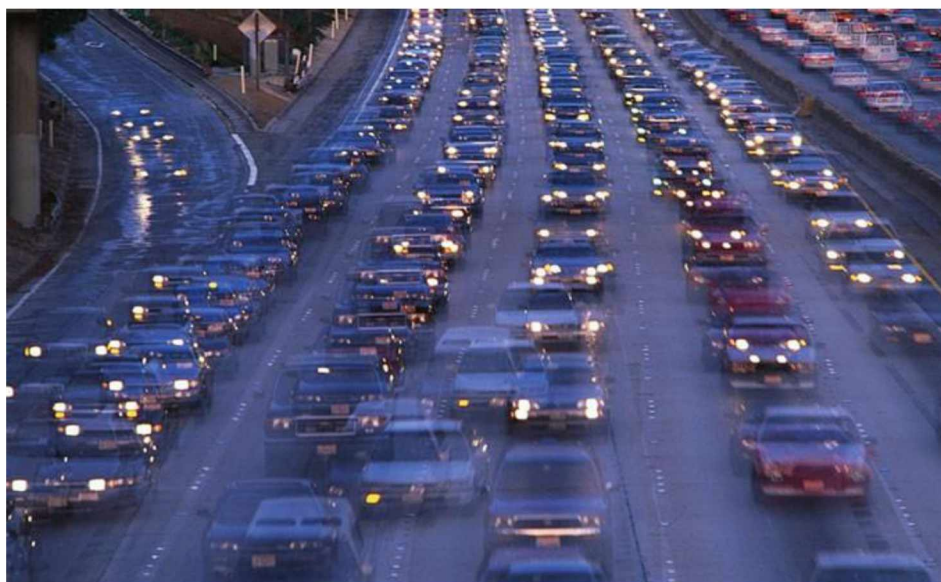




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ**



Υπό

**ΚΙΣΣΑ ΙΟΥΛΙΑ**

Επιβλέπων: Παντελεήμων Κοπελιάς

Επίκουρος καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

**ΒΟΛΟΣ 2022**

© 2022 Κίσσα Ιουλία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Παντελή Κοπελιά, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του, καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της. Επιπρόσθετα, είμαι ευγνώμων και στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Αθανάσιο Θεοφιλάτο και κ. Παναγιώτη Λεμονάκη. Ευχαριστώ επίσης αφάνταστα, την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αμέτρητη ηθική και ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφεραν από την αρχή ως το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών.

# ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ

Κίσα Ιουλία

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελεήμων Κοπελιάς, Επίκουρος Καθηγητής

## Περίληψη

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της σημαντικότητας του φαινομένου της κυκλοφοριακής συμφόρησης και η διερεύνηση σε θεωρητικό επίπεδο των μοντέλων κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με την εκτεταμένη χρήση γης, δημιούργησε ανάγκη για περισσότερες μετακινήσεις και έτσι αναπτύχθηκε ένα από τα σημαντικότερα σύγχρονα φαινόμενα, αυτό της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση κατά το πέρασμα του χρόνου αποτελούταν από πεζούς, οχήματα που σέρνονταν από άλογα και αργότερα από μηχανοκίνητα οχήματα. Συνδέεται άμεσα με την κυκλοφοριακή ροή, με βάση την οποία δημιουργήθηκαν τα πρώτα μοντέλα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το σημαντικότερο μοντέλο κυκλοφοριακής ροής είναι αυτό του Greenshields, που είναι το ιδανικότερο για την ανάλυση της κυκλοφορίας. Η προσομοίωση είναι η καλύτερη μέθοδος για τον προσδιορισμό της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Τα συστήματα πληροφοριών καθοδήγησης στάθμευσης βοηθούν στον περιορισμό του φαινομένου, καθώς ένα μεγάλο ποσοστό των ουρών αναμονής, ειδικά στα κέντρα των πόλεων, δημιουργούνται λόγω αναζήτησης θέσεων στάθμευσης. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία εντοπίστηκε ότι σε αντίθεση με τα μεγάλο πλήθος της βιβλιογραφίας, υπάρχει έλλειψη ύπαρξης ενός μοντέλου που να μπορεί να περιγράψει πλήρως τη σύγχρονη κατάσταση στις οδούς λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης. Από τα ήδη υπάρχοντα, περισσότερο κατάλληλα είναι τα μοντέλα ουρών  $M / M / 1$  δύο σταδίων και τεσσάρων σταδίων. Προτείνεται, η καλύτερη ενημέρωση στους χρήστες των οδών για εναλλακτικές διαδρομές, καθώς και η αλλαγή του χρονισμού των φωτεινών σηματοδοτών για περιορισμό της κυκλοφοριακής συμφόρησης, κυρίως στα κέντρα των πόλεων.

**Λέξεις-Κλειδιά:** Κυκλοφοριακή Συμφόρηση, Κυκλοφοριακή Ροή, Μοντέλα Κυκλοφοριακής Συμφόρησης, Προσομοίωση, Συστήματα Πληροφοριών Καθοδήγησης Στάθμευσης

# Review of Traffic Congestion Models

Kissa Ioulia

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2022

Supervisor: Panteleimon Kopelias, Associate Professor

## Abstract

The aim of this diploma thesis is to understand the importance of the traffic congestion phenomenon and to expand on a theoretical level the traffic congestion models. The rapid growth of the population combined with the extensive use of land, created a need for more movements and for this reason, developed one of the most important modern phenomena, traffic congestion. Traffic congestion over time consisted of pedestrians, horse drawn vehicles and later of motor vehicles. It is directly related to traffic flow, because of which the first models of traffic congestion were created. The most important traffic flow model is the Greenshields model, which is the most ideal for traffic analysis. Simulation is the best method to determine the traffic congestion. Parking guidance information systems help in order to limit the phenomenon. A large proportion of queues, especially in city centers, are created by searching for parking spaces. In this diploma thesis was identified, that contrary to the large amount of the literature, there is no model that can fully describe the modern situation on roads, due to traffic congestion. Of the existing ones, the two-stage and four-stage M / M / 1 queue models are most suitable. It is proposed to better inform road users about alternative routes, and to change the timing of traffic lights to limit traffic congestion, mainly in city centers.

**Keywords:** *Traffic Congestion, Traffic Flow, Models of Traffic Congestion, Simulation, Parking Guidance and Information Systems*

## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	10
1.1.Ορισμός Προβλήματος – Στόχος Πτυχιακής .....	10
1.2.Γενικοί ορισμοί.....	12
1.3.Δομή πτυχιακής.....	14
Κεφάλαιο 2: Ιστορικά στοι.χεία για την κυκλοφοριακή συμφόρηση .....	14
2.1.Γενικά.....	14
2.2 Ιστορικά παραδείγματα.....	15
2.3 Κυκλοφοριακή συμφόρηση στον 21ο αιώνα .....	21
Κεφάλαιο 3: Ορισμοί και βασικά μεγέθη κυκλοφοριακής συμφόρησης.....	24
3.1. Μέτρηση κυκλοφοριακής συμφόρησης – Εισαγωγικά .....	24
3.1.1 Όρια κυκλοφοριακής συμφόρησης.....	25
3.2 Επιμέρους στοιχεία συμφόρησης .....	26
3.2.1 Ένταση.....	27
3.2.1.1 Ποσοστό καθυστέρησης συμφόρησης Αυτό είναι ένα μέτρο του ποσού της καθυστέρησης που παρατηρείται σε αυτοκινητόδρομους και οδικές αρτηρίες. Η εξίσωση έχει ως εξής [2]: .....	27
3.2.1.2 Ώρες καθυστέρησης οχήματος .....	28
3.2.1.3 Άτομα-Ώρες καθυστέρησης.....	28
3.2.1.4 Δείκτης χρόνου ταξιδιού (ΤΤΙ) .....	29
3.2.1.5Φόρος χρόνου ταξιδιού — ΤΠΤ (Travel Time Tax).....	30
3.2.1.6 Σχόλια για τις χρήσεις του δείκτη χρόνου ταξιδιού (ΤΤΙ) και του φόρου χρόνου ταξιδιού (ΤΠΤ) .....	30
3.2.2 Διάρκεια .....	31
3.2.2.1 Ημερήσιες και Ωριαίες Παραλλαγές .....	32
3.2.3 Έκταση.....	33

<b>3.3.Συμπεράσματα κεφαλαίου .....</b>	<b>34</b>
<b>Κεφάλαιο 4: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μοντέλων Κυκλοφοριακής Ροής και Κυκλοφοριακής Συμφόρησης .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1.Εισαγωγή .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2. Το μοντέλο Greenshields .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3.Άλλα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4.Τα μοντέλα του HCM (Highway Capacity Manual) .....</b>	<b>42</b>
<b>4.5.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μοντέλων Κυκλοφοριακής Συμφόρησης .....</b>	<b>44</b>
<b>4.5.1.Εισαγωγή.....</b>	<b>44</b>
<b>4.5.2. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση.....</b>	<b>49</b>
<b>4.5.3. Μοντελοποίηση ροής κυκλοφορίας.....</b>	<b>55</b>
<b>4.5.4. Προσεγγίσεις στην προσομοίωση κυκλοφορίας .....</b>	<b>59</b>
<b>4.5.5. Σύστημα πληροφοριών καθοδήγησης στάθμευσης (PGI). .....</b>	<b>60</b>
<b>Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα .....</b>	<b>67</b>
<b>Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>70</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: κυκλοφοριακή ροή και η σχέση της με την υποδομή μεταφορών .....	11
Εικόνα 2: Βασικά στοιχεία που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ροή: περιβάλλον, όχημα, οδηγός / ταξιδιώτης .....	13
Εικόνα 3: Η εξάπλωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης.....	15
Εικόνα 4: Κυκλοφοριακή συμφόρηση στη Φιλαδέλφεια, τα τέλη του αιώνα. Πηγή: National Archives and Records Administration, 30-N-36713.....	17
Εικόνα 5: Dearborn street, κοιτάζοντας νότια από την οδό Randolph, περίπου το 1910. Πηγή: Σικάγο Ιστορική Εταιρεία .....	17
Εικόνα 6: Κυκλοφοριακή συμφόρηση σε μια προσέγγιση γεφυρών, Τόκιο, 16 Φεβρουαρίου 1924. Πηγή "Wikimedia Commons" <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Traffic_congestion.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Traffic congestion.jpg</a> .....	18
Εικόνα 7: Τυπική κυκλοφοριακή συμφόρηση στο κέντρο του Λος Άντζελες, περίπου 1920. Πηγή "Art + μεταφορά - pre-crosswalk και stoplight Los Angeles" δημοσιεύτηκε στις 26 Ιανουαρίου 2012 από τον Larry Ehl ( <a href="http://www.transportationissuesdaily.com/arttransportation-pre-crosswalk-and-stoplight-los-angeles/">http://www.transportationissuesdaily.com/arttransportation-pre-crosswalk-and-stoplight-los-angeles/</a> ).....	18
Εικόνα 8: Κυκλοφοριακή συμφόρηση σε ακτινική εθνική οδό που οδηγεί στο κέντρο της πόλης του Σικάγο, Cook County 1943. Πηγή [2] .....	19
Εικόνα 9: Gratiot Avenue, Detroit 1940. Πηγή: Automotive safety foundation .....	19
Εικόνα 10: Ένας κορεσμένος σύγχρονος αυτοκινητόδρομος. Πηγή «Η κυκλοφοριακή συμφόρηση και οι μεγάλες μετακινήσεις μας κοστίζουν ακριβά στο χρόνο και τα καύσιμα», <a href="http://www.peachygreen.com/going-green/traffic">http://www.peachygreen.com/going-green/traffic</a> .....	20
Εικόνα 11: Αριθμός διαδρόμων με κυκλοφοριακή συμφόρηση σε διάφορες μητροπολιτικές περιοχές. Πηγή: Αναφορά [11] .....	23
Εικόνα 12: Ένταση συμφόρησης σε χρόνο και χώρο. Αναφορά πηγής [6], NCHRP 398, Τομ. 1, Σχήμα 14, σελ. 70 .....	27
Εικόνα 13: Χρόνοι ταξιδιού περιόδου αιχμής για το I-93 Southbound: Roosevelt. Πηγή [5] .....	31
Εικόνα 14: Ποσοστό καθυστέρησης ανά ημέρα της εβδομάδας. Αναφορά πηγής [15], σελ. 7 .....	32
Εικόνα 15: Ποσοστό καθυστέρησης ανά ώρα της ημέρας. Αναφορά πηγής [15], σελ. 7 .....	33
Εικόνα 16: Ποσοστό καθυστέρησης ανά τύπο δρόμου. Αναφορά πηγής [15], σελ. 7 .....	33



Εικόνα 17: Το μοντέλο Greenshields [1].....	37
Εικόνα 18: Καμπύλες ροής ταχύτητας για αυτοκινητόδρομους (Από Εγχειρίδιο χωρητικότητας Αυτοκινητοδρόμων HCM, 2010.).....	42
Εικόνα 19: Καμπύλες ροής ταχύτητας για αυτοκινητόδρομους δύο λωρίδων (Από το Highway Capacity Manual 2010).....	44

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

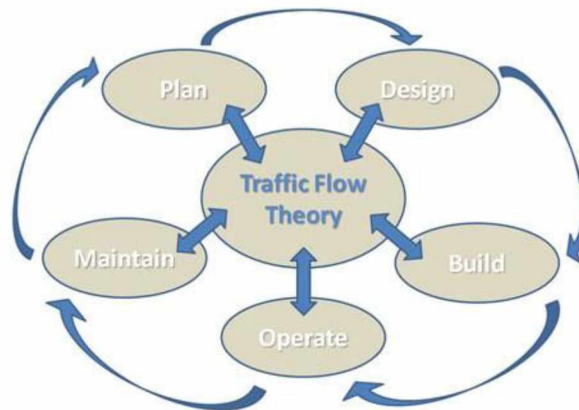
Πίνακας 1: Μέση ταχύτητα περιόδου αιχμής PM για τους 10 κορυφαίους διαδρόμους των ΗΠΑ με συμφόρηση με τη μεγαλύτερη καθυστέρηση περιόδου αιχμής, 2010 Source [11], Πίνακας 8, σελ 2422	
Πίνακας 2 Ενδεικτική εφαρμογή του φόρου χρόνου ταξιδιού (TTT) σε σύγκριση με το ΤΤΙ.....	30

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1.Ορισμός Προβλήματος – Στόχος Πτυχιακής

Οι μεταφορές ασχολούνται γενικά με την αποτελεσματική, ασφαλή και βιώσιμη κυκλοφορία ανθρώπων, όσο και αγαθών. Η ανάγκη για μετακίνηση είναι αποτέλεσμα της εκτεταμένης χρήσης της γης. Ο πληθυσμός της γης αυξάνεται διαρκώς καθ' όλη τη διάρκεια της καταγεγραμμένης ιστορίας, αλλά μόνο μέσα στον εικοστό αιώνα έχει γίνει το μέγεθός του σημαντικό εμπόδιο για τον πολιτισμό. Ένα από τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν από αυτήν την ανάπτυξη, το οποίο αποδείχθηκε ότι παρουσιάζει κάποιο μαθηματικό ενδιαφέρον, είναι το πρόβλημα της συμφόρησης. Στην ξηρά και στον αέρα, τόσο με τα οχήματα όσο και με τα πόδια, οι άνθρωποι κινούνται κοντά ο ένας στον άλλον σε βαθμό που ξεπερνά κατά πολύ την προηγούμενη εποχή. Η συμφόρηση παρατηρείται όχι μόνο στις μεταφορές, αλλά σχεδόν σε κάθε πτυχή της σύγχρονης ζωής, όπως στην επικοινωνία, την αστική ανάπτυξη, την εμπορική οργάνωση, την μαζική παραγωγή, και ίσως ακόμη και στη γεωργία. Η επιστημονική μελέτη της συμφόρησης, είτε προορίζεται να περιγράψει είτε να βελτιώσει μια υφιστάμενη κατάσταση, ήταν μια φυσική συνέπεια του μεγάλου ενδιαφέροντος του ανθρώπου για τον ολόενα και πιο γεμάτο κόσμο του. Η πιο πλήρως αναπτυγμένη μαθηματικά θεωρία της συμφόρησης είναι η «θεωρία της κυκλοφοριακής συμφόρησης» που ασχολείται με τη συσσώρευση οχημάτων (ή και πεζών) σε σταθερό σημείο, που προκαλείται από την ανάγκη για «υπηρεσία(ζήτηση)». Το θέμα μελετάται περισσότερο από εξήντα χρόνια. Ως πηγή συμφόρησης, το μηχανοκίνητο όχημα κατέχει μια μοναδική θέση, τόσο από πρακτική όσο και από μαθηματική άποψη και κατά συνέπεια τα τελευταία χρόνια έχει επισημανθεί από τους συγκοινωνιολόγους. Εκτιμήσεις για τη σημασία της μεταφοράς με αυτοκίνητο είναι δύσκολο να γίνουν, αλλά μπορεί κανείς να είναι σίγουρος ότι σε μια βιομηχανική κοινωνία η επίδρασή της είναι τεράστια, είτε μετράται οικονομικά, πολιτικά, από άποψη δημόσιας υγείας, ψυχολογικά, είτε και βιομηχανικά. Ορισμένες από τις κεντρικές έννοιες αυτής της εργασίας, όπως οι κυκλοφοριακές ροές και οι καθυστερήσεις λόγω μεγάλης κυκλοφορίας, είναι βασίμα δημοφιλείς έννοιες, σε αντίθεση με τομείς των εφαρμοσμένων μαθηματικών, όπου ελάχιστοι από αυτούς έχουν τόσο ευρεία και άμεσα διαισθητική σημασία στη ζωή μας. Οι συγκοινωνιολόγοι ασχολούνται με στάδια που είναι απαραίτητα για τον κύκλο ζωής μιας οδικής υποδομής, όπως η προμελέτη, ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία, και η συντήρηση. Στο στάδιο της προμελέτης, συνήθως προβλέπουμε απαιτήσεις κυκλοφορίας για ένα μελλοντικό έτος / περίοδο ανάλυσης, πραγματοποιούμε προκαταρκτική αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων ή προσδιορίζουμε προτεραιότητες για βελτιώσεις του συστήματος. Συνήθως μας ενδιαφέρει να απαντήσουμε σε ερωτήσεις όπως, πόσοι ταξιδιώτες αναμένεται να χρησιμοποιούν καθημερινά τη μονάδα μελέτης μας και ποιες είναι οι

αναμενόμενες αλλαγές στις χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης μας. Στο στάδιο του σχεδιασμού, ενδιαφερόμαστε για τα συγκεκριμένα γεωμετρικά στοιχεία της επιλεγμένης εναλλακτικής, όπως οριζόντια και κάθετη χάραξη για την προτεινόμενη υποδομή. Μετά την κατασκευή της εκάστοτε υποδομής (που είναι το πεδίο των μηχανικών που ασχολούνται με το κατασκευαστικό σκέλος), η εστίαση μετατοπίζεται στο λειτουργικό μέρος και τη συντήρηση. Το στάδιο συντήρησης περιλαμβάνει τακτική συντήρηση και επισκευές, όπως αποκατάσταση ασφάλτου ή ορίων δρόμου και πεζοδρομίων, καθώς και συντήρηση και ίσως επαναπρογραμματισμό φωτεινών σηματοδοτών. Επιπλέον υπάρχει και το στάδιο της διαχείρισης, στο οποίο ασχολούμαστε με αλγόριθμους ελέγχου (όπως μέτρηση ράμπας – ramp metering), τη διαχείριση της κυκλοφορίας και άλλες πτυχές, όπως η αποφυγή συμβάντων.



Εικόνα 1: κυκλοφοριακή ροή και η σχέση της με την υποδομή μεταφορών

Το σχήμα 1 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της κυκλοφοριακής ροής και των πέντε σταδίων μιας υποδομής που συζητήθηκαν παραπάνω. Η κυκλοφοριακή ροή σχετίζεται κυρίως με το στάδιο λειτουργίας, αλλά τα εργαλεία και οι μέθοδοι της, χρησιμοποιούνται σε όλο το φάσμα της συγκοινωνιακής ανάλυσης. Η κυκλοφοριακή ροή ασχολείται με την κίνηση οχημάτων ή πεζών σε μία οποιαδήποτε οδό και προσδιορίζεται από συγκεκριμένα μεγέθη. Τα μεγέθη αυτά είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, η ταχύτητα, η συγκέντρωση καθώς και ο διαχωρισμός. Η ανάγκη για μετακίνηση όμως έχει προκαλέσει σταδιακή αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, σε σημείο που τα οχήματα στις οδούς είναι περισσότερα της χωρητικότητας της οδού, πράγμα το οποίο μειώνει αρκετά την μέση ταχύτητα από την ταχύτητα ελεύθερης ροής. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται ως κυκλοφοριακή συμφόρηση. Για αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαία η συχνή αξιολόγηση της ποιότητας μίας οδού με βάση τις επικρατούσες συνθήκες της οδού. Η συμφόρηση είναι συνέπεια του τόπου που ζούμε και εργαζόμαστε, του πώς και πού ταξιδεύουμε, και του πώς χρησιμοποιείται η γη. Επηρεάζει το κόστος ταξιδιού, την ποιότητα του αέρα μας, την ασφάλεια της κυκλοφορίας και το καύσιμο που καταναλώνουν τα μηχανοκίνητα οχήματα.

*Ερωτήσεις που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους μηχανικούς κυκλοφορίας-συγκοινωνιολόγους είναι:*

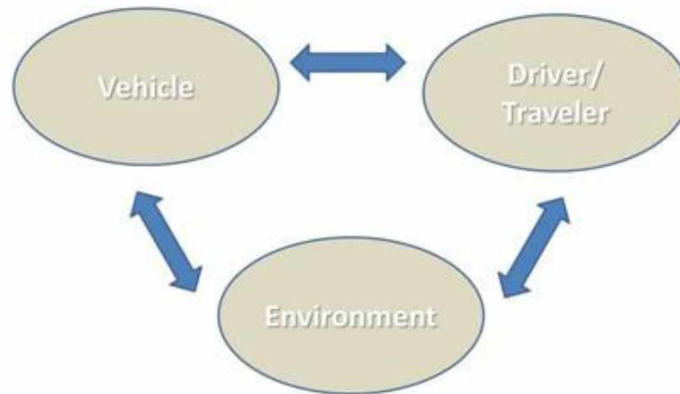
- Πόσες λωρίδες πρέπει να έχει η οδός για να λειτουργεί κάτω από την οριακή ικανότητά του;
- Πόση επιπλέον ζήτηση θα έχει μία οδός εάν σχεδιαστεί με περισσότερες λωρίδες για αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης;
- Ποια θα ήταν η ταχύτητα λειτουργίας μιας οδικής υποδομής, εάν η ζήτηση αυξηθεί απότομα τα επόμενα χρόνια;
- Μπορούν να βελτιωθούν οι λειτουργίες των κόμβων με σηματοδότηση με αλλαγή του χρόνου αναμονής στο φανάρι ή χρειάζονται αλλαγές γεωμετρικού σχεδιασμού;
- Που είναι πιθανόν να εμφανιστεί κυκλοφοριακή συμφόρηση;

Σκοπός αυτής της αξιολόγησης είναι ο εντοπισμός των μειονεκτημάτων του δικτύου, έτσι ώστε να γίνουν αλλαγές στα υπάρχοντα μοτίβα κυκλοφορίας, για να είναι η οδός πιο αποτελεσματική.

Ο στόχος της παρούσας πτυχιακής είναι να διερευνήσει ποια είναι τα συνηθέστερα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση (και την αποφυγή) κυκλοφοριακής συμφόρησης και σε θεωρητικό επίπεδο (ακαδημαϊκή έρευνα) και σε επίπεδο εφαρμογής (τι χρησιμοποιείται στις αληθινές μελέτες σχεδιασμού οδών, λεωφόρων, εθνικών οδών, είτε αν πρόκειται για νέους δρόμους, είτε για υφιστάμενους, όπου και θα πρέπει να ρυθμιστεί η φωτεινή σηματοδότησή τους, ο χρονισμός και οι κύκλοι τους).

## **1.2.Γενικοί ορισμοί**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο στόχος της κυκλοφοριακής ροής είναι η αξιολόγηση της ποιότητας λειτουργίας μιας οδού, δεδομένου ενός συνόλου επικρατούμενων συνθηκών. Η ποιότητα λειτουργίας αξιολογείται με συγκεκριμένα μέτρα απόδοσης, όπως η ταχύτητα, η καθυστέρηση ή ο χρόνος ταξιδιού. Η κυκλοφοριακή ροή ασχολείται με οχήματα με συγκεκριμένο μέγεθος και χαρακτηριστικά απόδοσης (π.χ. μήκος, βάρος-ιπποδύναμη κ.λπ.), καθώς και με οδηγούς με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και συμπεριφορές (π.χ. επιθετικοί, εξοικειωμένοι με την οδό κ.λπ.).



Εικόνα 2: Βασικά στοιχεία που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ροή: περιβάλλον, όχημα, οδηγός / ταξιδιώτης

Επιπλέον αποτελείται από πεζούς, ποδήλατα ή οχήματα μαζικής μεταφοράς και ασχολείται με τις λειτουργίες και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των διαφορετικών όρων. Οι επικρατούσες συνθήκες αναφέρονται στο σχεδιασμό (π.χ. οριζόντια χάραξη, βαθμός συμφόρησης κ.λπ.) και στα στοιχεία ελέγχου (π.χ. παρουσία σήματος ή σήματος STOP) μιας οδού καθώς και άλλων εξωτερικών συνθηκών όπως η βροχή ή τα συμβάντα. Συνοπτικά, η κυκλοφοριακή ροή επιδιώκει να κατανοήσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τριών θεμελιωδών στοιχείων: του οχήματος, του οδηγού / ταξιδιώτη και του περιβάλλοντος (Εικ. 2). Τα χαρακτηριστικά καθενός από αυτά τα στοιχεία καθώς και οι αλληλεπιδράσεις τους είναι πρωταρχικής σημασίας για τους συγκοινωνιολόγους.

Για παράδειγμα, ας εξετάσουμε την κίνηση ενός φορτηγού κατά μήκος ενός αυτοκινητόδρομου. Τα χαρακτηριστικά του φορτηγού (όπως το βάρος σε ιπποδύναμη) θα επηρέαζαν την επιτάχυνση και τη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να φτάσει. Εάν ο αυτοκινητόδρομος έχει απότομη κλίση, η επιτάχυνση και η μέγιστη ταχύτητα θα μειωθούν σημαντικά. Έτσι, η αλληλεπίδραση των χαρακτηριστικών του οχήματος με τα χαρακτηριστικά του αυτοκινητόδρομου επηρεάζει την απόδοση του οχήματος. Τώρα ας σκεφτούμε ότι το φορτηγό ταξιδεύει σε αυτοκινητόδρομο δύο λωρίδων (μία ανά κατεύθυνση). Η ταχύτητά του θα επηρέαζε σημαντικά την ταχύτητα των ακόλουθων οχημάτων και τελικά τις λειτουργίες της οδού (μέσος χρόνος ταξιδιού, χωρητικότητα κ.λπ.).

Η κυκλοφοριακή ροή αντλεί στοιχεία από πολλούς διαφορετικούς κλάδους για την ανάπτυξη κατάλληλων εργαλείων ανάλυσης. Επηρεάζεται από τη δυναμική του οχήματος, από ζητήματα απόδοσης οχημάτων (μηχανολογία) καθώς και από ανθρώπινους παράγοντες, ψυχολογία και κοινωνιολογία. Βασίζεται επίσης σε στατιστικές και λειτουργικές αρχές έρευνας και φυσικής. Το περιβάλλον της οδού ορίζεται γενικά με αποφάσεις πολιτικής (χρήση γης, οικονομικά κ.λπ.) που

επηρεάζουν επίσης την ποιότητα λειτουργίας της κυκλοφορίας. Έτσι, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε καθένα από τα στοιχεία που φαίνονται στο Σχ. 2 καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους, ώστε να μπορούμε να αναπτύξουμε και να λειτουργήσουμε καλύτερα τα δίκτυα μεταφοράς μας.

### 1.3. Δομή πτυχιακής

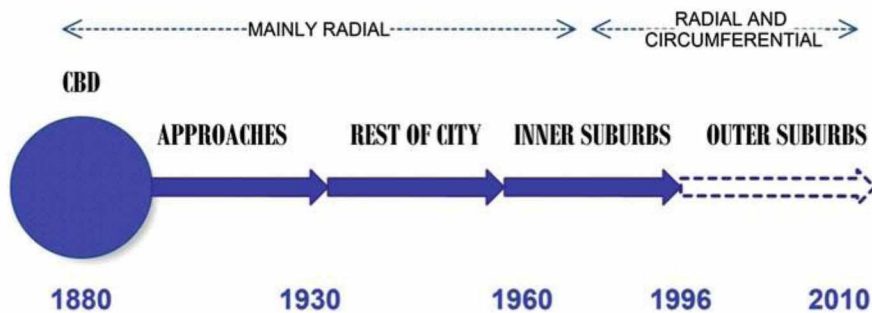
Αυτή η πτυχιακή είναι οργανωμένη σε τέσσερα μέρη. Το πρώτο μέρος επικεντρώνεται στην ατομική κίνηση του οχήματος και παρουσιάζει εξισώσεις κίνησης για μοντελοποίηση της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης των μεμονωμένων οχημάτων, καθώς και αλληλεπιδράσεις στο επίπεδο του οχήματος (παρακολούθηση αυτοκινήτου, αλλαγή λωρίδας). Το δεύτερο μέρος επικεντρώνεται στις λειτουργίες της κυκλοφοριακής ροής. Παρουσιάζει τα τρία θεμελιώδη χαρακτηριστικά που επηρεάζονται εξαιτίας της κυκλοφοριακής συμφόρησης (ταχύτητα, ροή, πυκνότητα) καθώς και τις σχέσεις τους με τη μορφή μοντέλων. Συζητά επίσης λεπτομερώς την χωρητικότητα και άλλα μέτρα απόδοσης που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μιας ροής. Το τρίτο μέρος διατυπώνει και χρησιμοποιεί πολλές διαφορετικές τεχνικές ανάλυσης κυκλοφορίας για σημεία συμφόρησης και ουρές, όπως μαθηματική μοντελοποίηση, εμπειρική και προσομοίωση. Το τελευταίο μέρος ασχολείται με τα χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες συγκεκριμένων υποδομών που εστιάζουν σε αυτοκινητόδρομους, σηματοδοτημένες και μη σηματοδοτημένες διασταυρώσεις, και αυτοκινητόδρομους δύο λωρίδων.

## Κεφάλαιο 2: Ιστορικά στοιχεία για την κυκλοφοριακή συμφόρηση

### 2.1. Γενικά

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση δεν είναι ένα νέο φαινόμενο. Ξεκινάει πριν από τη βιομηχανική επανάσταση, το μηχανοκίνητο όχημα και τη σύγχρονη πόλη. Ήταν συνηθισμένο στην αρχαιότητα, στο Λονδίνο του 17ου αιώνα και στη Νέα Υόρκη του 19ου αιώνα. Οι αγορές προϊόντων, οι λιμενικές περιοχές και τα κέντρα του παρελθόντος ήταν όλα γεμάτα και κορεσμένα. Η βιομηχανική πόλη που αναπτύχθηκε πριν από την εποχή του αυτοκινήτου αντιμετώπισε κυκλοφοριακή συμφόρηση που προκλήθηκε από την υψηλή πυκνότητα πληθυσμού και απασχόλησης, που παρήγαγε ταξιδιωτικές απαιτήσεις που υπερέβαιναν την οδική ικανότητα. Η εμφάνιση των ουρανοξυστών στην Αμερική στα τέλη του 19ου αιώνα, μαζί με το συνδυασμό των οχημάτων με άλογα, δημιούργησαν σοβαρή σύγχυση κατά τα τελευταία χρόνια του 19ου αιώνα.

Πριν από την αυτοκινητοβιομηχανία και τους ηλεκτρικούς σιδηρόδρομους, η συμφόρηση περιοριζόταν κυρίως στα κέντρα των πόλεων και στα άμεσα περιβάλλοντά τους. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση διαπερνά πλέον τις μητροπολιτικές περιοχές [1]. Η γεωγραφική εξάπλωση της συμφόρησης τον περασμένο αιώνα απεικονίζεται στο σχήμα 3. Αυτή η διασπορά αντικατοπτρίζει τη βελτιωμένη κινητικότητα των μεταφορών και τον αντίκτυπό της στα πρότυπα ανάπτυξης των προαστίων.



Εικόνα 3: Η εξάπλωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης

## 2.2 Ιστορικά παραδείγματα

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση αντικατοπτρίζει σταθερά το μέγεθος και τη δομή της πόλης. Οι τρόποι, οι τοποθεσίες και οι εντάσεις έχουν αλλάξει με την πάροδο των ετών, αλλά τα κοινά θέματα παραμένουν - η συγκέντρωση ατόμων και οχημάτων σε μεγάλα κέντρα απασχόλησης και η αδυναμία διαχείρισης των συγκρούσεων μεταξύ ταξιδιωτών και χρηστών του δρόμου και η εξάλειψη των φυσικών εμποδίων στη μετακίνηση [2].

Πριν από την εποχή του αυτοκινήτου, η κυκλοφοριακή συμφόρηση χαρακτηριζόταν από άμαξες και πεζούς που «διεκδικούσαν» χώρο στο κέντρο της πόλης. Ο οδικός σιδηρόδρομος (τραμ), εισήγαγε ένα άλλο διαφορετικό στοιχείο στην κυκλοφορία, προσθέτοντας συγκρούσεις και συμφόρηση. Τα αυτοκίνητα της εκάστοτε οδοού ερχόντοσυν συχνά σε πολύ κοντινή απόσταση και συχνά συμφόριζαν το ένα το άλλο.

Μερικά ιστορικά παραδείγματα είναι:

- Το 1891, στην οδό Tremont της Βοστώνης: «κατά τη διάρκεια της απογευματινής ώρας αιχμής, τα αυτοκίνητα ήταν τόσο κοντά το ένα με το άλλο που θα μπορούσε κανείς να περπατήσει από την πλατεία Scollay στην οδό Boylston στις στέγες του αυτοκινήτου». (Απόσταση 4,5 χλμ) [3]

- Στη Φιλαδέλφεια στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, τα αυτοκίνητα και τα οχήματα που έλκονταν από άλογα δεν μπορούσαν να κινηθούν καθόλου. (Εικ. 4).
- Στο Σικάγο το 1910, η Dearborn Street και η Randolph Street βίωσαν συνθήκες «κλειδώματος» τις ώρες αιχμής λόγω των συγκρούσεων οχημάτων-οχημάτων και οχημάτων-πεζών (Εικ. 5). Τόσο τα αυτοκίνητα όσο και τα οχήματα με άλογα συνέβαλαν σημαντικά στη συμμόρφωση.
- Στην συνοικία Honjo του Τόκιο, το σχήμα 6 δείχνει την ένταση της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης που συνέβει το 1924, λόγω του όγκου ζήτησης οχημάτων και πεζών που πλησιάζουν μια γέφυρα με ανεπαρκή χωρητικότητα.

Η ανάπτυξη της αυτοκινητοβιομηχανίας τη δεκαετία του 1920 προηγήθηκε του αποτελεσματικού ελέγχου και της διαχείρισης της κυκλοφορίας. Αυτό οδήγησε σε χαοτική σύγχυση και συμμόρφωση σε πολλά επιχειρηματικά κέντρα. Το σχήμα 7 δείχνει την κατάσταση στο κέντρο του Λος Άντζελες κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1920.

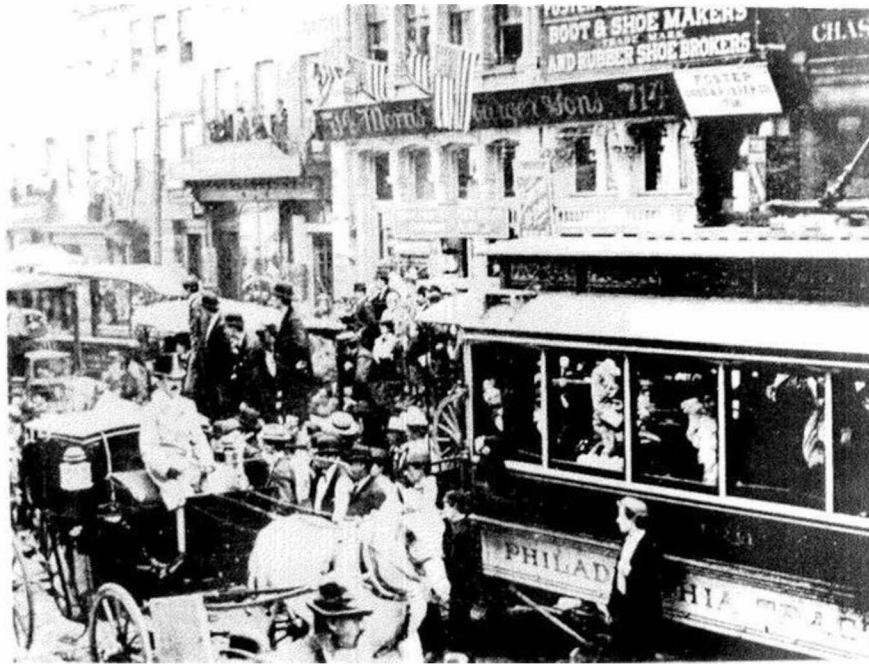
Αυτές οι συνθήκες οδήγησαν πολλές πόλεις:

- (1) να θεσπίσουν κανονισμούς και να κάνουν ελέγχους κυκλοφορίας,
- (2) στην κατάργηση αγορών προϊόντων από τις κεντρικές πόλεις
- (3) στην αύξηση του πλάτους των δρόμων. Το Σικάγο, για παράδειγμα κατά την εκ νέου κατασκευή της South Water Market, έχτισε δύο επίπεδα δρόμου: την Michigan Avenue και την Wacker Drive,
- (4) στην απαγόρευση αριστερών στροφών και
- (5) στην σηματοδότηση διασταυρώσεων στα κέντρα των πόλεων.

Άλλες πόλεις άρχισαν επίσης να διαχειρίζονται την κυκλοφορία τους, και εμφανίστηκε ο τομέας του Traffic Engineering.

Η δεκαετία του 1930 και του 1940 χαρακτηρίστηκε από τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης που προκαλούσαν τα αυτοκίνητα σε ακτινικούς αυτοκινητόδρομους που οδηγούσαν μέσα στο κέντρο της πόλης. Το σχήμα 8 δείχνει τα πρότυπα συμμόρφωσης στο Σικάγο και τα περίχωρά του το 1942. Τα εφεδρικά αντίγραφα της κυκλοφορίας ήταν στην ίδια κατάσταση σε πολλούς δρόμους της πόλης, όπου σε ορισμένες περιπτώσεις εκτείνονταν και για χιλιόμετρα. Το Σχήμα 9 δείχνει την κυκλοφοριακή συμμόρφωση του 1940 στην λεωφόρο Gratiot, μια σημαντική αρτηρία στο Ντιτρόιτ.

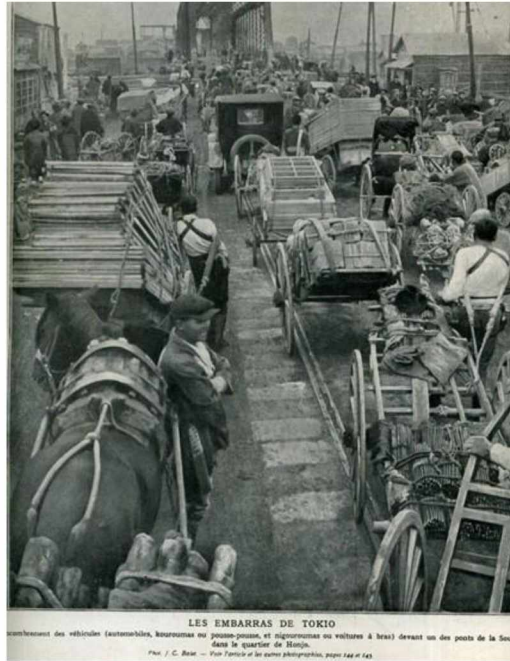




*Εικόνα 4: Κυκλοφοριακή συμφόρηση στη Φιλαδέλφεια, τα τέλη του αιώνα. Πηγή: National Archives and Records Administration, 30-N-36713*



*Εικόνα 5: Dearborn street, κοιτάζοντας νότια από την οδό Randolph, περίπου το 1910. Πηγή: Σικάγο Ιστορική Εταιρεία*



Εικόνα 6: Κυκλοφοριακή συμφόρηση σε μια προσέγγιση γεφυρών, Τόκιο, 16 Φεβρουαρίου 1924. Πηγή "Wikimedia Commons" [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Traffic\\_congestion.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Traffic_congestion.jpg)

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση εντός και γύρω από τα κέντρα πόλεων της Ευρώπης, των ΗΠΑ και του Καναδά αυξήθηκε τα χρόνια μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Μια μελέτη του 1950 σχετικά με τις συνθήκες κυκλοφορίας στην κεντρική επιχειρηματική περιοχή του Σικάγου, για παράδειγμα, ανέφερε ότι (κατά μέσο όρο) οι καθυστερήσεις στην κυκλοφορία στο Loop αντιπροσώπευαν απώλειες χρόνου 2 λεπτών ανά ταξίδι για τους οδηγούς αυτοκινήτων και 2-½ λεπτά για τους αναβάτες διαμετακόμισης λεωφορείων.



Εικόνα 7: Τυπική κυκλοφοριακή συμφόρηση στο κέντρο του Λος Άντζελες, περίπου 1920. Πηγή "Art + μεταφορά - pre-crosswalk και stoplight Los Angeles" δημοσιεύτηκε στις 26 Ιανουαρίου 2012 από τον Larry Ehl (<http://www.transportationissuesdaily.com/arttransportation-pre-crosswalk-and-stoplight-los-angeles/>)



Εικόνα 8: Κυκλοφοριακή συμμόρφωση σε ακτινική εθνική οδό που οδηγεί στο κέντρο της πόλης του Σικάγο, Cook County 1943. Πηγή [2]



Εικόνα 9: Gratiot Avenue, Detroit 1940. Πηγή: Automotive safety foundation

Οι μέθοδοι ελέγχου συγκοινωνιακής μηχανικής από μόνες τους δεν μπορούσαν να συμβαδίσουν με τις αυξανόμενες απαιτήσεις κυκλοφορίας. Οι συνωστισμένες συνθήκες στις πόλεις μετριάστηκαν τελικά από την κατασκευή αυτοκινητόδρομου που σχετίζεται με το σύστημα Interstate Highway. Πολλές πόλεις δημιούργησαν ακτινικούς αυτοκινητόδρομους με βρόχους, που οδηγούσαν κεντρικά της πόλης. Όμως, η σύγκλιση και η ισορροπία λωρίδων και η στενή απόσταση μεταξύ των

οχημάτων που προσπερνούσαν το ένα το άλλο, οδήγησαν σε λειτουργικά προβλήματα και επαναλαμβανόμενη συμφόρηση που έχει κατακλύσει πολλούς από αυτούς τους αυτοκινητόδρομους για χρόνια. Με την πάροδο των ετών (1960-μέσα της δεκαετίας του 1970), ωστόσο, οι συνδυασμένες επιδράσεις της κατασκευής αυτοκινητόδρομων και της βελτίωσης της συγκοινωνιολογίας, μείωσαν την κυκλοφοριακή συμφόρηση σε πολλές κοινότητες.

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση αυξήθηκε και πάλι από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Έχει μετατοπιστεί σε μεγάλο βαθμό από το κέντρο της πόλης σε προάστια, από κεντρικούς δρόμους μίας πόλης σε προαστιακούς αυτοκινητόδρομους και interstate αυτοκινητόδρομους (Εικ. 10). Μερικές μελέτες έχουν τεκμηριώσει βελτιώσεις, αν και λείπουν κάποια συστηματικά μέτρα για την κυκλοφοριακή συμφόρηση και την μεγάλη κινητικότητα.



*Εικόνα 10: Ένας κορεσμένος σύγχρονος αυτοκινητόδρομος. Πηγή «Η κυκλοφοριακή συμφόρηση και οι μεγάλες μετακινήσεις μας κοστίζουν ακριβά στο χρόνο και τα καύσιμα», <http://www.peachygreen.com/going-green/traffic>*

Μερικά παραδείγματα αναφερόμενων βελτιώσεων δίνονται παρακάτω:

- Μια μελέτη του 1970 [4] για την κινητικότητα που έγινε σε περίπου 17 πόλεις της Αμερικής, διαπίστωσε ότι η ταχύτητα κίνησης αυξήθηκε σε 13 πόλεις και μειώθηκε σε τέσσερις. Οι ταχύτητες αυξήθηκαν περισσότερο από 15% σε 8 πόλεις και μειώθηκαν περισσότερο από 15% σε δύο πόλεις.
- Στο Λος Άντζελες, παρά το τριπλασιασμό των εγγεγραμμένων μηχανοκίνητων οχημάτων μεταξύ του 1936 και το 1967, οι χρόνοι ταξιδιού σε ώρες εκτός αιχμής μεταξύ της κεντρικής επιχειρηματικής περιοχής (Central Business District - CBD) και δεκατεσσάρων απομακρυσμένων τοποθεσιών μειώθηκαν κατά μέσο όρο 23–26 λεπτά, κυρίως λόγω της συνεχιζόμενης ανάπτυξης αυτοκινητόδρομων.

- Η κατασκευή αυτοκινητόδρομου στο Λος Άντζελες μείωσε δραματικά την κυκλοφορία σε τοπικό επίπεδο του δρόμου. Για παράδειγμα, η καθημερινή κυκλοφορία στην οδό S. Figueroa μειώθηκε από 45.000 οχήματα το 1955 σε 13.500 οχήματα το 1958. Ωστόσο έκτοτε έχει αναφερθεί ότι αυξάνεται ξανά (σε πάνω από 34.000 το 1993) ως αποτέλεσμα της αυξημένης συμφόρησης στον παράλληλο αυτοκινητόδρομο [5].
- Οι ταχύτητες σε ώρες αιχμής στο κέντρο της πόλης Providence αυξήθηκαν από 8-16 km/h το 1927, σε 16-30 km/h το 1978 [6].
- Στη Βοστώνη, η κυκλοφορία μηχανοκίνητων οχημάτων από και προς το CBD αυξήθηκε κατά 80% από το 1927 έως το 1960. Ωστόσο, οι μέσες ημερήσιες ταχύτητες σε εννέα κύριους δρόμους στο κέντρο της πόλης αυξήθηκαν από 16.9 σε 21.4 km/h, αύξηση 27% κατά την περίοδο εκείνη.
- Ένα πρότυπο που δημιουργήθηκε στις λεωφόρους που συνδέουν τον Βορρά με το Νότο στο Μανχάταν, οδήγησε σε εξοικονόμηση χρόνου ταξιδιού 22% για την κυκλοφορία μεταξύ βορρά-νότου, εξοικονόμηση 40% για την κυκλοφορία μεταξύ ενδιάμεσων πόλεων και μείωση κατά 20% σε τυχόν ατυχήματα που εμπλέκονταν πεζοί [7].

### 2.3 Κυκλοφοριακή συμφόρηση στον 21ο αιώνα

Σήμερα υπάρχει συμφόρηση σε περιφερειακούς και διασταυρούμενους δρόμους καθώς και σε ακτινικούς αυτοκινητόδρομους. Η ανάπτυξη και η διασπορά κατοικιών και χώρων εργασίας, αντικατοπτρίζει τη συνεχιζόμενη μετατόπιση ατόμων και θέσεων εργασίας σε προαστιακά περιβάλλοντα, την αύξηση των κτιρίων γραφείων και των άκρων πόλεων [8] κατά μήκος αυτοκινητόδρομων / ζωνών και τη μείωση του πληθυσμού και της απασχόλησης σε παλαιότερες κεντρικές πόλεις.

Το INRIX ([11] σελ. 7, 22) καθορίζει μια λωρίδα ως κορεσμένη όταν:

- Εντοπίζεται επαναλαμβανόμενη συμφόρηση που συμβαίνει σε πολλά τμήματα μίας οδού, συνολικού μήκους τουλάχιστον 5 χιλιομέτρων.
- Τουλάχιστον ένα τμήμα της οδού έχει συμφόρηση 10 ώρες την εβδομάδα, κατά μέσο όρο και
- Όλα τα οδικά τμήματα της λωρίδας έχουν τουλάχιστον 4 ώρες την εβδομάδα συμφόρηση, κατά μέσο όρο.

Ο Πίνακας 1 εμφανίζει την ταχύτητα ταξιδιού για τις δέκα οδικές αρτηρίες με τη μεγαλύτερη καθυστέρηση κατά τις ώρες αιχμής, το 2010 στις ΗΠΑ. Αυτές οι οδικές αρτηρίες βρίσκονται στις

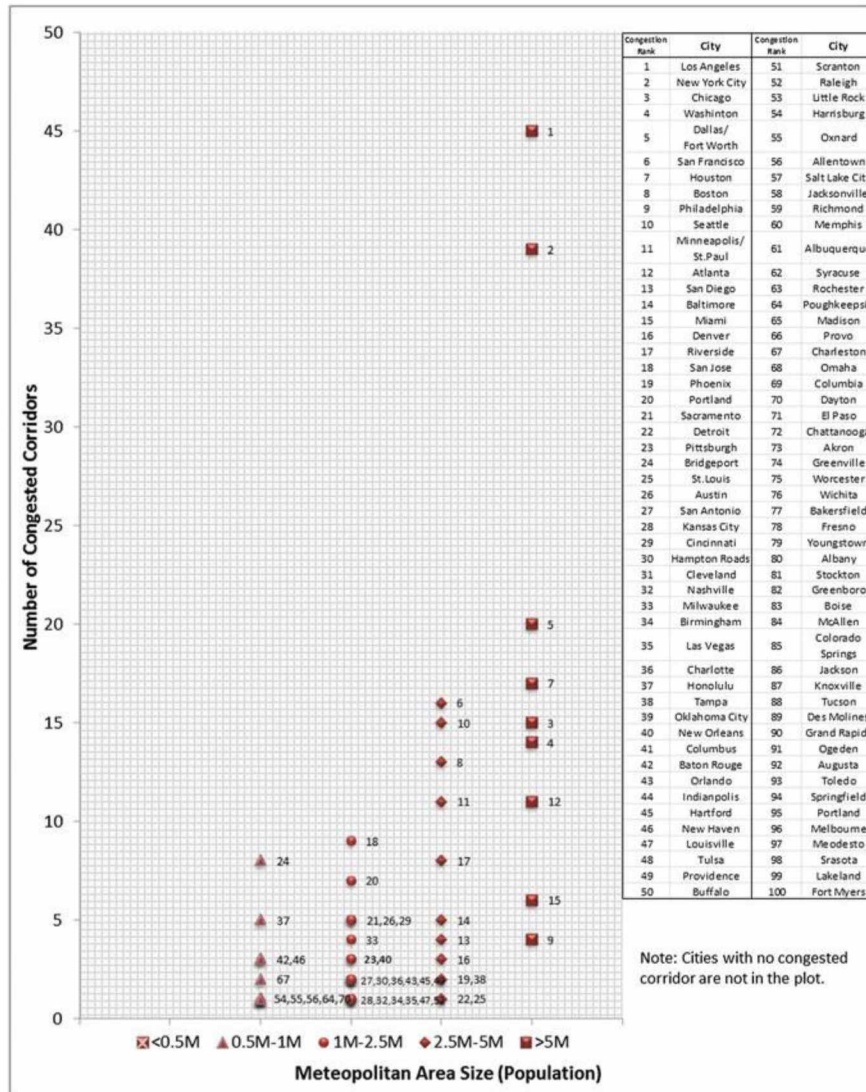
μεγάλες μητροπόλεις: Λος Άντζελες, Νέα Υόρκη, Σικάγο και Ουάσιγκτον DC. Για παράδειγμα, ο διάδρομος Cross-Bronx Expressway στη Νέα Υόρκη είχε 18,2 km ουρά και 25,4 km/h μέση ταχύτητα), ενώ στην Washington ο I 95 είχε 38,5 km ουρά με μέση ταχύτητα 44,4 km/h, απόσταση που εκτεινόταν από τον I-395 έως την οδό Russell.

Υπήρχαν 341 οδικές αρτηρίες με μόνιμη συμφόρηση στις ΗΠΑ το 2010, με συνολικό μήκος 2.295 km. Σε μία μέση οδική αρτηρία σε ώρα αιχμής, η ουρά εκτεινόταν σε μήκος 6,7 km και λειτουργούσε με ταχύτητα 43,8 km/h. Υπάρχει όμως μεγάλη διακύμανση από αυτές τις μέσες τιμές σε περιοχές με ίδιες ομάδες πληθυσμού, καθώς και μεταξύ ομάδων διαφορετικών μεγεθών.

Τα χαρακτηριστικά των κορεσμένων οδικών αρτηριών ποικίλλουν πολύ μεταξύ των μητροπολιτικών περιοχών σε έκταση (αριθμός και μήκος) και ένταση (μέση ταχύτητα) - (INRIX 2010). Αυτή η μεταβλητότητα σχετίζεται κυρίως με το μέγεθος της αστικής περιοχής. Οι μεγαλύτερες περιοχές (πληθυσμός άνω των 5 εκατομμυρίων) έχουν τον μεγαλύτερο αριθμό οδικών αρτηριών με συμφόρηση (Εικ. 11).

*Πίνακας 1: Μέση ταχύτητα για τους 10 κορυφαίους διαδρόμους των ΗΠΑ με συμφόρηση με τη μεγαλύτερη καθυστέρηση, 2010 Source [11], Πίνακας 8, σελ 24*

	Πόλη	Οδός	χρόνος καθυστέρησης (min)	Μήκος (km)	Μέση ταχύτητα σε ώρες αιχμής (km/h)
1	Los Angeles (Riverside)	Riverside Fwy/CA-91 EB	37	33,3	35,1
2	Chicago	I-90/I-94 EB (Kennedy/Dan Ryan Expys)	32	25,6	31,9
3	New York	I-95 SB (NE Thwy, Bruckner/Cross Bronx Expys)	30	18,2	25,4
4	Los Angeles	I-5 SB (Santa Ana/Golden St Fwys)	30	28,2	35,9
5	Washington, DC	I-95 SB	29	38,5	44,4
6	New York	Long Island Expy/I-495 EB	29	25,7	34,3
7	Chicago	Eisenhower Expy/I-290 EB	28	34,6	40,7
8	Los Angeles	San Diego Fwy/I-405 NB	28	21,1	30,9
9	Los Angeles	Pomona Fwy/CA-60 EB	28	34,9	41,8
10	Los Angeles	Santa Monica Fwy/I-10 EB	28	24	34,3



Εικόνα 11: Αριθμός διαδρόμων με κυκλοφοριακή συμφόρηση σε διάφορες μητροπολιτικές περιοχές. Πηγή: Αναφορά [11]

Η αστική ανάπτυξη είναι πιθανό να συνεχιστεί για τον υπόλοιπο 21ο αιώνα. Αναμένεται ότι περισσότεροι άνθρωποι θα ζουν σε μητροπολιτικές περιοχές όπου θα καταλαμβάνουν περισσότερη γη και θα ταξιδεύουν περισσότερο σε διασκορπισμένους χώρους εργασίας, καθώς και για ψώνια και αναψυχή. Οι διαβαθμίσεις της πυκνότητας του πληθυσμού και της απασχόλησης θα συνεχίσουν να γίνονται πιο ομαλές - δηλαδή η αύξηση του πληθυσμού σε απομακρυσμένες περιοχές θα συνεχίσει να καταλαμβάνει περισσότερη γη σε χαμηλή πυκνότητα. Αν τα κέντρα των πόλεων αυξηθούν σε πληθυσμό, πιθανόν και το κόστος ιδιοκτησίας και οδήγησης αυτοκινήτου να αυξηθεί. Η συμφόρηση θα ακολουθήσει αυτές τις τάσεις: αύξηση κυκλοφορίας σε απομακρυσμένες περιοχές και προσπέλαση των συνδέσμων μικρής δυναμικότητας του οδικού συστήματος. Έτσι, η κυκλοφοριακή συμφόρηση στον αυτοκινητόδρομο και στα προάστια είναι πιθανό να αυξηθεί, επεκτεινόμενη προς τα έξω μαζί με την ανάπτυξη της γης. Μεγαλύτερα μήκη οδικών αρτηριών θα

ασκήσουν μεγαλύτερη πίεση κυκλοφορίας σε πολλά αστικά κομμάτια γης. Η μείωση της αύξησης της συμμόρφωσης σε μεγάλες αστικές περιοχές θα απαιτήσει την από κοινού εφαρμογή συντονισμένων και συνεπών πρωτοβουλιών που (1) θα αυξήσουν την αποτελεσματικότητα και τη χωρητικότητα των μεταφορών μέσω νέων τεχνολογιών, (2) θα μειώσουν τη ζήτηση κυκλοφορίας αυτοκινήτων μέσω υψηλότερης πυκνότητας χρήσης γης, (3) θα ενθαρρύνουν την ανάπτυξη και τον επανασχεδιασμό υφιστάμενων οδικών αρτηριών, (4) θα ενθαρρύνουν την αύξηση της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς, το περπάτημα και το ποδήλατο κλπ και (5) θα απαιτήσουν από τις διάφορες υπηρεσίες σε μια περιοχή να συνεργαστούν με συντονισμένο τρόπο στην εφαρμογή στρατηγικών που αυξάνουν την αποτελεσματικότητα των μεταφορών και τη μείωση της εξάρτησης από τα αυτοκίνητα.

## Κεφάλαιο 3: Ορισμοί και βασικά μεγέθη κυκλοφοριακής συμμόρφωσης

### 3.1. Μέτρηση κυκλοφοριακής συμμόρφωσης – Εισαγωγικά

Συνοψίζοντας από διαφορετικές πηγές τους ορισμούς σημειώνεται ότι ο ορισμός της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης έχει εξελιχθεί με την πάροδο των ετών:

- Ο Mc Clintock στο βιβλίο του 1925 "Street Traffic Control", καθορίζει την κυκλοφοριακή συμμόρφωση σε μία οδό, *"ως προϋπόθεση που προκύπτει από την καθυστέρηση στον εκτιμώμενο χρόνο ταξιδιού, εξαιτίας της έντονης κινητικότητας στους δρόμους, πράγμα το οποίο είναι δεδομένο για τους σύγχρονους χρήστες των δρόμων"* [1].
- Ο Alan Altshuler [2] δηλώνει ότι *«ο όρος συμμόρφωση σημαίνει οποιαδήποτε κατάσταση όπου η ζήτηση του δρόμου υπερβαίνει τη χωρητικότητα υπό συνθήκες ταχύτητας ελεύθερης ροής, στη μέγιστη ταχύτητα σχεδιασμού»*.
- Στην εργασία των Homburger et al. [3] ορίζεται η συμμόρφωση ως *«το επίπεδο στο οποίο η απόδοση του συστήματος μεταφοράς δεν είναι πλέον αποδεκτή λόγω παρεμβολών στην κυκλοφορία. Αυτό μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του δρόμου, τη γεωγραφική τοποθεσία και την ώρα της ημέρας*
- Στην έκθεση των Lomax T, Turner S, Shunk G, Levinson HS, Pratt RH, Douglas B (1997) [5,6] παρουσιάζονται ορισμένοι ορισμοί τόσο της συμμόρφωσης, όσο και της κινητικότητας, της προσβασιμότητας και της αξιοπιστίας. Αυτοί οι ορισμοί παρέχουν ένα μέσο για τη μέτρηση των επιπτώσεων και των συνεπειών της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης:



- 1) Συμμόρφωση ορίζεται ως ο χρόνος ταξιδιού ή η καθυστέρηση που υπερβαίνει εκείνη που προκύπτει υπό συνθήκες ταξιδιού με ταχύτητα ελαφράς ή ελεύθερης ροής
- 2) Επαναλαμβανόμενη συμμόρφωση — Εμφανίζεται κάθε ημέρα της εβδομάδας (ή την ημέρα του Σαββατοκύριακου) στην ίδια γενική τοποθεσία και ώρα.
- 3) Μη επαναλαμβανόμενη συμμόρφωση - Ένα τυχαίο συμβάν (οδικό συμβάν ή εξαιτίας δυσμενών καιρικών συνθηκών) που περιορίζει τη ροή της κυκλοφορίας
- 4) Απαράδεκτη συμμόρφωση - είναι ο χρόνος ταξιδιού ή η καθυστέρηση που υπερβαίνει τον καθορισμένο ή συμφωνημένο κανόνα. Αυτός ο κανόνας μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία, ανά τύπο μεταφοράς, ανά τρόπο ταξιδιού και ώρα της ημέρας.
- 5) Κινητικότητα — πρόβλεψη χρόνου ταξιδιού (ισόχρονες), για να υποδηλώσει την απόσταση που καλύπτεται υπό συνθήκες συμμόρφωσης εντός ενός δεδομένου χρόνου ταξιδιού.
- 6) Προσβασιμότητα - η επίτευξη των ταξιδιωτικών στόχων εντός προθεσμιών που θεωρούνται αποδεκτές.
- 7) Αξιοπιστία χρόνου ταξιδιού - Η ικανότητα πρόβλεψης της ώρας άφιξης στην αρχή ενός ταξιδιού.

Η κυκλοφοριακή συμμόρφωση αντικατοπτρίζει τη διαφορά μεταξύ του χρόνου ταξιδιού κατά τη διάρκεια πολυσύχναστων περιόδων κυκλοφορίας κυρίως σε ώρες αιχμής και του χρόνου ταξιδιού όταν η οδός λειτουργεί υπό συνθήκες ταχύτητας ελεύθερης ροής. Εκφράζεται επίσης ως ο λόγος του πραγματικού χρόνου ταξιδιού και του μη αξιόπιστου χρόνου ταξιδιού ή του λόγου του πραγματικού έναντι του μη προσυμφωνημένου χρόνου ταξιδιού (π.χ., ελάχιστη απόσταση / χιλιόμετρο). Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης είναι η ένταση (ποσό), η έκταση (κάλυψη περιοχής ή δικτύου) και η διάρκεια (πόσο διαρκεί).

### 3.1.1 Όρια κυκλοφοριακής συμμόρφωσης

Τα όρια κυκλοφοριακής συμμόρφωσης μπορούν να καθοριστούν από:

1. την ταχύτητα ελεύθερης ροής.

2. ελάχιστη αποδεκτή ταχύτητα για διάφορους τύπους οδών και λειτουργικών περιβάλλοντων.

Η χρήση της ταχύτητας ελεύθερης ροής ως κατώφλι συμμόρφωσης μπορεί να είναι κατάλληλη σε αγροτικές περιοχές, ή στη μέση της νύχτας, ή το πρωί της Κυριακής σε μεγάλες αστικές περιοχές. .

Επίσης έχει το πλεονέκτημα της απλότητας στην ανάλυση δεδομένων και στην παρακολούθηση των τάσεων σε μία ευρεία περιοχή. Ωστόσο, μπορεί να μην είναι ρεαλιστικό να την χρησιμοποιήσει ο μελετητής ως τιμή κατωφλίου συμφόρησης, για να ποσοτικοποιήσει την κυκλοφοριακή συμφόρηση στις περιόδους αιχμής σε μεγάλες αστικές περιοχές. Αμφισβητήσιμη είναι επίσης η χρησιμότητά της στην αξιολόγηση συνθηκών κυκλοφοριακής συμφόρησης σε μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές, επειδή είναι σχεδόν αδύνατο να χτιστεί οδός με την απαραίτητη χωρητικότητα για να εξυπηρετήσει τις κυκλοφοριακές απαιτήσεις στις ώρες αιχμής υπό ταχύτητες ελεύθερης ροής (π.χ. για έλλειψη χώρου για νέους δρόμους, για κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς).

Ο χρόνος καθυστέρησης σε συνθήκες συμφόρησης, που οι ταξιδιώτες είναι διατεθειμένοι να ανεχθούν, προκάλεσε ανησυχία στους συγκοινωνιολόγους μηχανικούς για πολλά χρόνια. Κάποια από τα βασικά ζητήματα τα οποία σχετίζονται με το μήκος ταξιδιού, το μέγεθος της πόλης και τον τύπο της οδού είναι τα εξής:

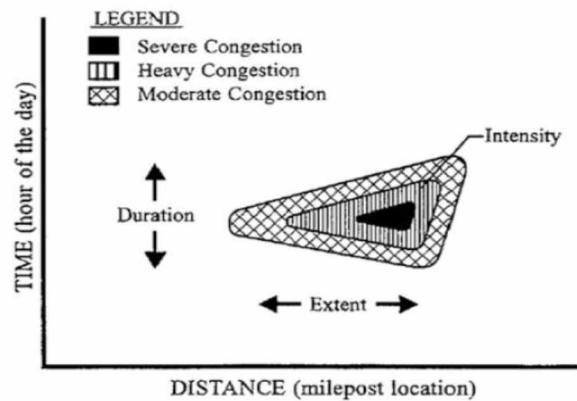
- Τα μεγαλύτερα ταξίδια επηρεάζονται περισσότερο από τη συμφόρηση από τα μικρότερα ταξίδια.
- Η συμφόρηση είναι συνήθως μεγαλύτερη και διαρκεί περισσότερο σε μεγαλύτερες πόλεις.
- Στις μεγαλύτερες πόλεις η συμφόρηση είναι πιο ανεκτή από ότι στις μικρότερες πόλεις.
- Οι ταξιδιώτες αναμένουν να ταξιδεύουν γρηγορότερα σε αυτοκινητόδρομους παρά στις κεντρικές οδούς της πόλης.

Είναι επομένως ζωτικής σημασίας, ότι τα πρότυπα της ανεκτής καθυστέρησης συμφόρησης σχετίζονται με το μέγεθος της αστικής περιοχής και αντικατοπτρίζουν τις κοινωνικές συνθήκες της περιοχής.

### 3.2 Επιμέρους στοιχεία συμφόρησης

Η συμφόρηση μπορεί να χαρακτηριστεί από τέσσερα μεγέθη, την ένταση, την διάρκεια, την έκταση και την μεταβλητότητα [6–11]. Η ένταση αντικατοπτρίζει την ποσότητα συμφόρησης που εκφράζεται ως ρυθμός (π.χ. λεπτά / χιλιόμετρο). Η διάρκεια αναφέρεται στο χρονικό διάστημα συμφόρησης της οδού. Η έκταση περιγράφεται από τα χιλιόμετρα των οδών που είναι υπό συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης ή από τον αριθμό των ταξιδιωτών που επηρεάζονται από τη συμφόρηση. Η μεταβλητότητα μετρά τη διακύμανση της έντασης, της διάρκειας και της έκτασης της κυκλοφοριακής συμφόρησης με την πάροδο του χρόνου. Η σχέση μεταξύ έντασης, διάρκειας και έκτασης φαίνεται στο σχήμα 12 όπου η διακύμανση της έντασης συμφόρησης μπορεί να

μετρηθεί τόσο σε απόσταση (έκταση) όσο και σε χρόνο (διάρκεια). Η απόσταση εμφανίζεται στον οριζόντιο άξονα και ο χρόνος εμφανίζεται στον κατακόρυφο άξονα. Μια σειρά γραμμών, που εμφανίζουν διάφορα επίπεδα έντασης, εμφανίζονται σε αυτό το πλέγμα απόστασης-χρόνου.



Εικόνα 12: Ένταση συμφόρησης σε χρόνο και χώρο. Αναφορά πηγής [6], NCHRP 398, Τομ. 1, Σχήμα 14, σελ. 70

### 3.2.1 Ένταση

Η ένταση μετρά το ύψος της καθυστέρησης λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης που παρατηρείται σε μια διασταύρωση, κατά μήκος τμημάτων μιας δεδομένης διαδρομής, αρκετών οδικών αρτηριών ή ολόκληρης της αστικής περιοχής. Οι μετρήσεις της περιλαμβάνουν: (1) ποσοστό καθυστέρησης λόγω συμφόρησης, (2) ώρες καθυστέρησης ενός οχήματος, (3) ώρες καθυστέρησης ατόμων, (4) δείκτη χρόνου ταξιδιού και (5) φόρο χρόνου ταξιδιού.

#### 3.2.1.1 Ποσοστό καθυστέρησης συμφόρησης

Αυτό είναι ένα μέτρο του ποσού της καθυστέρησης που παρατηρείται σε αυτοκινητόδρομους και οδικές αρτηρίες. Η εξίσωση έχει ως εξής [2]:

$$\begin{aligned} \text{Congestion Delay Rate} &= [\text{Congested travel time rate (min/ km)}] \\ &- [\text{Uncongested travel time rate (min/ km)}] \\ &= [1/ \text{congested speed (kmph)}] - [1/ \text{free - flow speed (kmph)}] \\ &\times (60 \text{ min/ h}) \end{aligned}$$

(3.1.)

Για μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές, αυτός ο ορισμός υπερβάλλει συνήθως για το ύψος της καθυστέρησης λόγω συμφόρησης που υπολογίζεται για τις ώρες αιχμής της κυκλοφοριακής ροής, επειδή υποθέτει ότι θα ήταν δυνατόν να ταξιδέψει κανείς με ταχύτητες ελεύθερης ροής στις ώρες

αιχμής. Το ποσοστό καθυστέρησης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για οδούς της πόλης συγκρίνοντας τον πραγματικό χρόνο ταξιδιού σε ώρες αιχμής και εκτός αιχμής.

### 3.2.1.2 Ώρες καθυστέρησης οχήματος

Ο μέσος χρόνος καθυστέρησης που προκαλείται λόγω συμφόρησης κυρίως στις ώρες αιχμής, όπως και το πόσο είναι ο συνολικός χρόνος καθυστερήσεων για κάθε όχημα μέσα στην ημέρα ή ακόμη και μέσα στο έτος, μπορεί να υπολογιστεί αθροίζοντας την καθυστέρηση που προκύπτει σε διάφορα τμήματα του οδικού δικτύου σε κάθε κατεύθυνση. Οι μέσες ετήσιες διάρκειες καθυστερήσεων σε ένα οδικό δίκτυο μπορούν να επιτευχθούν αθροίζοντας τις καθημερινές καθυστερήσεις. Η εθνική αναφορά των τάσεων συμφόρησης από την ετήσια έκθεση αστικής κινητικότητας των ΗΠΑ αλλά και διαφόρων Ευρωπαϊκών χωρών (Αγγλία, Γερμανία κλπ) [9] δημοσιεύει τα ποσά των ωρών που χάνονται ετησίως από μετακινούμενους από διάφορες πόλεις. Αυτή η καθυστέρηση υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση [2]:

$$\begin{aligned} & \text{Daily vehicle – Hours of Delay (DVHD)} \\ & = [\text{daily vehicle – minutes of actual speed}] \\ & - [\text{daily vehicle – minutes at free – flow speed}] \end{aligned}$$

(3.2.)

Σε μεγάλες αστικές περιοχές, η χρήση του ποσοστού καθυστέρησης ελεύθερης ροής ως αναφοράς για τη μέτρηση της καθυστέρησης υπερεκτιμά το χρόνο που χάθηκε λόγω της συμφόρησης.

### 3.2.1.3 Άτομα-Ώρες καθυστέρησης

Οι ώρες καθυστέρησης ανά άτομο υπολογίζονται εφαρμόζοντας παράγοντες πληρότητας οχήματος στα δεδομένα του οχήματος που παρατηρούνται.

$$\begin{aligned} & \text{Annual Person – Hours of Delay} = [(DVHD / \text{weekday}) \times (250 \text{ weekdays} / \text{year}) \\ & \times (1.25 \text{ persons} / \text{vehicle}) \\ & \text{Annual Hours of Delay per Weekday Traveler} = [(\text{Actual Weekday Travel Time, in minutes}) \\ & - (\text{FF or PSL Travel Time, in minutes})] \\ & \times [1 \text{h} / 60 \text{ min}] \\ & \times [250 \text{ weekdays per year}] \\ & = \text{Delay Hours per person, per year} \end{aligned}$$

(3.3.)

όπου:

FF = ταχύτητα ελεύθερης ροής

PSL = καταχωρημένη ταχύτητα ορίου ταχύτητας

Τα δεδομένα καθυστέρησης που υπολογίζονται με την ανωτέρω Εξίσωση χρησιμοποιούνται ευρέως από μια ποικιλία πηγών, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων Υπουργείων Μεταφορών σε αρκετά κράτη.

#### 3.2.1.4 Δείκτης χρόνου ταξιδιού (TTI)

Ο δείκτης χρόνου ταξιδιού που αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Μεταφορών του Τέξας (TTI), συγκρίνει τα ποσοστά χρόνου ταξιδιού στις ώρες αιχμής, με τα ποσοστά χρόνου ταξιδιού υπό συνθήκες ταχύτητας ελεύθερης ροής ή ορίων ταχύτητας [10]. Το TTI υπολογίζεται όπως φαίνεται παρακάτω:

$$TTI = (Actual\ Travel\ Time\ Rate) / (Travel\ Time\ Rate\ during\ free - flow\ conditions)$$

ή

$$TTI = (Free\ Flow\ Traffic\ Speed) / (Actual\ Traffic\ Speed)$$

(3.4.)

Για παράδειγμα, ένα TTI 1,30 δείχνει ότι ένα ταξίδι που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια ώρας αιχμής θα διαρκέσει 30% περισσότερο χρόνο από ό, τι εάν το ίδιο ταξίδι γινόταν υπο συνθήκες ελεύθερης ροής. Για παράδειγμα: ένα TTI 1,30 δείχνει ότι ένα ταξίδι που διαρκεί 40 λεπτά στις 3 π.μ., θα διαρκέσει 52 λεπτά εάν πραγματοποιηθεί σε ώρα αιχμής.

Το TTI είναι μια υπολογιστικά σωστή και εύκολα κατανοητή μέτρηση. Αλλά είναι ευαίσθητο στο πώς εφαρμόζεται η ταχύτητα «ελεύθερης ροής». Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε μια μεγάλη πόλη δεν είναι ρεαλιστικό να ταξιδεύει ο χρήστης με ταχύτητα ελεύθερης ροής (ή στο όριο ταχύτητας που αναγράφεται) στην ώρα αιχμής. Δεν είναι λογικό, επομένως, να συγκρίνουμε τους πραγματικούς χρόνους ταξιδιού εν ώρα αιχμής με τους χρόνους ταξιδιού στις ώρες αιχμής υπό συνθήκες ελεύθερης ροής, όταν η ελεύθερη ροή στην ώρα αιχμής είναι πρακτικά αδύνατη σε μια μεγάλη πόλη. Ενώ το TTI είναι ένας κατάλληλος δείκτης για μέτρηση της συμμόρφωσης με την πάροδο του χρόνου για την ίδια περιοχή, δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τη σύγκριση περιοχών που εξυπηρετούνται από οδικά δίκτυα με διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής. Μπορούμε να συγκρίνουμε ταχύτητες ελεύθερης ροής και συμμόρφωσης για αστικούς και προαστιακούς δρόμους, όχι όμως το ποσοστό καθυστέρησης. Το ποσοστό καθυστέρησης στους δρόμους της πόλης είναι υψηλότερο από αυτό των προαστιακών δρόμων. Επομένως, το TTI δεν πρέπει να χρησιμοποιείται

για τη σύγκριση των επιπτώσεων της συμφόρησης μεταξύ περιοχών όπου τα αντίστοιχα οδικά δίκτυα έχουν σημαντικά διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής.

### 3.2.1.5 Φόρος χρόνου ταξιδιού — TTT (Travel Time Tax)

Στην ετήσια έκθεσή της για το 2010, η INRIX εισήγαγε τον φόρο χρόνου ταξιδιού ή TTT [11]. Το TTT ορίζεται ως:

$$TTT = TTI - 1.0$$

(3.5.)

Το TTT είναι μια επιπλέον «επιβάρυνση» στον χρόνο ταξιδιού ελεύθερης ροής. Για παράδειγμα, με TTI 1,30, το TTT=0.3 (1,3-1,0) αντιπροσωπεύει επιβάρυνση 30% που προστίθεται στον χρόνο ταξιδιού ελεύθερης ροής. Το TTT βασίζεται στην ίδια μεθοδολογία με το TTI, αλλά κοινοποιεί τα αποτελέσματα με διαφορετικό τρόπο.

### 3.2.1.6 Σχόλια για τις χρήσεις του δείκτη χρόνου ταξιδιού (TTI) και του φόρου χρόνου ταξιδιού (TTT)

Τα TTI και TTT μπορούν καλύτερα να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της συμφόρησης με την πάροδο του χρόνου για τον ίδιο τύπο οδού στην ίδια περιοχή. Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση περιοχών με δίκτυα οδών που έχουν διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής ή που εξυπηρετούν διαφορετικά μέσα μήκη διαδρομής. Ο φόρος χρόνου ταξιδιού (TTT) αντιπροσωπεύει την πραγματική απώλεια χρόνου που προκύπτει και εκφράζεται σε λεπτά ανά χιλιόμετρο. Η συνολική απώλεια χρόνου (καθυστέρηση) κατά μήκος ενός δρόμου μπορεί να επιτευχθεί με στάθμιση της απώλειας χρόνου για κάθε τμήμα του δρόμου από το μήκος και τον όγκο του. Ο Πίνακας 2 παρέχει ένα επεξηγηματικό παράδειγμα. Το TTT παρέχει μια χρήσιμη απεικόνιση για τη μέτρηση και τη συσσώρευση καθυστέρησης σε μία συγκεκριμένη οδό. Βασίζεται σε μέτρηση ταχύτητας και χρόνου ταξιδιού σε πραγματικό χρόνο και είναι εύκολο να κατανοηθεί και να χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, έχει τους ίδιους περιορισμούς με τον Δείκτη Χρόνου Ταξιδιού (TTI) στο ότι είναι ευαίσθητος στη βασική υπόθεση για το τι συνιστά συμφόρηση.

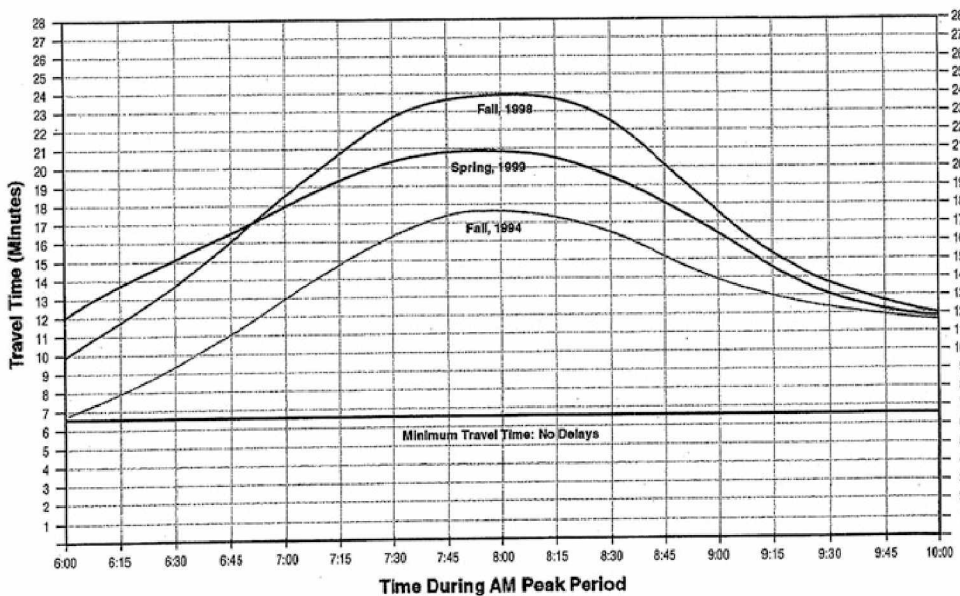
Πίνακας 2 Ενδεικτική εφαρμογή του φόρου χρόνου ταξιδιού (TTT) σε σύγκριση με το TTI

Μεταβλητές	Οδική Αρτηρία	Αυτοκινητόδρομος
FFS (ταχύτητα ελεύθερης ροής)	40 km / ώρα (1,5 λεπτό / km)	60 km / ώρα (1,00 λεπτά / km)
Actual Speed (πραγματική ταχύτητα)	30,76 km / ώρα (1,95 λεπτά / km)	46,15 km / ώρα (1,30 λεπτά / km)

$TTI = RS / HS$	1,30	1,30
$TTT = (TTI - 1,0)$	0,30	0,30
Πρόσθετο ποσοστό καθυστέρησης @ $TTI = 1,30$ ή $TTT = 30\%$	$(1,95 - 1,5) = + 0,45$ λεπτά / km	$(1,30 - 1,00) = + 0,30$ λεπτά / km

### 3.2.2 Διάρκεια

Η διάρκεια της συμφόρησης εξαρτάται από τους τύπους συμφόρησης (επαναλαμβανόμενη συμφόρηση ή μη επαναλαμβανόμενη). Εξαρτάται επίσης από το μέγεθος της πόλης και τον τύπο της οδού. Η συμφόρηση είναι γενικά μεγάλης διάρκειας σε μεγάλες οδούς (π.χ. αυτοκινητόδρομους) σε μεγάλες αστικές περιοχές - ειδικά όταν συγκλίνουν διαφορετικοί οδοί. Η μεγάλη διάρκεια της συμφόρησης είναι λιγότερο συχνή σε μικρές αστικές περιοχές.



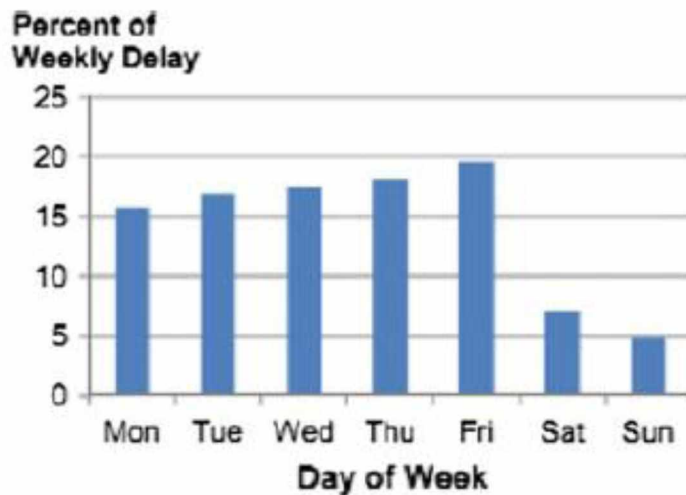
Εικόνα 13: Χρόνοι ταξιδιού περιόδου αιχμής για το I-93 Southbound: Roosevelt. Πηγή [5]

Με το πέρασμα των χρόνων έχουν αυξηθεί κατά πολύ οι ώρες της ημέρας κατά τις οποίες υπάρχει μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Σε αντίθεση με την τυπική «ώρα αιχμής» της δεκαετίας του 1960, η σημερινή συμφόρηση σε μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές εκτείνεται έως και 10 ώρες / ημέρα, με περιόδους αιχμής που διαρκούν 4 ώρες το πρωί (6-10 π.μ.) και 4 ώρες το απόγευμα (3-7 μ.μ.). Οι οδικές αρτηρίες, ωστόσο, τείνουν να αντιμετωπίζουν συμφόρηση για μεγαλύτερες περιόδους (INRIX 2010), ειδικά σε αυτοκινητόδρομους. Έτσι, η διάρκεια καθυστέρησης αντικατοπτρίζει τα καθημερινά μοτίβα κυκλοφορίας. Οι καθυστερήσεις στις διαβάσεις πεζών και σε διασταυρώσεις σε μεγάλες επιχειρηματικές περιοχές, διαρκούν συχνά όλη την εργάσιμη ημέρα. Οι περίοδοι καθυστέρησης σε τυπικές αστικές διατομές οδών που σηματοδοτούνται συνήθως

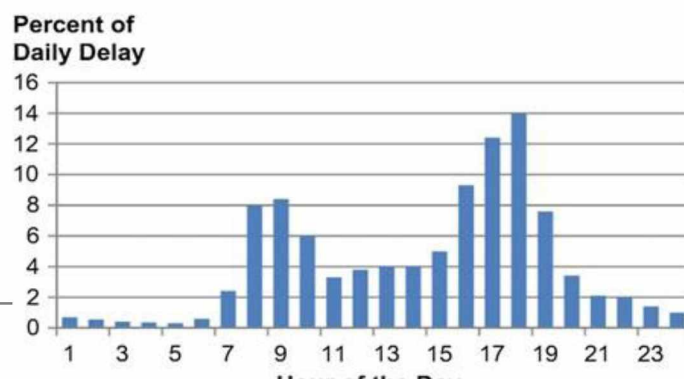
κυμαίνονται από 15 λεπτά έως περισσότερο από 1 ώρα, ανάλογα με τον όγκο των οχημάτων προσέγγισης, τη γεωμετρία της διασταύρωσης και τον χρόνο σηματοδότησης.

### 3.2.2.1 Ημερήσιες και Ωριαίες Παραλλαγές

Η μέση ημερήσια διάρκεια καθυστέρησης, για τυπικές ημέρες της εβδομάδας (Εικ. 14), δείχνει ότι η Παρασκευή αντιμετωπίζει το μεγαλύτερο ποσοστό χρόνου καθυστέρησης και η Δευτέρα το λιγότερο, ενώ η Κυριακή έχει τις μικρότερες καθυστερήσεις. Και όταν η καθυστέρηση κατανέμεται ανά ώρα της ημέρας (Εικ. 15), η χειρότερη ώρα είναι 5-6 μ.μ. το βράδυ, με περίπου 14% της ημερήσιας καθυστέρησης, ενώ οι ώρες με τις λιγότερες καθυστερήσεις είναι από τα μεσάνυχτα έως τις 6 π.μ.



Εικόνα 14: Ποσοστό καθυστέρησης ανά ημέρα της εβδομάδας. Αναφορά πηγής [15], σελ. 7



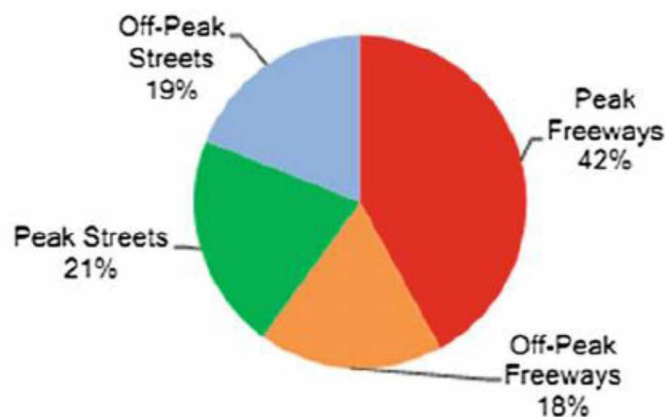


Εικόνα 15: Ποσοστό καθυστέρησης ανά ώρα της ημέρας. Αναφορά πηγής [15], σελ. 7.

### 3.2.3 Έκταση

Η έκταση μετρά πόσο μακριά εξαπλώνεται η συμφόρηση (km οδών ή αυτοκινητοδρόμων που επηρεάζονται) και πόσα άτομα ταξιδεύουν. Διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο της πόλης. Σε μεγάλες αστικές περιοχές μπορεί να εκτείνεται για χιλιόμετρα σε πολλούς δρόμους ή για πολλά τετράγωνα σε σηματοδοτημένη διασταύρωση.

Οι αυτοκινητόδρομοι, οι οποίοι συνήθως αντιπροσωπεύουν περίπου το ήμισυ του συνόλου των αστικών ταξιδιών, αντιμετωπίζουν μεγαλύτερη καθυστέρηση από τις κεντρικές οδικές αρτηρίες. Το UMR [9] διαπίστωσε ότι κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής (6-10 π.μ. και 3-7 μ.μ.) οι αυτοκινητόδρομοι αντιστοιχούν σε διπλάσια ημερήσια καθυστέρηση από τις οδικές αρτηρίες (42% έναντι 21%) και για το υπόλοιπο της ημέρας (16 ώρες) οι αυτοκινητόδρομοι και οι οδικές αρτηρίες αντιπροσωπεύουν περίπου ίσα μερίδια καθυστέρησης (18 και 19% αντίστοιχα).



Εικόνα 16: Ποσοστό καθυστέρησης ανά τύπο δρόμου. Αναφορά πηγής [15], σελ. 7

Πρέπει να σημειωθεί ότι το UMR [9] ορίζει καθυστέρηση ως τη διαφορά μεταξύ ενός πραγματικού ρυθμού χρόνου ταξιδιού και του ρυθμού χρόνου ταξιδιού για συνθήκες ελεύθερης ροής.

### 3.3. Συμπεράσματα κεφαλαίου

Οι αστικοί ταξιδιώτες αναμένουν και δέχονται ένα ορισμένο ποσό συμμόρφωσης κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής της ημέρας. Η συμμόρφωση γίνεται απαράδεκτη όταν υπερβαίνει μια τιμή κατωφλίου.

Είναι ορατή η ανάγκη καθορισμού ρεαλιστικών ορίων συμμόρφωσης καθώς οι τοπικές τιμές κατωφλίου δεν είναι καθολικές: διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή, την ώρα της ημέρας και τον τύπο του δρόμου.

#### 1. Περιοχή

Σε μικρές πόλεις και αγροτικές περιοχές, το όριο ταχύτητας συμμόρφωσης είναι (και πρέπει να είναι) η ταχύτητα ελεύθερης ροής. Οι ταξιδιώτες σε μεγάλες πόλεις, ωστόσο, είναι συνηθισμένοι να αναμένουν ένα περιβάλλον με μεγαλύτερη ένταση κυκλοφορίας, με περισσότερες συγκρούσεις οχημάτων και πεζών. Επομένως, είναι πιθανό να ανεχθούν χαμηλότερη ταχύτητα εξαιτίας της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης.

#### 2. Ώρα της ημέρας

Στις μεγάλες πόλεις οι χαμηλότερες ταχύτητες είναι ανεκτές κατά τις ώρες αιχμής από ό, τι σε ώρες εκτός αιχμής.

#### 3. Τύπος δρόμου

Κάποιος αναμένει γρηγορότερες ταχύτητες σε έναν αυτοκινητόδρομο παρά σε έναν τοπικό δρόμο. Επομένως, η ταχύτητα κατωφλίου συμμόρφωσης για έναν αυτοκινητόδρομο είναι υψηλότερη από ότι για έναν τοπικό δρόμο.

#### 4. Οικονομικά ζητήματα στην επιλογή της ταχύτητας συμμόρφωσης κατωφλίου

Ορισμένοι οικονομολόγοι και συγκοινωνιολόγοι αμφισβήτησαν τη χρήση των ταχυτήτων ελεύθερης ροής ως βάση για τον υπολογισμό των συνθηκών κυκλοφορίας στις ώρες αιχμής σε μεγαλύτερες αστικές περιοχές. Ο John Meyer και ο Jose 'Gomez-Ibanez στο βιβλίο τους "Autos, Transit και Cities" [20] δηλώνουν: *"Ένας αυτοκινητόδρομος αρκετά μεγάλος για να επιτρέψει κυκλοφορία με ταχύτητα ελεύθερης ροής κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής στο κέντρο των μεγάλων πόλεων είναι σπάνια βέλτιστη λύση, επειδή ένας δρόμος μιας τέτοιας χωρητικότητας είναι πολύ ακριβή λύση και τα οφέλη αυτά σε σχέση με την εξοικονόμηση χρόνου και το λειτουργικό κόστος, τα συγκεντρώνει μόνο μια μικρή ομάδα χρηστών στις ώρες αιχμής, επομένως θα είναι συγκριτικά μικρά. Εν ολίγοις, οι μηχανικοί καταλαβαίνουν ότι η κυκλοφοριακή συμμόρφωση είναι σχεδόν ενδεδειγμένη σε ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα αυτοκινητοδρόμων."* Η αντιμετώπιση αυτής της θέσης είναι, ίσως,

η σημερινή πραγματικότητα ότι ορισμένοι αυτοκινητόδρομοι είναι κορεσμένοι για πολλές ώρες τις καθημερινές.

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση στις πόλεις είναι ένα υποπροϊόν της επιτυχίας τους στην προσέλκυση ανθρώπων σε θέσεις εργασίας και άλλες ανέσεις, και η αδυναμία των πόλεων για τη βελτίωση / επέκταση της παραγωγικής ικανότητας μεταφοράς για να συμβαδίζουν με την ανάπτυξη αυτή. Η πρόκληση των πόλεων είναι να διατηρηθεί η συμφόρηση διαχειρίσιμη καθώς αυξάνεται ο πληθυσμός και αναπτύσσονται οι οικονομίες τους.

Για να είναι χρήσιμος στις αποφάσεις διαχείρισης συμφόρησης, ο ορισμός της συμφόρησης πρέπει να βασίζεται σε σύγκριση των «πραγματικών χρόνων ταξιδιού» με τους «αναμενόμενους χρόνους ταξιδιού» για τις ώρες αιχμής και τις συνθήκες στις ώρες αιχμής. Αναμενόμενοι χρόνοι ταξιδιού μπορεί να ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή, από την ώρα της ημέρας, καθώς και από το είδος των οδών, και θα πρέπει να ορισθούν με τη συμβολή των ατόμων που χρησιμοποιούν την κάθε οδό στην κάθε περιοχή (π.χ., ταξιδιώτες και υποκινητές φορτίου).

Η συμφόρηση συμβαίνει κυρίως στις ώρες αιχμής των καθημερινών ημερών, όταν συγκεντρώνεται περίπου το 60% του συνόλου της κυκλοφοριακής συμφόρησης, παρολαυτά όμως εμφανίζεται και τα σαββατοκύριακα του καλοκαιριού και των διακοπών, όταν πολλοί άνθρωποι ταξιδεύουν προς ή από παραλίες και άλλους χώρους αναψυχής.

Ένα πιο ρεαλιστικό πρότυπο μέτρησης καθυστέρησης πρέπει να αντικατοπτρίζει στόχους που μπορούν να εφαρμοστούν από την άποψη των κοινωνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών περιορισμών. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση έχει πολλές επιπτώσεις. Αυτές οι επιπτώσεις περιλαμβάνουν (1) μεγαλύτερους και λιγότερο αξιόπιστους χρόνους ταξιδιού, (2) μειωμένη κινητικότητα, (3) μειωμένη προσβασιμότητα, (4) χαμηλότερη παραγωγικότητα των οδών και (5) αυξημένο κόστος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτά συζητούνται στα κεφάλαια που ακολουθούν σε συνδυασμό με τα μαθηματικά μοντέλα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την προσομοίωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης καθώς και της αντιμετώπισής της.

## Κεφάλαιο 4: Βιβλ. Ανασκόπηση Μοντέλων Κυκλοφοριακής Ροής και Συμφόρησης

### 4.1.Εισαγωγή

Μαθηματικά, τα τρία βασικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής (ροή, ταχύτητα, πυκνότητα) σχετίζονται ως εξής:

Ροή=Ταχύτητα x Πυκνότητα

Η αλλιώς

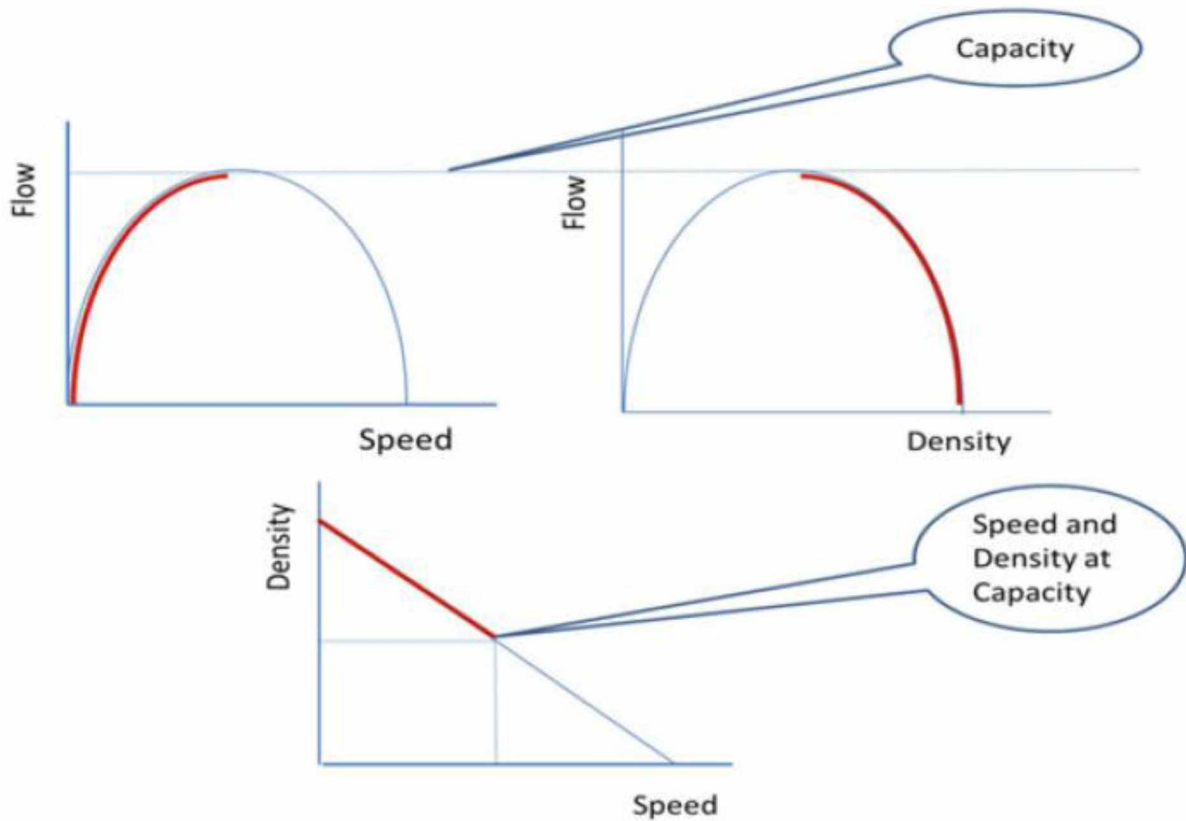
$$F = V \times D \quad (4.1.)$$

Και σε όρους μονάδων:

$$\text{Οχήματα}/\Omega\text{ρα} = \text{Χιλιόμετρα}/\Omega\text{ρα} \times \text{Οχήματα}/\text{Χιλιόμετρο}$$

Έτσι, όταν είναι γνωστές δύο από αυτές τις παραμέτρους, μπορεί να εκτιμηθεί η τρίτη. Από την αρχική εμφάνιση της έννοιας της κυκλοφοριακής ροής, οι ερευνητές προσπαθούν να μοντελοποιήσουν τη σχέση μεταξύ αυτών των τριών βασικών χαρακτηριστικών της. Τέτοιες σχέσεις παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την απόδοση μιας οδού σε διαφορετικά επίπεδα εξυπηρέτησης-ζήτησης. Για παράδειγμα, μπορούμε να εκτιμήσουμε πώς θα ήταν η λειτουργία μιας οδικής υποδομής εάν προστεθούν κάποια οχήματα ανά ώρα. Τέτοια μοντέλα που αναφέρονται ως μοντέλα κυκλοφοριακής ροής, έχουν χρησιμοποιηθεί στο Highway Capacity Manual (HCM) για τον καθορισμό των επιπέδων εξυπηρέτησης για τμήματα αυτοκινητόδρομων πολλών λωρίδων κυκλοφορίας. Με την πάροδο των ετών έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος μοντέλων που περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ κάθε ζεύγους αυτών των παραμέτρων. Το υπόλοιπο αυτής της υποενότητας παρουσιάζει μερικά από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής που αναφέρονται και χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, συζητά τα μοντέλα του HCM και τη σημασία της τοποθεσίας στην ανάπτυξη ή βαθμονόμηση μοντέλων κυκλοφοριακής ροής.

#### 4.2. Το μοντέλο Greenshields



Εικόνα 17: Το μοντέλο Greenshields [1]

Το πρώτο μοντέλο κυκλοφοριακής ροής αναπτύχθηκε από τον Greenshields [7] που ανέπτυξε μια γραμμική σχέση ταχύτητας-πυκνότητας με βάση δεδομένα πεδίου. Το Σχήμα 17 παρουσιάζει ένα σκίτσο του μοντέλου Greenshields, το οποίο αποτελείται από σχέσεις ροής-ταχύτητας, πυκνότητας-ροής και ταχύτητας-πυκνότητας. Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της μαθηματικής σχέσης μεταξύ των τριών μέτρων, όταν ορίζεται μια από τις σχέσεις, τα άλλα δύο ορίζονται επίσης. Έτσι, η γραμμική σχέση ταχύτητας-πυκνότητας οδηγεί σε παραβολικές καμπύλες ροής-ταχύτητας και ροής-πυκνότητας.

Στο Σχ. 17, τα τμήματα των καμπυλών που εμφανίζονται με μπλε χρώμα αντιστοιχούν σε συνθήκες μη συμφόρησης, ενώ τα τμήματα που εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν σε συνθήκες συμφόρησης. Για το διάγραμμα ροής-ταχύτητας και ξεκινώντας από το δεξί μέρος της καμπύλης, όταν η ροή είναι πολύ χαμηλή, η ταχύτητα βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο (FFS) καθώς οι οδηγοί μπορούν να ταξιδεύουν με την επιθυμητή ταχύτητα. Καθώς αυξάνονται οι ροές, η ταχύτητα μειώνεται σταδιακά. Η υψηλότερη ροή (συνολική χωρητικότητα οδού), φαίνεται να συμβαίνει κατά τη μετάβαση μεταξύ συνθηκών συμφόρησης και μη συμφόρησης. Η ταχύτητα που λαμβάνει ένα

όχημα, όταν στην οδό υπάρχουν τόσα οχήματα όσα η χωρητικότητα της οδού, αναφέρεται συχνά ως η βέλτιστη ταχύτητα.

Για πολύ σοβαρή συμφόρηση, τόσο η ροή όσο και η ταχύτητα πλησιάζουν το μηδέν. Παρομοίως, στην καμπύλη ροής-πυκνότητας, η μέγιστη ροή αντιστοιχεί στη βέλτιστη πυκνότητα, ενώ οι συνθήκες σοβαρής συμφόρησης με ροή που πλησιάζει το μηδέν αντιστοιχούν στην πυκνότητα εμπλοκής ( $D_j$ ), δηλαδή στην πυκνότητα όταν τα οχήματα βρίσκονται σε ακινησία. Και οι καμπύλες ροής-ταχύτητας και ροής-πυκνότητας βασίζονται στην υπόθεση ότι η σχέση ταχύτητας-πυκνότητας είναι γραμμική. Στην αρχική έρευνα που διεξήγαγε ο Greenshields βαθμονόμησε αυτές τις σχέσεις σε δεδομένα πεδίου όπου η μέγιστη ταχύτητα (FFS ή  $v_f$ ) ήταν περίπου 70,49 km/h ή 43,8 mph (μονάδες μέτρησης όπως τις χρησιμοποίησε ο Greenshields). Παρόλο που αυτή η ταχύτητα είναι αρκετά χαμηλή για τους σημερινούς αυτοκινητόδρομους, το συνολικό μοντέλο και οι σχέσεις μεταξύ των τριών μέτρων εξακολουθούν να ισχύουν.

Ο Greenshields προέβη στη σχέση παραβολικής ταχύτητας-ροής με βάση την υπόθεση γραμμικής σχέσης ταχύτητας-πυκνότητας και χρησιμοποιώντας την Εξ. (4.1.). Εάν υποθέσουμε ότι η σχέση ταχύτητας-πυκνότητας είναι γραμμική, τότε:

$$v = v_f - \frac{v_f}{D_j} D$$

(4.2.)

Όπου:

$v_f$  είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής

$D_j$  είναι η πυκνότητα συμφόρησης

Άρα αφού ισχύει πως η ροή είναι  $F = v \times D$  μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε και τις δύο πλευρές της εξίσωσης (4.2.) με την πυκνότητα  $D$  για να εκτιμήσουμε τη ροή:

$$F = v \times D = v_f D - \frac{v_f}{D_j} D^2$$

(4.3.)

Αφού  $dF/dD=0$  όταν το  $D$  προσεγγίζει το  $D_{opt}$ , εάν παραγωγίσουμε σε σχέση με το  $D$  καθώς το  $D \rightarrow D_{opt}$  λαμβάνουμε τα εξής:

$$\frac{dF}{dD} = 0 = v_f - 2 \frac{v_f}{D_j} D_{opt} \Rightarrow$$

$$D_{opt} = \frac{D_j}{2}$$

(4.4.)

Φυσικά, η σχέση Εξ. (4.4.) ισχύει μόνο αν υποθέσουμε μια γραμμική σχέση ταχύτητας-πυκνότητας. Σημειώνουμε ότι για μήκος οχήματος 6m και απόσταση μεταξύ οχημάτων σε ακινησία 1.5m, η πυκνότητα εμπλοκής,  $D_j$ , είναι περίπου 211 οχήματα ανά χιλιόμετρο ανά λωρίδα. Σύμφωνα με το HCM 2010, η πυκνότητα χωρητικότητας είναι 45 οχήματα ανά χιλιόμετρο ανά λωρίδα. Επομένως, με βάση τις πρόσφατες μετρήσεις πεδίου, η σχέση Greenshields δεν αναπαράγει αυτήν την κατάσταση ορίου πολύ καλά. Η σχέση ταχύτητας-ροής μπορεί να προκύψει αντικαθιστώντας το  $F/v = D$  στην Εξ. (4.2.) και στη συνέχεια επίλυση για  $F$ :

$$v = v_f - \frac{v_f}{D_j} \frac{F}{v} \Rightarrow$$

$$F = \frac{D_j}{v_f} (v_f v - v^2)$$

(4.5.)

Για  $F=F_{max}$  (δηλαδή στο όριο της χωρητικότητας του δρόμου) η εξίσωση 4.5. γίνεται:

$$F = v_{opt} D_{opt} = \frac{D_j}{v_f} (v_f v_{opt} - v_{opt}^2) \Rightarrow$$

$$v_{opt} = \frac{v_f}{2}$$

(4.6.)

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 4.4 και 4.6. στην 4.1 για  $F_{max}$  έχουμε ότι:

$$F_{max} = \frac{D_j v_f}{4}$$

(4.7.)

Το μοντέλο Greenshields έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην ανάλυση κυκλοφορίας γιατί είναι εύχρηστο σε αναλυτικά μοντέλα. Παρόλα αυτά, μετρήσεις πεδίου που έχουν γίνει κατά καιρούς δεν υποστηρίζουν την ακρίβειά του.

### 4.3. Άλλα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής

Μετά το μοντέλο Greenshields, αρκετά άλλα μοντέλα προτάθηκαν στην προσπάθεια να ταιριάζουν οι μετρήσεις πεδίου με κάποιο αναλυτικό προσομοίωμα.[7] Για παράδειγμα, ο Greenberg [8] πρότεινε μια λογαριθμική σχέση μεταξύ ταχύτητας και πυκνότητας:

$$v = v_{opt} \ln\left(\frac{D_{max}}{D}\right)$$

(4.8.)

Όπου:

$V$  είναι η μέση ταχύτητα (km/h)

$V_{opt}$  είναι η βέλτιστη ταχύτητα (km/h)

$D_{max}$  είναι η πυκνότητα συμφόρησης (vehicles/km)

Ένα βασικό μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι πως όταν η πυκνότητα προσεγγίζει το μηδέν, η ταχύτητα προσεγγίζει το άπειρο. Άρα, το μοντέλο αυτό δεν είναι κατάλληλο για πρόβλεψη ταχυτήτων σε πολύ χαμηλές πυκνότητες ροής.

Ο Underwood [9] ανέπτυξε το ακόλουθο μοντέλο:

$$v = v_{FF} e^{-D/D_{opt}}$$

(4.9.)

Όπου

$V_{FF}$  είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής

$D_{opt}$  είναι η βέλτιστη πυκνότητα, δηλαδή η πυκνότητα που αντιστοιχεί στην χωρητικότητα του δρόμου

Το μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι η ταχύτητα γίνεται μηδέν μόνο όταν η πυκνότητα φτάνει στο άπειρο. Άρα αυτό το μοντέλο δεν είναι κατάλληλο για να προβλέψει ταχύτητες σε υψηλές πυκνότητες.

Ο Pipes [10] πρότεινε ένα μοντέλο που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$v = v_f \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D}{D_{max}} \right)^n \right]$$

(4.10.)



Όπου  $n$  είναι μια παράμετρος η οποία επιτρέπει μια πιο γενικευμένη προσέγγιση μοντελοποίησης. Όταν το  $n$  τίθεται ίσο με μονάδα, το μοντέλο του Pire είναι ταυτόσημο με το μοντέλο του Greenshields.

Ο Van Aerde [11] πρότεινε το ακόλουθο μοντέλο με 4 παράμετρους, που μπορεί να απλοποιηθεί για να προκύψει το μοντέλο Greenshields.

$$D = \frac{1}{c_1 + c_2 / (v_f - v) + c_3 v}$$

(4.11.)

Όπου

$C_1$  είναι η σταθερή απόσταση σταθερής πορείας του οχήματος  $c_1 = m c_2$

$C_2$  είναι η πρώτη μεταβλητή απόστασης της σταθερής πορείας του οχήματος

$$c_2 = \frac{1}{D_{\max} (m + 1 / v_f)}$$

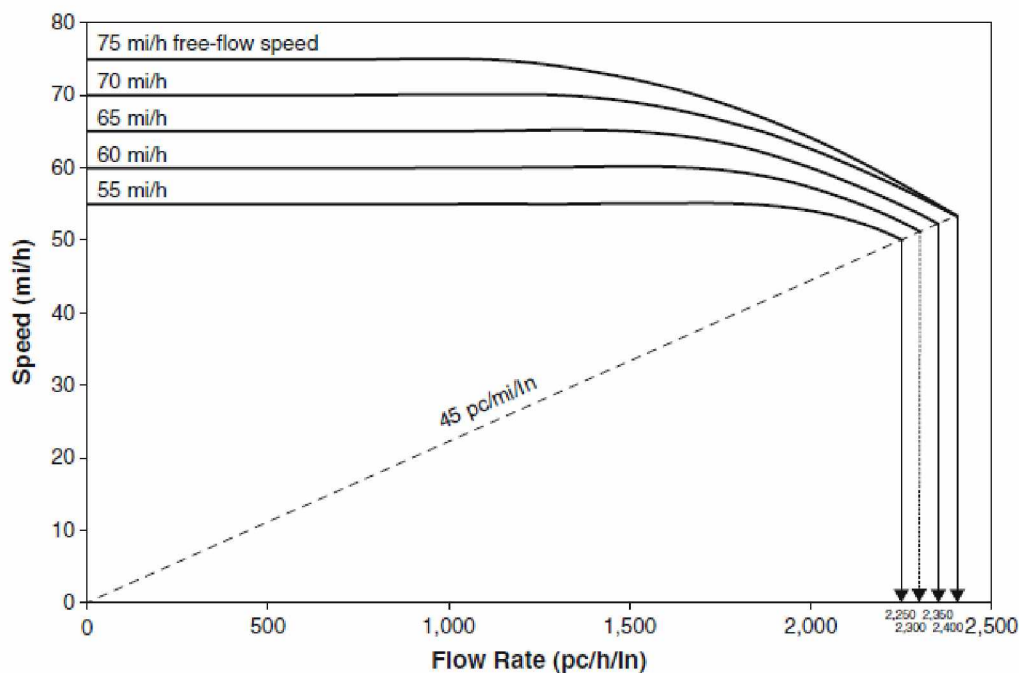
$C_3$  είναι η δεύτερη μεταβλητή απόστασης της σταθερής πορείας του οχήματος

$$c_3 = \frac{-c_1 + v_{opt} / q_{\max} - c_2 / (v_f - v_{opt})}{v_{opt}}$$

$m$ : είναι μια σταθερά που χρησιμοποιείται για την επίλυση των τριών σταθερών της πορείας του οχήματος

Το μοντέλο Van Aerde απλοποιείται στο μοντέλο Greenshields όταν  $c_1 = c_3 = 0$  και επιτρέπει επιπλέον ευελιξία για να ταιριάζει με τα δεδομένα πεδίου. Τα παραπάνω μοντέλα ονομάζονται μοντέλα ενός καθεστώτος, καθώς βασίζονται στην υπόθεση ότι η ίδια σχέση ταχύτητας-πυκνότητας ισχύει για ολόκληρο το εύρος πυκνότητας που παρατηρείται στις ροές κυκλοφορίας. Ωστόσο, παρατηρήσεις πεδίου δείχνουν ότι ενδέχεται να προκύψουν διαφορετικές σχέσεις σε διαφορετικό εύρος πυκνότητας. Αρκετά άρθρα στη βιβλιογραφία συζητούν την ασυνέχεια μεταξύ των συνθηκών χωρίς συμφόρηση και συμφόρηση και του φαινομένου δύο τιμών χωρητικότητας (μία τιμή αντιστοιχεί σε συνθήκες μη συμφόρησης και άλλη σε συνθήκες συμφόρησης). Η αναφορά [12] συζητά ορισμένα από τα μοντέλα πολλαπλών καθεστώτων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και παρέχει μια διεξοδική ανασκόπηση των μοντέλων κυκλοφοριακής ροής που αναπτύχθηκαν πριν από το 1990. Η αναφορά [13] παρέχει μια λεπτομερή συζήτηση για τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής και τα ζητήματα που σχετίζονται με τη βαθμονόμησή τους.

Τα περισσότερα άρθρα επικεντρώνονται σε μοντέλα κυκλοφοριακής ροής για τύπους οδών χωρίς διακοπή ροής (όπως απλούς αυτοκινητόδρομους και αυτοκινητόδρομους πολλών λωρίδων), ενώ μερικά άλλα συζητούν τύπους οδών με διακοπή ροής (δηλαδή, εκείνες όπου η κυκλοφορία διακόπτεται από σήματα, σηματοδότηση ή πινακίδες κυκλοφορίας).



Εικόνα 18: Καμπύλες ροής ταχύτητας για αυτοκινητόδρομους (Από Εγχειρίδιο χωρητικότητας Αυτοκινητοδρόμων HCM, 2010.)

#### 4.4. Τα μοντέλα του HCM (Highway Capacity Manual)

Το HCM ιστορικά (ξεκινώντας με το HCM του 1965) παρείχε σχέσεις μεταξύ των πρωταρχικών χαρακτηριστικών κυκλοφορίας (ταχύτητα, ροή και πυκνότητα) που αποτέλεσαν τη βάση διαδικασιών ανάλυσης χωρητικότητας αυτοκινητοδρόμων, ιδίως για οδούς χωρίς διακοπή ροής. Το Σχήμα 18 παρουσιάζει μια σειρά καμπυλών ταχύτητας-ροής που παρέχονται στο HCM 2010 [1] και απεικονίζει τη σχέση μεταξύ ταχύτητας και ροής για βασικά τμήματα αυτοκινητόδρομων και για διάφορες ταχύτητες ελεύθερης ροής (FFS) που κυμαίνονται από 55 έως 75 mph. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η ταχύτητα παραμένει σταθερή για χαμηλές ροές και αρχίζει να μειώνεται καθώς η ροή φτάνει τα 1.300-1.750 pc / h / ln. Το σχήμα δείχνει ότι οι τιμές χωρητικότητας ποικίλλουν ανάλογα με την ταχύτητα ελεύθερης ροής. Απεικονίζει επίσης σαφώς τον ισχυρισμό που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη αυτών των καμπυλών ότι η χωρητικότητα επιτυγχάνεται όταν η πυκνότητα είναι 45 επιβατικά αυτοκίνητα ανά μίλι ανά λωρίδα (pc / mi / ln). Αυτές οι καμπύλες αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα σε όλες τις ΗΠΑ, με βάση τα ακόλουθα ευρήματα και παραδοχές:

1. Σε χαμηλές ροές η ταχύτητα παραμένει σταθερή και αυτό το τμήμα της καμπύλης δεν βαθμονομείται, αλλά παραμένει ίσο με την ταχύτητα ελεύθερης ροής. αυτό το εύρημα υποστηρίχθηκε από τα δεδομένα πεδίου.
2. Οι βαθμοί χωρητικότητας διατηρήθηκαν σταθεροί και ίσοι με τις τιμές που προβλέπονται στο HCM 2000. Δεδομένης της δυσκολίας στην επίτευξη ενός αριθμού χωρητικότητας και της παρατηρούμενης μεταβλητότητας γύρω από τη χωρητικότητα, δεν απαιτήθηκε καμία αλλαγή από αυτήν τη νέα ανάλυση
3. Η μορφή της εξίσωσης που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του καμπυλόγραμμου τμήματος των καμπυλών έχει ως εξής:

$$v = \frac{a}{1 + \left[ \frac{a}{d(c - F + BP)} \right]}$$

(4.12.)

v είναι η ταχύτητα λειτουργίας

a είναι μια παράμετρος ταχύτητας

d είναι το μήκος του τμήματος

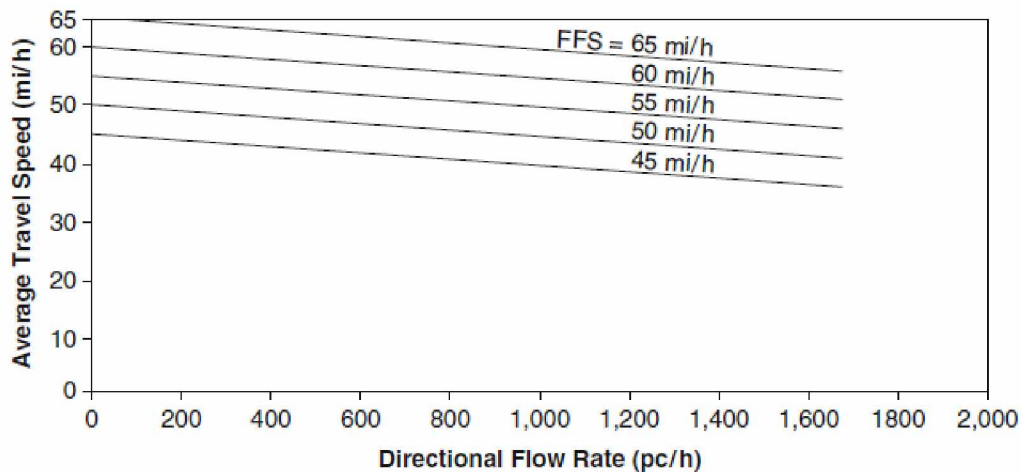
c είναι η χωρητικότητα του τμήματος

F είναι η ροή του τμήματος

BP είναι το σημείο διακοπής ροής όπου τελειώνει το σταθερό τμήμα της ταχύτητας. Πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με την ανάπτυξη των καμπυλών παρέχονται στο HCM 2010 ([1], τόμος 4.

Το HCM 2010 παρέχει σχέσεις ταχύτητας-ροής μόνο για μη κορεσμένη (δηλαδή, χωρίς συμφόρηση) ροή. Όταν η ζήτηση υπερβαίνει τη χωρητικότητα της δεδομένης οδού, η οδός θα γίνει ανεπαρκής, με τις ουρές να σχηματίζονται πίσω από την τοποθεσία της συμφόρησης. Προς το παρόν δεν έχουν αναπτυχθεί σχέσεις για υπερκορεσμένες συνθήκες στους αυτοκινητόδρομους, επειδή οι έρευνες δεν έχουν καταλήξει σε αυτό το θέμα. Ένας από τους περίπλοκους παράγοντες είναι ότι για τις συνθήκες συμφόρησης οι λειτουργίες εξαρτώνται από τη διάρκεια της συμφόρησης, όχι μόνο από το επίπεδο ζήτησης. Έτσι, όταν οι συνθήκες είναι αυτές της συμφόρησης και υποθέτουν την ίδια ζήτηση, η μέση ταχύτητα θα μειωνόταν καθώς αυξάνεται η διάρκεια αυτού του επιπέδου ζήτησης. Το σχήμα 19 δείχνει τη σχέση ταχύτητας-ροής για αυτοκινητόδρομους δύο λωρίδων [1]. Σε αυτήν

την περίπτωση, η ταχύτητα ελεύθερης ροής κυμαίνεται από 45 έως 65 mph (72,4 km/h έως 104,6 km/h) και η σχέση μεταξύ ταχύτητας και ροής είναι γραμμική. Να σημειώσουμε ότι το σχήμα παρέχει τη σχέση για κατεύθυνση ροής, όχι για αμφίδρομη ροή.



Εικόνα 19: Καμπύλες ροής ταχύτητας για αυτοκινητόδρομους δύο λωρίδων (Από το Highway Capacity Manual 2010)

#### 4.5. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μοντέλων Κυκλοφοριακής Συμφόρησης

##### 4.5.1. Εισαγωγή

Σε αυτή την εργασία έχουμε περιγράψει μοντέλα κυκλοφοριακής συμφόρησης που είναι σε θέση να αξιολογήσουν τις σύγχρονες συμπεριφορές κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομους και έχουμε σχολιάσει μεθόδους λύσης που επιτρέπουν την ανάλυση αυτών των μοντέλων κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το ευρύ πεδίο της βιβλιογραφικής έρευνας βασίζεται στη στοχαστική διαδικασία Poisson, στην αλυσίδα Markov και σε μοντέλα κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Ως πηγή συμφόρησης, το μηχανοκίνητο όχημα κατέχει μια μοναδική θέση, τόσο από πρακτική όσο και από μαθηματική άποψη και κατά συνέπεια τα τελευταία χρόνια έχει επισημανθεί από τους συγκοινωνιολόγους. Εκτιμήσεις για τη σημασία της μεταφοράς με αυτοκίνητο είναι δύσκολο να γίνουν, αλλά μπορεί κανείς να είναι σίγουρος ότι σε μια βιομηχανική κοινωνία η επίδρασή της είναι τεράστια, είτε μετράται οικονομικά, πολιτικά, από άποψη δημόσιας υγείας, ψυχολογικά, είτε και βιομηχανικά. Ορισμένες από τις κεντρικές έννοιες αυτής της εργασίας, όπως οι κυκλοφοριακές ροές και οι καθυστερήσεις της κυκλοφορίας, είναι βάσιμα δημοφιλείς έννοιες, σε αντίθεση με τομείς των εφαρμοσμένων μαθηματικών, όπου ελάχιστοι από αυτούς έχουν τόσο ευρεία και άμεσα διαισθητική σημασία στη ζωή μας.

Η αστική οδική υποδομή και η ανάπτυξη ορισμένων περιοχών του κόσμου έχει μείνει πίσω, εμφανώς σε ορισμένα μεγάλα μέρη που αντιμετωπίζουν κυκλοφοριακό πρόβλημα. Τα κύρια οδικά

προβλήματα που υπάρχουν στην αστική κυκλοφορία είναι οι χαοτικές διασταυρώσεις, η σοβαρή οδική πληρότητα, η χαμηλή χωρητικότητα των οδών, οι μεταφορές με καθυστερήσεις, οι άνθρωποι που περνούν από μη σηματοδοτούμενους δρόμους που προκαλούν μικτές παρεμβολές στην κυκλοφορία και άλλα πιο σοβαρά ζητήματα. Στη θεωρία των ουρών αναμονής, ένα μοντέλο κατασκευάζεται έτσι ώστε να μπορεί να προβλεφθεί το μήκος της κυκλοφοριακής συμφόρησης και οι χρόνοι αναμονής (Sundarapandian, 2009). Το ζήτημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης έχει αποτελέσει αντικείμενο επιστημονικής συζήτησης, γιατί δεν υπάρχει κάποια κοινωνία που δεν αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα. Σύμφωνα με τους Intikhab et al. (2008), το αποτελεσματικό σύστημα μεταφορών παίζει σημαντικό ρόλο για την τροφοδοσία των καθημερινών αναγκών, όπως η απασχόληση, η εκπαίδευση, οι υπηρεσίες υγείας και ο ελεύθερος χρόνος. Σε ατομικό επίπεδο, ο Wane (2001) επισημαίνει επίσης, ότι η μεταφορά είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την κάθε πόλη. Δεδομένου ότι παρέχει πρόσβαση στην οικονομική δραστηριότητα, διευκολύνει την οικογενειακή ζωή και βοηθά στην κίνηση των κοινωνικών δικτύων.

Κατά συνέπεια, σε μια προσπάθεια τα άτομα να ταξιδεύουν γρηγορότερα και να εκτελούν εύκολα καθημερινές δραστηριότητες, ο κόσμος που ζει κατά βάση στις πόλεις παρακολουθεί τα τελευταία χρόνια τις εξελίξεις στην αυτοκινητοβιομηχανία. Από το 1988 ο παγκόσμιος στόλος αυτοκινήτων έχει αυξηθεί κατά 600 εκατομμύρια. Η συνέπεια αυτού του φαινομένου, σύμφωνα με τον Δημητρίου (1991) είναι ότι οι μεταφορές *«αυτή τη στιγμή αντιπροσωπεύουν το 23% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον κόσμο»*.

Οι Gross και Harris [1985] έχουν συζητήσει έξι χαρακτηριστικά που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι επαρκή για να περιγράψουν τη διαδικασία αναμονής.

- 1) Πρότυπο άφιξης πελατών
- 2) Πρότυπο υπηρεσιών
- 3) Πειθαρχία στις ουρές
- 4) Χωρητικότητα συστήματος
- 5) Αριθμός καναλιών εξυπηρέτησης(μονοκαναλικό, πολυκαναλικό)
- 6) Αριθμός σταδίων υπηρεσίας

Ο Gross και ο Harris [1985] συζητούν επίσης την αντίδραση ενός χρήστη κατά την είσοδό του στο σύστημα. Ένας χρήστης μπορεί να αποφασίσει να περιμένει ανεξάρτητα από τη διάρκεια που εξελίσσεται η κυκλοφοριακή συμφόρηση, ή αν η κυκλοφοριακή συμφόρηση ή αλλιώς η ουρά που έχει δημιουργηθεί είναι πολύ μεγάλη για να την υποστεί, μπορεί να αποφασίσει να μην μπει σε

αυτή. Εάν ένας χρήστης αποφασίσει να μην εισέλθει στην ουρά κατά την άφιξη, θεωρείται ότι έχει απορρίψει αυτήν την επιλογή. Από την άλλη πλευρά, ένας χρήστης μπορεί να εισέλθει στην ουρά, αλλά μετά από λίγο να χάσει την υπομονή του και να αποφασίσει να φύγει. Σε αυτήν την περίπτωση λέγεται ότι παραιτήθηκε. Σε περίπτωση που υπάρχουν δύο ή περισσότερες παράλληλες γραμμές-ουρές αναμονής, οι χρήστες μπορούν να αλλάξουν από τη μία στην άλλη τη διαδρομή τους.

Οι Drekic και Stanford [2000] περιγράφουν τα συστήματα προτεραιότητας ως συστήματα που χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει κυκλοφοριακή συμφόρηση, στα οποία η πρόθεση είναι να προσφέρουν σε μια ομάδα χρηστών (ή πιθανώς σε περισσότερες) premium υπηρεσίες. Η δυνατότητα προτίμησης είναι βασικό στοιχείο αυτής της στρατηγικής. Στην κυκλοφοριακή συμφόρηση προτεραιότητας, οι χρήστες με υψηλότερη προτεραιότητα παραλείπουν τους χρήστες με χαμηλότερη προτεραιότητα, γεγονός που οδηγεί στη διαφορά μεταξύ των χρόνων αναμονής διαφορετικών τύπων πελατών.

Οι Filipowicz και Kwiecien (2000), περιέγραψαν συστήματα αναμονής με λωρίδες άφιξης και συστήματα αναμονής με μεμονωμένες υπηρεσίες. Επίσης περιέγραψαν δίκτυα αναμονής τα οποία χρησιμοποιούνται επιτυχώς για ανάλυση απόδοσης διαφορετικών συστημάτων όπως υπολογιστών, επικοινωνιών, δικτύων μεταφορών και κατασκευής, με την ενσωμάτωση κλασικών συστημάτων Markovian με εκθετικούς χρόνους υπηρεσίας και κατανομές Poisson.

Οι Dewan και Mendelson (1990) επικεντρώνονται στην χωρητικότητα μιας οδικής υποδομής και εξετάζουν τις βέλτιστες αποφάσεις τιμολόγησης και χωρητικότητας για μια εγκατάσταση υπηρεσιών που βρίσκεται σε ένα περιβάλλον όπου το κόστος λόγω καθυστέρησης των χρηστών είναι σημαντικό. Ανέπτυξαν ένα στατικό μοντέλο που υποθέτει μια μη γραμμική σχέση κόστους καθυστέρησης για να βρουν μια αντιστάθμιση μεταξύ του κόστους τιμολόγησης και του κόστους χωρητικότητας. Αυτή η τιμή εξαρτάται από τη ζήτηση που υπάρχει σε κάθε περίοδο και το αναμενόμενο κόστος καθυστέρησης για τη συγκεκριμένη ζήτηση.

Οι Rouba and Ward (2009) χρησιμοποίησαν την προσομοίωση υπολογιστών για να μελετήσουν την απόδοση εναλλακτικών εκτιμητών καθυστέρησης σε πραγματικό χρόνο, στο υπερφορτωμένο μοντέλο κυκλοφοριακής συμφόρησης πολλαπλών διακομιστών  $GI / GI / s + GI$ , επιτρέποντας την εγκατάλειψη των χρηστών. Αυτοί οι εκτιμητές είναι η καθυστέρηση του τελευταίου πελάτη που εισήλθε στο σύστημα, η καθυστέρηση που βίωσε μέχρι στιγμής αυτός που είναι στην αρχή της ουράς καθώς και η καθυστέρηση που βίωσε ο επόμενος χρονικά που εισήλθε στο σύστημα, αμέσως μετά από αυτούς που ολοκλήρωσαν την υπηρεσία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση ανακοινώσεων καθυστέρησης σε τηλεφωνικά κέντρα και σχετικά συστήματα

υπηρεσιών. Χαρακτηρίζουν την απόδοση του συστήματος με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Επιπλέον, καθιέρωσαν προσεγγίσεις για μέτρα απόδοσης με μια μη εκθετική κατανομή χρόνου εγκατάλειψης, για να αποκτήσουν νέους εκτιμητές καθυστέρησης, που αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τις μη εκθετικές κατανομές χρόνου εγκατάλειψης .

Οι Udayabhanu et al (2010) διαπίστωσαν ότι η συμφόρηση στα συστήματα αναμονής έχει σοβαρές συνέπειες, έτσι ώστε να μην είναι ποτέ βέλτιστη η λειτουργία του συστήματος στο 100% επίπεδο χρήσης. Αναπτύσσουν μια έκφραση για το βέλτιστο επίπεδο χρήσης για μια ουρά αναμονής  $M / D / 1$  και αποδεικνύουν την ομοιότητά της με το μοντέλο EOQ(ECONOMIC ORDER QUANTITY). Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη του βέλτιστου μέσου ποσοστού άφιξης ή για την κατάλληλη προσαρμογή της χωρητικότητας έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο εξυπηρέτησης .

Οι Gurumurthi και Benjaafar θεωρούν συστήματα αναμονής με πολλές κατηγορίες χρηστών και ετερογενείς διακομιστές, όπου οι χρήστες έχουν την ευελιξία να υποβάλλονται σε επεξεργασία από περισσότερους από έναν διακομιστές και οι διακομιστές αυτοί έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας περισσότερων από μία κατηγορία πελατών. Παρείχαν ένα ενοποιημένο πλαίσιο για τη μοντελοποίηση και ανάλυση αυτών των συστημάτων υπό αυθαίρετη ευελιξία χρήστη και διακομιστή, για ένα πλούσιο σύνολο πολιτικών ελέγχου που περιλαμβάνει προγράμματα προτεραιότητας για συγκεκριμένους χρήστες. Χρησιμοποίησαν τα μοντέλα τους για να λάβουν πολλές πληροφορίες σχετικά με την επίδραση της διαμόρφωσης του συστήματος και των πολιτικών ελέγχου.

Οι Bhargab Maitra, P.K Sikdar και S.L Dhingra, (1999) διεξήγαγαν μια μελέτη για τον ποσοτικό προσδιορισμό της συμφόρησης. Το ποσοτικό επίπεδο συμφόρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λογικό και βελτιωμένο μέτρο αποτελεσματικότητας για να ληφθεί υπόψη ο ορισμός του επιπέδου υπηρεσίας-εξυπηρέτησης με ποσοτικό τρόπο. Η μοντελοποίηση της συμφόρησης παρέχει μια ποσοτική βάση για την κατανόηση της συμβολής των διαφόρων τύπων οχημάτων στη συνολική συμφόρηση και είναι χρήσιμο για την ανάπτυξη της πολιτικής για τον περιορισμό της συμφόρησης.

Οι Jean-Marie και Hyon (2009), θεωρούν μια ουρά αναμονής διακομιστή σε διακριτή ώρα, στην οποία οι χρήστες πρέπει να εξυπηρετούνται πριν από κάποιο χρονικό όριο παραμονής, διαφορετικό για κάθε είδος γεωμετρικής κατανομής. Ένας χρήστης που δεν εξυπηρετείται πριν από αυτό το όριο είναι ανυπόμονος και αποχωρεί από το σύστημα. Το γεγονός της εξυπηρέτησης χρηστών και το γεγονός της απώλειας τους λόγω της ανυπομονησίας προκαλεί κόστος. Ο σκοπός είναι να αποφασιστεί πότε και σε πόσο χρόνο θα εξυπηρετηθούν οι χρήστες, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος. Χρησιμοποιούν μια διαδικασία Markov με άπειρο ορίζοντα και μειωμένο κόστος.

Καθιέρωσαν τις δομικές ιδιότητες του στοχαστικού δυναμικού προσομοιωτ και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη πολιτική είναι τύπου κατωφλίου. Επιπλέον, έκαναν σύγκριση και ανάλυση σε δύο πολιτικές όριων και ήταν σε θέση να υπολογίσουν ρητά τη βέλτιστη τιμή αυτού του ορίου σύμφωνα με τις παραμέτρους του προβλήματος.

Οι Wells-Parker et al., (2002) ορίζουν αυτό που «θέτει σε κίνδυνο ή ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο ανθρώπους ή περιουσία στις μεταφορές». Περιγράφεται από πολλές και γρήγορες αλλαγές λωρίδας, σκληρό φρενάρισμα και γρήγορη επιτάχυνση. Η στενή ακολουθία ή η «πύλη κυκλοφοριακής συμφόρησης» παρατηρείται συνήθως τόσο σε μητροπολιτικούς όσο και σε επαρχιακούς δρόμους. Οι οδηγοί μπορούν να είναι πολύ κοντά ο ένας στον άλλον σε μια προσπάθεια να αποτρέψουν τους άλλους να μπουν μπροστά τους, ενώ άλλοι οδηγοί προχωρούν κολλημένοι πίσω από το μπροστινό όχημα για να «αναγκάσουν» το όχημα να κινηθεί από μια συγκεκριμένη λωρίδα σε μια άλλη. Αυτό είναι πιο πιθανό από νεαρούς άνδρες οδηγούς και συσχετίζεται με αυξημένο κίνδυνο σύγκρουσης μηχανοκίνητου οχήματος στο πίσω άκρο, επειδή υπάρχει λιγότερος χρόνος για πέδηση έκτακτης ανάγκης εάν ένα ξαφνικό περιστατικό συνέβαινε πιο μακριά στο δρόμο.

Ο Retting et al., (2003) μελέτησε την εισαγωγή των φωτεινών σηματοδοτών και ανιχνευτών κάτω από το δρόμο που έχει οδηγήσει σε μείωση των συγκρούσεων που προκαλούσαν τραυματισμό και θάνατο. Χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής κάτω από το δρόμο που συνδέεται με σταθερές κάμερες. Λαμβάνεται μια φωτογραφία για να επιβεβαιωθεί ότι το εν λόγω όχημα διήλθε από τη διασταύρωση ή αν ξαφνικά έχει φρενάρει ή αν δεν σταμάτησε. Η εγκατάσταση καμερών κόκκινου φωτός σχετίζεται με αυξημένη συχνότητα συγκρούσεων οπίσθιου άκρου. Αυτό σχετίζεται με τους οδηγούς που ξαφνικά συνειδητοποιούν την παρουσία των καμερών. Ακολουθεί το απότομο φρενάρισμα και το ακόλουθο όχημα δεν προλαβαίνει να σταματήσει εγκαίρως.

Οι Chriqui και Robillard (1975) υποστήριξαν ότι οι επιβάτες σκέφτονται ένα σύνολο ελκυστικών γραμμών για να ελαχιστοποιήσουν το αναμενόμενο άθροισμα του χρόνου εντός και εκτός οχήματος. Πρότειναν επίσης ένα μοντέλο επιλογής διαδρομής με καλή συμπεριφορά, σύμφωνα με το οποίο οι επιβάτες των λεωφορείων επιλέγουν να επιβιβαστούν στην πρώτη γραμμή από το σύνολο των γραμμών που φτάνει σε μια στάση. Οι προτεινόμενες έννοιες έλαβαν μια τεράστια αναγνώριση γιατί ήταν σε θέση να εξηγήσουν στον επιβάτη τις επιλογές ταξιδιού που βασίζονται στη διαμετακόμιση.

Σύμφωνα με τους Van & Donald (2001), οι οδηγοί σήμερα αντιμετωπίζουν πολλά προβλήματα κατά την οδήγηση σε πολυσύχναστες πόλεις, ειδικά επειδή οι αισθήσεις υπερφορτώνονται από τον τεράστιο όγκο πληροφοριών που πρέπει να υποβάλλονται σε συνεχή επεξεργασία (υπερφόρτωση πληροφοριών). Οι τύποι πληροφοριών που μπορεί να συναντήσει ένας τυπικός οδηγός πόλης και



πρέπει να αντιδράσει σε αυτές είναι πολυάριθμοι και περιλαμβάνουν πινακίδες κυκλοφορίας, σήματα κυκλοφορίας, διαφημίσεις, κόρνες, δυνατή μουσική από οχήματα που διέρχονται, λωρίδες αλλαγής οχημάτων, πεζούς και πολλά άλλα.

Οι Zhang et al., (2000) συζητούν ότι η υπερβολική ταχύτητα είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που προκαλεί τις περισσότερες συγκρούσεις, τραυματισμούς και θανάτους, πράγμα λογικό εφόσον έχει αυξηθεί σημαντικά η μέση ταχύτητα κίνησης για τα μηχανοκίνητα οχήματα. Αυτή η αλλαγή συνέβη κυρίως από βελτιώσεις υποδομής και σχεδιασμού στο οδικό δίκτυο, οδηγώντας σε υψηλότερες ταχύτητες που διανύονται κατά βάση σε μεγάλους δρόμους και αυτοκινητόδρομους. Υπό οδήγηση με υπερβολική ταχύτητα, υπάρχει λιγότερος χρόνος και διαθέσιμος χώρος για να σταματήσει με ασφάλεια το όχημα. Η οδήγηση με ταχύτητες πάνω από το νόμιμο όριο είναι μια κοινή συμπεριφορά πολλών οδηγών. Μια έρευνα για την ταχύτητα έδειξε ότι μόλις λίγοι περισσότεροι από τους μισούς οδηγούς, έμειναν κάτω από τα καθορισμένα όρια ταχύτητας των 60 Km / h (όπως είχε οριστεί από την έρευνα).

Οι Schwartz et al. (2006), μελέτησαν κατανομές του μήκους κοινών ουρών σε διάφορα συστήματα M / M / 1 με απογραφή υπό συνεχή παρακολούθηση και σε μέρη με διαφορετικές πολιτικές διαχείρισης κυκλοφορίας. Θεωρούν ότι η ζήτηση είναι θεμελιώδης παράγοντας και ορίζει ποιος είναι ο χρόνος λειτουργίας για τον υπολογισμό της απόδοσης των αντίστοιχων συστημάτων. Σε περίπτωση «άπειρης αίθουσας αναμονής», το βασικό αποτέλεσμα δείχνει ότι ο περιορισμός των κατανομών του μήκους της ουράς(μέγεθος κυκλοφοριακής συμφόρησης) επεξεργάζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στο κλασικό σύστημα αναμονής M / M / 1.

Ο Tencer (2011) ανέφερε ότι οι άνθρωποι στον αναπτυσσόμενο κόσμο συνεχίζουν να αγοράζουν οχήματα, ενώ οι αναβαθμίσεις που γίνονται για την απόδοση καυσίμου από μόνες τους, δεν είναι αρκετές για να σταματήσουν μια σταθερή αύξηση στις παγκόσμιες θερμοκρασίες.

#### **4.5.2. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση.**

Ο Taylor (1999) ανέφερε, ότι η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι ένα φαινόμενο αυξημένης διαταραχής της κυκλοφορίας σε ένα σημείο του συστήματος μεταφοράς. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι ένα κοινό και αναπόφευκτο γεγονός της έντονης κυκλοφοριακής δραστηριότητας μίας περιοχής και ιδιαίτερα των αστικών περιοχών.

Ο Toole (2012) πιστεύει, ότι ο μεγάλος όγκος των οχημάτων, η ανεπαρκής οδική υποδομή και η παράλογη κατανομή της ανάπτυξης είναι οι κύριοι λόγοι για την αύξηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η εκάστοτε κυβέρνηση στην προσπάθειά της να σώσει την κατάσταση επεκτείνει τα

οδικά δίκτυα σε όλες σχεδόν τις μεγάλες πόλεις, αλλά τότε όλο και περισσότεροι άνθρωποι εισάγουν τα αυτοκίνητά τους στο δίκτυο και το πρόβλημα γίνεται ακόμη μεγαλύτερο.

Ο Hyden (1987) εισήγαγε τον όρο εγκυρότητα μεθόδων τεχνικών διένεξης κυκλοφορίας. Χρησιμοποιώντας λεπτομερή δεδομένα ανασυγκρότησης ατυχημάτων, σύγκρινε τις συνθήκες που οδηγούν σε συγκρούσεις και ατυχήματα και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν ομοιότητες μεταξύ των γεγονότων, που βασίζονται κυρίως στη συμπεριφορά των οδηγών.

Ο Quddus et al. (2010) διερεύνησε τη σχέση μεταξύ της σοβαρότητας των ατυχημάτων και της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Υποστήριξε με μία μελέτη που έκανε στον αυτοκινητόδρομο M25 του Λονδίνου με στοιχεία από το 2003-2006 με τη χρήση μοντέλων απόκρισης όπως μοντέλων logit, ότι το επίπεδο της κυκλοφοριακής συμφόρησης δεν επηρεάζει τη σοβαρότητα των τροχαίων ατυχημάτων.

Οι Glen et al. (2003) έδειξαν πώς οι στρατηγικές μείωσης της κυκλοφοριακής συμφόρησης μπορούν να προκαλέσουν ακόμη περισσότερη ζήτηση από αυτή που μπορεί να διαχειριστεί μία οδός σε μία άλλη και αυτό να μην έχει ως αποτέλεσμα τα αναμενόμενα οικονομικά οφέλη.

Ο Qingyu et al. (2007) πρότεινε μια βάση δεδομένων για την τιμολόγηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, και πιο αναλυτικά βασίστηκε στο εξωτερικό κόστος που δημιουργείται λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης και ανέλυσε τον μηχανισμό παραγωγής της αστικής κυκλοφοριακής συμφόρησης. Παρατήρησε ότι, συνήθως οι ταξιδιώτες παραβλέπουν την αρνητική εξωτερική κατάσταση της αστικής κυκλοφοριακής συμφόρησης και στη συνέχεια, εντάσσονται στις ουρές συμφόρησης. Επίσης τόνισαν ότι το εξωτερικό αυτό κόστος έχει σχέση με τις καθυστερήσεις στο προβλεπόμενο χρόνο ταξιδιού, την κατανάλωση καυσίμου, καθώς και με τα ατυχήματα.

Οι Intikhab et al. (2008) πρότειναν πως η ανάπτυξη ενός συστήματος μεταφοράς παίζει σημαντικό ρόλο στην καλή εξυπηρέτηση των καθημερινών αναγκών για τη ζωή στην πόλη, συμπεριλαμβανομένων των ανέσεων πρόσβασης, καθώς και των υπηρεσιών που είναι σημαντικές για τη ζωή όλων των ανθρώπων, όπως οι υπηρεσίες υγείας, η εργασία καθώς και η αξιοποίηση του ελεύθερου χρόνου τους.

Οι Teng et al. (2005), ως μέρος της προσπάθειας αναθεώρησης του εγχειριδίου χωρητικότητας της εθνικής οδού της Ταϊβάν, ανέλυσαν την ταχύτητα ελεύθερης ροής που συλλέχθηκε σε 76 διαφορετικά σημεία τμημάτων αγροτικών και προαστιακών αυτοκινητοδρόμων πολλαπλών λωρίδων στην Ταϊβάν. Η ανάλυση σχετικά με την κατανομή των ταχυτήτων ελεύθερης ροής για διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων έδειξε ότι οι ταχύτητες διαφορετικών κατηγοριών οχημάτων ακολούθησαν την κανονική κατανομή.

Ο Sahoo et al. (1996) μελέτησε τα χαρακτηριστικά κυκλοφοριακής ροής σε μια Εθνική Οδό των ΗΠΑ. Η διεξαγόμενη ανάλυση έδειξε ότι με αύξηση του όγκου των οχημάτων, η ταχύτητα μειώθηκε σημαντικά.

Ο Mukherjee et al. (1988) αξιολόγησε την καταλληλότητα αρνητικών και μετατοπισμένων αρνητικών εκθετικών κατανομών για οχήματα που πλησιάζουν σε διασταυρώσεις συγκεκριμένων οδών στην Καλκούτα της Ινδίας. Η καταλληλότητα της θεωρητικής κατανομής κρίθηκε χρησιμοποιώντας την κατανομή  $\chi^2$ -square. Διαπιστώθηκε ότι η μετατοπισμένη αρνητική εκθετική κατανομή έδωσε τη στενή προσαρμογή στις παρατηρούμενες κατανομές προόδου. Προτάθηκε ότι η σύγκριση των θεωρητικών εκθετικών κατανομών θα μπορούσε να βασίζεται σε αθροιστικές συχνότητες. Η θεωρία κυκλοφοριακής συμφόρησης παρέχει τη βάση για τη βελτιστοποίηση του χρονισμού σήματος.

Ο Woensel et al. (2001) μοντελοποίησε τον αντίκτυπο της κυκλοφοριακής συμφόρησης στις εκπομπές ρύπων, που ωθεί τους ιδιωτικούς και δημόσιους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να τον λάβουν υπόψιν τους. Από επιχειρησιακή προοπτική δεν μπορεί να λάβει υπόψη τον αντίκτυπο της συμφόρησης στις εκπομπές, εκτός εάν ο χρόνος ταξιδιού εξαρτάται από την περίοδο του χρόνου και αυτά τα στοιχεία λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό λωρίδων κυκλοφορίας ή κατά τον καθορισμό του επιπέδου εξυπηρέτησης .

Οι Di Febbraro et al, προσομοίωσαν ένα διατροφικό σύστημα μεταφοράς επιβατών. Το μοντέλο παρείχε στους επιβάτες διαδικτυακές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την κατάσταση του συστήματος. Το σύστημα μοντελοποίησε τρεις τρόπους μεταφοράς: λεωφορεία, υπόγειες σιδηροδρομικές γραμμές και σιδηροδρομικές γραμμές πάνω από το έδαφος. Το μοντέλο καθόρισε κόμβους, κόμβους μακροεντολών, συνδέσμους, εσωτερικούς συνδέσμους και συμβάντα. Οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν έναν σταθμό που εξυπηρετεί έναν τρόπο μεταφοράς. Οι κόμβοι μακροεντολών, αντιπροσωπεύουν έναν συνδυασμό κόμβων. Οι σύνδεσμοι αντιπροσωπεύουν τις διαδρομές στις οποίες μπορεί να ταξιδέψει ο χρήστης με έναν τρόπο μεταφοράς. Οι εσωτερικοί σύνδεσμοι αναφέρονται στη διαδρομή που ακολουθεί ένας επιβάτης για μεταφορά μεταξύ δύο κόμβων εντός ενός κόμβου μακροεντολών. Τα συμβάντα ορίζονται ως οτιδήποτε μπορεί να προκαλέσει αλλαγή στο σύστημα. Μπορούν να αντιπροσωπεύουν κανονικές συνθήκες κυκλοφορίας ή / και στοχαστικά περιστατικά εντός του συστήματος. Τα κανονικά γεγονότα είναι αφίξεις και αναχώρηση οχημάτων. Στοχαστικά γεγονότα είναι βλάβες και συμφόρηση για οχήματα.

Οι Jim και Chang (1998) παρουσίασαν ένα μοντέλο προσομοίωσης ενός τερματικού σταθμού επιβατών αεροδρομίου. Το μοντέλο αξιολογεί το σχεδιασμό ενός τερματικού σταθμού επιβατών με βάση τη ροή των επιβατών. Το μοντέλο ξεκινά με διαγράμματα ροής επιβατών και χρησιμοποιεί

προγράμματα πτήσεων, χαρακτηριστικά επιβατών και πληροφορίες εγκατάστασης. Η έξοδος του μοντέλου περιλαμβάνει στατιστικά στοιχεία σχετικά με τους χρόνους αναμονής, το μήκος της κυκλοφοριακής συμφόρησης και τον αριθμό πληρότητας σε κάθε μετρητή. Οι ίδιοι συγγραφείς παρουσίασαν ένα μη γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού ενός διαμετακομιστικού δικτύου. Το μοντέλο αξιολόγησε τις προτεινόμενες τροποποιήσεις σε ένα διατροπικό δίκτυο με βάση το κόστος χρήστη και χειριστή. Το μοντέλο ελαχιστοποίησε το κόστος χρήστη.

Οι Lammer et al (2008) εισήγαγαν ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της αναμονής στα φανάρια και την εκτίμηση του χρόνου αναμονής με βάση διαφορετικές αξιολογήσεις του μήκους της κυκλοφοριακής συμφόρησης και των πράσινων, κίτρινων(πορτοκαλί) και κόκκινων φαναριών και έτσι προήλθαν οι υβριδικές δυναμικές εξισώσεις που δίνουν τον απαιτούμενο πράσινο χρόνο για να γίνει εκκαθάριση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Ο Lammer and Helbing (2008) πρότεινε έναν αυτο-οργανωμένο έλεγχο φωτεινού σηματοδότη σε διασταυρώσεις με είσοδο ζωντανών δεδομένων που ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο αναμονής .

Ο Gendreau (1984) συζήτησε τις συνέπειες της κυκλοφοριακής συμφόρησης στο κόστος ταξιδιού των οχημάτων και κυρίως τον χρόνο αναμονής. Η μελέτη αντιμετώπισε τη συμφόρηση σε στάσεις λεωφορείων με βάση τη θεωρία κυκλοφοριακής συμφόρησης, με αποτέλεσμα ένα γενικό μοντέλο ανάθεσης διέλευσης υπό συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Οι Cominetti και Correa (2017) ανέλυσαν τα φαινόμενα συμφόρησης χρησιμοποιώντας το airdrop και τη δυναμική προσέγγιση προγραμματισμού. Ανέπτυξαν ένα μοντέλο εκχώρησης μεταφορών βασισμένο σε πρόοδο που εξετάζει τις επιπτώσεις συμφόρησης στους χρόνους αναμονής και την κατανομή ροής .

Ο Bolanle (2011) πραγματοποίησε μια μελέτη τονίζοντας τη σημασία της θεωρίας κυκλοφοριακής ροής στο πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης πέριξ των λιμένων, προκειμένου να ενισχυθεί η βιώσιμη ανάπτυξη των λιμένων της Νιγηρίας. Τα λιμάνια της Νιγηρίας χαρακτηρίζονται από αδιάκοπο πρόβλημα συμφόρησης κατά το πρόσφατο παρελθόν και αυτό είχε ως αποτέλεσμα τις καθυστερήσεις δρομολογίων που έχουν προγραμματιστεί από λιμάνια της Νιγηρίας για άλλα λιμάνια γειτονικών χωρών, γεγονός που έχει προκαλέσει την απώλεια πολλών εσόδων στη χώρα. Η αποτελεσματικότητα ενός λιμένα εξαρτάται από τη φόρτωση και εκφόρτωση πλοίων. Η ροή της κυκλοφορίας μέσω ενός λιμανιού είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο λόγω της τυχαίας φύσης της άφιξης και του χρόνου εξυπηρέτησης των πλοίων. Αυτό απαιτεί μια συστηματική προσέγγιση στον σχεδιασμό και τη διαχείριση λιμένων. Το μοντέλο κυκλοφοριακής συμφόρησης εφαρμόστηκε στο πρότυπο άφιξης και υπηρεσιών που προκαλεί τα προβλήματα συμφόρησης και προτείνει λύσεις στις προβληματικές περιοχές. Χρησιμοποιήθηκε επίσης για την πρόβλεψη του μέσου ποσοστού

άφιξης πλοίων και αυτοκινήτων στο λιμάνι Tin Can Island και του μέσου ποσοστού υπηρεσίας ανά πλοίο σε ένα μήνα. Η μελέτη διαπίστωσε ότι ο αριθμός ελλειμνισμού στο λιμάνι της Νιγηρίας είναι επαρκής για την ένταση της κυκλοφορίας των σκαφών αλλά και των διερχόμενων αυτοκινήτων που επιβιβάζονται στα πλοία. Παράγοντες που οδηγούν σε συμφόρηση λιμένων εντοπίστηκαν επίσης μέσω της ανάλυσης περιεχομένου της συνέντευξης που πραγματοποιήθηκε στους ενδιαφερόμενους στο λιμάνι.

Ο Chin (2007) διερεύνησε τη διαδικασία αναθεώρησης / έγκρισης υποβολής και χρησιμοποίησε τη θεωρία ουρών για να προσδιορίσει την κυκλοφοριακή συμφόρηση στη Μαγιόρκα και να αιτιολογήσει την ύπαρξη των μεγάλων χρόνων παράδοσης. Υπό τη μελέτη του, διερεύνησε τις υποκείμενες αιτίες αναμονής σε μια ουρά αναμονής και βρήκε τις μεθόδους βελτίωσης από την οπτική της κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Ο Joel Zhang Laifu (2000) έχει αξιολογήσει την απόδοση των συστημάτων αναμονής ενός καναλιού και πολλαπλών καναλιών, χρησιμοποιώντας την τεχνική προσομοίωσης διακριτών συμβάντων. Η είσοδος στους προσομοιωτές βασίζεται σε ζωντανά δεδομένα. Ένας χρήστης μπορεί να μεταβεί σε μια πιο σύντομη ουρά, αλλά ο χρόνος εξυπηρέτησης που απαιτείται από τους χρήστες στην ουρά μπορεί να είναι μεγαλύτερος, με αποτέλεσμα ακόμη μεγαλύτερο χρόνο αναμονής.

Οι Lam et al (1999) πρότειναν μια μαθηματική διατύπωση και έναν αλγόριθμο λύσης για τη μοντελοποίηση της διέλευσης σε κορεσμένο δίκτυο, όπου η καθυστέρηση των επιβατών στις στάσεις του bottleneck καθορίζεται ενδογενώς. Σε ένα κομβικό σημείο συμφόρησης, μόνο ένα ποσοστό επιβατών στο όχημα πρώτης άφιξης και οι υπόλοιποι επιβάτες εξυπηρετούνται από το επόμενο όχημα ή με μεταφορά σε εναλλακτικές διαδρομές.

Οι Benekohal και Abu - Lebdeh πραγματοποίησαν ανάλυση μεταβλητότητας, χρησιμοποιώντας το μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης κυκλοφορίας TRAF - NETSIM. Στη μελέτη οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν μέσα μαζικής μεταφοράς και εφαρμογές για να αποκτήσουν πρόσβαση στη μεταβλητότητα για τον υπολογισμό της αποτελεσματικότητας του NETSIM. Χρησιμοποίησαν τη μέση καθυστέρηση, τη μέση ταχύτητα και τα ταξίδια οχημάτων ως μέτρο των παραμέτρων αποτελεσματικότητας. Το VISSIM προσομοιώνει την κυκλοφοριακή ροή μετακινώντας τις μονάδες οχημάτων μέσω ενός δικτύου.

Οι Hur και Ahn (2005) μελέτησαν ένα σύστημα κυκλοφοριακής συμφόρησης διακομιστή, του οποίου η ροή άφιξης είναι μια σύνθετη συνάρτηση Poisson και οι χρόνοι εξυπηρέτησης διανέμονται γενικά. Θεωρούσαν τρεις τύπους περιόδου αδράνειας: κατώφλι, πολλαπλές διακοπές

για κάθε μοντέλο και μεμονωμένες διακοπές. Υπέθεσαν επίσης μετά την περίοδο αδράνειας, πως ο διακομιστής χρειάζεται ένα τυχαίο χρονικό διάστημα ρύθμισης εγκατάστασης πριν από την εξυπηρέτηση.

Ο Pearce (1967) θεωρούσε ένα σύστημα κυκλοφοριακής συμφόρησης ενός διακομιστή με έναν μηχανισμό υπηρεσίας που λειτουργεί τακτικά ανεξάρτητα από το εάν δν υπήρχαν χρήστες, όπως η υπηρεσία λεωφορείων ή πορθμείων που λειτουργούν ακόμη και όταν δεν υπάρχει διαθέσιμος επιβάτης. Ένας χρήστης που φτάνει σε μια κενή ουρά δεν θα μπορούσε, γενικά, να ξεκινήσει την υπηρεσία αμέσως. Ο Pearce εξέτασε τη συμπεριφορά ισορροπίας τέτοιων εξαρτώμενων από το χρόνο συστημάτων στην περίπτωση αρνητικής εκθετικής υπηρεσίας και μιας γενικής κατηγορίας στατικών αλλά όχι απαραίτητα επαναλαμβανόμενων εισόδων.

Ο Somuyiwa et.al (2015) αναλύει τον αντίκτυπο που προκαλεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση στη βέλτιστη απόδοση των εργαζομένων. Στην ανάλυση αυτή συμμετείχαν τυχαία εργαζόμενοι από 6 διαφορετικές εταιρίες που βρίσκονται κατά μήκος οδών, στις οποίες συναντάται συχνά κυκλοφοριακή συμφόρηση, προκειμένου να αξιολογηθεί το κόστος, ο χρόνος και οι επιδόσεις που χάνει ένας εργαζόμενος εξαιτίας της κυκλοφοριακής συμφόρησης που συναντά μέχρι να φτάσει στη δουλειά του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 6% της παραγωγικότητας των εργαζομένων οφείλεται στην κυκλοφοριακή συμφόρηση. Επίσης η παραγωγικότητα των εργαζομένων και η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι αντιστρόφως ανάλογα ποσά.

Η Qgunbodede [2003] μελέτησε την κυκλοφοριακή συμφόρηση και παρατήρησε πως είναι αποτέλεσμα της ραγδαίας αύξησης των μηχανοκίνητων οχημάτων χωρίς να γίνει η απαραίτητη βελτίωση στις οδικές υποδομές και στις τεχνικές διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Οι Shankar et al (1996) εφάρμοσαν μια λογική διατύπωση για την εκτίμηση της πιθανότητας σοβαρότητας του ατυχήματος. Διαπίστωσαν ότι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα εμφανούς τραυματισμού/θανάτου σε σχέση με μη εμφανή τραυματισμό, εάν τουλάχιστον ένας οδηγός από αυτούς που συμμετείχαν στο ατύχημα, δεν χρησιμοποιούσε σύστημα συγκράτησης κατά τη στιγμή του ατυχήματος.

Οι Fukuda et al (2005) σε μία έρευνα που διεξήχθη στην Bangkok, διαπίστωσαν ότι υπάρχουν μεγάλα κενά στη συλλογή δεδομένων από τα σημεία που έχουν συμβεί τροχαία ατυχήματα, πράγμα που ευθύνεται για την περιορισμένη βελτίωση των οδικών υποδομών. Για αυτό το λόγο εισήγαγαν τη μέθοδο Hi-yari-Hatto για τον καλύτερο εντοπισμό των μαύρων-νεκρών σημείων σε εθνικό επίπεδο.

Οι Lyons et al (2008) έδειξαν ότι τα σοβαρά ατυχήματα λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης σε οδούς διαφέρουν τόσο μεταξύ διαφόρων θέσεων όσο και δεδομένων υγείας στη Μεγάλη Βρετανία. Για την καλύτερη αξιολόγηση και το καλύτερο σχεδιασμό των συστημάτων υγείας, επιβάλλεται να υπάρχουν περισσότερα δεδομένα για τα ατυχήματα, τα οποία θα προκύπτουν από παρακολούθηση των οδικών υποδομών. Η χρήση πολλαπλών βάσεων δεδομένων ενώ έχει κόστος από κοινωνική άποψη, το κόστος αυτό θα είναι πολύ μικρότερο από το κόστος που σχετίζεται με αποφάσεις πολιτικής που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλειες ευκαιριών για την πρόληψη τραυματισμών στην οδική κυκλοφορία.

Ο Yass (2010) συζήτησε ότι κάθε περίπτωση τροχαίου ατυχήματος δεν επηρεάζει μόνο τον δρόμο στον οποίο συμβαίνει το ατύχημα αλλά και τη γύρω περιοχή. Προκαλεί πολλή αναστάτωση στην κυκλοφορία καθώς και καθυστέρηση. Οι καθυστερήσεις λόγω σοβαρών ατυχημάτων είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν από το κόστος. Τα ατυχήματα οδηγούν επίσης σε μακροχρόνια κλεισίματα οδών που οδηγούν και πάλι σε συμφόρηση και μπλοκάρισμα γειτονικών δρόμων.

#### **4.5.3. Μοντελοποίηση ροής κυκλοφορίας.**

Η αύξηση της κυκλοφοριακής ροής σε υπάρχουσες οδικές υποδομές οδηγεί σε αναπόφευκτη αύξηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η συμφόρηση οδηγεί σε καθυστερήσεις, μείωση του ρυθμού ροής, υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ερευνητές από ποικίλα επιστημονικά πεδία έχουν δώσει προσοχή στη μοντελοποίηση των οχημάτων για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της τρέχουσας οδικής υποδομής(π.χ αυτοκινητόδρομου).

Οι Kuhne et al.(2007) και Manke et al. (2005), ανέπτυξαν ένα στοχαστικό μοντέλο για την περιγραφή της κυκλοφοριακής συμπεριφοράς και μόρφωσαν μια γενική κύρια εξίσωση. Συνδυάζοντας τη διαδικασία Markov και το μοντέλο βέλτιστης ταχύτητας, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός κυκλοφοριακής συμφόρησης οφείλεται στη στοχαστική διαταραχή της κυκλοφορίας και η διάλυση της ουράς που προέκυψε εξαρτάται από το μέγεθος της ουράς. Επίσης ανέπτυξαν ένα μοντέλο πολλαπλών συστάδων σε κυκλική οδό ενός δρόμου.

Οι Kadiyali et al. (1981) ανακάλυψαν ότι οι ταχύτητες ελεύθερης ροής διαφόρων τύπων οχημάτων ακολούθησαν την κανονική διανομή. Ο May (1990) πρότεινε την επιλογή της κατανομής Poisson για την μοντελοποίηση στις αφίξεις οχημάτων υπό χαμηλή ροή.

Οι Adedayo et al (2006) τόνισαν ότι πολλές καταστάσεις στη ζωή απαιτούν από κάποιον να περιμένει πίσω από ουρές πριν κινηθεί. Αυτές οι γραμμές που σχηματίζονται αναφέρονται ως

γραμμές αναμονής ή ουρές. Σύμφωνα με αυτούς, η κυκλοφοριακή συμφόρηση εμφανίζεται όταν η χωρητικότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας υπολείπεται της ζήτησης για την υπηρεσία.

Σύμφωνα με τον Faragouí (1989), το μοτίβο άφιξης πλοίων είναι συνήθως μια στοχαστική διαδικασία που περιγράφεται από κάποιο είδος κατανομής πιθανότητας. Μια αρνητική εκθετική κατανομή των ωρών άφιξης και επομένως το ποσοστό άφιξης κατά Poisson, είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη προσέγγιση.

Ο A. Russo (2019) επεσήμανε ότι ο χώρος στάθμευσης σε δημόσιους δρόμους, αν και είναι βολικός για τον χρήστη, προκαλεί διάφορες συγκρούσεις, με απώλειες για την κοινωνία, που σχετίζονται με εμπλοκές, περιβαλλοντική ρύπανση, καθώς και οδική ασφάλεια και οικονομικές απώλειες που προκαλούνται από καθυστερήσεις στο ταξίδι. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, οι χώροι στάθμευσης σε δημόσιους δρόμους είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία των δραστηριοτήτων σε αστικές περιοχές, ειδικά για τις δραστηριότητες εκείνες που απασχολούν μεγάλο αριθμό χρηστών που μετακινούνται με ιδιωτικό τους όχημα.

Ο Dagboch (1964) παρουσιάζει μια επίσημη λύση για τη στατική κατανομή του μήκους της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε ένα φανάρι σταθερού κύκλου για μια αρκετά γενική κατανομή των αφίξεων και για ένα μόνο ρεύμα κυκλοφορίας. Παρουσιάστηκαν αποτελέσματα για το αναμενόμενο μήκος κυκλοφοριακής συμφόρησης και την αναμενόμενη καθυστέρηση ανά όχημα.

Οι Rupiah et al (2000) αναλύουν την κυκλοφοριακή ροή σε σηματοδοτημένες διασταυρώσεις και τονίζουν τη θεωρητική προσέγγιση των περιγραφικών μοντέλων της κυκλοφοριακής ροής.

Συμπεριλαμβάνεται σε πολλές από τις ανωτέρω μελέτες η προσέγγιση της θεωρίας ουρών και η προσέγγιση κυκλοφοριακής συμφόρησης σταθερής κατάστασης μαζί με τα διάφορα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους. Κατά τη μελέτη ή τη μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής σε ελεγχόμενες διασταυρώσεις, η μέση καθυστέρηση ανά όχημα, ο αριθμός των σταματημένων οχημάτων, οι αναμενόμενες καθυστερήσεις και το μέσο μήκος της κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι μεταξύ των σημαντικών μέτρων απόδοσης που μπορούν να ληφθούν. Η θεωρητική προσέγγιση ουρών θεωρείται πιο κατάλληλη για χρήση σε συνθήκες υπερβολικού κορεσμού. Συμπερασματικά, κρίνεται ότι υπάρχουν περιοχές που απαιτούν περαιτέρω προσοχή και έρευνα, και η υπόθεση της μη διορθωμένης κατάστασης στις αφίξεις που βρέθηκαν στα περισσότερα μοντέλα είναι ανεπαρκής για την περιγραφή της ροής. Δεύτερον, μια εκτίμηση της αρχικής κυκλοφοριακής συμφόρησης σε ένα τμήμα δρόμου δεν έχει τεκμηριωθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία. Θα πρέπει επίσης να αναπτυχθούν μοντέλα κυκλοφοριακής συμφόρησης που περιορίζονται από τον διαθέσιμο χώρο για κυκλοφοριακή συμφόρηση.



Ο Van Leeuwarden (2006) εξετάζει την κυκλοφοριακή συμφόρηση φωτεινού σηματοδότη σταθερού κύκλου (FCTL), όπου το όχημα φτάνει σε μια διασταύρωση που ελέγχεται από φωτεινό σηματοδότη. Παρουσιάζει τις κατανομές μήκους κυκλοφοριακής συμφόρησης και καθυστέρησης λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή Poisson και τη γεωμετρική κατανομή. Επίσης παρουσιάστηκε μια μέθοδος για την αντιστροφή των λειτουργιών παραγωγής, με το συμπέρασμα ότι η μέση καθυστέρηση είναι ευαίσθητη στις στοχαστικές ιδιότητες της κατανομής άφιξης .

Οι Van Zuylen και Viti (2010) στην έρευνα τους, έχουν σκοπό την εύρεση μιας μεθόδου επίλυσης του υπολογισμού των ουρών και των καθυστερήσεων σε μια σηματοδοτημένη διασταύρωση χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο αλυσίδας Markov, για να αντλήσουν την πιθανότητα κατανομής του μήκους της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε έναν κύκλο φαναριού, χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε αρχική κατανομή μήκους κυκλοφοριακής συμφόρησης. Με βάση τη δυναμική των προσδοκώμενων τιμών για το μήκος της κυκλοφοριακής συμφόρησης, οι συγγραφείς μορφώνουν έναν μαθηματικό τύπο για την καθυστέρηση στον έλεγχο της κυκλοφορίας σταθερού χρόνου. Παρέχουν μια ακριβή πιθανοτική διατύπωση για την καθυστέρηση στον έλεγχο κυκλοφορίας καθορισμένου χρόνου και μια ακριβή πιθανοτική διαμόρφωση της διαδικασίας κυκλοφοριακής συμφόρησης με έναν κύκλο, που επιτρέπουν την αιτιολόγηση του δυναμικού και στοχαστικού χαρακτήρα των ουρών συμφόρησης, ειδικά στα σημεία κοντά σε φανάρια που έχουν ζήτηση πολύ κοντά στη χωρητικότητα της οδού. Η πρόκληση, ωστόσο, έγκειται στην παραδοχή ενός σταθερού ποσοστού αναχώρησης, ενώ δεν υπάρχει συγκεκριμένη κατανομή για τις αφίξεις.

Ο Flaherty (2000) παρατήρησε ότι η διαχείριση της κυκλοφορίας έχει τη νομική της βάση και χρησιμοποιεί υποχρεωτικά και απαγορευτικά σήματα κυκλοφορίας και σήμανση για να ενημερώνει τους οδηγούς σχετικά με το τι πρέπει και τι δεν πρέπει να κάνουν σε σχέση με την ταχύτητα, το πλήθος οχημάτων στην οδό(η λεγόμενη κίνηση) και την αναμονή, τα όρια ταχύτητας, το περιορισμό στις κινήσεις στροφής, το κλείσιμο ή τη μονόδρομη λειτουργία των δρόμων και την προτεραιότητα για οχήματα υψηλής πληρότητας. Η εφαρμογή των ορίων ταχύτητας έχει παρατηρηθεί ότι επηρεάζει την ασφάλεια μεταφοράς.

Ο Elsinki (2000) παρατήρησε ότι η διαχείριση της κυκλοφορίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία, πληροφορίες κυκλοφορίας, έλεγχο κυκλοφορίας, διαχείριση συμβάντων, διαχείριση ζήτησης, υποστήριξη και παρακολούθηση οδηγών και διαχείριση μεταφορών στόλου.

Ο Gladys [2009] παρατήρησε ότι η συμπεριφορά των χρηστών του δρόμου επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο τα μέτρα διαχείρισης της κυκλοφορίας επιτυγχάνουν τους στόχους τους για τα οχήματα. Τα μέτρα διαχείρισης της κυκλοφορίας συνήθως αξιολογούνται χρησιμοποιώντας αυτοκινήτα εν κινήσει για τη λήψη δεδομένων σχετικά με το χρόνο ταξιδιού, τις ταχύτητες ταξιδιού, το χρόνο

στάσης, τον χρόνο που αναλώνεται σε καθυστερήσεις, ο αριθμός στάσεων για διέλευση πεζών, τη μείωση της απόκλισης των λωρίδων και την αύξηση των ασφαλών και βολικών εγκαταστάσεων διέλευσης.

Ο Rabta (2009) περιγράφει τη διαδικασία σε τρία βήματα. Συγχώνευση των αφίξεων από το εξωτερικό του συστήματος και από τις άλλες ουρές σε μία ροή άφιξης σε κάθε σταθμό, υπολογισμός των μετρήσεων απόδοσης και των χρόνων αναχώρησης σε κάθε σταθμό και διαχωρισμός της συνολικής αναχώρησης σε μεμονωμένες ροές. Οι ώρες αναχώρησης ενός σταθμού καθορίζουν τις ώρες άφιξης οποιωνδήποτε επόμενων σταθμών. Ο συγκεκριμένος τύπος κατανομής επεξεργασίας άφιξης δεν προσδιορίζεται αλλά αντιπροσωπεύεται μόνο από έναν μέσο και τετραγωνικό συντελεστή διακύμανσης.

Ο Meyer (1996) σημειώνει ότι παρόλο που η πολιτική δεν αποτελεί άμεσο παράγοντα της κυκλοφοριακής συμφόρησης, παίζει πολύ ζωτικό ρόλο στον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο οι άνθρωποι βλέπουν και χρησιμοποιούν τις πηγές και τις ευκαιρίες που διαθέτουν. Η παραπάνω έκθεση δείχνει έμμεσα τη σημασία της πολιτικής ή των ατυχημάτων όταν κάποιος ερευνά σε οποιαδήποτε μελέτη, όπως το πώς αντιλαμβάνεται η κοινότητα τον κίνδυνο σε σχέση με τα τροχαία ατυχήματα σε οποιαδήποτε χώρα σε τοπική κλίμακα. Αυτό συνδέεται στενά με τις διαθέσιμες προσφυγές και την ικανότητα των εθνικών και των τοπικών αρχών να θέσουν τις στρατηγικές για την οδική ασφάλεια στη χώρα. Η έλλειψη των πόρων και η δύναμη για τον έλεγχο και την επιβολή μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερα κίνητρα της αστυνομικής δύναμης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κυβερνητική πολιτική επηρεάζει όλους τους παράγοντες που προκαλούν τροχαία ατυχήματα, είτε πρόκειται για την ποιότητα του οδικού δικτύου, το φυσικό περιβάλλον, την κατάσταση του στόλου του οχήματος ή τις συμπεριφορές των οδηγών και των χρηστών του δρόμου. Σε διεθνή κλίμακα, η πολιτική έχει σχέση με την κατανομή πόρων, την υγεία, τον κίνδυνο και τη φτώχεια βάσει των διεθνών εμπορικών σχέσεων. Αυτή η σχέση, για παράδειγμα, μπορεί να εκφραστεί στην εισαγωγή μεταχειρισμένων οχημάτων τόσο για ιδιωτικά όσο και για δημόσια μέσα μεταφοράς από τις ανεπτυγμένες χώρες. Μερικές φορές αυτό θα μπορούσε να είναι η εισαγωγή οχημάτων που θεωρείται σχεδόν ως οδικός πλούτος κατά την άποψη του εξαγωγέα στην ανεπτυγμένη χώρα. Η πολιτική οικονομία ασχολείται με θέματα επιρροής και εξουσίας. Έτσι, το περιεχόμενο της πολιτικής οικονομίας τονίζει ότι η σχέση ανθρώπου-περιβάλλοντος σε τοπικές, περιφερειακές και παγκόσμιες κλίμακες μπορεί να γίνει κατανοητή μόνο με την ανάλυση των σχέσεων 24 προτύπων πόρων με τις δυνάμεις της πολιτικής οικονομίας. Ο Basset (1988) σημειώνει ότι, μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών που είναι δευτερεύοντα στην προσέγγιση της πολιτικής οικολογίας

περιλαμβάνεται η σημασία της ιστορικής ανάλυσης στην κατανόηση της τοπικής δυναμικής και των επιπτώσεων των κρατικών πολιτικών και δραστηριοτήτων στην τοπική κλίμακα.

Οι Houda et al (2012) περιγράφουν πολλές κοινές καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης και παρουσιάζουν μαθηματικά μοντέλα για την ανάλυση των ουρών αναμονής. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κυκλοφοριακή συμφόρηση πολλαπλών καναλιών με την κατανομή Poisson και τον εκθετικό χρόνο υπηρεσίας ( $m / m / s$ ), μπόρεσε να επιλύσει το πρόβλημα αναμονής και ελήφθη υπόψη ένας καλός γραμμικός προγραμματισμός.

Ο Robert (2000) εφάρμοσε τη θεωρία κυκλοφοριακής συμφόρησης στον σχεδιασμό του βέλτιστου αριθμού διακομιστών (RAMPS) σε κλειστό σύστημα στάθμευσης. Ερεύνησε πώς μπορούν οι αρχές να οργανώνουν αποτελεσματικά τις περιοχές κυκλοφορίας, το μέγεθος των χώρων στάθμευσης και να εξασφαλίζουν μια ποιοτική υπηρεσία στάθμευσης στον τοπικό πληθυσμό. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μπορεί να καθοριστεί ο βέλτιστος αριθμός διακομιστών (RAMPS) σε κλειστά συστήματα στάθμευσης.

Σύμφωνα με τον Nagurney et al., (2010) ο καιρός μπορεί να διαταράξει τις υπηρεσίες μεταφοράς με όλους τους τρόπους. Μερικές φορές θα μπορούσε να διαταράξει τη χρήση του δρόμου μειώνοντας τη χωρητικότητα του αυτοκινητόδρομου (σε περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών) ή αυξάνοντας την ευπάθεια στο σύστημα (λόγω πλημμυρών), διακόπτοντας επίσης τις δημόσιες συγκοινωνίες, κ.λπ.

#### **4.5.4. Προσεγγίσεις στην προσομοίωση κυκλοφορίας .**

Η εφαρμογή προγραμμάτων προσομοίωσης κίνησης μπορεί να ταξινομηθεί με διάφορους τρόπους. Ορισμένες από τις βασικές ταξινομήσεις των μοντέλων προσομοίωσης είναι ως προς το επίπεδο λεπτομέρειας σε μικροσκοπικά, μεσοκοπικά και μακροσκοπικά και ως προς το είδος των μεταβλητών σε συνεχή και διακριτά μοντέλα προσομοίωσης. Τα περισσότερα προβλήματα αστικών μεταφορών σχετίζονται με το δίκτυο. Στα δίκτυα, πρέπει κανείς να συνδυάζει διαφορετικά είδη διασταυρώσεων (σηματοδοτημένα ή μη) και συνδέσμους. Αυτό καθιστά την προσομοίωση αρκετά περίπλοκη και ο αριθμός των ολοκληρωμένων αναλύσεων εργαλείων δικτύου προσομοίωσης είναι αρκετά μικρός σε σύγκριση με τον αριθμό των προγραμμάτων για απομονωμένες διασταυρώσεις και τμήματα δρόμων. Το πιο γνωστό πακέτο σε αυτόν τον τομέα είναι πιθανώς το αμερικανικό NETSIM από τη δεκαετία του 1970.

Η προσομοίωση του συστήματος ελέγχου ως μέρος της λειτουργίας της κυκλοφορίας γίνεται όλο και πιο σημαντική με την ευρεία συνεχιζόμενη έρευνα στην τηλεματική μεταφορών. Στο μέλλον όλο και περισσότερα συστήματα προσομοίωσης θα ενσωματώνονται στο σύστημα ελέγχου για την

πρόβλεψη της κατάστασης της κυκλοφοριακής ροής και των επιπτώσεων των εναλλακτικών μέτρων ελέγχου. Η προσομοίωση της ταξιδιωτικής ζήτησης θα αυξηθεί γρήγορα. Η προσέγγιση προσομοίωσης θα είναι χρήσιμη όχι μόνο στην ανάλυση της κυκλοφοριακής ροής στις ώρες αιχμής σε αστικές περιοχές με συμφόρηση, αλλά και στον σχεδιασμό ειδικών υπηρεσιών μεταφοράς χαμηλής ζήτησης, όπως οι δημόσιες συγκοινωνίες που ανταποκρίνονται στη ζήτηση.

Οι Suri et al. (1995) περιγράφουν ένα μειονέκτημα πολλών μοντέλων κυκλοφοριακής συμφόρησης, το οποίο είναι η έλλειψη προσοχής, όταν μελετούν μόνο συστήματα χρόνου. Με βάση μελέτες προσομοίωσης που διεξήχθησαν για αυτό το ερευνητικό σύστημα μπορεί να απαιτηθούν αρκετές εκατοντάδες ώρες για να φτάσουν σε διαστήματα εμπιστοσύνης ενός ή δύο λεπτών για μέσο χρόνο αναμονής.

Οι Barath και Todd (1999) αναπτύσσουν ένα μοντέλο προσομοίωσης βασισμένο στην κυκλοφοριακή συμφόρηση, για να αναλύσουν την απόδοση συστημάτων κοινής χρήσης αυτοκινήτων στο Παλμ Σπρινγκς της Καλιφόρνια με έξι σταθμούς. Εντοπίστηκαν πολλά πλεονεκτήματα στο σύστημα αυτό, όπως η χρήση λιγότερων οχημάτων για την εξυπηρέτηση ταξιδιών, τα οποία εφόσον είναι ηλεκτρικά προσφέρουν μείωση των ρύπων στο περιβάλλον. Επίσης, το σύστημα αυτό αποδείχθηκε πως θα μπορούσε να είναι άκρως ανταγωνιστικό με τα συνηθισμένα μέσα μαζικής μεταφοράς ακόμη και οικονομικά.

#### **4.5.5. Σύστημα πληροφοριών καθοδήγησης στάθμευσης (PGI).**

Το σύστημα πληροφοριών καθοδήγησης στάθμευσης έχει χρησιμοποιηθεί συνήθως ως μια νέα και αποτελεσματική λύση για την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος στάθμευσης. Το σύστημα λειτουργεί με βάση το συνδυασμό διαφόρων τεχνολογιών παρακολούθησης της κυκλοφορίας και επικοινωνίας και συμβάλλει στην αφαίρεση του χρόνου αναζήτησης στάθμευσης με τη διάδοση δυναμικών πληροφοριών στάθμευσης στους χρήστες. Η πρώτη εφαρμογή του συστήματος έγινε στο Άαχεν της Γερμανίας στις αρχές της δεκαετίας του 1970 με βάση την εμφάνιση πληροφοριών στάθμευσης με μεταβλητά σήματα μηνυμάτων (VMS). Ωστόσο, μέχρι τώρα, αυτός ο τύπος ήταν η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή συστήματος PGI. Το σύστημα πληροφοριών στάθμευσης οχημάτων έχει αναπτυχθεί σημαντικά από τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Πολλές μελέτες έχουν αξιολογήσει τα συστήματα καθοδήγησης στάθμευσης στη διαδικασία αναζήτησης στάθμευσης.

Οι Thompson et al. (2001) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό πρόγραμμα βασισμένο σε απλό γενετικό αλγόριθμο για να προσδιορίσουν τη βέλτιστη εμφάνιση σημείων πληροφοριών καθοδήγησης

στάθμευσης, για να ελαχιστοποιήσουν τα μήκη της κυκλοφοριακής συμφόρησης και τα χιλιόμετρα στα οποία εκτείνονταν οχήματα.

Οι οικονομικές δαπάνες λόγω ατυχημάτων μελετήθηκαν από τους Peden και Sminkey (2004), που είναι μόνο η κορυφή του παγόβουνου. Για όλους αυτούς που σκοτώθηκαν, τραυματίστηκαν ή είχαν αναπηρία από τροχαίο δυστύχημα, υπάρχουν αμέτρητοι άλλοι που έχουν πληγεί σοβαρά και πολλές οικογένειες οδηγούνται βαθύτερα στη φτώχεια από τα έξοδα παρατεταμένης ιατρικής περίθαλψης, την απώλεια οικογενειακού εισοδήματος ή το πρόσθετο βάρος της φροντίδας των ατόμων με ειδικές ανάγκες.

Ο Wedagama (2010) έκανε μια μελέτη για να διερευνήσει την επίδραση παραγόντων που σχετίζονται με τροχαία θανατηφόρα ατυχήματα, και συγκεκριμένα ατυχήματα με μοτοσικλέτες στην πόλη Ντενπασάρ κατά την περίοδο 2006-2008, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης. Η μελέτη διαπίστωσε, ότι οι πιθανότητες ο θάνατος που προήλθε από σύγκρουση με πεζούς και από ατυχήματα ορθής γωνίας ήταν αντίστοιχα περίπου 0,44 και 0,40 πιο χαμηλές από ότι με σύγκρουση με άλλα οχήματα ή ατυχήματα λόγω άλλων παραγόντων. Αντίθετα, οι πιθανότητες ότι ένα ατύχημα με μοτοσικλέτα θα είναι θανατηφόρο λόγω σύγκρουσης με βαριά και ελαφριά οχήματα ήταν 1,67 φορές πιο πιθανό από ό, τι με άλλες μοτοσικλέτες. Η σύγκρουση με τους πεζούς και τα ατυχήματα ορθής γωνίας στα βαριά και ελαφριά οχήματα αντιστοιχούσαν στο 31%, το 29% και το 63% αντίστοιχα των θανατηφόρων ατυχημάτων μοτοσικλετών.

Οι Shin and Jun (2014) έχουν αναπτύξει έναν έξυπνο αλγόριθμο καθοδήγησης στάθμευσης, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς παράγοντες για την ιδανικότερη εγκατάσταση στάθμευσης, όπως την απόσταση οδήγησης μέχρι τον χώρο στάθμευσης υπό καθοδήγηση, την απόσταση με τα πόδια από τον χώρο στάθμευσης στον τελικό προορισμό και το κόστος στάθμευσης. Ο στόχος ήταν να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση των χωρικών πόρων της πόλης και να μειωθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση λόγω της αναζήτησης στάθμευσης.

Οι Astraea και Glante (1995) παρουσιάζουν μια μερική εξήγηση αυτών των επιχειρημάτων :*«Η μελέτη της κυκλοφοριακής ροής που κινείται μέσω ενός σημείου συμφόρησης με μια μικροσκοπική μεθοδολογία ισοδυναμεί με τη μελέτη ενός συστήματος τυχαίας κυκλοφοριακής συμφόρησης με υδροδυναμική ντετερμινιστική αναλογία.»*

Οι Schnell et al. (2001) δείχνουν μια σύγκριση μεταξύ μοντέλων προσομοίωσης με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που λήφθηκαν σε 4 ζώνες εργασίας σε αυτοκινητόδρομους πολλών λωρίδων στο Οχάιο. Σε αυτή την έρευνα το ντετερμινιστικό μακροσκοπικό μοντέλο QUEWZ92 δείχνει καλύτερα αποτελέσματα από τα μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης. Πιο επιβεβαιωμένα

λογισμικά όπως το Paramics, το Aim SUN και το VISSIM μπορούν, στην πραγματικότητα, να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των επιπτώσεων των ζωνών εργασίας στη ροή της κυκλοφορίας.

Ο Chang et.al. (2012) παρουσίασε μια μεθοδολογία βασισμένη σε ακριβή μέτρα δεδομένων κίνησης για τον υπολογισμό των καθυστερήσεων. Αυτό το άρθρο προτείνει ότι για να εκτιμηθεί με ακρίβεια ο αντίκτυπος της συμφόρησης λόγω των ζωνών εργασίας, αναπόφευκτα απαιτείται ειδική εκτίμηση για κάθε ζώνη εργασίας. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται ένα μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης που βαθμονομείται με ακρίβεια με μια πειραματική διαδικασία τοπικής επισκεψιμότητας. Η έρευνα θα μπορούσε να είναι ενδιαφέρουσα και για τους επαγγελματίες, καθώς δεν ήταν δυνατόν να βρεθεί κάποιο άλλο πρόσφατο έγγραφο στη βιβλιογραφία που να απεικονίζει ένα μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε ειδικά για ζώνες εργασίας αυτοκινητόδρομων.

Οι Edara και Cottrell (2007) παρουσίασαν μια πρακτική για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κυκλοφορίας στις ζώνες εργασίας, υπογράμμισαν τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες των μικροσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης στη μοντελοποίηση σε περιοχές με ζώνες εργασίας και στην εκτίμηση των επιπτώσεων στην κυκλοφορία. Ένα καλά βαθμονομημένο μοντέλο μικροσκοπικής προσομοίωσης μπορεί να παρέχει μια καλή εκτίμηση της καθυστέρησης των χρηστών σε πολλές συνθήκες κυκλοφορίας, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις του ποσοστού βαρέων οχημάτων και άλλες διαφορές μεταξύ του οχήματος και του τρόπου οδήγησης. Το προτεινόμενο μοντέλο που χρησιμοποιείται για ανάλυση κυκλοφορίας παρουσία ζωνών εργασίας αναπαράγει τις κινήσεις του οχήματος σε εργοτάξια αυτοκινητοδρόμων που διακρίνονται μεταξύ βαρέων και ελαφρών οχημάτων και επιτρέπει την αξιολόγηση των χρόνων άφιξης, των ιδανικών χρόνων ταξιδιού, των καθυστερήσεων και των ταχυτήτων. Οι τεχνικές προσομοίωσης είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό του μήκους και της βέλτιστης διαμόρφωσης της ζώνης εργασίας λαμβάνοντας υπόψη τις καθυστερήσεις των χρηστών .

Ο Noland (2013) παρέχει μια πλήρη ανασκόπηση της ασφάλειας σε συνδιασμό με την κινητικότητα. Η σχετική ασφάλεια του ταξιδιού ή οποιουδήποτε δεδομένου τρόπου κίνησης, είναι απλώς ένα άλλο χαρακτηριστικό που οι άνθρωποι λαμβάνουν υπόψη για την επιλογή τους. Μια βασική αντιστάθμιση είναι ο σχετικός χρόνος που αφιερώνεται σε ένα ταξίδι έναντι της ασφάλειας αυτού του ταξιδιού. Οι ταχύτερες ταχύτητες είναι πιο ριψοκίνδυνες, αλλά μειώνουν το χρόνο ταξιδιού. Ένας πεζός που επιδιώκει να διασχίσει έναν πολυσύχναστο δρόμο όταν πλησιάζει η κίνηση επιδιώκει απλώς να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο ταξιδιού που σχετίζεται με το ταξίδι του.

Οι Schonfeld και Chien, (1999) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό και τη βελτιστοποίηση του μήκους των ζωνών εργασίας των αυτοκινητοδρόμων στις οποίες, μια λωρίδα

ανά κατεύθυνση είναι κλειστή για να εκτελεί εργασίες συντήρησης. Για την αξιολόγηση των καθυστερήσεων που προκλήθηκαν από το κλείσιμο εφαρμόστηκε η ντετερμινιστική θεωρία των ουρών. Το βέλτιστο μήκος των ζωνών εργασίας καθορίστηκε ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος.

Οι E. Narragon, M. Dessouky και R. DeVor, (1974) συζητούν τη διάκριση τιμών μεταξύ των θέσεων στάθμευσης που είναι επίσης μια κοινή λύση που έχει διερευνηθεί στη βιβλιογραφία. Η αύξηση της τιμής στάθμευσης αναγκάζει κάθε άτομο να σταθμεύει για μικρότερο χρονικό διάστημα, επιτρέπει σε περισσότερα άτομα να χρησιμοποιούν θέσεις στάθμευσης κάθε μέρα, και έτσι μπορεί να αυξήσει την κίνηση. Για τον ίδιο λόγο, οι καταναλωτές συνήθως προτιμούν τη δωρεάν στάθμευση.

Οι R. Arnott and J. Rowse, (1999) λάβανε υπόψη τον πολυτροπικό και περίπλοκο χαρακτήρα της λειτουργίας των μεταφορών στις μητροπόλεις. Η σωστή λειτουργία ενός συστήματος μεταφορών συνδέεται άμεσα με τους χώρους στάθμευσης. Η έρευνα αυτή διεξήχθη στην Τζέντα της Σαουδικής Αραβίας, πόλη η οποία αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα με τη στάθμευση (νόμιμη και παράνομη). Κεντρικό στοιχείο της έρευνας είναι η εκτίμηση της προέλευσης του ταξιδιού και των προορισμών και η βαθμονόμηση ενός μοντέλου επιλογής χώρου στάθμευσης. Μια ανάλυση προσομοίωσης πολλαπλών οχημάτων για σκοπούς σχεδιασμού γίνεται κρίσιμη στην ικανότητα να προβλέψουμε πώς οι πολίτες που κάποτε στάθμευαν μέσα στον πυρήνα της μητρόπολης επιλέγουν άλλους κοντινούς εναλλακτικούς χώρους στάθμευσης.

Οι Florian και Scheele (1997) ανέπτυξαν τα έργα επέκτασης υποδομής Parallel to Highway μεγάλης κλίμακας τη δεκαετία του 1970. Η ανάγκη σχεδιασμού της υποδομής των δικτύων διαμετακόμισης προέκυψε ως μέρος του αστικού πλαισίου μοντελοποίησης και σχεδιασμού. Η αξιολόγηση των επιπτώσεων αυτών των επενδύσεων έπεισε τους ερευνητές να αναπτύξουν περαιτέρω διαδικασίες εκχώρησης διαμετακόμισης που θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο μοντέλων σχεδιασμού δικτύου μεταφορών και στο πλαίσιο ισορροπίας πολυτροπικών δικτύων. Σε όλες τις προαναφερθείσες μελέτες, το πρόβλημα αναχώρησης διέλευσης αντιμετωπίστηκε ως πρόβλημα επιλογής διαδρομής όπου οι επιβάτες υποτίθεται ότι περιμένουν στις στάσεις και οι διαδικασίες ανάθεσης διέλευσης αφορούσαν μόνο την απόφαση επιβίβασης. Οι επιλογές ώρας και αναχώρησης δεν συμπεριλήφθηκαν στη διαδικασία ανάθεσης. Οι διαδικασίες ανάθεσης δεν συνυπολογίζουν τους περιορισμούς χωρητικότητας και τις επιπτώσεις συμφόρησης στα στοιχεία εκτός χρόνου και εντός του οχήματος. Αυτό ήταν εύλογα δικαιολογημένο, καθώς η κυκλοφοριακή συμφόρηση δεν παρατηρήθηκε ευρέως. Μια προσπάθεια μοντελοποίησης των επιπτώσεων συμφόρησης στα δίκτυα

διέλευσης παρουσιάστηκε από τους Last and Leak (1976), το μοντέλο είναι το TRANSEPT, αλλά ισχύει μόνο για πολύ ειδικά ακτινικά δίκτυα που δεν είναι κοινές πραγματικές εφαρμογές.

Οι Spriess και Florian (1989) παρουσίασαν ένα γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού και έναν αλγόριθμο λύσεων για το πρόβλημα ανάθεσης διέλευσης, επεκτείνοντας τη δουλειά που πραγματοποίησαν οι Chriqui και Robillard (1975) από ένα απλό δίκτυο διαμετακόμισης ενός προορισμού σε γενικές υπηρεσίες διαμετακόμισης. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως προσέγγιση βασισμένη στην πρόοδο, η προσέγγιση βάσει συχνότητας, η προσέγγιση βάσει γραμμής ή πιο συχνά προσέγγιση βάσει στρατηγικής.

Οι Wahba και Shalaby (2005) παρουσίασαν τους λόγους της πολυπλοκότητας των κοινών γραμμών: Το πρόβλημα των κοινών γραμμών είναι αυτό όπου πολλές γραμμές με τις ίδιες ή διαφορετικές συχνότητες εξυπηρετούν το ίδιο τμήμα δρόμου. Οι επιβάτες, που περιμένουν στη στάση, αντιμετωπίζουν διάφορες επιλογές ταξιδιού μεταξύ προέλευσης και προορισμού όπου κάθε γραμμή χαρακτηρίζεται από διαφορετικά μέτρα συχνότητας και απόδοσης. Οι παράλληλες γραμμές σε παράλληλους δρόμους είναι συνήθη χαρακτηριστικά των δικτύων δημόσιων μεταφορών. Αυτό αντιπροσωπεύει μια επέκταση του προβλήματος των κοινών γραμμών όταν οι παράλληλοι δρόμοι είναι κοντά. Σε αντίθεση με τους οδηγούς αυτοκινήτων που είναι ελεύθεροι να αναχωρήσουν ανά πάσα στιγμή και ελεύθεροι να επιλέξουν μια διαδρομή, οι αναβάτες διέλευσης (οι αναβάτες στα μέσα μαζικής μεταφοράς) περιορίζονται έντονα από το χρονοδιάγραμμα του δικτύου και τη δομή σταθερής διαδρομής. Η παροχή υπηρεσίας διαμετακόμισης είναι ασυνεχής, είναι διαθέσιμη σε συγκεκριμένες ώρες. Η συνιστώσα χρόνου εκτός οχήματος είναι σημαντική για τη διαδικασία εκχώρησης διέλευσης και δεν είναι απλή η συσχέτιση με τη συνιστώσα χρόνου εντός οχήματος. Οι επιβάτες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα σύνδεσης μεταφοράς, το οποίο περιλαμβάνει

- Χρονικούς και χωρικούς περιορισμούς
- Οι επιλογές ταξιδιού στα δίκτυα δημόσιων μεταφορών εξαρτώνται από το ίδιο το δίκτυο
- Δομή και απόδοση.
- Η ύπαρξη υπο-τρόπων διέλευσης περιπλέκει τη διαδικασία εκχώρησης διέλευσης και δημιουργεί την πολυπλοκότητα της αλυσίδας τρόπου διέλευσης.

Οι Yang και Lam (2006) πρότειναν ένα μοντέλο εκχώρησης διαμετακόμισης βάσει αξιοπιστίας τύπου probit για κορεσμένα δίκτυα διέλευσης με αναξιόπιστες υπηρεσίες. Η αξιοπιστία της υπηρεσίας διαμετακόμισης και η συμπεριφορά επιλογής διαδρομής επιβατών, αποτυπώνονται σε μια νέα αναπτυξιακή λειτουργία. Τα μέτρα αξιοπιστίας σχετίζονται με το χρόνο εντός του οχήματος σε συνδέσεις διέλευσης που εξαρτώνται από αναξιόπιστες συνθήκες κυκλοφορίας για υπηρεσίες



λεωφορείων στο οδικό δίκτυο. Αυτό επηρεάζει επίσης τους χρόνους αναμονής των επιβατών στις στάσεις και τις καθυστερήσεις που σχετίζονται με τη χωρητικότητα. Δείχνουν ότι η παραδοσιακή στοχαστική εκχώρηση ισορροπίας χρήστη είναι μια ειδική περίπτωση του προτεινόμενου μοντέλου όταν δεν υπάρχει παραλλαγή στους χρόνους ταξιδιού για την υπηρεσία διαμετακόμισης .

Οι Gentile et al. (2005) πρότειναν ένα γενικό πλαίσιο για τον προσδιορισμό της πιθανότητας επιβίβασης σε κάθε γραμμή που είναι διαθέσιμη σε μία στάση, όταν παρέχονται στους επιβάτες διαδικτυακές πληροφορίες σχετικά με τους χρόνους αναμονής των λεωφορείων. Χρησιμοποίησαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την επιλογή διαδρομής, όπου οι επιβάτες χρησιμοποιούν διαδικτυακές πληροφορίες σχετικά με τους χρόνους αναμονής των διαθέσιμων γραμμών, εκτός από τους αναμενόμενους χρόνους ταξιδιού. Επέκτειναν τα αποτελέσματά τους σε γενικές διανομές προόδου (η οικογένεια διανομών Erlang) και έδειξαν ότι η περίπτωση κοινών γραμμών χωρίς παροχή πληροφοριών (π.χ. εκθετική κατανομή για επικεφαλίδες) είναι μια ειδική περίπτωση του προτεινόμενου μοντέλου. Χρησιμοποιώντας ένα δοκιμαστικό δίκτυο, έδειξαν ότι οι διαδικτυακές πληροφορίες είχαν σημαντικό αντίκτυπο στα φορτία διαδρομής. Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα ήταν ότι ενώ ο συνολικός αναμενόμενος χρόνος ταξιδιού μειώθηκε με την παροχή πληροφοριών στις στάσεις, ο τελικός χρόνος αναμονής αυξήθηκε καθώς οι επιβάτες είναι πιο πιθανό να δεχτούν μεγαλύτερους χρόνους αναμονής για επιβίβαση σε μια ταχύτερη διαδρομή. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν ορατά με υψηλή κανονικότητα υπηρεσίας .

Οι Kaspi et al. (2014) πρότειναν την εφαρμογή κρατήσεων θέσεων στάθμευσης σε μονόδρομα συστήματα κοινής χρήσης οχημάτων προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, μελέτησαν μια πλήρη πολιτική κρατήσεων στάθμευσης (CPR) στην οποία όλοι οι χρήστες υποχρεούνται, κατά την ενοικίαση ενός οχήματος, να κάνουν κράτηση θέσης στάθμευσης στο σταθμό προορισμού τους. Εάν υπάρχει κενή θέση στάθμευσης, θα δεσμευτεί για τον χρήστη και δεν θα είναι διαθέσιμη για άλλους χρήστες από τη στιγμή που ξεκινά το ενοίκιο έως ότου ο χρήστης επιστρέψει το όχημα στον δεσμευμένο χώρο στάθμευσης. Εάν κατά την ενοικίαση οχήματος δεν υπάρχουν κενές θέσεις στάθμευσης στον προορισμό, η συναλλαγή ενοικίασης θα απορριφθεί. Ο χρήστης μπορεί στη συνέχεια να προσπαθήσει να κάνει κράτηση σε άλλο σταθμό κοντά στον προορισμό του ή μπορεί να αποφασίσει να χρησιμοποιήσει έναν εναλλακτικό τρόπο μεταφοράς. Σύμφωνα με την πολιτική CPR, ένας δεσμευμένος χώρος στάθμευσης παραμένει άδειος έως ότου ο χρήστης επιστρέψει το όχημά του. Εν τω μεταξύ, άλλοι χρήστες δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτόν τον χώρο, δηλαδή είναι αποκλεισμένος. Η αντιστάθμιση στην εφαρμογή μιας τέτοιας πολιτικής είναι ότι ενώ ορισμένοι χρήστες έχουν εγγύηση για μια ιδανική υπηρεσία (δεδομένου ότι σίγουρα θα είναι σε θέση να επιστρέψουν το όχημά τους στον επιθυμητό προορισμό

τους) άλλοι χρήστες ενδέχεται να λάβουν φτωχότερη εξυπηρέτηση λόγω του αποκλεισμού των θέσεων στάθμευσης .

Στο Kasri et al. (2014), η πολιτική CPR συγκρίθηκε με τη βασική πολιτική (NR), χρησιμοποιώντας τόσο ένα μοντέλο Markovian με απλοποίηση των υποθέσεων όσο και ένα βελτιωμένο μοντέλο προσομοίωσης διακριτών συμβάντων. Και οι δύο πολιτικές είναι πλήρεις υπό την έννοια ότι όλοι οι χρήστες του συστήματος πρέπει να ακολουθούν τον ίδιο κανονισμό. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η πολιτική CPR ξεπερνά την πολιτική NR σε σχέση με διάφορα μέτρα απόδοσης με γνώμονα τις υπηρεσίες

## Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Η βιβλιογραφία για τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής και κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι τεράστια, αλλά δεν υπάρχει ακόμα ένα μοντέλο που να καταγράφει τη σύγχρονη συμπεριφορά της κυκλοφορίας. Σε αυτή τη διπλωματική μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης κρίνουμε ως αρκετά αξιόπιστα δύο μοντέλα ουράς που καταγράφουν την «συμπεριφορά» της κυκλοφορίας στον αυτοκινητόδρομο: την ουρά κατωφλίου δύο σταδίων  $M / M / 1$  και την ουρά κατωφλίου ανάδρασης  $M / M / 1$  τεσσάρων σταδίων. Και τα δύο μοντέλα ουράς έχουν επικυρωθεί από μια σειρά εμπειρικών δεδομένων κυκλοφορίας σε επιστημονικά άρθρα. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και τα δύο συστήματα αναμονής καταγράφουν το θεμελιώδες διάγραμμα της σύγχρονης αυξημένης κινητικότητας στους δρόμους, η οποία προκαλεί την κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι η προσομοίωση υπερτερεί της συλλογής πραγματικών δεδομένων, κυρίως στο κόστος και την ταχύτητα υπολογισμών. Ένας προσομοιωτής σου δίνει τη δυνατότητα επανάληψης μιας οποιασδήποτε διαδικασίας, και συνήθως είναι πιο γρήγορος και οικονομικός και έχει καλύτερο επίπεδο λεπτομέρειας. Ένα ακόμη θετικό της προσομοίωσης είναι η δυνατότητα απεικόνισης.

Μέσα από την παρούσα ανασκόπηση της βιβλιογραφίας διαφαίνονται αρκετές ελλείψεις στη διαδικασία βαθμονόμησης ενός μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικά στοιχεία. Οι περισσότερες προσεγγίσεις βαθμονομούν τη ζήτηση και την προσφορά ως δύο παράγοντες ανεξάρτητους μεταξύ τους, αδιαφορώντας για τις συνέπειες των αλληλεπιδράσεών τους. Οι παράμετροι της προσφοράς βαθμονομούνται συνήθως πρώτα. Οι παράμετροι της ζήτησης εν συνεχεία εκτιμώνται με σταθερές τις παραμέτρους προσφοράς. Οι διαδεδομένες πρακτικές βασίζονται σε προσεγγίσεις ρύθμισης των παραμέτρων, οι οποίες εμπεριέχουν την έννοια της υποκειμενικότητας. Επιπλέον, αυτές οι μελέτες συνήθως εκτιμούν ένα μικρό υποσύνολο των παραμέτρων, το οποίο κρίνεται ικανό να εξηγήσει φαινόμενα που παρατηρούνται συγκεκριμένες ώρες της ημέρας και σε πολύ συγκεκριμένα οδικά δίκτυα.

Στις περισσότερες από τις υπάρχουσες μεθόδους βαθμονόμησης της ζήτησης, οι ροές ζήτησης προέλευσης-προορισμού και οι παράμετροι επιλογής διαδρομής υπολογίζονται διαδοχικά. Οι εκτιμήσεις ζήτησης προέλευσης και προορισμού αγνοούν μερικές φορές τα φαινόμενα συμφόρησης στις επιλογές διαδρομής και τους χρόνους μετακίνησης. Το πρόβλημα σταθερού σημείου εκτίμησης προσέλευσης προορισμού λύνεται συχνά με τη χρήση μιας προσέγγισης δύο επιπέδων, με ένα σταθερό πίνακα κατανομής σε κάθε βήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Σχετικά με τη βαθμονόμηση των παραμέτρων προσφοράς, οι χωρητικότητες προσδιορίζονται γενικότερα μέσα από δεδομένα αισθητήρων και από οδηγίες από σχετικά εγχειρίδια, όπως το Αμερικανικό Highway Capacity Manual. Οι εξισώσεις ταχύτητας – πυκνότητας προσδιορίζονται τοπικά, μέσα από την προσαρμογή των δεδομένων από τους αισθητήρες. Οι περισσότερες μελέτες δεν λαμβάνουν υπόψη τις συνέπειες της ποικιλομορφίας στις μετρήσεις κυκλοφορίας και στη ζήτηση τόσο της προσέλευσης όσο και του προορισμού. Η ποικιλομορφία έχει να κάνει με τις συνθήκες δικτύου, τα διάφορα γεγονότα και ατυχήματα, τον καιρό, την εποχικότητα κ.τ.λ. Μια ανασκόπηση των υφιστάμενων μεθόδων γενικευμένης βαθμονόμησης μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω κύρια σημεία:

- Η ταυτόχρονη βαθμονόμηση όλων των παραμέτρων ζήτησης και προσφοράς παρέχει τις πιο ολοκληρωμένες εκτιμήσεις των δεδομένων ενός προσομοιωτή.
- Η πιο διαδεδομένη τεχνική για τη συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας είναι η χρήση αισθητήρων. Παρά το ότι αυτή η μεθοδολογία δίνει χρονικά εξαρτημένη πληροφορία, κάτι απόλυτα επιθυμητό για τη διαδικασία της βαθμονόμησης, δεν παράγεται επιπλέον χρήσιμη πληροφορία σχετικά με την κίνηση μεμονωμένων οχημάτων. Χρησιμοποιώντας συνδυασμένα δεδομένα από διάφορες πηγές, αυξάνεται η τελική ακρίβεια της βαθμονόμησης.
- Σε σύγκριση με τις χειροκίνητες τεχνικές αναζήτησης, η εφαρμογή των αυτοματοποιημένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης (π.χ. αλγόριθμος simplex) για τη βαθμονόμηση των μοντέλων προσομοίωσης είναι πιο αποτελεσματική και λιγότερο δαπανηρή. Όταν ένας προσομοιωτής είναι στοχαστικός, το πρόβλημα βαθμονόμησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τον εγγενή θόρυβο στα τελικά αποτελέσματα.
- Η εκτίμηση των χρόνων μετακίνησης και των ροών ζήτησης προέλευσης-προορισμού σε μια διαδικασία ή η εκτίμηση των ροών αυτών, χρησιμοποιώντας πληροφορίες χρόνων ταξιδιού ως πρόσθετη μέτρηση, βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των εκτιμήσεων. Η ένταξη των χρόνων μετακίνησης ως πληροφορία στη βαθμονόμηση του πίνακα προέλευσης-προορισμού επιτρέπει σε ένα μοντέλο προσομοίωσης την ορθότερη αναπαραγωγή των υφιστάμενων παρατηρούμενων συνθηκών κυκλοφορίας.
- Η ταυτόχρονη εκτίμηση των χρονικά εξαρτώμενων πινάκων ζήτησης προέλευσης-προορισμού σε πολλαπλά χρονικά διαστήματα βοηθά στην αποτύπωση των επιρροών μεγάλων διαδρομών. Η παραδοσιακή διαδοχική μέθοδος αγνοεί τις συνεισφορές των ροών αναχώρησης στις μετρήσεις των μελλοντικών χρονικών διαστημάτων.

- Η βαθμονόμηση των παραμέτρων προσφοράς βελτιώνεται σημαντικά με την καταγραφή των χρονικών και χωρικών συσχετίσεων μεταξύ των διαφόρων μετρήσεων.

Επιπρόσθετα με βάση όλες τις παραπάνω μελέτες εντοπίστηκε ότι μια καλύτερη ρύθμιση του προβλήματος της κυκλοφοριακής συμφόρησης μπορεί να επιτευχθεί όσον αφορά τις σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις με αλλαγή του χρονισμού των φωτεινών σηματοδότην, όπως επίσης και με την ενημέρωση των χρηστών μίας οδού για εναλλακτική διαδρομή.

## Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

1. Levinson HS, Falcocchio JC (2011) Urban development and traffic congestion. In: Proceedings of first transportation and development institute (TDI) congress. American Society of Civil Engineers, Chicago, pp 948–956
2. Levinson HS, Lomax TJ, Turner S (1997) Traffic congestion—past present, future. In: Proceedings traffic congestion and traffic safety in the 21st century, Chicago, 8–11 June 1997
3. Anderson JM (1941) *Fares, Please!* D. Appleton Century Company, New York
4. Koltnow P (1970) *Changes in mobility in American Cities*. Highway Users Federation for Safety and Mobility, Washington DC
5. Wilbur Smith and Associates (1966) *Transportation and parking for tomorrow's cities*. Wilbur Smith and Associates, New Haven
6. City of Los Angeles Traffic Volumes. 1983 and 1993
7. New York City Department of Transportation Data
8. Garreau J (1991) *Edge City*. s1 Anchor Books, New York
9. Federal Highway Administration, General Accounting Office (1989) *Statistics reported in traffic congestion trends, measures, and effects*, Washington, DC
10. Lomax T, Bullard D, Hanks J (1988) *The impact of declining mobility in major Texas and other US cities*. Texas Transportation Institute, College Station
11. INRIX (2011) *INRIX National Traffic Scorecard—2010 annual report: back to the road to Gridlock*
12. McClintock M (1925) *Street traffic control*. McGraw-Hill Book Company Inc, New York
13. Altshuler A, Womack JP, Pucher JR (1979) *The urban transportation system—politics and policy innovations*. The MIT Press, Cambridge, MA
14. Homburger WS, Hall JW, Loutzenhouser HC, Reilly W (1996) *Fundamentals in traffic engineering*. Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley, California
15. Lisco T, Draft Memorandum to Palewonsky L (1999) RE: AM peak period traffic volumes travel times and speeds on interstate 93. Between Medford and Boston, s.n., 1992–1994 and 1998–1999
16. Lomax T, Turner S, Shunk G, Levonson HS, Pratt RH, Douglas B (1997) NCHRP 398: quantifying
17. Lomax T, Turner S, Shunk G, Levonson HS, Pratt RH, Douglas B (1997) NCHRP 398: quantifying congestion, vol 2. Transportation Research Board, National Research Council,

- Washington, DC. User's guide
16. Lomax T, Turner S, Shunk G, Levinson HS, Pratt RH, Bay P, Douglas B (1997) NCHRP report 398: quantifying congestion, vol 1. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. Final report
  17. New York Metropolitan Transportation Council (2009) Congestion management process—2009 status report. New York, s.n.
  18. Lomax T, Schrank D, Turner S, Geng L, Li Y, Koncz N (2010) 2010 urban mobility report. Texas Transportation Institute, University Transportation Center for Mobility, s.l.
  19. Cambridge Systematics, Dowling Associates, System Metrics Group (2008) NCHRP report 618: cost effective performance measures for travel time delay, variation, and reliability. Transportation Research Board, Washington, DC
  20. INRIX (2011) National traffic scorecard—2010 Annual Report. pp 163–174
  21. City of Chicago study and recommendations for improving traffic movement in the central business district (1950) The Mayor's Traffic Survey Committee for the Central business District, s.l.
  22. La Hood R (2009) Secretary of transportation. Senate Committee on Banking, Housing and Urban Affairs, Washington, DC
  23. White JB (2011) American idle: on the road. Wall Street J : s.n.
  24. Schrank D, Lomax T, Eisele B (2011) TTI's 2011 urban mobility report—powered by INRIX traffic data. University Transportation Center for Mobility, Texas Transportation Institute, s.l.
  25. National Committee on Urban Transportation (1958) Better transportation for your city—a guide to the factual development of urban transportation plans administration services. National Committee Urban Transportation, Chicago
  26. HCM (2010) Highway capacity manual. Transportation Research Board, Washington DC
  27. Washington State Department of Transportation. The 2011 Congestion Report, 23 Aug 2011
  28. Transport Canada (2006)
  29. Gómez-Ibáñez JA, Meyer JR(1981) Autos, transit, and cities: a twentieth century fund report. Harvard University Press, Cambridge
  30. Transportation Research Board, National Academies (2010) Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC

31. Mendenhall W, Wackerly DD, Scheaffer RL (1990) Mathematical statistics with applications 4th edn. PWS-KENT, Boston, MA
32. FHWA traffic detector handbook, 3rd edn, Publication no. FHWA-HRT-06-108, Oct 2006.
33. Gerlough DL, Huber MJ (1975) Traffic flow theory: a monograph, TRB special report 165. National Research Council, Washington, DC
34. Daganzo CF (1997) Fundamentals of transportation and traffic operations. Pergamon, Oxford
35. Edie LC (1963) Discussion of traffic stream measurements and definitions. In: Almond J (ed) Proceedings of the second international symposium on the theory of traffic flow, OECD, Paris, pp 139–154
36. Greenshields B (1935) A study of Traffic Capacity, Highway Research Board. In: Proceedings of the annual meeting of the Highway Research Board, vol 14, pp 448–477
37. Greenberg H (1959) An analysis of traffic flow. Oper Res 7:78–85
38. Underwood RT (1961) Speed, volume, and density relationships: quality and theory of traffic flow. Yale Bureau of Highway Traffic, New Haven, Connecticut, pp 141–188
39. Pipes LA (1967) Car following models and the fundamental diagram of road traffic. Transp Res 1:21–29
40. Van Aerde M (1995) Single regime speed-flow-density relationship for congested and uncongested highways. Presented at the 74th TRB annual conference, Paper no. 950802, Washington, DC
41. May AD (1990) Traffic flow fundamentals. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
42. Roess RP, Prassas ES, McShane WR (2011) Traffic engineering, 4th edn. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ
43. Sundarapandian, V. (2009). 7. Queueing Theory: Probability, Statistics and Queueing Theory. PHI Learning. ISBN 8120338448
44. Intikhab, QA., Huapu, L., & Shi Y. (2008). Urban Transportation and Equity: A Case Study of Beijing and Karachi. In Transportation Research Part A: Policy and Practice, 42: 1
45. Wane, H.R. (2001). Urban Mobility and Emissions : Towards Accurate Standards for Sub-Saharan Africa. A Research Program and Results on a Sahelian Case: The District of Bamako. At the Session on Air Pollution, Accra, Ghana, April 18-20, 2001.
46. Dimitriou, HT. (1990). Transport Planning for Third World Cities. Editor Routeledge, Chapman and Hall, Inc., 1990. 432 pp. + xxii. ISBN 0-415-00448-9
47. Gross, D. and Harris, C.M. (1985) Fundamentals of Queueing Theory. 2nd Edition, John Wiley, New York



48. Drekić, Steve. (2001). Reducing Delay in Preemptive Repeat Priority Queues. *Operations Research*. 49. 145-156. [10.1287/opre.49.1.145.11186](https://doi.org/10.1287/opre.49.1.145.11186).
49. B. Filipowicz and J. Kwiecień, "Fork-join systems", *ZN AGH Automatics* 7 (3), 707–716 (2000), (in Polish).
50. Dewan, S., H. Mendelson. 1990. User delay cost and internal pricing for a service facility. *Management Sci.* 36:1502–1517.
51. Ibrahim, Rouba, Ward Whitt. 2009. Real-time delay estimation based on delay history. *Manufacturing & Service Operations Management* 11(3) 397–415.
52. Udayabhanu, V, Sunder K. and Kannan S. (2010), Optimizing Capacity Utilization in Queuing Systems: Parallels with the EOQ Model, *California Journal of Operations Management*, Volume 8, Number 1, February 2010 CSU-POM
53. Gurumurthi, S., & Benjaafar, S. (2004). Modeling and analysis of flexible Queueing systems. *Naval Research Logistics*, 51(5), 755-782. <https://doi.org/10.1002/nav.20020>
54. K. V. Krishna Rao, Bhargab Maitra, Prof. P. K. Sikdar and Prof. S. L. Dhingra (1999), Estimation of Traffic and Toll Sensitivity for a Proposed Major Urban Transport Infrastructure A case of BWSL, Mumbai, India Road Congress, Vol 63-1, pp. 195-235.
55. E. Hyon and A. Jean-Marie. Scheduling in a queuing system with impatience and setup costs. Technical Report RR-6881, INRIA, 2009
56. Wells-Parker, Elisabeth & Ceminsky, Jennifer & Hallberg, Victoria & Snow, Ronald & Dunaway, Gregory & Guiling, Shawn & Williams, Marsha & Anderson, Bradley. (2002). An exploratory study of the relationship between road rage and crash experience in a representative sample of US drivers. *Accident; analysis and prevention*. 34. 271-8. [10.1016/S0001-4575\(01\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00021-5).
57. Retting, R. A., Ferguson, S. A., & McCartt, A. T. (2003). A review of evidence-based traffic engineering measures designed to reduce pedestrian-motor vehicle crashes. *American journal of public health*, 93(9), 1456–1463. <https://doi.org/10.2105/ajph.93.9.1456>
58. Chriqui, Claude and Robillard, Pierre, (1975), Common Bus Lines, *Transportation Science*, 9, issue 2, p. 115-121
59. Zhang LJ, Ng WW, Tay SC (2000). "Discrete-event simulation of queuing systems". Published in the Proceedings of the Sixth Youth Science Conference, Ministry of Education, Singapore, pp.1-5.
60. Schwarz, M., Sauer, C., Daduna, H. et al. M/M/1 Queueing systems with inventory. *Queueing Syst* 54, 55–78 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11134-006-8710-5>

61. Tencer, Daniel (2011). Number Of Cars Worldwide Surpasses 1 Billion; Can The World Handle This Many Wheels?, from [http://www.huffingtonpost.ca/2011/08/23/car-population\\_n\\_934291.html](http://www.huffingtonpost.ca/2011/08/23/car-population_n_934291.html)
62. Taylor, MAP. (1999). An Extended Family of Traffic Network Equilibria and its Implications for Land Use and Transport policies. In Meerman, H., Van Der Voode, E., Winkelmans, W. (Eds.), *World Transport Research. Selected Proceedings from the Eight World Conference on Transport Research, Transport Policy*, Elsevier-Pergamon, Oxford, Vol 4; Pp 29-42.
63. Hyden, C. (1987). The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique. Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
64. Quddus, MA., Chao, W., Stephen, GI. (2010). Road Traffic Congestion and Crash Severity: Econometric Analysis Using Ordered Response Models. *Journal of Transportation Engineering* Volume: 136: Issue Number: 5. Pp 424-435, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000044](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000044)
65. Glen, W., Don V., George T. (2003). Measuring Economic Costs of Urban Traffic Congestion to Business. *Transportation Research Record*. Volume: 1839, Issue: 1, Publisher: Trans Res Board, Pages: 98-106 DOI: 10.3141/1839-10
66. Qingyu, L., Zhicai, J., Baofeng, S., Hongfei J. (2007). Method Research on Measuring the External Costs of Urban Traffic Congestion. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. Volume: 7, Issue: 5, Pages: 9-12 DOI: 10.1016/S1570-6672(07)60035-X
67. Intikhab, QA., Huapu, L., & Shi Y. (2008). Urban Transportation and Equity: A Case Study of Beijing and Karachi. In *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42: 1
68. J. Teng and G. N. Rouskas, "A Detailed Analysis' and Performance Comparison of Wavelength Reservation Schemes for Optical Burst Switched Networks", *Photonic Network Communications*, Vol. 9, pp. 311-335, May 2005.
69. Sahoo, P. K.; Rao, S. K.; Kumar, V. M. 1996. A study of traffic flow characteristics on two stretches of national highway No. 5, *Indian Highways* 24(4): 11–17.
70. Mukherjee, S. K.; Rao, S. K.; Raichowdhury, M. L. 1988. Fitting a statistical distribution for headways of approach roads at two street intersections in Calcutta, *Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division* 69: 43–48.
71. Van Woensel, T., R. Creten and N. Vandaele, Managing the environmental externalities of traffic logistics: the issue of emissions, *Production and Operations Management journal*, 2001,

72. Di Febbraro, D. Giglio, N. Sacco, (2002) On applying Petri nets to determine optimal offsets for coordinated traffic light timings Proc. of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2002 (ITSC'02) (2002), pp. 687-706
73. Jim, H.K. and Chang, Z.Y. (1998) An airport passenger terminal simulator: A planning and design tool, *Simulation Practice and Theory*, 6, 387-396.
74. Lämmer, S. & Donner, Reik & Helbing, Dirk. (2008). Anticipative control of switched queuing systems. *Physics of Condensed Matter*. 63. 341-347. 10.1140/epjb/e2007-00346-5.
75. Gendreau, M., Étude approfondie d'un modèle d'équilibre pour l'affectation des passagers dans les réseaux de transport en commun, in *Department d'Informatique et de Recherche Operationnelle* (1984), Université de Montréal: Montreal.
76. Cominetti, Roberto & Correa, Jose & Olver, Neil. (2017). Long Term Behavior of Dynamic Equilibria in Fluid Queuing Networks. 10.1007/978-3-319-59250-3\_14.
77. Amole Bilqis Bolanle , (2011), "Application of Queuing theory to port congestion problem in Nigeria", *European Journal of Business and Management* 3 (8), 2011 www.iiste.org ISSN 2222-1905 (Paper) ISSN 2222-2839
78. Zhang Laifu Joel 1, Wei Jonathan , Tay S. C,(2000), “ Discrete – Event Simulation Of Queuing Systems”, *Proceedings of the Sixth Youth Science Conference, Ministry of Education, Singapore.* (2000)
79. Lam W. H. K., Gao Z. Y., Chan K. S. and Yang H. (1999) A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks. *Transportation Research-B*, 33, 1-18.
80. Abu-Lebdeh, G., & Benekohal, R. F. (2000). Genetic Algorithms for Traffic Signal Control and Queue Management of Oversaturated Two-Way Arterials. *Transportation Research Record*, 1727(1), 61–67. <https://doi.org/10.3141/1727-08>
81. Hur, S. and Ahn, S. (2005). Batch arrival queues with vacations and server setup. *Applied Mathematical Modelling*, 29:1164-1181
82. Pearce, C. (1967). Queues with Moving Average Service Times. *Journal of Applied Probability*, 4(3), 553-570. doi:10.2307/3212221
83. Somuyiwa, A. O., Fadare, S. O., & Ayantoyinbo, B. B. (2015). Analysis of the Cost of Traffic Congestion on Worker's Productivity in a Mega City of a Developing Economy. *International Review of Management and Business Research*.
84. Ogunbodede, E.F (2003) Assessment of Traffic Congestions in Akure (Nigerian) Using GIS Approach : Lessons and Challenges for Urban Substances.

85. Shankar, V & Milton, John & Mannering, Fred. (1997). Modeling accident frequencies as zero-altered probability processes: An empirical inquiry. *Accident; analysis and prevention*. 29. 829-37. 10.1016/S0001-4575(97)00052-3.
86. Fukuda, Tuenjai & Tangpaisalkit, C. & Ishizaka, Tetsuhiro & Sinlapabutra, T. & Fukuda, Atsushi. (2005). Empirical study on identifying potential black spots through public participation approach: A case study of Bangkok. *J. Eastern Asia Soc. Transport. Stud.*. 6. 3683-3696.
87. Lyons, Ronan & Ward, Heather & Brunt, H. & Macey, Steven & Thoreau, Roselle & Bodger, Owen & Woodford, Maralyn. (2008). Using multiple datasets to understand trends in serious road traffic casualties. *Accident analysis and prevention*. 40. 1406-10. 10.1016/j.aap.2008.03.011.
88. R. Kühne, R. Mahnke, J. Hinkel Understanding traffic breakdown: A stochastic approach. *Transportation and Traffic Theory (2007)*, pp. 777-789
89. R. Mahnke, J. Kaupužs, I. Lubashevsky Probabilistic description of traffic flow *Physics Reports*, 408 (1–2) (2005), pp. 1-130
90. Kadiyali L.R., Viswanathan E. and Gupta R.K. (1981). Free Speeds of Vehicles on Indian Roads, Paper 343, *IRC Journal*, Volume 42-3, pp 377-460.
91. Adedayo O.A, Ojo O and Obamiro J.K (2006). *Operations Research in Decision Analysis and Production Management*, Pumark Educational Publishers, Lagos
92. Fararoui F (1989). *Queuing theory and berthing optimization*, PhD thesis Priority Berthing in Congested Ports
93. Russo, A., J. van Ommeren and A. Dimitropoulos (2019), "The Environmental and Welfare Implications of Parking Policies", *OECD Environment Working Papers*, No. 145, OECD Publishing, Paris.
94. Darroch, J.N. (1964). On the traffic light queue, *Ann. Math. Statist.*35: 380-388
95. Leeuwaarden, J. (2006). Delay Analysis for the Fixed-Cycle Traffic-Light Queue. *Transportation Science*. 40. 189-199. 10.1287/trsc.1050.0125.
96. Viti, Francesco & van Zuylen, Henk. (2010). Probabilistic models for queues at fixed control signals. *Transportation Research Part B: Methodological*. 44. 120-135. 10.1016/j.trb.2009.05.001.
97. Flaherty, C.A. (2000). "Regulatory Measures for Traffic Management." *Traffic management and collision investigation*, Mc hall, 450-458.
98. M. Helsinki Road Traffic Management Strategies of the Finnish Transport Agency (2010), pp. 6-12

99. F. Gladys Traffic Management and Transport Demand Management The World Bank Distance Learning Course in Urban Planning (2009), pp. 1-18
100. Rabta, B., 2009, A review of decomposition methods for open queuing methods in Rapid Modeling for Increased Competitiveness: Tools and Mindset, G Reiner, Ed., New York: Springer
101. Meyer, D. (1996). Protest and Political Opportunities. *Annual Review of Sociology*, 30, 125-145. Retrieved August 13, 2020, from [www.jstor.org/stable/29737688](http://www.jstor.org/stable/29737688)
102. Nagurney, Anna & Nagurney, Ladimer. (2010). Sustainable supply chain network design: A multicriteria perspective. *International Journal of Sustainable Engineering*. 3. 189-197. 10.1080/19397038.2010.491562.
103. Barth, M., and M. Todd. 1999. Simulation model performance analysis of a multiple station shared vehicle system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 7(4): 237-259.
104. Peden, M., Sminkey, L., et al., 2004. World Health Organization dedicates World Health Day to road safety. *Inj. Prev.* 10, 67.
105. Wedagama, D.M.P. and Dissanayake, D. (2010b) The Influence of Accident Related Factors on Road Fatalities Considering Bali Province in Indonesia as a Case Study. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 8, 1905 -1917.
106. J. H. Shin and H. B. Jun, "A study on smart parking guidance algorithm," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 44, pp. 299– 317, 2014.
107. Schnell, T., Mohror, J.S., Aktan, F. Evaluation of Traffic Flow Analysis Tools Applied to Work Zones Based on Flow Data Collected in the Field. FHWA Report No. FHWA/HWA-2001/08, Final Report Submitted to the Ohio DOT, May 2001.
108. Edara, P. K. and Cottrell, D. H. Jr. (2007). Estimation of Traffic Impacts at Work Zones: State of Practice. In *Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
109. Noland R (2013) from theory to practice in road safety policy: Understanding risk versus mobility. *Research in Transportation Economics* 43(1): 71 – 84.
110. Schonfeld, P.; Chien, S. Optimal work zone lengths for two-lane highways. *J. Transp. Eng.* 1999, 125, 21–29
111. Narragon, E. A., Dessouky, M. I., & DeVor, R. E. (1974). A probabilistic model for analyzing campus parking policies. *Operations Research*, 22, 1025-1039
112. R. Arnott and J. Rowse, "Modeling Parking", *Journal of Urban Economics* , τoμ. 45, όχι 1, σελ. 97–124, 1999.

113. Last, A. and Leak, S.E (1976) Transept: A bus Model, *Traffic Engineering and Control*, 14, 91-96
114. Spiess H, Florian M (1989) Optimal strategies: a new assignment model for transit networks. *Transp Res B* 23(2):83–102
115. Chriqui, C. and Robillard, P. (1975) Common bus line, *Transportation Science*, 9, 115-121
116. Wahba, M. and A. Shalaby (2005), “A Multi-Agent Learning-Based Approach to the Transit Assignment Problem: A Prototype”, *Transportation Research Record*, 1926:96-105
117. Yang, L. , and Lam, W. H. K. (2006). Probit-type reliability-based transit network assignment. *Transportation Research Record* (1977), 154-163.
118. Gentile, G., Nguyen, S., Pallotino, S., (2005). Route Choice on Transit Networks with Online Information at Stops. *Transportation Science* 29(3), 289-297
119. Kaspi, M., Raviv, T., Tzur, M., (2014): Parking reservation policies in one-way vehicle sharing systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, v62, 35-50.