίου 2006				

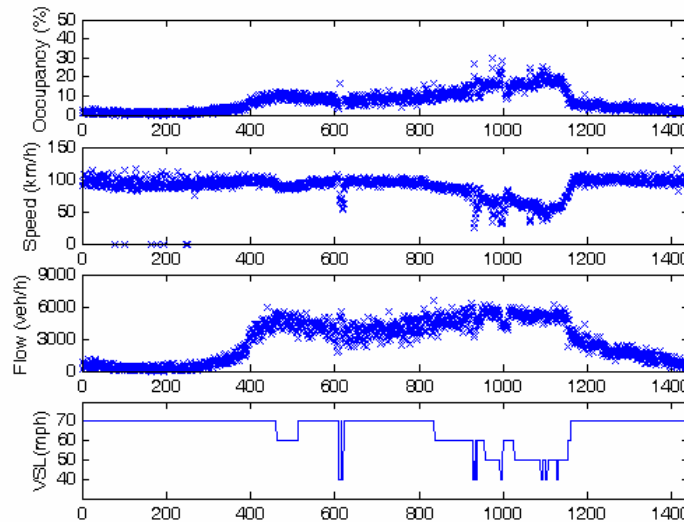
2.3 Επεξεργασία των δεδομένων

2.3.1 Γραφική απεικόνιση δεδομένων

Είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση των δεδομένων για όλες τις ημέρες με την μορφή χρονοσειρών και θεμελιωδών διαγραμμάτων ανά VSL

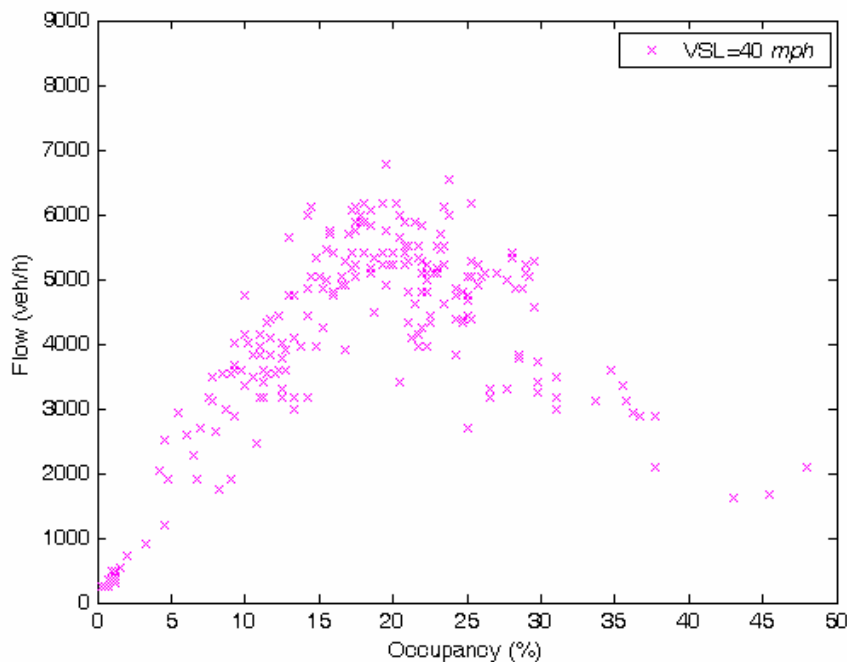
Καταρχάς θα παρουσιαστούν γραφικά τα δεδομένα (ροής, ταχύτητας και ποσοστού κάλυψης) για μια ημέρα, την 2 Μαρτίου 2006, βλέπε Σχήμα 2-1. Για την

συγκεκριμένη ημέρα, αλλά και για κάθε μια από τις 22 ημέρες, υπάρχουν μετρήσεις ανά ένα λεπτό της ώρας. Κάθε μέτρηση περιλαμβάνει τιμές για την ροή, την ταχύτητα και το ποσοστό κάλυψης για το εκάστοτε εφαρμοζόμενο VSL, δηλαδή 40mph, 50mph, 60mph ή 70mph .

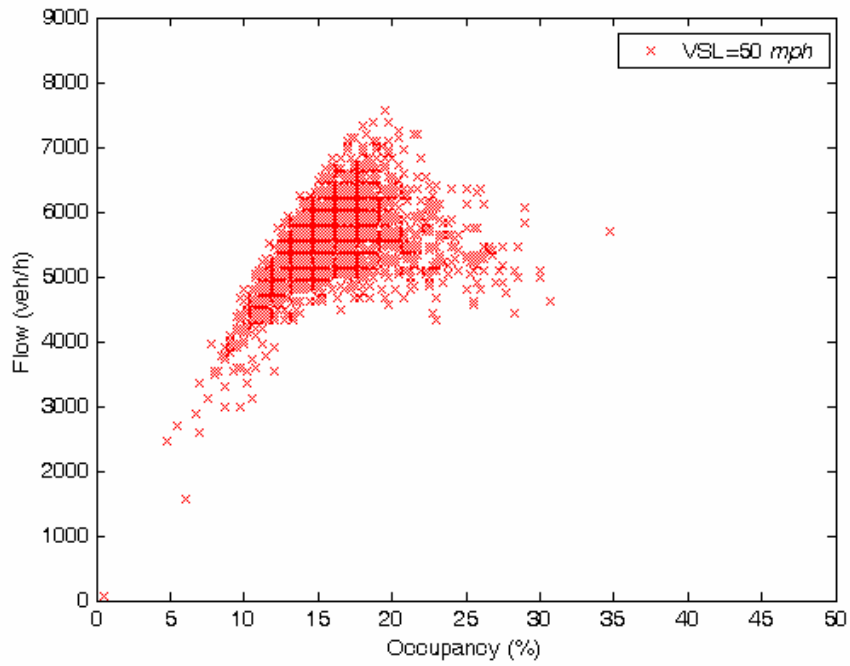


Σχήμα 2-1: Γραφική αναπαράσταση όλων των μετρήσεων από μια ημέρα, την 2 Μαρτίου 2006.

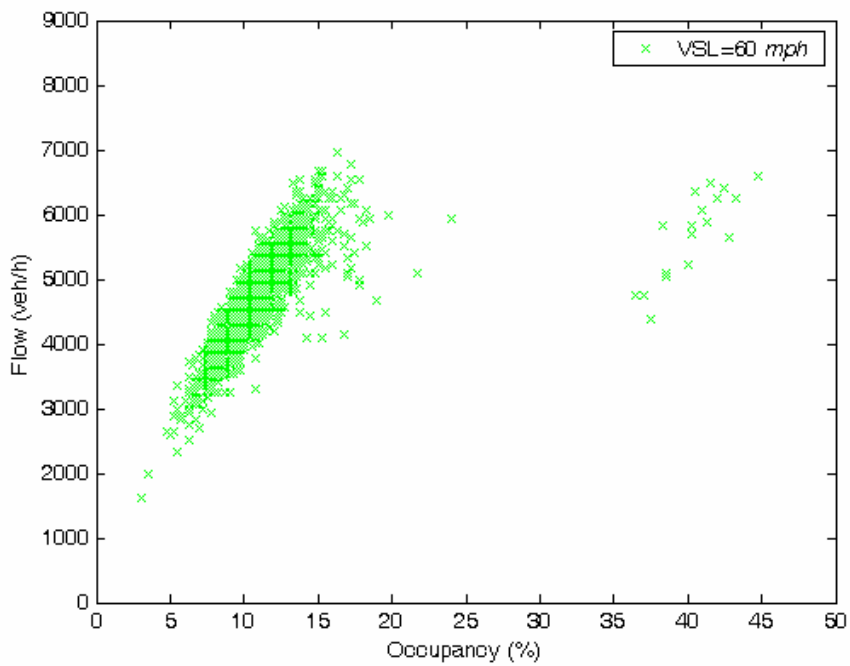
Ακολουθεί γραφική αναπαράσταση των μετρήσεων όλων των ημερών για κάθε ένα από τα VSL, 40mph, 50mph, 60mph και 70mph .



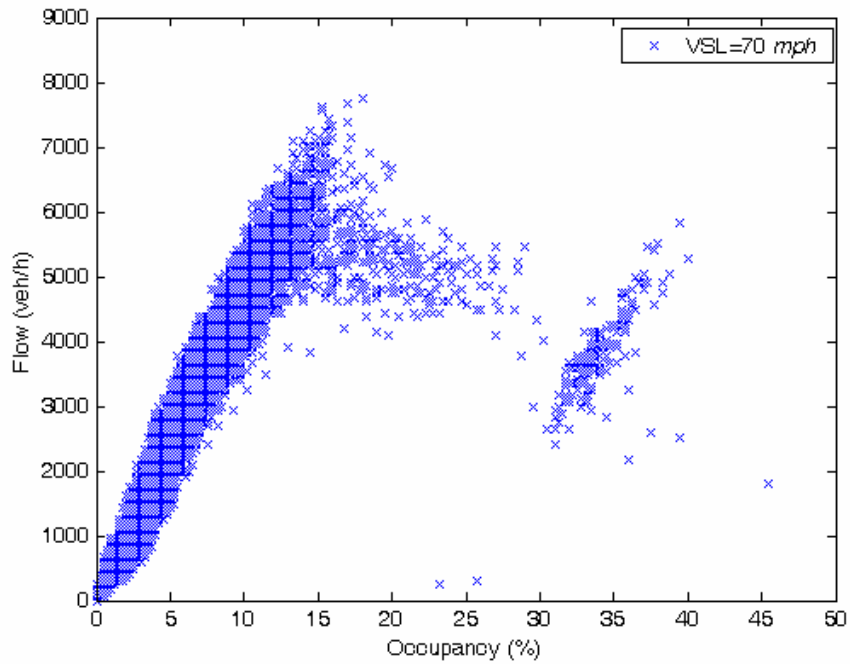
Σχήμα 2-2: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για VSL=40mph.



Σχήμα 2-3: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για VSL=50mph.

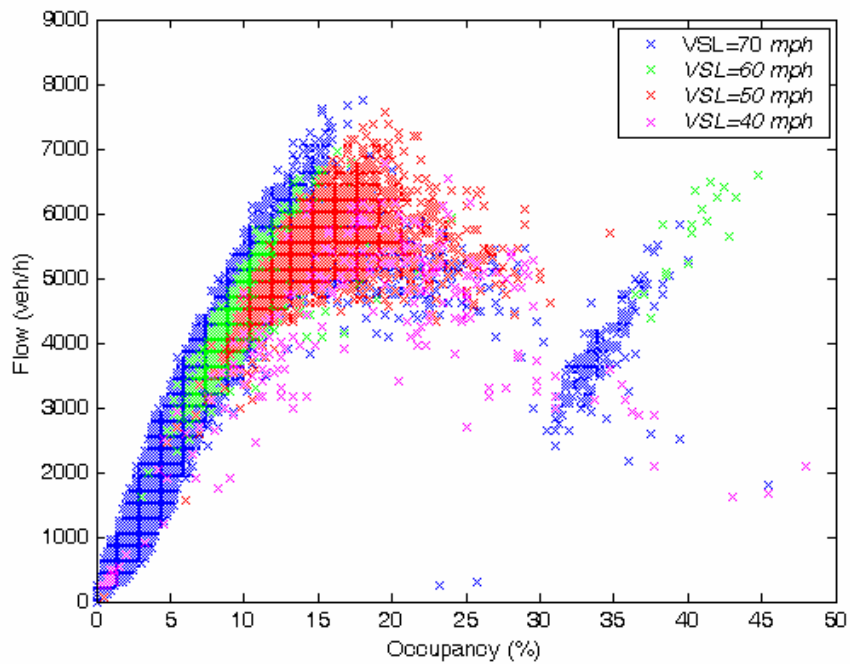


Σχήμα 2-4: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για VSL=60mph.



Σχήμα 2-5: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για VSL=70mph.

Στο Σχήμα 2-6 που ακολουθεί απεικονίζονται οι μετρήσεις από όλες τις ημέρες, για όλα τα VSL.



Σχήμα 2-6: Διάγραμμα ροής-ποσοστού κάλυψης όλων των ημερών για όλα τα VSL 40mph, 50mph, 60mph και 70mph.

2.3.2 Καμπύλη ροής-ποσοστού κάλυψης (θεμελιώδες διάγραμμα -fundamental diagram)

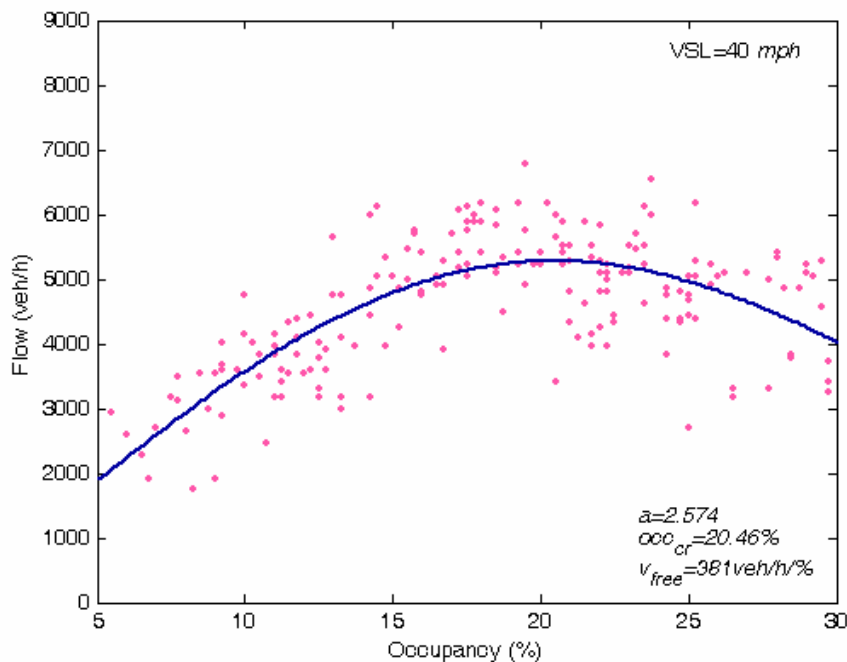
Για κάθε ένα από τα προηγούμενα διαγράμματα flow – occupancy προσαρμόστηκε η βέλτιστη καμπύλη που περνάει από τα σημεία, χρησιμοποιώντας το Curve Fitting Toolbox του προγράμματος Matlab και την εξίσωση (2.1).

$$flow = occ \cdot v_{free} \cdot \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{occ}{occ_{cr}} \right)^a \right] \quad (2.1)$$

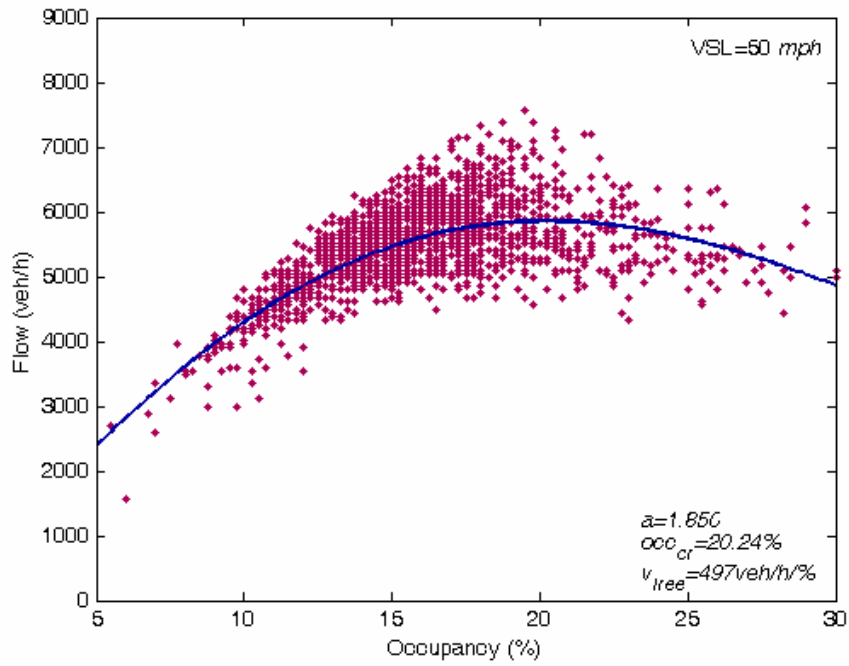
Για να έχουμε την βέλτιστη καμπύλη δόθηκαν βάρη στα σημεία. Συγκεκριμένα ο άξονας των occupancy χωρίστηκε σε διαστήματα ίσα με 5%. Σε κάθε σημείο μέσα σε ένα διάστημα δόθηκε βάρος ίσο με 1/(συνολικό αριθμό των σημείων του διαστήματος).

Με χρήση του Curve Fitting Toolbox του Matlab έγινε προσαρμογή με ελάχιστα τετράγωνα της βέλτιστης καμπύλης για την περιγραφή των δεδομένων καθενός διαγράμματος. Έτσι υπολογίστηκαν βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους:

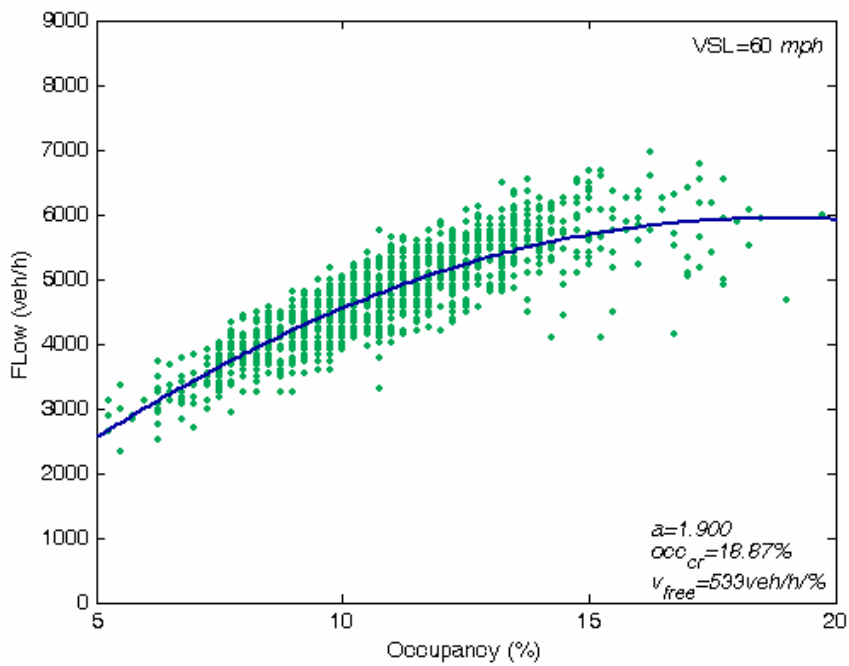
- a
- v_{free}
- occ_{cr}



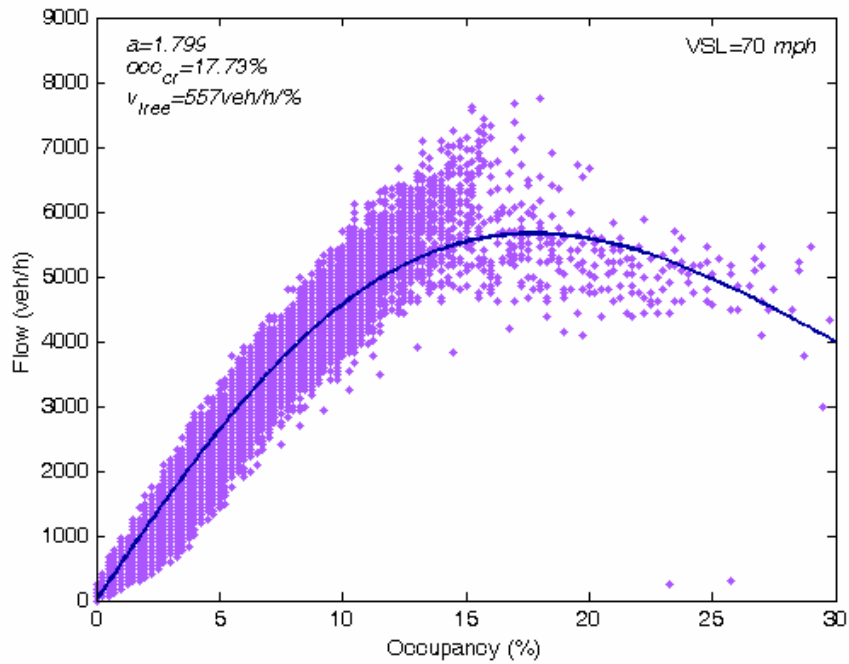
Σχήμα 2-7: Θεμελιώδες διάγραμμα για $VSL=40 \text{ mph}$.



Σχήμα 2-8: Θεμελιώδες διάγραμμα για $VSL=50\text{ mph}$



Σχήμα 2-9: Θεμελιώδες διάγραμμα για $VSL=60\text{ mph}$.



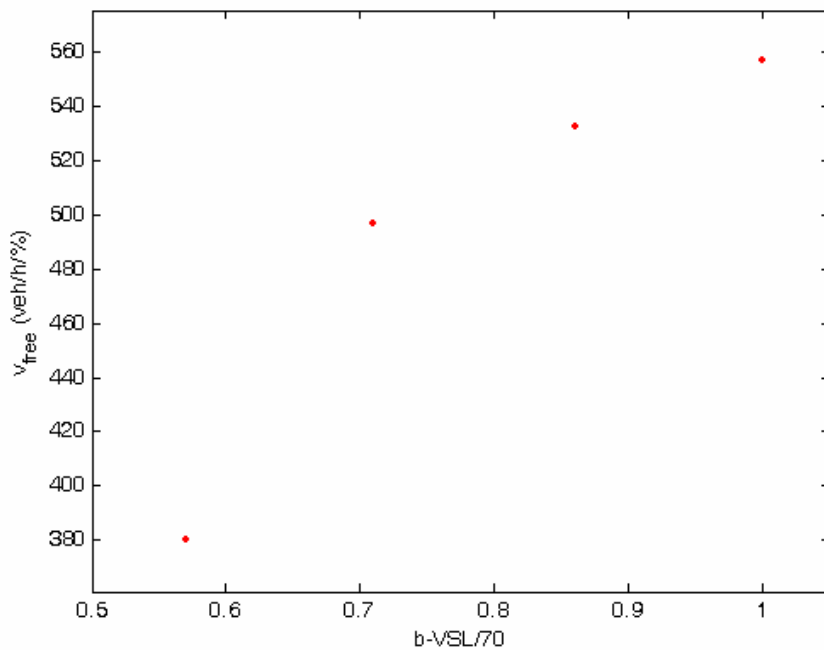
Σχήμα 2-10: Θεμελιώδες διάγραμμα για $VSL=70 \text{ mph}$.

2.3.3 Επεξεργασία των παραμέτρων των θεμελιωδών διαγραμμάτων

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν μέσω των προηγούμενων καμπυλών, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα $v_{free} - b$, $occ_{cr} - b$, $a - b$ και $capacity - b$, όπου $b = VSL/70$ (70 mph είναι το από το νόμο οριζόμενο όριο ταχύτητας στο Ηνωμένο Βασίλειο).

Σημειώνεται ότι η ικανότητα ($capacity$) υπολογίστηκε σύμφωνα με τον τύπο:

$$capacity = v_{free} \cdot occ_{cr} \cdot \exp\left(-\frac{1}{a}\right) \quad (2.2)$$



Σχήμα 2-11: Διάγραμμα $v_{free}(veh/h/\%)-b$

Έγινε μετατροπή των μονάδων της ταχύτητα σε *mph*. Υπολογίστηκε δηλαδή ένας αριθμητικός παράγοντας, το g συγκεκριμένα, που είναι ο συντελεστής αναλογίας της ικανότητας (*occupancy*) και της πυκνότητας (*density*). Δηλαδή:

$$occupancy = g \cdot density$$

$$\text{όμως } density(veh / km) = (flow / speed)$$

$$\text{άρα } g = \frac{occupancy \cdot speed}{flow} (\%km / veh)$$

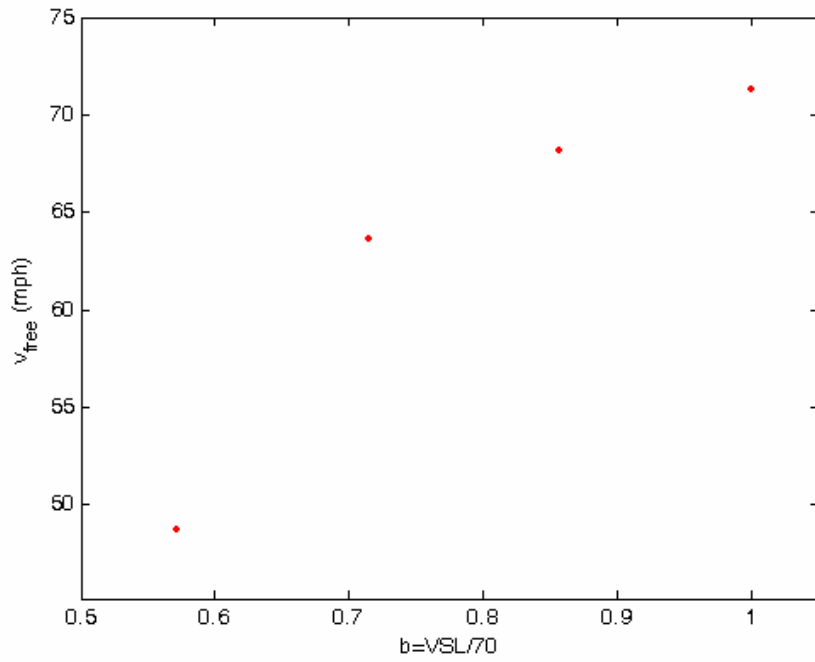
υπολογίστηκε λοιπόν η μέση τιμή του g για όλα τα δεδομένα

$$g_{mean} = 0.2060 .$$

Τελικά, για την μετατροπή του v_{free} από *veh/h/%* σε *mph*, πραγματοποιήθηκε για κάθε VSL ο εξής πολλαπλασιασμός:

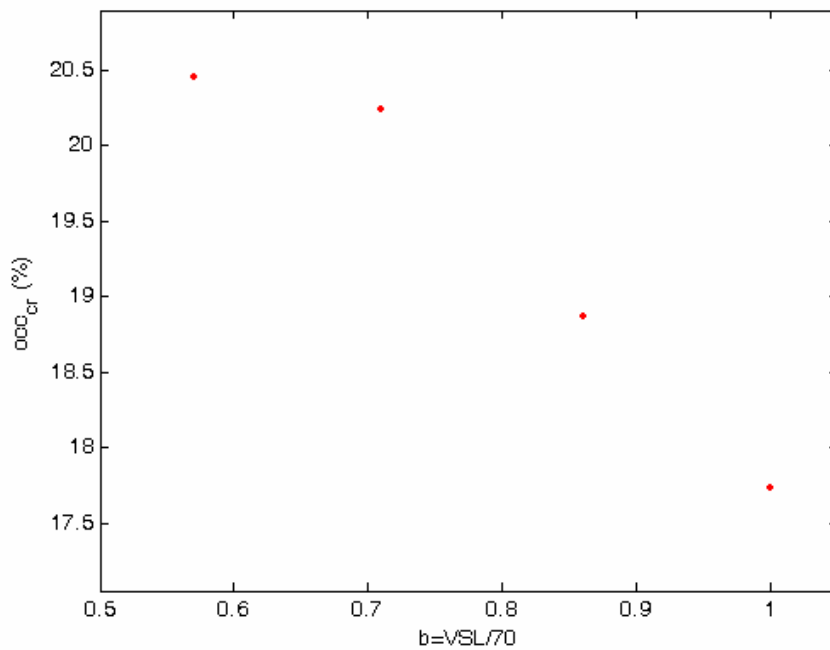
$$v_{free}(veh / h / \%) \cdot g_{mean} (\%km / veh) \cdot 0.6214(miles / km) .$$

Οπότε προέκυψε το διάγραμμα $v_{free} (mph)-b$ που ακολουθεί (Σχήμα 2-12):

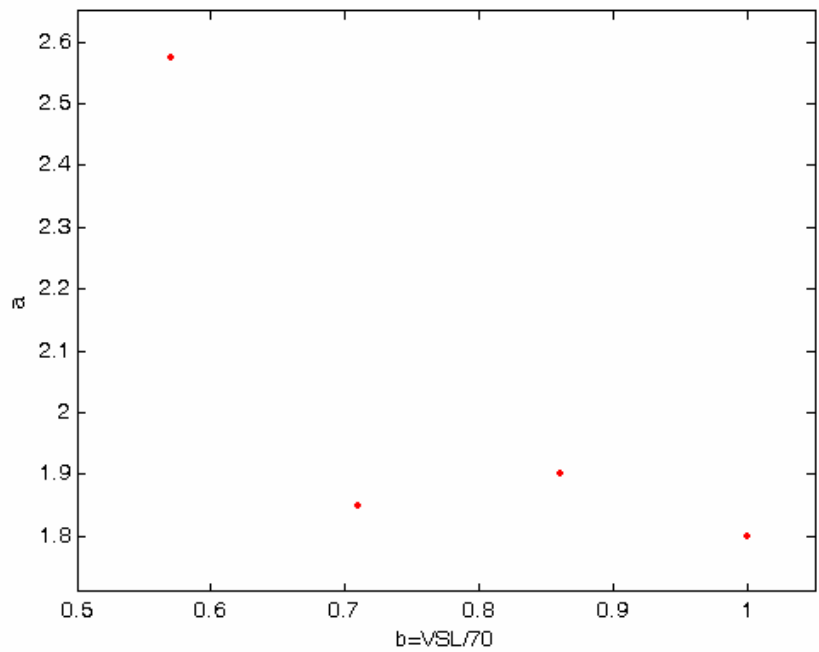


Σχήμα 2-12: Διάγραμμα $v_{free}(mph)-b$

Ακολουθούν τα διαγράμματα $occ_{cr}-b$ και $a-b$



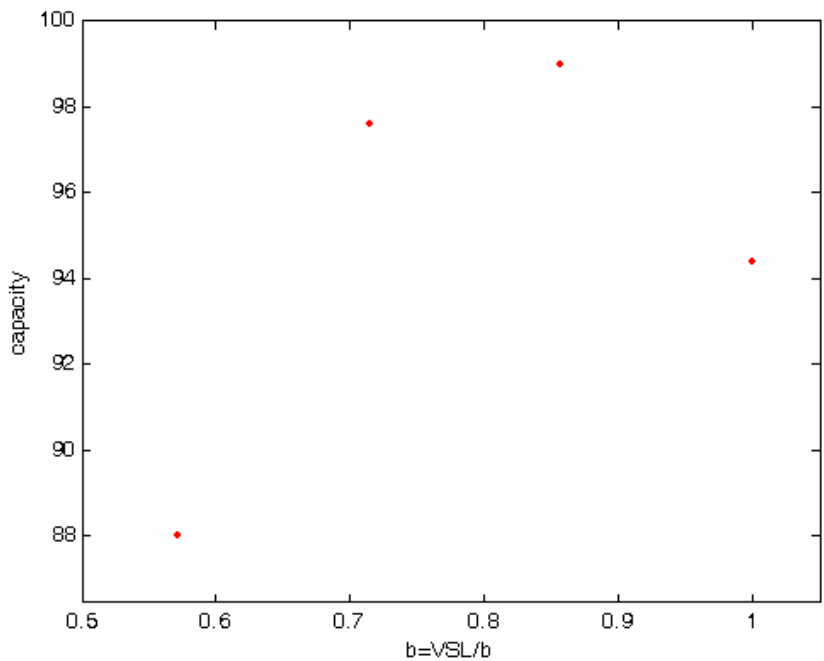
Σχήμα 2-13: Διάγραμμα $occ_{cr}-b$



Σχήμα 2-14: Διάγραμμα α-*b*

Από το Σχήμα 2-11 έως και το Σχήμα 2-13 παρατηρούμε ότι οι παράμετροι v_{free} και occ_{cr} είναι σχεδόν γραμμικές σε σχέση με το b . Δεν συμβαίνει το ίδιο όμως για το a όπως είναι εμφανές στο Σχήμα 2-14.

Η ικανότητα (*capacity*) υπολογίστηκε από τον τύπο (2.2) όπως αναφέρθηκε και το αντίστοιχο διάγραμμα capacity- b (Σχήμα 2-15) ακολουθεί.



Σχήμα 2-15: Διάγραμμα capacity-*b*

Στο Σχήμα 2-15 παρατηρούμε τις τιμές της ικανότητας για τα διάφορα επιβαλλόμενα όρια ταχύτητας. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει όριο ταχύτητας όταν δηλαδή $b=1$ ($VSL = 70mph$) η ικανότητα είναι στα $94.4 veh/min$, ενώ λαμβάνει την μέγιστη τιμή της $99.0 veh/min$ για $VSL = 60mph$. Γενικά παρατηρούμε ότι για υψηλές τιμές ορίων ταχύτητας ($VSL = 70mph$) η ικανότητα διατηρεί χαμηλές τιμές, ενώ αντίθετα καθώς μειώνονται τα όρια ταχύτητας παρατηρείται υπερβολική αύξηση στην τιμή της.

2.4 Το προτεινόμενο μοντέλο

Δημιουργήθηκε μια εξίσωση (2.3) ανάλογη με αυτήν του θεμελιώδους διαγράμματος, στην οποία εισάγεται το b δείχνοντας την εξάρτηση των παραμέτρων από αυτό.

$$V(occ(k), b) = v_{free}(b) \exp \left[-\frac{1}{a(b)} \left(\frac{occ(k)}{occ_{cr}(b)} \right)^{a(b)} \right] \quad (2.3)$$

όπου

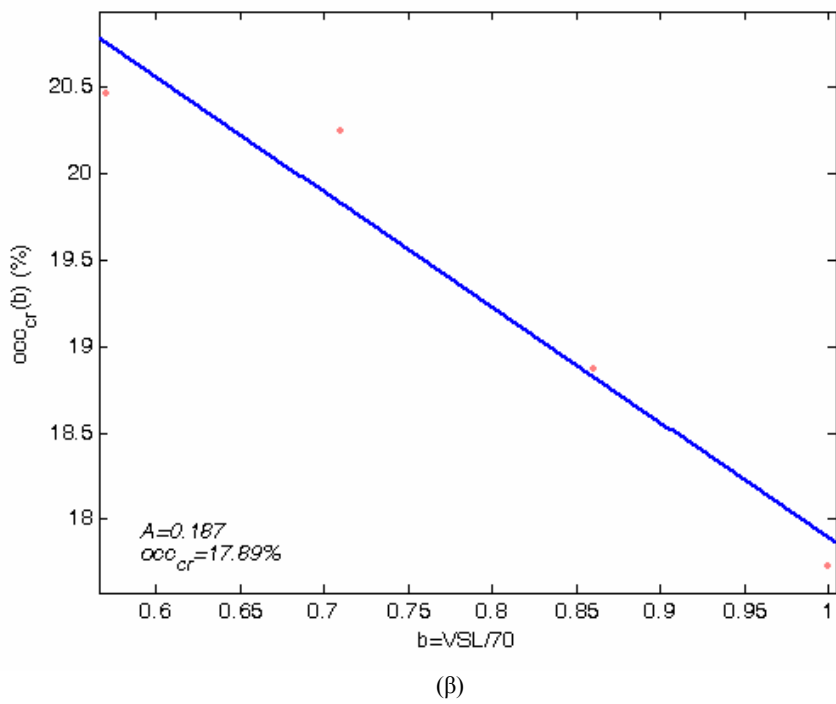
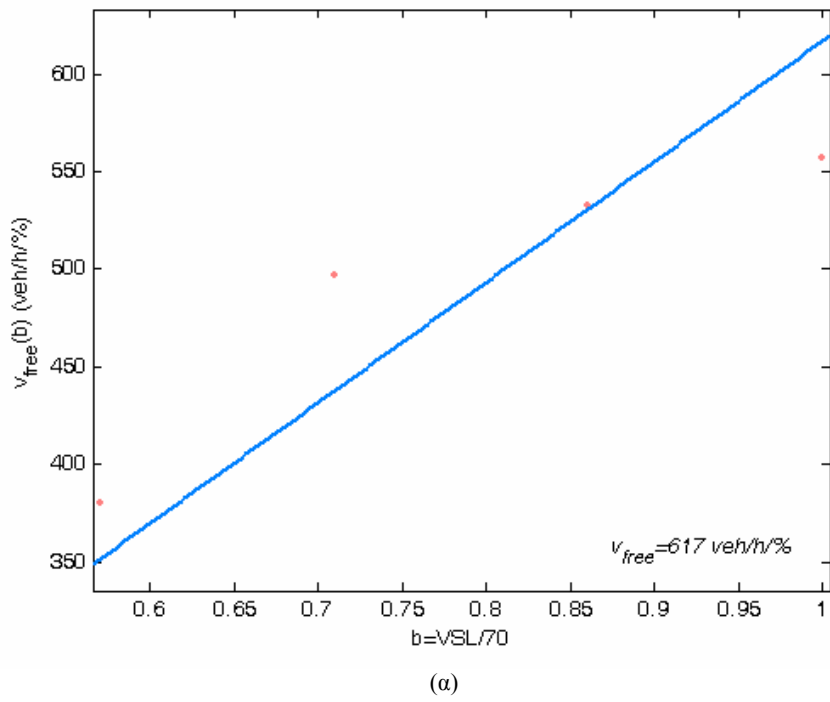
$$v_{free}(b) = v_{free} b \quad (2.4)$$

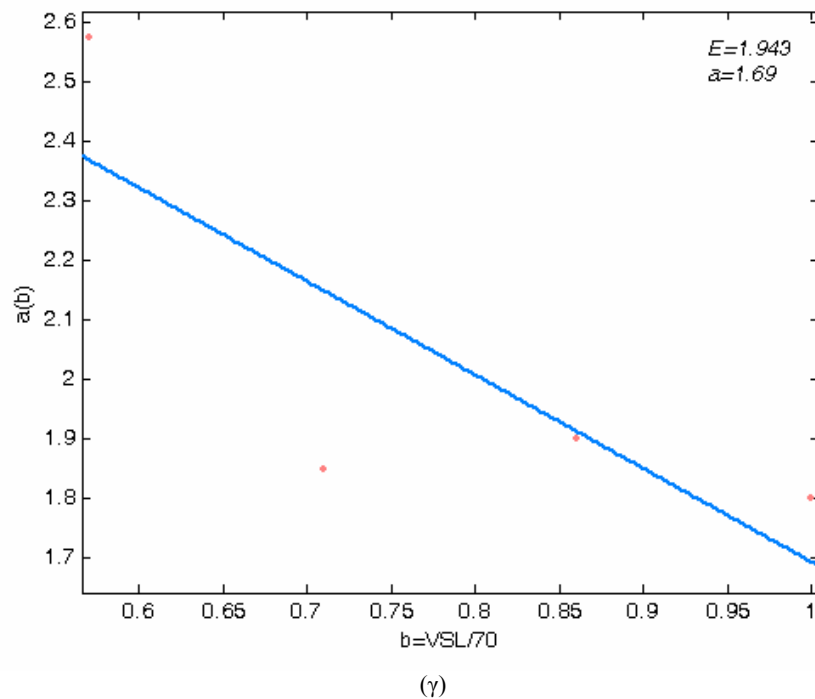
$$occ_{cr}(b) = occ_{cr} (1 + 2A(1-b)) \quad (2.5)$$

$$a(b) = a(E - (E-1)b) \quad (2.6)$$

Εφόσον από τα Σχήμα 2-11 έως και Σχήμα 2-14 προέκυψε ότι οι σχέσεις των παραμέτρων a , v_{free} και occ_{cr} με το b είναι σχεδόν γραμμική, έγινε προσπάθεια προσαρμογής των προηγούμενων γραμμικών εξισώσεων (2.4) - (2.6) στις τιμές των παραμέτρων αυτών όπως αυτές υπολογίστηκαν μέσω βασικών διαγραμμάτων των VSL (βλέπε Σχήμα 2-7 - Σχήμα 2-10). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ξανά το ίδιο toolbox του Matlab (curve fitting) και βέβαια οι γραμμικές σχέσεις (2.4) - (2.6).

Στο Σχήμα 2-16 απεικονίζονται οι βέλτιστες καμπύλες και οι τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων, όπως αυτές υπολογίστηκαν μέσω του curve fitting της Matlab.





Σχήμα 2-16: Προσαρμογή των γραμμικών σχέσεων στις τιμές των παραμέτρων

Η τελευταία εξίσωση (2.6) δεν έχει καλό συντελεστή προσαρμογής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-16 (γ) από τα σημεία του τελευταίου διαγράμματος ($a(b) - b$). Δημιουργήθηκε λοιπόν ένας κώδικας με τον οποίο οι τρεις γραμμικές σχέσεις (2.4), (2.5) και (2.6) επιβάλλονται και πραγματοποιείται βελτιστοποίηση ως προς αυτές δημιουργώντας ένα νέο σετ παραμέτρων. Επιλύθηκε έτσι το πρόβλημα βέλτιστης προσαρμογής των τριών γραμμικών εξισώσεων στις τιμές των παραμέτρων ταυτόχρονα για όλα τα VSL.

Οι νέες παράμετροι για την εξίσωση (2.3) που προκύπτουν από τον κώδικα έχουν ως εξής:

$$v_{free} = 649 \text{ veh/h/\%}$$

$$occ_{cr} = 17.87\%$$

$$a = 1.3444$$

$$A = 0.2110$$

$$E = 3.1606$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές και τις εξισώσεις (2.4) - (2.6) βρέθηκαν νέες τιμές για τις παραμέτρους a , occ_{cr} , v_{free} και $capacity$ για κάθε VSL και στην συνέχεια δημιουργήθηκαν ξανά τα βασικά διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αρχικά θεμελιώδης διαγράμματα (βλέπε Σχήμα 2-7 - Σχήμα 2-10),

που δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα πριν επιβληθούν οι γραμμικές σχέσεις του προτεινόμενου μοντέλου.

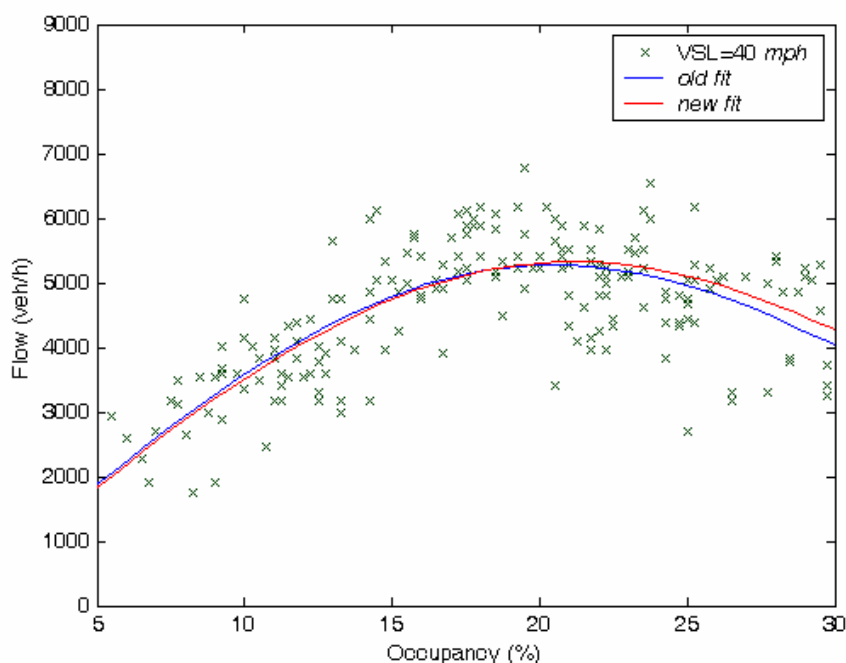
VSL=40mph

Ο Πίνακας 2 που ακολουθεί παρουσιάζει τις νέες και τις παλιές τιμές των παραμέτρων, όπου η ικανότητα (*capacity*) υπολογίστηκε από την εξίσωση (2.2).

Πίνακας 2: Οι τιμές των παραμέτρων για VSL=40 mph

	a	occ_{cr} (%)	v_{free} (veh/h/%)	$capacity$ (veh/h)
Παλιές τιμές	2.574	20.46	380	5278
Νέες τιμές	2.589	21.11	371	5320

Στο Σχήμα 2-17 απεικονίζονται στο ίδιο γράφημα το παλιό και το νέο θεμελιώδες διάγραμμα. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το νέο θεμελιώδες διάγραμμα αποκλίνει ελάχιστα από το παλιό.



Σχήμα 2-17: Νέο βασικό διάγραμμα για το VSL=40 mph και σύγκριση του με το αρχικό θεμελιώδες διάγραμμα.

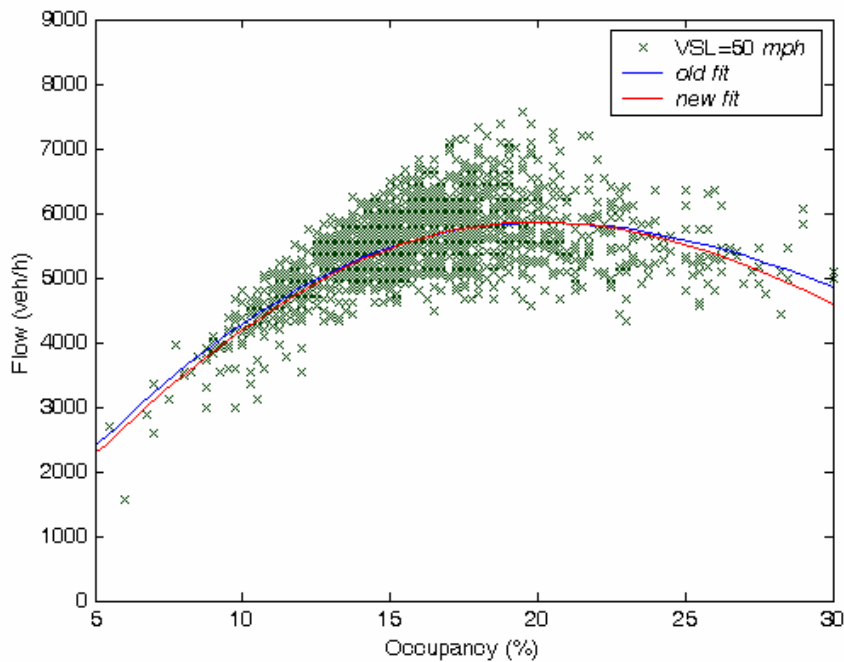
VSL=50mph

Ο Πίνακας 3 που ακολουθεί παρουσιάζει τις νέες και τις παλιές τιμές των παραμέτρων, όπου η ικανότητα (*capacity*) υπολογίστηκε από την εξίσωση (2.2).

Πίνακας 3: Οι τιμές των παραμέτρων για *VSL=50 mph*

	<i>a</i>	<i>occ_{cr}</i> (%)	<i>v_{free}</i> (veh/h/%)	<i>capacity</i> (veh/h)
Παλιές τιμές	1.85	20.24	497	5856
Νέες τιμές	2.174	20.03	464	5862

Στο Σχήμα 2-18 απεικονίζονται στο ίδιο γράφημα το παλιό και το νέο θεμελιώδες διάγραμμα. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το νέο θεμελιώδες διάγραμμα αποκλίνει ελάχιστα από το παλιό.



Σχήμα 2-18: Νέο βασικό διάγραμμα για το *VSL=50 mph* και σύγκριση του με το αρχικό θεμελιώδες διάγραμμα.

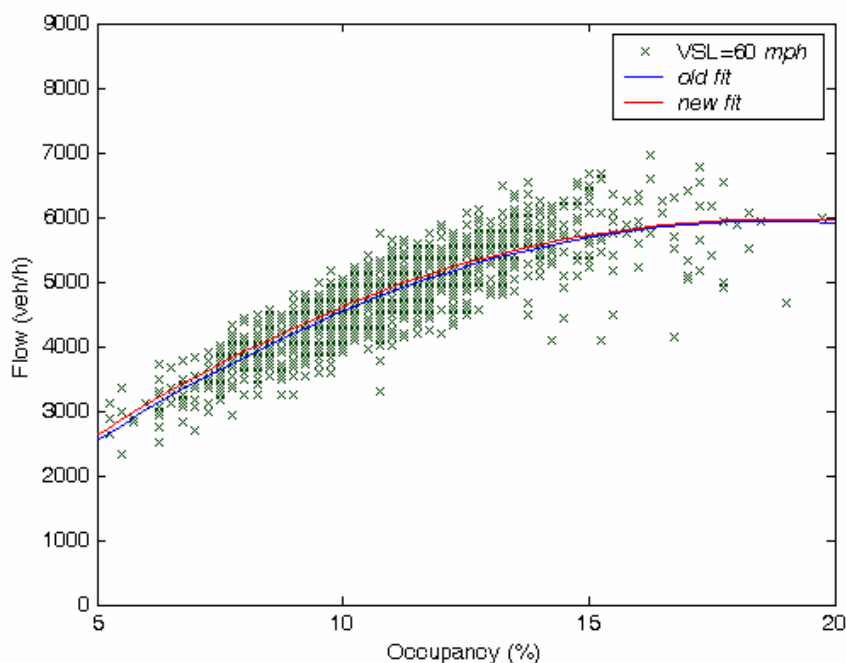
VSL=60mph

Ο Πίνακας 4 που ακολουθεί παρουσιάζει τις νέες και τις παλιές τιμές των παραμέτρων, όπου η ικανότητα (*capacity*) υπολογίστηκε από την εξίσωση (2.2).

Πίνακας 4: Οι τιμές των παραμέτρων για *VSL=60 mph*

	<i>a</i>	<i>occ_{cr}</i> (%)	<i>v_{free}</i> (veh / h / %)	<i>capacity</i> (veh / h)
Παλιές τιμές	1.9	18.9	533	5938
Νέες τιμές	1.759	18.95	556	5972

Στο Σχήμα 2-19 απεικονίζονται στο ίδιο γράφημα το παλιό και το νέο θεμελιώδες διάγραμμα. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το νέο θεμελιώδες διάγραμμα αποκλίνει ελάχιστα από το παλιό.



Σχήμα 2-19: Νέο βασικό διάγραμμα για το *VSL=60 mph* και σύγκριση του με το αρχικό θεμελιώδες διάγραμμα.

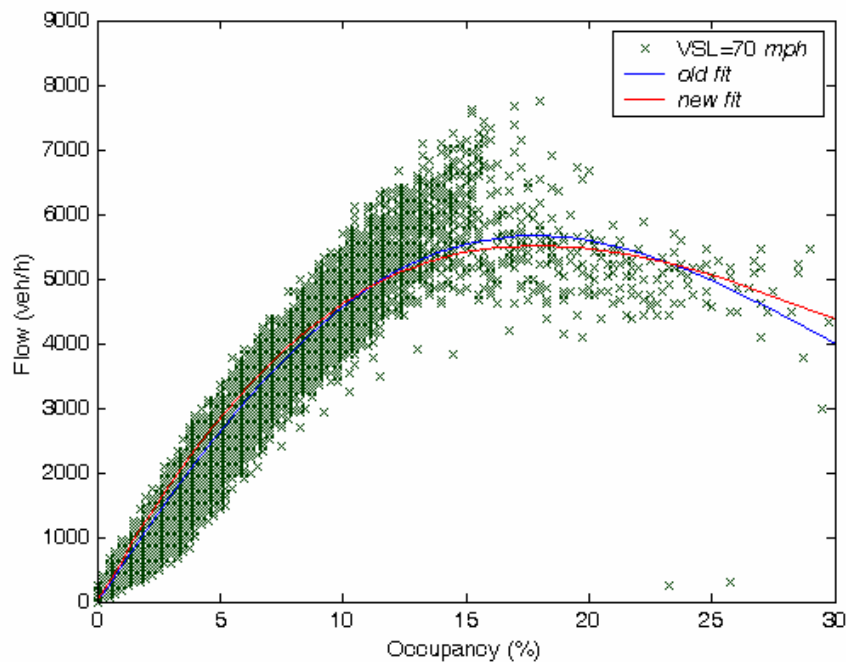
VSL=70mph

Ο Πίνακας 5 που ακολουθεί παρουσιάζει τις νέες και τις παλιές τιμές των παραμέτρων όπου η ικανότητα (capacity) υπολογίστηκε από την εξίσωση (2.2).

Πίνακας 5: Οι τιμές των παραμέτρων για VSL=70 mph

	a	occ_{cr} (%)	v_{free} (veh/h/%)	capacity (veh/h)
Παλιές τιμές	1.799	17.73	557	5665
Νέες τιμές	1.344	17.8	649	5513

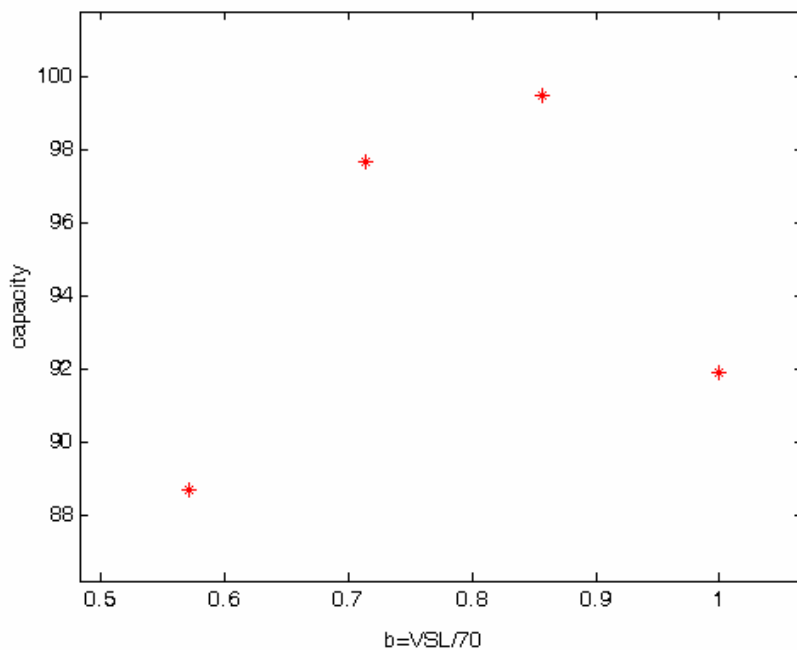
Στο Σχήμα 2-20 απεικονίζονται στο ίδιο γράφημα το παλιό και το νέο θεμελιώδες διάγραμμα. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το νέο θεμελιώδες διάγραμμα αποκλίνει ελάχιστα από το παλιό.



Σχήμα 2-20: Νέο βασικό διάγραμμα για το VSL=70 mph και σύγκριση του με το αρχικό θεμελιώδες διάγραμμα.

2.4.1 Επεξεργασία των νέων παραμέτρων του προτεινόμενου μοντέλου

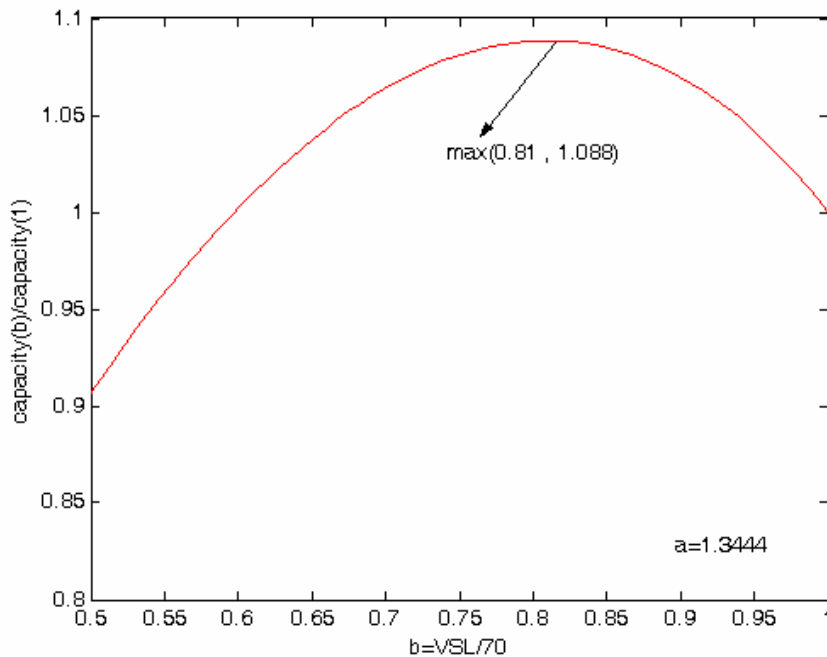
Ακολουθεί γραφική αναπαράσταση του *capacity* σε συνάρτηση με το *b*



Σχήμα 2-21: Γραφική αναπαράσταση του *capacity* του προτεινόμενου μοντέλου, συναρτήσει του *b*

Στο Σχήμα 2-21 παρατηρούμε όπως και στο Σχήμα 2-15, ότι η ικανότητα του δικτύου αυξάνεται όσο αυξάνεται το όριο ταχύτητας, μέχρις ότου να φτάσει σε μια μέγιστη τιμή για $VSL = 60mph$, στην συνέχεια με την αύξηση του ορίου ταχύτητας σε $VSL = 70mph$ η ικανότητα μειώνεται.

Στο Σχήμα 2-22 που ακολουθεί παρουσιάζεται και η σχετική μεταβολή της ικανότητας (*capacity*) σε σχέση με τα VSL, όπως αυτή προκύπτει με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου.



Σχήμα 2-22: Σχετική μεταβολή της ικανότητας (capacity) του προτεινόμενου μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε στο Σχήμα 2-22 παρουσιάζεται η σχετική μεταβολή της ικανότητας για κάθε επιβαλλόμενο VSL (40, 50 και 60 *mph*) σε σχέση με την περίπτωση χωρίς την επιβολή VSL (δηλαδή για $VSL = 70\text{mph}$).

Παρατηρούμε ότι για υψηλά όρια ταχύτητας η σχετική μεταβολή της ικανότητας είναι μικρή, ενώ καθώς μειώνεται το VSL αυξάνεται και η τιμή της σχετικής μεταβολής. Έχουμε δηλαδή μια ποσοστιαία αύξηση της ικανότητας καθώς μειώνεται το επιβαλλόμενο όριο ταχύτητας.

Η μέγιστη τιμή $\frac{capacity(b)}{capacity(b=1)} = 1.088$ παρουσιάζεται στο σημείο όπου $b = 0.81$,

όπου παρατηρείται μια σημαντική αύξηση της ικανότητας σχετικά με την περίπτωση όπου $b=1$ ($VSL = 70\text{mph}$).

Κεφάλαιο 3

3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής στα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων είναι αρκετά χρήσιμη σε πολλές εφαρμογές όπως είναι [15]:

- Η ανάπτυξη και η αξιολόγηση των στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας.
- Οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις και έρευνες της κατάστασης της κυκλοφορίας σε πολύπλοκα δίκτυα.
- Η αξιολόγηση της επίδρασης νέων μεθόδων, η σύγκριση των διαφόρων εναλλακτικών κτλ.
- Αξιολόγηση της επίδρασης συμβάντων που μειώνουν την ικανότητα (όπως ατυχήματα) ή που αυξάνουν την ζήτηση, κτλ.

3.2 Ο μακροσκοπικός προσομοιωτής METANET

3.2.1 Μοντελοποίηση του δικτύου

Προκειμένου να περιγραφεί η διαδικασία της κυκλοφοριακής ροής σε δίκτυα αυτοκινητοδρόμων, χρησιμοποιείται ένα επικυρωμένο, με βάση πραγματικά δεδομένα, μοντέλο [16]. Το δίκτυο αναπαρίσταται σαν προσανατολισμένος γράφος, όπου οι σύνδεσμοί του αντιπροσωπεύουν μέρη αυτοκινητοδρόμων. Οι κόμβοι τοποθετούνται σε σημεία όπου υπάρχει αλλαγή γεωμετρίας, διασταύρωση ή ένωση δυο αυτοκινητοδρόμων ή ένωση αυτοκινητοδρόμου με ράμπα εισόδου ή εξόδου. Κατά σύμβαση σε κάθε κόμβο μπορούν να υπάρχουν συνολικά μέχρι τρεις προσκείμενοι σύνδεσμοι, εισερχόμενοι και εξερχόμενοι. Πολύπλοκες τοπολογίες δικτύων μπορούν να ληφθούν υπόψη με τη χρήση ψευδοσυνδέσμων και ψευδοκόμβων.

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

σύμβαση λέμε ότι έχουμε μοντελοποίηση προσανατολισμένη προς τους προορισμούς, ενώ στην αντίθετη περίπτωση έχουμε μοντελοποίηση μη-προσανατολισμένη προς τους προορισμούς. Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει η δεύτερη περίπτωση καθώς δεν θα ασχοληθούμε με μέτρα ελέγχου καθοδήγησης πορείας.

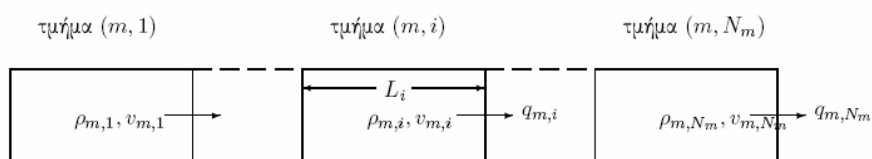
3.2.2 Μοντελοποίηση συνδέσμων

Είδη συνδέσμων δικτύου

Υπάρχουν διάφορα είδη συνδέσμων που αποτελούν το δίκτυο γράφο τα οποία και διαφοροποιούνται ανάλογα με τη λειτουργία τους [16]. Υπάρχουν δηλαδή οι σύνδεσμοι που αντιπροσωπεύουν τους αυτοκινητοδρόμους, οι σύνδεσμοι που αντιστοιχούν στις ράμπες εισόδου, οι σύνδεσμοι για τις ράμπες εξόδου και οι ψευδοσύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται για να αναλύονται περίπλοκες τοπολογίες. Επίσης υπάρχουν και σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης που χαρακτηρίζονται μόνο από την ικανότητα και το χρόνο διαδρομής τους.

Σύνδεσμοι αυτοκινητοδρόμων

Κάθε ομοιόμορφο τμήμα ενός αυτοκινητοδρόμου δεν παρουσιάζει μεταβολές στη γεωμετρία του, έχει σταθερό αριθμό λωρίδων και δεν εμπεριέχει ανάμεσα στα άκρα που το καθορίζουν συμβολή με κάποιον άλλο αυτοκινητόδρομο ή ράμπα εισόδου ή εξόδου. Τόσο ο χρόνος t όσο και το μήκος L του αυτοκινητοδρόμου είναι διακριτοποιημένα. Το διακριτό βήμα του χρόνου είναι T (της τάξης των 10 δευτερολέπτων), ενώ για το σύνδεσμο m που αντιπροσωπεύει ένα ομοιόμορφο κομμάτι αυτοκινητοδρόμου, το διακριτό διάστημα είναι L_m (της τάξης των 400 – 800 μέτρων), Σχήμα 3-1. Προκειμένου να υπάρχει ευστάθεια στο μοντέλο, θα πρέπει η χωρική και η χρονική διακριτοποίηση να μην επιτρέπουν σε οχήματα που οδεύουν με τη μέγιστη ταχύτητα $v_{f,m}$ στο σύνδεσμο m , να μεταπηδήσουν από τη θέση τους σ' ένα διακριτό τμήμα του δρόμου στο μεθεπόμενο τμήμα ή παραπέρα κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος.



Σχήμα 3-1 Διακριτά τμήματα ενός συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου

Δηλαδή, στη χρονική διάρκεια T τα οχήματα που βρίσκονται σ' ένα διακριτό τμήμα, μπορούν να φτάσουν το πολύ μέχρι το επόμενο τμήμα του συνδέσμου, κι όχι παραπέρα. Γι' αυτό θα πρέπει να ισχύει πάντα η ανισότητα

$$L_m > v_{f,m} \cdot T \quad (3.1)$$

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

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m \Lambda_m} [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)] \quad (3.2)$$

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k) \Lambda_m \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} v_{m,i}(k+1) = & v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} \{V[\rho_{m,i}(k), b_m(k)] - v_{m,i}(k)\} \\ & + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) [v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)] - \frac{\nu T}{\tau L_m} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \end{aligned} \quad (3.4)$$

όπου τ , ν και κ είναι παράμετροι που έχουν την ίδια τιμή για όλους τους συνδέσμους του δικτύου που αντιστοιχούν σε αυτοκινητοδρόμους και Λ_m είναι ο αριθμός των λωρίδων.

Για να εξετάσουμε την επίδραση των VSL στις κυκλοφοριακές συνθήκες, εισάγεται το b ως εξής:

$$V[\rho_{m,i}(k), b_m(k)] = v_{f,m}[b_m(k)] \exp \left[-\frac{1}{\alpha_m [b_m(k)]} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}[b_m(k)]} \right)^{\alpha_m [b_m(k)]} \right] \quad (3.5)$$

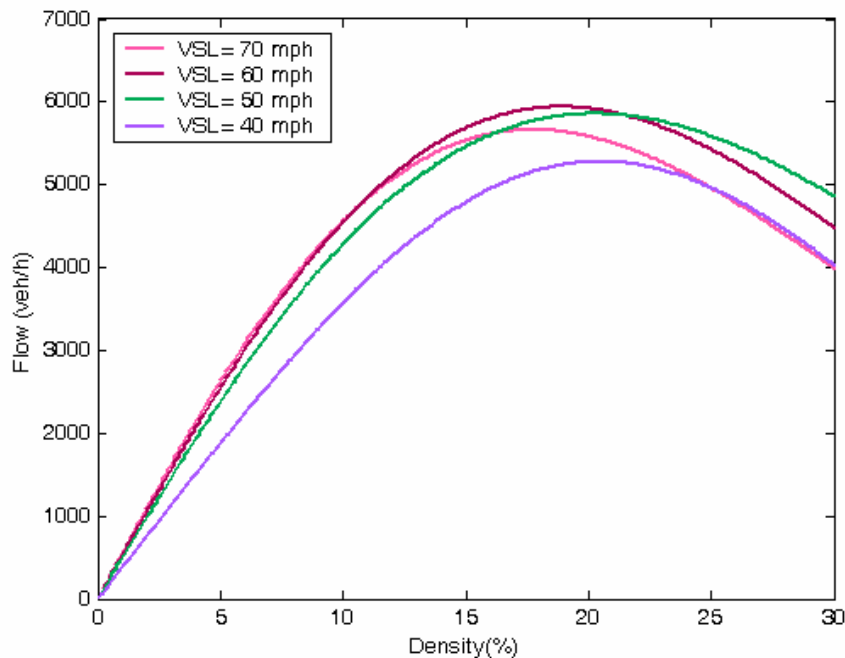
$$v_{f,m}[b_m(k)] = v_{f,m}^* b_m(k) \quad (3.6)$$

$$\rho_{cr,m}[b_m(k)] = \rho_{cr,m}^* \{1 + 2A_m [1 - b_m(k)]\} \quad (3.7)$$

$$\alpha_m [b_m(k)] = \alpha_m^* [E_m - (E_m - 1)b_m(k)] \quad (3.8)$$

Όπου α_m είναι μία παράμετρος του θεμελιώδους διαγράμματος και $\rho_{cr,m}$ είναι η κρίσιμη πυκνότητα του συνδέσμου m και αντιπροσωπεύει την πυκνότητα στην οποία επιτυγχάνεται μέγιστη ροή.

Το $b_m(k)$ είναι ο ρυθμός μεταβολής των VSL στον σύνδεσμο m κατά την περίοδο k και $b_{min,m} \leq b_m(k) \leq 1$, αν $b_{m,k}=1$ δεν έχει εφαρμοστεί VSL, αλλιώς $b_{m,k}<1$ και $b_{min,m}$ είναι το ελάχιστο επιτρεπόμενο VSL. Όπως φαίνεται στην (3.6) το b_m είναι ίσο με την ταχύτητα $v_{f,m}$ που προκαλείται από την επίδραση των VSL, διαιρεμένη με την ταχύτητα $v_{f,m}^*$ χωρίς VSL. Οι (3.7) και (3.8) φανερώουν ότι τα $\rho_{cr,m}$ και α_m είναι γραμμικές συναρτήσεις του b_m , που αποκτούν τις συνήθεις τιμές τους χωρίς VSL για $b_m(k)=1$. Οι εξισώσεις αυτές επικυρώθηκαν με την επεξεργασία των δεδομένων από τον M42 (βλέπε Κεφάλαιο 2) και οι σχετικές καμπύλες ροής-πυκνότητας, από τον συνδυασμό των εξισώσεων (3.3) και (3.5) για συγκεκριμένα VSL παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-2 που ακολουθεί.



Σχήμα 3-2: Θεμελιώδη διαγράμματα για διαφορετικά VSL

Στην περίπτωση που στην αρχή του συνδέσμου m συγκλίνουν δυο άλλοι σύνδεσμοι, ένας εκ των οποίων θεωρείται κύριος σύνδεσμος p , ενώ ο άλλος σύνδεσμος o

θεωρείται σαν δευτερεύων, τότε, αν $\Lambda_m \leq \Lambda_p + \Lambda_o$, στην εξίσωση (3.4) για το πρώτο τμήμα του συνδέσμου m προστίθεται ο όρος:

$$-\frac{\delta T}{L_m \Lambda_m} \frac{q_\mu(k) v_{m,1}(k)}{\rho_{m,1}(k) + \kappa} \quad (3.9)$$

όπου δ είναι παράμετρος του μοντέλου, $q_\mu(k)$ είναι η εισερχόμενη ροή από το δευτερεύοντα σύνδεσμο. Αν $\Lambda_m > \Lambda_p$ τότε υπάρχουν λωρίδες που διευκολύνουν την ένταξη των οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο (dedicated lanes). Σ' αυτήν την περίπτωση η $q_\mu(k)$ ισούται με τη διαφορά της ροής του συνδέσμου o με τη ικανότητα αυτών των λωρίδων, αν αυτή είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Αν είναι μικρότερη του μηδενός, τότε ο όρος (3.9) δεν προστίθεται στην (3.4).

Αν μετά από έναν σύνδεσμο αυτοκινητοδρόμου m που έχει Λ_m λωρίδες βρίσκεται ένας άλλος σύνδεσμος αυτοκινητοδρόμου μ με $\Lambda_m > \Lambda_\mu$, τότε αυτή η μείωση του αριθμού των λωρίδων έχει σαν συνέπεια την πτώση της ταχύτητας, κάτι που λαμβάνεται υπόψη στην εξίσωση (3.4) για το τελευταίο διακριτό τμήμα του συνδέσμου m , l_m με την πρόσθεση του όρου:

$$-\frac{\phi T}{L_m \Lambda_m} \frac{\Delta \Lambda \rho_{m,l_m}(k)}{\rho_{cr,m}} v_{m,l_m}(k)^2 \quad (3.10)$$

Σύνδεσμοι ραμπών εισόδου

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

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T [d_o(k) - q_o(k)] \quad (3.11)$$

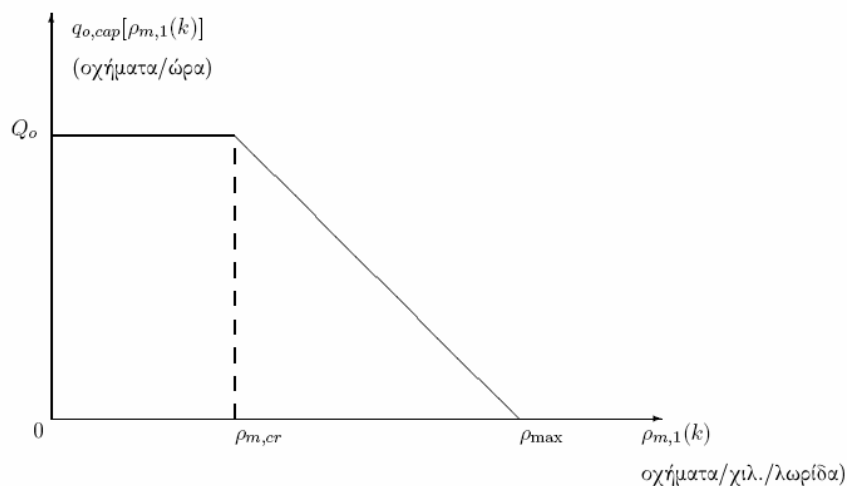
με

$$q_o(k) = \min \{ \hat{q}_{o,1}(k), \hat{q}_{o,2}(k) \} \quad (3.12)$$

$$\hat{q}_{o,1}(k) = d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T} \quad (3.13)$$

$$\hat{q}_{o,2}(k) = Q_o \min \left\{ 1, \frac{\rho_{\max} - \rho_{\mu,1}(k)}{\rho_{\max} - \rho_{cr,\mu}} \right\} \quad (3.14)$$

όπου Q_o είναι η ικανότητα της ράμπας (veh/h) όταν ο αυτοκινητόδρομος δεν έχει συμφόρηση και η είσοδος των οχημάτων μέσω της ράμπας σ' αυτόν είναι ανεμπόδιστη, μ είναι ο κατάντη σύνδεσμος αυτοκινητοδρόμου και ρ_{\max} είναι η μέγιστη δυνατή πυκνότητα στο δίκτυο (veh/h/lane). Κατ' αυτόν τον τρόπο η εκροή της ράμπας εισόδου καθορίζεται είτε από την τρέχουσα ζήτηση ($\hat{q}_{o,1} < \hat{q}_{o,2}$ στην (3.12)), είτε από τη γεωμετρική ικανότητα της ράμπας Q_o (αν η πυκνότητα κατάντη της ράμπας είναι μικρότερη της κρίσιμης, δηλαδή αν $\rho_{\mu,1}(k) < \rho_{cr,\mu}$ στην (3.14)), είτε, τέλος, από τη μειωμένη ικανότητα της ράμπας λόγω της συμφόρησης που επικρατεί κατάντη της ράμπας (δηλαδή $\rho_{\mu,1}(k) \geq \rho_{cr,\mu}$ στην (3.14)). Στο Σχήμα 3-3 φαίνεται η μεταβολή της ικανότητας της ράμπας συναρτήσει των κυκλοφοριακών συνθηκών στο κατάντη τμήμα αυτοκινητοδρόμου.



Σχήμα 3-3: Δυνατή εκροή από μια ράμπα συναρτήσει των κυκλοφοριακών συνθηκών του αυτοκινητοδρόμου.

Σύνδεσμοι εξόδου

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

$$q_d(k) = \begin{cases} q_{m,l_m}(k) & \text{αν } \rho_{m,l_m}(k) \leq \rho_{cr,m} \\ V[\rho_{cr,m}] \rho_{cr,m} \Lambda_m & \text{αν } \rho_{m,l_m}(k) > \rho_{cr,m} \end{cases} \quad (3.15)$$

Η (3.15) θέτει ουσιαστικά έναν περιορισμό στη δυνατότητα εκροής του δικτύου. Παρόλο που το περιβάλλον θεωρείται ότι έχει άπειρη ικανότητα, η δυνατότητα εκροής του δικτύου είναι πεπερασμένη.

Σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης

Οι σύνδεσμοι αποθήκευσης και προώθησης περιγράφουν με χαμηλότερη ακρίβεια την κυκλοφοριακή ροή. Χρησιμοποιούνται για την κυκλοφοριακή ροή σε αστικές περιοχές καθώς και στις συνδέσεις μεταξύ αυτοκινητοδρόμων, όταν εφαρμόζονται μέτρα ελέγχου αυτοκινητοδρόμου προς αυτοκινητόδρομο. Τα αστικά δίκτυα αποτελούνται από δρόμους και διασταυρώσεις ελεγχόμενες από φωτεινούς σηματοδότες, κάτι που τα καθιστά τοπολογικά πιο πολύπλοκα σε σχέση με τα δίκτυα των αυτοκινητοδρόμων. Η λεπτομερής περιγραφή των κυκλοφοριακών συνθηκών των αστικών δικτύων απαιτεί διαφορετική προσέγγιση που δεν είναι όμως αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Περιοριζόμαστε μόνο στο να μοντελοποιήσουμε τις αστικές περιοχές χρησιμοποιώντας συνδέσμους αποθήκευσης και προώθησης. Οι

κυκλοφοριακές συνθήκες σ' ένα τέτοιο σύνδεσμο a χαρακτηρίζονται από το μέσο χρόνο διαδρομής, t_a (αριθμός διακριτών βημάτων), την ικανότητα του Q_a (οχ./ώρα) και την ουρά του συνδέσμου w_a (οχήματα). Η ροή που εισέρχεται σ' ένα σύνδεσμο αποθήκευσης και προώθησης προστίθεται στην ουρά του συνδέσμου μετά από χρονική υστέρηση t_a . Η εξέλιξη της ουράς δίνεται από τη σχέση:

$$w_a(k+1) = w_a(k) + T[q_{a,i}(k) - q_a(k)] \quad (3.16)$$

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

$$q_a(k) = \min\{\hat{q}_{a,1}(k), \hat{q}_{a,2}(k)\} \quad (3.17)$$

και

$$\hat{q}_{a,1}(k) = q_{a,i}(k) + \frac{w_a}{T} \quad (3.18)$$

και

$$\hat{q}_{a,2}(k) = Q_a \min\left\{1, \frac{\rho_{\max} - \rho_{m,1}(k)}{\rho_{\max} - \rho_{cr,m}}\right\} \quad (3.19)$$

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

$$\rho_{cr,m} = \frac{\rho_{\max}}{2} \quad (3.20)$$

Η πυκνότητα για ένα τέτοιο σύνδεσμο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_a(k) = \rho_{\max} \frac{[w_a(k) + q_{a,d}(k)]L_v}{L_a\Lambda_a} \quad (3.21)$$

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

3.2.3 Μοντελοποίηση των κόμβων του δικτύου

Κατανομή της ροής στους κόμβους

Η κυκλοφοριακή ροή εισέρχεται σ' ένα κόμβο n μέσω το πολύ δυο συνδέσμων που ανήκουν στο σύνολο I_n [16] και κατανέμεται το πολύ σε δυο συνδέσμους που εξέρχονται από τον κόμβο και που ανήκουν στο σύνολο O_n . Η συνολική ροή $Q_n(k)$ που εισέρχεται στον κόμβο δίνεται από τη σχέση:

$$Q_n(k) = \sum_{\mu \in I_n} q_{\mu, l_\mu}(k) \quad (3.22)$$

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

$$q_{m,0}(k) = \beta_n^m(k) Q_n(k) \quad \forall m \in O_n \quad (3.23)$$

όπου $\beta_n^m(k)$ είναι το ποσοστό στροφής και αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ροής που εισέρχεται στον κόμβο n και ακολουθεί εν συνεχεία το σύνδεσμο m . Η εξίσωση (3.23) δίνει τα $q_{m,0}(k)$ για $i=1$ στην εξίσωση (3.2).

Ανάντη επίδραση της πυκνότητας

Όταν ένας κόμβος m έχει δυο εξερχόμενους συνδέσμους, τότε ανάντη αυτών των δυο συνδέσμων, στο τελευταίο τμήμα του εισερχόμενου συνδέσμου, απαιτείται στην εξίσωση της ταχύτητας (3.4) μία κατάντη πυκνότητα $\rho_{m, l_m+1}(k)$ ($i=l_m$ στην (3.4)).

Αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{m, l_m+1}(k) = \frac{\sum_{\mu \in O_n} \rho_{\mu,1}(k)^2}{\sum_{\mu \in O_n} \rho_{\mu,1}(k)} \quad (3.24)$$

Η τετραγωνική μορφή της (3.24) έχει σαν συνέπεια να παρουσιάζεται συμφόρηση ακόμη κι όταν μόνο ένας από τους δυο εξερχόμενους συνδέσμους έχει συμφόρηση, πράγμα που επαληθεύεται σαν γεγονός από την εμπειρία.

Κατάντη επίδραση της ταχύτητας

Όταν ένας κόμβος m έχει δυο εισερχόμενους κι έναν εξερχόμενο σύνδεσμο, τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση των ταχυτήτων στα τέλη των δυο εισερχόμενων συνδέσμων επί της αρχής του εξερχόμενου. Αυτό γίνεται με τον υπολογισμό της ταχύτητας $v_{m,0}(k)$, που απαιτείται στην (3.4) για $i=1$, σύμφωνα με το σταθμισμένο μέσο

$$v_{m,0}(k) = \frac{\sum_{\mu \in I_n} v_{\mu,l_m}(k) q_{\mu,l_m}(k)}{\sum_{\mu \in I_n} q_{\mu,l_\mu}(k)} \quad (3.25)$$

3.2.4 Υπολογιζόμενα κριτήρια

Με βάση το μοντέλο που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, μπορούν να υπολογιστούν διάφορα κριτήρια απόδοσης [16]. Αυτά τα κριτήρια ποσοτικοποιούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συνολικού δικτύου και αποτελούν δείκτες που περιγράφουν την αντίστοιχη απόδοσή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο διάφορες στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας μπορούν να αξιολογηθούν ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Τα κριτήρια απόδοσης που μπορούν να υπολογιστούν είναι τα εξής:

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

$$\tau_{\Sigma\text{ΧΤ}} = \sum_k \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \Lambda_m T + \sum_k \sum_a \rho_a(k) L_a \Lambda_a T \quad (3.26)$$

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

$$\tau_{\Sigma\text{ΧΑΕ}} = \sum_k \sum_o w_o(k) T \quad (3.27)$$

3. Συνολικός Χρόνος Αναμονής στις ουρές των συνδέσμων Αποθήκευσης και Προώθησης (ΣΧΑΑΠ) $\tau_{\Sigma\text{ΧΑΑΠ}}$ (οχ./ώρες). Ο ΣΧΑΑΠ εκφράζει το συνολικό

χρόνο που δαπανούν τα οχήματα στις ουρές των συνδέσμων αποθήκευσης και προώθησης του δικτύου. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{\Sigma\chi\alpha\alpha\pi} = \sum_k \sum_a w_a(k)T \quad (3.28)$$

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

$$\tau_{\Sigma\chi} = \tau_{\Sigma\chi\tau} + \tau_{\Sigma\chi\alpha\epsilon} + \tau_{\Sigma\chi\alpha\alpha\pi} \quad (3.29)$$

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

$$L_{\Sigma\Delta\alpha} = \sum_k \sum_m \sum_i q_{m,i}(k) L_m T + \sum_k \sum_a q_a(k) L_a T \quad (3.30)$$

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

$$V_{\Sigma\pi\kappa} = V_{\Sigma\pi\kappa,1} + V_{\Sigma\pi\kappa,2} \quad (3.31)$$

όπου

$$V_{\Sigma\pi\kappa,1} = \sum_k \frac{T}{100} \sum_m \sum_i \kappa_1(k) \quad (3.32)$$

με

$$\kappa_1(k) = \begin{cases} q_{m,i}(k) L_m \left[4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} + 0.0016(v_{m,i}(k) - 60)^2 \right] & \text{αν } v_{m,i}(k) > 60 \\ q_{m,i}(k) L_m \left(4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} \right) & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.33)$$

και

$$V_{\Sigma\pi\kappa,2} = \sum_k \frac{T}{100} \sum_a \kappa_2(k) \quad (3.34)$$

με

$$\kappa_2(k) = \begin{cases} q_a(k) L_a \left[4.49 + \frac{122}{v_a(k)} + 0.0016(v_a(k) - 60)^2 \right] & \text{αν } v_a(k) > 60 \\ q_a(k) L_a \left(4.49 + \frac{122}{v_a(k)} \right) & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.35)$$

Οι σχέσεις (3.31) – (3.35) βασίζονται στο [17].

3.3 Το λογισμικό AMOC

Το μοντέλο METANET είναι ένα αιτιοκρατικό μοντέλο όπου η κυκλοφοριακή κατάσταση περιγράφεται από την πυκνότητα, τη μέση ταχύτητα και τις ουρές των οχημάτων και λαμβάνει υπόψη του διαταραχές που επιδρούν στην κυκλοφορία. Η στρατηγική ελέγχου που έχει αναπτυχθεί με αυτήν την φιλοσοφία ονομάζεται AMOC [4] (Advanced Motorway Optimal Control). Το AMOC δέχεται σαν δεδομένα εισόδου την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος που θεωρείται σαν αρχική κατάσταση, και τις προβλέψεις των διαταραχών και με βάση το μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής του δικτύου υπολογίζει, βελτιστοποιώντας ένα κατάλληλο κριτήριο κόστους, τις βέλτιστες τροχιές ελέγχου, δηλαδή καθορίζει πως θα πρέπει να λειτουργήσουν τα διαθέσιμα μέτρα κυκλοφοριακού ελέγχου στο μέλλον.

Παρόλο που οι τροχιές ελέγχου που προσδιορίζονται από το AMOC είναι βέλτιστες, οι προκαθορισμένες ενέργειες που θα τις υλοποιήσουν δεν διατηρούν αυτή την ιδιότητα. Αυτό συμβαίνει για τους παρακάτω λόγους [18]:

1. Η εκτίμηση της αρχικής κατάστασης του συστήματος δεν είναι απολύτως ακριβής είτε ελλείπει αρκετών δεδομένων είτε λόγω περιορισμένης ακρίβειας των αλγορίθμων εκτίμησης. Συνήθως δεν υπάρχουν μεγάλα λάθη στην εκτίμηση της αρχικής κατάστασης γιατί τα σύγχρονα και μεγάλα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων είναι εφοδιασμένα με ένα πυκνό δίκτυο αισθητήρων που παρέχουν την αναγκαία πληροφορία. Εξάλλου έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι εκτίμησης με καλή απόδοση όταν έχουν στην διάθεση τους ικανή ποσότητα πληροφορίας.
2. Η πρόβλεψη των στοχαστικών διαταραχών έχει πεπερασμένη ακρίβεια αφού οι διαταραχές έχουν στοχαστικό χαρακτήρα και άρα η πρόβλεψη τους αναπόφευκτα περιλαμβάνει λάθη που μεταδίδονται στο μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής. Άρα το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύει το AMOC δεν ανταποκρίνεται στο πραγματικό πρόβλημα, αλλά σε μια προσέγγιση αυτού.
3. Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου της κυκλοφοριακής ροής ή της αλλαγή των παραμέτρων κατά την διάρκεια εφαρμογής του ελέγχου έχει επίσης πεπερασμένη ακρίβεια. Αυτή η έλλειψη ακρίβειας οφείλεται στο ότι η διαδικασία

εκτίμησης των παραμέτρων (διαδικασία η οποία παρουσιάστηκε παραπάνω για τον μακροσκοπικό προσομοιωτή METANET) εγγυάται σε μεγάλο βαθμό τον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων, αλλά πιθανώς σε μια εφαρμογή να είναι δύσκολο πραγματοποιηθεί, π.χ. επειδή είναι αρκετά επίπονη, απαιτεί χρόνο και ποσότητα δεδομένων. Επιπλέον, οι παράμετροι του μοντέλου παίρνουν τις τιμές τους με βάση τα χαρακτηριστικά οδήγησης των οδηγών, ενώ ο τρόπος οδήγησης μπορεί να μεταβληθεί με το χρόνο, π.χ. λόγω αλλαγής των εξωτερικών συνθηκών ή της σύνθεσης της κυκλοφορίας.

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

3.3.1 Η στρατηγική ελέγχου AMOC

Στην στρατηγική AMOC [19], ο συντονισμένος έλεγχος με ρύθμιση της ροής στις ράμπες εισόδου διατυπώνεται σαν δυναμικό πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου με σταθερές μεταβλητές ελέγχου που μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά για δοθέντες τιμές ζήτησης και ποσοστών στροφής του αυτοκινητόδρομου για ένα χρονικό ορίζοντα. Η γενική μορφή του προβλήματος έχει ως εξής :

$$J = \theta[K] + \sum_{k=0}^{K-1} \phi[x(k), u(k), d(k)] \quad (3.36)$$

υπό τους περιορισμούς

$$x(k+1) = f[x(k), u(k), d(k)], \quad x(0) = x_0 \quad (3.37)$$

$$u_{i,\min} \leq u_i(k) \leq u_{i,\max} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.38)$$

όπου το K είναι ο χρονικός ορίζοντας, το $x \in \mathbb{R}^n$ είναι το διάνυσμα κατάστασης, το $u \in \mathbb{R}^m$ είναι το διάνυσμα ελέγχου, d είναι το διάνυσμα των μη ελεγχόμενων εξωγενών διαταραχών, $u_{i,\min}$ και $u_{i,\max}$ είναι τα κάτω και άνω όρια των ελέγχων αντίστοιχα και θ, ϕ είναι διπλά παραγωγίσιμες μη-γραμμικές συναρτήσεις κόστους.

Είναι εμφανή ότι αν αντικατασταθούν οι (3.3), (3.22), (3.23) στην (3.2), οι (3.5), (3.24), (3.25) στην (3.4) και οι (3.17)-(3.19) στην (3.16) προκύπτει η εξίσωση (3.37).

Στην εξίσωση (3.37) το διάνυσμα κατάστασης \mathbf{x} αποτελείται από τις παρακάτω μεταβλητές:

- την πυκνότητα των οχημάτων $\rho_{m,i}$ (οχήματα/ χιλιόμετρα/ λωρίδα) σε κάθε διακριτό τμήμα i του συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου m .
- την μέση ταχύτητα $v_{m,i}$ (χιλιόμετρα/ ώρα) που επικρατεί σε κάθε διακριτό τμήμα i του συνδέσμου αυτοκινητοδρόμου m .
- την ουρά w_o (οχήματα) της ράμπας εισόδου ή συνδέσμου αποθήκευσης και προώθησης o .

Το διάνυσμα ελέγχου \mathbf{u} αποτελείται από:

- την μεταβλητή $r_o(k)$, το ποσοστό δηλαδή εισόδου κάθε ράμπας o που είναι υπό έλεγχο, με $r_{o,\min} \leq r_o(k) \leq 1.0$ σύμφωνα με την εξίσωση (3.38) όπου $r_{o,\min}$ είναι το ελάχιστο επιτρεπόμενο ποσοστό και
- τον ρυθμό μεταβολής $b_m(k)$ των VSL στον σύνδεσμο m κατά την περίοδο k και $b_{\min,m} \leq b_m(k) \leq 1$, αν $b_{m,k}=1$ δεν έχει εφαρμοστεί VSL, αλλιώς $b_{m,k}<1$ και $b_{\min,m}$ είναι το ελάχιστο επιτρεπόμενο VSL.

Το διάνυσμα των διαταραχών \mathbf{d} αποτελείται από τις εξής μεταβλητές:

- τη ζήτηση d_o που εμφανίζεται στις εισόδους του δικτύου
- τις διαδρομές των οδηγών του δικτύου όπως αυτά συγκεκριμενοποιούνται στα ποσοστά στροφής β_n^m .

Το κριτήριο κόστους που έχει επιλεγεί σκοπεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου (Total Time Spend, TTS) των οχημάτων στο δίκτυο και δίδεται από την σχέση

$$\begin{aligned}
J = & T \sum_{k=1}^{K_p-1} \sum_m \sum_i \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m + T \sum_{k=1}^{K_p-1} \sum_o w_o(k) \\
& + T \sum_{k=1}^{K_p-1} \sum_o a_f [r_o(k) - r_o(k-1)]^2 \\
& + T \sum_{k=1}^{K_p-1} \sum_m a_b [b_m(k) - b_m(k-1)]^2 \\
& + \sum_{k=1}^{K_p-1} \sum_o a_w [\max\{0, w_o(k) - w_{o,\max}\}]^2
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Οι δύο πρώτοι όροι της (3.39) αφορούν το κριτήριο TTS που θεωρείται δείκτης αποδοτικότητας του δικτύου. Το a_f [4] είναι ένας συντελεστής βάρους ποινής που τιμωρεί σημαντικές χρονικές μεταβολές των μεταβλητών, ενώ a_w είναι συντελεστής βάρους ποινής που τιμωρεί τιμές της κάθε ουράς w_o που είναι μεγαλύτερες από την μέγιστη επιτρεπτή ουρά $w_{o,\max}$.

Για την αριθμητική επίλυση του χρονικά διακριτοποιημένου προβλήματος βέλτιστου ελέγχου χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος εφικτής κατεύθυνσης (feasible direction algorithm) (βλέπε [20]). Η αριθμητική επίλυση αποδίδει βέλτιστο έλεγχο ανοικτού-βρόχου (open-loop) όπως για παράδειγμα τα ποσοστά εισόδου από τις ελεγχόμενες ράμπες για όλο τον χρονικό ορίζοντα. Τέλος εάν είναι επιθυμητό, η μοντελοποίηση του προβλήματος και ο αλγόριθμος επίλυσης μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί έλεγχος για χρονικούς περιόδους T_c πολλαπλάσια του χρονικού βήματος T_a (βλέπε [21]).

Κεφάλαιο 4

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκαν ο προσομοιωτής METANET και το λογισμικό AMOC που υπολογίζει βέλτιστες τροχιές ελέγχου ανοικτού βρόχου. Με την ενσωμάτωση των μεταβαλλόμενων ορίων ταχύτητας στο μοντέλο του AMOC σαν επιπρόσθετο παράγοντα ελέγχου, έχουμε την δυνατότητα να εξετάσουμε την επίδραση, όχι μόνο του συντονισμένου ελέγχου με ρύθμιση της ροής στις ράμπες εισόδου αλλά και των VSL, στις κυκλοφοριακές συνθήκες. Σκοπός λοιπόν του κεφαλαίου αυτού είναι η εφαρμογή των δύο αυτών μέτρων ελέγχου σε δίκτυο αυτοκινητοδρόμου και η διερεύνηση των αποτελεσμάτων που παρέχονται από την προσομοίωση του δικτύου για συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου (βλέπε παράγραφος 2.4).

Χρησιμοποιήθηκαν λοιπόν, στα δεδομένα εισόδου του AMOC, οι βέλτιστες παράμετροι που υπολογίστηκαν κατά την επεξεργασία των μετρήσεων από τον αυτοκινητόδρομο M42 (παράγραφος 2.4).

Δηλαδή:

$$v_{free} = 649veh / h / \% = 133.7km / h$$

$$\rho_{cr} = 17.8758veh / km / lane$$

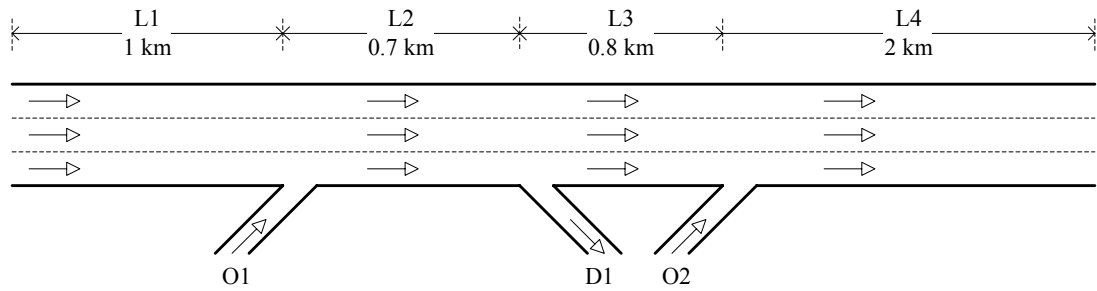
$$a = 1.3444$$

$$A = 0.2110$$

$$E = 3.1606$$

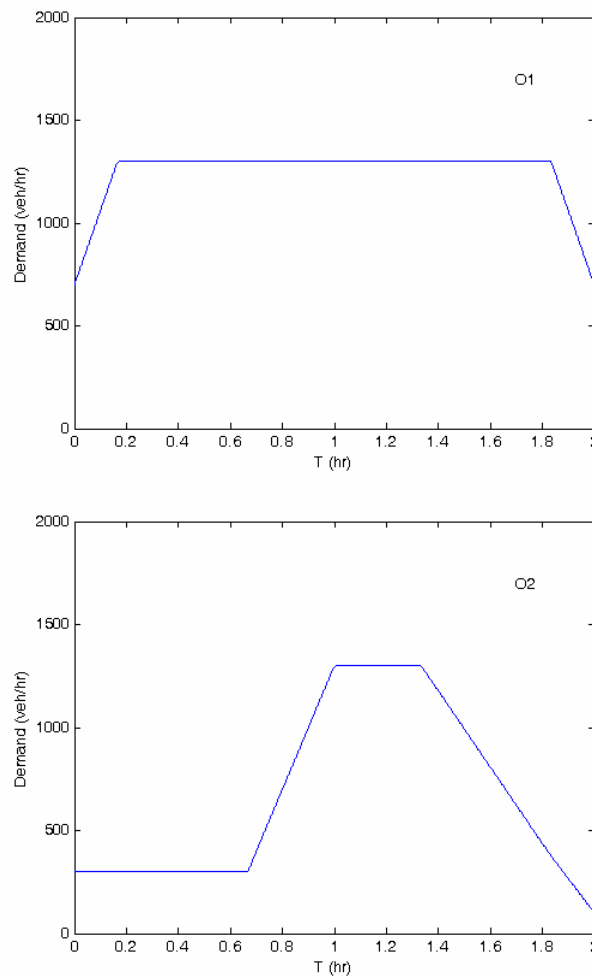
4.1 Περιγραφή του δικτύου

Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης μελέτης θεωρήθηκε ένας υποθετικός αυτοκινητόδρομος τριών λωρίδων, μήκους 4.5 km, με δύο ράμπες εισόδου (O1 και O2) και μια εξόδου (D1) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-1. Το δίκτυο χωρίστηκε σε τέσσερα διακριτά τμήματα L1, L2 L3 και L4 μήκους 1km, 0.7km, 0.8km και 2km αντίστοιχα.



Σχήμα 4-1: Ο τριών λωρίδων αυτοκινητόδρομος

Η ζήτηση στην είσοδο του αυτοκινητοδρόμου επιλέχθηκε ίση με 4200veh/h , ενώ η ζήτηση για κάθε μια από τις δύο ράμπες εισόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-2 (τραπεζοειδής μορφή), ακόμα το ποσοστό εξόδου από την ράμπα D1 θεωρείται ίσο με 5%. Η ζήτηση στις δύο ελεγχόμενες ράμπες έχει τραπεζοειδή μορφή (Σχήμα 4-2) έτσι ώστε να παραμένει υψηλά για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής του AMOC είναι 2 ώρες, δηλαδή 720 διακριτά χρονικά βήματα για διακριτό βήμα του μοντέλου $T=10\text{sec}$.



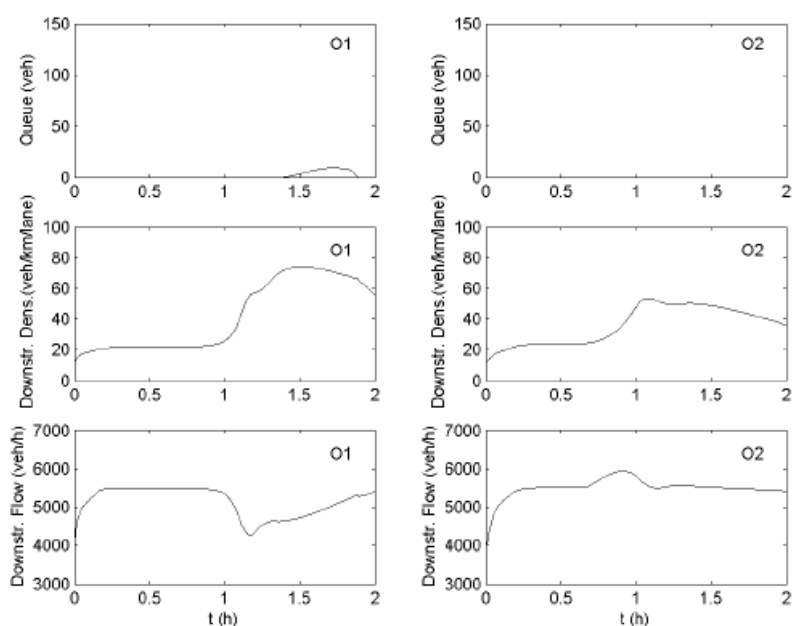
Σχήμα 4-2: Η τραπεζοειδής μορφή της ζήτησης στις ράμπες εισόδου O1 και O2

4.2 Περιγραφή σεναρίων

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια, που διαφοροποιούνται ως προς τα μέτρα ελέγχου που εφαρμόζονται κάθε φορά στο δίκτυο. Στο σενάριο 0 θεωρείται ότι στο δίκτυο δεν ασκείται οποιοσδήποτε έλεγχος. Στο σενάριο 1, εφαρμόζεται έλεγχος με ρύθμιση ροής στις ράμπες εισόδου του δικτύου και στο σενάριο 2, εφαρμόζονται μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας. Τέλος, στο σενάριο 3 έχουμε ολοκληρωμένο έλεγχο της κυκλοφοριακής ροής και με τα δύο μέτρα ελέγχου. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε σενάριο.

4.3 Σενάριο 0

Στο σενάριο αυτό δεν ασκείται κανένας έλεγχος στο δίκτυο. Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον χρονικό ορίζοντα των 2 ωρών της ροής και της πυκνότητας κατάντη της κάθε ράμπας και της σχηματιζόμενης ουράς σε κάθε ράμπα.



Σχήμα 4-3: χωρίς έλεγχο

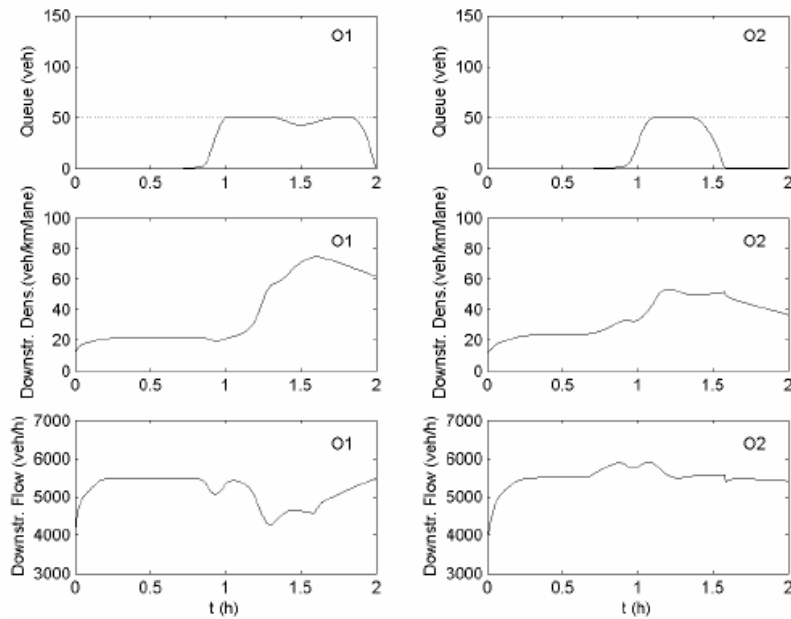
Η απουσία μέτρων ελέγχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3, έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση συμφόρησης μετά από 50 λεπτά στο τμήμα κατάντη της ράμπας O2, εξαιτίας των υψηλών ροών που καταφθάνουν στην περιοχή αυτή. Η συμφόρηση αυτή είναι εμφανές ότι οδηγεί σε ελάττωση της ροής στο κυρίως ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου (μείωση της ικανότητας-capacity drop). Η συμφόρηση που

δημιουργείται προχωράει ανάντη στο δίκτυο και φθάνει στο τμήμα κατάντη της Ο1 όπου υπάρχει εμφανής μείωση της ροής όπως και πριν. Παρατηρούμε ακόμα ότι δημιουργείται μια μικρή ουρά στη Ο1 ράμπα, η ουρά αυτή οφείλεται στην μείωση της ικανότητας της ράμπας που προκαλείται από την συμφόρηση στο κυρίως ρεύμα.

Ο συνολικός χρόνος παραμονής (*TTS*) στο δίκτυο για την περίπτωση αυτή, όπως υπολογίστηκε από το METANET, είναι ίσος με $TTS = 1204veh \cdot h$. Ο *TTS* για το σενάριο αυτό και για τα επόμενα τρία, υπολογίστηκε από την προσομοίωση του δικτύου για τον χρονικό ορίζοντα των 2 ωρών συν 10 λεπτά στα οποία θεωρήθηκε μηδενική είσοδος ροής στο δίκτυο. Αυτό αποσκοπεί στο να έχει αδειάσει το δίκτυο στο τέλος κάθε προσομοίωσης κάθε σεναρίου, έτσι ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των τιμών των *TTS* των υπό εξέταση σεναρίων.

4.4 Σενάριο 1

Στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται συντονισμένος έλεγχος στις ράμπες εισόδου, με μέγιστη επιτρεπόμενη ουρά ίση με $50veh$. Η ρύθμιση της ροής στις ελεγχόμενες ράμπες επιτρέπεται να μεταβάλλεται κάθε 30 sec με μια ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή για το ποσοστό εισόδου σε αυτές ίση με 0.05, με σκοπό να αποφευχθεί ενδεχόμενο κλείσιμο της ράμπας. Στην περίπτωση αυτού του σεναρίου ο συνολικός χρόνος παραμονής στο δίκτυο είναι $TTS = 1172veh \cdot h$ και σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο 0 (χωρίς έλεγχο) παρουσιάζει μια βελτίωση της τάξεως του 2.7%. Στο Σχήμα 4-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον χρονικό ορίζοντα των 2 ωρών της ροής και της πυκνότητας κατάντη της κάθε ράμπας και της σχηματιζόμενης ουράς σε κάθε ράμπα.



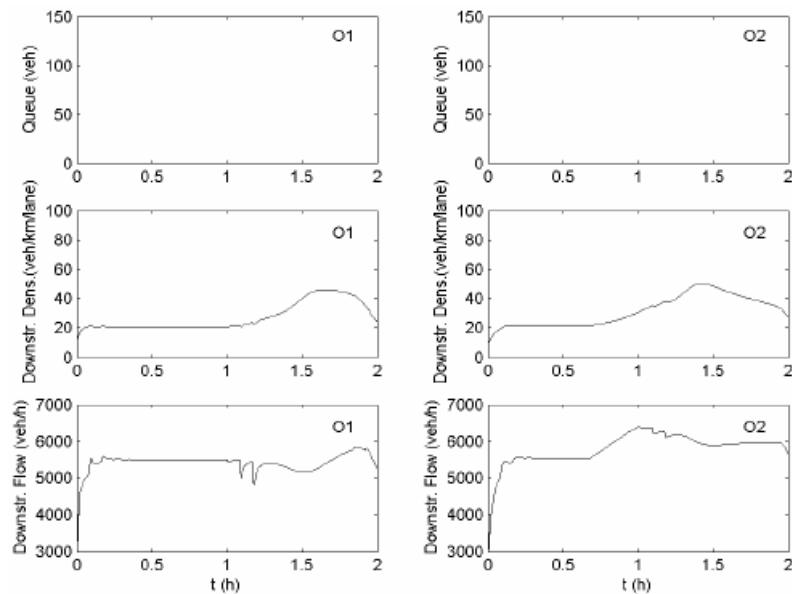
Σχήμα 4-4: Συντονισμένος έλεγχος στις ράμπες

Η βέλτιστη λύση (βλέπε Σχήμα 4-4) διατηρεί την πυκνότητα και την ροή κατάντη της O2, όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κρίσιμη τιμή ($capacity = 5940veh/h$), έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ροή εξόδου από τον αυτοκινητόδρομο και να ελαττώνεται ο συνολικός χρόνος παραμονής στο δίκτυο. Για να επιτευχθεί αυτό, οι ουρές δημιουργούνται σχεδόν ταυτόχρονα και στις δύο ράμπες. Η συμφόρηση που εμφανίζεται σε περίπου $t = 1.2hours$ είναι αναπόφευκτη εν' όψει της μεγάλης ζήτησης και της περιορισμένης χωρητικότητας των ραμπών.

4.5 Σενάριο 2

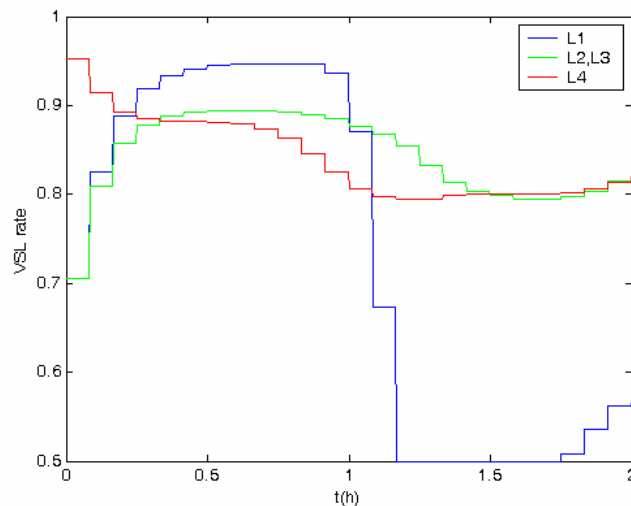
Στο σενάριο αυτό ο έλεγχος της ροής πραγματοποιείται με την εφαρμογή μεταβαλλόμενων ορίων ταχύτητας στο δίκτυο. Για να εφαρμοστούν τα VSL, τα τέσσερα διακριτά τμήματα του δικτύου χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες, για καθεμία από τις οποίες εισήχθη μια μεταβλητή ελέγχου. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει το L1 τμήμα, η δεύτερη το L2 και το L3 τμήμα (μια μεταβλητή ελέγχου και για τα δύο τμήματα) και η τρίτη ομάδα αποτελείται από το τμήμα L4. Τα όρια ταχύτητας επιτρέπεται να μεταβάλλονται κάθε 300sec, με ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο ίσο με 0.5 (για το b, όπου $b = VSL/70$ όπως έχει ήδη αναφερθεί). Στην περίπτωση του σεναρίου αυτού έχουμε $TTS = 741veh \cdot h$, παρουσιάζεται δηλαδή μια βελτίωση κατά 38.5% σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο. Στο Σχήμα 4-5 παρουσιάζονται

γραφικά για τον χρονικό ορίζοντα των 2 ωρών, η ροή και η πυκνότητα κατάντη κάθε ράμπας και η σχηματιζόμενη ουρά σε κάθε ράμπα.



Σχήμα 4-5: Έλεγχος με VSL

Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τροχιές των μεταβολών του VSL.



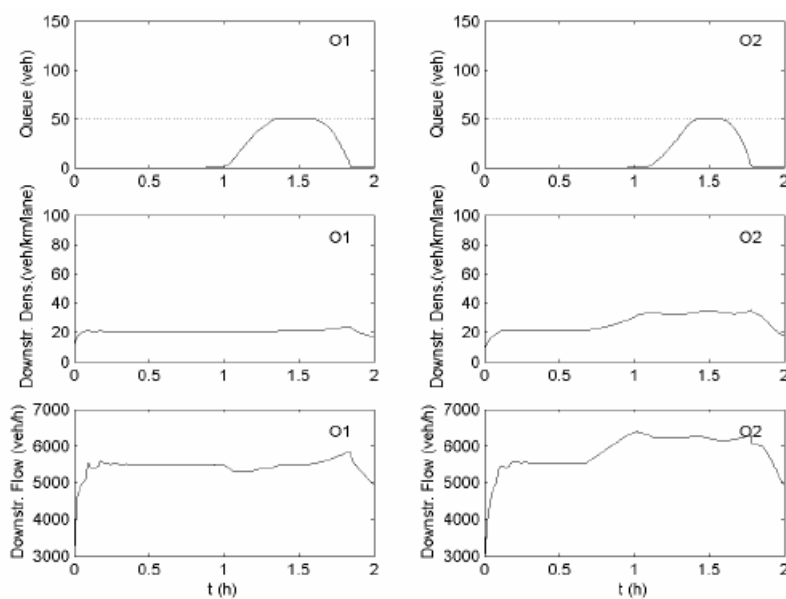
Σχήμα 4-6: Οι βέλτιστες τροχιές των μεταβολών του VSL για κάθε ομάδα τμημάτων, στην περίπτωση του ελέγχου μόνο με VSL.

Η τροχιά μεταβολής στο VSL για το L4 είναι τέτοια ώστε η υψηλότερη δυνατή ροή και ικανότητα (περίπου $6400veh/h$) να επιτυγχάνεται κατάντη της O2. Μετά από $t=1.0hours$, το VSL στο L1 μεταβάλλεται βαθμιαία από 0.95 σε 0.5. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ροή που φθάνει κατάντη της O2, όπου υπάρχει μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας, να μειώνεται σημαντικά και να καθυστερεί έτσι η

εκδήλωση συμφόρησης στην περιοχή αυτή. Παρατηρούμε ότι στις νέες κυκλοφοριακές συνθήκες δεν σχηματίζεται ουρά σε καμιά από τις δύο ράμπες. Παρόλα αυτά η συμφόρηση δεν μπορεί να αποφευχθεί τελείως, αλλά καθυστερεί να εκδηλωθεί σε σχέση με τα άλλα σενάρια.

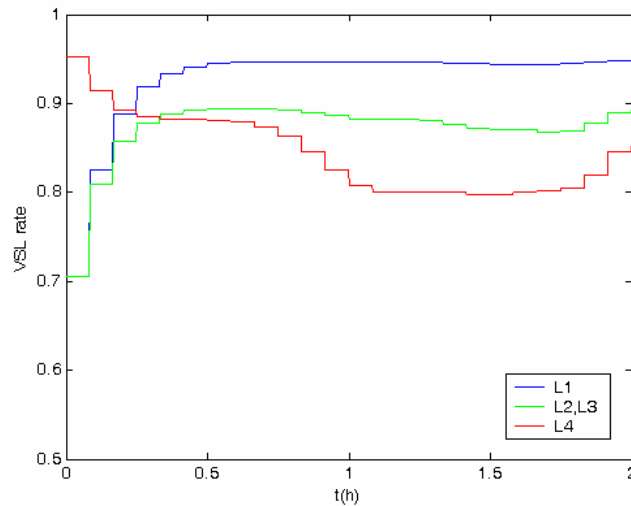
4.6 Σενάριο 3

Στο σενάριο αυτό στο δίκτυο εφαρμόζονται δύο μέτρα ελέγχου, ρύθμιση ροής στις ράμπες εισόδου και μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας. Έχουμε λοιπόν ολοκληρωμένο έλεγχο της κυκλοφοριακής ροής, εφόσον όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3, εφαρμόζονται διαφορετικού είδους μέτρα ελέγχου. Για το σενάριο αυτό ο συνολικός χρόνος παραμονής στο δίκτυο, είναι $TTS = 673veh \cdot h$, παρουσιάζει δηλαδή ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση από τα υπόλοιπα σενάρια και μάλιστα μια βελτίωση κατά 44.1% από το σενάριο 0 (χωρίς έλεγχο). Η γραφική απεικόνιση της πυκνότητας και της ροής κατάντη κάθε ράμπας και της σχηματιζόμενης ουράς κάθε ράμπας, για το χρονικό ορίζοντα των 2 ωρών φαίνεται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7: Ολοκληρωμένος έλεγχος

Στο Σχήμα 4-8 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βέλτιστες τροχιές των μεταβολών του VSL.



Σχήμα 4-8: Οι βέλτιστες τροχιές των μεταβολών του VSL για κάθε ομάδα τμημάτων , στην περίπτωση του ολοκληρωμένου ελέγχου.

Και σε αυτή την περίπτωση η βέλτιστη τροχιά του VSL για το τμήμα L4 είναι τέτοια ώστε να δημιουργείται η μεγαλύτερη δυνατή ροή και ικανότητα (6400veh/h περίπου) κατάντη της O2. Παράλληλα οι ουρές (Σχήμα 4-7) που σχηματίζονται στις δύο ράμπες συγκρατούν την είσοδο από αυτές έτσι ώστε να αποφευχθεί η συμφόρηση. Στην περίπτωση αυτή, όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 4-8, δεν υπάρχει καμία επίδραση από το εφαρμοζόμενο VSL στο τμήμα L1, εφόσον η ρύθμιση ροής στη ράμπα εισόδου επαρκεί για να εμποδίσει την εμφάνιση κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Κεφάλαιο 5

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Στη συγκεκριμένη μελέτη προτάθηκε ένα ποσοτικό μοντέλο για να καθοριστεί η επίδραση των μεταβαλλόμενων ορίων ταχύτητας στις κυκλοφοριακές συνθήκες. Τα VSL ενσωματώθηκαν σε ένα γενικό μοντέλο ελέγχου της κυκλοφορίας, ως ένα επιπρόσθετος παράγοντας ελέγχου οδηγώντας σε μια εκτεταμένη διατύπωση του.

Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή σε δίκτυο για τέσσερα διαφορετικά σενάρια, εξετάζοντας τις εξής περιπτώσεις: να μην υπάρχει κανένας έλεγχος της κυκλοφορίας στο δίκτυο, να εφαρμόζεται έλεγχος με ρύθμιση ροής στις ράμπες εισόδου, να εφαρμόζονται μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας και τέλος να πραγματοποιείται ολοκληρωμένος έλεγχος της κυκλοφοριακής ροής.

Με βάση τα κεφάλαια που προηγήθηκαν μπορούν αν εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μακροσκοπική μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής δικτύων αυτοκινητοδρόμων ευρείας κλίμακας είναι ικανοποιητική, ιδιαίτερα για την πρόβλεψη των μελλοντικών κυκλοφοριακών συνθηκών. Το METANET είναι ικανό να προσομοιώσει την κυκλοφορία του δικτύου με την ακρίβεια που απαιτείται προκειμένου να γίνουν αξιολογήσεις της αποτελεσματικότητας μιας στρατηγικής ελέγχου. Επίσης το μοντέλο του METANET μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον σχεδιασμό μιας αποτελεσματικής στρατηγικής ελέγχου (λογισμικό AMOC).
- Η έλλειψη μέτρων ελέγχου οδηγεί στην εμφάνιση συμφόρησης και στην μείωση της ικανότητας του αυτοκινητοδρόμου, με τον συνολικό χρόνο παραμονής στο δίκτυο να είναι αρκετά υψηλός αν συγκριθεί με τον αντίστοιχο χρόνο των υπόλοιπων περιπτώσεων που εξετάστηκαν.
- Με την εφαρμογή συντονισμένου ελέγχου στις ράμπες εισόδου, μεγιστοποιείται η ροή εξόδου και επιτυγχάνεται βελτίωση της τάξεως του 2.7% στο συνολικό χρόνο παραμονής στο δίκτυο, σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο. Η συμφόρηση είναι αναπόφευκτη και στην περίπτωση αυτή εν' όψη της μεγάλης ζήτησης και της περιορισμένης ικανότητας των ραμπών εισόδου.

- Όταν εφαρμόζονται μόνο μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας επιτυγχάνεται βελτίωση της τάξεως του 38.5% στο συνολικό χρόνο παραμονής στο δίκτυο, σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο. Η συμφόρηση και στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να αποφευχθεί τελείως αλλά καθυστερεί αρκετά να εκδηλωθεί σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο και την περίπτωση συντονισμένου ελέγχου στις ράμπες εισόδου.

- Όταν υπάρχει ολοκληρωμένος έλεγχος της κυκλοφοριακής ροής, όταν δηλαδή εφαρμόζονται δύο μέτρα ελέγχου ρύθμιση ροής στις ράμπες εισόδου και μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας, ο συνολικός χρόνος παραμονής μειώνεται ακόμα περισσότερο και παρουσιάζει βελτίωση της τάξεως του 44.1% σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο. Με τον ολοκληρωμένο έλεγχο είναι δυνατό να αποφευχθεί η συμφόρηση, ενώ η ικανότητα να διατηρεί την μεγαλύτερη δυνατή τιμή της.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η αποτελεσματικότητα της κυκλοφοριακής ροής μπορεί να βελτιωθεί αρκετά όταν εφαρμόζονται μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας σε συνδυασμό με τον συντονισμένο έλεγχο στις ράμπες εισόδου.

- Το AMOC, όπως και οι υπόλοιπες στρατηγικές βέλτιστου ελέγχου βασίζονται στην υπόθεση της πλήρους γνώσεως των διαταραχών του συστήματος. Αυτή η υπόθεση δεν ευσταθεί στην πραγματικότητα και για αυτό είναι αναπόφευκτο η βέλτιστη λύση να είναι τελικά υποβέλτιστη. Εξαιτίας λοιπόν των ποικίλων αβεβαιοτήτων η ανοικτού βρόχου διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης θα έχει λιγότερο έγκυρα αποτελέσματα αν εφαρμοστεί απευθείας στην χωρική και χρονική εξέλιξη των κυκλοφοριακών συνθηκών. Ωστόσο το AMOC αποτελεί ένα αρκετά χρήσιμο εργαλείο και τα βέλτιστα αποτελέσματα από την συγκεκριμένη εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εξής:

1. Με την τεχνική του Κυλιόμενου Ορίζοντα. Η βέλτιστη λύση ενσωματώνει σφάλματα στην εκτίμηση του αρχικού διανύσματος κατάστασης και των παραμέτρων του μοντέλου καθώς και σφάλματα των προβλέψεων των διαταραχών. Με την τεχνική του Κυλιόμενου Ορίζοντα προκειμένου να περιοριστεί η επιρροή και η διάδοση των σφαλμάτων αυτών στην διάρκεια

του χρόνου απαιτείται να γίνεται μια περιοδική ανανέωση της αρχικής κατάστασης και των προβλέψεων των διαταραχών ανά περίοδο.

2. Μπορούν να αξιοποιηθούν για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου με ανάδραση.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Papageorgiou and A. Kotsialos. Freeway ramp metering: An overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, Vol. 3, pp. 271-281, 2002.
- [2] M. Papageorgiou, I. Papamichail. Handbook of Ramp Metering. Deliverable 7.5. *Report of the Information Society Project EURAMP (IST-2002-23110)*, IST Office, Brussels, Belgium, 2007.
- [3] M. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos, M. Protopapas and I. Papamichail. Evaluation of the effects of variable speed limits on motorway traffic using M42 traffic data. *Internal Report No: 2006-25, Dynamic Systems and Simulation Laboratory*, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2006.
- [4] Α. Κότσιαλος. Μοντελοποίηση και βέλτιστος έλεγχος κυκλοφορίας δικτύων αυτοκινητοδρόμων ευρείας κλίμακας. Διδακτορική Διατριβή. *Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης*, 2004.
- [5] I. Papamichail, M. Papageorgiou and Y. Wang. Motorway traffic surveillance and control. *European Journal of Control*, Vol. 12, pp. 1-23, 2007.
- [6] I. Papamichail, K. Kampitaki, M. Papageorgiou, A. Messemer. Integrated ramp metering and variable speed limit control of motorway traffic flow. *IFAC World Congress 2008*, accepted.
- [7] H. Zackor. Beurteilung verkehrsabhängiger geschwindigkeitsbeschränkungen auf autobahnen. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Vol. 128, pp. 1-61, 1972.
- [8] H. Zackor. Speed limitation on freeways: traffic-responsive strategies. In: *Concise Encyclopedia of Traffic Transportation Systems*, (M. Papageorgiou, Ed.), pp. 507-511, Oxford, UK, 1991.
- [9] M. Cremer. Der verkehrsfluß auf schnellstrassen. *Springer*, Berlin, Germany, 1979.

- [10] S. Smulders. Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transportation Research Part B*, Vol. 24, pp. 111-132, 1990.
- [11] A. Hegyi, B. De Schutter and J. Hellendoorn. Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves. *Transportation Research Record*, Vol. 1852, pp. 167-174, 2003.
- [12] Atkins Transport Systems. Advice regarding the controlled motorways algorithm and parameter setting. *Interim Advice Note xx/yy*, 2005.
- [13] Atkins Transport Systems. Innovative ITS Control measures. WP: 1 A critical review of control motorways algorithms and parameter setting, Jan. 2006(draft M42).
- [14] Mouchelparkman/TRL. M42 active traffic management – Parameters for 3-Lane variable speed limits. *Unpublished report produced by HA*, UPTR/T/108/04.
- [15] A. Messmer. A simulation program for motorway networks. *Documentation, Dynamic System and Simulation Laboratory*, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2006.
- [16] Dynamic Systems and Simulation Laboratory (DSSL), A. Messmer. The documentation of METANET: A simulation program for motorway networks. *Dynamic Systems and Simulation Laboratory*, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2000.
- [17] J. C. Jurvillier. Simulation de temps de parcours et modèle de consommation sur une autoroute urbaine. *Technical report, Institute National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité*, DART, Arcueil, France, 1982.
- [18] Y. Wang and M. Papageorgiou. Real time freeway traffic state estimation based on extended Kalman Filter: a general approach. *Transportation Research Part B*, 2003.

- [19] A. Kotsialos, M. Papageorgiou. Efficiency and equity properties of freeway network-wide ramp metering with AMOC. *Transportation Research Part C*, Vol. 12, pp. 401-420, 2004.
- [20] M. Papageorgiou, M. Marinaki. A feasible direction algorithm for the numerical solution of optimal control problems. Internal Report No. 1995-4. *Dynamic Systems and Simulation Laboratory*, Technical University of Crete, Chania, Greece.
- [21] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, F. Middelham. Optimal coordinated ramp metering with AMOC. *Preprints of the 80th Transportation Research Board Meeting*, Paper No. 3125, Washington, DC, USA, 2001.