



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Διδακτορική Διατριβή

**Έλεγχος της Κυκλοφορίας υπό Συνθήκες Δυναμικής Φόρτισης
με Μεθόδους Ελαχιστοποίησης του Ρίσκου**

Ελένη Παπατζίκου

Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ, MSc



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

**Έλεγχος της Κυκλοφορίας υπό Συνθήκες Δυναμικής Φόρτισης
με Μεθόδους Ελαχιστοποίησης του Ρίσκου**

Διδακτορική Διατριβή
για την απόκτηση διδακτορικού διπλώματος
της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ελένη Παπατζίκου
Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός, Ε.Μ.Π.
MSc Transport Planning and Engineering, University of Leeds, U.K.

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αντώνιος Σταθόπουλος
Ομότιμος Καθηγητής, ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Κωνσταντίνος Αντωνίου
Professor, Technical University of Mu-
nich, Germany

Αμαλία Πολυδωροπούλου
Καθηγήτρια, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αντώνιος Σταθόπουλος
Ομότιμος Καθηγητής, ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Κωνσταντίνος Αντωνίου
Professor, Technical University of Mu-
nich, Germany

Αμαλία Πολυδωροπούλου
Καθηγήτρια, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Ελένη Βλαχογιάννη
Επίκουρη Καθηγήτρια, ΕΜΠ

Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

Alexander Skabardonis
Professor-in-Residence, UC Berkeley, USA

Λουκάς Δημητρίου
Επίκουρος Καθηγητής, Πανεπιστήμιο
Κύπρου, Κύπρος

Στη Δανάη και την Ηλέκτρα

και

στον Βασίλη

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας αυτό το μακρύ και επίπονο ερευνητικό ταξίδι, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την υποστήριξη που είχα από τους καθηγητές, τους συναδέλφους, τους φίλους και την οικογένειά μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Σταθόπουλο για την επιστημονική και ηθική υποστήριξή του κατά την πολυετή συνεργασία μας. Μου έδωσε την ευκαιρία να αρχίσω, να συνεχίσω και να ολοκληρώσω την παρούσα διατριβή προσφέροντάς μου πάντα απλόχερα τις συμβουλές και την καθοδήγησή του ως δάσκαλος και ως μέντορας, επηρεάζοντάς με βαθύτατα σε επιστημονικό και προσωπικό επίπεδο.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στα μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Αντωνίου και την Καθηγήτρια κα. Αμαλία Πολυδωροπούλου για τις πολύτιμες συμβουλές τους στη εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής και για τις παρατηρήσεις και κατευθύνσεις τους που βελτίωσαν το περιεχόμενο και τη δομή της διατριβής. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τις συμβουλές και την καθοδήγηση του εκλιπόντα Καθηγητή κ. Ματθαίου Καρλαύτη στα πρώτα χρόνια της διατριβής μου.

Παράλληλα, θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στην Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Ελένη Βλαχογιάννη, στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου και στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λουκά Δημητρίου για την υποστήριξή τους σε όλα τα χρόνια της εκπόνησης της διατριβής μου. Η ενθάρρυνση και οι συμβουλές τους υπήρξαν πολύτιμες για μένα. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Αλέξανδρο Σκαμπαρδώνη για τη συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το διδακτικό προσωπικό του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής της Σχολής για τις γνώσεις, τις δράσεις και το συνεχές ενδιαφέρον και τη συμπαράσταση τους. Ειδικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια κα. Βούλα Ψαράκη-Καλουπτσίδη για τη στήριξη και την καθοδήγησή της σε επιστημονικό και προσωπικό επίπεδο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνάδελφο και φίλη, Ιωάννα Παγώνη, που μοιραζόμασταν τις εγκαταστάσεις του τομέα, τις ανησυχίες και τις αγωνίες μας στη κοινή μας ερευνητική πορεία.

Περαιτέρω, θα ήθελα να ευχαριστήσω και την οικογένεια της NAMA και συγκεκριμένα τους κ.κ. Παναγιώτη Παπαδάκο, Ευαγγελία Περιμένη και Κωνσταντίνο Φουσέκη για την αμέριστη συμπαράσταση, κατανόηση και βοήθεια που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια της προσπάθειας μου.

Ευγνωμοσύνη οφείλω στον σύντροφο της ζωής μου, Βασίλη Δαμιανό, που με ώθησε σε αυτό το ταξίδι και με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια. Χωρίς την απεριόριστη βοήθεια και υποστήριξή του δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση αυτής της διατριβής. Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω στις δύο υπέροχες κόρες μου, Δανάη και Ηλέκτρα, που με πολλή υπομονή και αγάπη, μου έδιναν καθημερινά δύναμη και κουράγιο να συνεχίσω. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην μητέρα μου, Κατερίνα Πριοβόλου, που πάντα με ενθάρρυνε να γίνομαι καλύτερη και να πιστεύω στον εαυτό μου, και στα αδέρφια μου Γιάννη και Άγγελο που είναι πάντα δίπλα μου.

Έλεγχος της Κυκλοφορίας υπό Συνθήκες Δυναμικής Φόρτισης με Μεθόδους Ελαχιστοποίησης του Ρίσκου

Διδακτορική Διατριβή

Ελένη Παπατζίκου, Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός, Ε.Μ.Π., MSc

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή εξετάζει το σύνθετο πρόβλημα της διαχείρισης των δυναμικών φαινομένων της κυκλοφορίας με μεθόδους μεσοσκοπικής προσέγγισης. Καθημερινά, οι χρήστες ενός μεταφορικού συστήματος βιώνουν διαφορετικά επίπεδα συμφόρησης κατά τη μετακίνησή τους. Οι απώλειες στο χρόνο μετακίνησης λόγω συμφόρησης είναι συνέπεια της δυναμικής αλληλοεξάρτησης της ζήτησης μετακινήσεων που εξυπηρετείται από το σύστημα και επηρεάζονται από τις παραμέτρους που ορίζουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του.

Ο κύριος στόχος της διατριβής είναι η διερεύνηση και η διατύπωση κατάλληλης συλλογιστικής, μεθόδων και εργαλείων για την αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας και των προβλημάτων συμφόρησης που παρατηρούνται σε αστικά δίκτυα, προσφέροντας μία διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα μέσω της ανάλυσης και της διαχείρισης του ρίσκου του χρόνου μετακίνησης.

Η προσέγγιση της παρούσας διατριβής διέπεται από τις έννοιες του ρίσκου και της απώλειας του παραγωγικού¹ χρόνου μετακίνησης. Το ρίσκο στο χρόνο μετακίνησης λαμβάνεται ως ο συνδυασμός της απώλειας του παραγωγικού χρόνου λόγω συμφόρησης και της πιθανότητας εμφάνισης αυτής της απώλειας εντός του χρονικού ορίζοντα ανάλυσης των δυναμικών φαινομένων της κυκλοφορίας. Για την μελέτη της απόδοσης του μεταφορικού συστήματος και τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk), για την ποσοτικοποίηση και πρόβλεψη του κινδύνου εμφάνισης υψηλών επιπέδων συμφόρησης.

Η ανάγκη για διατύπωση ενός συστήματος που να μπορεί να διαχειρίζεται την πληροφορία, την πολυπλοκότητα των παραμέτρων των πολλαπλών προβλημάτων και την ευρύτητα των εναλλακτικών λύσεων που εμπεριέχονται στη διαχείριση της κυκλοφορίας οδήγησε στην ανάπτυξη ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική δομή του Συστήματος ενσωματώνει την ανάλυση ρίσκου και τη δυναμική μεσοσκοπική ανάλυση των κυκλοφοριακών συνθηκών στα υποσυστήματα που το αποτελούν.

¹ τόσο με την οικονομική έννοια του όρου όσο και με την έννοια της προσωπικής χρήσης του χρόνου και της εναλλακτικής διάθεσής του

Στην παρούσα διατριβή, το Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων εξειδικεύεται και η μεθοδολογία εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου διατυπώνεται ως βασικό δομικό μέρος του. Σε πρώτο επίπεδο αναλύεται και περιγράφεται το πρόβλημα για τον μεμονωμένο κόμβο διατυπώνοντας και περιγράφοντας την αλγοριθμική διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, το μοντέλο ελαχιστοποίησης του ρίσκου των καθυστερήσεων και τον προτεινόμενο αλγόριθμο αναζήτησης λύσεων του προβλήματος. Στη συνέχεια διατυπώνεται το ευρύτερο πρόβλημα εύρεσης σηματοδότησης δικτύου με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του ρίσκου ως προγνωστικό υποσύστημα εκτός σύνδεσης αλλά και ως υποσύστημα απευθείας σύνδεσης. Στην προτεινόμενη προσέγγιση διατυπώνεται και περιγράφεται με λεπτομέρεια το μοντέλο ρίσκου για την ανάλυση της απόδοσης του δικτύου μέσω της δυναμικής μεσοσκοπικής προσομοίωσης, το μοντέλο ελαχιστοποίησης του ρίσκου για την εύρεση των βέλτιστων ρυθμίσεων σηματοδότησης, ο αλγόριθμος αναζήτησης λύσεων και οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Η εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών εύρεσης πραγματοποιείται σε περιπτώσεις υποδειγμάτων της βιβλιογραφίας. Τα οφέλη από την ενσωμάτωση της ανάλυσης ρίσκου στο σχεδιασμό της σηματοδότησης και της ανάλυσης της απόδοσης του μεταφορικού συστήματος διαπιστώνονται μέσω σύγκρισης των προτεινόμενων μεθοδολογιών με τυπικές μεθοδολογίες και λογισμικά που χρησιμοποιούνται ευρέως. Επιπλέον διερευνάται η βασική υπόθεση της μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου που προτείνεται, ότι δηλαδή η διαχείριση της κυκλοφορίας, μέσω φωτεινής σηματοδότησης, που είναι σχεδιασμένη και βελτιστοποιημένη με την ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο, θα προσφέρει στους χρήστες μικρότερο κίνδυνο να βιώσουν υψηλότερες τιμές καθυστερήσεων.

Η διατριβή εξετάζει ένα θέμα που έχει τόσο ερευνητικό όσο και πρακτικό ενδιαφέρον. Από τα αποτελέσματα των εφαρμογών, προκύπτει ότι η συμβολή της διατριβής δύναται να μεγιστοποιηθεί, εάν οι μεθοδολογίες και οι διαδικασίες που διατυπώνονται εφαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες ανάλυσης και διαχείρισης δικτύων, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής των χρηστών του συστήματος και συμβάλλοντας θετικά στην οικονομία και στο περιβάλλον.

Λέξεις Κλειδιά: Στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας, Σηματοδότηση μεμονωμένου κόμβου, Σηματοδότηση δικτύου υπό δυναμική ισορροπία, Δυναμικός καταμερισμός της κυκλοφορίας, Μεσοσκοπικός καταμερισμός, Ανάλυση ρίσκου, Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο, Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων, Βελτιστοποίηση σηματοδότησης σταθερού χρόνου, Βελτιστοποίηση σηματοδότησης προσαρμοστικού ελέγχου, Αλγόριθμος Διεσπαρμένης Αναζήτησης, Γενετικός Αλγόριθμος,

Traffic Control under Dynamic Loading Conditions with Risk Analysis Methods

PhD Thesis

By Eleni Papatzikou, SurvEng, MSc

Thesis Supervisor: Antony Stathopoulos Professor Emeritus NTUA

Abstract

This thesis examines the complex problem of dynamic traffic management with mesoscopic approach methods. The users of a transport system experience different congestion levels during their everyday activities. The losses in travel time due to congestion is a consequence of the dynamic interdependence of travel demand served by the system and are influenced by the parameters that define its operating characteristics.

The main objective is to investigate and formulate appropriate reasoning, methods and tools for efficient traffic management and tackling the congestion problem in urban networks, offering a different approach to the problem through the analysis and management of travel time risk.

The approach is based on the concepts of risk and the loss of productive² travel time. The travel time risk is defined as the combination of loss of productive time due to congestion and the likelihood of this loss to occur over the analysis horizon taking into account the dynamic traffic phenomena. The Conditional Value-at-Risk was used to quantify and predict the risk of high levels of congestion for both the transport system performance and the optimization of traffic control.

The need for formulating a system that can handle the information, the complexity of the parameters of multiple problems and the breadth of the alternative solutions involved in traffic management led to the development of a Decision Support System. The proposed architecture of the System incorporates risk analysis and dynamic mesoscopic approaches for the representation of traffic conditions in its subsystems.

Here, the Decision Support System is focused on the activities involved with the traffic control strategy formulation, incorporating the risk minimization methodology for finding the best

² both in the economic sense of the term and in terms of the personal use of time and its alternative usage

traffic control plans as its main component. At first, the problem for the isolated intersection is defined and analyzed, formulating and describing the methodological framework, the risk model for minimizing delays and the optimization algorithms. Next, the extended problem of finding the best traffic control for a network by minimizing the risk of delays is formulated as a predictive off-line and on-line subsystem. The proposed approach is defined and described in detail with regard to the risk model for the analysis of the network performance through the dynamic mesoscopic simulation, the risk minimization model for finding the best signaling settings, the search algorithm and the objective functions of the optimization problem.

The proposed approaches of traffic signal optimization by minimizing the risk of delay were applied to reference intersection and network from the literature. The benefits for integrating risk analysis into the design of traffic signals and the system's performance are identified by comparing the proposed methodologies with standard methods and software widely used by researchers and practitioners. Furthermore, the basic hypothesis of the proposed approach is investigated, namely that traffic signals designed and optimized by minimizing the Conditional Value-at-Risk will offer users a lower risk of experiencing higher levels of congestion.

The thesis examines an issue that has both research and practical interest. The results of the application show that its contribution can be maximized if the methodologies and procedures formulated here are implemented in real-world analysis and management conditions, improving the quality of life of users of the system and contributing positively to the economy and the environment.

Keywords: Traffic control strategies, Isolated intersection traffic control optimization, Network traffic control under dynamic loading, Dynamic Traffic Assignment, Mesoscopic assignment, Risk analysis, Conditional Value-at-Risk, Decision Support System, Fixed-time traffic control optimization, Adaptive traffic control optimization, Scatter search algorithm, Genetic algorithm.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	iii
Abstract	v
Πίνακας Περιεχομένων	vii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή του προβλήματος της διαχείρισης της κυκλοφορίας	1
1.2 Στόχοι και μεθοδολογικό πλαίσιο της διατριβής	4
1.3 Οργάνωση της διδακτορικής διατριβής	6
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1 Βασικοί ορισμοί	12
2.2 Στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας	13
2.2.1 Σηματοδότηση μεμονωμένων κόμβων	15
2.2.2 Σηματοδότηση αρτηριών και δικτύων	22
2.2.3 Σηματοδότηση δικτύων υπό συνθήκες ισορροπίας	31
2.2.4 Σηματοδότηση κόμβων και δικτύων υπό συνθήκες αβεβαιότητας	37
2.3 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σηματοδότησης	41
2.4 Σύνοψη βιβλιογραφικής ανασκόπησης και συμβολή διατριβής	47
Κεφάλαιο 3 Η Έννοια του Ρίσκου στον Κυκλοφοριακό Σχεδιασμό	53
3.1 Εισαγωγή στην ανάλυση ρίσκου στον κυκλοφοριακό σχεδιασμό	53
3.2 Μοντέλα ανάλυσης ρίσκου	55
3.3 Εκτίμηση και ανάλυση ρίσκου χρόνου μετακίνησης	58
3.4 Το CVaR σε συγκοινωνιακά προβλήματα	66
3.5 Σύνοψη κεφαλαίου	72
Κεφάλαιο 4 Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων	73
4.1 Γενικά	73
4.1.1 Διαδικασία λήψης αποφάσεων	73
4.1.2 Εξέλιξη των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων	75
4.1.3 Αρχιτεκτονική και τύποι Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων	77
4.2 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων στη Διαχείριση της Κυκλοφορίας	80
4.2.1 Γενικά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας ..	80
4.2.2 Εφαρμογές πρότυπων Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας	85

4.2.3	Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για τον σηματοδοτούμενο έλεγχο της κυκλοφορίας.....	87
4.3	Προτεινόμενο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων	88
4.3.1	Αρχιτεκτονική δομή προτεινόμενου Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων	89
4.3.2	Πλαίσιο ανάπτυξης Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων πολλαπλών πρακτόρων.....	101
4.3.3	Δυναμικό μεσοσκοπικό πρότυπο καταμερισμού της κυκλοφορίας.....	103
4.4	Σύνοψη κεφαλαίου	119
Κεφάλαιο 5 Μεθοδολογία Εύρεσης Βέλτιστης Σηματοδότησης Ελαχιστοποίησης Ρίσκου		121
5.1	Διατύπωση προβλήματος εύρεσης βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου	122
5.1.1	Μοντέλο ελαχιστοποίησης ρίσκου καθυστερήσεων σε μεμονωμένο σηματοδοτούμενο κόμβο	127
5.1.2	Μοντέλο εκτίμησης καθυστέρησης.....	129
5.1.3	Εναλλακτικοί αλγόριθμοι αναζήτησης λύσεων του προβλήματος.....	144
5.2	Διατύπωση μεσοσκοπικού προβλήματος βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου.....	149
5.2.1	Μοντέλο ελαχιστοποίησης ρίσκου καθυστερήσεων σε σηματοδοτούμενο δίκτυο	153
5.2.2	Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος.....	172
5.2.3	Εκτίμηση και ανάλυση ρίσκου χρόνου μετακίνησης δυναμικής μεσοσκοπικής προσομοίωσης δικτύου.....	176
5.3	Διατύπωση μεσοσκοπικού προβλήματος βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου σε απευθείας σύνδεση.....	178
5.4	Σύνοψη κεφαλαίου	181
Κεφάλαιο 6 Εφαρμογές Μεθοδολογίας		183
6.1	Εύρεση σταθερού προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου σε μεσοσκοπικό επίπεδο	183
6.1.1	Περιγραφή του κόμβου υποδείγματος.....	183
6.1.2	Σύγκριση εναλλακτικών αλγορίθμων επίλυσης	186
6.1.3	Σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων.....	192
6.1.4	Επαλήθευση εκτιμώμενης καθυστέρησης με χρήση μικροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης	196
6.2	Εφαρμογή του προβλήματος εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου σε μεσοσκοπικό επίπεδο	200
6.2.1	Περιγραφή του δικτύου υποδείγματος	200
6.2.2	Εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου	205
6.2.3	Σύγκριση μεθοδολογίας με το μεσοσκοπικό λογισμικό TRANSYT-7F	207

6.2.4 Εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης και σύγκριση μεθοδολογιών σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης.....	215
Κεφάλαιο 7 Ανάλυση Ευαισθησίας	227
7.1 Ανάλυση ευαισθησίας μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου σε μεμονωμένο κόμβο....	227
7.2 Ανάλυση ευαισθησίας μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου σε σηματοδοτούμενο δίκτυο.....	230
7.3 Σύγκριση μεθοδολογίας σε προσομοίωση προσαρμοστικού ελέγχου	239
Κεφάλαιο 8 Συνεισφορά και Συμπεράσματα.....	245
8.1 Συνεισφορά της Διατριβής.....	245
8.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή των μεθόδων.....	250
8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	255
Κεφάλαιο 9 Βιβλιογραφία	259
Παράρτημα Α: Βιβλιοθήκη συνδυασμών φάσεων	283
Παράρτημα Β: Ψευδοκώδικας Αλγοριθμικής Διαδικασίας Βελτιστοποίησης Σηματοδότησης Συντονισμένου Δικτύου.....	291
Παράρτημα Γ: Παράμετροι Αλγορίθμων Βελτιστοποίησης και Δυναμικής Μεσοσκοπικής Φόρτισης.....	297

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Εθνικοί δείκτες κυκλοφοριακής συμμόρφωσης στις Η.Π.Α. (Schrack et al., 2015).....	2
Σχήμα 1-2: Οργάνωση διδακτορικής διατριβής	9
Σχήμα 2-1: Προσομοιωμένα διαγράμματα κίνησης οχημάτων σε σηματοδοτούμενη πρόσβαση (Dion et al., 2004)	16
Σχήμα 2-2: Διάγραμμα χρόνου – απόστασης μίας συντονισμένης σηματοδοτούμενης αρτηρίας (Urbanik et al., 2015)	23
Σχήμα 2-3: Συνδυασμένο πρόβλημα καταμερισμού της ζήτησης υπό συνθήκες ισορροπίας και εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης	32
Σχήμα 3-1: Αξία σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) και Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR).....	57
Σχήμα 3-2: Περίπτωση κατακόρυφης ασυνέχειας που η $\Psi x, \xi$ δεν έχει λύση στο ξ	60
Σχήμα 3-3: Περίπτωση οριζόντιας ασυνέχειας που η $\Psi x, \xi$ έχει πολλές λύσεις στο ξ	61
Σχήμα 3-4: Αξία σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) και Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) στην περίπτωση διακριτών τιμών	64
Σχήμα 4-1: Αναθεωρημένο μοντέλο λήψης απόφασης Simon	75
Σχήμα 4-2: Εξέλιξη των ΣΥΑ (Arnott & Pervan, 2016).....	76
Σχήμα 4-3: Βασική αρχιτεκτονική δομή των ΣΥΑ (Holsapple, 2008).....	78
Σχήμα 4-4: Προτεινόμενο Σύστημα υποστήριξης Αποφάσεων.....	90
Σχήμα 4-5: Προτεινόμενη δομή υποσυστημάτων παρακολούθησης και πρόβλεψης/προσομοίωσης	93
Σχήμα 4-6: Προτεινόμενη δομή υποσυστήματος εντοπισμού προβλημάτων	94
Σχήμα 4-7: Προτεινόμενη δομή γενικού υποσυστήματος σχεδιασμού.....	97
Σχήμα 4-8: Προτεινόμενη δομή γενικού υποσυστήματος εφαρμογής και αξιολόγησης.....	100
Σχήμα 4-9: Γενικό πλαίσιο λειτουργίας ενός δυναμικού μοντέλου καταμερισμού της κυκλοφορίας (Barcelo et al. 2010)	104
Σχήμα 4-10: Εννοιολογική δομή του διακομιστή δυναμικού καταμερισμού κυκλοφορίας στο Aimsun	109
Σχήμα 4-11: Προσομοίωση της κίνησης ενός οχήματος στη μεσοσκοπική προσέγγιση στο Aimsun	116
Σχήμα 5-1: Ενδεικτικά παραδείγματα συνδυασμών φάσεων.....	123
Σχήμα 5-2: Αλγοριθμική διαδικασία εύρεσης βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου	124
Σχήμα 5-3: Παράδειγμα οριστικοποίησης συνδυασμού φάσεων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κόμβου.....	125
Σχήμα 5-4: Το μοντέλο ελαχιστοποίησης ρίσκου καθυστερήσεων μεσοσκοπικής προσέγγισης στην προτεινόμενη αλγοριθμική διαδικασία βελτιστοποίησης σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου.....	128
Σχήμα 5-5: Η βασική ροή εργασιών του HCM2010 μοντέλου για την εκτίμηση της καθυστέρησης (TRB, 2010)	131
Σχήμα 5-6: Πολύγωνο για τον υπολογισμό της ομοιόμορφης καθυστέρησης σύμφωνα με το HCM2010 (TRB, 2010) για την περίπτωση αποκλειστικής λωρίδας και την περίπτωση επιτρεπόμενης στρέφουσας σε μεικτή λωρίδα.....	139
Σχήμα 5-7: Οι εναλλακτικοί αλγόριθμοι επίλυσης στην προτεινόμενη αλγοριθμική διαδικασία βελτιστοποίησης προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου.....	144
Σχήμα 5-8: Μηχανισμός εύρεσης νέου συνόλου αναφοράς στον αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης (Glover et al., 2000).....	147

Σχήμα 5-9: Επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου	151
Σχήμα 5-10: Χαρακτηριστικά μεγέθη στον υπολογισμό της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων	161
Σχήμα 5-11: Κατάταξη μελών πληθυσμού σε τάξεις βάσει υπεροχής στο γενετικό αλγόριθμο πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων	174
Σχήμα 5-12: Επιλογή βέλτιστου σημείου από το μέτωπο Pareto	175
Σχήμα 5-13: Λειτουργία κυλιόμενου ορίζοντα στη βελτιστοποίηση σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου σε απευθείας σύνδεση	179
Σχήμα 5-14: Επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου σε απευθείας σύνδεση	180
Σχήμα 6-1: Γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά κόμβου υποδείγματος	184
Σχήμα 6-2: Αρχικό σηματοδοτικό πρόγραμμα κόμβου υποδείγματος	185
Σχήμα 6-3: Διακύμανση κυκλοφοριακού φόρτου κόμβου υποδείγματος	185
Σχήμα 6-4: Σύγκριση αλγορίθμων επίλυσης στην βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	188
Σχήμα 6-5: Συνολική καθυστέρηση κόμβου υποδείγματος εκτιμώμενη μικροσκοπικά (Aimsun) και μεσοσκοπικά (HCM2010)	189
Σχήμα 6-6: Εκτιμώμενη συνολική καθυστέρηση κόμβου για όλες τις δυνατές λύσεις	192
Σχήμα 6-7: Βελτιστοποιημένα προγράμματα σηματοδότησης με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελαχιστοποίησης ρίσκου (<i>CVaR.D</i>), την ελαχιστοποίηση συνολικής καθυστέρησης (<i>Tot.D</i>) και την ελαχιστοποίηση 15λέπτου αιχμής (<i>PH.D</i>)	193
Σχήμα 6-8: Εκτίμηση μέσης καθυστέρησης ανά όχημα με τη μέθοδο HCM2010 πολλαπλών διαδοχικών βημάτων	194
Σχήμα 6-9: Σύγκριση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης στο (α) αρχικό πρόγραμμα και στα (β) βελτιστοποιημένα προγράμματα	198
Σχήμα 6-10: Απόλυτη και πραγματική απόκλιση της μεσοσκοπικής εκτίμησης μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης	198
Σχήμα 6-11: Σύγκριση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης συνολικής καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης στο (α) αρχικό πρόγραμμα και στα (β) βελτιστοποιημένα προγράμματα	199
Σχήμα 6-12: Απόλυτη και πραγματική απόκλιση της μεσοσκοπικής εκτίμησης συνολικής καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης	199
Σχήμα 6-13: Χαρακτηριστικά δικτύου υποδείγματος (Allsop & Charlesworth, 1977)	201
Σχήμα 6-14: Διαδρομές συντονισμού στο δίκτυο υποδείγματος	202
Σχήμα 6-15: Διακύμανση ζήτησης μετακινήσεων στο δίκτυο υποδείγματος	204
Σχήμα 6-16: Διαγράμματα μετώπου Pareto βασικού σεναρίου	206
Σχήμα 6-17: Μέση καθυστέρηση και <i>CVaR</i> μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων	209
Σχήμα 6-18: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων	210
Σχήμα 6-19: Διαγράμματα αποστάσεων – χρόνων συντονισμού διαδρομών με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις	213
Σχήμα 6-20: Διαγράμματα μετώπου Pareto σεναρίου υψηλής ζήτησης	216
Σχήμα 6-21: Διαγράμματα μετώπου Pareto σεναρίου πολύ υψηλής ζήτησης	216
Σχήμα 6-22: Μέση καθυστέρηση και <i>CVaR</i> μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων σεναρίων αυξημένης ζήτησης	217
Σχήμα 6-23: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων σεναρίου υψηλής ζήτησης	219
Σχήμα 6-24: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων σεναρίου πολύ υψηλής ζήτησης	219

Σχήμα 6-25: Διαγράμματα αποστάσεων – χρόνων συντονισμού διαδρομών με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις στο σενάριο υψηλής ζήτησης.....	225
Σχήμα 6-26: Διαγράμματα αποστάσεων – χρόνων συντονισμού διαδρομών με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης.....	226
Σχήμα 7-1: Διακύμανση CVaR μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας μεμονωμένου κόμβου – Σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων.....	228
Σχήμα 7-2: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας μεμονωμένου κόμβου – Σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων.....	229
Σχήμα 7-3: Διακύμανση μέγιστη τιμής μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας μεμονωμένου κόμβου – Σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων.....	229
Σχήμα 7-4: Διακύμανση ζήτησης σεναρίων αύξησης ζήτησης στην ώρα αιχμής (5-7).....	231
Σχήμα 7-5: Διακύμανση ζήτησης σεναρίων επέκτασης ώρας αιχμής (12-15).....	231
Σχήμα 7-6: Σενάρια συμβάντων αποκλεισμού λωρίδας και μείωσης ταχύτητας (16-34).....	233
Σχήμα 7-7: Διαγράμματα σύγκρισης μέσης τιμής και CVaR μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης στο δίκτυο ευαισθησίας σε σχέση με το TRANSYT-7F.....	234
Σχήμα 7-8: Διάγραμμα σύγκρισης μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας στο δίκτυο σε σχέση με το βασικό σενάριο.....	237
Σχήμα 7-9: Διάγραμμα σύγκρισης CVaR μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας στο δίκτυο σε σχέση με το βασικό σενάριο.....	237
Σχήμα 7-10: Διάγραμμα σύγκρισης συνολικού χρόνου διαδρομής σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας στο δίκτυο σε σχέση με το βασικό σενάριο.....	238
Σχήμα 7-11: Αλγοριθμική διαδικασία εύρεσης βέλτιστων ρυθμίσεων σηματοδότησης με προσαρμοστικό έλεγχο.....	240
Σχήμα 7-12: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων βασικού σεναρίου με προσαρμοστικό έλεγχο και έλεγχο σταθερού χρόνου.....	243
Σχήμα 7-13: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων 4 ^{ου} σεναρίου με προσαρμοστικό έλεγχο και έλεγχο σταθερού χρόνου.....	243
Σχήμα 7-14: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων 36 ^{ου} σεναρίου με προσαρμοστικό έλεγχο και έλεγχο σταθερού χρόνου.....	244

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Δείκτες συμφόρησης 2016 σε 10 Ευρωπαϊκές πόλεις με τα υψηλότερα επίπεδα συμφόρησης (TomTom, 2017).....	2
Πίνακας 4-1: Δυναμικά μεσοσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφορίας.....	105
Πίνακας 5-1: Τιμές συντελεστή προσαρμογής χρήσης λωρίδας (HCM, 2010).....	135
Πίνακας 6-1: Ωριαίοι κυκλοφοριακοί φόρτοι ώρας αιχμής (HCM, 2000)	185
Πίνακας 6-2: Στατιστικά στοιχεία υλοποίησης αλγορίθμων επίλυσης.....	187
Πίνακας 6-3: Αξιολόγηση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης καθυστέρησης εναλλακτικών αλγορίθμων επίλυσης.....	189
Πίνακας 6-4: Επαλήθευση συνολικής βέλτιστης λύσης.....	190
Πίνακας 6-5: Αξιολόγηση μεσοσκοπικής εκτίμησης καθυστέρησης εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων.....	195
Πίνακας 6-6: Αξιολόγηση μικροσκοπικής εκτίμησης καθυστέρησης εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων.....	196
Πίνακας 6-7: Σύγκριση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης.....	197
Πίνακας 6-8: Σύγκριση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης συνολικής καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης.....	199
Πίνακας 6-9: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συνδέσμων δικτύου (Allsop & Charlesworth, 1977)	200
Πίνακας 6-10: Ζήτηση μέγιστης ώρας αιχμής (Allsop & Charlesworth, 1977)	203
Πίνακας 6-11: Περιορισμοί και παράμετροι βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου	206
Πίνακας 6-12: Σύγκριση εναλλακτικών προσεγγίσεων στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης του ρίσκου	206
Πίνακας 6-13: Σύγκριση εναλλακτικών προσεγγίσεων στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης του ρίσκου με τις μεθόδους MC και GATRANSPFEE στη μέγιστη ώρα αιχμής	207
Πίνακας 6-14: Περιορισμοί και παράμετροι βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου στο TRANSYT	208
Πίνακας 6-15: Σύγκριση εναλλακτικών προσεγγίσεων στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης του ρίσκου	209
Πίνακας 6-16: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού διαδρομών σηματοδότησης	212
Πίνακας 6-17: Επίπεδα αποδοτικότητας χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης διαδρομών δύο κατευθύνσεων	214
Πίνακας 6-18: Επίπεδα εφικτότητας χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης διαδρομών δύο κατευθύνσεων	214
Πίνακας 6-19: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού διαδρομών σηματοδότησης	215
Πίνακας 6-20: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού διαδρομών σηματοδότησης	218
Πίνακας 6-21: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού σηματοδότησης στα σενάρια αυξημένης ζήτησης	220
Πίνακας 6-22: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού διαδρομών σηματοδότησης σεναρίων αυξημένης ζήτησης	224
Πίνακας 7-1: Σύγκριση σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας βελτιστοποίησης σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου	230
Πίνακας 7-2: Δείκτες ανάλυσης ευαισθησίας σε σχέση με το TRANSYT-7F	235
Πίνακας 7-3: Δείκτες ανάλυσης ευαισθησίας στο δίκτυο σε σχέση με το Σενάριο 1.....	239
Πίνακας 7-4: Σύγκριση προσαρμοστικού ελέγχου και ελέγχου σταθερού χρόνου	241

Κεφάλαιο 1

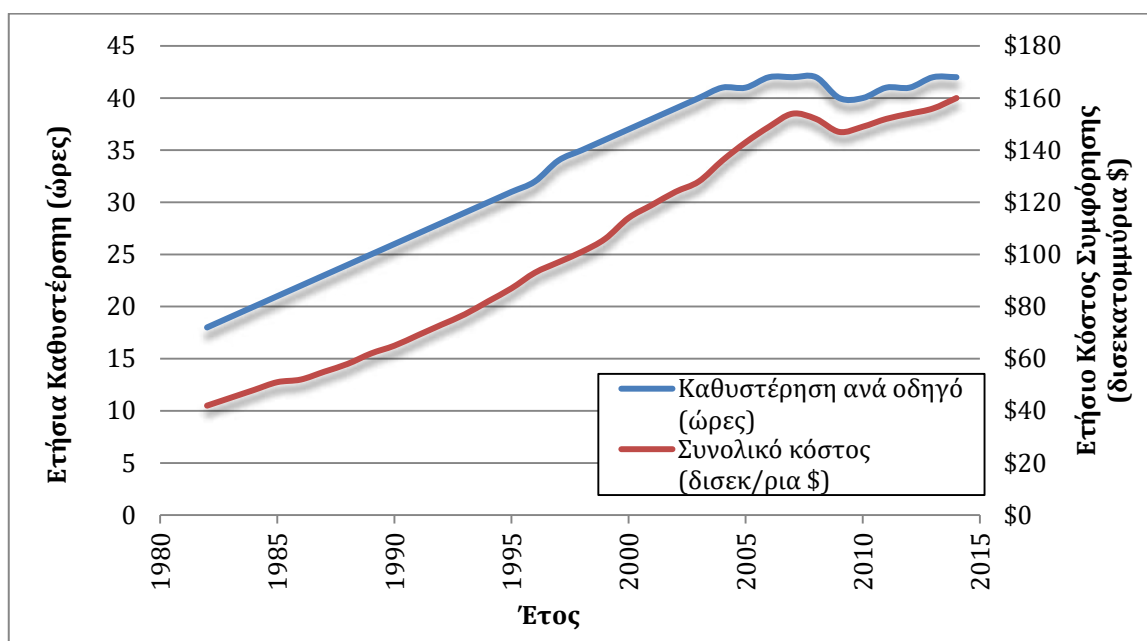
Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος της διαχείρισης της κυκλοφορίας

Η επέκταση των πόλεων και η συγκέντρωση ανθρώπων, υπηρεσιών και αγαθών σε αυτές, σε συνδυασμό με την αύξηση των οχημάτων, οδήγησε στην εμφάνιση φαινομένων συμφόρησης στα μεταφορικά δίκτυα των πόλεων. Κάθε χρόνο, οι κυκλοφοριακές συνθήκες επιδεινώνονται λόγω της αύξησης του πληθυσμού, της πυκνότερης συγκέντρωσης ανθρώπων σε αστικές περιοχές και της αύξησης των αναγκών για μετακίνηση. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση επηρεάζει αρνητικά την οικονομία, λόγω των απωλειών στο χρόνο μετακίνησης ανθρώπων και αγαθών και λόγω των επιπλέον εξόδων συντήρησης και λειτουργίας των οχημάτων και των υποδομών, το περιβάλλον, λόγω αύξησης των εκπομπών ρύπων και των επιπέδου θορύβου, την υγεία των ανθρώπων, όχι μόνο λόγω της επιδείνωσης του περιβάλλοντος, αλλά και λόγω εμφάνισης άγχους σχετιζόμενο με την καθημερινή μετακίνηση, αλλά και την οδική ασφάλεια.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) το 2016 εκτιμήθηκε ότι κατά μέσο όρο δαπανήθηκαν 30,35 ώρες σε κυκλοφοριακή συμφόρηση από τον μέσο οδηγό ετησίως, παρουσιάζοντας αύξηση κατά 3% σε σχέση με το 2015 και 4% με το 2014 (European Commission, 2018). Το κόστος της κυκλοφοριακής συμφόρησης στην Ευρώπη, εκτιμήθηκε ότι είναι 1% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος της Ε.Ε., το οποίο αντιστοιχεί σε 100 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως (European Commission, 2017). Στην Ελλάδα, ο μέσος ετήσιος χρόνος μετακίνησης ενός οδηγού υπό συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης το 2016 ήταν 35,63 ώρες και ήταν ο τρίτος υψηλότερος στην Ευρωπαϊκή Ένωση, παρά την οικονομική κρίση που διανύει η χώρα.

Αντίστοιχα φαινόμενα αυξανόμενης συμφόρησης παρουσιάζονται παγκοσμίως. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των Η.Π.Α. που βάσει στοιχείων (Schrank et al., 2015), το κόστος της συμφόρησης ετησίως έχει τετραπλασιαστεί από το 1982, ενώ οι απώλειες του χρόνου μετακίνησης λόγω συμφόρησης έχουν υπερδιπλασιαστεί (βλ. Σχήμα 1-1). Οι διακυμάνσεις των επιπέδων συμφόρησης έχουν ως συνέπεια το υπερδιπλασιασμό του απαιτούμενου χρόνου μετακίνησης έναντι του χρόνου υπό συνθήκες ελεύθερης ροής, όταν η μετακίνηση γίνεται σε περιόδους αιχμής (TomTom, 2018).



Σχήμα 1-1: Εθνικοί δείκτες κυκλοφοριακής συμφόρησης στις Η.Π.Α. (Schrank et al., 2015)

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση λοιπόν, αποτελεί ένα σημαντικό συγκοινωνιακό κόστος και έναν σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της απόδοσης των συγκοινωνιακών συστημάτων, καθώς και για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ανάπτυξη και εφαρμογή στρατηγικών και μέτρων στο συγκοινωνιακό σχεδιασμό για τη διαχείριση της κυκλοφορίας και τον περιορισμό των συνεπειών της συμφόρησης.

Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της συμφόρησης είναι η διακύμανση που παρουσιάζει κατά τις ώρες αιχμής, δημιουργώντας ακραίες τιμές και επιπλέον προβλήματα τόσο στους χρήστες του δικτύου όσο και στους διαχειριστές του. Όπως φαίνεται και στα στοιχεία που δημοσίευσε η TomTom για το 2016 (βλ. Πίνακα 1-1), η καθυστέρηση των χρηστών του δικτύου διπλασιάζεται περίπου κατά τις περιόδους αιχμής σε σχέση με την μέση καθυστέρηση που έχει μετρηθεί εντός της ημέρας.

Πίνακας 1-1: Δείκτες συμφόρησης 2016 σε 10 Ευρωπαϊκές πόλεις με τα υψηλότερα επίπεδα συμφόρησης (TomTom, 2017)

	Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Συμφόρησης	Μέσος Δείκτης Συμφόρησης Πρωινής Αιχμής	Μέσος Δείκτης Συμφόρησης Απογευματινής Αιχμής
Βουκουρέστι	50%	90%	98%
Μόσχα	44%	71%	94%
Αγία Πετρού- πολη	41%	65%	90%
Λονδίνο	40%	64%	68%
Μασσαλία	40%	62%	75%
Ρώμη	40%	74%	68%
Παρίσι	38%	68%	66%

	Μέσος Ημερήσιος Δείκτης Συμφόρησης	Μέσος Δείκτης Συμφόρησης Πρωινής Αιχμής	Μέσος Δείκτης Συμφόρησης Απογευματινής Αιχμής
Βρυξέλλες	38%	71%	77%
Μάντσεστερ	38%	68%	79%
Αθήνα	37%	58%	56%

[Ο δείκτης συμφόρησης αντιστοιχεί στο ποσοστό του επιπλέον χρόνου μετακίνησης αναλογικά με το χρόνο μετακίνησης σε συνθήκες ελεύθερης ροής.]

Η διαχείριση λοιπόν της κυκλοφορίας δεν έγκειται μόνο στο συνολικό περιορισμό της συμφόρησης και των καθυστερήσεων, αλλά και στη διαχείριση του ρίσκου που λαμβάνει ο κάθε χρήστης στην καθημερινή του μετακίνηση και που έχει ως συνέπεια την απώλεια του παραγωγικού του χρόνου λόγω καθυστερήσεων.

Ο στρατηγικός στόχος που συχνά τίθεται από τους διαχειριστές της κυκλοφορίας είναι η αποτελεσματική και αξιόπιστη μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, ενώ σχεδιάζοντας και υλοποιώντας στρατηγικές και μέτρα επιχειρούν την επίτευξη αυτού του στόχου. Οι συχνές αιτίες εμφάνισης αστοχιών των δικτύων λόγω συμφόρησης οφείλονται είτε σε εσωτερικούς παράγοντες, όπως η διακύμανση της ζήτησης, είτε σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως ατυχήματα, συμβάντα, καιρικές συνθήκες, κτλ. Το αποτέλεσμα αυτών των αιτιών είναι η μη δυνατότητα κάλυψης από την προσφερόμενη υποδομή της μεταφορικής ζήτησης που αναμένει να εξυπηρετηθεί. Η δυναμική εξέλιξη, δε, αυτών των φαινομένων με την σταδιακή αύξηση της ζήτησης κατά τις περιόδους αιχμής και τη συσσώρευση της συμφόρησης πέρα από ένα χρονικό και χωρικό όριο οδηγεί τα κυκλοφοριακά δίκτυα σε καταστάσεις μη ανατρέψιμες και δύσκολα διαχειρίσιμες. Έτσι, ένα κέντρο διαχείρισης κυκλοφορίας αναπτύσσει και εφαρμόζει στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων όλων των χρηστών, αλλά και την αποφυγή δημιουργίας συνθηκών υπερκορεσμού που μπορεί να οδηγήσουν σε συνθήκες ακραίων επιπέδων καθυστέρησης.

Παράλληλα, σε αστικό περιβάλλον, στο οποίο οι οδηγοί συχνά αντιμετωπίζουν υψηλά επίπεδα συμφόρησης, η επιλογή της διαδρομής τους πραγματοποιείται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του χρόνου διαδρομής τους, αλλά και την ελαχιστοποίηση του ρίσκου της αντιμετώπισης υψηλών τιμών καθυστερήσεων, λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση του δικτύου.

Διαμορφώνεται λοιπόν, ένα σύνθετο πρόβλημα για τη διαχείριση της συμφόρησης που η επίλυσή του δεν είναι μονοσήμαντη και εξαρτάται από πολλές αλληλεξαρτώμενες παραμέτρους του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, είτε για τον διαχειριστή του συστήματος, είτε για τον χρήστη του συστήματος.

1.2 Στόχοι και μεθοδολογικό πλαίσιο της διατριβής

Το θέμα της παρούσας διατριβής αφορά στη διαχείριση των δυναμικών φαινομένων της κυκλοφορίας με μεθόδους μεσοσκοπικής προσέγγισης. Σε αυτό το πλαίσιο είναι απαραίτητη η χρήση μεθόδων και εργαλείων που θα προσομοιώνουν την κυκλοφοριακή κατάσταση υπό δυναμική φόρτιση, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση σημαντική λεπτομέρεια σχετικά με τις δυναμικές συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, αλλά και τις διαθέσιμες διαδρομές που οι χρήστες του δικτύου επιλέγουν ανάλογα με την εξέλιξη των δυναμικών κυκλοφοριακών συνθηκών. Επιπλέον, η δυναμική μεσοσκοπική προσέγγιση παρέχει τη δυνατότητα μίας πλατφόρμας εφαρμογής στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας σε προγνωστικό επίπεδο ή σε πραγματικό χρόνο, που εντάσσεται σε πολλά συστήματα ρύθμισης της κυκλοφορίας στη βιομηχανία, αλλά και σε ερευνητικές εφαρμογές.

Γενικά, η καθυστέρηση στη μετακίνηση των χρηστών, όταν αναλύονται οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα σύστημα σε ένα χρονικό ορίζοντα, εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η μετακίνηση του κάθε χρήστη και επομένως από τις συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα κατά τη διάρκεια της κάθε μετακίνησης. Οι χρήστες λοιπόν, βιώνουν διαφορετικά επίπεδα συμφόρησης κατά την μετακίνησή τους και οι απώλειες στο χρόνο μετακίνησης λόγω συμφόρησης είναι συνέπεια της δυναμικής ζήτησης μετακινήσεων που εξυπηρετείται από το σύστημα, καθώς και των παραμέτρων που ορίζουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος.

Κύριος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση και η ανάπτυξη κατάλληλης συλλογιστικής, μεθόδων και εργαλείων για την αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας και των προβλημάτων συμφόρησης που παρουσιάζονται σε αστικά δίκτυα, προσφέροντας μία διαφορετική από τη συνήθη προσέγγιση στο πρόβλημα μέσω της ανάλυσης και διαχείρισης ρίσκου του χρόνου μετακίνησης. Ως ρίσκο στο χρόνο μετακίνησης ορίζεται ο συνδυασμός της απώλειας του παραγωγικού χρόνου (τόσο με την οικονομική έννοια του όρου όσο και με την έννοια της προσωπικής χρήσης του χρόνου και της εναλλακτικής διάθεσής του) λόγω συμφόρησης και της πιθανότητας εμφάνισης αυτής της απώλειας εντός του χρονικού ορίζοντα ανάλυσης.

Ο κύριος στόχος της διατριβής αναλύεται στους ακόλουθους επιμέρους στόχους που αποτελούν και την κύρια συνεισφορά της διατριβής:

- Ανάπτυξη μεθόδου ανάλυσης των χρονικά εξαρτώμενων κινδύνων και αβεβαιοτήτων του συστήματος που σχετίζονται με την απώλεια του χρόνου μετακίνησης των χρηστών.

- Ανάπτυξη αξιόπιστων και αποτελεσματικών μεθόδων διαχείρισης της κυκλοφορίας που συμπεριλαμβάνουν την ανάλυση του ρίσκου στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα.
- Διαμόρφωση μεθόδου εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου για μεμονωμένο κόμβο.
- Διαμόρφωση μεθόδου εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου για δίκτυο στο πλαίσιο ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεως διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Για την επίτευξη των στόχων της διατριβής διαμορφώθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα.

Αρχικά πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας αναφορικά με τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης σε κόμβους, αρτηρίες και δίκτυα. Στη συνέχεια διατυπώνεται η έννοια του ρίσκου στον κυκλοφοριακό σχεδιασμό και στη διαχείριση της κυκλοφορίας. Μετά από διερεύνηση των εναλλακτικών μοντέλων ανάλυσης ρίσκου προτείνεται η χρήση της τεχνικής της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk) για την ανάλυση της απόδοσης του μεταφορικού συστήματος, αλλά και τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης. Η Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο είναι ένα πολύ διαδεδομένο μέτρο ποσοτικοποίησης και πρόβλεψης του κινδύνου, το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο των χρηματοοικονομικών δραστηριοτήτων, και χρησιμοποιείται σήμερα σε πολλά επιστημονικά πεδία.

Ακολούθως, διερευνάται η διαδικασία λήψης αποφάσεων και τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, που έχουν αναπτυχθεί για τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Δεδομένου της πολυπλοκότητας των διαδικασιών που συμπεριλαμβάνονται στη διαχείριση της κυκλοφορίας διαμορφώνεται η αρχιτεκτονική δομή ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων που ενσωματώνει την ανάλυση ρίσκου και τη δυναμική μεσοσκοπική ανάλυση των κυκλοφοριακών συνθηκών στα υποσυστήματα που το αποτελούν.

Στη συνέχεια διατυπώνεται η μεθοδολογία εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου ως βασικό μέρος του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων. Σε πρώτο επίπεδο αναλύεται και περιγράφεται το πρόβλημα για τον μεμονωμένο κόμβο διατυπώνοντας και περιγράφοντας την αλγοριθμική διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, το μοντέλο ελαχιστοποίησης του ρίσκου των καθυστερήσεων, τον προτεινόμενο αλγόριθμο αναζήτησης λύσεων του προβλήματος και το μοντέλο εκτίμησης καθυστέρησης που χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια διατυπώνεται το ευρύτερο πρόβλημα εύρεσης σηματοδότησης δικτύου με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του ρίσκου ως προγνωστικό υποσύστημα εκτός σύνδεσης και ως υπο-

σύστημα απευθείας σύνδεσης. Και στην περίπτωση του δικτύου διατυπώνεται και περιγράφεται με λεπτομέρεια το μοντέλο ρίσκου για την ανάλυση της απόδοσης του δικτύου μέσω δυναμικής μεσοσκοπικής προσομοίωσης, το μοντέλο ελαχιστοποίησης του ρίσκου για την εύρεση των βέλτιστων ρυθμίσεων σηματοδότησης, ο αλγόριθμος αναζήτησης λύσεων και οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου εφαρμόζονται σε περιπτώσεις υποδειγμάτων της βιβλιογραφίας και συγκρίνονται με τυπικές μεθοδολογίες και λογισμικά που χρησιμοποιούνται ευρέως, έτσι ώστε να διαπιστωθούν τα οφέλη από την ενσωμάτωση της ανάλυσης ρίσκου στο σχεδιασμό της σηματοδότησης και της ανάλυσης της απόδοσης του μεταφορικού συστήματος. Επιπλέον διερευνάται η βασική υπόθεση της μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου που προτείνεται, ότι δηλαδή η διαχείριση της κυκλοφορίας, μέσω φωτεινής σηματοδότησης, που είναι σχεδιασμένη και βελτιστοποιημένη με την ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο, θα προσφέρει στους χρήστες μικρότερο κίνδυνο να βιώσουν υψηλότερες τιμές καθυστερήσεων.

1.3 Οργάνωση της διδακτορικής διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή μετά την εισαγωγή στο πρόβλημα της διαχείρισης της κυκλοφορίας, παρουσιάζει μία εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση των στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας μέσω φωτεινής σηματοδότησης (Κεφάλαιο 2). Συγκεκριμένα στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται προσεγγίσεις για την εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης κόμβων, αρτηριών και δικτύων εστιάζοντας στις μεθόδους επίλυσης, στα κριτήρια βελτιστοποίησης, στη στατική ή δυναμική θεώρηση του προβλήματος, καθώς και στις προσεγγίσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο, αναφορικά με την ύπαρξη ισορροπίας, αλλά και τη λεπτομέρεια της προσομοίωσης (μακροσκοπική, μεσοσκοπική, μικροσκοπική). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε προσεγγίσεις που συμπεριλαμβάνουν την αβεβαιότητα και την ανάλυση ρίσκου στο σχεδιασμό ως σημείο αφετηρίας της παρούσας προσέγγισης. Στη συνέχεια αναφέρονται και συνοψίζονται οι μετα-ευρετικές μέθοδοι βελτιστοποίησης που έχουν χρησιμοποιηθεί στην επίλυση του προβλήματος σηματοδότησης. Καταλήγοντας, συνοψίζονται οι ελλείψεις που εντοπίστηκαν στην βιβλιογραφία και οδήγησαν την ανάπτυξη των συνεισφορών της παρούσας διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η έννοια του ρίσκου στον κυκλοφοριακό σχεδιασμό που προτείνεται στην παρούσα διατριβή. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου ανάλυσης ρίσκου προκύπτει μέσω μίας ανασκόπησης των σημαντικότερων μοντέλων ανάλυσης ρίσκου, όπου παρουσιάζεται η θεωρητική τους προσέγγιση, τα μειονεκτήματα, καθώς και τα πλεονεκτήματά τους. Βάσει αυτής της ανασκόπησης, διαμορφώνεται η μέθοδος εκτίμησης και ανάλυσης ρίσκου μετακινήσεων υιοθετώντας τις έννοιες της Αξίας σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR)

και της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, *CVaR*) για την ανάλυση της απόδοσης του δικτύου, αλλά και τη βελτιστοποίηση του ελέγχου της κυκλοφορίας. Επίσης, παρουσιάζεται μία συνοπτική ανασκόπηση των συγκοινωνιακών προβλημάτων που έχουν εφαρμόσει μεθόδους ανάλυσης ρίσκου βασιζόμενες στην Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο.

Το 4^ο Κεφάλαιο συνεχίζει με την παρουσίαση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων αναφέροντας τις βασικές αρχές των θεμελιωδών θεωριών στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, με σκοπό τη διαχείριση της πληροφορίας, της πολυπλοκότητας των παραμέτρων ενός ή πολλαπλών προβλημάτων, της ευρύτητας των εναλλακτικών λύσεων και την επιλογή της καταλληλότερης λύσης. Μέσω της αναδρομής των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας και ειδικότερα για το σηματοδοτούμενο έλεγχο της κυκλοφορίας στη διεθνή βιβλιογραφία, εντοπίζεται η έλλειψη της χρήσης μεθόδων που συμπεριλαμβάνουν την ανάλυση του ρίσκου στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα του σχεδιασμού. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στη διατύπωση της αρχιτεκτονικής δομής του προτεινόμενου, στην παρούσα διατριβή, Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων και των υποσυστημάτων που το αποτελούν. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη δυναμική μεσοσκοπική προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα διατριβή και η οποία αποτελεί τον πυρήνα του προτεινόμενου συστήματος.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο και οι αλγόριθμοι εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης που εντάσσονται στο υποσύστημα σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας με κριτήριο την ελαχιστοποίηση και τον περιορισμό των χρονικά εξαρτώμενων κινδύνων του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση και τον περιορισμό του ρίσκου των χρόνων μετακίνησης των χρηστών. Η μεθοδολογία αρχικά ορίζεται στο επίπεδο του μεμονωμένου κόμβου, όπου αναλύεται το συνδυασμένο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστων φάσεων και χρόνων σηματοδότησης σταθερού χρόνου ως προγνωστικό εργαλείο εκτός σύνδεσης (*offline*) για την ελαχιστοποίηση του ρίσκου της μετακίνησης με μεσοσκοπική προσέγγιση. Παρουσιάζεται το μοντέλο ελαχιστοποίησης του ρίσκου για την περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου, καθώς και το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης όπως ορίζεται στο HCM2010 (TRB, 2010). Προτείνεται η χρήση δύο εναλλακτικών αλγορίθμων αναζήτησης λύσεων του προβλήματος, του ευρέως διαδεδομένου γενετικού αλγορίθμου και του αλγορίθμου διεσπαρμένης αναζήτησης, που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη διαδικασία επίλυσης. Στη συνέχεια, διατυπώνεται το μεσοσκοπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου που εντάσσεται στο υποσύστημα σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας του προτεινόμενου Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων και μπορεί να λειτουργήσει ως προγνωστικό εργαλείο εκτός σύνδεσης (*offline*), αλλά και εντός σύνδεσης (*online*). Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται μέσω του γενετικού αλγορίθμου πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, με τη μία αντικειμενική

συνάρτηση να αφορά στη μεσοσκοπική εκτίμηση της καθυστέρησης όλων των σηματοδοτούμενων κόμβων του δικτύου και τη δεύτερη να αφορά στο συντονισμό των σηματοδοτούμενων κόμβων, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις.

Στη συνέχεια, στο 6^ο Κεφάλαιο, εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία εύρεσης της βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου σε μεσοσκοπικό επίπεδο στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου και στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου, χρησιμοποιώντας υποδείγματα της βιβλιογραφίας. Στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου εξετάστηκαν διαφορετικοί αλγόριθμοι επίλυσης του προβλήματος της σηματοδότησης ως προς την ταχύτητα και την ακρίβεια της προκύπτουσας λύσης, ενώ πραγματοποιήθηκε και σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Στο πλαίσιο της ανάλυσης των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε επαλήθευση της εκτιμώμενης καθυστέρησης του κόμβου με μικροσκοπική προσέγγιση. Στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου οι προτεινόμενες προσεγγίσεις ελαχιστοποίησης του ρίσκου με μεσοσκοπική προσέγγιση εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που παρέχονται από τη χρήση του λογισμικού TRANSYT-7F σε τρία επίπεδα ζήτησης, ενώ πραγματοποιήθηκε και σύγκριση με προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα επικεντρώνοντας μόνο στην ώρα αιχμής και όχι στην εξέταση της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου της ζήτησης και της προκύπτουσας καθυστέρησης.

Ακολούθως, στο 7^ο Κεφάλαιο διερευνάται η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας διαφορετικών επιπέδων ζήτησης και συμβάντων. Διερευνάται έτσι το κατά πόσο ένα πρόγραμμα σηματοδότησης σχεδιασμένο και βελτιστοποιημένο με την ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη σε Κίνδυνο είναι ικανό να προσφέρει στους χρήστες μικρότερο κίνδυνο να βιώσουν υψηλότερες τιμές καθυστερήσεων. Επιπλέον, η προτεινόμενη προσέγγιση εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου σταθερού χρόνου ελαχιστοποιώντας το ρίσκο των καθυστερήσεων συγκρίθηκε σε επιλεγμένα σενάρια με τη στρατηγική προσαρμοστικού ελέγχου, έτσι ώστε να εντοπιστούν τα οφέλη από την ανάλυση του ρίσκου της εξέλιξης των φαινομένων για εκτεταμένο χρονικό διάστημα με χρήση μεσοσκοπικών μεθόδων.

Τέλος, η διατριβή καταλήγει στο 8^ο Κεφάλαιο με τη σύνοψη της συνεισφοράς που προκύπτει από την παρουσίαση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και τεκμηριώνεται από τα κύρια συμπεράσματα της εφαρμογής των μεθόδων, τόσο στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου, όσο και στην περίπτωση του συντονισμένου δικτύου. Τέλος, αναφέρονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και εμβάθυνση του προβλήματος της διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω μεσοσκοπικών δυναμικών προσεγγίσεων στο πλαίσιο της ανάλυσης ρίσκου, που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή.

Η οργάνωση της διατριβής παρουσιάζεται συνοπτικά στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1-2: Οργάνωση διδακτορικής διατριβής

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η μεταφορά ανθρώπων και αγαθών στο αστικό περιβάλλον είναι μία σημαντική δραστηριότητα που απασχολεί το σχεδιασμό της καθημερινότητας και τη λειτουργία των πόλεων. Η εξυπηρέτηση των αναγκών των μετακινούμενων οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων και στρατηγικών για την οργάνωση και διαχείριση των υποδομών των πόλεων. Σκοπός τους είναι η αποτελεσματικότερη χρήση των υποδομών και ο περιορισμός των προβλημάτων που είναι επακόλουθα της κυκλοφοριακής συμφόρησης, όπως η εμφάνιση καθυστερήσεων, η μείωση της οδικής ασφάλειας, η αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων, η περιβαλλοντική επιβάρυνση, κτλ.

Βασικές παραμέτρους μίας στρατηγικής διαχείρισης κυκλοφορίας αποτελούν τα χαρακτηριστικά που ορίζουν το σύστημα και τη λειτουργία του (όπως τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου, τα προγράμματα σηματοδότησης, κτλ.) και τα οποία αποτελούν στοιχεία που μπορούν να ελεγχθούν μέσω μίας στρατηγικής. Η ζήτηση που καλείται ένα σύστημα να εξυπηρετήσει, καθώς και οι μη ελεγχόμενες παράμετροι του συστήματος (όπως αστοχίες στα χαρακτηριστικά λειτουργίας, ατυχήματα, σημαντικές διακυμάνσεις της ζήτησης, κτλ.) είναι επίσης βασικές παράμετροι της στρατηγικής ελέγχου κυκλοφορίας που ορίζουν το πρόβλημα της διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Ο σκοπός λοιπόν, μίας στρατηγικής ελέγχου είναι ο προσδιορισμός των ελεγχόμενων χαρακτηριστικών του δικτύου (όπως η ρύθμιση της σηματοδότησης) βάσει διαθέσιμων εργαλείων που αναπαριστούν τη λειτουργία του (όπως κυκλοφοριακά μοντέλα μακροσκοπικής, μεσοσκοπικής ή μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας), έτσι ώστε να επιτευχθεί ο προκαθορισμένος στόχος (όπως η μείωση των καθυστερήσεων ή ο χρόνος μετακίνησης στο δίκτυο), λαμβάνοντας υπόψη τις μη ελεγχόμενες παραμέτρους (όπως η διακύμανση της ζήτησης).

Στην παρούσα ενότητα ορίζονται οι βασικές έννοιες που αφορούν στον έλεγχο της κυκλοφορίας και πραγματοποιείται ανασκόπηση των σημαντικότερων στρατηγικών ελέγχου, εστιάζοντας στον έλεγχο φωτεινής σηματοδότησης των κόμβων, αρτηριών και δικτύων σε κατάσταση ισορροπίας ή μη ισορροπίας, όπως και στους αλγορίθμους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της σηματοδότησης. Ξεχωριστά εξετάζεται

ο σχεδιασμός της σηματοδότησης λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα στις παραμέτρους σχεδιασμού ως ένα σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη του πλαισίου διαμόρφωσης της παρούσας διατριβής.

2.1 Βασικοί ορισμοί

Η ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας και πιο συγκεκριμένα η χρήση σηματοδοτούμενων κόμβων σε ένα οδικό δίκτυο αποτελεί συνήθη πρακτική στο αστικό περιβάλλον. Ο έλεγχος της κυκλοφορίας σε διασταυρώσεις με χρήση σηματοδοτούμενων διατάξεων θεωρήθηκε αναγκαίος μετά την αυξανόμενη χρήση του αυτοκινήτου στις πόλεις στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Η σημερινή μορφή των σηματοδοτούμενων διατάξεων υλοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1917 στο Detroit, USA, από τον William Potts, ο οποίος εισήγαγε την κίτρινη ένδειξη για να διευκολύνει την ασφαλή κίνηση των πεζών και να διασφαλίσει την εκκαθάριση του κόμβου από την κυκλοφορία μεταξύ διαδοχικών πράσινων ενδείξεων εμπλεκόμενων ρευμάτων της κυκλοφορίας (McShane, 1999).

Ένας οδικός κόμβος αποτελείται από έναν αριθμό προσβάσεων με μία ή δύο κατευθύνσεις κυκλοφορίας. Οι κινήσεις που επιτρέπονται σε ένα κόμβο περιορίζονται είτε από τις κατευθύνσεις των προσβάσεων είτε από την εφαρμογή ρυθμιστικών κανόνων (π.χ. απαγόρευση αριστερής κίνησης). Οι κινήσεις που δεν παρουσιάζουν κοινό σημείο εμπλοκής (conflict point) στον χώρο ελιγμών του κόμβου, μπορούν να πραγματοποιηθούν παράλληλα με ασφάλεια, ενώ οι κινήσεις που παρουσιάζουν σημεία εμπλοκής ονομάζονται εμπλεκόμενες κινήσεις και πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα για την παράλληλη λειτουργία τους ανά περίπτωση.

Η κύρια λειτουργία ενός σηματοδοτούμενου κόμβου είναι ο χρονικός διαχωρισμός των εμπλεκόμενων κινήσεων κυκλοφορίας (όλων ή των περισσοτέρων) με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε όλες οι επιτρεπόμενες κινήσεις ενός κόμβου να εξυπηρετούνται, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την καθυστέρηση που προκύπτει από τη συγκεκριμένη ρύθμιση στην κάθε κίνηση για όλους τους χρήστες.

Ο σχεδιασμός των προγραμμάτων σηματοδότησης πραγματοποιείται βάσει των κυκλοφοριακών, λειτουργικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διασταυρούμενων ρευμάτων κυκλοφορίας (κινήσεων). Το πρόγραμμα σηματοδότησης ενός κόμβου αποτελείται από τις φάσεις (phases), τη διαδοχή των φάσεων και τους χρόνους των φάσεων (timings). Η χρονική περίοδος που απαιτείται για μία πλήρη διαδοχή των ενδείξεων των σηματοδοτών που συνθέτουν το πρόγραμμα σηματοδότησης αποτελεί την περίοδο σηματοδότησης.

Η φάση σηματοδότησης είναι ένα τμήμα της περιόδου όπου εξυπηρετείται μία κίνηση ή ένας συνδυασμός κινήσεων. Ο αριθμός των φάσεων σε ένα σηματοδοτικό πρόγραμμα καθορίζεται

από τα λειτουργικά, κυκλοφοριακά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διασταυρωμένων κινήσεων, αλλά και των χαρακτηριστικών των υπολοίπων χρηστών της διασταύρωσης (όπως πεζών, ποδηλατών, λεωφορείων, κτλ.). Η διαδικασία σχεδιασμού των φάσεων αποσκοπεί στην εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού κινήσεων, έτσι ώστε να μειώνεται ο αριθμός των φάσεων ενός προγράμματος και επομένως και η καθυστέρηση, διασφαλίζοντας όμως παράλληλα την ασφάλεια των χρηστών. Έτσι, σε μία φάση οι κινήσεις μπορεί να είναι είτε προστατευόμενες είτε επιτρεπόμενες. Προστατευόμενες στρέφουσες κινήσεις (protected turning movements) ονομάζονται οι κινήσεις που εξυπηρετούνται σε μία φάση χωρίς εμπλοκή με άλλες κινήσεις. Επιτρεπόμενες στρέφουσες κινήσεις (permitted turning movements) ονομάζονται οι κινήσεις που εξυπηρετούνται σε μία φάση ταυτόχρονα με μία άλλη κύρια εμπλεκόμενη κίνηση οχημάτων ή πεζών. Στο διάγραμμα διαδοχής φάσεων απεικονίζεται σχηματικά ο αριθμός και η διαδοχή φάσεων, καθώς και ο συνδυασμός κινήσεων που εξυπηρετούνται σε κάθε φάση. Η απεικόνιση του σηματοδοτικού προγράμματος συνδυάζει το διάγραμμα διαδοχής φάσεων και τους χρόνους πράσινης, κίτρινης και κόκκινης ένδειξης της κάθε φάσης. Προκειμένου να εξασφαλισθεί η ασφαλής μετάβαση στη διαδοχή των φάσεων προβλέπονται ενδιάμεσοι χρόνοι (χαμένοι χρόνοι) έτσι ώστε οι κινήσεις προηγούμενων φάσεων να έχουν εκκενώσει το χώρο ελιγμού του κόμβου πριν την εκκίνηση των αντίστοιχων εμπλεκόμενων κινήσεων επόμενης φάσης του προγράμματος.

Η επίλυση του προβλήματος εύρεσης βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης ενός κόμβου συνίσταται στην επιλογή κατάλληλων φάσεων και χρόνων πρασίνου με στόχο την επίτευξη της καλύτερης δυνατής λειτουργίας του κόμβου με παράλληλη ικανοποίηση ενός συνόλου περιορισμών. Συγκεκριμένα, καθορίζονται τα ακόλουθα:

- Ο συνδυασμός των κινήσεων σε φάσεις και ο συνολικός αριθμός των φάσεων του προγράμματος.
- Η διάρκεια της κάθε φάσης σηματοδότησης.
- Η διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης, που ισούται με το άθροισμα των χρόνων πρασίνου της κάθε φάσης σηματοδότησης και το άθροισμα των χαμένων χρόνων για λόγους ασφαλείας.
- Η χρονική μετατόπιση της έναρξης του προγράμματος σηματοδότησης στο πλαίσιο του συντονισμού μίας ακολουθίας σηματοδοτούμενων κόμβων για την επίτευξη της αδιάκοπης διέλευσης των οχημάτων.

2.2 Στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας

Οι στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας κατηγοριοποιούνται, σύμφωνα με τους Papageorgiou et al. (2003), ανάλογα με την χωρική αλληλεπίδραση με άλλους σηματοδοτούμενους κόμ-

βους, την χρονική περίοδο σχεδιασμού ή/ και υλοποίησης, καθώς και την μεθοδολογία εκτίμησης των χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας:

- (α) Οι στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την περιοχή στην οποία εφαρμόζονται σε περιπτώσεις μεμονωμένων κόμβων, συντονισμένων αρτηριών και συντονισμένων δικτύων. Τα σηματοδοτικά προγράμματα μεμονωμένων κόμβων επιλέγονται σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν άλλοι σηματοδοτούμενοι κόμβοι σε κοντινή απόσταση που η λειτουργία τους να επηρεάζει τον εν λόγω κόμβο. Σε αστικές περιοχές, στις οποίες υπάρχουν σηματοδοτούμενοι κόμβοι σε τέτοια απόσταση, που η λειτουργία ενός κόμβου επηρεάζει τις κυκλοφοριακές συνθήκες του άλλου, ο έλεγχος της κυκλοφορίας σχεδιάζεται και υλοποιείται, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη τους γειτονικούς κόμβους και να υπάρχει συντονισμός στα προγράμματα σηματοδότησης. Ανάλογα με τη τοποθεσία των επηρεαζόμενων κόμβων διακρίνονται οι στρατηγικές που αφορούν σε συντονισμένες αρτηρίες ή σε συντονισμένα δίκτυα.
- (β) Οι στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την χρονική περίοδο σχεδιασμού και υλοποίησης τους σε σταθερού χρόνου, επενεργούμενες (actuated) και προσαρμοστικές (adaptive). Πρόγραμμα σηματοδότησης σταθερού χρόνου είναι το πρόγραμμα που η περίοδος, οι χρόνοι πρασίνου της κάθε φάσης, καθώς και ο συνδυασμός των κινήσεων σε φάσεις παραμένουν σταθερά για όλη την περίοδο εφαρμογής του προγράμματος. Στρατηγικές σταθερού χρόνου σχεδιάζονται για συγκεκριμένες χαρακτηριστικές περιόδους της ημέρας, που έχουν κοινά κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά (όπως πρωινή ή απογευματινή αιχμή, περίοδος εκτός αιχμής, νυχτερινή περίοδος, κτλ.). Στην περίπτωση των επενεργούμενων προγραμμάτων σηματοδότησης υπάρχει αυτόματη διαμόρφωση του προγράμματος σηματοδότησης ανάλογα με την υφιστάμενη κυκλοφορία που καταγράφεται από ειδικούς φωρατές. Σε αυτή την περίπτωση σύμφωνα με τους προδιαγεγραμμένους κανόνες που έχουν οριστεί στο πρόγραμμα, μπορεί να τροποποιηθεί ο χρόνος πρασίνου ορισμένων φάσεων, να ενεργοποιηθεί ή να απενεργοποιηθεί μια φάση ή/ και να τροποποιηθεί η περίοδος του προγράμματος σηματοδότησης. Τέλος, στην περίπτωση του προσαρμοστικού ελέγχου, η κυκλοφορία καταγράφεται από ειδικούς φωρατές και γίνεται επανασχεδιασμός του προγράμματος σηματοδότησης σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις κυκλοφοριακές συνθήκες που έχουν προκύψει είτε από τα συλλεχθέντα δεδομένα είτε μέσω προβλέψεων κυκλοφορίας.
- (γ) Σύμφωνα με τη χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία εκτίμησης της συσσωρευμένης ουράς οχημάτων, διακρίνονται οι στρατηγικές που είναι κατάλληλες για περιπτώσεις που λειτουργούν υπό συνθήκες κορεσμού ή μη. Οι στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας που δεν λαμβάνουν υπόψη τις επιπτώσεις της συσσωρευμένης ουράς και της μη απορρόφη-

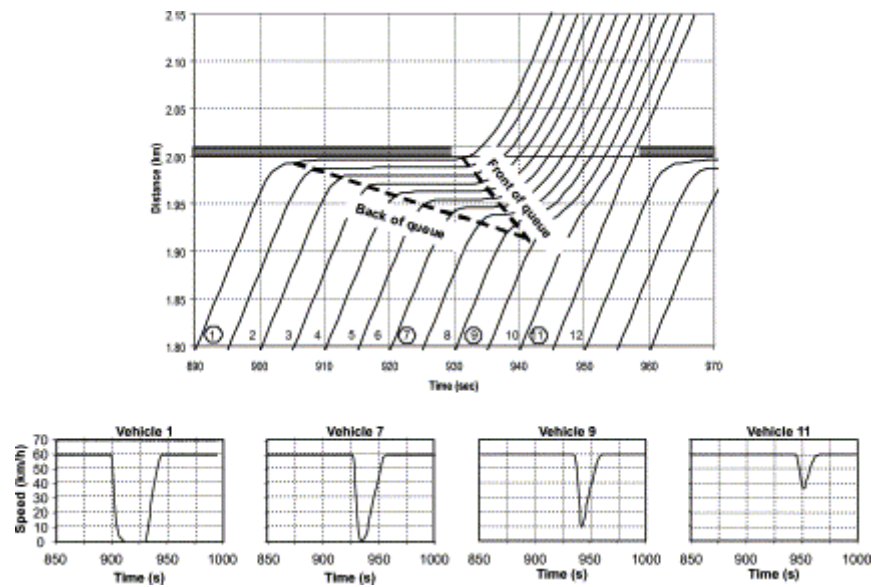
σής της σε κάθε κύκλο, δεν μπορούν να περιγράψουν τις συνθήκες υπερκορεσμού κυκλοφορίας με ακρίβεια, ειδικά όταν αυτές διατηρούνται για εκτεταμένο χρονικό διάστημα.

2.2.1 Σηματοδότηση μεμονωμένων κόμβων

Ένας κόμβος θεωρείται ότι είναι σηματοδοτικά μεμονωμένος όταν άλλοι σηματοδοτούμενοι κόμβοι απέχουν τέτοια απόσταση ώστε οι διελεύσεις των οχημάτων στον υπό εξέταση κόμβο να μην επηρεάζονται από τους γειτονικούς κόμβους, όπως επίσης, και η χωρητικότητα της διασταύρωσης να μην επηρεάζεται από τις κυκλοφοριακές συνθήκες των άλλων κόμβων (ανάντη και κατάντη).

Η ανάπτυξη, εφαρμογή και βελτιστοποίηση των στρατηγικών ελέγχου και ρύθμισης της κυκλοφορίας βασίζεται στην εκτίμηση της χρονικά εξαρτώμενης κυκλοφοριακής κατάστασης, η οποία εκφράζει την αποτελεσματική λειτουργία του κόμβου σε συνάρτηση με τον χρόνο. Σε πολλές περιπτώσεις βελτιστοποίησης προγραμμάτων σηματοδότησης ενός κόμβου, το πρόβλημα ορίζεται ως η εύρεση του βέλτιστου προγράμματος με σκοπό την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων ή των ουρών ή των στάσεων των οχημάτων που εξυπηρετούνται από τον κόμβο ή τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του κόμβου.

Το επίπεδο εξυπηρέτησης ενός κόμβου συνήθως προσδιορίζεται από τη μέση καθυστέρηση που ο χρήστης (το όχημα) βιώνει. Η μέση καθυστέρηση είναι ένας από τους ευρέως διαδεδομένους δείκτες απόδοσης ενός κόμβου και αποτελεί ένα πεδίο που πολλοί ερευνητές έχουν καταβάλει σημαντική προσπάθεια για την εκτίμησή της. Γενικά η καθυστέρηση ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του χρόνου που απαιτείται από ένα όχημα για να διασχίσει έναν κόμβο με φωτεινή σηματοδότηση από τον χρόνο που θα χρειαζόταν αν δεν υπήρχε σηματοδότηση. Η καθυστέρηση περιλαμβάνει τρεις βασικές οντότητες, την καθυστέρηση κατά την επιβράδυνση, την καθυστέρηση από την στάση και την καθυστέρηση κατά την επιτάχυνση. Αυτή η θεώρηση φαίνεται στο Σχήμα 2-1 (από τους Dion et al. 2004), όπου αποτυπώνονται οι προσομοιωμένες πορείες οχημάτων στο μικροσκοπικό μοντέλο INTEGRATION. Συγκεκριμένα φαίνεται ότι ορισμένα οχήματα πραγματοποιούν στάση στο σηματοδοτούμενο κόμβο είτε λόγω της κόκκινης ένδειξης (όχημα 1) είτε λόγω της ύπαρξης ουράς (όχημα 7), και παράλληλα αποτυπώνεται η μείωση της ταχύτητας κίνησης ακόμα και για τα οχήματα που δεν πραγματοποιούν στάση (όχημα 9 και 11).



Σχήμα 2-1: Προσομοιωμένα διαγράμματα κίνησης οχημάτων σε σηματοδοτούμενη πρόσβαση (Dion et al., 2004)

Μία από τις πρώτες διατυπώσεις για την εκτίμηση της καθυστέρησης, η οποία χρησιμοποιήθηκε από πολλούς ερευνητές, είναι το μοντέλο του Webster (1958), το οποίο είναι μία γραμμική συνάρτηση που έχει βασιστεί στο θεωρητικό υπόβαθρο της στοχαστικής θεώρησης των σταθερών καταστάσεων (steady-state stochastic models), αλλά και σε πειραματικά δεδομένα. Ο Webster (1958) διατύπωσε το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης, θεωρώντας μία κατανομή Poisson για τις αφίξεις, λαμβάνοντας υπόψη την καθυστέρηση που προκύπτει τόσο από τις ομοιόμορφες αφίξεις όσο και από τις τυχαίες. Το βασικό του όμως μειονέκτημα είναι ότι δεν εκτιμά την καθυστέρηση σε περιπτώσεις υπερκορεσμού. Ο Webster (1958) πρότεινε επίσης έναν προσδιορισμό της βέλτιστης περιόδου σηματοδότησης και των χρόνων πρασίνου των φάσεων βάσει της αναλογίας των ροών κορεσμού. Ο Allsop (1971) χρησιμοποίησε το βασικό μοντέλο καθυστέρησης του Webster και πρότεινε για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης σε σχέση με τους κυκλοφοριακούς φόρτους έτσι ώστε να εκτιμήσει τους χρόνους πρασίνου των φάσεων.

Ο Gazis (1964) παρουσίασε μία μεθοδολογία η οποία λαμβάνει υπόψη της συνθήκες υπερκορεσμού σε ένα δυναμικό περιβάλλον προσπαθώντας να εξισορροπήσει τις απομένουσες ουρές δύο διασταυρούμενων οδών και χρησιμοποιώντας ως αντικειμενική συνάρτηση τη συνολική καθυστέρηση. Τη συνολική καθυστέρηση χρησιμοποίησαν για την εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης υπερκορεσμένων κόμβων και δικτύων και οι Michalopoulos & Stephanopoulos (1977a, 1977b, 1978). Ο Rorbech (1968) μελέτησε τη διαδικασία δημιουργίας ουράς σε σηματοδοτημένες προσβάσεις στην έναρξη της κόκκινης ένδειξης, χρησιμοποιώντας τα θεμελιώδη μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής που περιγράφουν τη μακροσκοπική κίνηση των οχημάτων βάσει κανόνων της μηχανικής των ρευστών. Οι Stephanopoulos et al. (1979) επέ-

κτείνουν τη δυναμική θεώρηση της δημιουργίας και της εκκένωσης της ουράς, ενώ σε επόμενες εργασίες οι Michalopoulos et al. (1981) και οι Michalopoulos & Pisharody (1981) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας την ίδια λογική και λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό της μέγιστης ουράς στις επιμέρους προσβάσεις.

Η βελτιστοποίηση της σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου σε υπερκορεσμένες συνθήκες απασχόλησε την ακαδημαϊκή κοινότητα, προτείνοντας μοντέλα που είχαν ως στόχο την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων ή τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας των διασταυρώσεων, όπως οι Gazis & Potts (1963), Guardabassi et al. (1984), Improta & Cantarella (1984).

Για την εκτίμηση της καθυστέρησης στην περίπτωση ύπαρξης φαινομένων υπερκορεσμού και άλλοι ερευνητές προσπάθησαν να τροποποιήσουν το βασικό μοντέλο του Webster (1958), όπως οι Roupail & Akcelik (1992). Το Transportation Research Board (TRB) το 1985 δημοσίευσε στο Highway Capacity Manual (HCM) μία μεθοδολογία εκτίμησης της καθυστέρησης λόγω σηματοδότησης για μία σταθερή περίοδο 15 λεπτών (TRB, 1985), η οποία αναθεωρήθηκε και εμπλουτίστηκε το 1994 και 1997. Το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης λόγω σηματοδότησης αναθεωρήθηκε πάλι στο HCM2000 (TRB, 2000) και στο HCM2010 (TRB, 2010), συμπεριλαμβάνοντας στο υπολογισμό την ομοιόμορφη καθυστέρηση (uniform delay), την καθυστέρηση υπερκορεσμού (overflow delay) λόγω τυχαίων αφίξεων και ουρών υπερκορεσμού και την καθυστέρηση λόγω αρχικής ουράς. Επίσης, η μεθοδολογία της εκτίμησης της καθυστέρησης επεκτάθηκε ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι διακυμάνσεις της ζήτησης στη διάρκεια της περιόδου ανάλυσης. Έτσι προτάθηκε μία μεθοδολογία εκτίμησης της καθυστέρησης σε σύντομες διαδοχικές χρονικές περιόδους, οι οποίες έχουν κοινά χαρακτηριστικά και συνολικά συνθέτουν την εκτεταμένη περίοδο ανάλυσης. Μία τέτοια περίπτωση είναι η περίπτωση της πρωινής αιχμής, όπου παρατηρείται αρχικά αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, στη συνέχεια η κυκλοφοριακή κατάσταση διατηρείται σταθερή, αλλά σε υψηλά επίπεδα υπερκορεσμού, και τέλος ακολουθεί η μείωση του κυκλοφοριακού φόρτου σε χαμηλότερα επίπεδα. Η μεθοδολογία του HCM για την εκτίμηση της καθυστέρησης χρησιμοποιείται και σε εμπορικά λογισμικά για την εκτίμηση και βελτιστοποίηση προγραμμάτων σταθερού χρόνου, όπως το HCS (McTrans, 2018a), το SYNCHRO (Trafficware, 2017) και το SIDRA (Akcelik, 2015). Στις περισσότερες περιπτώσεις η ανάλυση και η βελτιστοποίηση του προγράμματος σηματοδότησης βασίζεται σε ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα 15 λεπτών, το οποίο αντιπροσωπεύει το διάστημα με τον υψηλότερο φόρτο. Με αυτό τον τρόπο όμως δεν λαμβάνεται υπόψη, είτε στην ανάλυση είτε στη βελτιστοποίηση, ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται η ουρά στον κόμβο, όταν ο φόρτος αυξάνει, αλλά και η δυνατότητα που παρέχει το πρόγραμμα σηματοδότησης για γρήγορη αποκατάσταση του επιπέδου εξυπηρέτησης μετά τον υπερκορεσμό. Ερευνητές (όπως οι Wong et al. 2002 και Tong et al. 2015) έχουν εκτιμήσει

την καθυστέρηση μέσω της μεθοδολογίας των πολλαπλών διαδοχικών χρονικών βημάτων (HCM2000 και HCM2010), η οποία αξιοποιεί τις διακυμάνσεις του κυκλοφοριακού φόρτου και συνεκτιμά στον υπολογισμό της την επίδρασή του (χωρικά και χρονικά), αφού σε κάθε διαδοχικό βήμα συνεκτιμάται η εναπομένουσα ουρά από το προηγούμενο βήμα.

Τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση του κόμβου σε όλη την υπερκορεσμένη περίοδο μελέτησαν και οι Chang & Lin (2000), οι οποίοι παρουσίασαν μία μέθοδο διακριτών δυναμικών βημάτων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της ουράς για την εύρεση της βέλτιστης περιόδου σηματοδότησης και των χρόνων πρασίνου των φάσεων. Ο Lan (2004) πρότεινε μία μέθοδο για την εύρεση της βέλτιστης περιόδου σηματοδότησης σε υπερκορεσμένες συνθήκες χρησιμοποιώντας το μοντέλο καθυστέρησης του HCM2000 και λαμβάνοντας υπόψη την έκταση της περιόδου ανάλυσης και τις παραμέτρους που ορίζουν τη ροή στις προσβάσεις του κόμβου. Οι Talmor & Mahalel (2007) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης υπό συνθήκες υπερκορεσμού έχοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την αύξηση της μέσης ροής των προσβάσεων του κόμβου. Οι Ioslovich et al. (2011) πρότειναν ένα συνεχές μοντέλο για την απλή περίπτωση των δύο προσβάσεων βασισμένο στο R-DMP μοντέλο των Haddad et al. (2009), χρησιμοποιώντας ως κριτήριο βελτιστοποίησης τη συνολική καθυστέρηση σε μία επαναληπτική διαδικασία. Οι Ren et al. (2013) επιλύσανε το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστων χρόνων σηματοδότησης θεωρώντας ότι οι χρόνοι πρασίνου των φάσεων ακολουθούν τη δυναμική ισορροπία του χρήστη, σύμφωνα με την οποία οι μέσες καθυστερήσεις των οχημάτων που αντιστοιχούν στις φάσεις σηματοδότησης είναι ίσες και μέγιστες. Οι Sun et al. (2016) εξέτασαν μία εκτεταμένη περίοδο ανάλυσης υπερκορεσμένων συνθηκών σε ένα μεμονωμένο κόμβο χωρίζοντάς την σε δύο περιόδους, την περίοδο συσσώρευσης της ουράς και την περίοδο εκκένωσης της ουράς, και πρότειναν μία επαναληπτική διαδικασία για την εύρεση της σχεδόν βέλτιστης λύσης θέτοντας ως στόχο στην πρώτη περίοδο τη διατήρηση της ουράς εντός του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου και στη δεύτερη περίοδο την ταχύτερη εκκένωση όλων των ουρών.

Τη θεωρία παιγνίων έχουν χρησιμοποιήσει ερευνητές για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης μεμονωμένων διασταυρώσεων. Οι Villalobos et al. (2008), προτείνουν τη χρήση ενός μη-συνεργατικού παιγνίου όπου ο κάθε παίκτης (σηματοδοτούμενη πρόσβαση) επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει την ουρά του. Οι Linglong et al. (2010) αναπαράστησαν έναν μεμονωμένο κόμβο χρησιμοποιώντας ένα παίγνιο συνεργασίας δύο παικτών, όπου οι δύο παίκτες είναι οι αντίστοιχες προσβάσεις και οι δύο στρατηγικές που αναλύονται αφορούν στο χρόνο του πρασίνου τους. Ο Khanjary (2013) χρησιμοποιεί ένα παίγνιο βασισμένο στο ολιγοπώλιο του Cournot, όπου οι παίκτες (σηματοδοτούμενες προσβάσεις) προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το χρόνο πρασίνου που τους αντιστοιχεί.

Πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί και στην επίλυση επενεργούμενων και προσαρμοστικών προγραμμάτων σηματοδότησης. Το 1965, ο Miller (1965) πρότεινε ένα μοντέλο που εκτιμά τη βέλτιστη χρονική στιγμή για τη μετάβαση από μία φάση σηματοδότησης σε μία άλλη, λαμβάνοντας υπόψη τους χαμένους χρόνους από τις διαδοχικές αλλαγές φάσεων. Αντίστοιχες προσεγγίσεις επενεργούμενων προγραμμάτων σηματοδότησης για μεμονωμένους κόμβους διατυπώθηκαν από ερευνητές όπως οι Robertson & Bretherton (1974) και Bang (1976). Μία άλλη λογική που μελετήθηκε από ερευνητές, όπως οι Hallworth (1980) και Barnes (1984), είναι η εύρεση όχι μόνο της χρονικής διάρκειας των επενεργούμενων φάσεων, αλλά και της διαδοχής των φάσεων και του πιθανού συνδυασμού τους. Το MOVA (Vincent & Peirce, 1988) παρουσιάστηκε από το TRRL ως ένας μικροεπεξεργαστής που τροποποιεί τους χρόνους των φάσεων ενός μεμονωμένου κόμβου χρησιμοποιώντας αναλυτικές μεθόδους και ευρετικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Το αντίστοιχο Σουηδικό εργαλείο, LHOVRA (SRA, 1991), αναπτύχθηκε αρχικά για μη αστικές οδούς από το SRA (Swedish Road Authority) με σκοπό να μειώσει τον αριθμό των ατυχημάτων και να βελτιώσει το επίπεδο εξυπηρέτησης των μεμονωμένων κόμβων.

Οι Head et al. (2006) μελέτησαν την περίπτωση των πολλαπλών ζητήσεων για εξυπηρέτηση μέσω της επενεργούμενης σηματοδότησης χρησιμοποιώντας μία προσέγγιση ανάλογη των γραφημάτων παρακολούθησης έργων, όπως γραφήματα Gantt, κρίσιμο μονοπάτι και την μέθοδο PERT. Οι Comert et al. (2009) πρότειναν έναν αλγόριθμο που συμπεριλαμβάνει το μήκος των ουρών στον υπολογισμό των μέγιστων χρόνων πρασίνου σε κάθε περίοδο σηματοδότησης, έτσι ώστε να εξυπηρετήσει με πιο αποτελεσματικό τρόπο τη διακύμανση της ζήτησης. Οι Agbolosu-Amison & Park (2009) χρησιμοποίησαν το χαρακτηριστικό μέγεθος δυναμικού χάσματος για τον προσδιορισμό του τερματισμού του χρόνου πρασίνου αν εντός αυτού του χρονικού διαστήματος δεν υπήρχαν αφίξεις οχημάτων. Οι Viti & Van Zuylen (2010) παρουσίασαν μία προσέγγιση για την εκτίμηση των ουρών και των χρόνων πρασίνου των φάσεων, βάσει της θεωρίας πιθανοτήτων για τις αφίξεις των οχημάτων, εκτιμώντας τη διακύμανση του μήκους της ουράς και λαμβάνοντας υπόψη τις χρονικές διακυμάνσεις στην καθυστέρηση των οχημάτων. Τη στοχαστική θεώρηση των αφίξεων των οχημάτων και τη δημιουργία ουράς έλαβαν υπόψη και οι Zhang & Wang (2011) για τον προσδιορισμό των ελάχιστων και μέγιστων χρόνων πρασίνου χρησιμοποιώντας στοιχεία σε πραγματικό χρόνο για το μήκος της ουράς. Οι He et al. (2014) διατύπωσαν το πρόβλημα για την περίπτωση των πολλαπλών ζητήσεων από διαφορετικά μέσα ως ένα μεικτό ακέραιο γραμμικό πρόβλημα (mixed-integer linear program, MILP). Οι Ribeiro & Simões (2016) βασίστηκαν στην αρχή της ελαχιστοποίησης του συνολικού χρόνου αναμονής των οχημάτων για την επίλυση του γραμμικού προβλήματος που διατύπωσαν με έναν αλγόριθμο διαδοχικής συμπληρωματικότητας θωρώντας ότι οι αφίξεις των οχημάτων ακολουθούν την κατανομή Poisson. Οι Shiri & Maleki (2017) χρησιμοποίησαν τεχνικές της ασαφούς λογικής για το δυναμικό προσδιορισμό

των μέγιστων χρόνων πρασίνου. Οι Wang et al. (2018) χρησιμοποίησαν το κρίσιμο διάκενο για την επιλογή της χρονικής στιγμής αλλαγής της φάσης, θεωρώντας ότι οι αφίξεις ακολουθούν κατανομή Poisson και επεκτείνοντας την προσέγγισή τους στην περίπτωση των γενικών κατανομών.

Ο Newell (1998) παρουσίασε μία από τις πρώτες ερευνητικές προσπάθειες για την χρήση προσαρμοστικών προγραμμάτων σηματοδότησης σε μεμονωμένους κόμβους χρησιμοποιώντας στο μοντέλο εκτίμησης ουρών. Ο De Schutter (2002) πρότεινε μία μέθοδο για την εύρεση των βέλτιστων χρονικών σημείων αλλαγής των φάσεων ενός προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου χρησιμοποιώντας την επέκταση του προβλήματος της γραμμικής συμπληρωματικότητας (Extended Linear Complementarity Problem) σε περιπτώσεις υπερκορεσμού. Οι Li & Prevedouros (2004) πρότειναν μία υβριδική μορφή βελτιστοποίησης και στρατηγική προσαρμοστικού ελέγχου βασιζόμενη σε κανόνες για υπερκορεσμένο μεμονωμένο κόμβο, όπου στόχος της προσέγγισης είναι η μεγιστοποίηση της ροής των οχημάτων στον κόμβο και ο έλεγχος του μήκους της ουράς των προσβάσεων. Οι Mirchandani & Zou (2007) ανέπτυξαν ένα στοχαστικό μοντέλο προσαρμοστικού ελέγχου για μεμονωμένο κόμβο χρησιμοποιώντας τη θεωρία των σταθερών καταστάσεων αναλύοντας τις ουρές των προσεγγίσεων σε ένα κυλιόμενο ορίζοντα. Οι Yang et al. (2015) προτείνουν τη χρήση μεθόδων ανίχνευσης οχημάτων μέσω βιντεοσκόπησης για την εύρεση βέλτιστων περιόδων σηματοδότησης σε υπερκορεσμένους κόμβους ελαχιστοποιώντας το μήκος των ουρών καθ' όλη την περίοδο υπερκορεσμού. Οι Chen & Sun (2016) πρότειναν ένα προσαρμοστικό μοντέλο που χρησιμοποιεί μικροσκοπική προσομοίωση για τον προσδιορισμό των αφίξεων των οχημάτων στο τέλος της ουράς και εξετάζει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αφίξεων, του μήκους της ουράς και των εναλλακτικών προγραμμάτων σηματοδότησης, ενώ η βελτιστοποίηση επιλύεται με δυναμικό προγραμματισμό. Οι Lee & Wong (2017) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση της σταδιακής συσσώρευσης της ουράς ανά λωρίδα και ένα μοντέλο προσαρμοστικού ελέγχου για τον περιορισμό της καθυστέρησης σε επίπεδο λωρίδας στο πλαίσιο ενός κυλιόμενου ορίζοντα. Οι Jin & Ma (2017) διαμόρφωσαν μία μέθοδο πολλαπλών πρακτόρων για τον στοχαστικό προσαρμοστικό έλεγχο του μεμονωμένου κόμβου ενσωματώνοντας τεχνικές εκμάθησης για την αναγνώριση της κυκλοφοριακής κατάστασης και των πιθανών ενεργειών. Τεχνικές ασαφούς λογικής έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης από ερευνητές για την επίλυση του προβλήματος του προσαρμοστικού ελέγχου, όπως οι Yang et al. (2012), Gao et al. (2014), Lee et al. (2017a, 2017b), Jovanović & Kukić (2017).

Το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης έχει επιλυθεί από ερευνητές χρησιμοποιώντας αλγορίθμους για την επίλυσή του, όπως γραμμικό προγραμματισμό, δυναμικό προγραμματισμό, ευρετικές τεχνικές, θεωρία παιγνίων, τεχνικές ασαφούς λογικής, μεταευρετικούς αλγορίθμους, κ.α.

Ο γενετικός αλγόριθμος (Genetic Algorithm) είναι ιδιαιτέρως διαδεδομένη μέθοδος αναζήτησης λύσεων στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστων σηματοδοτικών ρυθμίσεων και ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του σε μεμονωμένους κόμβους παρουσιάζονται από τους Chen & Shi (2002), Wan & Chen (2007), Agbolosu-Amison & Park (2009), Zhang et al. (2011), Benkheris & Ghoul (2013), Hale et al. (2015).

Τη δυναμική επίλυση του προβλήματος εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης προσέγγισαν οι Gu & Wang (1998) χρησιμοποιώντας ως αλγόριθμο επίλυσης τον αλγόριθμο προσομοιωμένης απόπτωσης (Simulated Annealing). Οι Ola et al. (2014) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο προσομοιωμένης απόπτωσης για την εύρεση βέλτιστου προγράμματος σε ένα χρονικό ορίζοντα είκοσι περιόδων σηματοδότησης ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των οχημάτων σε στάση. Οι Hale et al. (2015) συνέκριναν την χρήση τεσσάρων διαφορετικών ευρετικών αλγορίθμων επίλυσης του προβλήματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου, του γενετικού αλγορίθμου, του αλγορίθμου προσομοιωμένης απόπτωσης, του αλγορίθμου περιορισμένης αναζήτησης (Tabu search) και του αλγορίθμου Hill Climbing, καταλήγοντας ότι ο γενετικός αλγόριθμος και ο αλγόριθμος προσομοιωμένης απόπτωσης ήταν εξίσου αποτελεσματικοί στην εύρεση ολικών βέλτιστων λύσεων, σε αντίθεση με τους άλλους δύο εξεταζόμενους αλγορίθμους που δεν παρείχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τη βελτιστοποίηση των χρόνων πρασίνου των φάσεων σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο μελέτησαν οι Zhang et al. (2008) χρησιμοποιώντας τον ευρετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization). Οι Qu et al. (2008) εξέτασαν τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εύρεση βέλτιστου σηματοδοτικού προγράμματος σε έναν κόμβο με τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις, την ελαχιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης, την ελαχιστοποίηση των στάσεων και την μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του κόμβου. Οι He & Hou (2012) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony) και σύγκριναν την προσέγγισή τους με την μέθοδο του Webster και τον γενετικό αλγόριθμο. Ο Min (2017) ανέπτυξε ένα βελτιωμένο αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών για την εύρεση βέλτιστων λύσεων ελαχιστοποιώντας έναν συνδυασμό της μέσης καθυστέρησης, του αριθμού στάσεων και του αντίστροφου της χωρητικότητας του κόμβου. Ο αλγόριθμος αποικίας μελισσών (Bee Colony Algorithm) επιλέχθηκε από τους Jovanović & Teodorović (2017) για την εύρεση σταθερών προγραμμάτων σηματοδότησης σε μη-κορεσμένες και υπερκορεσμένες συνθήκες ελαχιστοποιώντας τη συνολική καθυστέρηση σε μία περίοδο ανάλυσης χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία των πολλαπλών διαδοχικών χρονικών βημάτων του HCM2010 (TRB, 2010). Οι Hao et al. (2018) εξέτασαν το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης αξιόπιστης σηματοδότησης ελαχιστοποιώντας τη μέση καθυστέρηση και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της μέσης καθυστέρησης έτσι ώστε να λάβουν υπόψη στο σχεδιασμό την αβεβαιότητα των φόρτων σχεδιασμού. Για την εύρεση των λύσεων χρησιμο-

ποίησαν τον αλγόριθμο αποικίας μελισσών σε συνδυασμό με τη μέθοδο περιορισμένης αναζήτησης (Tabu search).

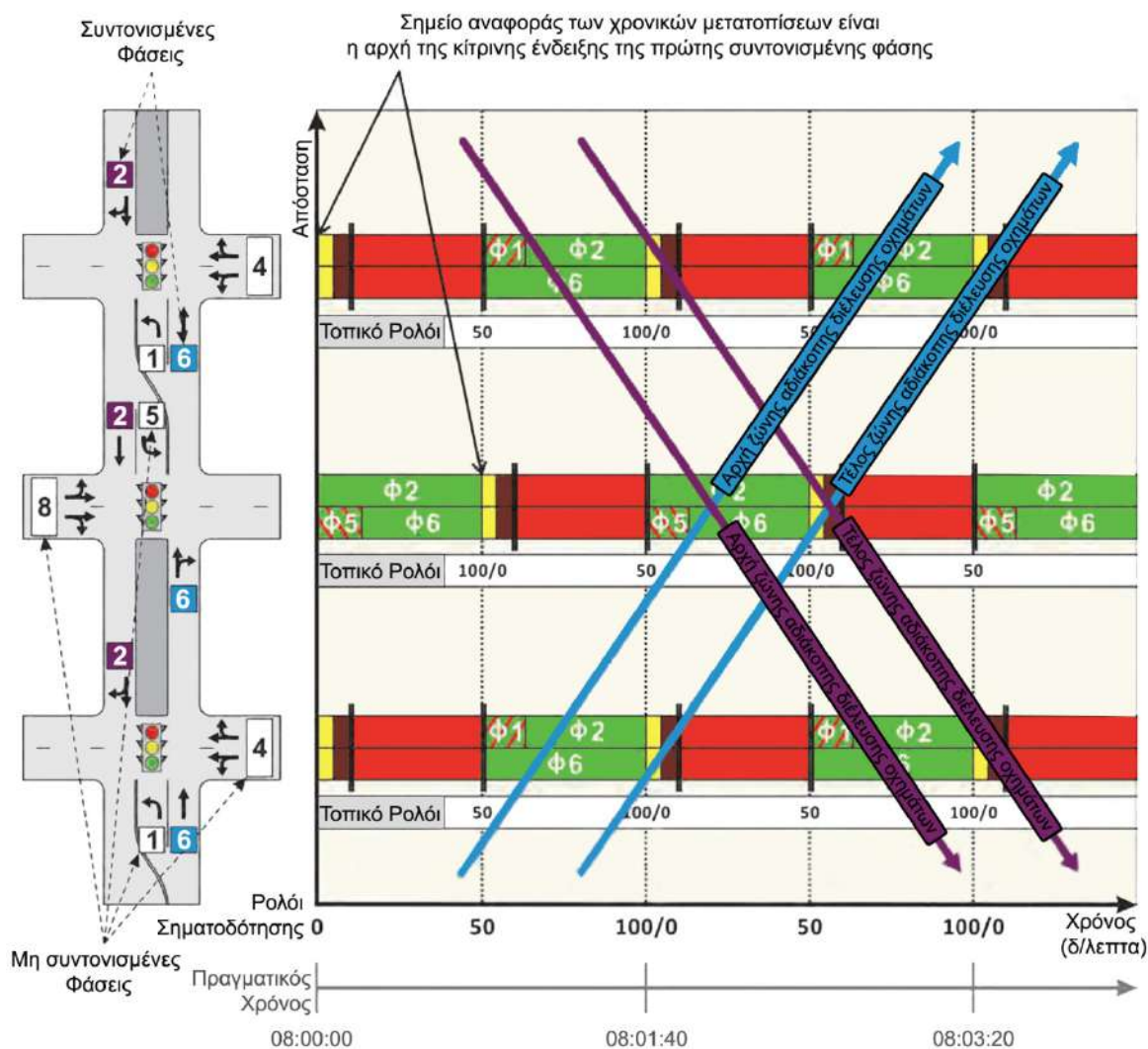
Οι Hale et al. (2017) πρότειναν τη χρήση του αλγορίθμου ταυτόχρονης στοχαστικής προσέγγισης διαταραχών (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, SPSA) για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου σταθερών ή προσαρμοστικών προγραμμάτων και τη συνέκριναν με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου.

Οι Hong et al. (1999) εξέτασαν την εύρεση σταθερού προγράμματος για έναν κόμβο με χρήση νευρωνικών δικτύων και τεχνικές ασαφούς λογικής ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις. Οι Chiou & Huang (2012) χρησιμοποίησαν έναν γενετικό αλγόριθμο ασαφούς λογικής για την εύρεση επενεργούμενου προγράμματος σηματοδότησης σε μεμονωμένο κόμβο για την προσομίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών σε περιπτώσεις μεικτής κυκλοφορίας και τη βελτίωση των χρόνων εύρεσης λύσεων του αλγορίθμου. Γενετικό αλγόριθμο ασαφούς λογικής χρησιμοποιούν και οι Qin et al. (2018) για την εύρεση προσαρμοστικού προγράμματος σηματοδότησης σε έναν κόμβο χρησιμοποιώντας δεδομένα πραγματικού χρόνου από βιντεοσκόπηση.

Άλλες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου συγκαταλέγονται στο ευρύ πεδίο των τεχνικών εκμάθησης. ενδεικτικά αναφέρονται οι Abdulhai et al. (2003), Ritcher (2007), Wen et al. (2007), Lu et al. (2008), El-Tantawy & Abdulhai (2010), Chanloha et al. (2012), Araghi et al. (2013), Isukapati & List (2015), Liang et al. (2018).

2.2.2 Σηματοδότηση αρτηριών και δικτύων

Στην περίπτωση των συντονισμένων αρτηριών ή δικτύων οι μέθοδοι που έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν λαμβάνουν υπόψη την επιλογή της διαδρομής ή όχι. Η περίπτωση που η εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης δεν επηρεάζεται από την επιλογή της διαδρομής αντιστοιχεί κυρίως σε περιπτώσεις συντονισμού αρτηριών, όπου ο σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση των χρόνων πρασί-νου των φάσεων των σηματοδοτούμενων κόμβων κατά μήκος των αρτηριών και η εύρεση της χρονικής μετατόπισης της έναρξης των προγραμμάτων, εξασφαλίζοντας μέγιστες χρονικές ζώνες αδιάκοπης διέλευσης (bandwidth) για τα οχήματα που διανύουν την αρτηρία.



Σχήμα 2-2: Διάγραμμα χρόνου – απόστασης μίας συντονισμένης σηματοδοτούμενης αρτηρίας (Urbanik et al., 2015)

Οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες, στην περίπτωση που η εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης δεν επηρεάζεται από την επιλογή της διαδρομής, καταγράφονται από τους Morgan & Little (1964), οι οποίοι μελέτησαν τη μεγιστοποίηση του εύρους της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης σε μία αρτηρία δύο κατευθύνσεων θεωρώντας δεδομένα την περίοδο σηματοδότησης και τους χρόνους πρασίνου των φάσεων των κόμβων. Ο Little (1966) επέκτεινε την εργασία αυτή μελετώντας τη μεγιστοποίηση του εύρους της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης σε μία αρτηρία δύο κατευθύνσεων χρησιμοποιώντας MILP και έχοντας ως δεδομένα την αναλογία πράσινης/ κόκκινης ένδειξης προσδιόρισε την περίοδο σηματοδότησης και τη χρονική μετατόπιση των προγραμμάτων. Ο Allsop (1968) παρουσίασε μία διαφορετική προσέγγιση στην εύρεση της βέλτιστης συντονισμένης σηματοδότησης ελαχιστοποιώντας τη συνολική καθυστέρηση του συστήματος. Ο Robertson (1969) στο TRANSYT χρησιμοποιώντας αναλυτικό προσδιορισμό των γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των κόμβων και λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό αφίξεων, τροποποιεί τις ρυθμίσεις σηματοδότησης μέσω του Hill Climbing Αλγορίθμου έως ότου δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση στο

δείκτη απόδοσης που ορίζεται ως ένας συνδυασμός του χρόνου μετακίνησης και των στάσεων. Το TRANSYT έχει αναπτυχθεί και για την περίπτωση της βελτιστοποίησης σηματοδοτούμενου δικτύου και έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα ερευνητικών εργασιών και πρακτικών εφαρμογών. Η συνδυασμένη ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και της μεγιστοποίησης της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης εξετάστηκε επίσης και από τους Cohen (1983), Cohen & Liu (1986), Liu (1988).

Οι Messer et al. (1973), βασιζόμενοι στην εργασία των Morgan & Little (1964), ανέπτυξαν τον αλγόριθμο PASSER II που είναι ένα μακροσκοπικό ντετερμινιστικό μοντέλο βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό της διαδοχής των φάσεων, τη χρονική μετατόπιση των προγραμμάτων των κόμβων και της περιόδου σηματοδότησης για μία αρτηρία δύο κατευθύνσεων. Το PASSER-IV που αναπτύχθηκε από τους Chaudhary & Messer (1991) έχει σχεδιαστεί και για την περίπτωση των σηματοδοτούμενων δικτύων. Οι Little et al. (1981) ανέπτυξαν το λογισμικό MAXBAND, το οποίο προσδιορίζει την περίοδο σηματοδότησης, το συντονισμό των σηματοδοτούμενων κόμβων, τη διαδοχή των φάσεων στους κόμβους έχοντας ως στόχο τη μεγιστοποίηση της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης σε μία αρτηρία δύο κατευθύνσεων λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς συντελεστές για κάθε κατεύθυνση. Το μοντέλο που στηρίζεται το MAXBAND για τη βελτιστοποίηση είναι επίσης MILP. Οι Chang et al. (1988) επέκτειναν το μοντέλο σε MAXBAND-86 έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα πολλαπλών αρτηριών και να συμπεριλαμβάνει το σχεδιασμό φάσεων με αριστερές στροφές. Ως συνέχεια του MAXBAND, οι Gartner et al. (1990) ανέπτυξαν το MULTIBAND, στο οποίο η βέλτιστη λύση για την περίοδο σηματοδότησης, τις χρονικές μετατοπίσεις, τις ταχύτητες κίνησης και τις διαδοχές των φάσεων προσδιορίζεται στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση του συνδυασμού των χρονικών ζωνών αδιάκοπης διέλευσης σε μία αρτηρία δύο κατευθύνσεων. Το MULTIBAND-96 αναπτύχθηκε στη συνέχεια από τους Stamatiadis & Gartner (1996) για την περίπτωση συντονισμού πολλαπλών αρτηριών σε ένα δίκτυο. Ο Yang (2001) συνέκρινε διαφορετικές μεθόδους εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης για μία αρτηρία καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η μεγιστοποίηση της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης παρέχει καλύτερα αποτελέσματα στη συνολική λειτουργία του συστήματος σε σχέση με μεθόδους που επιχειρούν να βελτιστοποιήσουν την καθυστέρηση αρτηριών. Οι Tian & Urbanik (2007) πρότειναν την επίλυση του προβλήματος της εύρεσης χρονικών μετατοπίσεων αναλύοντας την αρτηρία σε μικρότερα υποσυστήματα βάσει των χαρακτηριστικών των μετακινήσεων μεγιστοποιώντας τη χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης μίας κατεύθυνσης και μερικές χρονικές ζώνες αδιάκοπης διέλευσης της άλλης κατεύθυνσης. Την προσέγγιση της μεγιστοποίησης της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης με τον παράλληλο προσδιορισμό των μεταβλητών ορίων ταχύτητας χρησιμοποίησαν και οι De Nunzio et al. (2015) επιλύοντας το πρόβλημα συντονισμού μίας αρτηρίας ως ένα MILP.

Μέθοδοι υπολογιστικής νοημοσύνης χρησιμοποιήθηκαν από πολλούς ερευνητές για την επίλυση του προβλήματος εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης. Οι μέθοδοι υπολογιστικής νοημοσύνης διευκολύνουν την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων συνδυάζοντας μεθόδους που συναντιούνται στη φύση με υπολογιστικές μεθόδους, όπως νευρωνικά δίκτυα, ασαφή συστήματα, εξελικτικούς αλγορίθμους, ευρετικούς αλγορίθμους, αλγορίθμους σμήνους, ενισχυτικής μάθησης, κ.α.

Οι Nakatsuji & Kaku (1991) πρότειναν τη χρήση ενός διεπίπεδου νευρωνικού δικτύου το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των συνθηκών και τη βελτιστοποίηση μέσω σταδιακών βημάτων για την εύρεση των βέλτιστων ρυθμίσεων. Τη βελτιστοποίηση αρτηριών συμπεριλαμβάνοντας φωτεινή σηματοδότηση, στρατηγικές ελέγχου εισόδων αυτοκινητοδρόμων, εμφάνιση μεταβλητών μηνυμάτων για τον έλεγχο και την πληροφόρηση της διαδρομής των οδηγών, μελέτησε ο Papageorgiou (1995) επιλύοντας το γραμμικό πρόβλημα βάσει της προσέγγισης αποθήκευσης-και-προώθησης (store-and-forward) με χρήση νευρωνικών δικτύων.

Τεχνικές ασαφούς λογικής έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για την εύρεση βέλτιστων σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε μία αρτηρία ή σε ένα δίκτυο χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επιλογή της διαδρομής από τους χρήστες. Οι Nakatsuyama et al. (1984) πρότειναν τη χρήση τεχνικών ασαφούς λογικής για τη ρύθμιση των σηματοδοτικών προγραμμάτων σε μία αρτηρία ελαχιστοποιώντας την καθυστέρηση κατά μήκος της αρτηρίας. Οι Bi et al. (2018) πρότειναν τη χρήση μίας προσέγγισης τύπου-2 ασαφούς λογικής όπου σε δύο επίπεδα γίνεται η βελτιστοποίηση των χρόνων πρασίνων των κόμβων και ο συντονισμός τους λαμβάνοντας υπόψη και παραμέτρους αβεβαιότητας.

Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν μετα-ευρετικούς αλγορίθμους για την εύρεση των βέλτιστων ρυθμίσεων σε αρτηρίες ή δίκτυα χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την επιλογή της διαδρομής. Οι Foy et al. (1992) πρότειναν τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου για την εύρεση των χρόνων πρασίνου σε ένα σηματοδοτούμενο δίκτυο ελαχιστοποιώντας το χρόνο μετακίνησης εντός του δικτύου, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη το συντονισμό μεταξύ γειτονικών κόμβων. Οι Hadi & Wallace (1993) εισήγαγαν στο TRANSYT-7F δύο υβριδικές προσεγγίσεις με τον γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση όλων των σηματοδοτικών ρυθμίσεων. Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιούσε τον γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση της περιόδου σηματοδότησης και τη διαδοχή των φάσεων και η δεύτερη προσέγγιση συμπεριλάμβανε και τις χρονικές μετατοπίσεις, ενώ οι χρόνοι πρασίνου των φάσεων προκύπταν από τον αλγόριθμο Hill Climbing. Τη δυναμική θεώρηση του προβλήματος και την επίλυσή του με γενετικό αλγόριθμο εξέτασαν οι Abu-Lebdeh & Benekohal (1997) μεγιστοποιώντας τη δυνητική ροή σε μία αρτηρία. Οι Park et al. (1999) και Park et al. (2001) χρησιμοποίησαν τον γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση της περιόδου σηματοδότησης, των χρόνων πρασίνου των φάσεων, τις χρονικές μετατοπίσεις

και τη διαδοχή των φάσεων βελτιστοποιώντας την απόδοση της αρτηρίας μέσω προσομοίωσης. Οι Girianna & Benekohal (2002) αντιμετώπισαν το πρόβλημα συντονισμού πολλών αρτηριών σε ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο και επιλύοντας το πρόβλημα της δυναμικής δημιουργίας και εκκένωσης ουρών σε υπερκορεσμένους κόμβους. Ο Ceylan (2006) συνδύασε τον γενετικό αλγόριθμο με τον αλγόριθμο αναρρίχησης (Hill Climbing) του TRANSYT προτείνοντας μία μέθοδο για τη μείωση του χώρου αναζήτησης λύσης (ADESS) για την εύρεση των σηματοδοτικών ρυθμίσεων ενός δικτύου. Ο Stevanovic et al. (2008) παρουσίασε τη βελτιστοποίηση των σηματοδοτικών ρυθμίσεων για οχήματα δημόσιων συγκοινωνιών και οχήματα ιδιωτικής χρήσης χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο σε συνδυασμό με μικροσκοπική προσομοίωση στο VISSIM. Ο Kesur (2009) πρότεινε ένα τροποποιημένο γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε δίκτυα υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης. Τον γενετικό αλγόριθμο χρησιμοποίησαν και οι Singh et al. (2011) για την εύρεση της βέλτιστης προσαρμοστικής σηματοδότησης σε ένα δίκτυο σε πραγματικό χρόνο διατηρώντας σταθερή την περίοδο σηματοδότησης και τροποποιώντας τους χρόνους των φάσεων. Οι Liu & Chang (2011) πρότειναν τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε μία αρτηρία λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική εξέλιξη της ουράς σε οδικά τμήματα με λωρίδες μεικτής χρήσης και την αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών κόμβων σε υπερκορεσμένες συνθήκες. Οι Li & Schonfeld (2015) ανέπτυξαν μία συνδυασμένη προσέγγιση του γενετικού αλγορίθμου και του αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης για την εύρεση των σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε μία αρτηρία βάσει του cell-transmission model, CTM, (Daganzo, 1994). Οι Christofa et al. (2016) χρησιμοποίησαν τον γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε μία αρτηρία σε πραγματικό χρόνο ελαχιστοποιώντας το χρόνο διάνυσης των χρηστών λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό πληρότητας των οχημάτων ιδιωτικής και δημόσιας χρήσης.

Οι Hadi & Wallace (1994) εισήγαγαν τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της διαδοχής των φάσεων στο TRANSYT-7F χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο της προσομοιωμένης ανόπτησης Cauchy (Cauchy Simulated Annealing) μεγιστοποιώντας το χαρακτηριστικό μέγεθος που ορίζει στο TRANSYT-7F τη δυνατότητα εξυπηρέτησης της κυκλοφορίας. Οι Oda et al. (1997) εξέτασαν τη χρήση του αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε μία αρτηρία και σε δίκτυα. Οι Yun & Park (2006) σύγκριναν την αποτελεσματικότητα τριών αλγορίθμων, του γενετικού αλγορίθμου, του αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης και του αλγορίθμου OptQuest, που ενσωματώνει τον αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης (Scatter search), την μέθοδο περιορισμένης αναζήτησης (Tabu search) και τα νευρωνικά δίκτυα. Η αντικειμενική τους συνάρτηση ήταν η ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής σε ουρά και η αξιολόγηση των παραγόμενων λύσεων πραγματοποιήθηκε μέσω του μικροσκοπικού μοντέλου CORSIM.

Χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) έχουν χρησιμοποιήσει οι Zhao et al. (2006) για την εύρεση των χρόνων πρασί-νου των φάσεων και του συντονισμού των κόμβων σε μία αρτηρία μεγιστοποιώντας τη ροή των οχημάτων στην αρτηρία. Οι Peng et al. (2009) πρότειναν τη χρήση της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εύρεση των σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε ένα σύστημα δύο κόμβων. Οι Dong et al. (2011) πρότειναν και συνέκριναν διαφορετικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης για την επίλυση της εύρεσης βέλτιστων προγραμμάτων σηματοδότησης. Οι αλγόριθμοι που εξέτασαν περιλάμβαναν: τον χαοτικό γενετικό αλγόριθμο, τον χαοτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, τον συνδυασμένο αλγόριθμο προσομοιωμένης ανόπτησης και βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και τον καταστροφικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Οι Zhang et al. (2017) βελτιστοποίησαν τη λειτουργία ενός σηματοδοτούμενου δικτύου ως προς τη συνολική καθυστέρηση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Οι Malecki et al. (2017) χρησιμοποίησαν επίσης τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εύρεση σταθερών προγραμμάτων σηματοδότησης σε ένα δίκτυο και το σύγκριναν με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου και της μεθόδου διαφορικής εξέλιξης (differential evolution) που προτείνουν στην εργασία τους. Οι Wen & Wu (2004) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με βάση την λειτουργία των αποικιών των μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε ένα δίκτυο ελαχιστοποιώντας την καθυστέρηση. Οι Putha et al. (2011) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών για τη σηματοδότηση δικτύων σε υπερκορεσμένες συνθήκες έχοντας ως σκοπό την ταχύτερη εκκένωση των ουρών. Οι Jovanović et al. (2017) χρησιμοποίησαν τη βελτιστοποίηση αποικίας μελισσών για την εύρεση βέλτιστων σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε αρτηρία και δίκτυο και τη συνέκριναν με τη βελτιστοποίηση της προσομοιωμένης ανόπτησης. Την εξέταση του προβλήματος της εύρεσης ρυθμίσεων σηματοδότησης σε δίκτυο υπό δυναμική φόρτιση με ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων των οχημάτων και των πεζών πραγματοποίησαν οι Gao et al. (2018) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο αποικίας μελισσών και τον αλγόριθμο αναζήτησης αρμονίας.

O Maher (2008) και οι Maher et al. (2013) πρότειναν τη χρήση της μεθόδου της διεντροπίας (cross-entropy method) για την εύρεση κατάλληλων σηματοδοτικών ρυθμίσεων για έναν κυκλικό κόμβο με σκοπό την ελαχιστοποίηση των πυκνοτήτων των κελιών του CTM του Daganzo (1994) στην περίοδο ανάλυσης.

Οι Agbolosu-Amison et al. (2009) συνέκριναν τη χρήση τριών αλγορίθμων βελτιστοποίησης για μία σηματοδοτούμενη αρτηρία, του αλγορίθμου αναζήτησης αρμονίας (Harmony search), του γενετικού αλγορίθμου και του αλγορίθμου OptQuest, που ενσωματώνει τον αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης (Scatter search), την μέθοδο περιορισμένης αναζήτησης (Tabu

search) και νευρωνικά δίκτυα. Ο αλγόριθμος αναζήτησης αρμονίας χρησιμοποιήθηκε από τους Gao et al. (2016) για την επίλυση του δυναμικού προβλήματος της εύρεσης σηματοδότησης σε ένα δίκτυο εξετάζοντας το χρονικό διάστημα των τριάντα ή εξήντα δευτερολέπτων σε διαδοχικά χρονικά βήματα των πέντε δευτερολέπτων. Οι Gao et al. (2017) χρησιμοποίησαν και συνέκριναν τη χρήση τριών μεθόδων βελτιστοποίησης, του αλγορίθμου Java, του αλγορίθμου αναζήτησης αρμονίας και του αλγορίθμου κύκλου νερού (water cycle algorithm) για την εύρεση των σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε ένα δίκτυο ελαχιστοποιώντας τη συνολική καθυστέρηση στο δίκτυο για όλη την περίοδο ανάλυσης. Η προσομοίωση των συνθηκών πραγματοποιείται μέσω του CTM (Daganzo, 1994).

Οι Cabezas & García (2018) πρότειναν τη χρήση του αλγορίθμου περιορισμένης αναζήτησης (Tabu search) εντείνοντας την αναζήτηση από μία ακολουθία διαδικασιών αναζήτησης γειτονικών λύσεων, όπως στη περίπτωση της αναζήτησης μεταβλητής γειτονίας ή μεταβλητής γειτνίασης (Variable Neighbourhood Search) για το συντονισμό πολλαπλών αρτηριών σε ένα δίκτυο.

Πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί και στην επίλυση επενεργούμενων και προσαρμοστικών προγραμμάτων σηματοδότησης αρτηριών και δικτύων, που επιδίδουν στο επιλυόμενο πρόβλημα επιπλέον βαθμούς πολυπλοκότητας, αφού τα χρονικά σημεία έναρξης και λήξεων των πράσινων ενδείξεων των κόμβων που ζητείται ο συντονισμός τους δεν είναι δεδομένα. Οι Jovanis & Gregor (1986) μελέτησαν την προσαρμογή του τέλους της πράσινης ένδειξης των συντονισμένων φάσεων στο τέλος της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης των οχημάτων. Ο Skabardonis (1996) πρότεινε μεθόδους για τον μετασχηματισμό σταθερών προγραμμάτων που έχουν υπολογιστεί βάσει των MAXBAND, PASSER και TRANSYT σε επενεργούμενα προγράμματα αρτηριών και δικτύων, προσδιορίζοντας τις χρονικές μετατοπίσεις των επενεργούμενων προγραμμάτων βάσει των μέσων εκτιμήσεων της αρχής των επενεργούμενων συντονισμένων φάσεων. Ο Chang (1996) πρότεινε επίσης τη χρήση μίας δεύτερης διαδικασίας βελτιστοποίησης για τον μετασχηματισμό σταθερών προγραμμάτων σε επενεργούμενα στο πλαίσιο λειτουργίας μίας αρτηρίας ή ενός δικτύου. Οι Shoup & Bullock (1999) εξέτασαν τη χρήση των παρατηρούμενων χρόνων διάνυσης των συνδέσμων για το πρώτο όχημα της συστάδας οχημάτων στον συντονισμό αρτηρίας για τη βελτίωση των χρονικών μετατοπίσεων. Οι Abbas et al. (2001) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο πραγματικού χρόνου εύρεσης των χρονικών μετατοπίσεων, ο οποίος προσαρμόζει διαρκώς τις χρονικές μετατοπίσεις με σκοπό την ομαλή διέλευση μίας συστάδας οχημάτων σε μία αρτηρία, μετατοπίζοντας το χρονικό διάστημα που εμφανίζεται η πράσινη ένδειξη έτσι ώστε να ενσωματωθεί μεγαλύτερο μέρος του ιστογράμματος επενεργούμενης κατάληψης. Οι Chang & Sun (2004) παρουσίασαν μία δυναμική μέθοδο για την εύρεση σηματοδοτικών προγραμμάτων σε υπερκορεσμένα δίκτυα χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο τύπου διακόπτη (bang-bang-like model) για

τους υπερκορεσμένους κόμβους και το TRANSYT για τους κόμβους που δεν είναι υπερκορεσμένοι. Οι Yin et al. (2007) πρότειναν μία μέθοδο βελτίωσης των χρονικών μετατοπίσεων σε μία αρτηρία με επενεργούμενες φάσεις σε συνέχεια της εφαρμογής και αξιολόγησής τους βάσει μετρημένων μεγεθών, έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερος συντονισμός. Οι Zhang & Yin (2008) πρότειναν την επέκταση του κλασσικού MILP προβλήματος της αξιόπιστης (robust) εύρεσης βέλτιστων χρονικών μετατοπίσεων σε μία επενεργούμενη αρτηρία θεωρώντας ως στοιχείο αβεβαιότητας την αρχή και το τέλος των συντονισμένων φάσεων για την εύρεση ενός βέλτιστου συντονισμού και χρησιμοποιώντας την Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) για τον περιορισμό των απωλειών από το μη καλό συντονισμό της αρτηρίας. Την ταυτόχρονη εύρεση της κοινής περιόδου σηματοδότησης, των χρονικών μετατοπίσεων, της διαδοχής των φάσεων, των χρόνων πρασίνου και των ελάχιστων/μέγιστων χρόνων πρασίνου των ημι-επενεργούμενων φάσεων πρότειναν οι Zhang & Lou (2013) διατυπώνοντας το πρόβλημα ως ένα μεικτό ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα, που επιλύεται με την κλασσική προσέγγιση του γενετικού αλγορίθμου και με μία ευρετική μέθοδο που βασίζεται στον γενετικό αλγόριθμο για ταχύτερη επίλυση. Οι Kim et al. (2015) πρότειναν μία μέθοδο για την αξιολόγηση του δυναμικού συντονισμού των ημι-επενεργούμενων αρτηριών, την οποία και εφάρμοσαν για τη περαιτέρω βελτίωση των χρονικών μετατοπίσεων αρτηρίας (Kim et al., 2016).

Επίσης, προσαρμοζόμενα συστήματα στις τρέχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες ενός σηματοδοτούμενου δικτύου έχουν εφαρμοστεί σε αστικά δίκτυα. Οι βασικότερες στρατηγικές ελέγχου σε πραγματικό χρόνο αναφέρονται στα επόμενα βάσει της λειτουργικής τους αρχιτεκτονικής που κατατάσσονται σε στρατηγικές αποκεντρωμένης λειτουργικής αρχιτεκτονικής, σε στρατηγικές ιεραρχικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής και σε στρατηγικές κεντρικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής σύμφωνα με τον Αμπουντλάας (2009).

Στρατηγικές αποκεντρωμένης λειτουργικής αρχιτεκτονικής έχουν υλοποιηθεί στα συστήματα OPAC (Gartner, 1983), COP (Sen & Head, 1997) και PRODYN (Farges et al., 1983), όπου η σηματοδότηση ρυθμίζεται σε κάθε κόμβο λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τις τοπικές συνθήκες λειτουργίας του κόμβου και σε περιορισμένο βαθμό τις συνθήκες στους γειτονικούς κόμβους. Συγκεκριμένα το OPAC επιλύει ένα πρόβλημα δυναμικού προγραμματισμού για την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων και των στάσεων των οχημάτων τροποποιώντας την περίοδο σηματοδότησης, τους χρόνους πρασίνου και τις χρονικές μετατοπίσεις και έχοντας ως περιορισμό μόνο τις ελάχιστες και μέγιστες διάρκειες των χρόνων. Η περαιτέρω ανάπτυξη του προγράμματος, ROPAC (Gartner et al., 1991), ενσωμάτωσε τη πρόβλεψη της κυκλοφορίας και τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης σε ένα κυλιόμενο ορίζοντα, ενώ το DynaROPAC (Valdes & Paz, 2004) ενσωμάτωσε και το δυναμικό καταμερισμό της κυκλοφορίας. Το PRODYN χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο δυναμικού προγραμματισμού για τον προσ-

διορισμό του ποσοστού πρασίνου στις φάσεις με σκοπό την ελαχιστοποίηση των συνολικών καθυστερήσεων σε ένα κυλιόμενο ορίζοντα 75 δευτερολέπτων.

Στρατηγικές ιεραρχικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής, όπως τα συστήματα SCOOT (Hunt et al., 1982), SCATS (Lowrie, 1982), MOTION (Bielefeldt & Busch, 1994), UTOPIA (Mauro & Di Taranto, 1989) και το RHODES (Mirchandani & Head, 1998), ρυθμίζουν τη σηματοδότηση σε επίπεδο μεμονωμένου κόμβου, επίπεδο ομάδας κόμβων ή επίπεδο δικτύου. Το SCOOT χρησιμοποιεί μία ευρετική μεθοδολογία βελτιστοποίησης πραγματικού χρόνου για την εκτίμηση των χρόνων πρασίνου των φάσεων, της περιόδου σηματοδότησης και των χρονικών μετατοπίσεων των προγραμμάτων για την ελαχιστοποίηση της μέγιστης ροής κορεσμού σε κάθε πρόσβαση σε τακτά χρονικά διαστήματα (πέντε δευτερολέπτων για την αυξομείωση των φάσεων, μίας περιόδου σηματοδότησης για τις χρονικές μετατοπίσεις και πέντε λεπτών για την αυξομείωση της περιόδου σηματοδότησης). Το SCATS χρησιμοποιεί μία υβριδική πλατφόρμα όπου λαμβάνονται αποφάσεις μεμονωμένα για κάθε κόμβο και σε ένα ανώτερο επίπεδο συνολικά για κάθε υποδίκτυο κόμβων, σε κάθε περίοδο σηματοδότησης, αναλύοντας τα κυκλοφοριακά μεγέθη των προσβάσεων των κόμβων. Το MOTION χρησιμοποιεί μαθηματικό πρότυπο για τη εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο των βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών στο δίκτυο και υπολογίζει τις ρυθμίσεις σηματοδότησης κάθε 5, 10 ή 15 λεπτά. Οι ρυθμίσεις των χρόνων πρασίνου των φάσεων πραγματοποιούνται για κάθε κόμβο από το κεντρικό σύστημα και τροποποιούνται κατάλληλα σε τοπικό επίπεδο βάσει των τοπικών κυκλοφοριακών συνθηκών. Το UTOPIA είναι επίσης ένα υβριδικό σύστημα που σε ανώτερο επίπεδο επιλύεται η βελτιστοποίηση του δικτύου και παρέχονται κατευθύνσεις και περιορισμοί στους τοπικούς ελεγκτές οι οποίοι βάσει των τοπικών κυκλοφοριακών συνθηκών πραγματοποιούν βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων των κόμβων. Το RHODES έχει επίσης μία ιεραρχική δομή τριών επιπέδων, όπου στο ανώτερο επίπεδο προσδιορίζονται οι κυκλοφοριακοί φόρτοι στο δίκτυο, στο ενδιάμεσο επίπεδο πραγματοποιούνται εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών λειτουργίας του δικτύου (όπως μήκη ουρών και καθυστερήσεις) και στο χαμηλότερο επίπεδο προσομοιώνεται η κίνηση των οχημάτων μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Η βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων σηματοδότησης πραγματοποιείται μέσω του αλγορίθμου REALBAND των Dell'Olmo & Mirchandani (1995).

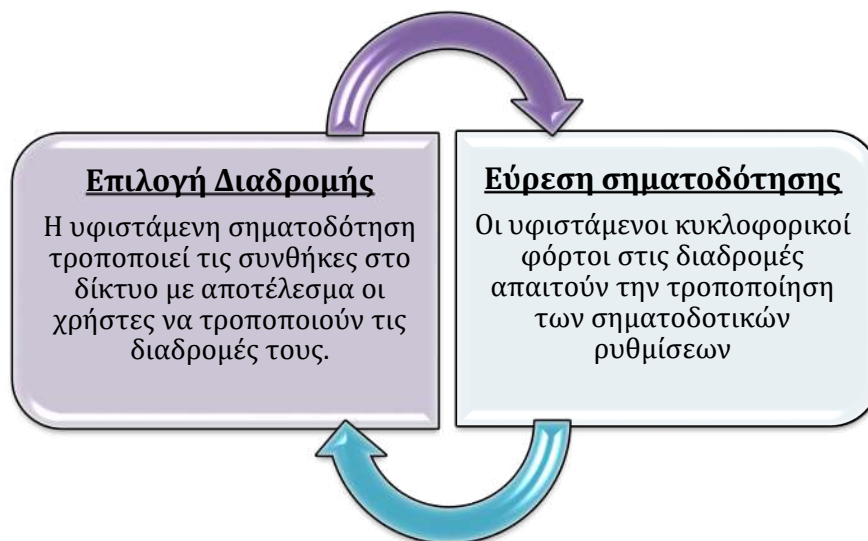
Το TUC (Diakaki 1999, Diakaki et al. 2002, Diakaki et al. 2003) είναι ένα σύστημα πραγματικού χρόνου που υλοποιεί στρατηγικές κεντρικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής, τροποποιώντας τις ρυθμίσεις και λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική λειτουργία του δικτύου. Το TUC έχει βασιστεί στη θεωρία των πολυμεταβλητών ρυθμιστών αυτόματου ελέγχου και εφαρμόζει έναν αναδραστικό έλεγχο για τη διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης, των χρόνων πρασίνου και των χρονικών μετατοπίσεων. Το μαθηματικό πρότυπο και ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου εφαρμόζεται με μεθόδους γραμμικού τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου. Οι ρυθμίσεις

σηματοδότησης σχεδιάζονται βάσει των κυκλοφοριακών στοιχείων που έχουν συλλεχθεί για όλο το δίκτυο σε κάθε περίοδο σηματοδότησης και μεταφέρονται για εφαρμογή στον κάθε κόμβο. Οι Aboudolas et al. (2009) και Aboudolas et al. (2010) επέκτειναν το TUC συμπεριλαμβάνοντας περιορισμούς που αφορούν τη χωρητικότητα των συνδέσμων και την ανάλυση και βελτιστοποίηση του δικτύου στο πλαίσιο ενός κυλιόμενου ορίζοντα. Οι Baldi et al. (2017) προτείνουν μία επέκταση του TUC ως προς τη βελτιστοποίηση των χρόνων πρασίνου των φάσεων και του κύκλου χρησιμοποιώντας τη διατύπωση του βέλτιστου προβλήματος ελέγχου Hamilton-Jacobi-Bellman και βασιζόμενοι σε μία μέθοδο μεσοσκοπικής προσομοίωσης.

Άλλες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης δικτύου συγκαταλέγονται στο πεδίο των τεχνικών εκμάθησης. Οι Wiering et al. (2004) πρότειναν έναν αλγόριθμο εκμάθησης για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε δίκτυο. Οι Li et al. (2004) πρότειναν τη χρήση ενός αλγορίθμου εκμάθησης συνδυάζοντας τη θεωρία παιγνίων και ένα σύνολο κανόνων για τον συντονισμό μεταξύ των πρακτόρων σε ένα σηματοδοτούμενο δίκτυο. Οι Bingham (2001) και Choy et al. (2003) πρότειναν την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης σηματοδότησης ενός δικτύου αναπτύσσοντας ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων με χρήση τεχνικών εκμάθησης, ασαφούς λογικής και νευρωνικών δικτύων. Τη λογική των πολλαπλών πρακτόρων και την ενσωμάτωση τεχνικών ενισχυτικής μάθησης στην εύρεση των ρυθμίσεων σηματοδότησης σε ένα δίκτυο εφάρμοσαν και οι Arel et al. (2010). Για την επίλυση μεγάλης έκτασης δικτύων οι Prashanth & Bhatnagar (2011) ανέπτυξαν ένα σύστημα ενισχυτικής μάθησης ακολουθώντας προσεγγιστικές εκφράσεις των κυκλοφοριακών καταστάσεων του δικτύου. Οι Abdoos et al. (2011) ανέλυσαν τη δυναμική εξέλιξη της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε ένα δίκτυο προτείνοντας ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων που χρησιμοποιεί τεχνικές εκμάθησης για την εκτίμηση του μήκους των ουρών στους σηματοδοτούμενους κόμβους, ενώ σε επόμενη εργασία τους (Abdoos et al., 2013) επέκτειναν αυτή τη λογική σε ένα ολιστικό σύστημα πολλαπλών πρακτόρων.

2.2.3 Σηματοδότηση δικτύων υπό συνθήκες ισορροπίας

Το συνδυασμένο πρόβλημα του καταμερισμού της κυκλοφορίας υπό τη συνθήκη ισορροπίας του χρήστη (user equilibrium, UE) και της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης ορίζεται ως η βελτιστοποίηση της σηματοδότησης με την παράλληλη επιλογή των διαδρομών από τους χρήστες έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες της ισορροπίας του χρήστη (Maher & Zhang, 1999). Στα επόμενα αναφέρονται ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογών του συνδυασμένου προβλήματος του καταμερισμού της κυκλοφορίας και της ρύθμισης της σηματοδότησης.



Σχήμα 2-3: Συνδυασμένο πρόβλημα καταμερισμού της ζήτησης υπό συνθήκες ισορροπίας και εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης

Το συνδυασμένο πρόβλημα του καταμερισμού της ζήτησης και της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης, το οποίο λαμβάνει υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης την επιλογή διαδρομής από τους χρήστες μελετήθηκε αρχικά από τον Allsop (1974), ως μία επαναληπτική διαδικασία του στατικού καταμερισμού της κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο σταθερών προγραμμάτων σηματοδότησης. Η αλγοριθμική προσέγγιση του Allsop (1974) επεκτάθηκε από τους Allsop & Charlesworth (1977) και Charlesworth (1977) εφαρμόζοντας μία επαναληπτική διαδικασία προκειμένου να επιτευχθεί αμοιβαία συνεπής ρύθμιση σηματοδότησης και καταμερισμού κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας το λογισμικό TRANSYT για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης. Οι Tan et al. (1979) πρότειναν την υβριδική προσέγγιση του προβλήματος διατυπώνοντας δύο μεθόδους επίλυσης, την εύρεση τοπικού βέλτιστου μέσω μίας ενισχυμένης Λαγκρανζιανής (Lagrangian) μεθόδου που απαιτεί απαρίθμηση των διαδρομών και την εύρεση αμοιβαίας συνεπής λύσης μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας. Ο Smith (1979, 1981) παρουσίασε τις συνθήκες ύπαρξης, μοναδικότητας και σταθερότητας της ισορροπίας στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της σηματοδότησης και της επιλογής διαδρομής από τους χρήστες. Οι Sheffi & Powell (1983) επίσης κατέδειξαν ότι οι φόρτοι των διαδρομών σε συνάρτηση με τους χρόνους σηματοδότησης ενδέχεται να μην έχουν συνεχή παράγωγα ως προς τους χρόνους σηματοδότησης σε ένα ορισμένο σύνολο λόγω πιθανών αλλαγών στο σύνολο των χρησιμοποιήσιμων διαδρομών προερχόμενων από αλλαγές στη σηματοδότηση. Οι Friesz et al. (1992) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο της προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση του προβλήματος της εύρεσης βέλτιστων σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε ένα δίκτυο. Οι Yang & Yagar (1995) διατύπωσαν το πρόβλημα σε δίκτυα υπό συμφόρηση ως ένα διεπίπεδο πρόβλημα. Οι Maher et al. (2001) συνδύασαν το πρόβλημα

της εύρεσης μητρώου μετακινήσεων και της εύρεσης σηματοδοτικών ρυθμίσεων ως ένα διεπίπεδο πρόβλημα με στοχαστικό καταμερισμό της κυκλοφορίας.

Η Chiou (2003) παρουσίασε επίσης μία διεπίπεδη προσέγγιση για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης με το TRANSYT και τον καταμερισμό των κυκλοφοριακών φόρτων, ενώ στις εργασίες της Chiou (2005) και Chiou (2008) χρησιμοποίησε μεθόδους που βασίζονται στις κλίσεις για την επίλυση του συνδυασμένου προβλήματος του καταμερισμού και της εύρεσης σηματοδοτικών ρυθμίσεων. Οι Cipriani & Fusco (2004) μελέτησαν τη μέθοδο των κλίσεων για την εύρεση της σηματοδότησης σε ένα δίκτυο υπό τη συνθήκη της ισορροπίας του χρήστη και πρότειναν την περαιτέρω τροποποίηση της μεθόδου χρησιμοποιώντας τον κανόνα Armijo για την σταδιακή εκτίμηση.

Οι Ceylan & Bell (2004α, 2004b) παρουσίασαν μία διεπίπεδη προσέγγιση, στην οποία στο άνω επίπεδο επιλύεται το πρόβλημα της σηματοδότησης χρησιμοποιώντας τους γενικούς αλγορίθμους σε συνδυασμό με το TRANSYT, ενώ στο κάτω επίπεδο οι φόρτοι των συνδέσμων εκτιμώνται βάσει της στοχαστικής επιλογής της διαδρομής από τους χρήστες. Η θεωρητική τους προσέγγιση επεκτάθηκε από τους Ceylan & Ceylan (2012) επιλύοντας το πρόβλημα με τη χρήση του συνδυασμού του TRANSYT και του γενετικού αλγορίθμου και του αλγορίθμου αναζήτησης αρμονίας, όπως και από τον Ceylan (2013) που συνδύασε το TRANSYT με τον αλγόριθμο διαφορικής εξέλιξης. Οι Teklu et al. (2007) πρότειναν επίσης την επίλυση του συνδυασμένου προβλήματος χρησιμοποιώντας γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση της σηματοδότησης και το SATURN για τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο.

Οι Gallo et al. (2010) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο της διεσπαρμένης αναζήτησης για την επίλυση του μεικτού προβλήματος του σχεδιασμού του δικτύου υπό συνθήκη ισορροπίας του χρήστη, συμπεριλαμβάνοντας τον προσδιορισμό των κατευθύνσεων των οδών και την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων στους κόμβους. Σε επόμενη εργασία τους οι Gallo et al. (2014) επιλύσανε το διεπίπεδο συνδυαστικό πρόβλημα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο εφικτής καθοδικής κατεύθυνσης (feasible descent direction algorithm). Οι Khooban et al. (2015) επέκτειναν την προσέγγιση των Gallo et al. (2010) συμπεριλαμβάνοντας στις μεταβλητές και την αύξηση της χωρητικότητας των οδών και στους περιορισμούς τη χωρητικότητα των οδών. Το συνδυαστικό πρόβλημα της χωρητικότητας των συνδέσμων και της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης σε ένα δίκτυο σε κατάσταση ισορροπίας υπό συνθήκες αβεβαιότητας εξέτασε η Chiou (2016) εφαρμόζοντας μία παραλλαγή του αλγορίθμου της διεσπαρμένης αναζήτησης.

Οι Ngoduy & Maher (2011) πρότεινε τη χρήση της μεθόδου της διεντροπίας (cross-entropy method) για την εύρεση κατάλληλων σηματοδοτικών ρυθμίσεων για ένα δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη την επιλογή της διαδρομής από τους χρήστες με χρήση του CTM (Daganzo,

1994). Οι Dell' Orco et al. (2013) πρότειναν την επίλυση του διεπίπεδου προβλήματος μέσω του αλγορίθμου αναζήτησης αρμονίας και την επίλυση του καταμερισμού της ζήτησης με χρήση στοχαστικής προσέγγισης της ισορροπίας του χρήστη. Συνέκριναν την μεθοδολογία τους με την επίλυση μέσω γενετικού αλγορίθμου και Hill Climbing. Οι Moghimi et al. (2018) επιλύσανε το διεπίπεδο πρόβλημα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο προσομοιωμένης απόπτωσης για την εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης και τον αλγόριθμο κλίσεων για την επίλυση του καταμερισμού της ζήτησης υπό τη συνθήκη της ισορροπίας του χρήστη.

Μία διαφορετική προσέγγιση στη διατύπωση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης σηματοδότησης υπό συνθήκη ισορροπίας ακολούθησαν οι Wang et al. (2017) βασιζόμενοι στην επιλογή της διαδρομής για την ακολουθία ταξιδιού (trip chain). Η επίλυση του διεπίπεδου προβλήματος προκύπτει από την ισορροπία Stackelberg χρησιμοποιώντας την μέθοδο ανάλυσης ευαισθησίας μεταβλητών ανισοτήτων για το άνω πρόβλημα και τη γενικευμένη μέθοδο αντίστροφου μητρώου για το κάτω πρόβλημα.

Οι Li & Sun (2018) επιλύσανε το άνω πρόβλημα της διεπίπεδης προσέγγισης χρησιμοποιώντας βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, που συμπεριλάμβαναν τη μεγιστοποίηση της δυνητικής ροής του συστήματος, την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων, τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας και την αποφυγή της διάχυσης των ουρών. Η βέλτιστη σηματοδότηση προκύπτει από την επιλογή του μετώπου Pareto που εντοπίζεται μέσω του γενετικού αλγορίθμου.

Οι προαναφερόμενες ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στη στατική θεώρηση του προβλήματος. Οι Ghali & Smith (1993) ασχολήθηκαν με το συνδυασμένο πρόβλημα του δυναμικού καταμερισμού και της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης χρησιμοποιώντας το λογισμικό CONTRAM. Οι Smith & Van Vuren (1993) περιέγραψαν τα βήματα μίας αλγοριθμικής επαναληπτικής διαδικασίας που αποτελεί επέκταση της στατικής θεώρησης του αλγορίθμου του Allsop υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης. Οι Gartner & Stamatiadis (1997) παρουσίασαν το θεωρητικό πλαίσιο για τη συνδυασμένη επίλυση του δυναμικού καταμερισμού και της ρύθμισης της σηματοδότησης. Οι Abdelfatah & Mahmassani (1998) πρότειναν έναν αλγόριθμο εύρεσης του δυναμικού καταμερισμού του βέλτιστου συστήματος και της βέλτιστης ρύθμισης της σηματοδότησης χρησιμοποιώντας το μεσοσκοπικό μοντέλο DYNASMART για τον δυναμικό καταμερισμό. Για την εύρεση των βέλτιστων σηματοδοτικών ρυθμίσεων προτείνονται δύο προσεγγίσεις, το μοντέλο του Webster (1958) και το μοντέλο τοπικής αναζήτησης προτύπων των Hooke & Jeeves (1961). Οι Abdelghany et al. (1999) προσέγγισαν το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης σε ένα δίκτυο υπό δυναμική φόρτιση σε ισορροπία εντοπίζοντας και χρησιμοποιώντας τις κυρίαρχες διαδρομές για τη ρύθμιση της σηματοδότησης με προγράμματα σταθερού χρόνου και επενεργούμενα. Ο δυναμικός μεσοσκοπικός καταμερισμός υλοποιείται μέσω του DYNASMART-X, ενώ η βελτιστοποίηση της

σηματοδότησης ακολουθεί τη λογική των Abdelfatah & Mahmassani (1998). Οι Varia & Dhingra (2004) διατύπωσαν το πρόβλημα του δυναμικού μεσοσκοπικού καταμερισμού και της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης σταθερού χρόνου σε ένα δίκτυο ελαχιστοποιώντας το συνολικό χρόνο μετακίνησης χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο. Οι Lian & Gao (2005) πρότειναν ένα διεπίπεδο μοντέλο για την επίλυση του συνδυασμένου προβλήματος του δυναμικού μεσοσκοπικού καταμερισμού και της σηματοδότησης ορίζοντας καθυστερήσεις ουρών υπό κατάσταση ισορροπίας σε κορεσμένους συνδέσμους οι οποίες ικανοποιούν την αρχή σύμφωνα με την οποία εξυπηρετείται πρώτα αυτός που φτάνει πρώτος (First-In-First-Out, FIFO) με ένα χαοτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Για την δυναμική επίλυση του συνδυασμένου προβλήματος με στοχαστική θεώρηση, οι Sun et al. (2006) πρότειναν ένα διεπίπεδο μοντέλο όπου στο άνω επίπεδο οι ρυθμίσεις σηματοδότησης βελτιστοποιούνται με χρήση γενετικού αλγορίθμου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου μετακίνησης, ενώ στο κάτω επίπεδο πραγματοποιείται ο δυναμικός μεσοσκοπικός καταμερισμός της κυκλοφορίας βάσει του CTM του Daganzo (1994) βάσει της μεθόδου σταδιακού Logit καταμερισμού.

Οι Karoonsoontawong & Waller (2009) πρότειναν μία διεπίπεδη προσέγγιση για την ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της σηματοδότησης και της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη παρέχοντας μία αμοιβαία συνεπή λύση. Η βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων της σηματοδότησης πραγματοποιείται με ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου μετακίνησης του συστήματος χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο περιορισμένης αναζήτησης με αντίδραση βάσει της αναλογίας της απευθείας αναζήτησης λύσεων και της θεωρίας δυναμικών συστημάτων, ενώ ο δυναμικός καταμερισμός επιλύεται μέσω του CTM του Daganzo (1994).

Το διεπίπεδο δυναμικό πρόβλημα προσέγγισαν οι Mitsakis et al. (2011), όπου η βελτιστοποίηση των σηματοδοτικών ρυθμίσεων πραγματοποιήθηκε με χρήση γενετικού αλγορίθμου ελαχιστοποιώντας τη συνολική καθυστέρηση στους κόμβους σύμφωνα με το HCM2000 (TRB, 2000), ενώ η επίλυση της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη με μεσοσκοπική προσέγγιση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό VISTA.

Οι Koehler & Strehler (2012) διαμόρφωσαν έναν συνδυασμένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης για τον ταυτόχρονο συντονισμό της σηματοδότησης μέσω γραμμικού προγραμματισμού και την επίλυση του δυναμικού καταμερισμού χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο κυκλικού επεκτεινόμενου χρόνου. Σε επόμενη εργασία τους (Koehler & Strehler, 2018) επέκτειναν το μοντέλο συμπεριλαμβάνοντας και τη βελτιστοποίηση των χρόνων πρασίνου των φάσεων και τη διαδοχή των φάσεων.

Οι Ukkusuri et al. (2013) διατύπωσαν το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης του άνω επιπέδου ως ένα μεικτό ακέραιο γραμμικό πρόβλημα (MILP), ενώ για την επίλυση του προβλήματος της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη με μεσοσκοπική προσέγγιση χρησιμοποιούν τον ευρετικό αλγόριθμο προβολής που πρότειναν σε προηγούμενη εργασία τους (Ukkusuri et al., 2012) και βασίζεται στο CTM του Daganzo (1994). Οι Mehrabipour & Hajbabaie (2017) πρότειναν την επίλυση του διεπίπεδου προβλήματος στο πλαίσιο ενός κυκλόμενου οριζοντα, όπου στο κάτω επίπεδο ο δυναμικός καταμερισμός της κυκλοφορίας πραγματοποιείται από το CTM του Daganzo (1994), ενώ στο άνω επίπεδο η βελτιστοποίηση της σηματοδότησης του δικτύου αποσυντίθεται σε ένα πρόγραμμα πολλαπλών MILPs ένα για κάθε σηματοδοτούμενο κόμβο.

Οι Varia et al. (2013) παρουσίασαν μια κοινή βελτιστοποίηση των παραμέτρων ρύθμισης σηματοδότησης και του δυναμικού καταμερισμού για τα αστικά δίκτυα με συμφόρηση, χρησιμοποιώντας γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης και καταμερίζοντας τη ζήτηση βάσει της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη. Οι Yu et al. (2018) πρότειναν επίσης μία κοινή βελτιστοποίηση ελαχιστοποίησης του συνολικού χρόνου μετακίνησης χρησιμοποιώντας ένα διπλό μοντέλο ουράς συνεχούς χρόνου έτσι ώστε να αναπαριστούν το δυναμικό φαινόμενο της διάχυσης των ουρών. Ο καταμερισμός της κυκλοφορίας πραγματοποιείται βάσει της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη, ενώ η βελτιστοποίηση της σηματοδότης συμπεριλαμβάνει την εύρεση χρόνων πρασίνου των φάσεων για προγράμματα σταθερού χρόνου και προσαρμοστικά μέσω γενετικού αλγορίθμου.

Οι García-Nieto et al. (2012) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης σε ένα δίκτυο προσομοιώνοντας την κίνηση των οχημάτων με μικροσκοπική προσέγγιση στο λογισμικό SUMO ελαχιστοποιώντας το χρόνο μετακίνησης μέσα στο δίκτυο και μεγιστοποιώντας τον αριθμό των οχημάτων που καταλήγουν στον προορισμό τους.

Οι Han et al. (2015) διατύπωσαν το διεπίπεδο δυναμικό πρόβλημα ως ένα μαθηματικό πρόβλημα με περιορισμούς ισορροπίας. Στο κάτω επίπεδο πραγματοποιείται η εύρεση της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη και στο άνω πρόβλημα πραγματοποιείται η εύρεση των χρονικά μεταβαλλόμενων ρυθμίσεων σηματοδότησης μέσω της συνεχής προσέγγισης των Han et al. (2014). Χρησιμοποίησαν τρεις μετα-ευρετικούς αλγορίθμους για την επίλυση του προβλήματος, τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, τον αλγόριθμο προσομοιωμένης ανόπτησης και τον αλγόριθμο διαχωρισμού των φωλιών (nested partition).

Ο Smith (2015) επίλυσε το διεπίπεδο δυναμικό πρόβλημα επεκτείνοντας το μοντέλο P_0 (Smith, 1979) ως προς τη θεώρηση των δυναμικών κάθετων ουρών για την εύρεση των ρυθμίσεων βέλτιστων σηματοδότησης σταθερού χρόνου, ενώ ο δυναμικός καταμερισμός της κυ-

κλοφορίας πραγματοποιείται μέσω του μοντέλου εναλλαγών διαδρομών (Smith, 1984), έτσι ώστε το διεπίπεδο πρόβλημα να συγκλίνει σε κατάσταση ισορροπίας. Οι Liu & Smith (2015) μελέτησαν το συνδυασμένο πρόβλημα της επιλογής της διαδρομής και της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης σε ένα δυναμικό περιβάλλον αξιολογώντας τη σταθερότητα των προτεινόμενων μοντέλων. Το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο είναι μία επέκταση του δυναμικού μοντέλου που έχει προταθεί από τον Smith (1984) στο οποίο ενσωματώνεται το μοντέλο του Webster (1958) και το μοντέλο P_0 του Smith (1979) θεωρώντας ότι ο χρόνος κόκκινης ένδειξης που αντιστοιχεί σε μία πρόσβαση είναι επιπλέον φόρτος. Έτσι η επιλογή των εναλλακτικών διαδρομών πραγματοποιείται σύμφωνα με τις διαφορές του κόστους της κάθε διαδρομής και η επιλογή του χρόνου κόκκινης ένδειξης πραγματοποιείται μέσω των διαφορών στην πίεση που δέχονται οι σύνδεσμοι λόγω φόρτων.

Οι Di Gangi et al. (2016) διατύπωσαν ένα διεπίπεδο πρόβλημα όπου ο δυναμικός καταμερισμός της ζήτησης πραγματοποιείται μέσω του CTM του Daganzo (1994) και του TRAFFMED (Di Gangi, 2011), ενώ η εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης πραγματοποιείται σε ένα κυλιόμενο ορίζοντα χρησιμοποιώντας δύο στάδια με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Στο πρώτο στάδιο βελτιστοποιούνται τα προγράμματα σηματοδότησης των κόμβων ανεξάρτητα μεταξύ τους και στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται εύρεση του βέλτιστου συντονισμού. Οι Jin et al. (2017) πρότειναν το πλαίσιο ανάπτυξης μιας διεπίπεδης προσέγγισης μέσω επαναληπτικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας μεσοσκοπικά ή μικροσκοπικά μοντέλα για τον δυναμικό καταμερισμό της κυκλοφορίας και την αξιολόγηση των εναλλακτικών ρυθμίσεων σηματοδότησης που παράγονται από γενετικό αλγόριθμο βάσει προηγούμενων προσομοιώσεων. Οι Thonhofer et al. (2017) πρότειναν μία επαναληπτική διαδικασία προγνωστικού ελέγχου που μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικό χρόνο βάσει ενός δυναμικού μακροσκοπικού μοντέλου στο πλαίσιο ενός κυλιόμενου ορίζοντα. Η βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων της σηματοδότησης πραγματοποιείται με χρήση γενετικού αλγορίθμου ελαχιστοποιώντας τη μέγιστη συμφόρηση ως έκφραση της πυκνότητας των οδικών τμημάτων.

2.2.4 Σηματοδότηση κόμβων και δικτύων υπό συνθήκες αβεβαιότητας

Μία διαφορετική προσέγγιση στο σχεδιασμό του προγράμματος σηματοδότησης υπό αβέβαιες κυκλοφοριακές συνθήκες έχει ακολουθηθεί από ερευνητές, όπου πραγματοποιείται μία επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης για την εύρεση ενός προγράμματος το οποίο δεν σχεδιάζεται βάσει δεδομένων κυκλοφοριακών φόρτων, αλλά συμπεριλαμβάνει την μεταβλητότητα των φόρτων στο σχεδιασμό του και έτσι θεωρείται αξιόπιστο (robust) να παρέχει ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Ο Heydecker (1987) διερεύνησε τις συνέπειες της μεταβλητότητας στους κυκλοφοριακούς φόρτους και στις ροές κορεσμού για τον υπολογισμό των ρυθμίσεων σηματοδότησης και πρότεινε μία μέθοδο βελτιστοποίησης που ελαχιστοποιεί το μέσο ρυθμό καθυστέρησης σύμφωνα με τις

παρατηρούμενες αφίξεις και ροές κορεσμού. Ακολουθώντας την ίδια λογική ο Ribeiro (1994) πρότεινε μία τεχνική ομαδοποίησης του δικτύου για να χρησιμοποιήσει το TRANSYT στην εκτίμηση των χρόνων φάσεων στην περίπτωση της μεταβλητής ζήτησης. Οι Park et al. (2001) και οι Park & Kamarajugadda (2007) πρότειναν την ενσωμάτωση της μέσης τιμής και της διακύμανσης των κυκλοφοριακών φόρτων στο μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης του TRANSYT και του HCM, αντίστοιχα, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό η αβεβαιότητα των φόρτων σχεδιασμού σε ένα σηματοδοτούμενο δίκτυο. Ο Lo (2006) ανέπτυξε μία προσέγγιση βασισμένη στην αξιοπιστία για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης, προτείνοντας ένα μέτρο για την έκφραση της αξιοπιστίας της εκκένωσης των οχημάτων στη φάση. Η προτεινόμενη προσέγγιση δεν στηρίζεται στην πιθανοτική έκφραση των σταθερών καταστάσεων, αλλά αναλύει την κατάσταση του συστήματος ανά περίοδο σηματοδότησης με πιθανοτικό τρόπο λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των αφίξεων στους κόμβους.

Ο Yin (2008) επεκτείνοντας αυτή τη θεώρηση του προβλήματος παρουσίασε τρία μοντέλα για τον προσδιορισμό αξιόπιστων χρόνων σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου που ελαχιστοποιούν τη μέση καθυστέρηση ανά όχημα λαμβάνοντας υπόψη τις καθημερινές διακυμάνσεις της κυκλοφορίας, διατηρώντας μία σταθερή απόδοση υπό αυτές τις διακυμάνσεις ή επιτυγχάνοντας καλύτερη απόδοση στην χειρότερη αναμενόμενη περίπτωση ή στην περίπτωση υψηλών επιπτώσεων. Για την ανάλυση των διακυμάνσεων ανέλυσε πολλαπλά σενάρια μεταβλητής ζήτησης, ενώ η εκτίμηση της καθυστέρησης που αντιπροσωπεύει τις επιπτώσεις βασίστηκε στο μοντέλο του HCM2000 (TRB, 2000). Τα μοντέλα που προτάθηκαν για τη βελτιστοποίηση περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση της μέσης τιμής και της διακύμανσης της καθυστέρησης, την ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) και της ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης υπό τις πιο αντίξοες κυκλοφοριακές συνθήκες. Την προσέγγιση της ελαχιστοποίησης της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο μέσω ανάλυσης πολλαπλών σεναρίων μεταβλητής ζήτησης επέκτειναν οι Zhang et al. (2010) στην περίπτωση της σηματοδοτούμενης αρτηρίας με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Αντίστοιχα, οι Zhang et al. (2013) διατύπωσαν ένα δισδιάστατο πρόβλημα υπό συνθήκες αβεβαιότητας για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε συντονισμένες αρτηρίες ελαχιστοποιώντας την καθυστέρηση και το ρίσκο της ανθρώπινης έκθεσης σε ρύπους εκπομπών χρησιμοποιώντας την Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο. Οι Karoonsoontawong & Waller (2010) παρουσίασαν μία μέθοδο για την ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος της επέκτασης της χωρητικότητας του δικτύου, της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης και του δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας λαμβάνοντας υπόψη ένα μέτρο αξιοπιστίας στο σχεδιασμό, το διεπίπεδο πρόβλημα και την αβεβαιότητα της ζήτησης μετακινήσεων. Το μέτρο αξιοπιστίας που συμπεριέλαβαν στην ανάλυσή τους είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος του αναμενόμενου συνολικού

χρόνου μετακίνησης του συστήματος και του τετραγώνου της μονόπλευρης τυπικής απόκλισης από ένα δεδομένο όριο.

Οι Ukkusuri et al. (2010) επέκτειναν τη θεώρηση της αβεβαιότητας στη ζήτηση που είχαν διατυπώσει στο γενικευμένο πλαίσιο του σχεδιασμού συγκοινωνιακού δικτύου (Ukkusuri et al., 2007), στο συνδυασμένο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης και αξιόπιστης σηματοδότησης υπό συνθήκες δυναμικής ισορροπίας. Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης αξιόπιστης λύσης οι συγγραφείς αναλύουν πιθανά σενάρια μεταβλητής ζήτησης και επιχειρούν την ελαχιστοποίηση του γινομένου της πιθανότητας των συνεπειών και των συνεπειών που εκφράζονται συνδυαστικά μέσω του χρόνου μετακίνησης, των καθυστερήσεων στους κόμβους και των αριθμών των στάσεων. Ο Li (2011) διατύπωσε το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης υπό τις πιο αντίξοες κυκλοφοριακές συνθήκες και την εύρεση του αξιόπιστου προγράμματος πραγματοποιώντας διακριτοποίηση των τιμών των χρόνων πρασίνου που οι φάσεις ενός κόμβου θα μπορούσαν να λάβουν και επιλύοντας το πρόβλημα με δυναμικό προγραμματισμό. Οι Wei et al. (2011) διερεύνησαν την εύρεση αξιόπιστου προγράμματος σηματοδότησης λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των κυκλοφοριακών ροών στις προσεγγίσεις ενός κόμβου βάσει ανάλυσης σεναρίων, καταλήγοντας ότι το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τα τυχαία σφάλματα που προκαλούνται από την αβεβαιότητα της κυκλοφοριακής ροής. Οι Chen et al. (2013) πρότειναν ένα μοντέλο για τη βελτιστοποίηση των σταθερών προγραμμάτων σηματοδότησης σε ένα δίκτυο συνδυάζοντας ένα αναλυτικό μοντέλο για την εκτίμηση του χρόνου μετακίνησης και ένα μοντέλο προσομοίωσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου χρόνου μετακίνησης και της τυπικής απόκλισης του χρόνου μετακίνησης παρέχοντας έτσι αξιόπιστες ρυθμίσεις. Η βελτιστοποίηση στις ρυθμίσεις σηματοδότησης δεν λαμβάνει υπόψη το συντονισμό μεταξύ των κόμβων, αλλά την εύρεση ρυθμίσεων για πολλαπλούς κόμβους σε ένα δίκτυο θεωρώντας τους μεμονωμένους. Ο Sacco (2014) μελέτησε τη μεταβλητότητα σε μεμονωμένο κόμβο που προκύπτει από τα χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής και ανακατασκεύασε τρία μοντέλα στοχαστικής βελτιστοποίησης της χωρητικότητας σε κόμβους μέσω της σηματοδότησης δικτύων ελαχιστοποιώντας τη μέγιστη αναμενόμενη τιμή του δείκτη απόδοσης. Οι Tettamanti et al. (2014) πρότειναν μία διεπίπεδη προσέγγιση προγνωστικού ελέγχου. Η εύρεση των βέλτιστων χρόνων πρασίνου των φάσεων (και όχι της περιόδου σηματοδότησης και των χρονικών μετατοπίσεων) υπό συνθήκες αβεβαιότητας πραγματοποιείται ελαχιστοποιώντας τις ουρές σε ένα κυλίομενο ορίζοντα στη δυσμενέστερη περίπτωση και απλοποιώντας το αρχικό πρόβλημα σε ένα ημι-ορισμένο πρόβλημα (semidefine programming). Οι Liu et al. (2015) ανέπτυξαν μία μέθοδο βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου πραγματικού χρόνου δύο επιπέδων σε δίκτυο υπό δυναμική φόρτιση χρησιμοποιώντας κανόνες γραμμικών αποφάσεων (Linear Decision Rules, LDR) και τεχνικές κατανεμημένης αξιόπιστης βελτιστοποίησης (Distributed Robust Optimization, DRO). Στο πρώτο επίπεδο χρησιμοποιούνται τε-

χνικές LDR για την αντιστοίχιση των φόρτων σε βέλτιστα προγράμματα σηματοδότησης εκτός σύνδεσης. Στο δεύτερο επίπεδο χρησιμοποιούνται τεχνικές DRO για την εύρεση σε πραγματικό χρόνο του βέλτιστου προγράμματος υπό συνθήκες αβεβαιότητας στην κατανομή της ζήτησης. Οι Tong et al. (2015) πρότειναν την ελαχιστοποίηση της αναμενόμενης καθυστέρησης μέσω στοχαστικού προγραμματισμού λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα στη ζήτηση και συνέκριναν το μοντέλο τους με το προσαρμοστικό μοντέλο του Li (2011) παρέχοντας πιο εξισορροπημένες ουρές στην περίπτωση των υπερκορεσμένων κόμβων. Οι Axer and Friedrich (2016) πρότειναν μία σταδιακή διαδικασία εύρεσης χρονικά εξαρτώμενων σταθερών και επενεργούμενων προγραμμάτων σηματοδότησης κόμβου βάσει δεδομένων από παρακολουθούμενα οχήματα (floating cars). Η εύρεση των χρόνων φάσεων και της περιόδου σηματοδότησης πραγματοποιείται μέσω της στατιστικής ανάλυσης του ιστογράμματος των στοιχείων της πορείας των οχημάτων. Οι Han et al. (2016) πρότειναν μία νέα υβριδική μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού ακεραίων τιμών για την επίλυση του προβλήματος της δυναμικής σηματοδότησης λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές ρύπων θεωρώντας ως αβεβαιότητα τον προσδιορισμό των παραμέτρων στις μακροσκοπικές σχέσεις μεταξύ των μεγεθών. Η προσέγγιση αυτή περιορίζει την κυκλοφοριακή συμφόρηση μέσω της ελαχιστοποίησης των καθυστερήσεων και αντιμετωπίζει ζητήματα σχετικά με τις εκπομπές ρύπων οχημάτων σε ένα δίκτυο σηματοδοτούμενων κόμβων υπό δυναμική φόρτιση.

Οι Zheng et al. (2017) πρότειναν ένα νέο πλαίσιο για την αξιολόγηση των συνεπειών της σηματοδότησης στην αξιοπιστία και στην αναμενόμενη τιμή του χρόνου μετακίνησης συντονισμένων αρτηριών. Η μέθοδος που προτείνουν για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης χρησιμοποιεί τον γενετικό αλγόριθμο για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης μέσω μίας γραμμικής σχέσης του αναμενόμενου χρόνου μετακίνησης και της τυπικής του απόκλισης. Το διεπίπεδο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης αξιόπιστης σηματοδότησης σε ένα δίκτυο υπό τη συνθήκη ισορροπίας εξέτασε η Chiou (2014, 2017a, 2017b) για την περίπτωση της αβεβαιότητας της ζήτησης μετακινήσεων με ντετερμινιστική και στοχαστική προσέγγιση στον καταμερισμό. Η ανάλυση που ακολουθήθηκε συμπεριλάμβανε την ελαχιστοποίηση των συνεπειών στην περίπτωση της εμφάνισης της δυσμενέστερης κατάστασης μέσω ανάλυσης πολλαπλών σεναρίων. Η Chiou (2018) επέκτεινε την προηγούμενη προσέγγιση συμπεριλαμβάνοντας στη θεώρηση της αβεβαιότητας την εκτίμηση αβέβαιων καθυστερήσεων στους συνδέσμους του δικτύου χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα εξομάλυνσης με περιορισμούς ισορροπίας. Οι Ampountolas et al. (2017) και Zhong et al. (2017) επέκτειναν τη μέθοδο περιορισμού εισόδων περιμετρικά των περιοχών για την βελτίωση των κυκλοφορικών συνθηκών εντός των περιοχών ανάλυσης λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα της ζήτησης και βελτιστοποιώντας τη σηματοδότηση μέσω ελαχιστοποίησης της δυσμενέστερης περίπτωσης για την εύρεση αξιόπιστων ρυθμίσεων. Οι Li & Chow (2018) πρότειναν μία μέθοδο προσαρμοστικού ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα και τη συνέκριναν με την μέθοδο εύρεση αξιόπιστης

σηματοδότησης μέσω της ελαχιστοποίησης των συνεπειών της δυσμενέστερης περίπτωσης, καταλήγοντας ότι η μέθοδος αξιοπιστίας παρέχει καλύτερα αποτελέσματα στη μεταβλητότητα της εκτιμώμενης καθυστέρησης, αλλά όχι και στη συνολική απόδοση του δικτύου.

2.3 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σηματοδότησης

Γενικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης αποσκοπεί στην εύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης ανάμεσα στο σύνολο των διαθέσιμων λύσεων. Οι αλγόριθμοι αναζήτησης λύσεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει διαφόρων αρχών που τις διέπουν (Cavazzuti, 2012), όπως ντετερμινιστική ή στοχαστική προσέγγιση, βασιζόμενη σε χρήση κλίσεων (gradient-based), εξελικτική προσέγγιση, γενική, χωρίς περιορισμούς, με μία ή πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις, πολυπαραγοντική, τοπική ή ολική, διακριτών τιμών, κτλ.

Μία σημαντική κατηγοριοποίηση των προβλημάτων βελτιστοποίησης προκύπτει από το είδος των μεταβλητών του προβλήματος, οι οποίες μπορεί να λαμβάνουν είτε συνεχείς τιμές, είτε διακριτές τιμές. Επίσης, διαφορετική προσέγγιση στην επίλυση του προβλήματος επιλέγεται στις περιπτώσεις που το πρόβλημα είναι γραμμικό ή μη. Ευρετικές και μετα-ευρετικές μέθοδοι επιλέγονται από πολλούς ερευνητές για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων συνήθως λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Στην παρούσα ενότητα γίνεται μία συνολική αναφορά σε μετα-ευρετικές μεθόδους βελτιστοποίησης που έχουν χρησιμοποιηθεί στην επίλυση του προβλήματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου ή συντονισμένου δικτύου και αναφέρθηκαν αναλυτικά στις προηγούμενες παραγράφους, συνοψίζοντας παράλληλα και ενδεικτικές εργασίες στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί η κάθε μέθοδος.

Οι ευρετικές και μετα-ευρετικές μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι μέθοδοι που δεν χρησιμοποιούν αναλυτική διαδικασία επίλυσης του προβλήματος και επομένως δεν εγγυώνται την εύρεση καθολικά βέλτιστης λύσης, αλλά μπορούν να εντοπίσουν λύσεις στο πρόβλημα εντός ενός σύντομου χρονικού διαστήματος και με ικανοποιητική ακρίβεια. Η βασική διαφορά μεταξύ των ευρετικών και μετα-ευρετικών μεθόδων είναι ότι οι ευρετικές μέθοδοι είναι προσανατολισμένοι σε συγκεκριμένη δομή προβλήματος, χρησιμοποιώντας διαδικασίες τοπικής αναζήτησης, ενώ οι λύσεις που παράγουν αντιστοιχούν σε τοπικά βέλτιστα. Αντίθετα, οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδοι επίλυσης που συνδυάζουν διαδικασίες τοπικής αναζήτησης και υψηλότερου επιπέδου στρατηγικών για να δημιουργήσουν μια διαδικασία που είναι ικανή να αποφύγει κάποιο τοπικό ελάχιστο. Οι μετα-ευρετικές μέθοδοι μπορούν να παράγουν ικανοποιητικές λύσεις σε προβλήματα βελτιστοποίησης με ελλειπείς ή ατελείς πληροφορίες και με περιορισμένη ικανότητα υπολογισμού. Συνήθως οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι μοντελοποιούν ένα φαινόμενο που παρατηρείται στη φύση, και λόγω των περιορισμένων υποθέσεων στην αλγοριθμική τους δομή μπορούν να προσαρμοστούν και να μεταφερθούν σε πληθώρα προβλημάτων. Η αναζήτηση της καλύτερης δυνατής λύσης ενός μετα-ευρετικού

αλγόριθμου προκύπτει από μία διαδικασία που εκκινεί από μία αρχική λύση και μέσω ενδιάμεσων λύσεων καταλήγει στην βέλτιστη. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της αναζήτησης των ενδιάμεσων λύσεων τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα εύρεσης της καθολικά βέλτιστης λύσης. Παράλληλα, όμως, αυξάνονται και οι απαιτήσεις για υπολογιστικούς πόρους, όπως και ο χρόνος εκτέλεσης του αλγόριθμου. Είναι, επομένως, απαραίτητη η χρήση ενός εξειδικευμένου αλγόριθμου αναζήτησης, ο οποίος να παρέχει τη δυνατότητα για ποιοτικές και ταχείς επιλύσεις.

Οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι που απαντώνται συχνότερα στη βιβλιογραφία είναι οι εξής:

- Γενετικός αλγόριθμος (Genetic Algorithm)

Ο Γενετικός Αλγόριθμος αποτελεί μια μέθοδο βελτιστοποίησης υπολογιστικής νοημοσύνης, και είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία, υλοποιώντας τεχνικές γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Μορφές του Γενετικού Αλγόριθμου δημοσιεύτηκαν και χρησιμοποιήθηκαν από τα μέσα του 20ου αιώνα, αλλά η χρήση του έγινε πιο εκτεταμένη μετά το 1970 (Fraser & Burnell, 1970, Crosby, 1973). Ο αλγόριθμος μιμείται τη διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης, καθώς σε κάθε επανάληψη τροποποιεί τον πληθυσμό των μεμονωμένων λύσεων και επιλέγει τυχαίες μεμονωμένες λύσεις από τον υφιστάμενο πληθυσμό των λύσεων για να τις χρησιμοποιήσει ως γονείς στην εξέλιξη των απογόνων που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στην παραγωγή της επόμενης γενιάς. Η επαναληπτική διαδικασία έχει ως σκοπό την εξέλιξη του πληθυσμού προς μία βέλτιστη λύση. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης γενετικών αλγορίθμων στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης αποτελούν οι εργασίες των Foy et al. (1992), Hadi & Wallace (1993), Abu-Lebdeh & Benekohal (1997), Park et al. (1999), Park et al. (2001), Chen et al. (2002), Ceylan & Bell (2004a, 2004b), Varia & Dhingra (2004), Ceylan (2006), Yun & Park (2006), Sun et al. (2006), Wan & Chen (2007), Teklu et al. (2007), Stevanovic et al. (2008), Agbolosu-Amison & Park (2009), Agbolosu-Amison et al. (2009), Kesur (2009), Zhang et al. (2010), Zhang et al. (2011), Singh et al. (2011), Liu & Chang (2011), Dong et al. (2011), Mitsakis et al. (2011), He & Hou (2012), Chiou & Huang (2012), Ceylan & Ceylan (2012), Varia et al. (2013), Benkheris & Ghoul (2013), Hale et al. (2015), Li & Schonfeld (2015), Christofa et al. (2016), Di Gangi et al. (2016), Jin et al. (2017), Thonhofer et al. (2017), Zheng et al. (2017), Bi et al. (2018), Zhao & Ma (2018), Qin et al. (2018), Li & Sun (2018), Yu et al. (2018).

- Αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης (Simulated Annealing)

Ο αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης βασίζεται στην επεξεργασία ανόπτησης των μετάλλων (Kirkpatrick et al., 1984). Ο αλγόριθμος αντικατοπτρίζει μία αναλογία μεταξύ

των λύσεων ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και των ενεργειακών καταστάσεων ενός στερεού κατά τη διαδικασία βραδείας ψύξης. Σε αντίθεση με τις μεθόδους που βασίζονται σε διαβάθμιση και άλλες ντετερμινιστικές μεθόδους αναζήτησης, το κύριο πλεονέκτημα της προσομοιωμένης ανόπτησης είναι η ικανότητά της να αποφεύγει την παγίδευση σε τοπική βέλτιστα. Ένα άλλο πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι η μία άμεση εξάρτηση των παραγόμενων λύσεων από τις αρχικές τιμές του προβλήματος. Αναλογικά με τη διαδικασία ανόπτησης των μετάλλων, ο αλγόριθμος αρχικά προσδιορίζει μια αρχική στάθμη ενέργειας σε αρχική υψηλή θερμοκρασία. Με τη διατάραξη του αρχικού συνόλου μεταβλητών βελτιστοποίησης για το σύστημα σε σταθερή θερμοκρασία, ο αλγόριθμος συνεχίζει να υπολογίζει την αλλαγή της ενέργειας. Όταν η ενέργεια μειωθεί, η νέα διαμόρφωση γίνεται το επόμενο σημείο αναζήτησης. Ακόμα και όταν η ενέργεια αυξάνεται, ο αλγόριθμος προσδιορίζει την αποδοχή της νέας διαμόρφωσης με μια πιθανότητα που δίνεται από τον παράγοντα Boltzmann, ο οποίος γίνεται μικρότερος καθώς η θερμοκρασία μειώνεται σύμφωνα με τη διαδικασία της ανόπτησης. Η διαταραχή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ο αλγόριθμος επιτύχει καλές στατιστικές δειγματοληψίας για την τρέχουσα θερμοκρασία και στη συνέχεια ο αλγόριθμος μειώνει τη θερμοκρασία (και πραγματοποιείται η ψύξη). Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης αποτελούν οι εργασίες των Friesz et al. (1992), Hadi & Wallace (1994), Oda et al. (1997), Gu & Wang (1998), Yun & Park (2006), Dong et al. (2011), Ola et al. (2014), Li & Schonfeld (2015), Hale et al. (2015), Han et al. (2015), Moghimi et al. (2018).

- Αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)

Η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων αναπτύχθηκε από τους Kennedy & Eberhart (1995) και βασίζεται στην παρατηρούμενη κοινωνική συμπεριφορά του βιολογικού συστήματος με το χαρακτηριστικό της συλλογικής νοημοσύνης να αναζητά την καλύτερη λύση. Ο αλγόριθμος θεωρεί ότι επηρεάζεται τυχαία από την εμπειρία του σμήνους (τοπικό καλύτερο σημείο) και από το σωματίδιο που καθοδηγεί (ολικό καλύτερο σημείο). Τα μεμονωμένα σωματίδια θα αναζητήσουν την καλύτερη λύση σύμφωνα με το τοπικό και ολικό καλύτερο σημείο. Η συλλογή πληροφοριών βασίζεται στην κοινωνική συμπεριφορά των σμηνών και στην επιτυχία του σμήνους λόγω της επικοινωνίας που δημιουργείται μεταξύ τους. Ο αλγόριθμος αρχικοποιείται με έναν πληθυσμό υποψήφιας λύσεων (σωματίδιο) και η κάθε υποψήφια λύση συσχετίζεται με μία τυχαία ταχύτητα κίνησης μέσα στο χώρο αναζήτησης. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων θεωρείται μία αξιόπιστη και ταχεία μέθοδος επίλυσης μη γραμμικών, μη διαφοροποιήσιμων, πολυτροπικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων στη βελτιστοποίηση της ση-

ματοδότησης αποτελούν οι εργασίες των Zhao et al. (2006), Zhang et al. (2008), Peng et al. (2009), Dong et al. (2011), García-Nieto et al. (2012), Han et al. (2015), Malecki et al. (2017), Zhang et al. (2017).

- Αλγόριθμος βελτιστοποίησης με βάση τη λειτουργία των αποικιών των μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization)

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών αναπτύχθηκε από τους Dorigo et al. (1996) και βασίζεται στη συμπεριφορά των μυρμηγκιών στην αναζήτηση τροφής. Τα μυρμήγκια είναι κοινωνικά έντομα και ζουν μαζί σε οργανωμένες αποικίες αποτελούμενες από περίπου 2 έως 25 εκατομμύρια άτομα. Κατά την αναζήτηση τροφής, ένα πλήθος μυρμηγκιών ή κινητών πρακτόρων αλληλοεπιδρούν ή επικοινωνούν στο τοπικό τους περιβάλλον. Κάθε μυρμήγκι είναι επίσης σε θέση να ακολουθήσει τη διαδρομή που σημειώνεται από άλλα μυρμήγκια. Όταν ένα μυρμήγκι βρίσκει μια πηγή τροφής, θα επισημάνει το σημείο, όπως και το ίχνος προς και από αυτό. Από την αρχική οδό τυχαίας αναζήτησης, τα μυρμήγκια ακολουθούν τη διαδρομή με την υψηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης και στη συνέχεια η διαδρομή αυτή ενισχύεται από τον αυξανόμενο αριθμό μυρμηγκιών. Καθώς όλο και περισσότερα μυρμήγκια ακολουθούν την ίδια διαδρομή, γίνεται η ευνοούμενη διαδρομή, που συνήθως είναι οι πιο σύντομες ή πιο αποτελεσματικές διαδρομές. Αυτός είναι ένας μηχανισμός θετικής ανάδρασης. Καθώς το σύστημα εξελίσσεται, συγκλίνει σε μια αυτο-οργανωμένη κατάσταση, η οποία είναι η βασική θεώρηση των αλγορίθμων της αποικίας μυρμηγκιών. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης αποτελούν οι εργασίες των Wen & Wu (2004), Putha et al. (2011), Baskan & Haldebilen (2011), He & Hou (2012), Min (2017).

- Αλγόριθμος βελτιστοποίησης με βάση τη λειτουργία αποικίας μελισσών (Bee Colony Optimization)

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μελισσών αντιπροσωπεύει μία από τις τεχνικές νοημοσύνης σμήνους και βασίζεται στη μελέτη των ενεργειών μονάδων σε διάφορα αποκεντρωμένα συστήματα. Ο αλγόριθμος εισήχθη από τους Lučić & Teodorović (2001) περιγράφοντας τη συμπεριφορά των μελισσών στη φύση. Οι τεχνητές (artificial) μέλισσες εφαρμόζουν τους κανόνες που χρησιμοποιούνται από τις μέλισσες για τη φάση της διαδικασίας συλλογής νέκταρ. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι να σχεδιάσει μία αποικία τεχνητών μελισσών ικανή να λύσει αποτελεσματικά δύσκολα συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Οι τεχνητές μέλισσες ερευνούν τον χώρο αναζήτησης αναζητώντας τις εφικτές λύσεις μέσω της συνεργασίας και της ανταλλαγής πληροφοριών. Με τη χρήση της συλλογικής γνώσης και της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ τους, οι τε-

χνητές μέλισσες επικεντρώνονται σε πιο ελπιδοφόρες περιοχές και σε κάθε βήμα απορρίπτουν λύσεις από τις λιγότερο ελπιδοφόρες. Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο εναλλασσόμενες φάσεις: προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Σε κάθε μπροστινό πέρασμα, κάθε τεχνητή μέλισσα εξερευνά το χώρο αναζήτησης, εφαρμόζοντας έναν προκαθορισμένο αριθμό κινήσεων, οι οποίες κατασκευάζουν ή βελτιώνουν μία λύση, αποδίδοντας μια νέα λύση. Έχοντας αποκτήσει νέες λύσεις, οι μέλισσες επιστρέφουν στη φωλιά και ξεκινούν τη δεύτερη φάση, το λεγόμενο οπίσθιο πέρασμα. Στο οπίσθιο πέρασμα, όλες οι τεχνητές μέλισσες μοιράζονται πληροφορίες για τις λύσεις τους, γνωστοποιώντας την ποιότητα της λύσης, δηλαδή την τιμή της αντικειμενική τους συνάρτησης. Έτσι αποφασίζεται με κάποια πιθανότητα αν θα εγκαταλειφθεί η παραγόμενη λύση ή αν ακολουθηθεί κάποια άλλη για εξερεύνηση. Οι δύο φάσεις του αλγορίθμου αναζήτησης διεξάγονται διαδοχικά, μέχρι να επιτευχθεί μία συνθήκη τερματισμού. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης αποικίας μελισσών στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης αποτελούν οι εργασίες των Dell'Orco et al. (2013), Jovanović & Teodorović (2017), Jovanović et al. (2017), Hao et al. (2018), Gao et al. (2018).

- Αλγόριθμος αναζήτησης αρμονίας (Harmony Search)

Ο αλγόριθμος αναζήτησης αρμονίας είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε από τους Geem et al. (2001) για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος μιμείται τον αυτοσχεδιασμό των μουσικών προσομοιώνοντας μια μουσική διαδικασία αναζήτησης για την τέλεια κατάσταση αρμονίας. Ο αλγόριθμος αναζητά μια φανταστική αρμονία που καθορίζεται από την αισθητική εκτίμηση επιδιώκοντας την καλύτερη δυνατή κατάσταση (καθολικά βέλτιστη) που καθορίζεται από μια τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Η αισθητική εκτίμηση πραγματοποιείται από το συλλογικό ήχο που παίζεται από ένα μουσικό σύνολο. Αντιστοίχως, η τιμή αντικειμενικής συνάρτησης αξιολογείται από το σύνολο των τιμών που παράγονται από τις προσαρμοσμένες μεταβλητές. Οι αισθητικοί ήχοι μπορούν να βελτιωθούν με συνεχή ελαχιστοποίηση / μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης μέσω της επανάληψης. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου αναζήτησης αρμονίας στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης αποτελούν οι εργασίες των Agbolosu-Amison et al. (2009), Ceylan & Ceylan (2012), Dell'Orco et al. (2013), Gao et al. (2017), Gao et al. (2018).

- Αλγόριθμος περιορισμένης αναζήτησης (Tabu Search)

Ο αλγόριθμος περιορισμένης αναζήτησης αναπτύχθηκε από τους Glover & Laguna (1998). Το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι το ιστορικό αναζήτησης σε αντίθεση με τους περισσότερους αλγορίθμους που λειτουργούν είτε χωρίς μνήμη είτε χρησιμοποιούν μόνο τα αποτελέσματα των τελευταίων βημάτων. Η χρήση της μνήμης και του

ιστορικού αναζήτησης εισάγουν πολλούς βαθμούς ελευθερίας και μια μαθηματική ανάλυση της συμπεριφοράς αλγορίθμου που μπορεί να καταστήσει τον αλγόριθμο δύσχρηστο. Παρόλ'αυτά, η περιορισμένη αναζήτηση θεωρείται ένας από τους πιο επιτυχημένους και ευρέως χρησιμοποιούμενους αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος περιορισμένης αναζήτησης μπορεί να θεωρηθεί ως μια εντατική τοπική αναζήτηση όπου η κατάλληλη χρήση του ιστορικού αναζήτησης αποφεύγει την επανεξέταση των τοπικών λύσεων, καταγράφοντας πρόσφατα δοκιμασμένες λύσεις στις λίστες των απαγορευμένων. Σε έναν μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, αυτές οι λίστες απαγορευμένων λύσεων εξοικονομούν σημαντικό χρόνο υπολογισμών, γεγονός που οδηγεί σε βελτιώσεις στην αποτελεσματικότητα της αναζήτησης. Πολλοί υβριδικοί αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί συνδυάζοντας την περιορισμένη αναζήτηση με άλλους μετα-ερευνητικούς αλγορίθμους. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου περιορισμένης αναζήτησης στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης αποτελούν οι εργασίες των Yun & Park (2006), Agbolosu-Amison et al. (2009), Karoonsoontawong & Waller (2009), Hu & Chen (2012), Hale et al. (2015), Cabezas & García (2018), Hao et al. (2018).

- Αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution)

Ο αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης αναπτύχθηκε από τους Storn & Price (1997) και πρόκειται για έναν εξελικτικό αλγόριθμο που θεωρείται μία περαιτέρω ανάπτυξη του γενετικού αλγορίθμου. Σε αντίθεση όμως με τον γενετικό αλγόριθμο, ο αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης εκτελεί υπολογισμούς σε κάθε συστατικό ή σε κάθε διάσταση της λύσης. Σχεδόν όλοι οι υπολογισμοί του αλγορίθμου πραγματοποιούνται στη βάση των διανυσμάτων μέσω μίας αυτό-οργανωτικής αναζήτησης που κατευθύνεται στο βέλτιστο. Για κάθε πολυδιάστατο πρόβλημα πολλαπλών παραμέτρων δημιουργείται αρχικά ένας πληθυσμός διανυσμάτων λύσεων, ενώ η κάθε γενιά διανυσμάτων λύσεων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα χρωμόσωμα. Ο αλγόριθμος αποτελείται αντίστοιχα με τον γενετικό αλγόριθμο από τις τεχνικές γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Ενδεικτικά παραδείγματα της χρήσης του αλγορίθμου αναζήτησης αρμονίας στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης αποτελούν οι εργασίες των Ceylan (2013) και Malecki et al. (2017).

- Αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης (Scatter Search)

Ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης είναι μία μέθοδος μετα-ερευνητικής τεχνικής, που μπορεί όμως να θεωρηθεί και εξελικτικός αλγόριθμος, αφού οι νέες λύσεις κάθε επανάληψης προκύπτουν από τον συνδυασμό των υπάρχοντων λύσεων. Σύμφωνα με την αρχική διατύπωση του αλγορίθμου από τον Glover (1998), ο αλγόριθμος ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία δημιουργίας λύσεων αναζητώντας και αναλύοντας με ευφυή

τρόπο τον χώρο του προβλήματος. Ο αλγόριθμος διαφέρει από τον γενετικό αλγόριθμο (αλλά και από άλλους εξελικτικούς αλγορίθμους) κυρίως στην διαδικασία παραγωγής νέων λύσεων επειδή δίνει περισσότερο έμφαση στον ντετερμινιστικό συνδυασμό των προηγούμενων λύσεων, σε αντίθεση με άλλες στοχαστικές προσεγγίσεις. Σε κάθε επανάληψη, ο αλγόριθμος στηρίζεται σε ένα σύνολο σημείων προηγούμενων επαναλήψεων που αναπαραγάγουν καλές λύσεις. Αυτά τα σημεία ορίζουν το σύνολο αναφοράς, το οποίο χρησιμοποιείται για την εύρεση του επόμενου συνόλου και τελικώς την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης έχει εφαρμοστεί στο λογισμικό OptQuest (OptTek, 2018), το οποίο ενσωματώνει τον αλγόριθμο περιορισμένης αναζήτησης, τον αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης, τον προγραμματισμό ακεραίων τιμών και τα νευρωνικά δίκτυα σε ένα μηχανισμό αναζήτησης για την επίλυση ντετερμινιστικών και στοχαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του λογισμικού OptQuest στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου αποτελούν οι εργασίες των Yun & Park (2006) και Agbolosu-Amison et al. (2009). Ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης χρησιμοποιήθηκε από τους Gallo et al. (2010), Chiou (2016) και Khooban et al. (2015) για την επίλυση του συνδυαστικού προβλήματος της εύρεσης κατάστασης ισορροπίας και ρυθμίσεων στο δίκτυο.

2.4 Σύνοψη βιβλιογραφικής ανασκόπησης και συμβολή διατριβής

Το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστων στρατηγικών ελέγχου και διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω της σηματοδότησης είναι ένα πρόβλημα που έχει απασχολήσει την ακαδημαϊκή κοινότητα δίνοντας το έναυσμα για διατύπωση μοντέλων και αλγορίθμων μέσα από πληθώρα ερευνητικών εργασιών. Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση επικεντρώθηκε σε θέματα σηματοδότησης κόμβων, αρτηριών και δικτύων δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους εύρεσης και αναζήτησης των βέλτιστων λύσεων του κάθε προβλήματος, καθώς και στις αντικειμενικές συναρτήσεις επίλυσης του προβλήματος. Οι βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις των στρατηγικών ελέγχου και διαχείρισης της κυκλοφορίας που αναφέρονται στην παρούσα ανασκόπηση καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την χωρική αλληλεπίδραση τους, την χρονική περίοδο σχεδιασμού ή/ και υλοποίησής τους, τα κριτήρια και τους παραμέτρους βελτιστοποίησης, καθώς και την μεθοδολογία επίλυσης της βελτιστοποίησης.

Η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σε θέματα διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω σηματοδότησης καταδεικνύει τη χρησιμότητα μοντέλων που εκφράζουν τα κυκλοφοριακά μεγέθη δυναμικά. Ειδικά σε περιπτώσεις αυξημένης συμφόρησης η δυναμική φόρτιση και εκτίμηση των κυκλοφοριακών μεγεθών δίνει τη δυνατότητα να συμπεριλαμβάνονται στο σχεδιασμό τα φαινόμενα της συσσώρευσης της ουράς, της διατήρησής της, αλλά και της εκκένωσής της σε όλη τη χρονική διάρκεια των περιόδων αιχμής. Με αυτό τον τρόπο, η σημα-

τοδότηση που διαμορφώνεται παρέχει συνολικά καλύτερο επίπεδο εξυπηρέτησης στους χρήστες του συστήματος. Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης εντοπίστηκαν πολλές ερευνητικές προσπάθειες που έχουν αναλύσει δυναμικά το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης. Οι προσεγγίσεις που έχουν ακολουθηθεί συμπεριλαμβάνουν ως κριτήριο βελτιστοποίησης συνολικές, μέσες ή μέγιστες τιμές των δυναμικών μεγεθών, χωρίς να πραγματοποιείται ανάλυση της κατανομής των μεγεθών στην χρονική εξέλιξη των φαινομένων, αλλά και χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα που προκαλούν αυτές, τόσο στους χρήστες, όσο και στην απόδοση του δικτύου.

Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις προσεγγίσεις που έχουν εξεταστεί από ερευνητές λαμβάνοντας υπόψη το στοιχείο της αβεβαιότητας στο σχεδιασμό της σηματοδότησης. Οι ερευνητικές προσπάθειες που εντοπίστηκαν σε αυτό τον τομέα λαμβάνουν την έννοια της αβεβαιότητας ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού της σηματοδότησης. Έτσι παρουσιάστηκαν μέθοδοι για την ελαχιστοποίηση των συνεπειών στο σχεδιασμό συμπεριλαμβάνοντας την αβεβαιότητα στις προβλέψεις της ζήτησης και επομένως και στα βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η θεώρηση του Han (1996), σύμφωνα με την οποία όταν οι διακυμάνσεις της κυκλοφορίας διαφοροποιούνται σε διαδοχικές χρονικές περιόδους, οι ρυθμίσεις σηματοδότησης που είναι βέλτιστες για μία περίοδο είναι μόνο τοπικές λύσεις στο πρόβλημα. Αντίθετα, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική επιρροή των χρονικών διακυμάνσεων της ζήτησης και των διακυμάνσεων που προκαλούν στα κυκλοφοριακά μεγέθη της καθυστέρησης και της συσσώρευσης και εκκένωσης ουρών, η συνολική απόδοση της σηματοδότησης μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά.

Η έννοια της διαχείρισης και του περιορισμού των συνεπειών των υψηλών διακυμάνσεων ζήτησης αποτελεί μία εναλλακτική θεώρηση του προβλήματος της ελαχιστοποίησης όχι μόνο των χρονικά τοπικών καθυστερήσεων και των τοπικών φαινομένων συμφόρησης, αλλά και της αντιμετώπισης των ακραίων συνθηκών που παρατηρούνται υπό συνθήκες κορεσμού στο σχεδιασμό της σηματοδότησης. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάστηκε η έννοια του ρίσκου στη διαχείριση της κυκλοφορίας και ενσωματώθηκε σε ένα Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων διαμορφώνοντας το πλαίσιο ανάπτυξής του με γνώμονα την εκτίμηση και την ανάλυση του ρίσκου υπέρβασης του αναμενόμενου χρόνου μετακίνησης λόγω των διακυμάνσεων ζήτησης. Επιπλέον, επικεντρώνοντας στην περίπτωση της βελτιστοποίησης σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου, αλλά και συντονισμένου δικτύου, αναπτύχθηκε μεθοδολογία εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης αυτού του ρίσκου.

Σε επίπεδο μεμονωμένου κόμβου, οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται σε θέματα εύρεσης βέλτιστων χρόνων σηματοδότησης σε προεπιλεγμένες δομές προγραμμάτων, ενώ ορισμένες προσπάθειες έχουν εστιάσει και στη διαδοχή των επιλεγμένων φάσεων. Μία σημαντική παράμετρος του σχεδιασμού του προγράμματος σηματοδότησης είναι και ο εντοπισμός των κατάλληλων σηματοδοτικών φάσεων ανάλογα με τα γεωμετρικά και κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά του κόμβου. Η εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης χρησιμοποιώντας μία προκαθορισμένη δομή προγράμματος δεν μπορεί παρά να θεωρηθεί ένα τοπικό βέλτιστο.

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε το συνδυασμένο πρόβλημα της εύρεσης του συνδυασμού των κινήσεων σε φάσεις και των σηματοδοτικών ρυθμίσεων του προγράμματος. Η απαρίθμηση όλων των δυνατών συνδυασμών των φάσεων και των σηματοδοτικών ρυθμίσεων δεν αποτελεί ένα πρακτικό τρόπο επίλυσης του προβλήματος, αφού ο αριθμός όλων των πιθανών συνδυασμών είναι εξαιρετικά μεγάλος ειδικά σε έναν κόμβο με περισσότερες από δύο προσβάσεις και πολλές επιτρεπόμενες κινήσεις. Είναι επομένως, αναγκαία η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης που θα επιλύουν το πρόβλημα ικανοποιητικά σε σχέση τόσο με την ακρίβεια της εκτιμώμενης λύσης, όσο και με τις απαιτήσεις χρόνου και υπολογιστικών πόρων. Έτσι αναπτύχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο εξερευνά το χώρο αναζήτησης λύσεων του προβλήματος μέσω μίας ευρετικής διαδικασίας για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού των επιτρεπόμενων κινήσεων σε φάσεις και μέσω ενός μετα-ευρετικού αλγορίθμου αναζήτησης λύσεων για την εύρεση των βέλτιστων σηματοδοτικών ρυθμίσεων του προγράμματος.

Η χρήση των μετα-ευρετικών αλγορίθμων στην επίλυση του προβλήματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου καταγράφηκε στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, εντοπίζοντας τους δημοφιλέστερους αλγορίθμους που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές. Ο γενετικός αλγόριθμος έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές για την εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης σε επίπεδο μεμονωμένου κόμβου, αρτηρίας και δικτύου. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του γενετικού αλγορίθμου, που τον καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, είναι η εύρεση πολλών λύσεων σε κάθε επανάληψη με στοχαστικό τρόπο. Οι λύσεις αυτές αφενός παρέχουν τη δυνατότητα για μία ποιοτικότερη λύση, αλλά αφετέρου απαιτούν σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και χρόνο για την σύγκλισή τους. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης, οποίος παράγει λύσεις αναλύοντας και αναζητώντας τον χώρο του προβλήματος με ευφυή τρόπο δίνοντας περισσότερη έμφαση στον αιτιοκρατικό (ντερμινιστικό) συνδυασμό των προηγούμενων λύσεων, σε αντίθεση με τις στοχαστικές προσεγγίσεις. Ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης έχει εφαρμοστεί σε πολλά επιστημονικά πεδία, αλλά η χρήση του στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης είναι πολύ περιορισμένη.

Επιλέχθηκε έτσι στην παρούσα διατριβή η χρήση του αλγορίθμου διεσπαρμένης αναζήτησης για την επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης σε μεμονωμένο κόμβο και η σύγκριση του με τον γενετικό αλγόριθμο, εξετάζοντας την ποιότητα των λύσεων σε σχέση με την ακρίβεια αλλά και την ταχύτητα παραγωγής τους.

Σε επίπεδο δικτύου, το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης έχει αναλυθεί από την ακαδημαϊκή κοινότητα μέσω δύο προσεγγίσεων που αφορούν στην ενσωμάτωση ή όχι της επιλογής της διαδρομής των χρηστών και την (παράλληλη ή επαναληπτική) εύρεση ισορροπίας του δικτύου. Οι προσεγγίσεις που ακολουθούνται για την προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών στο δίκτυο είναι, είτε στατικές, είτε δυναμικές και αναλύουν τα κυκλοφοριακά μεγέθη μέσω μακροσκοπικών, μεσοσκοπικών ή μικροσκοπικών προσεγγίσεων. Η ανάλυση των κυκλοφοριακών μεγεθών μέσω μεσοσκοπικής προσέγγισης υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης αποτελεί μία συνηθισμένη επιλογή από ερευνητές που παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Μέσω της δυναμικής φόρτισης εκφράζονται οι δυναμικές αλληλεξαρτήσεις στην εξέλιξη των κυκλοφοριακών μεγεθών, αλλά και στην επιλογή διαδρομών από τους χρήστες. Παράλληλα η μεσοσκοπική προσέγγιση επιτρέπει την προσομοίωση των κυκλοφοριακών μεγεθών με ικανοποιητική λεπτομέρεια σε σχέση με τις μακροσκοπικές μεθόδους, ενώ αποφεύγονται τα μειονεκτήματα των μικροσκοπικών προσεγγίσεων που σχετίζονται με τις ανάγκες βαθμονόμησης των μοντέλων και των σημαντικών απαιτήσεων σε υπολογιστικό χρόνο και πόρους.

Ένα δυναμικό μεσοσκοπικό μοντέλο έχει αποδειχθεί από τη διεθνή πρακτική ότι μπορεί να αποτελέσει ιδανικό μέσο προσομοίωσης των συνθηκών κυκλοφορίας για την παρακολούθηση της κυκλοφοριακής απόδοσης ενός δικτύου και την επίλυση του πολυδιάστατου προβλήματος της διαχείρισης της κυκλοφορίας. Τα τελευταία χρόνια πολλά κέντρα κυκλοφορίας, αλλά και συστήματα ρύθμισης της σηματοδότησης χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο δυναμικά μεσοσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφορίας για την επίτευξη των στόχων τους αναφορικά με την παρακολούθηση των συνθηκών των δικτύων και τη ρύθμιση της κυκλοφορίας.

Υπό αυτό το πρίσμα υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή η μεσοσκοπική προσέγγιση υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης στο πλαίσιο ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων, το οποίο ενσωματώνει τη θεώρηση της διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω της ανάλυσης των κινδύνων και της διαχείρισης του ρίσκου σε όλα τα υποσυστήματα από την παρακολούθηση και τον εντοπισμό προβλημάτων έως την επίλυση και εφαρμογή κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας.

Συγκεκριμένα, το Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων εξειδικεύεται για την εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης σε ένα δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη την επιλογή των διαδρομών από τους

χρήστες τόσο για την περίπτωση εκτός σύνδεσης όσο και για την περίπτωση απευθείας σύνδεσης. Το πρόβλημα αυτό αναλύεται σε ένα διεπίπεδο πρόβλημα, όπου στο άνω πρόβλημα πραγματοποιείται η εύρεση της σηματοδότησης και στο κάτω πρόβλημα πραγματοποιείται η εύρεση της ισορροπίας του δικτύου. Η δυναμική και μεσοσκοπική διάσταση του προβλήματος υιοθετήθηκε και στα δύο επίπεδα του προβλήματος με γνώμονα τον περιορισμό του ρίσκου του χρόνου μετακίνησης των χρηστών, τόσο στην ανάλυση της απόδοσης του δικτύου, όσο και στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης.

Επιπλέον, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης διαπιστώθηκε ότι η δυναμική έκφραση των φαινομένων συμφόρησης μέσω της συσσώρευσης και εκκένωσης ουρών έχει απασχολήσει την ακαδημαϊκή κοινότητα διατυπώνοντας πληθώρα μοντέλων εκτίμησης της καθυστέρησης με συνεχείς προσεγγίσεις ή μέσω διακριτών βημάτων. Το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης HCM2010 (TRB, 2010) είναι ένα επικαιροποιημένο μοντέλο χρονικά εξαρτωμένων διακριτών βημάτων στοχαστικής μεσοσκοπικής προσέγγισης που λαμβάνει υπόψη με σημαντική λεπτομέρεια τις γεωμετρικές και λειτουργικές παραμέτρους των κόμβων. Η μεθοδολογία των πολλαπλών διαδοχικών χρονικών βημάτων αξιοποιεί τις διακυμάνσεις του κυκλοφοριακού φόρτου και συνεκτιμά στον υπολογισμό της καθυστέρησης την επίδραση του φόρτου, χωρικά και χρονικά, αφού σε κάθε διαδοχικό βήμα συνεκτιμάται η εναπομένουσα ουρά από το προηγούμενο βήμα. Το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης HCM2010 έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές, αλλά περιορισμένη είναι η εφαρμογή της μεθοδολογίας των πολλαπλών διαδοχικών χρονικών βημάτων.

Επιλέχθηκε, λοιπόν, στην παρούσα διατριβή η χρήση της μεθοδολογίας εκτίμησης καθυστέρησης HCM2010 μέσω των πολλαπλών διαδοχικών χρονικών βημάτων τόσο στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου όσο και στην περίπτωση του δικτύου για την εύρεση της σηματοδότησης ως μία δυναμική μεσοσκοπική προσέγγιση. Στην παρούσα προσέγγιση όμως οι χρονικά μεταβαλλόμενες καταστάσεις αξιοποιούνται όχι αθροιστικά ή συγκεντρωτικά όπως έχει παρουσιαστεί μέχρι τώρα στη βιβλιογραφία, αλλά αναλύοντας και χρησιμοποιώντας την κατανομή τους μέσω της μεθοδολογίας ανάλυσης του ρίσκου εμφάνισής τους.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ενός δικτύου ερευνητές έχουν διατυπώσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας εκφράσεις της απόδοσης του δικτύου είτε αντιμετωπίζοντας το δίκτυο ενιαία είτε αναλύοντάς σε διαδρομές που επιχειρείται ο συντονισμός τους. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί εκφράζονται είτε μέσω της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης διαδρομών είτε μέσω των καθυστερήσεων του δικτύου ή των διαδρομών του για την εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης.

Στην προσέγγιση που αναπτύσσεται στη διατριβή για την περίπτωση της εύρεσης της βέλτιστης σηματοδότησης του δικτύου συνδυάζονται οι δύο διαστάσεις του προβλήματος, οι καθυστερήσεις στους κόμβους του δικτύου και ο συντονισμός προκαθορισμένων διαδρομών. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις επιλύονται ταυτόχρονα με χρήση του γενετικού αλγορίθμου πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων για την αναζήτηση λύσεων στο πρόβλημα και την παράλληλη συνεκτίμηση των παραγόντων που επηρεάζουν την εύρεση κατάλληλων σηματοδοτικών ρυθμίσεων σε ένα δίκτυο.

Τέλος, τα αποτελέσματα της εφαρμογής των προτεινόμενων προσεγγίσεων ελαχιστοποίησης ρίσκου στη διαχείρισης της κυκλοφορίας και η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται έχουν ως σκοπό την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των προσεγγίσεων της διατριβής με ποσοτικοποιημένο τρόπο, καθώς και την επαλήθευση της βασικής υπόθεσης της μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου.

Η βασική υπόθεση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου είναι ότι ένα πρόγραμμα σηματοδότησης σχεδιασμένο και βελτιστοποιημένο με την ελαχιστοποίηση του ρίσκου θα προσφέρει στους χρήστες μικρότερο κίνδυνο να βιώσουν υψηλότερες τιμές καθυστερήσεων.

Κεφάλαιο 3

Η Έννοια του Ρίσκου στον Κυκλοφοριακό Σχεδιασμό

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η έννοια του ρίσκου στον κυκλοφοριακό σχεδιασμό που προτείνεται από την παρούσα διατριβή, πραγματοποιείται μία ανασκόπηση σημαντικών μοντέλων ανάλυσης ρίσκου και παρουσιάζεται η θεωρητική τους προσέγγιση, τα μειονεκτήματά καθώς και τα πλεονεκτήματά τους. Βάσει αυτής της ανασκόπησης διαμορφώνεται η μέθοδος εκτίμησης και ανάλυσης ρίσκου μετακινήσεων υιοθετώντας στην παρούσα διατριβή τις έννοιες της Αξίας σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) και της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) για την ανάλυση της απόδοσης του δικτύου, αλλά και τη βελτιστοποίηση του ελέγχου της κυκλοφορίας. Τέλος, παρουσιάζεται μία συνοπτική ανασκόπηση των συγκοινωνιακών προβλημάτων που έχουν εφαρμόσει μεθόδους ανάλυσης ρίσκου βασιζόμενες στο CVaR.

3.1 Εισαγωγή στην ανάλυση ρίσκου στον κυκλοφοριακό σχεδιασμό

Η διαχείριση του ρίσκου αποτελεί συνεχή και αναγκαία πρακτική στην καθημερινή λειτουργία κυκλοφοριακών συστημάτων. Οι διαχειριστές μεταφορικών συστημάτων θέτουν στρατηγικούς στόχους, όπως η αξιόπιστη και αποτελεσματική μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, και αναπτύσσουν και εφαρμόζουν στρατηγικές και μέτρα για την επίτευξή τους. Η απόδοση ενός μεταφορικού συστήματος είναι ευάλωτη σε καθημερινούς κινδύνους που μπορούν να προκαλέσουν αστοχίες στην απόδοσή του. Εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες και συμβάντα μπορούν να επηρεάσουν την επίτευξη αυτών των στόχων. Έτσι, τα κέντρα διαχείρισης της κυκλοφορίας καθορίζουν συγκεκριμένους δείκτες μέτρησης της απόδοσης της λειτουργίας των κυκλοφοριακών συστημάτων και αναπτύσσουν συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συστημάτων αυτών.

Η ανάλυση των χρονικά μεταβαλλόμενων καταστάσεων του δικτύου αποτελεί σημαντική παράμετρο στην επιτυχημένη ανάπτυξη και αξιολόγηση στρατηγικών ρύθμισης και ελέγχου της κυκλοφορίας που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των προβλημάτων της ομαλής λειτουργίας του δικτύου και στη διασφάλιση της εξισορρόπησης του δικτύου στη πάροδο του χρόνου. Οι συνήθειες διακυμάνσεις, τόσο της μεταφορικής ζήτησης, όσο και των χαρακτηρι-

στικών του δικτύου, είναι η πιο συχνή πηγή δημιουργίας μεταβλητών συνθηκών κυκλοφορίας, οι οποίες δημιουργούν ασάφειες και αβεβαιότητες στην απόδοση του δικτύου.

Η ανάπτυξη αξιόπιστων και αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας επιβάλλει την ελαχιστοποίηση ή τον περιορισμό των χρονικά εξαρτώμενων κινδύνων και αβεβαιοτήτων του συστήματος. Απαιτείται λοιπόν, μία έγκυρη στατιστική ανάλυση της απόδοσης του δικτύου που θα λαμβάνει υπόψη την ανάλυση και τον περιορισμό του ρίσκου των χρόνων μετακίνησης των χρηστών.

Με την ευρεία έννοια του όρου, κίνδυνος είναι οτιδήποτε θα μπορούσε να αποτελέσει εμπόδιο στην επίτευξη οριοθετημένων στόχων, ενώ ρίσκο είναι ο συνδυασμός της πιθανότητας εμφάνισης μίας κατάστασης και της έκτασης των συνεπειών της (ISO, 2009). Η διαχείριση ρίσκου είναι η διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται ανάλυση και προσδιορισμός των αβεβαιοτήτων που αποτελούν σημαντικούς παράγοντες κινδύνου, καθώς και σχεδιασμός και εφαρμογή στρατηγικών και μέτρων για τον περιορισμό αυτών των παραγόντων. Σε κάθε σύστημα υπάρχει το ενδεχόμενο να συμβούν γεγονότα που θα έχουν είτε θετικές είτε αρνητικές συνέπειες. Η συνήθης πρακτική στην ανάλυση κινδύνων είναι να λαμβάνονται υπόψη οι αρνητικές συνέπειες που μπορεί να υποστεί ένα σύστημα και να πραγματοποιείται προσπάθεια για την πρόληψη, καθώς και τον περιορισμό αυτών των αρνητικών συνεπειών.

Σύμφωνα με το Πρότυπο Διαχείρισης Κινδύνων (IRM, 2002) τα βασικότερα στάδια στη διαδικασία διαχείρισης ρίσκου είναι η αποτίμηση των κινδύνων, η ανάλυση του ρίσκου, η αξιολόγηση του ρίσκου και οι αποφάσεις που στοχεύουν στη μείωση του ρίσκου. Αρχικό στάδιο στη διαδικασία αποτελεί ο καθορισμός των στόχων προς επίτευξη για ένα σύστημα ή έναν οργανισμό. Ο καθορισμός των στόχων ακολουθείται από την ποσοτικοποίησή τους χρησιμοποιώντας κατάλληλους δείκτες. Οι δείκτες αυτοί μετρώνε με σαφήνεια τους στόχους, έτσι ώστε να μπορούν να ποσοτικοποιηθούν χρησιμοποιώντας πραγματικά στοιχεία, αλλά και στοιχεία από προσομοιώσεις μοντέλων πρόβλεψης της απόδοσης ενός συστήματος ή ενός οργανισμού. Η αποτίμηση του ρίσκου είναι το επόμενο κρίσιμο στάδιο κατά το οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση, ο προσδιορισμός και η αξιολόγηση του ρίσκου, καθώς και η περιγραφή των κινδύνων που διαμορφώνουν το ρίσκο. Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων στηρίζεται στην αποτίμηση ρίσκου και στις στρατηγικές και τα μέτρα που προτείνονται για τον περιορισμό του. Το τελευταίο βήμα μετά την εφαρμογή των προτεινόμενων στρατηγικών και μέτρων είναι η παρακολούθηση και η αξιολόγηση της εφαρμογής τους.

Σύμφωνα με το NCHRP Project 20-24(74) (D'Ignazio et al., 2011), ένας οργανισμός διαχείρισης μεταφορικών συστημάτων απαιτείται να συμπεριλάβει τη διαχείριση ρίσκου στη λειτουργία του, στη διαδικασία στρατηγικής στοχοθέτησης, στη διαχείριση των υποδομών, αλλά και στην διαχείριση της απόδοσης των συστημάτων και των δικτύων του.

3.2 Μοντέλα ανάλυσης ρίσκου

Οι έννοιες του ρίσκου και της αβεβαιότητας σχετίζονται αλλά είναι διαφορετικές. Ο Knight (1921) επισήμανε τη διάκριση μεταξύ των δύο εννοιών και προσδιόρισε ως ρίσκο την ποσοτικοποίηση του κινδύνου σε συνδυασμό με την κατανομή πιθανοτήτων των ενδεχόμενων κινδύνων. Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει μεταβλητές που είναι άγνωστες και μεταβαλλόμενες, αλλά η αβεβαιότητά τους θα αρθεί με το πέρασμα του χρόνου και την ολοκλήρωση σχετικών γεγονότων και ενεργειών. Το ρίσκο είναι το αποτέλεσμα της αβεβαιότητας που επηρεάζει ένα σύστημα είτε με γνωστό είτε με άγνωστο τρόπο, ενώ η έκταση των επιπτώσεων είναι άγνωστη επιφέροντας έτσι διακύμανση στην αξία, αλλά και στο ίδιο το αποτέλεσμα του συστήματος. Η ανάλυση, μέτρηση και αξιολόγηση του ρίσκου αναπτύχθηκε σε χρηματοοικονομικές εφαρμογές. Η εργασία του νομπελίστα οικονομολόγου Markowitz (1952) αποτέλεσε την αρχή εξέλιξης της σύγχρονης θεωρίας χαρτοφυλακίου, αποδεικνύοντας μαθηματικά μία μέθοδο δημιουργίας αποτελεσματικών και διαφοροποιημένων χαρτοφυλακίων και τη θεωρία ότι το ρίσκο δεν μηδενίζεται μέσω της διαφοροποίησης αυτής, αλλά μπορεί να μειωθεί σημαντικά διατηρώντας σταθερή την αναμενόμενη απόδοση του χαρτοφυλακίου. Έκτοτε έχουν διατυπωθεί από ερευνητές ποικίλα μέτρα ποσοτικοποίησης και πρόβλεψης του ρίσκου. Γενικά, τα μέτρα ποσοτικοποίησης του ρίσκου μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: μέτρα διασποράς (dispersion) και μέτρα απωλειών στο εύρος της διασποράς (downside).

Ο Markowitz (1952) πρότεινε τη χρήση της διασποράς και της μέσης αναμενόμενης απόδοσης, ενώ οι Konno & Yamazaki (1991) πρότειναν τη χρήση της απόλυτης τιμής τυπικής απόκλισης, που αντιστοιχεί στη μέση απόλυτη τιμή των αποκλίσεων από τη μέση τιμή. Τα μέτρα διασποράς όμως χαρακτηρίζουν τη διασπορά των αποδόσεων γύρω από την αναμενόμενη απόδοση του χαρτοφυλακίου και επομένως θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως μέτρα αβεβαιότητας της απόδοσης του χαρτοφυλακίου, αφού λαμβάνουν υπόψη θετικές και αρνητικές αποκλίσεις από το μέσο θεωρώντας ισάξιο βαθμό ρίσκου. Έτσι προτάθηκε από τον Markowitz (1959) η χρήση της μονομερούς τυπικής απόκλισης (semistandard deviation/semivariance), η οποία αντιστοιχεί στη μέση τιμή των αποκλίσεων από τη μέση τιμή των τιμών που είναι μικρότερες από αυτή. Ο Roy (1952) πρότεινε τη χρήση ενός επιπέδου ασφάλειας, d , συνδέοντας τη μέση τιμή, μ_p , και τη διασπορά, σ_p , για τη διαμόρφωση ενός μέτρου απόκλισης από το επίπεδο ασφαλείας της επένδυσης, $(\mu_p - d)/\sigma_p^2$.

Οι Bawa (1975) και Bawa & Lindenberg (1977) πρότειναν τη χαμηλότερη μερική ροπή (lower partial moment) n βαθμού ως μέτρο μέτρησης του ρίσκου, η οποία για απόδοση χαρτοφυλακίου R και εκτιμώμενη απόδοση R_T εκτιμάται ως $([R - R_T]^-)^n$, όπου:

$$[R - R_T]^- = \begin{cases} R - R_T & \text{όταν } R - R_T \leq 0 \\ 0 & \text{όταν } R - R_T > 0 \end{cases}$$

Ο Fishburn (1977) πρότεινε ένα μέτρο μέτρησης ρίσκου βάσει της σταθμισμένης διασποράς από ένα επιθυμητό όριο απόδοσης χρησιμοποιώντας ως βάρος την πιθανότητα εμφάνισης της κάθε τιμής. Ο Lai (1991) χρησιμοποίησε την ασυμμετρία της καμπύλης των αποδόσεων χαρτοφυλακίου για τη βελτιστοποίησή του και συζήτησε τα πλεονεκτήματά της από μία προσέγγιση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον από μεγάλα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα, ρυθμιστικές αρχές, αλλά και την ακαδημαϊκή κοινότητα για τη ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης κινδύνου αγοράς (Market Risk). Η αφορμή για την ανάπτυξη αυτών των μοντέλων και μεθοδολογιών ήταν η εξέλιξη πολλών μεγάλων χρηματοοικονομικών κρίσεων, όπως αυτή της Baring's Bank στο Orange County της Καλιφόρνιας και της περίπτωσης Metallgesellschaft στη Γερμανία στις αρχές του 1990, που σε μεγάλο ποσοστό οφείλονταν στην έλλειψη μεθόδων ανάλυσης και διαχείρισης κινδύνου (σύμφωνα με τους Elliot & Kopp, 2005). Η J.P. Morgan ανέπτυξε μία πρώτη εκδοχή του μέτρου της Αξίας σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) το 1990, έτσι ώστε να περιγράψει τις μέγιστες απώλειες της εταιρείας σε ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης για τις επόμενες 24 ώρες λαμβάνοντας υπόψη όλο το χαρτοφυλάκιο της. Η αρχική εκδοχή του μέτρου, σύμφωνα με τους Fabozzi et al. (2007), βασιζόταν στην προσέγγιση της κανονικής κατανομής των κερδών της εταιρείας για την επόμενη ημέρα, αλλά η πρακτική εφαρμογή του μέτρου ήταν χρονοβόρα και περίπλοκη, αφού συμπεριλάμβανε συλλογή και στατιστική ανάλυση δεδομένων από πολλές και περίπλοκες συναλλαγές. Το 1994 η J.P. Morgan αποφάσισε να δημοσιεύσει μία πιο απλοποιημένη εκδοχή της Αξίας σε Κίνδυνο στο διαδίκτυο (RiskMetrics), η οποία οδήγησε στην ραγδαία ανάπτυξη και χρήση του μέτρου από πολλά χρηματοοικονομικά ιδρύματα, αλλά και ερευνητές τόσο στον χρηματοοικονομικό τομέα, όσο και σε άλλους τομείς.

Το VaR λοιπόν, ορίζει τη χειρότερη αναμενόμενη έκβαση χαρτοφυλακίων σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα προκαθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Πιο συγκεκριμένα, είναι η τιμή εκείνη που μπορεί να θεωρηθεί ως το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο απωλειών που είναι αποδεκτό στις χρηματοοικονομικές δραστηριότητες. Το VaR είναι πολύ σημαντικό μέγεθος μέτρησης ρίσκου, επειδή συνοψίζει σε έναν αριθμό την συνολική έκθεση ενός οργανισμού ή ενός συστήματος στον κίνδυνο. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα στη χρήση του είναι το γεγονός ότι η μονάδα μέτρησής του είναι αυτή που ορίζεται από την αξία που αποτιμάται, που στις χρηματοοικονομικές εφαρμογές είναι χρηματική, έτσι είναι ευκολότερα αντιληπτό. Το VaR όμως είναι ένα ποσοτικό στοιχείο βασισμένο σε ποσοστημόρια, έτσι πολλοί ερευνητές (Artzner et al., 1999; Dowd & Blake, 2006; Delbaen, 2002) έχουν θεωρήσει ότι δεν είναι συνεπές μέτρο ρίσκου, αφού δεν ικανοποιεί τη συνθήκη της υποπροσθετικότητας. Η υποπροσθετικότητα επιτρέπει σε ένα χαρτοφυλάκιο που αποτελεί σύνολο μικρότερων χαρτοφυλακίων να έχει ρίσκο ίσο ή μικρότερο με το άθροισμα των ρίσκων των επιμέρους χαρ-

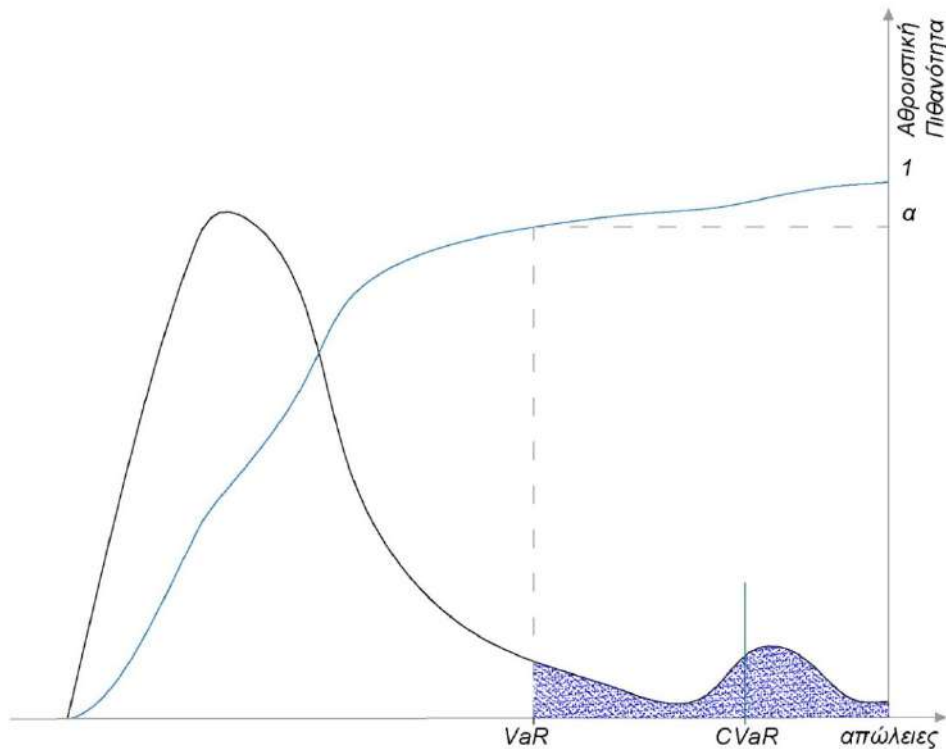
τοφυλακίων. Ένα άλλο μειονέκτημα του VaR είναι ότι δεν συνυπολογίζει πιθανές μεγαλύτερες απώλειες από το προκαθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Τα μειονεκτήματα του VaR καλύπτονται από το μέτρο της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR). Το CVaR είναι ένα πολύ διαδεδομένο μέτρο το οποίο προτάθηκε από τους Rockafellar & Uryasev (2000) και Rockafellar & Uryasev (2002) και το οποίο εκτιμά τη μέση κατάσταση απωλειών που υπερβαίνει το επίπεδο εμπιστοσύνης. Απλοϊκά, λοιπόν, το VaR απαντάει στην ερώτηση «πόσο κακές προβλέπονται να είναι οι συνθήκες;», ενώ το CVaR απαντάει στην ερώτηση «αν οι συνθήκες είναι κακές, πόσο εκτιμάται ότι θα είναι η αναμενόμενη απώλεια;». Οι Rockafellar & Uryasev (2000) απέδειξαν ότι το CVaR είναι καλύτερο από το VaR σε εφαρμογές βελτιστοποίησης, αφού προσφέρει κυρτότητα και επομένως μπορεί να λυθεί ως γραμμικό πρόβλημα για συνεχείς και διακριτές τιμές (Marsini et al., 2007). Έτσι, το VaR ενός χαρτοφυλακίου για ένα προκαθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης, α , είναι η ελάχιστη τιμή r όπου η πιθανότητα εμφάνισης μεγαλύτερης απώλειας, R , του χαρτοφυλακίου, είναι μικρότερη ή ίση του $(1-\alpha)$:

$$VaR_{\alpha} = \min\{r \in \mathbb{R} : Pr(R > r) \leq 1 - \alpha\} \quad (3-1)$$

ενώ το CVaR ορίζεται ως η εκτίμηση των απωλειών που υπερβαίνουν το VaR:

$$CVaR_{\alpha} = \frac{1}{1-\alpha} \int_{\alpha}^1 VaR_{\alpha} d\alpha \quad (3-2)$$



Σχήμα 3-1: Αξία σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) και Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR)

3.3 Εκτίμηση και ανάλυση ρίσκου χρόνου μετακίνησης

Η μεθοδολογία ανάλυσης ρίσκου που υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή στηρίζεται στις έννοιες της Αξίας σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) και της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) για την ανάλυση της απόδοσης του δικτύου, αλλά και τη βελτιστοποίηση του ελέγχου της κυκλοφορίας.

Στην προτεινόμενη ανάλυση ρίσκου της απόδοσης ενός κυκλοφοριακού δικτύου ως απώλεια έχει θεωρηθεί η απώλεια του χρόνου που αντιστοιχεί στην καθυστέρηση με την οποία επιβαρύνεται ένας χρήστης του συγκοινωνιακού δικτύου για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου, το VaR για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης α είναι η ελάχιστη τιμή r όπου η πιθανότητα παρατήρησης μεγαλύτερων απωλειών του παραγωγικού χρόνου (λόγω καθυστερήσεων), R , είναι μικρότερη ή ίση του $(1 - \alpha)$. Κατ' αντιστοιχία, το CVaR στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης α είναι η αναμενόμενη απώλεια που επέρχεται στον παραγωγικό χρόνο λόγω καθυστερήσεων στη μετακίνηση καθ' όλη την περίοδο ανάλυσης στην περίπτωση της υπέρβασης της τιμής VaR.

Έτσι, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής επεκτείνεται η διατύπωση των Rockafellar & Uryasev (2000) και Rockafellar & Uryasev (2002) στην ανάλυση ρίσκου της απόδοσης ενός κυκλοφοριακού δικτύου. Αρχικά παρουσιάζεται το ανάλογο της προσέγγισής τους για τις συνεχείς κατανομές (Rockafellar & Uryasev, 2000) και στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλογη περίπτωση των γενικών κατανομών και των διακριτών τιμών (Rockafellar & Uryasev, 2002).

Έστω ότι $f(x, y)$ είναι η απώλεια κεφαλαίων ή χρόνου (καθυστέρησης) που σχετίζεται με το άνυσμα των μεταβλητών αποφάσεως (decision vector) x και το οποίο επιλέγεται από ένα υποσύνολο X του $\mathbb{R}^n$, και το άνυσμα των τυχαίων μεταβλητών y στο $\mathbb{R}^m$. Το άνυσμα x μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστά ένα χαρτοφυλάκιο ή τις παραμέτρους ρύθμισης σηματοδότησης και το X ότι αναπαριστά το σύνολο των διαθέσιμων χαρτοφυλακίων ή το σύνολο των διαθέσιμων παραμέτρων ρύθμισης που υπόκειται σε διάφορους περιορισμούς. Το άνυσμα y αντιπροσωπεύει τις αβεβαιότητες, όπως παραμέτρους της αγοράς ή το μέγεθος της ζήτησης μετακινήσεων, οι οποίες επηρεάζουν την απώλεια.

Για κάθε x , οι απώλειες $f(x, y)$ είναι μία τυχαία μεταβλητή που έχει μία κατανομή στο $\mathbb{R}$, που επηρεάζεται από την κατανομή του y . Η διαφανόμενη κατανομή πιθανοτήτων (underlying probability distribution) του y στο $\mathbb{R}^m$ θεωρείται ότι έχει πυκνότητα που συμβολίζεται ως $p(y)$. Για την εφαρμογή της προσέγγισης δεν είναι απαραίτητος ο αναλυτικός υπολογισμός της $p(y)$, αλλά αρκεί μία διαδικασία παραγωγής τυχαίων τιμών από την $p(y)$.

Η πιθανότητα το $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ να μην υπερβεί ένα κατώτατο όριο r δίνεται από την εξίσωση:

$$\Psi(\mathbf{x}, r) = \int_{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq r} p(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \quad (3-3)$$

Η συνάρτηση Ψ είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής των απωλειών που επηρεάζονται από το $\mathbf{x}$. Ο ορισμός αυτός είναι αντιπροσωπευτικός για την τυχαία μεταβλητή $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ και είναι καθοριστικός στον ορισμό του VaR_a και του $CVaR_a$. Γενικά, η $\Psi(\mathbf{x}, r)$ είναι αύξουσα συνάρτηση ως προς το r και συνεχής τουλάχιστον προς τα δεξιά, γιατί προς τα αριστερά μπορεί να παρατηρηθούν σημειακές αυξήσεις. Σε αυτή την προσέγγιση θεωρείται ότι η συνάρτηση είναι συνεχής ως προς το r έτσι ώστε να μην αυξηθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος. Οι τιμές του VaR_a και του $CVaR_a$ για την τυχαία μεταβλητή των απωλειών που σχετίζεται με το $\mathbf{x}$ στο επίπεδο εμπιστοσύνης α δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$VaR_a = \min\{r \in \mathbb{R} : \Psi(\mathbf{x}, r) \geq a\} \quad (3-4)$$

και

$$CVaR_a = \frac{1}{(1-a)} \int_{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq VaR_a} f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) p(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \quad (3-5)$$

Το VaR_a είναι το αριστερό όριο του διαστήματος που ορίζεται από το α έτσι ώστε $\Psi(\mathbf{x}, r) = a$. Ο ορισμός αυτός προκύπτει από την υπόθεση ότι η $\Psi(\mathbf{x}, r)$ είναι αύξουσα και συνεχής ως προς το $\mathbf{x}$.

Επομένως, η πιθανότητα οι απώλειες να ξεπεράσουν την τιμή του VaR_a (δηλαδή $f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq VaR_a$) είναι ίση με $(1-a)$. Έτσι το $CVaR_a$ ορίζεται ως οι αναμενόμενες απώλειες που σχετίζονται με το $\mathbf{x}$ υπό τη συνθήκη ότι οι απώλειες θα είναι ίσες ή μεγαλύτερες από την τιμή VaR_a .

Στην επόμενη εργασία τους οι Rockafellar & Uryasev (2002) διατύπωσαν τον ορισμό του $CVaR_a$ για μεγέθη που οι κατανομές πυκνοτήτων τους δεν είναι ομαλές και παρουσιάζουν ασυνέχειες. Έτσι για συνεχείς κατανομές, το $CVaR$ για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης αντιστοιχεί στις αναμενόμενες απώλειες όταν οι απώλειες είναι είτε μεγαλύτερες από το VaR (και τότε ορίζεται ως $CVaR^+$) είτε μεγαλύτερες ή και ίσες από το VaR (και τότε ορίζεται ως $CVaR^-$). Στις περιπτώσεις όμως που εμφανίζονται ασυνέχειες στις κατανομές, το $CVaR$ μπορεί να διαφέρει από αυτές τις δύο τιμές, $CVaR^+$ και $CVaR^-$, τα οποία αναφέρονται και ως ανώτερο (upper) και κατώτερο (lower) $CVaR$ αντίστοιχα. Γενικά ισχύει $CVaR^- \leq CVaR \leq CVaR^+$, όπου οι ισότητες ισχύουν μόνο στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει ασυνέχεια στο VaR , ενώ όταν υπάρχει ασυνέχεια ισχύουν οι ανισότητες.

Θεωρείται λοιπόν, ένα τυχαίο άνυσμα y το οποίο διέπεται από ένα πιθανολογικό μέτρο P στο Y που είναι ανεξάρτητο από το x (αυτή η συνθήκη δεν είναι απαραίτητο να ισχύει, ωστόσο είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις γραμμικού προγραμματισμού). Για κάθε x ορίζεται ως $\Psi(x, \cdot)$ στο $\mathbb{R}$ η προκύπτουσα κατανομή για τις απώλειες $z = f(x, y)$:

$$\Psi(x, \xi) = P\{y: f(x, y) \leq \xi\} \quad (3-6)$$

κάνοντας την παραδοχή ότι η $f(x, y)$ είναι συνεχής στο x και μετρήσιμη στο y και ότι $E\{|f(x, y)|\} < \infty$ για κάθε $x \in X$. Έστω ότι $\Psi(x, \xi^-)$ είναι το αριστερό όριο του $\Psi(x, \cdot)$ στο σημείο ξ , τέτοιο ώστε:

$$\Psi(x, \xi^-) = P\{y: f(x, y) < \xi\} \quad (3-7)$$

Θεωρείται ότι ένα «άτομο» πιθανότητας (probability atom) εντοπίζεται στο ξ , όταν η διαφορά

$$\Psi(x, \xi) - \Psi(x, \xi^-) = P\{y: f(x, y) = \xi\} \quad (3-8)$$

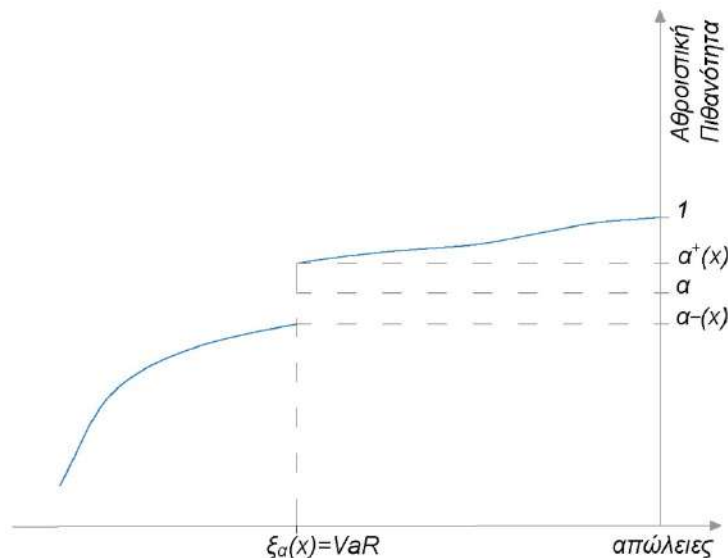
είναι θετική έτσι που το $\Psi(x, \cdot)$ να έχει μία ασυνέχεια στο ξ .

Έτσι για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης $\alpha \in (0, 1)$ το αντίστοιχο VaR ορίζεται ως:

$$VaR_\alpha = \xi_\alpha(x) = \min\{\xi : \Psi(x, \xi) \geq \alpha\} \quad (3-9)$$

Το ελάχιστο στην εξίσωση (3-9) επιτυγχάνεται επειδή η $\Psi(x, \xi)$ είναι μη φθίνουσα και συνεχής προς τα δεξιά στο ξ . Όταν η $\Psi(x, \cdot)$ είναι συνεχής και αύξουσα, η $\xi_\alpha(x)$ είναι η μοναδική τιμή ξ που ικανοποιεί την ισότητα $\Psi(x, \xi) = \alpha$. Διαφορετικά η εξίσωση είτε δεν έχει λύσεις είτε έχει πολλές λύσεις.

Η περίπτωση που η εξίσωση δεν έχει λύσεις αντιστοιχεί σε μία κατακόρυφη ασυνέχεια στο γράφημα της $\Psi(x, \cdot)$, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



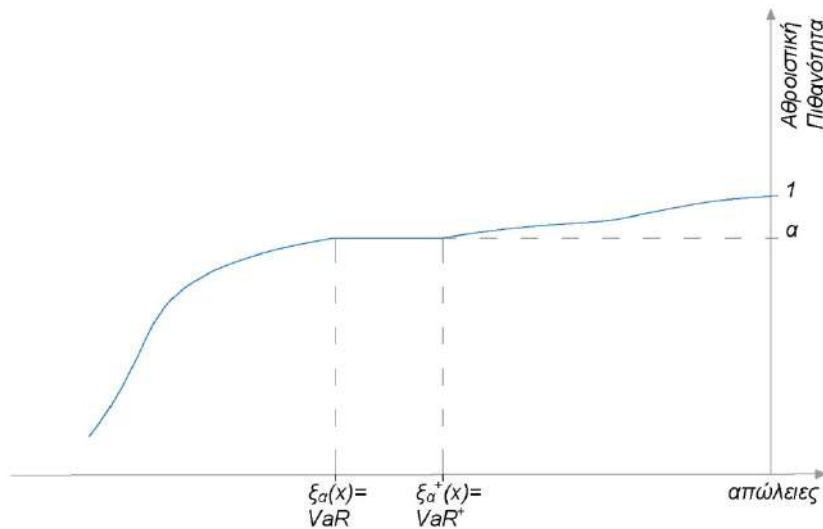
Σχήμα 3-2: Περίπτωση κατακόρυφης ασυνέχειας που η $\Psi(x, \xi)$ δεν έχει λύση στο ξ

Σε αυτή την περίπτωση το επίπεδο εμπιστοσύνης α βρίσκεται σε ένα διάστημα επιπέδων εμπιστοσύνης που έχουν το ίδιο VaR . Έτσι το κάτω και άνω όριο αυτού του διαστήματος είναι:

$$\begin{aligned}\alpha^-(x) &= \Psi(x, \xi_\alpha(x)^-) \\ \alpha^+(x) &= \Psi(x, \xi_\alpha(x))\end{aligned}\tag{3-10}$$

Η περίπτωση που η εξίσωση έχει πολλές λύσεις αντιστοιχεί σε μία οριζόντια ασυνέχεια στο γράφημα της $\Psi(x, \cdot)$, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Σε αυτή την περίπτωση οι λύσεις εντάσσονται σε ένα διάστημα, με το $\xi_\alpha(x)$ να είναι το κάτω όριο και το $\xi_\alpha^+(x)$ να είναι το άνω όριο, όπου:

$$VaR_\alpha^+ = \xi_\alpha^+(x) = \inf\{\xi : \Psi(x, \xi) > \alpha\}\tag{3-11}$$



Σχήμα 3-3: Περίπτωση οριζόντιας ασυνέχειας που η $\Psi(x, \xi)$ έχει πολλές λύσεις στο ξ

Αυτές οι δύο περιπτώσεις είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα γενικών κατανομών, που αντιστοιχούν σε συνηθισμένες περιπτώσεις διακριτών τιμών ή ανάλυσης σεναρίων και που το VaR σε αντίθεση με το $CVaR$ δεν μπορεί να αντιμετωπίσει. Έτσι το $CVaR$, για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης α , ορίζεται ως η μέση τιμή της «ουράς της κατανομής» για τις απώλειες, $z = f(x, y)$. Η κατανομή αυτή είναι η $\Psi_\alpha(x, \cdot)$ και ορίζεται ως εξής:

$$\Psi_\alpha(x, \xi) = \begin{cases} 0 & \xi < \xi_\alpha(x) \\ [\Psi(x, \xi) - \alpha] / [1 - \alpha] & \text{για } \xi \geq \xi_\alpha(x) \end{cases}\tag{3-12}$$

Η $\Psi_\alpha(x, \cdot)$ είναι μία συνάρτηση κατανομής όπως η $\Psi(x, \cdot)$, η οποία είναι μη φθίνουσα και συνεχής προς τα δεξιά τείνοντας στη μονάδα όσο το ξ τείνει στο άπειρο.

Στην περίπτωση που εντοπίζεται στην $\Psi(x, \cdot)$ μία κατακόρυφη ασυνέχεια στο $\xi_\alpha(x)$ (βλ. Σχήμα 3-2), τότε το διάστημα που συμπεριλαμβάνει το $\xi_\alpha(x)$ και εκτείνεται μέχρι το άπειρο έχει πιθανότητα μεγαλύτερη από $(1 - a)$, αφού:

$$\Psi(x, \xi_\alpha(x)^-) < a \leq \Psi(x, \xi_\alpha(x)) \text{ όταν } \Psi(x, \xi_\alpha(x)^-) < \Psi(x, \xi_\alpha(x)) \quad (3-13)$$

και επομένως η ουρά της κατανομής πρέπει να αναφέρεται στο άνω τμήμα $(1 - a)$ της συνολικής κατανομής. Αυτό επιλύεται με αναπροσαρμογή του τμήματος του γραφήματος της αρχικής κατανομής μεταξύ των επιπέδων $(1 - a)$ και 1, έτσι ώστε να εκτείνεται μεταξύ του 0 και του 1, μέσω της εξίσωσης (3-12). Σε αυτό το πλαίσιο επαναδιατυπώνεται ο ορισμός του ανώτερου (upper) και κατώτερου (lower) $CVaR$ ως εξής:

$$CVaR_a^+ = E\{f(x, y) : f(x, y) > \xi_\alpha(x)\} \quad (3-14)$$

$$CVaR_a^- = E\{f(x, y) : f(x, y) \geq \xi_\alpha(x)\} \quad (3-15)$$

Η συνθήκη $f(x, y) \geq \xi_\alpha(x)$ της εξίσωσης (3-15) ορίζεται επαρκώς αφού $P\{f(x, y) : f(x, y) \geq \xi_\alpha(x)\} \geq 1 - a > 0$. Αντίθετα, η συνθήκη της εξίσωσης (3-14) ισχύει μόνο όσο ισχύει $P\{f(x, y) : f(x, y) > \xi_\alpha(x)\} > 0$ δηλαδή $\Psi(x, \xi_\alpha(x)) < 1$, το οποίο δεν ισχύει πάντα για $a \in (0, 1)$ στις περιπτώσεις που υπάρχει μία ασυνέχεια στο $\xi_\alpha(x)$ η οποία καλύπτει το διάστημα $1 - a^-(x)$.

Έτσι ορίζονται οι βασικές σχέσεις μεταξύ του $CVaR$ και των ορίων του, $CVaR^+$ και $CVaR^-$:

- Αν δεν υπάρχει ασυνέχεια στο $\xi_\alpha(x)$ τότε ισχύει:

$$CVaR_a^-(x) = CVaR_a(x) = CVaR_a^+(x) \quad (3-16)$$

- Αν υπάρχει ασυνέχεια στο $\xi_\alpha(x)$ τότε ισχύει:

$$CVaR_a^-(x) < CVaR_a(x) = CVaR_a^+(x) \text{ όταν } a = \Psi(x, \xi_\alpha(x)) \quad (3-17)$$

$$CVaR_a^-(x) = CVaR_a(x) \text{ όταν } \Psi(x, \xi_\alpha(x)) = 1 \quad (3-18)$$

$$CVaR_a^-(x) < CVaR_a(x) < CVaR_a^+(x) \text{ όταν } \Psi(x, \xi_\alpha(x)^-) < a < \Psi(x, \xi_\alpha(x)) < 1 \quad (3-19)$$

Στην περίπτωση που το $\Psi(x, \xi_\alpha(x))$ είναι ίσο με τη μονάδα τότε το $CVaR_a^+(x)$ δεν ορίζεται. Επίσης, φαίνεται ότι στην περίπτωση που δεν υπάρχει ασυνέχεια, η εξίσωση (3-16) αντιστοιχεί στην γενική περίπτωση που αναπτύχθηκε από τους Rockafellar & Uryasev (2000) και περιγράφεται από τις Εξισώσεις (3-4) και (3-5).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του $CVaR$ ως σταθμισμένος μέσος όρος του $CVaR^+$ και του VaR . Έστω ότι η πιθανότητα που αντιστοιχεί στην απώλεια $z = \xi_\alpha(x) = VaR_\alpha(x)$ είναι:

$$\lambda_a(x) = [\Psi(x, \xi_a(x)) - \alpha] / [1 - \alpha] \in [0, 1] \quad (3-20)$$

Αν $\Psi(x, \xi_a(x)) < 1$, οπότε υπάρχει πιθανότητα οι απώλειες να είναι μεγαλύτερες από $\xi_a(x)$, τότε:

$$CVaR_a(x) = \lambda_a(x)\xi_a(x) + [1 - \lambda_a(x)]CVaR_a^+(x) \quad (3-21)$$

όπου $\lambda_a(x) < 1$, ενώ αν $\Psi(x, \xi_a(x)) = 1$, τότε το $\xi_a(x)$ είναι οι περισσότερες δυνατές απώλειες (και έτσι το $\lambda_a(x)$ ισούται με τη μονάδα και το $CVaR_a^+(x)$ δεν ορίζεται) και επομένως ισχύει το ακόλουθο ως επακόλουθο της εξίσωσης (3-21):

$$CVaR_a(x) = \xi_a(x) \quad (3-22)$$

Το παράδοξο που προκύπτει από την προηγούμενη έκφραση του $CVaR$ ως σταθμισμένος μέσος όρος των VaR_a και $CVaR_a^+$ είναι ότι παρόλο που τα δύο αυτά μεγέθη δεν θεωρούνται συνεκτικά μεγέθη και δεν ορίζονται σε όλες τις περιπτώσεις, το $CVaR$ έχει πολλές καλές ιδιότητες. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η ασυνέχεια μπορεί να διαχωριστεί σε δύο ξεχωριστές οντότητες. Έτσι στον ορισμό των $\alpha^+(x)$ και $\alpha^-(x)$ που δίνεται στην εξίσωση (3-10) και στην περίπτωση που περιγράφεται από τη εξίσωση (3-19), όπου $\alpha^-(x) < \alpha < \alpha^+(x)$, το $\xi_a(x)$ που έχει πιθανότητα $\alpha^+(x) - \alpha^-(x)$ διαχωρίζεται σε δύο οντότητες με αντίστοιχες πιθανότητες: $\alpha^+(x) - \alpha$ και $\alpha - \alpha^-(x)$. Θεωρητικά, μόνο η πρώτη από αυτές τις δύο οντότητες συνορεύει με το διάστημα $(\xi_a(x), \infty)$, το οποίο έχει πιθανότητα $1 - \alpha^+(x)$, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η πιθανότητα:

$$[1 - \alpha^+(x)] + [\alpha^+(x) - \alpha] = 1 - \alpha \quad (3-23)$$

Αντίθετα, αν η ασυνέχεια δεν μπορούσε να διαχωριστεί σε δύο οντότητες θα έπρεπε να επιλεγεί ένα από δύο διαστήματα $[\xi_a(x), \infty)$ και $(\xi_a(x), \infty)$, κανένα από τα οποία δεν έχει πιθανότητα $(1 - \alpha)$.

Οι Rockafellar & Uryasev (2002) διατύπωσαν επίσης, τον ορισμό του $CVaR_a$ για διακριτές τιμές ορισμένες στο $X \times \mathbb{R}$ και απέδειξαν ότι έχει όλες τις ιδιότητες ενός συνεπούς μέτρου ρίσκου όπως τις είχε ορίσει ο Artzner et al. (1999). Έστω ότι ένα μέτρο πιθανότητας P συγκεντρώνεται σε πεπερασμένο αριθμό σημείων y_m του Y , τέτοια ώστε για κάθε $x \in X$ η κατανομή των απωλειών $z = f(x, y)$ να είναι αντίστοιχα συγκεντρωμένη σε πεπερασμένο αριθμό σημείων και η $\Psi(x, \cdot)$ να είναι μία συνάρτηση διακριτών βημάτων (step function) σε αυτά τα σημεία. Έστω, ότι αυτά τα σημεία απωλειών μπορούν να ταξινομηθούν έτσι που $z_1 < \dots < z_m < \dots < z_q$ με την πιθανότητα του z_m να είναι $p_m > 0$. Επομένως, το μέγεθος ρίσκου των απωλειών, R , λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

$$R = \begin{cases} 0 & \text{με πιθανότητα } p_0 \\ z_1 & \text{με πιθανότητα } p_1 \\ \vdots & \vdots \\ z_m & \text{με πιθανότητα } p_m \\ \vdots & \vdots \\ z_q & \text{με πιθανότητα } p_q \end{cases} \quad (3-24)$$

όπου $p_0 = 1 - \sum_{m=1}^q p_m$.

Έστω ότι m_a είναι ένας μοναδικός δείκτης, που αντιστοιχεί στο επίπεδο εμπιστοσύνης α , τέτοιος που:

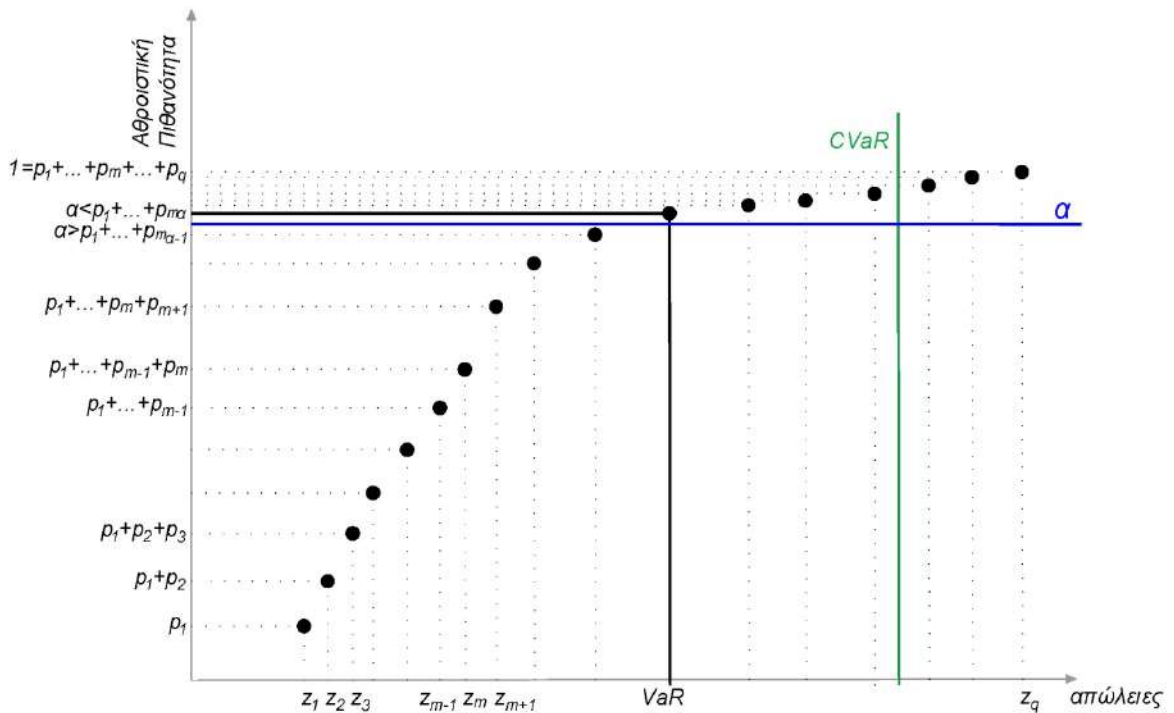
$$\sum_{m=1}^{m_a} p_m \geq \alpha > \sum_{m=1}^{m_a-1} p_m \quad (3-25)$$

Τότε το VaR_a των απωλειών είναι:

$$VaR_a = z_{m_a} \quad (3-26)$$

και το $CVaR_a$ είναι:

$$CVaR_a = \frac{1}{(1-\alpha)} \left[\left(\sum_{m=1}^{m_a} p_m - \alpha \right) z_{m_a} + \sum_{m=m_a+1}^q p_m z_m \right] \quad (3-27)$$



Σχήμα 3-4: Αξία σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) και Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) στην περίπτωση διακριτών τιμών

Επιπλέον, στην περίπτωση των διακριτών τιμών ισχύει:

$$\lambda_a(\mathbf{x}) = \frac{1}{(1-a)} \left(\sum_{m=1}^{m_a} p_m - \alpha \right) \leq \frac{p_{m_\alpha}}{p_{m_\alpha} + \dots + p_q} \quad (3-28)$$

Έτσι σύμφωνα με την εξίσωση (3-25) ισχύουν τα ακόλουθα, που είναι συμβατά με την θεωρηση του $CVaR$ (Εξισώσεις (3-12) και (3-20)-(3-22)):

$$\begin{aligned} \Psi(\mathbf{x}, \xi_\alpha(\mathbf{x})) &= \sum_{m=1}^{m_a} p_m \\ \Psi(\mathbf{x}, \xi_\alpha(\mathbf{x})^-) &= \sum_{m=1}^{m_a-1} p_m \\ \Psi(\mathbf{x}, \xi_\alpha(\mathbf{x})) - \Psi(\mathbf{x}, \xi_\alpha(\mathbf{x})^-) &= p_{m_\alpha} \end{aligned} \quad (3-29)$$

Τέλος, στην περίπτωση που οι μεγαλύτερες απώλειες, z_q , έχουν πιθανότητα $p_q > 1 - \alpha$, τότε ισχύει αντιστοίχως το $CVaR_a = VaR_a = z_{m_\alpha}$.

Για τη βελτιστοποίηση του $CVaR_a$, οι Rockafellar & Uryasev (2002) επέκτειναν τον ορισμό αυτό έτσι ώστε να μπορεί να επιλυθεί και με γραμμικό προγραμματισμό συμπεριλαμβανοντας στις μεταβλητές και την τιμή του $VaR = \xi$ για το επίπεδο εμπιστοσύνης α .

$$CVaR_a(\mathbf{x}, \xi) = \xi + \frac{1}{(1-a)} \sum_{m=1}^q p_m [f(\mathbf{x}, \mathbf{y}_m) - \xi]^+ \quad (3-30)$$

$$\text{όπου } [f(\mathbf{x}, \mathbf{y}_m) - \xi]^+ = \begin{cases} f(\mathbf{x}, \mathbf{y}_m) - \xi & \text{όταν } f(\mathbf{x}, \mathbf{y}_m) - \xi < 0 \\ 0 & \text{όταν } f(\mathbf{x}, \mathbf{y}_m) - \xi \geq 0 \end{cases}$$

Το ανάλογο λοιπόν, πρόβλημα που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή αφορά στο ρίσκο της ενδεχόμενης καθυστέρησης για έναν χρήστη και εξαρτάται από τον χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται το ρίσκο. Η καθυστέρηση στη μετακίνηση των χρηστών, όταν αναλύονται οι συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο σε έναν χρονικό ορίζοντα, εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η μετακίνηση του κάθε χρήστη και επομένως από τις συνθήκες που θα επικρατούν στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της κάθε διαδρομής. Ανάλογα λοιπόν με τις συνθήκες συμφόρησης στο δίκτυο, οι χρήστες βιώνουν διαφορετικά επίπεδα καθυστέρησης (απωλειών χρόνου μετακίνησης) κατά τη διαδρομή τους. Έστω, ότι στο δίκτυο για έναν χρονικό ορίζοντα εμφανίζονται διαφορετικά επίπεδα καθυστέρησης (απώλειες) από διαφορετικά ποσοστά χρηστών. Αυτές οι απώλειες κυμαίνονται από μηδενικές τιμές έως τις μέγιστες τιμές καθυστέρησης που εμφανίζονται στο δίκτυο. Έτσι οι απώλειες στο χρόνο μετακίνησης λόγω καθυστερήσεων, $z_m = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}_m)$, που βιώνουν οι χρήστες θεωρούνται ως η συνέπεια της κυκλοφοριακής ζήτησης που συγκεντρώνεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων, $\mathbf{y}_m$, εντός του χρονικού ορίζοντα ανάλυσης, $[m=1, \dots, q]$, και των παραμέτρων που ορίζουν τις μεταβλητές αποφάσεως του δικτύου, $\mathbf{x}$ (όπως ρυθμίσεις σηματοδότησης, γεωμετρικά χαρα-

κτηριστικά κτλ.). Η πιθανότητα, p_m , εμφάνισης αυτών των συνεπειών λαμβάνεται στη παρούσα θεώρηση ως το ποσοστό των χρηστών που βιώνει το κάθε επίπεδο καθυστέρησης έναντι όλων των χρηστών του δικτύου στον χρονικό ορίζοντα ανάλυσης.

3.4 Το CVaR σε συγκοινωνιακά προβλήματα

Διατυπώσεις του VaR και του CVaR έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλά πεδία έρευνας τα τελευταία χρόνια. Μία αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνητικών τομέων που έχει χρησιμοποιηθεί το CVaR δίνεται από τους Filippi et al. (2017), εξετάζοντας τομείς όπως διαχείριση αποθεμάτων, ενέργεια, διαχείριση αλυσίδας τροφοδοσίας, σχεδιασμός δικτύου και χωροθέτηση κέντρων αλυσίδας τροφοδοσίας, συγκοινωνιακός σχεδιασμός και διαχείριση, σχεδιασμός δικτύων, ιατρικές εφαρμογές, θέματα χρονο-δρομολόγησης και άλλα.

Στη συνέχεια αναφέρονται όλες τις εργασίες που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί το CVaR σε θέματα στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας και ενδεικτικά επιλεγμένες εργασίες σε άλλα αντικείμενα συγκοινωνιακού σχεδιασμού και διαχείρισης συστημάτων, όπως εύρεση βέλτιστης διαδρομής, διακίνηση επικίνδυνων υλικών και διαχείριση υποδομών.

Στρατηγικές ελέγχου κυκλοφορίας

Ο Yin (2008) χρησιμοποίησε πρώτη φορά το CVaR για τη βελτιστοποίηση σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου θεωρώντας ότι ο σχεδιασμός προγραμμάτων σηματοδότησης σταθερού χρόνου δεν είναι αξιόπιστος όταν παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις στις κυκλοφοριακές συνθήκες. Πρότεινε, λοιπόν, τη χρήση τριών μοντέλων για την εύρεση της βέλτιστης αξιόπιστης σηματοδότησης, τα οποία χωρίς να αποκλίνουν πολύ από το βέλτιστη λύση παρουσιάζουν πιο σταθερή απόδοση όταν υπάρχει διακύμανση των κυκλοφοριακών συνθηκών σε σχέση με τις συνθήκες σχεδιασμού ή όταν παρατηρείται το χειρότερο δυνατό σενάριο. Αναλύοντας μετρήσεις κυκλοφοριακού φόρτου παρατήρησε ότι σε πολλές περιπτώσεις ο φόρτος παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις ακόμη και όταν αναλύεται η ίδια ώρα της ημέρας και η ίδια ημέρα της εβδομάδας. Έτσι ο Yin πρότεινε η εύρεση των βέλτιστων χρόνων σηματοδότησης να μην στηρίζεται σε μία δεδομένη τιμή που μπορεί να αντιστοιχεί στη μέγιστη ή μέση τιμή των φόρτων που παρατηρούνται σε έναν κόμβο, αλλά να συμπεριλάβει στη διαδικασία την αβεβαιότητα της διακύμανσης της ζήτησης. Το πρώτο μοντέλο που προτείνει ελαχιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης της καθυστέρησης ανά όχημα που προκύπτουν από την ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων ζήτησης. Το δεύτερο μοντέλο που προτείνει ελαχιστοποιεί στο CVaR της μέσης καθυστέρησης ανά όχημα που προκύπτει από την ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων ζήτησης. Τέλος, το τρίτο μοντέλο είναι της μορφής min-max έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί η δυσκολία προσδιορισμού και ανάλυσης όλων των δυνατών σεναρίων ζήτησης, λαμβάνοντας την αναμενόμενη ελάχιστη και

μέγιστη τιμή των φόρτων. Η μέση καθυστέρηση ανά όχημα που χρησιμοποιείται και στα τρία μοντέλα εκτιμάται με τη χρήση της στατικής θεώρησης του μοντέλου HCM2000. Τα οφέλη των προτεινόμενων μεθόδων αποδεικνύονται μέσω της μεταξύ τους σύγκρισης και της σύγκρισης με την κλασσική μεθοδολογία βελτιστοποίησης σε δύο κόμβους.

Οι Zhang et al. (2010) επέκτειναν τη χρήση του CVaR στην εύρεση βέλτιστης αξιόπιστης σηματοδότησης σε αρτηρία. Κατά αντιστοιχία με τη θεώρηση του Yin (2008), δημιουργούνται διαφορετικά σενάρια ζήτησης, τα οποία αναλύονται με τη χρήση του CTM (Daganzo, 1994) για να εκτιμηθεί η δυναμική επίπτωση στην καθυστέρηση των χρηστών και βελτιστοποιούνται με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης της σηματοδοτούμενης αρτηρίας είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης στην αρτηρία κατά τη διάρκεια μίας περιόδου ανάλυσης χρησιμοποιώντας τις συσσωρευτικές καμπύλες αφίξεων και αναχωρήσεων σε κάθε κελί για κάθε χρονικό βήμα. Οι συγγραφείς επέκτειναν το CTM (Daganzo, 1994) για σηματοδοτούμενες αρτηρίες που είχε αναπτυχθεί από τον Lo (1999, 2001) έτσι ώστε να κωδικοποιούνται αρτηρίες δύο κατευθύνσεων, να συμπεριλαμβάνονται αναλυτικά οι φάσεις της σηματοδότησης και να αντιστοιχεί σε ένα γραμμικό σύστημα ισοτήτων και ανισοτήτων με ακέραιες μεταβλητές, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βελτιστοποίηση της περιόδου σηματοδότησης, των χρόνων πρασίνου των φάσεων, των χρονικών μετατοπίσεων και της διαδοχής των φάσεων. Έτσι για κάθε σενάριο ζήτησης και κάθε δυνατό σύνολο ρυθμίσεων σηματοδότησης εκτιμάται η συνολική καθυστέρηση μέσω του τροποποιημένου CTM. Για κάθε δυνατό σύνολο ρυθμίσεων σηματοδότησης το CVaR της συνολικής καθυστέρησης εκτιμάται από την ανάλυση των σεναρίων ζήτησης, ενώ σκοπός της βελτιστοποίησης είναι να εντοπίσει τις ρυθμίσεις σηματοδότησης που ελαχιστοποιούν το CVaR. Οι Zhang et al. (2013) επέκτειναν τη προηγούμενη εργασία στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης αρτηρίας ως ένα πρόβλημα διπλής αντικειμενικής συνάρτησης, ελαχιστοποιώντας τη συνολική καθυστέρηση στην αρτηρία και το CVaR της έκθεσης σε ρύπους λαμβάνοντας ως στοιχείο αβεβαιότητας τη μεταβλητότητα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου για να διαμορφώσουν διαφορετικά σενάρια. Η τελική επιλογή της βέλτιστης ρύθμισης προκύπτει από την ανάλυση του μετώπου Pareto μεταξύ της συνολικής καθυστέρησης και του CVaR της έκθεσης σε ρύπους.

Οι Zhang & Yin (2008) επιχείρησαν να συντονίσουν τους σηματοδοτούμενους κόμβους σε μία αρτηρία με επενεργούμενη σηματοδότηση, χρησιμοποιώντας την μέθοδο του Little (1966) για την εύρεση των χρονικών μετατοπίσεων. Θεώρησαν ότι η έναρξη της πράσινης και κόκκινης ένδειξης αποτελούν αβεβαιότητα στο σύστημα που ακολουθεί μία τυχαία κατανομή, η οποία προσδιορίζεται μέσω ενός συνόλου σεναρίων διαφορετικών χρόνων σηματοδότησης. Η απώλεια σε αυτή την περίπτωση εκτιμάται μέσω της μεθόδου του Little (1966) και αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ της μέγιστης χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευ-

σης (bandwidth) και της προκύπτουσας ζώνης για το κάθε σενάριο. Υλοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία σε μία αρτηρία διπλής κατεύθυνσης με πέντε σηματοδοτούμενους κόμβους και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την κλασσική προσέγγιση εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης, χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή της ζήτησης, φαίνεται ότι η προτεινόμενη προσέγγιση παρέχει πιο αξιόπιστα προγράμματα σηματοδότησης χωρίς να αποκλίνει σημαντικά από τη βέλτιστη λύση. Από τη σύγκριση της κλασσικής και της προτεινόμενης προσέγγισης φαίνεται ότι στις δυσμενέστερες περιπτώσεις η μέθοδος του CVaR ανταποκρίνεται καλύτερα, ενώ στις περιπτώσεις με ευνοϊκότερες συνθήκες η κλασσική μέθοδος υπερέχει.

Το πρόβλημα του προσδιορισμού του ιδανικότερου συνόλου φόρτου για την εύρεση της βέλτιστης και πιο αξιόπιστης σηματοδότησης σε δίκτυο αποτέλεσε πεδίο έρευνας και στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας (Papatzikou & Stathopoulos, 2015). Σε αυτή την εργασία η απώλεια του χρόνου μετακίνησης που συσχετίζεται με το ρίσκο ορίζεται στο πλαίσιο της περιόδου ανάλυσης, όπως διατυπώνεται και στην παρούσα διατριβή. Έτσι, οι απώλειες αντιστοιχούν στη διαφορά του προσομοιωμένου χρόνου μετακίνησης από τον αναμενόμενο χρόνο μετακίνησης των χρηστών για κάθε χρονικό βήμα της περιόδου ανάλυσης, ενώ η πιθανότητα εμφάνισης αυτών των απωλειών έχει θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο ποσοστό των χρηστών που βιώνουν αυτές τις απώλειες σε σχέση με το σύνολο των χρηστών. Στη προτεινόμενη μεθοδολογία εκκινώντας από ορισμένες αρχικές συνθήκες σηματοδότησης πραγματοποιείται δυναμικός καταμερισμός της ζήτησης στο δίκτυο για μία εκτεταμένη περίοδο ανάλυσης μέσω του δυναμικού μεσοσκοπικού μοντέλου DTALite, που είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Στη συνέχεια για κάθε βήμα προσομοίωσης πραγματοποιείται βελτιστοποίηση της σηματοδότησης μέσω TRANSYT-7F εξετάζοντας κάθε φορά ξεχωριστά το κάθε βήμα. Οι ρυθμίσεις σηματοδότησης που έχουν προκύψει από κάθε βήμα κωδικοποιούνται στο μεσοσκοπικό εργαλείο δυναμικού καταμερισμού ως σηματοδότηση σταθερού χρόνου και εκτιμάται το CVaR των απωλειών του χρόνου μετακίνησης για την εκτεταμένη περίοδο ανάλυσης. Η επιλογή των ρυθμίσεων σηματοδότησης γίνεται βάσει της χαμηλότερης τιμής του CVaR. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο δίκτυο υποδείγματος που έχει χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα διατριβή (Allsop & Charlesworth, 1977) και πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας στο επίπεδο εμπιστοσύνης για τον υπολογισμό του CVaR και στη ταχύτητα που ορίστηκε για τον υπολογισμό του αναμενόμενου χρόνου μετακίνησης. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής και των αναλύσεων ευαισθησίας υπέδειξαν ότι το καταλληλότερο χρονικό βήμα για την εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης αντιστοιχεί στο βήμα όχι με την υψηλότερη ζήτηση, αλλά σε αυτό που έπεται και στο οποίο η συμφόρηση παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα.

Τέλος, η προτεινόμενη προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση σταθερού χρόνου σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου σε μεμονωμένο κόμβο που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή έχει δημοσιευτεί (Papatzikou & Stathopoulos, 2017) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο διασπαρμένης αναζήτησης για την εύρεση βέλτιστων λύσεων και αναλύοντας το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστων χρόνων σηματοδότησης σε ένα σύνολο εναλλακτικών συνδυασμών φάσεων σηματοδότησης.

Εύρεση βέλτιστης διαδρομής

Το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης διαδρομής των χρηστών λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των χρόνων διαδρομής έχει εξεταστεί στο πλαίσιο της ελαχιστοποίησης του ρίσκου και μέσω του CVaR. Οι Chen & Zhou (2010) πρότειναν ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη αξιοπιστίας στη διακύμανση της μεταβλητότητας των χρόνων διαδρομών στην διαδικασία επιλογής των βέλτιστων διαδρομών. Σε αυτή την εργασία έχει θεωρηθεί ότι οι χρήστες επιθυμούν να ελαχιστοποιήσουν όχι τον αποδεκτό αναμενόμενο χρόνο διαδρομής, που αντιστοιχεί στην έννοια του VaR, αλλά τον μέσο χρόνο διαδρομής που υπερβαίνει τον αναμενόμενο χρόνο τους και που αντιστοιχεί στο CVaR, λαμβάνοντας υπόψη τους διαφορετικούς παράγοντες αβεβαιότητας που επηρεάζουν τη μεταβλητότητα των χρόνων μετακίνησης. Η στοχαστική θεώρηση στην επιλογή της διαδρομής από τους χρήστες στο πλαίσιο της ελαχιστοποίησης του CVaR του χρόνου διαδρομής εξετάστηκε από τους Chen et al. (2011), ενώ οι Sun & Gao (2012) στη στοχαστική τους προσέγγιση δεν περιορίζονται από την υπόθεση ότι οι χρόνοι διαδρομής ακολουθούν κανονική κατανομή. Οι Zhang et al. (2018) επέκτειναν το μοντέλο των Chen & Zhou (2010) έτσι ώστε να λάβουν υπόψη τις συνδιακυμάνσεις των χρόνων διαδρομών, αλλά και τα πιθανά εύρη των διακυμάνσεων. Έτσι το κριτήριο που προτείνουν λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες των χρόνων μετακίνησης, αλλά και των υποφαινόμενων κατανομών που αυτές ακολουθούν. Πρόσφατα, οι Zhao & Zhang (2018) διατύπωσαν ένα δυναμικό μοντέλο επιλογής διαδρομής λαμβάνοντας υπόψη αβεβαιότητες του δικτύου. Σε αντίθεση με άλλες στοχαστικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιείται μία τυχαία μεταβλητή με δεδομένη κατανομή, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν στοιχεία από καταγραφές της πορείας των διασυνδεδεμένων οχημάτων (connected vehicles) για την διαμόρφωση του προτεινόμενου μοντέλου. Η αβεβαιότητα των χρόνων διαδρομών εκφράζεται μέσω του VaR και του CVaR στο δυναμικό μοντέλο επιλογής βέλτιστης διαδρομής, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των χρηστών σε σχέση με την επιλογή πιο «επικίνδυνων» χρονικά διαδρομών.

Διακίνηση επικίνδυνων υλικών

Ένα κρίσιμο θέμα στη διακίνηση επικίνδυνων υλικών είναι ο προσδιορισμός των καλύτερων δυνατών διαδρομών για τη μεταφορά υλικών μεταξύ σημείων προέλευσης και προορισμού.

Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύσσονται μοντέλα τα οποία εκτιμούν το ρίσκο που παρουσιάζουν εναλλακτικές διαδρομές και αντίστοιχοι αλγόριθμοι εύρεσης βέλτιστων διαδρομών. Το ρίσκο ορίζεται από τις αναμενόμενες συνέπειες που ένα ατύχημα μπορεί να προκαλέσει στον πληθυσμό και στο περιβάλλον και από την πιθανότητα που έχουν αυτές οι συνέπειες να εμφανιστούν. Οι Toumazis et al. (2013) επέλυσαν το πρόβλημα της εύρεσης καλύτερης διαδρομής σε ένα δίκτυο, του οποίου οι σύνδεσμοι έχουν δύο χαρακτηριστικά, την πιθανότητα να συμβεί ένα ατύχημα και την εκτίμηση για τις αναμενόμενες συνέπειες από το ατύχημα. Η προσέγγισή τους στοχεύει στην εύρεση μιας βέλτιστης διαδρομής που θα ελαχιστοποιεί το ρίσκο των συνεπειών ενός ατυχήματος στο σύνολο της διαδρομής, χρησιμοποιώντας ως μέγεθος ρίσκου το CVaR. Οι Toumazis & Kwon (2013) επέκτειναν την προσέγγισή τους σε δυναμικά δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι πιθανότητες εμφάνισης ατυχημάτων και οι συνέπειες ατυχημάτων είναι χρονικά εξαρτώμενες, ενώ εισάγουν και μία επιπλέον μεταβλητή στο πρόβλημα που αφορά στην επιλογή της βέλτιστης ώρας έναρξης της διαδρομής. Οι Faghhih-Roohi et al. (2016) επέκτειναν την μεθοδολογία που ανέπτυξαν οι Toumazis & Kwon (2013) σε ένα πρόβλημα πολλαπλών εμπορευμάτων διαφορετικών υλικών, θεωρώντας ότι οι συνέπειες ενός ατυχήματος εξαρτώνται από το είδος των υλικών ορίζοντας παράλληλα και διαφορετική ιεράρχηση υλικών και λαμβάνοντας υπόψη ότι όλα τα υλικά δεν μπορούν να μεταφερθούν ταυτόχρονα. Hosseini & Verma (2018) πρότειναν τη χρήση του CVaR για τη δρομολόγηση επικίνδυνων υλικών μέσω του σιδηροδρομικού δικτύου λαμβάνοντας υπόψη το περιορισμένο σιδηροδρομικό δίκτυο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, αλλά και τον περιορισμένο αριθμό προκαθορισμένων σιδηροδρομικών υπηρεσιών. Ο ορισμός του CVaR ακολουθεί την προσέγγιση των Rockafellar & Uryasev (2002) και διατυπώνεται στο πλαίσιο του προβλήματος που εξετάζεται.

Διαχείριση δικτύων και στόλου σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης

Στη διαχείριση δικτύων και στόλου σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης είναι κρίσιμη η εκτίμηση των ενδεχόμενων κινδύνων και η ενσωμάτωση στον σχεδιασμό της έννοιας του ρίσκου για την ελαχιστοποίηση των συνεπειών που συνεπάγονται επιλογές ή αποφάσεις. Ο Noyan (2012) ανέπτυξε ένα στοχαστικό μοντέλο αποφυγής ρίσκου δύο σταδίων χρησιμοποιώντας ως μέγεθος ρίσκου το CVaR για τη διαχείριση καταστροφών. Συγκεκριμένα αντιμετώπισε το πρόβλημα του προσδιορισμού των θέσεων εγκαταστάσεων παροχής βοήθειας και των επιπέδων αποθεμάτων σε κάθε εγκατάσταση στην περίπτωση αβεβαιότητας στη ζήτηση και στην κατάσταση του δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί για τη διανομή των απαιτούμενων υλικών. Οι Alem et al. (2016) πρότειναν τη δυναμική θεώρηση του προβλήματος δύο σταδίων στοχαστικού προγραμματισμού, όπου επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του κόστους της διανομής και της μη-εξυπηρετούμενης ζήτησης. Στο πρώτο στάδιο του προβλήματος σχεδιάζονται οι προκαθορισμένες θέσεις των εγκαταστάσεων και η χωρητικότητα του στόλου οχη-

μάτων, ενώ στο δεύτερο στάδιο επιλύεται το επιχειρησιακό επίπεδο της διακίνησης των υλικών και της βοήθειας, λαμβάνοντας αποφάσεις σχετικά με την εύρεση διαδρομών για τη δρομολόγηση των οχημάτων, αλλά και σχετικά με την απογραφή και την προμήθεια της τροφοδοσίας. Οι Chunlin & Liu (2012) επιλύσανε το πρόβλημα της διανομής υλικών διάσωσης σε μία κατάσταση έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιώντας τον τυχαίο περιορισμένο στοχαστικό προγραμματισμό (chance constraint stochastic programming) στην περιγραφή του προτεινόμενου μοντέλου για να λάβουν υπόψη αβεβαιότητες του χρόνου, της περιοχής, τον αριθμό των απαιτούμενων πόρων έκτακτης ανάγκης, κτλ.

Οι Boginski et al. (2009) ανέλυσαν το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης διαδρομής στη περίπτωση που σύνδεσμοι του δικτύου μπορεί να μην είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, όπως περιπτώσεις αυξημένης συμφόρησης αυτοκινητοδρόμων ή περιπτώσεις που λόγω έκτακτης ανάγκης σε ορισμένους συνδέσμους έχει απαγορευτεί η κυκλοφορία οχημάτων. Στην προσέγγισή τους το CVaR αντιπροσωπεύει τις μέσες μέγιστες απώλειες φόρτου στο δίκτυο και συμπεριλαμβάνεται σε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού. Οι Lu et al. (2018) διατύπωσαν το πρόβλημα της προστασίας του δικτύου μεταφορών για την αντιστάθμιση ακραίων φαινομένων, όπως ο σεισμός μέσω ενός μοντέλου δύο σταδίων στοχαστικού προγραμματισμού. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται ελαχιστοποίηση του κόστους αποκατάστασης ζημιών μέσω στρατηγικών αποφάσεων, ενώ στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται ελαχιστοποίηση του κόστους μετακίνησης. Το CVaR χρησιμοποιείται ως μέτρο ρίσκου για το συνολικό κόστος του συστήματος.

Διαχείριση και συντήρηση υποδομών

Η διαχείριση και συντήρηση συγκοινωνιακών υποδομών αφορά συνήθως μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο σχεδιασμό και συμπεριλαμβάνει στρατηγικές αποφάσεις αναλύοντας το κόστος της λειτουργίας και της συντήρησής τους. Οι Damnjanovic et al. (2008) ανέπτυξαν ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των στρατηγικών ανακατασκευής αυτοκινητοδρόμων σε σχέση με την αποδοτικότητα της λειτουργίας του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλεια, την κινητικότητα και το κόστος της αποκατάστασης. Το CVaR χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση και μέτρηση του ρίσκου στην απόδοση του οδοστρώματος και στη μεταφορική ζήτηση. Έτσι η στρατηγική αποκατάστασης του οδοστρώματος ενός δικτύου επιλέγεται έχοντας ως κριτήριο την ελαχιστοποίηση του CVaR της κακής ποιότητας του οδοστρώματος βάσει περιορισμών στο διαθέσιμο προϋπολογισμό. Οι στρατηγικές αύξησης της χωρητικότητας συνδέσεων αξιολογούνται χρησιμοποιώντας το CVaR του χρόνου μετακίνησης για την εύρεση της βέλτιστης επιλογής, όπως και το CVaR του ρυθμού ατυχημάτων αναλογικά με το φόρτο, συνδέοντας την αύξηση του ρυθμού ατυχημάτων με την αύξηση του λόγου φόρτου προς χωρητικότητα ενός συνδέσμου. Οι Seyedshohadaie et al. (2010) προτείνουν μία μέθοδο ρίσκου για τον προσδιορισμό της βέλτι-

στης πολιτικής συντήρησης και αποκατάστασης συγκοινωνιακών υποδομών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ένα επίπεδο ποιότητας στο δίκτυο για ένα δεδομένο επίπεδο ρίσκου. Το μακροπρόθεσμο μοντέλο διαμορφώνεται στο πλαίσιο της Markov διαδικασίας λήψης απόφασης με ενέργειες για την αποφυγή του ρίσκου και με πιθανότητες που περιγράφουν την αβεβαιότητα στην διαδικασία φθοράς. Οι Osawa & Honda (2016) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά αβεβαιότητας του ρίσκου και της χρονικής του εξέλιξης που συναρτάται με τη φθορά των κατασκευών και των εργασιών συντήρησης. Το CVaR χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση του ρίσκου αναλύοντάς το ενιαία σε μία περίοδο ή διαχωρίζοντάς το σε πολλαπλές περιόδους.

3.5 Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η προσέγγιση της ανάλυσης ρίσκου στο σχεδιασμό των μεταφορικών συστημάτων και πραγματοποιήθηκε μία περιγραφή των διαθέσιμων μοντέλων ρίσκου που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Η ανάλυση και παρουσίαση των διαφορετικών προσεγγίσεων και των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των διαφόρων μεθόδων ανάλυσης ρίσκου οδήγησαν στην υιοθέτηση του μοντέλου της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) στην παρούσα διατριβή. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι έννοιες της Αξίας σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) και της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) όπως διαμορφώθηκαν για την ανάλυση ρίσκου μετακινήσεων σχετικά με την διερεύνηση της απόδοσης του δικτύου. Στην προτεινόμενη ανάλυση ρίσκου της απόδοσης ενός κυκλοφοριακού δικτύου ως απώλεια έχει θεωρηθεί η απώλεια του χρόνου που αντιστοιχεί στην καθυστέρηση με την οποία επιβαρύνεται ένας χρήστης του συγκοινωνιακού δικτύου για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου, το VaR για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης α είναι η ελάχιστη τιμή r όπου η πιθανότητα παρατήρησης μεγαλύτερων απωλειών του παραγωγικού χρόνου (λόγω καθυστερήσεων), R , είναι μικρότερη ή ίση του $(1 - \alpha)$. Κατ' αντιστοιχία, το CVaR στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης α είναι η αναμενόμενη απώλεια που επέρχεται στον παραγωγικό χρόνο λόγω καθυστερήσεων στη μετακίνηση καθ' όλη την περίοδο ανάλυσης στην περίπτωση της υπέρβασης της τιμής VaR. Τέλος, καταλήγουμε με μία ανασκόπηση των εργασιών που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί το CVaR σε θέματα στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας και ενδεικτικά σε επιλεγμένες εργασίες σε άλλα αντικείμενα συγκοινωνιακού σχεδιασμού και διαχείρισης συστημάτων, όπως εύρεση βέλτιστης διαδρομής, διακίνηση επικίνδυνων υλικών και διαχείριση υποδομών.

Κεφάλαιο 4

Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία λήψης αποφάσεων αναφέροντας τις βασικές αρχές των θεμελιωδών θεωριών στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων με σκοπό τη διαχείριση του όγκου της πληροφορίας, της πολυπλοκότητας των παραμέτρων ενός ή πολλαπλών προβλημάτων, της ευρύτητας των εναλλακτικών λύσεων και της επιλογής της καταλληλότερης λύσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται βασικοί ορισμοί, χαρακτηριστικά και τύποι των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων στα οποία έχει στηριχθεί η εξέλιξή τους, ενώ αναλυτικά περιγράφονται τα χαρακτηριστικά συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για τη διαχείριση της κυκλοφορίας και ειδικότερα για το σηματοδοτούμενο έλεγχο της κυκλοφορίας. Η αναδρομή των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας στη διεθνή βιβλιογραφία και η έλλειψη της χρήσης μεθόδων που θα συμπεριλαμβάνουν την ανάλυση του ρίσκου στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα του σχεδιασμού οδήγησε στη διατύπωση του προτεινόμενου στην παρούσα διατριβή Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων και των υποσυστημάτων που το αποτελούν.

4.1 Γενικά

4.1.1 Διαδικασία λήψης αποφάσεων

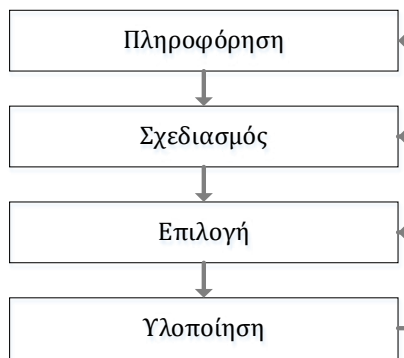
Η διαδικασία λήψης αποφάσεων είναι ένα πολύ συνηθισμένο πρόβλημα που απασχολεί την ακαδημαϊκή κοινότητα, τον επιχειρηματικό κλάδο, αλλά και τους ανθρώπους στις καθημερινές τους δραστηριότητες. Το πρόβλημα της λήψης απόφασης συνίσταται στην επιλογή ενός βέλτιστου, κατά το δυνατόν, τρόπου δράσης επιλέγοντας από ένα σύνολο εναλλακτικών. Όσο το αντικείμενο που αντιμετωπίζεται είναι απλό, η λήψη αποφάσεων μπορεί να στηριχθεί στην εμπειρία και στην εφαρμογή της λογικής, αλλά πολύπλοκα και σύνθετα προβλήματα αντιμετωπίζονται μόνο μέσω επιστημονικών προσεγγίσεων. Η επιστημονική προσέγγιση της διαδικασίας λήψης απόφασης είναι πολυεπίπεδη, περιλαμβάνοντας μεταξύ άλλων διαδικασίες λογικής, προσεγγίσεις ψυχολογίας, ποσοτικές μεθόδους ανάλυσης και πρόβλεψης, κτλ. που συνήθως συνδυάζονται μέσω πληροφοριακών συστημάτων. Οι διαχειριστές συστημάτων που είναι υπεύθυνοι για τη λήψη και εφαρμογή αποφάσεων, πρέπει ιδανικά να συλλέξουν δεδομένα για όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν το σύστημα και την κάθε από-

φαση, να κατανοήσουν και να αναλύσουν τη βαρύτητα και την επιρροή του κάθε παράγοντα, να διαμορφώσουν και να αναλύσουν όλες τις πιθανές εναλλακτικές λύσεις και να εκτιμήσουν το όφελος και το κόστος της κάθε λύσης, έτσι ώστε να καταλήξουν στη βέλτιστη λύση. Όσο όμως το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί γίνεται πιο πολύπλοκο και υπεισέρχεται η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη των βασικών χαρακτηριστικών του προβλήματος, η διαδικασία της λήψης βέλτιστης απόφασης απαιτεί τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων, πληροφοριακών συστημάτων και συγκεκριμένων δομών λογικής αποφάσεων, έτσι ώστε να βοηθήσουν τους διαχειριστές συστημάτων στη λήψη αποφάσεων. Ένα επιπλέον κρίσιμο ζήτημα στη λήψη αποφάσεων σε επιχειρησιακό επίπεδο είναι και ο χρονικός ορίζοντας που οι αποφάσεις αυτές θα ληφθούν, αλλά και θα εφαρμοστούν έτσι ώστε να έχουν τα αναμενόμενα ή/και επιθυμητά οφέλη.

Ο Simon (1960) ισχυρίστηκε ότι οι ανθρώπινες αποφάσεις είναι μερικώς λογικές που υπόκεινται σε δύο κύριους περιορισμούς. Ο πρώτος περιορισμός αφορά στην έκταση της πληροφορόρησης που μπορεί να είναι διαθέσιμη, είτε ως πρωτογενής πληροφορόρηση, που μπορεί να μην είναι πλήρης, είτε ως επεξεργάσιμη μορφή πληροφορόρησης που μπορεί να είναι ατελής. Ο δεύτερος περιορισμός αφορά στις γνωστικές και αντιληπτικές ικανότητες του ανθρώπου ειδικά σε περιπτώσεις που οι αποφάσεις υπόκεινται σε χρονικούς περιορισμούς. Σύμφωνα με τους Gorry & Scott Morton (1971), οι αποφάσεις μπορεί να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τη δομή του προβλήματος σε δομημένες, αδόμητες και ημιδομημένες. Δομημένες αποφάσεις θεωρούνται οι αποφάσεις που αφορούν ένα απολύτως κατανοητό πρόβλημα, με προκαθορισμένες λύσεις, ως αποτέλεσμα ενός μαθηματικού μοντέλου ή αλγορίθμου, και που εντάσσονται σε μία τυποποιημένη διαδικασία, η οποία λόγω της φύσης του προβλήματος μπορεί να αυτοματοποιηθεί. Οι αδόμητες αποφάσεις αφορούν προβλήματα που δεν είναι σαφώς ορισμένα, δεν είναι επαναλαμβανόμενα και παρουσιάζουν σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας, ενώ οι πιθανές λύσεις τους δεν είναι προκαθορισμένες και εμπεριέχουν και αυτές ορισμένο βαθμό αβεβαιότητας. Οι ημιδομημένες αποφάσεις είναι μία ενδιάμεση κατηγορία που περιέχουν στοιχεία και από τις δύο άλλες κατηγορίες, των δομημένων και αδόμητων αποφάσεων, όπως αβεβαιότητα, προκαθορισμένες λύσεις, κτλ.

Ο Simon (1960) εισήγαγε ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων βασιζόμενος στη σαφή αναλογία μεταξύ της λειτουργίας του νου και της λειτουργίας ενός υπολογιστή. Χρησιμοποιώντας αυτή την αναλογία, υποστήριξε ότι η λήψη αποφάσεων αντιστοιχεί σε μία περίπτωση γενικής συμπεριφοράς επίλυσης ενός προβλήματος που παρουσιάζουν οι άνθρωποι και ότι αυτή πραγματοποιείται στο χώρο που καλύπτει το πρόβλημα. Ο χώρος που καλύπτει ένα πρόβλημα απεικονίζεται από τον Simon ως ένα τοπίο, στο οποίο αντιστοιχίζονται οι διαφορετικές του θέσεις με τις εναλλακτικές λύσεις και ενέργειες που είναι διαθέσιμες στον υπεύθυνο λήψης απόφασης. Έτσι η διαδικασία επεξεργασίας κατά την επίλυση του προβλήματος απεικο-

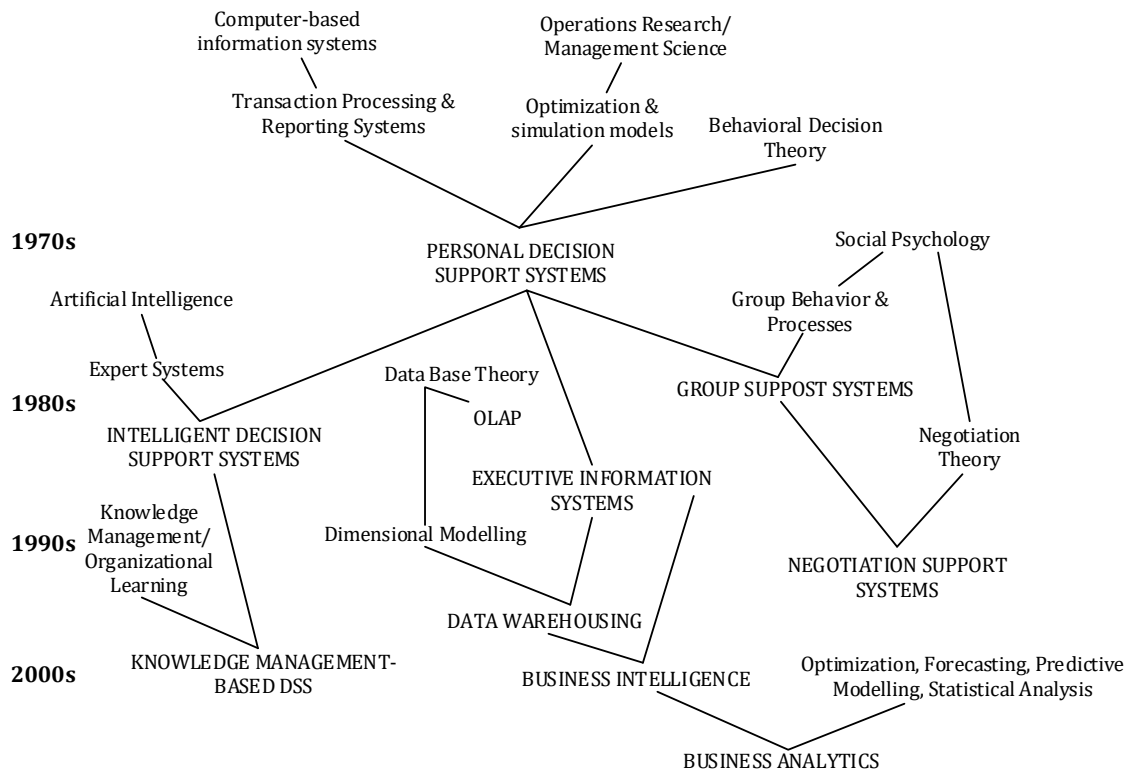
νίζεται ως μετακίνηση από το ένα σημείο στο άλλο στο χώρο του προβλήματος με σκοπό την εύρεση της επιθυμητής λύσης. Το βασικό μοντέλο του Simon που διέπει κάθε διαδικασία λήψης αποφάσεων αποτελείται από τρία βασικά στάδια που τροφοδοτούν τη διαδικασία μέσω της ανάδρασης μεταξύ τους. Το πρώτο στάδιο είναι το στάδιο της πληροφόρησης, στο οποίο καθορίζεται το πρόβλημα και συλλέγονται και αναλύονται οι απαραίτητες πληροφορίες. Το δεύτερο στάδιο αφορά στο σχεδιασμό των εναλλακτικών λύσεων για την επίλυση του προβλήματος μέσω μαθηματικών μοντέλων και αλγορίθμων που αναπαριστούν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων του προβλήματος και των συνεπειών των λύσεων. Το τρίτο στάδιο αφορά στην επιλογή της λύσης μέσω της συστηματικής ανάλυσης και αξιολόγησης των εναλλακτικών που σχεδιάστηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Το μοντέλο του Simon επεκτάθηκε στη συνέχεια από πολλούς ερευνητές (όπως Mintzberg et al. 1976, Courtney 2001) έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνει και ένα τέταρτο στάδιο της υλοποίησης της απόφασης στο οποίο υλοποιείται η ληφθείσα απόφαση και πραγματοποιείται ανάλυση των συνεπειών της μέσω πραγματικών δεδομένων (βλ. Σχήμα 4-1).



Σχήμα 4-1: Αναθεωρημένο μοντέλο λήψης απόφασης Simon

4.1.2 Εξέλιξη των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων

Η αναζήτηση λοιπόν ενός συστήματος που να μπορεί να διαχειρίζεται τον όγκο της πληροφορίας, την πολυπλοκότητα των παραμέτρων ενός ή πολλαπλών προβλημάτων, την ευρύτητα των εναλλακτικών λύσεων και τη επιλογή της καταλληλότερης λύσης οδήγησε στην ανάπτυξη των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ, Decision Support Systems, DSS). Η γενική ιδέα των ΣΥΑ πρωτοπαρουσιάστηκε στο πλαίσιο της οργάνωσης επιχειρήσεων στη δεκαετία του 1960 από το Carnegie Institute of Technology (Keen & Scott Morton, 1978), ενώ εξελίχθηκαν ραγδαία με την παράλληλη ανάπτυξη των υπολογιστικών και πληροφοριακών συστημάτων στις επόμενες δεκαετίες. Εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για την εξέλιξη των ΣΥΑ προσφέρεται στην εργασία των Arnott & Pervan (2016), η οποία συνοπτικά περιγράφεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 4-2: Εξέλιξη των ΣΥΑ (Arnott & Pervan, 2016)

Ακολουθώντας την πορεία εξέλιξης των ΣΥΑ πολλοί ερευνητές έχουν αποδώσει διαφορετικούς ορισμούς, αλλά και πεδία εφαρμογών των ΣΥΑ (Sol et al., 1987). Οι Gorry & Scott Morton (1971) ορίζουν τα ΣΥΑ ως συστήματα αλληλεπίδρασης, βασισμένα στους υπολογιστές, που υποβοηθούν τους υπεύθυνους λήψης απόφασης να επιλύσουν ημιδομημένα προβλήματα χρησιμοποιώντας δεδομένα και μοντέλα. Οι Keen & Scott Morton (1978) θεωρούν ότι τα ΣΥΑ συνδυάζουν τις δυνατότητες των ανθρώπων με αυτές των υπολογιστών, έτσι ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα των αποφάσεων, βασιζόμενα στους υπολογιστές για την επίλυση ημιδομημένων προβλημάτων. Οι Bonczek et al. (1980) επικεντρώνουν τον ορισμό τους στα συστατικά μέρη των ΣΥΑ και τα ορίζουν ως συστήματα βασισμένα στους υπολογιστές που αποτελούνται από τρία συστατικά μέρη που αλληλεπιδρούν, το σύστημα επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη και των άλλων μερών του ΣΥΑ, το σύστημα που περιέχει πληροφορίες σχετικά με το πρόβλημα, όπως δεδομένα, διαδικασίες, κ.α., και το σύστημα επεξεργασίας του προβλήματος, το οποίο και χρησιμοποιείται στη λήψη αποφάσεων. Οι Elam et al. (1985) επέκτειναν την έννοια των ΣΥΑ λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάπτυξη ευφυών συστημάτων ως συστήματα που εκμεταλλεύονται τις διανοητικές ικανότητες των ατόμων και τις ευφυείς τεχνολογίες για τη βελτίωση της δημιουργικότητας στη διαδικασία λήψης απόφασης. Η πληθώρα των ορισμών που έχουν διατυπωθεί από τα πρώτα χρόνια της εξέλιξης των ΣΥΑ σχολιάζεται από τους Turban et al. (2005), οι οποίοι επισημαίνουν ότι οι διαφορετικοί ορισμοί αντιστοιχούν σε διαφορετικούς ορισμούς προβλημάτων από διαφορετικούς ανθρώπους σε διαφορετικές εφαρμογές. Έτσι, ο ορισμός του ΣΥΑ ως ένα

σύστημα, που βασίζεται σε υπολογιστές και το οποίο υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων σε έναν οργανισμό, μπορεί να θεωρηθεί ένας γενικός ορισμός που καλύπτει όλα τα διαφορετικά συστήματα.

Σύμφωνα με τους Turban et al. (2005), τα ΣΥΑ προσφέρουν τις ακόλουθες δυνατότητες στους χρήστες κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης:

- Ταχύτητα στην εκτέλεση πολύπλοκων υπολογισμών με χαμηλό υπολογιστικό κόστος και χρόνο.
- Αυξημένες δυνατότητες επικοινωνίας μεταξύ μελών της ομάδας που χειρίζεται το σύστημα και που είναι υπεύθυνα για τη λήψη αποφάσεων.
- Εύκολη πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων είτε πρωτογενών είτε επεξεργασμένων πληροφοριών.
- Τεχνική υποστήριξη για την αποθήκευση, επεξεργασία και μετάδοση πληροφοριών εξασφαλίζοντας ταχύτητα και χαμηλό κόστος.
- Ποιοτική υποστήριξη μέσω της πρόσβασης σε περισσότερα δεδομένα ακολουθώντας τυποποιημένες διαδικασίες.
- Αυξημένη παραγωγικότητα αναλυτών μέσω των εξελεγμένων εργαλείων στατιστικής ανάλυσης, προσομοίωσης και ευφυούς / τεχνητής νοημοσύνης για την ανάλυση δεδομένων και την προσομοίωση εναλλακτικών λύσεων.
- Υπέρβαση ανθρώπινων αντιληπτικών ορίων.
- Ανταγωνιστικό πλεονέκτημα μέσω της επίτευξης καλύτερων αποφάσεων.

4.1.3 Αρχιτεκτονική και τύποι Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων

Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία σχετικά με την αρχιτεκτονική των ΣΥΑ. Μία γενικευμένη προσέγγιση που έχει υποστηριχθεί από αρκετούς ερευνητές (όπως οι Sprague & Carlson 1982, Haag et al. 2004, Power 2002,) αναλύει ένα ΣΥΑ σε τρία βασικά μέρη:

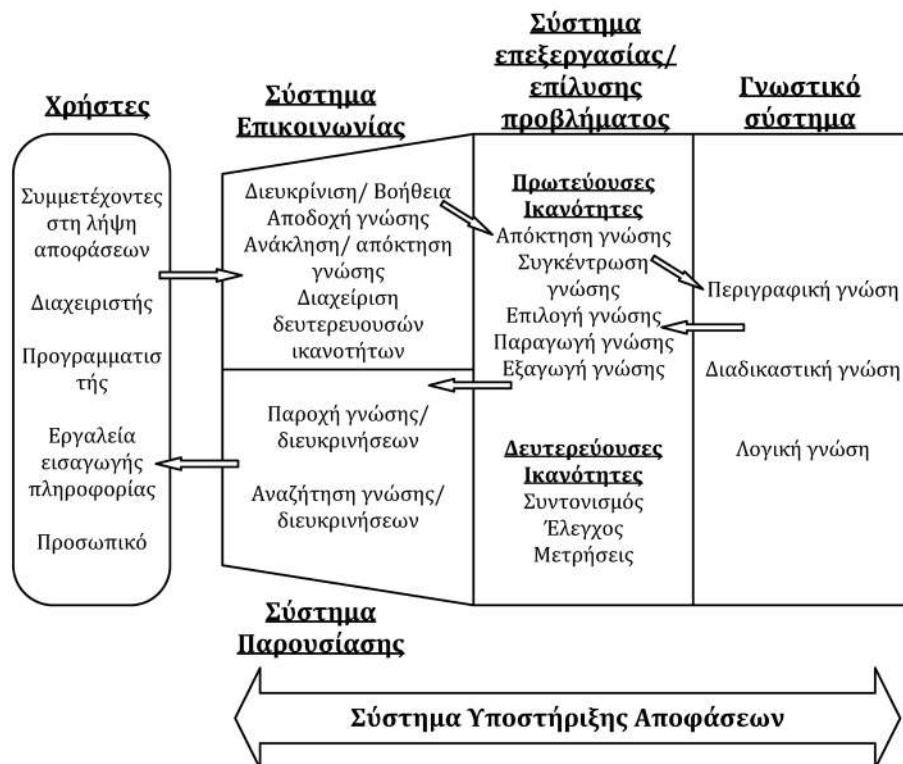
- Το σύστημα δεδομένων, που περιλαμβάνει τη βάση δεδομένων και πληροφοριών είτε σε πρωτογενή μορφή είτε επεξεργασμένα.
- Το σύστημα επεξεργασίας και ανάλυσης του προβλήματος, που περιλαμβάνει τη δομή του προβλήματος, τα κριτήρια ανάλυσης, το μηχανισμό δημιουργίας εναλλακτικών λύσεων και τα εργαλεία αξιολόγησης των λύσεων.

- Το σύστημα επικοινωνίας με τον χρήστη, που περιλαμβάνει διαδικασίες για την εισαγωγή δεδομένων από τους χρήστες προς το ΣΥΑ και την παρουσίαση αποτελεσμάτων από τους χρήστες προς το ΣΥΑ.

Ο Holsapple (2008) ανέλυσε τη δομή των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων περιλαμβάνοντας τέσσερα βασικά μέρη:

- Το σύστημα επικοινωνίας, το οποίο περιλαμβάνει όλα τα μηνύματα που το ΣΥΑ μπορεί να δεχθεί και να επεξεργαστεί.
- Το σύστημα παρουσίασης, το οποίο περιλαμβάνει όλα τα μηνύματα που το ΣΥΑ μπορεί να παράγει.
- Το γνωστικό σύστημα, το οποίο περιέχει όλες τις αποθηκευμένες πληροφορίες.
- Το σύστημα επεξεργασίας και επίλυσης του προβλήματος, το οποίο αποτελεί και το κύριο μέρος του ΣΥΑ, αφού αναλύει το πρόβλημα, σχεδιάζει και αναλύει εναλλακτικές λύσεις και υποβοηθάει στην τελική απόφαση.

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ των κύριων μερών του ΣΥΑ και μεταξύ του χρήστη, έτσι όπως διατυπώνονται από τον Holsapple (2008).



Σχήμα 4-3: Βασική αρχιτεκτονική δομή των ΣΥΑ (Holsapple, 2008)

Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν ακολουθηθεί και στην ταξινόμηση των ΣΥΑ βάσει διαφορετικών κριτηρίων. Μία σημαντική κατηγοριοποίηση είναι αυτή που πρότεινε ο Alter (1980), η οποία στηρίζεται στον βαθμό κατά τον οποίο η έξοδος του συστήματος είναι ικανή να καθορίσει την απόφαση, καθώς και στις γενικές λειτουργίες που ένα ΣΥΑ μπορεί να εκτελέσει. Οι τύποι των ΣΥΑ βάσει του Alter είναι οι ακόλουθες:

- Συστήματα αρχειοθέτησης (file drawer), τα οποία παρέχουν πρόσβαση σε δεδομένα.
- Συστήματα ανάλυσης δεδομένων, τα οποία υποστηρίζουν την επεξεργασία των δεδομένων με ηλεκτρονικά εργαλεία προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες εργασίες ή γενικής φύσης εργαλεία.
- Συστήματα ανάλυσης πληροφοριών, τα οποία παρέχουν πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων και μοντέλα περιορισμένης έκτασης.
- Λογιστικά και χρηματοοικονομικά μοντέλα, τα οποία εκτιμούν τις συνέπειες πιθανών ενεργειών.
- Μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία εκτιμούν τις συνέπειες πιθανών ενεργειών μέσω μοντέλων προσομοίωσης.
- Μοντέλα βελτιστοποίησης, που παρέχουν καθοδήγηση για ενέργειες παράγοντας μία βέλτιστη λύση που υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς.
- Μοντέλα εισηγήσεων, τα οποία πραγματοποιούν μία λογική επεξεργασία που οδηγεί σε μία συγκεκριμένη ενδεδειγμένη απόφαση για μία καλά δομημένη διαδικασία.

Ο Power (2002) επέκτεινε τη θεώρηση των ΣΥΑ και τα κατηγοριοποίησε ανάλογα με το κύριο μέρος που βασίζονται:

- Συστήματα βασιζόμενα στην επικοινωνία (communication-driven), τα οποία καθιστούν δυνατή τη συνεργασία υποστηρίζοντας περισσότερους από έναν χρήστη στη διαδικασία της επεξεργασίας του προβλήματος και της λήψης απόφασης.
- Συστήματα βασιζόμενα στα δεδομένα (data-driven), τα οποία επικεντρώνονται στην πρόσβαση και επεξεργασία δεδομένων και χρονοσειρών δεδομένων του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του προβλήματος.
- Συστήματα βασιζόμενα σε κείμενα (document-driven), τα οποία επικεντρώνονται στη διαχείριση, ανάκτηση και επεξεργασία μη δομημένης μορφής πληροφορίας σε διάφορες ηλεκτρονικές μορφές.

- Συστήματα βασιζόμενα στη γνώση (knowledge-drive), τα οποία εξειδικεύονται στην τεχνολογία επίλυσης προβλημάτων βάσει προγενέστερων γεγονότων, κανόνων, διαδικασιών ή παρόμοιων δομών.
- Συστήματα βασιζόμενα σε μοντέλα (model-driven), τα οποία χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα στατιστικής, χρηματοοικονομικών, βελτιστοποίησης ή προσομοίωσης χρησιμοποιώντας δεδομένα και παραμέτρους που παρέχονται από τους χρήστες με σκοπό την καθοδήγηση στην ανάλυση των συνθηκών λειτουργίας ενός συστήματος, οργανισμού, κτλ.

4.2 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων στη Διαχείριση της Κυκλοφορίας

Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για την υποβοήθηση των Κέντρων Διαχείρισης Κυκλοφορίας στην μείωση των φαινομένων της συμφόρησης και στην διαχείριση του συγκοινωνιακού συστήματος έχουν αναπτυχθεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1980. Οι Van Aerde & Yagar (1988a) αναφέρουν τα οφέλη και τις δυσκολίες που παρουσιάζονται από την ενοποίηση προηγμένων συστημάτων για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη διαχείριση αυτοκινητοδρόμων και δίκτυα αρτηριών. Στη συνέχεια, παρατίθεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων στη διαχείριση της κυκλοφορίας, εφαρμοσμένων πρότυπων συστημάτων, Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για την εύρεση βέλτιστων σηματοδοτικών ρυθμίσεων, καθώς και άλλων υποσυστημάτων εύρεσης σηματοδοτικών ρυθμίσεων.

4.2.1 Γενικά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας

Οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες καταγράφονται από τους Foraste & Scemama (1987) σε ένα πρότυπο έμπειρο σύστημα γνώσεων (Knowledge based expert system, KBES) για την παρακολούθηση της κατάστασης του αστικού οδικού δικτύου, την αξιολόγησή του βάσει προγενέστερων πληροφοριών και τη δημιουργία προτάσεων για τη διαχείριση σηματοδοτούμενων κόμβων από το κέντρο διαχείρισης κυκλοφορίας του Παρισιού. Το σύστημα χρησιμοποιεί και στηρίζεται στη γνώση ειδικών για τη δημιουργία της γνωστικής βάσης, στα στοιχεία της λειτουργίας του δικτύου και στη χρήση κανόνων που έχουν προκύψει από τους ειδικούς για την επίλυση των προβλημάτων. Μετά τον εντοπισμό προβλημάτων συμφόρησης στο δίκτυο προτείνει τη χρήση προγραμμάτων σηματοδότησης σταθερού χρόνου σύμφωνα με την πολιτική που επιδιώκεται να ακολουθηθεί από τους διαχειριστές του συστήματος. Οι Han & May (1989, 1990) πρότειναν επίσης ένα έμπειρο σύστημα γνώσεων (KBES) για τη διάγνωση συμβάντων σε ένα αστικό σηματοδοτούμενο δίκτυο χρησιμοποιώντας τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης συνδυάζοντας την προσέγγιση του δέντρου απόφασης (decision tree) που συμπεριλαμβάνει πιθανά προβλήματα του συστήματος.

Ο Ritchie (1990) πρότεινε μία αρχιτεκτονική ενός ΣΥΑ πραγματικού χρόνου για τη διαχείριση της κυκλοφορίας βάσει ενός έμπειρου συστήματος γνώσεων (KBES) και που ενσωματώνει μία πλατφόρμα επίλυσης προβλημάτων σε ένα ενοποιημένο αστικό δίκτυο και δίκτυο αυτοκινητοδρόμων. Το ΣΥΑ αναλύεται σε πέντε βασικά στάδια: την διάγνωση συμβάντων, την επαλήθευση συμβάντων, την εύρεση και αξιολόγηση πιθανών ενεργειών, την υλοποίηση των επιλεγμένων ενεργειών και την αξιολόγηση της υλοποίησης των ενεργειών. Η ανάλυση της δομής ενός πολύπλοκου ΣΥΑ για τη διαχείριση της κυκλοφορίας οδήγησε στον εντοπισμό κρίσιμων ζητημάτων για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη. Η αρχιτεκτονική αυτού του ΣΥΑ επεκτάθηκε από τους Ritchie & Prosser (1991) και Zhang & Ritchie (1994) στο πρότυπο διαχείρισης αυτοκινητοδρόμων σε πραγματικό χρόνο στην νότια Καλιφόρνια, γνωστό ως FRED (Freeway Real-Time Expert System Demonstration), που απέδειξε τις δυνατότητες, τα οφέλη και τις προοπτικές που ένα ΣΥΑ μπορεί να προσφέρει στο κέντρο διαχείρισης κυκλοφορίας.

Αντίστοιχο ΣΥΑ αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Santa Monica Smart Corridor Demonstration Project από τους Rowe (1989) και Kamini & Gupta (1993). Σκοπός του ΣΥΑ ήταν να δημιουργεί μία βάση δεδομένων με κυκλοφοριακά στοιχεία και στοιχεία συμβάντων για τον αυτοκινητόδρομο και το οδικό δίκτυο της περιοχής σε πραγματικό χρόνο, να παρέχει υποβοήθηση στη λήψη αποφάσεων, να επηρεάζει τη επιλογή διαδρομής των χρηστών και να ρυθμίζει την κυκλοφορία ανάλογα με τις υφιστάμενες συνθήκες, αποκρινόμενο σε συμβάντα που έχουν ανιχνευτεί και επιβεβαιωθεί, μεταβάλλοντας μηνύματα σε πίνακες μεταβλητών μηνυμάτων (VMS), μεταδίδοντας πληροφορίες για την κατάσταση συμφόρησης του δικτύου και για εναλλακτικές διαδρομές, καθώς και τροποποιώντας τις ρυθμίσεις του ελέγχου εισόδων αυτοκινητοδρόμου (ramp metering) και της σηματοδότησης.

Η ανάπτυξη πιο εξελιγμένων μεθόδων στο πεδίο των υπολογιστών προσέφερε κατάλληλο περιβάλλον για την ανάπτυξη ΣΥΑ στη διαχείριση σύνθετων δικτύων. Οι Cuena et al. (1995) και Molina et al. (1998) ανέπτυξαν το σύστημα TRYS, το οποίο είναι ένα σύστημα που βασίζεται στη λογική πρακτόρων (agent-based) για τον έλεγχο αστικών αυτοκινητοδρόμων ενσωματώνοντας ασαφή λογική (fuzzy logic) στη διαδικασία λήψης απόφασης μέσω γνωστικών πλαισίων. Το δίκτυο διαχωρίζεται σε αλληλεπικαλυπτόμενες περιοχές και ένας πράκτορας καταμερίζεται σε κάθε περιοχή. Αυτοί οι πράκτορες πρέπει να ανιχνεύσουν και να διαγνώσουν πιθανά προβλήματα και να προτείνουν εναλλακτικές στρατηγικές ελέγχου στον συντονιστή του συστήματος που δρα σε ανώτερο επίπεδο πραγματοποιώντας διαπραγματεύσεις, έτσι ώστε να αποφασίσει ποιες ενέργειες θα εφαρμοστούν. Οι προτεινόμενες εναλλακτικές στρατηγικές αφορούν σε μηνύματα προς τους χρήστες που εμφανίζονται σε VMS και τους πληροφορούν για εναλλακτικές διαδρομές που μπορούν να ακολουθήσουν, έτσι ώστε να μειωθεί ο κορεσμός των προβληματικών περιοχών. Το προτεινόμενο ΣΥΑ διαμορφώθηκε και εφαρμόστηκε δοκιμαστικά σε δύο κέντρα διαχείρισης κυκλοφορίας, της Μαδρί-

της και της Βαρκελώνης, παρέχοντας αξιόλογες πληροφορίες σχετικά με την ενοποίησή του με υφιστάμενα συστήματα και τη χρήση του από το κέντρο.

Οι Hegyi et al. (2000) ανέπτυξαν ένα ΣΥΑ για να χρησιμοποιηθεί από κέντρα διαχείρισης κυκλοφορίας το οποίο παρέχει κατάλληλο συνδυασμό ενεργειών ελέγχου κυκλοφορίας για μία δεδομένη κυκλοφοριακή κατάσταση του δικτύου χρησιμοποιώντας ασαφή βάση περιπτώσεων (fuzzy case base). Τα βασικά στοιχεία εισόδου του συστήματος είναι η υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου και το κριτήριο βελτιστοποίησης, που είναι είτε ένας μεμονωμένος δείκτης, όπως ο ελάχιστος χρόνος μετακίνησης, είτε ένας σταθμισμένος συνδυασμός περισσότερων δεικτών. Αρχικά πραγματοποιείται μετασχηματισμός των στοιχείων εισόδου με βάση την ασαφή λογική και κατηγοριοποίησή τους και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας μία γνωστική ασαφή βάση προσδιορίζονται οι καταλληλότερες ενέργειες για τα δεδομένα. Η γνωστική ασαφή βάση δημιουργείται χρησιμοποιώντας αποτελέσματα από πληθώρα προσομοιώσεων για διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες και διαφορετικούς συνδυασμούς μέτρων, ενώ συμπληρώνεται από κανόνες και ευρετικά στοιχεία που παρέχονται από έμπειρους χειριστές του κέντρου διαχείρισης κυκλοφορίας. Το ΣΥΑ παράγει μία ταξινομημένη λίστα των καλύτερων μέτρων διαχείρισης της κυκλοφορίας, η οποία παρουσιάζεται στον χειριστή του συστήματος, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται η προβλεπόμενη αποτελεσματικότητα τους είτε βάσει της προηγούμενης αξιολόγησης είτε και χρησιμοποιώντας κάποιο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του δικτύου. Οι ενέργειες που εξετάζονται στην εφαρμογή του ΣΥΑ σε ένα απλό σύστημα αυτοκινητοδρόμου αφορούν στην εμφάνιση δυναμικών μηνυμάτων πληροφόρησης εναλλακτικών διαδρομών, στον αποκλεισμό κυκλοφορίας σε συγκεκριμένες λωρίδες, όπως και στον συνδυασμό τους. Οι Hoogendoorn et al. (2003) επέκτειναν τη λογική του ΣΥΑ που πρότειναν οι Hegyi et al. (2000) για την αξιολόγηση και επιλογή μέτρων διαχείρισης της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ότι (α) βασίζεται στη λογική ανάλυσης διαφορετικών περιπτώσεων που προέρχονται είτε από συνθετικά δεδομένα είτε από πραγματικές εφαρμογές διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου υπό διαφορετικές συνθήκες, (β) ότι προσδιορίζει την ομοιότητα της υφιστάμενης κατάστασης με τις διαφορετικές περιπτώσεις του (α) χρησιμοποιώντας τεχνικές της ασαφούς λογικής και (γ) ότι βασίζεται στην λογική πρακτόρων διαχωρίζοντας το δίκτυο σε μικρότερες περιοχές προβλέποντας για την κάθε περιοχή τις συνέπειες των πιθανών ενεργειών και συνδυάζοντάς αυτές σε επόμενο στάδιο. Τα εναλλακτικά σενάρια, που αξιολογούνται σε ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμων του Άμστερνταμ, αφορούν σε προκαθορισμένα σχέδια δράσεις και περιλαμβάνουν ενέργειες όπως έλεγχος εισόδων αυτοκινητοδρόμου, ομογενοποίηση ταχύτητας, παροχή επιπλέον λωρίδων ή απαγόρευση χρήσης λωρίδας, κτλ.

Οι De Schutter et al. (2003) επίσης επέκτειναν τη λογική που παρουσιάστηκε από τους Hegyi et al. (2000) ως ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων. Το σύστημα που πρότειναν αποτελεί

μέρος ενός ευρύτερου ΣΥΑ και βασίζεται στην ανάλυση περιπτώσεων και στην ασαφή λογική για να παράγει μία ιεραρχημένη λίστα συνδυασμένων μέτρων διαχείρισης κυκλοφορίας και την προβλεπόμενη απόδοσή τους για μία δεδομένη κυκλοφοριακή κατάσταση. Το προτεινόμενο σύστημα δεν στηρίζεται στη χρήση γνώσης από ειδικούς ή ευρετικών κανόνων, αλλά μόνο στην ανάλυση των περιπτώσεων, έτσι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ποιότητα της ανάλυσης περιπτώσεων. Για την αποδοτικότερη ανάλυση του συστήματος, ειδικά σε περιπτώσεις σύνθετων δικτύων, το δίκτυο διαχωρίζεται σε αλληλεπικαλυπτόμενες περιοχές, στις οποίες αντιστοιχίζονται οι πράκτορες για την ανάλυση των περιπτώσεων και την αξιολόγηση.

Οι Almejalli et al. (2007) επέκτειναν τις θεωρήσεις των Hegyi et al. (2000) και De Schutter et al. (2003) και πρότειναν ένα ΣΥΑ που χρησιμοποιεί τρεις προσεγγίσεις, την ασαφή λογική, τα νευρωνικά δίκτυα και τον γενετικό αλγόριθμο. Το σύστημα εφαρμόστηκε σε ένα μικρό τμήμα του περιφερειακού άξονα του Ριάντ στη Σαουδική Αραβία αξιολογώντας μέτρα διαχείρισης κυκλοφορίας, όπως έλεγχος εισόδων αυτοκινητοδρόμου και εμφάνιση μεταβλητών μηνυμάτων διαδρομών, τα οποία έχουν διαμορφωθεί σε προγενέστερο χρόνο βασιζόμενα στις υφιστάμενες υποδομές, στην εμπειρία ειδικών και σε ιστορικά δεδομένα. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει ένα σύνολο κριτηρίων απόδοσης του δικτύου χρησιμοποιώντας ένα προεκπαιδευμένο εργαλείο ασαφούς νευρωνικού δικτύου για να ιεραρχήσει τα πιθανά μέτρα βάσει των ιστορικών δεδομένων και της υφιστάμενης κατάστασης. Σε επόμενη εργασία τους (Dahal et al., 2013) επεκτείνουν αυτή τη θεώρηση και συμπεριλαμβάνουν πολλαπλούς πράκτορες που καταμερίζονται στις περιοχές του δικτύου και έχουν τη δυνατότητα να εξετάζουν το κάθε μέτρο τοπικά, αλλά και συνολικά στο δίκτυο.

Ένα άλλο ΣΥΑ που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας την ασαφή λογική από τους Utama et al. (2017) συνδυάζει τη μετα-ευρετική μέθοδο βελτιστοποίησης ροής νερού (Water Flow Algorithm, WFA), η οποία χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες και να εντοπίσει την καλύτερη εναλλακτική, ενώ η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για να παραμετροποιήσει και να ιεραρχήσει όλες τις παραμέτρους του προβλήματος.

Οι Chen et al. (2010) πρότειναν το πλαίσιο λειτουργίας ενός ΣΥΑ βασιζόμενο σε έμπειρο σύστημα γνώσεων (knowledge based expert system) και στη λογική ανάλυσης περιπτώσεων για τη αναγνώριση προβλημάτων και την πρόταση ενεργειών σε ένα δυναμικό περιβάλλον, επεκτείνοντας τη θεώρηση των Hegyi et al. (2000). Στην πρώτη φάση χρησιμοποιείται ένας κανόνας αντιστοίχισης για την αναγνώριση του προβλήματος και την προκαταρκτική πρόταση ενεργειών και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η ανάλυση περιπτώσεων για να προσδιοριστούν οι ενέργειες που είτε έχουν χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες εφαρμογές είτε έχουν αποθηκευτεί στο σύστημα. Η ανάλυση των προκρινόμενων ενεργειών πραγματοποιείται με ανάλυση στοιχείων από το δυναμικό μεσοσκοπικό καταμερισμό στο δίκτυο.

Οι Ossowski et al. (2005) πρότειναν μία αρχιτεκτονική δομή ενός ΣΥΑ βασιζόμενο σε έμπειρο σύστημα γνώσεων, το οποίο στηρίζεται σε πολλαπλούς πράκτορες και δίνουν παραδείγματα χρήσης και εφαρμογής του για την περίπτωση της διαχείρισης κυκλοφορίας στο Μπιλμπάο και για την περίπτωση της διαχείρισης στόλου λεωφορείων στη Μάλαγα της Ισπανίας. Η μέθοδος που χρησιμοποιούν προέρχεται από τη θεωρία RICA (Role, Interaction, Communicative Act), η οποία βασίζει το σχεδιασμό του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων και την επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων στις οργανωτικές έννοιες. Συγκεκριμένα, για τη διαχείριση της κυκλοφορίας στο Μπιλμπάο χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο δίκτυο πέντε κύριων αρτηριών χωρισμένο σε υποπεριοχές στις οποίες καταμερίζονται αντίστοιχοι πράκτορες διαχείρισης δεδομένων και διαχείρισης προβλημάτων. Οι διαχειριστές προβλήματος αναλύουν τα στοιχεία και εντοπίζουν πιθανά προβλήματα συμφόρησης και διαμορφώνουν εναλλακτικές ενέργειες για την περιοχή τους χρησιμοποιώντας τη γνωστική βάση. Οι ενέργειες αυτές είναι η εμφάνιση μηνυμάτων σε πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων (VMS) για την πληροφόρηση των οδηγών σχετικά με τη συμφόρηση ορισμένων διαδρομών και την πρόταση εναλλακτικών διαδρομών και η επικοινωνία με τις τοπικές αρχές έτσι ώστε να διαχειριστεί ένα συμβάν από τους κατάλληλους ανθρώπους. Οι Dunkel et al. (2011) χρησιμοποίησαν τη σύνθετη επεξεργασία συμβάντων (complex event processing) ως το βασικό εργαλείο για την αναγνώριση, διάγνωση και ανάλυση προβλημάτων καθώς και την εύρεση πιθανών ενεργειών στο ΣΥΑ πολλαπλών πρακτόρων που είχε προταθεί από τους Ossowski et al. (2011), προσφέροντας έτσι σημαντική βελτίωση του υπολογιστικού χρόνου και τη δυνατότητα χρήσης του σε πραγματικό χρόνο.

Οι Chang et al. (2007) προτείνουν ένα ΣΥΑ για τη διαχείριση της κυκλοφορίας και συμβάντων σε αυτοκινητοδρόμους συνδυάζοντας δεδομένα πραγματικού χρόνου από το σύστημα συλλογής διοδίων και το σύστημα καταγραφής οχημάτων με ιστορικά δεδομένα σε ένα μοντέλο μικροσκοπικής προσομοίωσης με κυψελωτά αυτόματα (Cellular Automata, CA), έτσι ώστε να προβλέψουν τις συνθήκες που θα επικρατούν μετά την έναρξη ενός συμβάντος. Τα βασικά μέρη του ΣΥΑ που προτείνουν αφορούν στη συλλογή δεδομένων, στην επεξεργασία δεδομένων, στην προσομοίωση και στην εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Το τελικό αποτέλεσμα της προσέγγισης είναι η χρήση των δεικτών απόδοσης και της προσομοίωσης από τους χειριστές στο κέντρο κυκλοφορίας, έτσι ώστε η απόφαση που θα λάβουν να είναι όσο το δυνατόν καλύτερα ενημερωμένη.

Οι Barcelo et al. (2007) προτείνουν μία αρχιτεκτονική δομή για ένα ΣΥΑ που στηρίζεται στη μικροσκοπική προσομοίωση μέσω του μοντέλου Aimsun για τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος είναι: (α) η συλλογή και αποθήκευση δεδομένων πραγματικού χρόνου και ιστορικών στοιχείων για τη λειτουργία του δικτύου σε μία βάση δεδομένων, (β) ο προσδιορισμός προτύπων κυκλοφορίας και ο εντοπι-

σμός περιοχών που παρουσιάζουν κάποιο κυκλοφοριακό πρόβλημα στο δίκτυο, (γ) η επιλογή από τον χειριστή του συστήματος της υποπεριοχής που επηρεάζεται από το πρόβλημα, (δ) η επιλογή κατάλληλων προεπιλεγμένων στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας μέσω της ανάλυσης συναφών προβλημάτων με χρήση ενός δένδρου αποφάσεων και (ε) η εκτίμηση των προβλεπόμενων επιπτώσεων είτε για την υφιστάμενη κατάσταση είτε και για τον άμεσο χρονικό ορίζοντα εφαρμογής μέσω της προσομοίωσης στο Aimsun το οποίο χρησιμοποιείται ως μία ενοποιημένη πλατφόρμα προσομοίωσης τριών επιπέδων μακροσκοπικά, μεσοσκοπικά και μικροσκοπικά. Τα εναλλακτικά μέτρα διαχείρισης της κυκλοφορίας αφορούν σε απαγόρευση κυκλοφορίας σε λωρίδες, επαναδρομολόγηση μέσω μηνυμάτων σε VMS, τροποποίηση ορίων ταχύτητας και έλεγχος εισόδων σε αυτοκινητοδρόμους. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση και την ανάλυση δεικτών παρέχονται στο χειριστή του συστήματος έτσι ώστε να ληφθεί η απόφαση για την εφαρμογή των καταλληλότερων ενεργειών. Το προτεινόμενο σύστημα εφαρμόστηκε στον περιφερειακό αυτοκινητόδρομο της Μαδρίτης για τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε περιπτώσεις συμφόρησης και συμβάντων.

Ο Hasan (2010) πρότεινε ένα πλαίσιο ανάπτυξης ευφυούς ΣΥΑ για τη διαχείριση κυκλοφορίας σε στρατηγικό επίπεδο βασιζόμενο σε μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφορίας και χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Geographic Information System, GIS) για την διαχείριση των δεδομένων, σεναρίων και προτάσεων. Η αρχιτεκτονική δομή του ΣΥΑ ακολουθεί τη τυπική δομή ενός γενικευμένου ΣΥΑ προσθέτοντας δύο επιπλέον υποσυστήματα, τη διαχείριση σεναρίων και τη δημιουργία εναλλακτικών σεναρίων.

Συμπεριλαμβάνοντας την ανάλυση ρίσκου που είναι αποτέλεσμα της αβεβαιότητας της ζήτησης η Chiou (2015a) ανέπτυξε ένα ΣΥΑ δύο επιπέδων για την εύρεση βέλτιστης στρατηγικής αύξησης της χωρητικότητας συνδέσμων ενός δικτύου. Χρησιμοποιεί μία ισορροπία κατά Stackelberg αποφυγής κινδύνου για το χειρότερο πιθανό σενάριο της απόδοσης του δικτύου, όπου στο άνω επίπεδο ο υπεύθυνος λήψης απόφασης καθορίζει το αξιόπιστο σύνολο συνδέσμων που θα αυξηθεί η χωρητικότητά τους, ενώ στο κάτω επίπεδο οι οδηγοί επιλέγουν τις διαδρομές τους για τη χειρότερη περίπτωση βάσει της αβεβαιότητας της ζήτησης. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας του στο δίκτυο Sioux Falls στη Νότια Ντακότα των ΗΠΑ παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στη λειτουργία του δικτύου όσο τα επίπεδα ζήτησης αυξάνονται.

4.2.2 Εφαρμογές πρότυπων Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας

Η γενική αρχιτεκτονική δομή που παρουσιάστηκε από τους Barcelo et al. (2007) και η χρήση του μοντέλου Aimsun Online επεκτάθηκε και εφαρμόστηκε πλήρως το 2014 στο πλαίσιο του προγράμματος Integrated Corridor Management System (ICMS) για τη διαχείριση του αυτοκινητοδρόμου I-15 στο Σαν Ντιέγκο (ΗΠΑ) και του περιφερειακού του δικτύου (όπως περιγράφονται από τους FHWA 2008, Casas et al. 2014, Dion & Skabardonis 2015, Alexiadis &

Chu 2016). Το ΣΥΑ που αναπτύχθηκε έχει ως σκοπό την υποβοήθηση του ICMS στην ανίχνευση προβλημάτων συμφόρησης και συμβάντων και στην παραγωγή συντονισμένων σχεδίων δράσης μέσω της προσομοίωσης πραγματικού χρόνου και της ανάλυσης προβλέψεων κυκλοφοριακών συνθηκών. Το ΣΥΑ περιλαμβάνει δύο εργαλεία (α) το iNET που είναι ένα αυτόματο σύστημα διαχείρισης της κυκλοφορίας που διαχειρίζεται τις συσκευές παρακολούθησης και ελέγχου και τη σύντηξη ετερογενών δεδομένων (data fusion), πραγματοποιεί διαχείριση συμβάντων και παράγει σχέδια δράσεων ως απόκριση στα συμβάντα και (β) το Aimsun Online που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο και την αξιολόγηση των σχεδίων δράσης απόκρισης συμβάντων και των στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας μέσω της προσομοίωσης. Βάσει ενός έμπειρου συστήματος γνώσεων, το ΣΥΑ πραγματοποιεί μία κατηγοριοποίηση των συμβάντων και των πιθανών συνεπειών που θα επιφέρουν στο δίκτυο, ενώ προτείνει σχέδια που έχουν σχεδιαστεί εκ των προτέρων και περιλαμβάνουν πληροφόρηση των οδηγών, αλλαγές σε σηματοδοτούμενους κόμβους, έλεγχο εισόδων αυτοκινητοδρόμου, πληροφόρηση, επαναδρομολόγηση και αλλαγή χωρητικότητας υπηρεσιών μέσων μαζικής μεταφοράς και χρήση ή απαγόρευση κυκλοφορίας ειδικών λωρίδων.

Στο πλαίσιο του αντίστοιχου προγράμματος ICM αναπτύχθηκε ένα ΣΥΑ για τον αυτοκινητόδρομο US-75 στο Ντάλλας (ΗΠΑ), το οποίο είναι σε λειτουργία από το 2013. Το σύστημα, όπως περιγράφεται στην έκθεση των Robinson et al. (2017), χρησιμοποιεί ένα μοντέλο προσομοίωσης το οποίο μπορεί να αξιολογεί εναλλακτικά σχέδια δράσης σε ένα δίκτυο πολλών μέσων μεταφοράς με σκοπό τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε περιπτώσεις αυξημένης συμφόρησης και προγραμματισμένων ή μη συμβάντων. Μόνο προκαθορισμένες ενέργειες μπορούν να υλοποιηθούν από το σύστημα. Οι προκαθορισμένες ενέργειες αναπτύχθηκαν από ειδικούς και εμπλεκόμενους φορείς και αξιολογήθηκαν βάσει μοντέλων της υφιστάμενης, αλλά και της προβλεπόμενης κυκλοφορίας, ενώ η επιλογή τους γίνεται μέσω μίας διαδικασίας κανόνων. Οι προκαθορισμένες ενέργειες που συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα αφορούν σε αλλαγές στη χρήση ειδικών λωρίδων, σε μέτρα διαχείρισης στάθμευσης και στην πληροφόρηση των μετακινούμενων για την εκτροπή της κυκλοφορίας σε εναλλακτικά δίκτυα για τα οχήματα, αλλά και για τους χρήστες μέσων μαζικής μεταφοράς.

Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος Opticities αναπτύχθηκε ένα ΣΥΑ για την μητροπολιτική περιοχή της Λυόν, Γαλλίας, βασιζόμενο στην πλατφόρμα του Aimsun Online. Σύμφωνα με τους Robert & Montano (2017), οι δυνατότητες του πρότυπου ΣΥΑ συμπεριλαμβάνουν τη συλλογή και ανάλυση πραγματικού χρόνου δεδομένων, την πρόβλεψη κυκλοφοριακών συνθηκών για την επόμενη ώρα κάθε 3-5 λεπτά, τον εντοπισμό συμβάντων, την επιλογή σχεδίων δράσης για προσομοίωση και αξιολόγηση και την τελική πρόταση προς τους χειριστές του συστήματος. Τα σχέδια δράσεις που επιλέγονται για ανάλυση από το σύ-

στημα είναι προκαθορισμένα από ειδικούς και επιλέγονται προς αξιολόγηση μέσω μίας διαδικασίας κανόνων.

4.2.3 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για τον σηματοδοτούμενο έλεγχο της κυκλοφορίας

Οι Choy et al. (2003) και οι Balaji & Srinivasan (2010) πρότειναν ένα σύστημα που στηρίζεται σε κατανεμημένη προσέγγιση συνεργατικής επίλυσης προβλημάτων μέσω της χρήσης πολλαπλών πρακτόρων που αλληλοεπιδρούν για την παροχή αποτελεσματικών ρυθμίσεων σηματοδότησης για τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο σε ένα δίκτυο αρτηριών. Το σύστημα συνδυάζει τα νευρωνικά δίκτυα και τα συστήματα ασαφούς λογικής βασισμένα σε μία γνωστική βάση σηματοδοτικών ρυθμίσεων, ενώ εισάγει μία πολυεπίπεδη προσέγγιση για την εκμάθηση σε πραγματικό χρόνο και την αυτό-οργάνωση των πρακτόρων μέσω της ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) και της προσαρμογής ασαφών κανόνων με εξελικτικό αλγόριθμο. Το σύστημα αναλύεται σε τρία επίπεδα, το χαμηλότερο επίπεδο αποτελείται από τους μεμονωμένους πράκτορες των κόμβων, το ενδιάμεσο επίπεδο αποτελείται από τους πράκτορες που διαμορφώνουν τα προγράμματα σηματοδότησης των προκαθορισμένων ζωνών των κόμβων προσδίδοντας και έναν συνεργατικό συντελεστή και στο ανώτερο επίπεδο δρα ο περιφερειακός πράκτορας που συλλέγει τις πληροφορίες από όλες τις ζώνες του συστήματος και επιλέγει την τελική πρόταση βάσει των συνεργατικών συντελεστών.

Οι Chen et al. (2015) ανέπτυξαν ένα συστηματικό πλαίσιο για την εφαρμογή και αξιολόγηση ρυθμίσεων σηματοδότησης υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες από την αξιολόγηση προκαθορισμένων ρυθμίσεων. Το σύστημα αποτελείται από τρία κυρίως μέρη: τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων πραγματικού χρόνου και την πρόβλεψη και των κυκλοφοριακών συνθηκών, το διαχείριση σεναρίων για την επιλογή κατάλληλων προκαθορισμένων προγραμμάτων σηματοδότησης βάσει των προβλέψεων και το δυναμικό μεσοσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης της κυκλοφορίας, που παρέχει στοιχεία για την αξιολόγηση των εναλλακτικών προγραμμάτων. Τα οφέλη του ΣΥΑ διαπιστώθηκαν μέσα από την εφαρμογή του σε ένα αστικό δίκτυο (Salt Lake City).

Οι Hashemi & Abdelghany (2016) παρουσίασαν ένα σύστημα εκτίμησης και πρόβλεψης της κατάστασης κυκλοφορίας του δικτύου σε πραγματικό χρόνο με ενσωματωμένες δυνατότητες υποστήριξης αποφάσεων για την επιλογή αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας για επαναλαμβανόμενη συμφόρηση και συμβάντα βασισμένο σε μετα-ευρετικό μηχανισμό αναζήτησης για την επιλογή των στρατηγικών συνδυάζοντας προκαθορισμένα ποικίλα μέτρα διαχείρισης της κυκλοφορίας, όπως προεγκεκριμένα προγράμματα σηματοδότησης κόμβων, μηνύματα εκτροπής της κυκλοφορίας σε δυναμικές VMS, έλεγχο εισόδων αυτοκινητοδρόμων, σενάρια τιμολόγησης διοδίων κ.λπ. Οι εναλλακτικές στρατηγικές που

παράγονται με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου αξιολογούνται σε ένα δυναμικό μεσοσκοπικό πλαίσιο κυλιόμενου ορίζοντα. Δοκιμές και ανάλυση ευαισθησίας των διαδικασιών που προτείνονται πραγματοποιήθηκαν στον αυτοκινητόδρομο US-75 στο Ντάλλας εμφανίζοντας βελτιώσεις στη λειτουργία του συστήματος και εντοπίζοντας κατευθύνσεις για βελτιώσεις. Επέκτειναν λοιπόν, τη βασική τους θεώρηση στην εργασία τους, Abdelghany et al. (2018), στην οποία στοχεύουν στη εύρεση (σχεδόν) βέλτιστων και αξιόπιστων στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας συμπεριλαμβάνοντας στην προσέγγισή τους ανάλυση του ρίσκου που προκύπτει από την αβεβαιότητα της ζήτησης, αλλαγών του δικτύου, καιρικών φαινομένων, κτλ. Το ρίσκο στην εργασία τους ορίζεται από τη μέση τιμή και τη διακύμανση της απόδοσης του δικτύου στα διαφορετικά σενάρια. Έτσι για κάθε εναλλακτική στρατηγική που παράγεται από τον Γενικό Αλγόριθμο πραγματοποιούνται προσομοιώσεις όλων των σεναρίων που ορίζουν το σύνολο των αβεβαιοτήτων του συστήματος και υπολογίζεται το ρίσκο της κάθε εναλλακτικής.

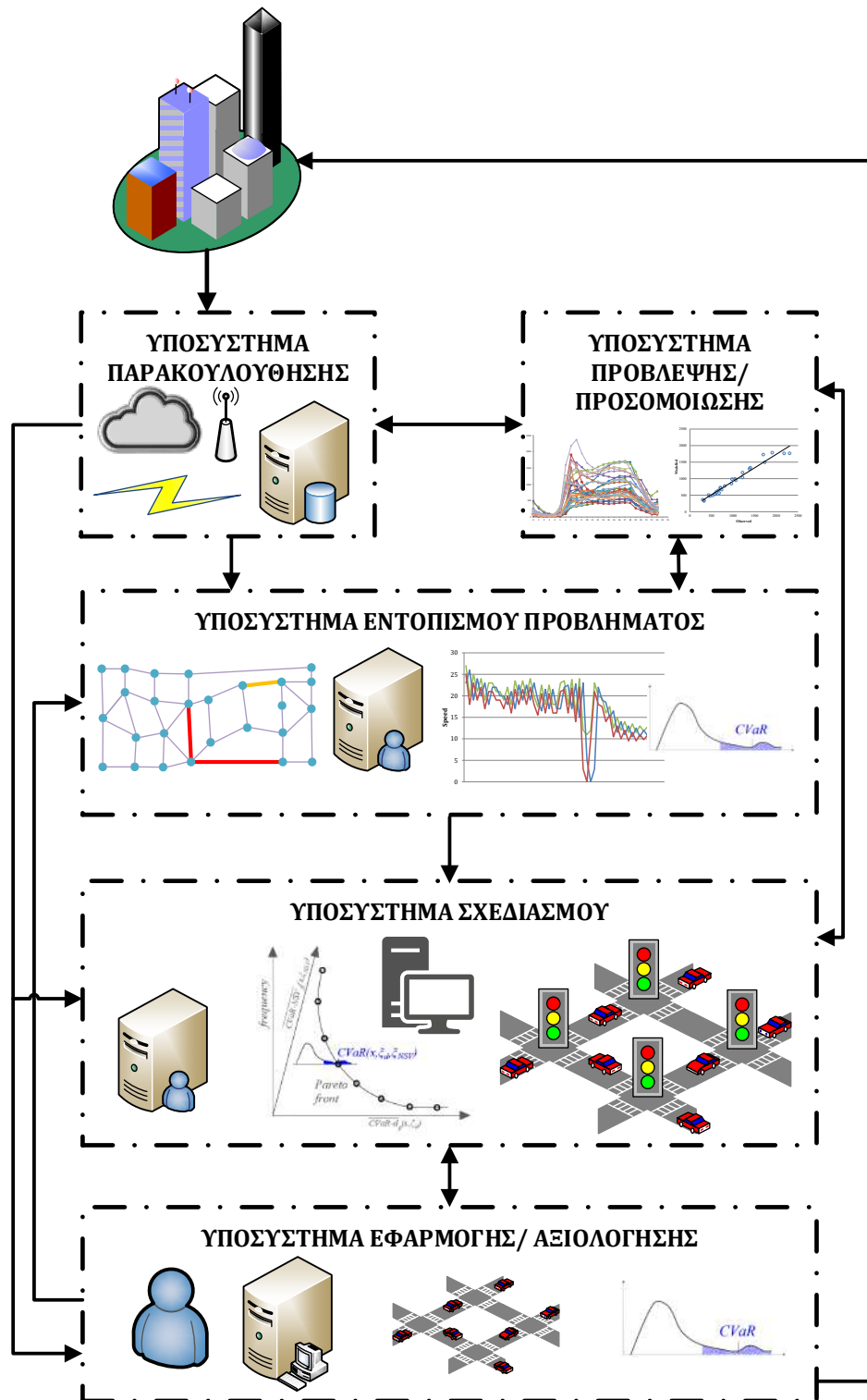
4.3 Προτεινόμενο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων

Η αναδρομή των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας στη διεθνή βιβλιογραφία κατέδειξε την έλλειψη της χρήσης μεθόδων που θα συμπεριλαμβάνουν την ανάλυση του ρίσκου στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα του σχεδιασμού των εναλλακτικών μέτρων, όπως είναι η ζήτηση για μετακινήσεις. Οι Abdelghany et al. (2018) μόνο χρησιμοποιούν την έννοια του ρίσκου στον σχεδιασμό τους, αλλά αφενός το μέγεθος που έχουν επιλέξει να αντιπροσωπεύει το ρίσκο θεωρείται, από τους ειδικούς στην ανάλυση του ρίσκου, ως ένα μέγεθος μη συνεκτικό ειδικά στην περίπτωση ανάλυσης σεναρίων, και αφετέρου χρησιμοποιούν την ανάλυση ρίσκου για την αβεβαιότητα στη εκτίμηση της ζήτησης και όχι στη μεταβλητότητα των διαφορετικών επιπέδων συμφόρησης που αντιμετωπίζουν οι χρήστες του δικτύου. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται η γενική αρχιτεκτονική δομή ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας που στηρίζεται στην ανάλυση του ρίσκου της μετακίνησης των χρηστών σε ένα χρονικό ορίζοντα. Η χρήση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) για την ανάλυση της απόδοσης του δικτύου παρέχει τη δυνατότητα στο προτεινόμενο ΣΥΑ να μειώσει τόσο τις συνέπειες από την εμφάνιση υψηλών επιπέδων συμφόρησης όσο και την πιθανότητα εμφάνισης αυτών των επιπέδων στους χρήστες εντός του χρονικού ορίζοντα που αναλύεται. Επιπλέον ορίζεται το πλαίσιο λειτουργίας του συστήματος με τη χρήση πολλαπλών πρακτόρων έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύπλοκα και μεγαλύτερα δίκτυα βελτιώνοντας τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.

4.3.1 Αρχιτεκτονική δομή προτεινόμενου Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων

Το προτεινόμενο ΣΥΑ αποτελείται από πέντε υποσυστήματα, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-4 και περιγράφονται πιο αναλυτικά στη συνέχεια, ακολουθώντας τη γενική αρχιτεκτονική δομή συστημάτων όπως έχει διατυπωθεί και από άλλους ερευνητές για τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Τα υποσυστήματα είναι τα ακόλουθα:

- Υποσύστημα παρακολούθησης της κατάστασης του δικτύου: Σκοπός του υποσυστήματος είναι η συλλογή και αποθήκευση δεδομένων από τους μετρητές του δικτύου που αφορούν στην ιστορική λειτουργία του, αλλά και σε δεδομένα λειτουργίας πραγματικού χρόνου, η κατηγοριοποίηση των δεδομένων, η παραγωγή και αποθήκευση προτύπων κυκλοφοριακής ροής (traffic patterns) και η αποθήκευση μητρώων ζήτησης μετακινήσεων.
- Υποσύστημα πρόβλεψης και προσομοίωσης της κυκλοφορίας: Σκοπός του υποσυστήματος είναι η ανάλυση προτύπων κυκλοφοριακής ροής και η σύγκριση, ρύθμιση και εξαγωγή μητρώων ζήτησης υφιστάμενων και προβλεπόμενων μετακινήσεων.
- Υποσύστημα εντοπισμού προβλημάτων: Σκοπός του υποσυστήματος είναι η εισαγωγή στοιχείων συμβάντων καταγεγραμμένα από το υποσύστημα παρακολούθησης, η επικοινωνία με το υποσύστημα πρόβλεψης/ προσομοίωσης της κυκλοφορίας για την προσομοίωση των συμβάντων και ο εντοπισμός προβλημάτων συμφόρησης από την προβλεπόμενη προσομοίωση του δικτύου με ή/ και χωρίς προγραμματισμένα ή όχι συμβάντα.
- Υποσύστημα σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας: Σκοπός του υποσυστήματος είναι η εύρεση εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας, όπως τροποποίηση σηματοδότησης, έλεγχος εισόδων αυτοκινητοδρόμου, εκτροπή κυκλοφορίας, κτλ., η επικοινωνία με το υποσύστημα πρόβλεψης/ προσομοίωσης για την προσομοίωση των επιπτώσεων των εναλλακτικών στρατηγικών, καθώς και η αξιολόγηση και η επιλογή της καταλληλότερης στρατηγικής.
- Υποσύστημα εφαρμογής και αξιολόγησης στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας: Σκοπός του υποσυστήματος είναι η επικοινωνία με τον εξοπλισμό του δικτύου, όπως σηματοδότες, VMS, κτλ., για την εφαρμογή των ενεργειών της προτεινόμενης στρατηγικής, η αξιολόγηση των ενεργειών μέσω των μετρημένων και προσομοιωμένων δεδομένων από τη λειτουργία του δικτύου και η επικαιροποίηση της γνωστικής βάσης εναλλακτικών στρατηγικών.



Σχήμα 4-4: Προτεινόμενο Σύστημα υποστήριξης Αποφάσεων

Το υποσύστημα παρακολούθησης της κατάστασης του δικτύου (βλ. Σχήμα 4-5) λαμβάνει δεδομένα από τον εξοπλισμό μέτρησης κυκλοφοριακών δεδομένων, από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και αναφοράς προγραμματισμένων ή μη περιστατικών και συμβάντων και από τα άλλα υποσυστήματα του ΣΥΑ. Τα κυκλοφοριακά δεδομένα λαμβάνονται από διάφορων ειδών φωρατές που είναι τοποθετημένοι στο δίκτυο και συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με την πυκνότητα, τη χωρητικότητα, την ταχύτητα, τον αριθμό των οχημάτων, αλλά και τη λει-

τουργία του δικτύου όπως ρυθμίσεις σηματοδότησης, δρομολόγια μέσων μαζικής μεταφοράς. Τα δεδομένα αυτά κατατάσσονται και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη θέση τους στο δίκτυο, τη χρονική τους αναφορά (ώρα, ημέρα, μήνα) και τον τύπο δεδομένων. Τα δεδομένα περιστατικών και συμβάντων συμπεριλαμβάνουν στοιχεία για τη θέση και το χρόνο αναφοράς προγραμματισμένων ή μη συμβάντων, όπως εργασίες συντήρησης, απαγόρευση κυκλοφορίας σε οδικά τμήματα, διαφοροποίηση στη λειτουργία μέσων μαζικής μεταφοράς, εκδηλώσεις, ατυχήματα, αστοχίες οδικής υποδομής, κτλ. Τα δεδομένα που συλλέγονται και αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων από άλλα υποσυστήματα αφορούν κυρίως μητρώα ζήτησης μετακινήσεων που έχουν ρυθμιστεί για συγκεκριμένες ημέρες και ώρες λειτουργίας του δικτύου και χρησιμοποιούνται ως μητρώα αναφοράς για τη ρύθμιση νέων μητρώων. Το υποσύστημα επίσης αποθηκεύει πρότυπα κυκλοφοριακής ροής που έχουν παραχθεί από τα πρωτογενή ή/ και επεξεργασμένα δεδομένα και αφορούν στη λειτουργία του δικτύου, όπως και δείκτες αξιολόγησης της λειτουργίας του δικτύου που προκύπτουν από τα πρωτογενή δεδομένα και από τα δεδομένα προσομοίωσης του δικτύου.

Το υποσύστημα πρέπει να περιλαμβάνει λειτουργίες προεπεξεργασίας των δεδομένων, που αποτελεί και σημαντικό βήμα για την εξόρυξη πληροφοριών χρήσιμων στην αναγνώριση προβλημάτων και ασυνεχειών στη λειτουργία του δικτύου. Οι βασικές δραστηριότητες στην προεπεξεργασία των δεδομένων είναι:

- Ο καθαρισμός των δεδομένων, που αφορά (α) στη συμπλήρωση των ελλিপών τιμών, (β) στην αναγνώριση ή/ απομάκρυνση ακραίων τιμών, (γ) στην εξομάλυνση δεδομένων που περιέχουν τυχαία σφάλματα (θόρυβο) με κατάλληλες τεχνικές, όπως ενδοχείωση (binning), συσταδοποίηση (clustering), παλινδρόμηση, κτλ. και (δ) στην επίλυση ασυνεπειών μεταξύ των δεδομένων, με χρήση κανόνων και συναρτησιακών εξαρτήσεων και περιορισμών. Οι ελλειπείς τιμές μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, όπως δυσλειτουργίες του εξοπλισμού καταγραφής ή/ και αποθήκευσης, διαγραφή τιμών λόγω ασυνεπειών με άλλα καταγεγραμμένα δεδομένα.
- Η ενοποίηση των δεδομένων, που αφορά (α) στην ενοποίηση πολλαπλών βάσεων δεδομένων, πηγών δεδομένων, αρχείων, κτλ. σε μία συνεκτική βάση αποθήκευσης, (β) στην ενοποίηση σχήματος (schema integration) με χρήση μεταδεδομένων από τις διάφορες πηγές, (γ) στην ανίχνευση και ανάλυση πιθανών ασυνεπειών μεταξύ των δεδομένων και (δ) στην διαχείριση πλεοναζόντων δεδομένων από τη συνένωση πολλαπλών πηγών δεδομένων.
- Ο μετασχηματισμός δεδομένων, που αφορά (α) στην κανονικοποίηση, δηλαδή στον μετασχηματισμό σε ένα συγκεκριμένο εύρος, (β) στην συνάθροιση δεδομένων (aggregation) σύμφωνα με κριτήρια που μπορεί να περιλαμβάνουν τη χωρική, τη χρονική

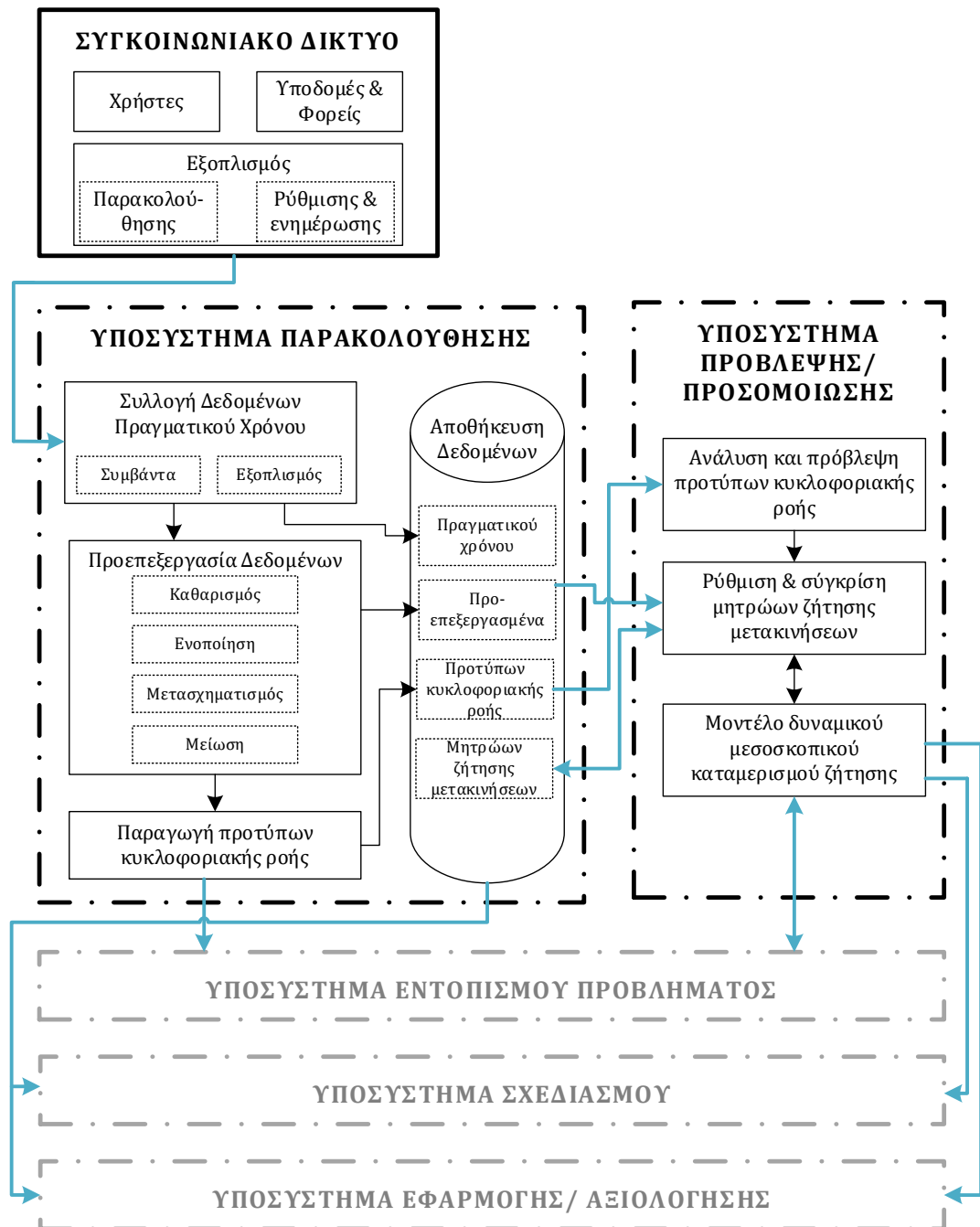
κή ή/ και τη σημειολογική έννοια των δεδομένων και (γ) στη δημιουργία νέων χαρακτηριστικών, όπως κριτήρια για την απόδοση του δικτύου.

- Η μείωση των δεδομένων, που αφορά (α) στην εξαγωγή μειωμένων δεδομένων ως προς τον όγκο, αλλά με ίδια ή ανάλογη αναλυτική αξία, (β) στη διακριτοποίηση δεδομένων που έχουν συγκεκριμένη σημασία για την περαιτέρω ανάλυση και (γ) στη γενίκευση των δεδομένων χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως συνάθροιση, μείωση διαστατικότητας, συμπίεση, κτλ. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η ανάλυση και εξόρυξη πληροφοριών και σύνθετων δεδομένων από τα άλλα υποσυστήματα να πραγματοποιείται σε μικρότερο υπολογιστικό χρόνο.

Το υποσύστημα πρέπει να περιλαμβάνει λειτουργίες για την κατηγοριοποίηση των δεδομένων και την παραγωγή προτύπων κυκλοφοριακής ροής βάσει των πρωτογενών δεδομένων και των ιστορικών δεδομένων της λειτουργίας του δικτύου, τα οποία χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης μετακινήσεων και τελικά τη διάγνωση προβλημάτων στο δίκτυο. Η κατηγοριοποίηση των δεδομένων και η δημιουργία προτύπων σχεδιάζεται για διαφορετικές ημέρες τις εβδομάδας, καιρικές συνθήκες, επαναλαμβανόμενες συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, κτλ. χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης περιπτώσεων ασαφούς λογικής (Li et al. 2008), τεχνικές νευρωνικών δικτύων ασαφούς λογικής (Boto-Giralda et al. 2010), συσταδιοποίησης (Wang et al. 2011, Montazeri-Gh & Fotouhi 2011), κτλ.

Το υποσύστημα πρόβλεψης και προσομοίωσης της κυκλοφορίας (βλ. Σχήμα 4-5) περιλαμβάνει δύο βασικές λειτουργίες. Η πρώτη βασική λειτουργία είναι η εκτίμηση μητρώων μετακινήσεων σε πραγματικό χρόνο (ή κοντά στον πραγματικό χρόνο) για την υφιστάμενη κατάσταση, αλλά και η πρόβλεψη των μητρώων για έναν μελλοντικό χρονικό ορίζοντα ανάλυσης και τα ενδιάμεσα στάδια του ορίζοντα. Η δεύτερη βασική λειτουργία του υποσυστήματος είναι την προσομοίωση της κυκλοφορίας για την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης, τον εντοπισμό προβλημάτων, την αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων και την αξιολόγηση της εφαρμογής μέτρων. Το πρόβλημα της πρόβλεψης των μελλοντικών καταστάσεων του δικτύου αφορά δύο παραμέτρους, την πρόβλεψη μελλοντικών χαρακτηριστικών του δικτύου μέσω αναλυτικών μαθηματικών μοντέλων και την πρόβλεψη μελλοντικών μητρώων μετακινήσεων μέσω μοντέλων προσομοίωσης. Τεχνικές και μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών παρατίθενται αναλυτικά από τους Vlahogianni et al. (2014), όπως μέθοδοι παλινδρόμησης, χρονοσειρών, νευρωνικών δικτύων, ασαφούς λογικής, εξομάλυνσης, κτλ. Η εκτίμηση του υφιστάμενου μητρώου μετακινήσεων και των μελλοντικών μητρώων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που ορίζουν το δίκτυο, τις παραμέτρους ρύθμισης των μητρώων εκτός σύνδεσης (offline), την προγενέστερη γνώση μητρώων μετακινήσεων (προηγούμενων χρονικών βημάτων ή /και προγενέστερων ημερών) και τα δεδομένα πραγματικού χρόνου. Η διαδικασία αυτή είναι

σύνθετη και χρονοβόρα που πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρώσει τις προσπάθειες τους τα τελευταία χρόνια (ενδεικτικά αναφέρονται Ashok & Ben-Akiva 2002, Antoniou et al. 2007, Zhou & Mahmassani 2007, Sundaram et al. 2011, Djukic et al. 2012, Antoniou et al. 2016).

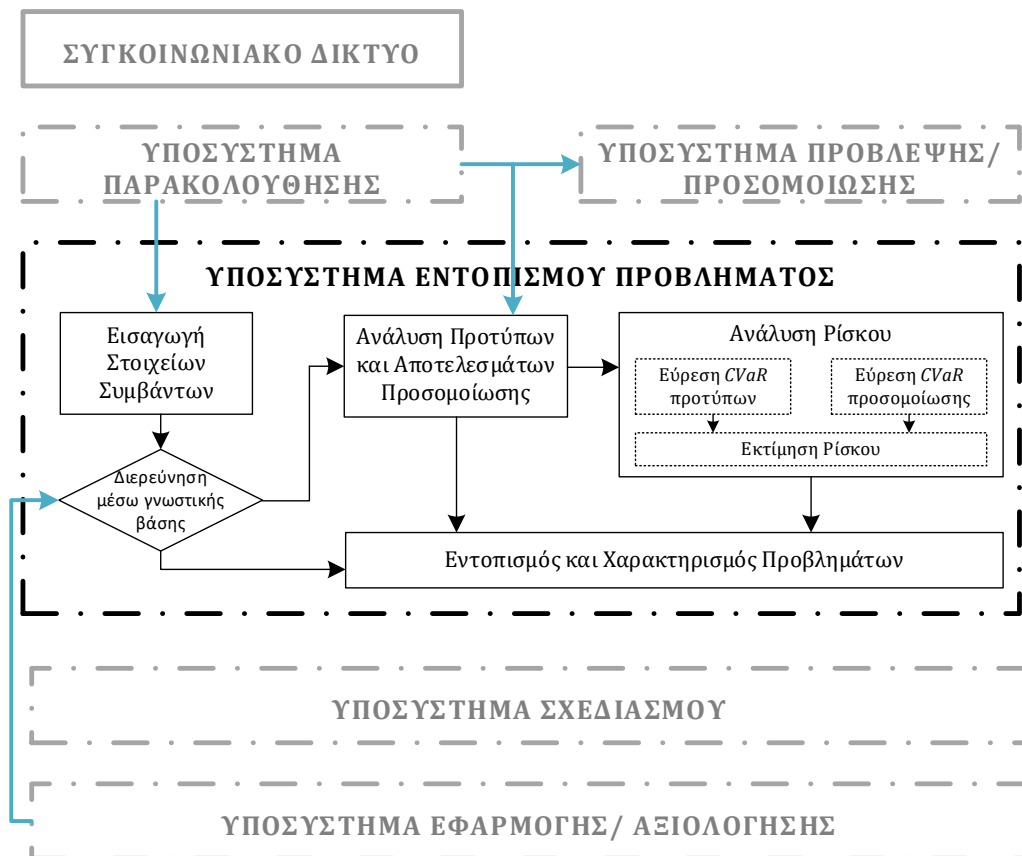


Σχήμα 4-5: Προτεινόμενη δομή υποσυστημάτων παρακολούθησης και πρόβλεψης/ προσομοίωσης

Η άλλη κύρια λειτουργία του υποσυστήματος είναι η δυναμική προσομοίωση της υφιστάμενης και της προβλεπόμενης κατάστασης για τον εντοπισμό και επίλυση προβλημάτων. Η δυναμική αναπαράσταση των φαινομένων της κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι απαραίτητη για την ανάλυση και επίλυση των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν καθημερινά τα κέντρα διαχείρισης κυκλοφορίας. Το επίπεδο προσομοίωσης που προτείνεται να περιλαμβάνει το υποσύστημα είναι αυτό της μεσοσκοπικής προσομοίωσης, η οποία παρουσιάζει πολλά πλεο-

νεκτήματα, ειδικά στην περίπτωση πολύπλοκων και εκτεταμένων δικτύων που η ρύθμιση και βαθμονόμησή τους είναι δύσκολη και χρονοβόρα. Η αναλυτική παρουσίαση του δυναμικού μεσοσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης και των χαρακτηριστικών παρατίθεται στο Κεφάλαιο 4.3.3.

Το υποσύστημα εντοπισμού προβλημάτων συμφόρησης στο δίκτυο (βλ. Σχήμα 4-6) χρησιμοποιεί δύο βασικές εισόδους δεδομένων για τον εντοπισμό των προβλημάτων. Η μία κατηγορία δεδομένων προέρχεται από το υποσύστημα παρακολούθησης και αφορά σε καταγεγραμμένα στοιχεία συμβάντα που είναι είτε προγραμματισμένα (όπως συντήρηση δικτύου, αποκλεισμός κυκλοφορίας σε τμήματα του δικτύου, διαφοροποίηση στη λειτουργία μέσω μαζικής μεταφοράς, εκδηλώσεις, κτλ.) είτε τυχαία (όπως ατυχήματα, αστοχίες οδικής υποδομής, κτλ.). Η άλλη κατηγορία δεδομένων προέρχεται από την ανάλυση προτύπων κυκλοφοριακής ροής είτε των υφιστάμενων δεδομένων από το υποσύστημα παρακολούθησης είτε των προβλεπόμενων δεδομένων από το υποσύστημα πρόβλεψης/ προσομοίωσης.



Σχήμα 4-6: Προτεινόμενη δομή υποσυστήματος εντοπισμού προβλημάτων

Το υποσύστημα προτείνεται να χρησιμοποιεί ένα έμπειρο σύστημα γνώσεων (KBES), το οποίο θα το κατευθύνει μέσω ενός δένδρου αποφάσεων από τη συλλογή των στοιχείων συμβάντων στην επόμενη φάση που περιλαμβάνει είτε την πρόταση προκαθορισμένων ενεργειών είτε την ανάλυση προτύπων και την προσομοίωση και πρόβλεψη των κυκλοφοριακών συνθηκών για την περαιτέρω έρευνα στον εντοπισμό προβλημάτων.

Η μέθοδος ανάλυσης ρίσκου μέσω του υπολογισμού του $CVaR$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτό το υποσύστημα για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών από τη λειτουργία του δικτύου που οι τιμές του είναι μεγαλύτερες από την ιστορική τιμή $CVaR$. Τέτοια χαρακτηριστικά λειτουργίας προέρχονται είτε από τα επεξεργασμένα δεδομένα είτε από την προσομοίωση της προβλεπόμενης κατάστασης, όπως η ταχύτητα κίνησης οχημάτων από έναν φωρατή, οι χρόνοι διάνυσης προκαθορισμένων διαδρομών, οι καθυστερήσεις σε σηματοδοτούμενους κόμβους ή σε δίκτυα κόμβων, κτλ. Έτσι, χρησιμοποιώντας τα ιστορικά στοιχεία το υποσύστημα μπορεί να υπολογίσει την ιστορική τιμή $CVaR$ που αντιστοιχεί σε ένα πρότυπο κυκλοφοριακής ροής. Αν η τιμή $CVaR$ των υφιστάμενων στοιχείων ή των προβλεπόμενων στοιχείων είναι μεγαλύτερη των αντίστοιχων ιστορικών τιμών $CVaR$, τότε θεωρείται ότι οι συνέπειες από την υπέρβαση του αποδεκτού ορίου ρίσκου είναι δυσμενέστερες από ότι είναι στην συνήθη λειτουργία του δικτύου. Η ανάλυση ρίσκου μέσω του $CVaR$ (βλ. Κεφάλαιο 3.3) στηρίζεται στην έννοια της απώλειας, επομένως τα μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να εκφραστούν ως απώλειες.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση ρίσκου στη διάγνωση ενός προβλήματος μέσω των στοιχείων που συλλέγονται από ένα σημειακό φωρατή ταχύτητας οχημάτων. Σε αυτή την περίπτωση, οι απώλειες στην ταχύτητα κίνησης, z_{S_m} , κάθε οχήματος, m , αντιστοιχούν στη διαφορά της μετρημένης ταχύτητας κίνησης, S_m^μ , από την ονομαστική ταχύτητας ελεύθερης ροής, S^{ff} :

$$z_{S_m} = S^{ff} - S_m^\mu \quad (4-1)$$

Για ένα χρονικό βήμα συλλέγονται και αναλύονται οι ταχύτητες κίνησης των οχημάτων που διέρχονται από τον φωρατή, $[m=1, \dots, q]$. Τα δεδομένα αυτά είτε αναλύονται μοναδιαία έχοντας ως πιθανότητα εμφάνισης της κάθε τιμής απώλειας: $p_{S_m} = 1/q$, είτε ομαδοποιούνται σε κλάσεις και διαμορφώνουν έτσι πιθανότητες εμφάνισης της κάθε κλάσης απώλειας ίση με το λόγο των οχημάτων της κάθε κλάσης προς το σύνολο των οχημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περίπτωση της ομαδοποίησης των ταχυτήτων χρειάζεται προσεκτική ομαδοποίηση, έτσι ώστε να υπάρχει αρκετή διακριτοποίηση των δεδομένων που προκύπτουν και να μην χάνεται απαραίτητη πληροφορία.

Οι απώλειες στην ταχύτητα των οχημάτων ή των κλάσεων οχημάτων ταξινομούνται έτσι που $z_{S_1} < \dots < z_{S_m} < \dots < z_{S_q}$ με την πιθανότητα του z_m να είναι $p_{S_m} > 0$. Επομένως το μέγεθος ρίσκου των απωλειών, R , λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

$$R = \begin{cases} 0 & \text{με πιθανότητα} & p_{S_0} \\ z_{S_1} & \text{με πιθανότητα} & p_{S_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{S_m} & \text{με πιθανότητα} & p_{S_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{S_q} & \text{με πιθανότητα} & p_{S_q} \end{cases} \quad (4-2)$$

όπου $p_{S_0} = 1 - \sum_{m=1}^q p_{S_m}$.

Έστω ότι m_a είναι ένας μοναδικός δείκτης, που αντιστοιχεί στο επίπεδο εμπιστοσύνης α , τέτοιος που:

$$\sum_{m=1}^{m_a} p_{S_m} \geq \alpha > \sum_{m=1}^{m_a-1} p_{S_m} \quad (4-3)$$

Τότε το VaR_a^S των απωλειών στην ταχύτητα είναι:

$$VaR_a^S = z_{S_{m_a}} \quad (4-4)$$

και το $CVaR_a^S$ των απωλειών στην ταχύτητα είναι:

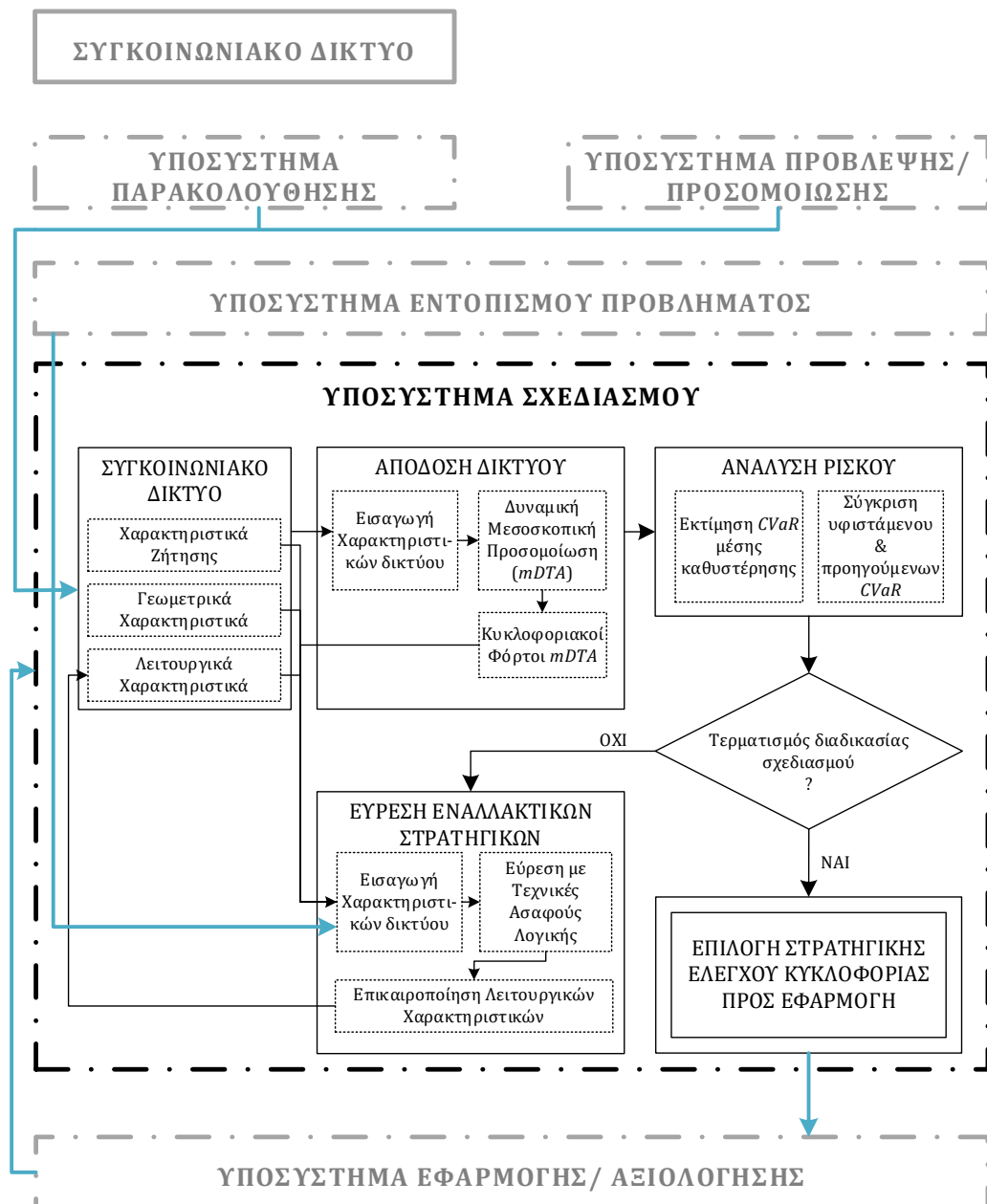
$$CVaR_a^S = \frac{1}{(1-\alpha)} \left[\left(\sum_{m=1}^{m_a} p_{S_m} - \alpha \right) z_{S_{m_a}} + \sum_{m=m_a+1}^q p_{S_m} z_{S_m} \right] \quad (4-5)$$

Το υποσύστημα σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας (βλ. Σχήμα 4-7), βάσει των στοιχείων που έχουν εξαχθεί από το υποσύστημα εντοπισμού προβλημάτων, πραγματοποιεί εύρεση των εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας, όπως τροποποίηση σηματοδότησης, έλεγχος εισόδων αυτοκινητοδρόμου, εκτροπή κυκλοφορίας, κτλ. Το υποσύστημα χρησιμοποιεί μία γνωστική βάση, που έχει διαμορφωθεί από ειδικούς, και εξειδικευμένους αλγορίθμους βελτιστοποίησης στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας για τον σχεδιασμό των εναλλακτικών προτάσεων. Οι τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου στην παραγωγή των εναλλακτικών κριτηρίων έχουν αναφερθεί αναλυτικά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση των ΣΥΑ σε προηγούμενο κεφάλαιο και ποικίλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και την έκταση του δικτύου, καθώς και με το σύνολο των πιθανών ενεργειών.

Το υποσύστημα σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας προτείνεται να περιλαμβάνει μία γνωστική βάση που θα κατατάσσει τα προβλήματα και τις πιθανές εναλλακτικές στρατηγικές που μπορούν να εξεταστούν. Για παράδειγμα, ανάλογα με το συμβάν μπορεί να επαρκεί μόνο η χρήση εμφάνισης μεταβλητών μηνυμάτων ενημέρωσης των οδηγών και όχι η εύρεση διαφορετικών προγραμμάτων σηματοδότησης. Χρησιμοποιώντας τεχνικές ασαφούς λογικής και της γνωστικής βάσης ειδικών θα μπορεί να καταλήγει σε εναλλακτικές στρατηγικές που η αξιολόγησή τους θα γίνεται μέσω του μεσοσκοπικού μοντέλου χωρίς ό-

μως τη χρήση υπολογιστικά σύνθετων αλγορίθμων, όπως συμβαίνει με την εύρεση σηματοδοτικών προγραμμάτων.

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών στρατηγικών ακολουθεί την ανάλυση ρίσκου του χρόνου μετακίνησης που έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3.3 και η προτεινόμενη στρατηγική προς εφαρμογή από το σύστημα είναι η στρατηγική που παρουσιάζει το μικρότερο ρίσκο του χρόνου μετακίνησης. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έχει αναπτυχθεί αναλυτικά το υποσύστημα για την περίπτωση εύρεσης και πρότασης προγραμμάτων σηματοδότησης σε μεμονωμένους κόμβους και σε δίκτυο κόμβων και παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Η γενική διαδικασία που προτείνεται παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4-7: Προτεινόμενη δομή γενικού υποσυστήματος σχεδιασμού

Συγκεκριμένα τα στάδια που ακολουθούνται στο υποσύστημα σχεδιασμού περιγράφονται στη συνέχεια. Αρχικά πραγματοποιείται είσοδος των χαρακτηριστικών του συγκοινωνιακού δικτύου στο υποσύστημα. Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται είναι χαρακτηριστικά ζήτησης μετακινήσεων, όπως έχουν προκύψει από το υποσύστημα πρόβλεψης/ προσομοίωσης για το χρονικό ορίζοντα που θα διεξαχθεί η ανάλυση, χαρακτηριστικά γεωμετρικών στοιχείων του δικτύου και των κόμβων, τα οποία ορίζουν και περιορίζουν το πρόβλημα σχεδιασμού, όπως αριθμός λωρίδων, μήκος συνδέσμων, πλάτη λωρίδων, κτλ., και τέλος τα χαρακτηριστικά που αφορούν στη λειτουργία του συστήματος, όπως σηματοδοτικά προγράμματα, θέσεις και αναγραφές VMS, δρομολόγια μέσων, κτλ. Η κυκλοφοριακή κατάσταση του δικτύου προσομοιώνεται στο δυναμικό μεσοσκοπικό μοντέλο με εισαγωγή των χαρακτηριστικών του δικτύου και εξάγονται οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και τα χαρακτηριστικά απόδοσης του δικτύου για όλη την περίοδο προσομοίωσης. Η προσομοίωση της απόδοσης του δικτύου γίνεται σε μία εκτεταμένη περίοδο, έτσι ώστε να περιλαμβάνονται τόσο τα φαινόμενα αύξησης και διατήρησης της συμφόρησης, όσο και τα φαινόμενα της αποκλιμάκωσης της συμφόρησης για το ευρύτερο δίκτυο, αλλά και να υπάρχει ικανοποιητική διακριτοποίηση των δεδομένων για την ανάλυση ρίσκου. Σε περιπτώσεις που το υποσύστημα λειτουργεί σε απευθείας σύνδεση τότε η προσέγγιση που ακολουθείται είναι μία προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα με εκτεταμένη διάρκεια ανάλυσης σε κάθε βήμα.

Τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου και η εκτιμώμενη ζήτηση εισάγεται στο εργαλείο που χρησιμοποιείται για την εύρεση εναλλακτικών στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας. Για τον εντοπισμό των εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης προτείνεται η χρήση μίας γνωστικής βάσης ειδικών προκαθορισμένων ενεργειών και η διερεύνησή της μέσω τεχνικών ασαφούς λογικής βάσει των στοιχείων και των χαρακτηριστικών των προβλημάτων συμφόρησης που εντοπίστηκαν στο αντίστοιχο υποσύστημα και των κυκλοφοριακών συνθηκών που προκύπτουν από την προσομοίωση. Οι εναλλακτικές στρατηγικές διαχείρισης κυκλοφορίας στη συνέχεια προσομοιώνονται και αξιολογούνται μέσω του εργαλείου ανάλυσης ρίσκου.

Η ανάλυση ρίσκου της καθυστέρησης στο χρόνο μετακίνησης των χρηστών που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κάθε εναλλακτικής λύσης περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.3 και συγκεκριμένα από τις εξισώσεις (3-24), (3-25), (3-26) και (3-27). Η καθυστέρηση ορίζεται γενικώς ως ο επιπλέον χρόνος μετακίνησης που υπερβαίνει τον χρόνο μετακίνησης υπό ιδανικές συνθήκες χωρίς συμφόρηση. Θεωρείται λοιπόν, ότι η καθυστέρηση στη μετακίνηση των χρηστών, όταν αναλύουμε τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο σε έναν χρονικό ορίζοντα, εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η μετακίνηση του κάθε χρήστη και επομένως από τις συνθήκες που θα επικρατούν στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της κάθε διαδρομής. Ανάλογα με τις συνθήκες συμφόρησης στο δίκτυο, οι χρήστες

βιώνουν διαφορετικά επίπεδα καθυστέρησης (απωλειών χρόνου μετακίνησης) κατά τη διαδρομή τους, τα οποία σχετίζονται με μία πιθανότητα εμφάνισης ανάλογη με το ποσοστό χρηστών που βιώνει αυτές τις απώλειες.

Έτσι οι απώλειες στο χρόνο μετακίνησης λόγω καθυστερήσεων, $z_{d_m} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}_m)$, που βιώνουν οι χρήστες σε ένα χρονικό βήμα προσομοίωσης, m , εντός του χρονικού ορίζοντα ανάλυσης $[m=1, \dots, q]$, θεωρούνται ως η συνέπεια της κυκλοφοριακής ζήτησης που συγκεντρώνεται στο αντίστοιχο πεπερασμένο αριθμό σημείων, $\mathbf{y}_m$, εντός του χρονικού ορίζοντα ανάλυσης και των παραμέτρων που ορίζουν τις μεταβλητές αποφάσεως του δικτύου, $\mathbf{x}$ (όπως μέτρα ελέγχου, ρυθμίσεις σηματοδότησης, κτλ.). Η πιθανότητα, p_{d_m} , εμφάνισης αυτών των συνεπειών λαμβάνεται στη παρούσα θεώρηση για κάθε βήμα προσομοίωσης, m , ως το ποσοστό των χρηστών που βιώνει το κάθε επίπεδο καθυστέρησης έναντι όλων των χρηστών του δικτύου στον χρονικό ορίζοντα ανάλυσης. Η καθυστέρηση εκτιμάται μέσω της δυναμικής μεσοσκοπικής προσομοίωσης για κάθε βήμα προσομοίωσης για όλες τις μετακινήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο δίκτυο. Στο περιβάλλον του μοντέλου Aimsun, η μέση καθυστέρηση υπολογίζεται ανά όχημα ανά χιλιόμετρο και για κάθε όχημα που διέρχεται από το δίκτυο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του χρόνου μετακίνησης που προκύπτει από την προσομοίωση και του χρόνου μετακίνησης υπό ιδανικές συνθήκες. Αναλυτικά η δυναμική μεσοσκοπική προσομοίωση στο Aimsun παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.3.3.

Οι καθυστερήσεις των χρονικών βημάτων ταξινομούνται έτσι που

$$z_{d_1} < \dots < z_{d_m} < \dots < z_{d_q}$$

με την πιθανότητα του z_{d_m} να είναι $p_{d_m} > 0$. Επομένως το μέγεθος ρίσκου των απωλειών, R , λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

$$R = \begin{cases} 0 & \text{με πιθανότητα } p_{d_0} \\ z_{d_1} & \text{με πιθανότητα } p_{d_1} \\ \vdots & \vdots \\ z_{d_m} & \text{με πιθανότητα } p_{d_m} \\ \vdots & \vdots \\ z_{d_q} & \text{με πιθανότητα } p_{d_q} \end{cases} \quad (4-6)$$

όπου $p_{d_0} = 1 - \sum_{m=1}^q p_{d_m}$.

Έστω ότι m_a είναι ένας μοναδικός δείκτης, που αντιστοιχεί στο επίπεδο εμπιστοσύνης α , τέτοιος που:

$$\sum_{m=1}^{m_a} p_{d_m} \geq \alpha > \sum_{m=1}^{m_a-1} p_{d_m} \quad (4-7)$$

Τότε το Var_a^d των απωλειών λόγω καθυστερήσεων είναι:

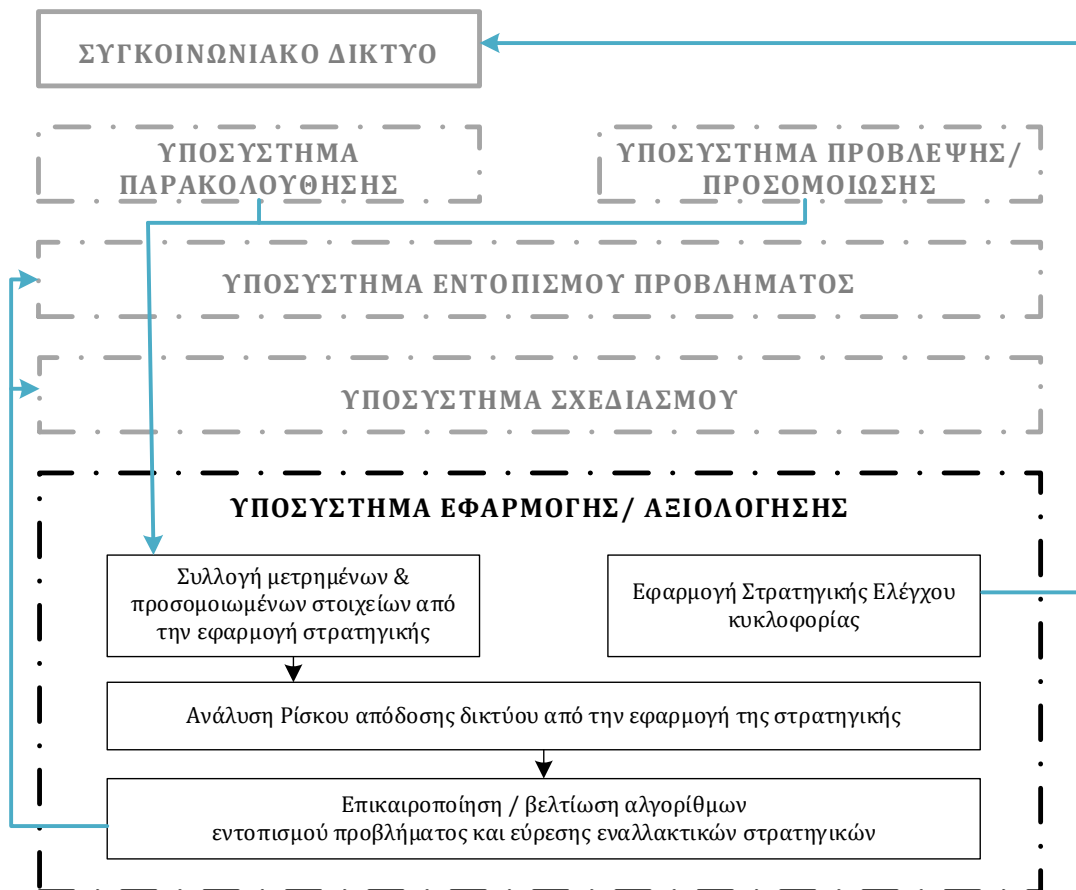
$$VaR_a^d = z_{d_{m_a}} \quad (4-8)$$

και το $CVaR_a^d$ των απωλειών λόγω καθυστερήσεων είναι:

$$CVaR_a^d = \frac{1}{(1-a)} \left[\left(\sum_{m=1}^{m_a} p_{d_m} - a \right) z_{d_{m_a}} + \sum_{m=m_a+1}^q p_{d_m} z_{d_m} \right] \quad (4-9)$$

Για κάθε εναλλακτική λύση λοιπόν, πραγματοποιείται δυναμική μεσοσκοπική προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών και υπολογίζεται το $CVaR_a^d$ που της αντιστοιχεί. Η επιλογή της λύσης που προκρίνεται προς εφαρμογή είναι η λύση που έχει το χαμηλότερο $CVaR_a^d$.

Το υποσύστημα εφαρμογής και αξιολόγησης στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας (βλ. Σχήμα 4-8) περιλαμβάνει δύο κύριες λειτουργίες: (α) την επικοινωνία με τον εξοπλισμό του δικτύου, όπως σηματοδότες, VMS, κτλ., για την εφαρμογή των ενεργειών της προτεινόμενης στρατηγικής και (β) την αξιολόγηση των στρατηγικών με σκοπό τη βελτίωση των αλγορίθμων εντοπισμού του προβλήματος και εύρεσης εναλλακτικών στρατηγικών με τεχνικές ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning).



Σχήμα 4-8: Προτεινόμενη δομή γενικού υποσυστήματος εφαρμογής και αξιολόγησης

Έτσι, επαληθεύεται ο μηχανισμός εντοπισμού του προβλήματος και επικαιροποιείται η διαδικασία εντοπισμού τόσο μέσω της γνωστικής βάσης όσο και μέσω της ανάλυσης προτύπων. Επιπλέον, συλλέγονται στοιχεία που περιγράφουν την απόδοση του δικτύου από την εφαρ-

μογή των στρατηγικών που προτάθηκαν από το υποσύστημα σχεδιασμού και επικαιροποιείται η διαδικασία εύρεσης εναλλακτικών στρατηγικών.

4.3.2 Πλαίσιο ανάπτυξης Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων πολλαπλών πρακτόρων

Η έκταση και η πολυπλοκότητα του δικτύου μπορεί να προκαλέσει σημαντικά ζητήματα στη λειτουργία και την ταχύτητα ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων. Για τη ταχύτερη ανάλυση της κυκλοφοριακής κατάστασης του δικτύου και την εύρεση εναλλακτικών στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας προτείνεται η διακριτοποίηση του συστήματος μέσω πολλαπλών πρακτόρων που θα δρουν σε όλα τα υποσυστήματα του προτεινόμενου ΣΥΑ. Συγκεκριμένα προτείνεται ο διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε υποπεριοχές που ενδέχεται και να αλληλοκαλύπτονται. Για την κάθε υποπεριοχή κατασκευάζονται και ρυθμίζονται τα δίκτυα και τα χαρακτηριστικά ζήτησης μετακινήσεων και ορίζονται οι περιορισμοί που αφορούν στις συνθήκες στα όρια των υποπεριοχών.

Η αρχιτεκτονική του ΣΥΑ πολλαπλών πρακτόρων περιλαμβάνει τρία επίπεδα. Το χαμηλότερο επίπεδο αποτελείται από τους πράκτορες που δρουν μεμονωμένα ο καθένας σε κάθε υποπεριοχή (Individual Agents), το ενδιάμεσο επίπεδο αποτελείται από περιφερειακούς πράκτορες (Regional Agents) που δημιουργούνται δυναμικά από τη συνένωση υποπεριοχών, ενώ το ανώτερο επίπεδο αποτελείται από έναν κεντρικό πράκτορα (Central Agent) που δρα συγκεντρωτικά σε όλη την περιοχή μελέτης. Έτσι μπορεί αν θεωρηθεί ότι το ΣΥΑ αναλύεται σε ξεχωριστά συστήματα για κάθε περιοχή που διεκπεραιώνουν κατά αντίστοιχο τρόπο τις επιμέρους διαδικασίες των υποσυστημάτων και ελέγχονται από το κεντρικό σύστημα.

Το κεντρικό σύστημα λοιπόν, ζητάει από τους μεμονωμένους πράκτορες κάθε υποπεριοχής να εκτελέσουν τις αντίστοιχες ενέργειες που αφορούν στην παρακολούθηση του δικτύου και ταυτόχρονα συλλέγει από τις επιμέρους βάσεις δεδομένων τα στοιχεία που είναι χρήσιμα για τη μακροσκοπική ανάλυση του ευρύτερου συστήματος. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι εργασίες του υποσυστήματος πρόβλεψης και προσομοίωσης από τον κάθε μεμονωμένο πράκτορα, αλλά και από τον κεντρικό πράκτορα σε μακροσκοπικό επίπεδο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση ενός μοντέλου, όπως το Aimsun, που στην αρχιτεκτονική του δομή περιλαμβάνει επίσης διαφορετικά επίπεδα προσομοίωσης και ενσωμάτωσης δεδομένων είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό του προτεινόμενου ΣΥΑ πολλαπλών πρακτόρων. Ένας επιπλέον ρόλος του κεντρικού πράκτορα είναι και ο έλεγχος των περιορισμών στα όρια των υποπεριοχών και η εξασφάλιση της συνοχής τόσο μεταξύ των υποπεριοχών όσο και μεταξύ των υποπεριοχών και της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Το υποσύστημα εντοπισμού του προβλήματος για κάθε υποπεριοχή ενεργοποιείται από τον αντίστοιχο μεμονωμένο πράκτορα. Τα προβλήματα συμφόρησης όπως και οι στρατηγικές επίλυσής τους διαχωρίζονται (α) σε τοπικά, που επηρεάζουν μόνο την υποπεριοχή στην ο-

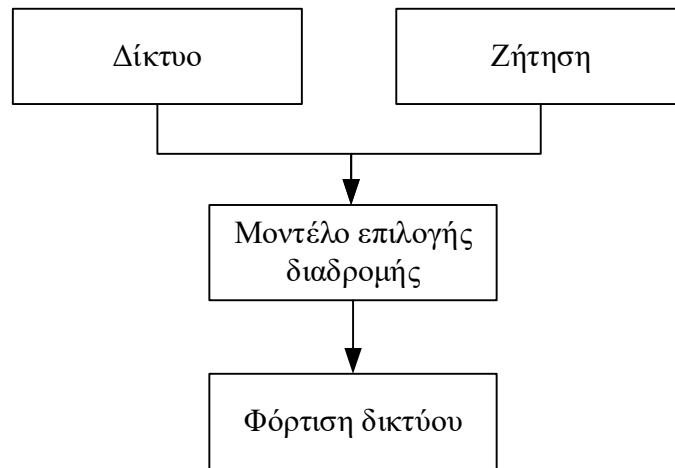
ποία εμφανίζονται και εφαρμόζονται αντίστοιχα, και (β) σε υπερτοπικά, που επηρεάζουν περισσότερες από δύο υποπεριοχές ή και ολόκληρο το δίκτυο. Χρησιμοποιώντας μία γνωστική βάση που στηρίζεται σε κανόνες, ο κεντρικός πράκτορας κατατάσσει τα προβλήματα που έχουν εντοπίσει οι μεμονωμένοι πράκτορες σε τοπικά ή υπερτοπικά. Αν κάποιο πρόβλημα είναι υπερτοπικό τότε προσδιορίζεται μία νέα ζώνη που ελέγχεται από έναν περιφερειακό πράκτορα και περιέχει ως υποσύνολα τις επηρεαζόμενες υποπεριοχές. Αν το μέγεθος της ζώνης ενός υπερτοπικού προβλήματος ξεπερνάει ένα αποδεκτό όριο, τότε το πρόβλημα αντιμετωπίζεται συνολικά από το κεντρικό πράκτορα. Μετά την κατάταξη των προβλημάτων ανάλογα με την έκτασή τους, ενεργοποιείται το υποσύστημα σχεδιασμού εναλλακτικών λύσεων εκκινώντας από το ανώτερο επίπεδο. Έτσι αν για παράδειγμα σε ένα τμήμα ενός αστικού αυτοκινητοδρόμου υπάρχει κάποιο συμβάν, το οποίο θα προκαλέσει προβλήματα συμφόρησης σε τρεις υποπεριοχές (έστω ότι αυτές οι υποπεριοχές είναι ο αυτοκινητόδρομος και δύο γειτνιάζουσες υποπεριοχές), τότε το κεντρικό σύστημα θα δημιουργήσει μία ζώνη που περιέχει αυτές τις υποπεριοχές και ο περιφερειακός πράκτορας θα αναλύσει το πρόβλημα της ζώνης. Έστω λοιπόν ότι μία προτεινόμενη λύση είναι η εκτροπή της κυκλοφορίας στο τοπικό δίκτυο που αποτελείται από τις δύο υποπεριοχές. Ο περιφερειακός πράκτορας θα ζητήσει από τους μεμονωμένους πράκτορες να εντοπίσουν επιπλέον προβλήματα συμφόρησης στις περιοχές τους και να τα επιλύσουν με δεδομένη την εκτρεπόμενη κυκλοφορία. Η επίλυση θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη ρύθμιση της σηματοδότησης για την εξυπηρέτηση της εκτρεπόμενης κυκλοφορίας. Μετά την ανάλυση ρίσκου των εναλλακτικών στρατηγικών, ο κεντρικός πράκτορας είναι υπεύθυνος για την τελική επιλογή των ενεργειών που οι μεμονωμένοι και περιφερειακοί πράκτορες προτείνουν. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη ανάλυση ρίσκου παρέχεται στον κεντρικό πράκτορα ένα εργαλείο για την ιεράρχηση των εναλλακτικών και συγκρουόμενων προτάσεων που προέρχονται από διαφορετικούς πράκτορες. Το *CVaR* δίνει την πληροφορία για τις μέσες απώλειες που είναι μεγαλύτερες του αποδεκτού ορίου ρίσκου σε ένα σύστημα. Επιλέγοντας ως απώλειες στην παρούσα ανάλυση τη μέση καθυστέρηση του συστήματος ανά όχημα ανά χιλιόμετρο, που δεν επηρεάζεται από μεγέθη που αφορούν στην έκταση του δικτύου και στην εξυπηρετούμενη ζήτηση, η ανάλυση ρίσκου εκμεταλλεύεται ένα από τα πλεονεκτήματα του *CVaR*, που είναι η έκφραση της τιμής ρίσκου σε μονάδες απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, ένα άλλο χρήσιμο χαρακτηριστικό της συνεκτικότητας του *CVaR* που ενσωματώνεται στην παρούσα προσέγγιση είναι το χαρακτηριστικό της υποπροσθετικότητας. Έτσι οι τιμές ρίσκου των υποπεριοχών μπορούν να αθροιστούν χωρίς να χάσουν τις ιδιότητές τους και να διαμορφώσουν τη συνολική τιμή ρίσκου μέσω του *CVaR*.

4.3.3 Δυναμικό μεσοσκοπικό πρότυπο καταμερισμού της κυκλοφορίας

4.3.3.1 Γενικά

Ο καταμερισμός της κυκλοφορίας αποτελεί τμήμα της τυπικής διαδικασίας πρόβλεψης μελλοντικών μετακινήσεων που περιλαμβάνει τέσσερα στάδια: τη γένεση των μετακινήσεων, την κατανομή των μετακινήσεων, την κατανομή των μετακινήσεων στα μέσα και τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο. Ο καταμερισμός της κυκλοφορίας είναι η διαδικασία κατά την οποία προσδιορίζονται οι βέλτιστες διαδρομές που θα ακολουθηθούν από τους χρήστες του συστήματος και οι φόρτοι που θα ακολουθήσουν την κάθε διαδρομή, εκτιμώντας έτσι τους φόρτους των επιμέρους τμημάτων του δικτύου που συνθέτουν τις διαδρομές αυτές. Η επέκταση της στατικής θεώρησης του καταμερισμού της κυκλοφορίας και η ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων καταμερισμού της κυκλοφορίας παρουσιάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 (Yagar 1971, Robillard 1974, Merchant & Nemhauser 1978). Ο δυναμικός καταμερισμός της κυκλοφορίας (Dynamic Traffic Assignment, DTA) έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών κυκλοφορίας στο δίκτυο, όχι μόνο χωρικά αλλά και χρονικά. Τα χρονικά εξαρτώμενα χαρακτηριστικά αφορούν τόσο στη ζήτηση μετακινήσεων όσο και στην προσφορά ενός συστήματος μεταφορών. Διάφορες προσεγγίσεις δυναμικού καταμερισμού έχουν διαμορφωθεί βασιζόμενες σε αναλυτικές προσεγγίσεις και σε μεθόδους προσομοίωσης. Τα αναλυτικά μοντέλα προσεγγίζουν το πρόβλημα του καταμερισμού με μαθηματικές διατυπώσεις του επιδιωκόμενου στόχου του, όπως η ισορροπία του χρήστη ή του συστήματος, χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες επίλυσης μαθηματικού προγραμματισμού (mathematical programming), βέλτιστου ελέγχου (optimal control) και μεταβολικών ανισοτήτων (variational inequalities). Τα μοντέλα που βασίζονται σε μεθόδους προσομοίωσης (simulation-based) χρησιμοποιούν έναν προσομοιωτή της κυκλοφορίας για την αναπαράσταση των σύνθετων δυναμικών φαινομένων της κυκλοφοριακής ροής, που είναι κρίσιμα στην ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας, χρησιμοποιώντας μοντέλα που αναπαριστούν τη συμπεριφορά των χρηστών του δικτύου. Εκτενής ανασκόπηση των σημαντικότερων DTA μεθόδων περιέχεται στις εργασίες των Peeta & Ziliaskopoulos (2001) και Chiu et al. (2011).

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στη χρήση των DTA μοντέλων που βασίζονται σε μεθόδους προσομοίωσης για την ανάλυση του συγκοινωνιακού συστήματος και την εύρεση στρατηγικών για τη διαχείριση κυκλοφορίας και παρουσιάζονται σημαντικές μέθοδοι και εφαρμογές τους σε αυτό το ερευνητικό πλαίσιο. Η βασική θεωρητική προσέγγιση ενός μοντέλου προσομοίωσης DTA όπως έχει διατυπωθεί από τους Barcelo et al. (2010) αποτελείται από τα μοντέλα αναπαράστασης της ζήτησης μετακινήσεων και της προσφοράς κυκλοφοριακής εξυπηρέτησης του δικτύου, το μοντέλο επιλογής διαδρομής και τη φόρτιση του δικτύου για την εκτίμηση των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου.



Σχήμα 4-9: Γενικό πλαίσιο λειτουργίας ενός δυναμικού μοντέλου καταμερισμού της κυκλοφορίας (Barcelo et al. 2010)

Ανάλογα με το βαθμό και τη λεπτομέρεια αναπαράστασης των χαρακτηριστικών του δικτύου τα μοντέλα καταμερισμού της κυκλοφορίας κατηγοριοποιούνται σε μακροσκοπικά, μεσοσκοπικά και μικροσκοπικά.

Τα μακροσκοπικά μοντέλα περιγράφουν τα κυκλοφοριακά φαινόμενα ως μία γενική αναπαράσταση της συνεχούς ροής της κυκλοφορίας μέσω των μακροσκοπικών μεγεθών του φόρτου, της πυκνότητας και της ταχύτητας. Έτσι είναι σε θέση να παρέχουν υπολογιστικά αποδοτικές λύσεις ειδικά σε περιπτώσεις που η έκταση του δικτύου είναι μεγάλη. Ενδεικτικά παραδείγματα μακροσκοπικών DTA μοντέλων προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Τα μικροσκοπικά μοντέλα αναπαριστούν αναλυτικά και εξατομικευμένα την κίνηση των οχημάτων και την συμπεριφορά των οδηγών στο δίκτυο που επηρεάζονται από την επιλογή της διαδρομής τους, τα χαρακτηριστικά του οδικού περιβάλλοντος και τις αλληλεπιδράσεις με τα γειτονικά οχήματα. Ενδεικτικά παραδείγματα μικροσκοπικών DTA μοντέλων προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Τα μεσοσκοπικά μοντέλα δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας έχουν τη δυνατότητα αναπαράστασης των μακροσκοπικών ιδιοτήτων των κυκλοφοριακών φόρτων, όπως είναι η μέση ταχύτητα, η πυκνότητα και η ροή των οχημάτων, χωρίς να εξετάζουν με μεγάλη λεπτομέρεια τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οχημάτων, όπως τα αντίστοιχα μοντέλα μικροσκοπικού επιπέδου. Η κύρια πρακτική της διαδικασίας καταμερισμού κυκλοφορίας με μεσοσκοπική προσέγγιση προσομοιώνει την κίνηση των οχημάτων ή μιας ομάδας οχημάτων κατά μήκος των επιλεγμένων διαδρομών, λαμβάνοντας υπόψη τις καθυστερήσεις που προκύπτουν από τη δημιουργία ουρών σε διασταυρώσεις, ενώ παρέχει τη δυνατότητα για αξιολόγηση της λειτουργίας του δικτύου μέσω των θεμελιωδών μακροσκοπικών σχέσεων της ροής των οχημάτων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεσοσκοπικής προσέγγισης είναι οι απαιτήσεις για

δεδομένα εισόδου, όπου σε αντίθεση με τα μοντέλα μικροσκοπικού επιπέδου ανάλυσης, τα στοιχεία εισόδου ενός μεσοσκοπικού μοντέλου είναι αντίστοιχα σε πλήθος και διακριτότητα με τα στοιχεία ενός μακροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης. Μεσοσκοπικά δυναμικά μοντέλα καταμερισμού που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Δυναμικά μεσοσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφορίας

DTA Μοντέλα	Προσέγγιση προσομοίωσης		
	Μακροσκοπική	Μεσοσκοπική	Μικροσκοπική
Aimsun (2018)	✓	✓	✓
CONTRAM (Taylor, 1990)		✓	
CTM (Daganzo, 1994)		✓	
Cube Voyager (Citilabs, 2018c)	✓		
Cube Avenue (Citilabs, 2018a)		✓	
Cube Dynasim (Citilabs, 2018b)			✓
DRACULA (Liu, 2010)			✓
DTALite (Zhou & Taylor, 2014)		✓	
DYNAMEQ (Florian et al., 2008)		✓	
DynaMIT (Ben-Akiva, et al., 2001)		✓	
DYNASMART (Mahmassani, 2001)		✓	
DYNEMO (Schwerdtfeger, 1984)		✓	
DynusT (Chiu & Nava, 2018)		✓	
EMME (INRO, 2018)	✓		
INTEGRATION (Van Aerde & Yagar, 1988b)		✓	
MATSim (Horni et al., 2016)			✓
METANET (Wang et al., 2001)	✓		
METROPOLIS (Palma & Marchal, 1998)		✓	
MEZZO (Burghout, et al., 2006)		✓	
MITSLab (Ben-Akiva et al., 2010)			✓
PARAMICS (Smith et al., 1995)			✓
SUMO (Krajzewicz et al., 2012)		✓	✓
TransCAD (Caliper, 2018a)	✓		
TransDNA (Caliper, 2018b)		✓	
TransModeler (Caliper, 2018c)			✓
TRANSIMS (2018)		✓	
TRITONE (TIS Group, 2018)			✓
TSIS-CORSIM (McTrans, 2018)			✓
VISTA (Ziliaskopoulos & Waller, 2000)		✓	
VISUM (PTV Group, 2018b)	✓		
VISSIM (PTV Group, 2018a)		✓	✓

Οι διαφορές αυτών των μοντέλων εντοπίζονται κυρίως στο επίπεδο λεπτομέρειας της προσομοίωσης, της εύρεσης της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη ή του συστήματος, της ντετερμινιστικής (που εξαρτάται αποκλειστικά από τις εισόδους και την αρχική κατάσταση) ή στοχαστικής θεώρησης, της θεώρησης διαφορετικών χρόνων διάνυσης των συνδέσμων, των παραδοχών ως προς βασικές αρχές (π.χ. First In – First Out), της επαναληπτικής ή μη διαδικασίας υπολογισμού της δυναμικής ισορροπίας, της διαδικασίας επαναυπολογισμού της χρονικά εξαρτώμενης βέλτιστης διαδρομής (διαχωρίζοντάς τα σε δυναμικά ή ψευδο-δυναμικά), της δυνατότητας εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο, του βαθμού ενσωμάτωσης της πληροφόρησης των χρηστών κτλ.

Μία ιδιαίτερη κατηγορία δυναμικών μοντέλων αποτελούν τα μοντέλα δυναμικής αναπαράστασης των καθημερινών φαινομένων του δικτύου (Day-To-Day Dynamics) που λαμβάνουν υπόψη τόσο τις προσομοιωμένες τρέχουσες συνθήκες όσο και τις εμπειρίες από προηγούμενες ημέρες (Friesz, et al., 1994, Friesz, et al., 1996, Cantarella και Cascetta, 1995). Μία άλλη σημαντική κατηγορία δυναμικών μοντέλων καταμερισμού αποτελούν τα μοντέλα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο του κυλιόμενου χρονικού ορίζοντα (Rolling Horizon), που αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε εφαρμογή ρύθμισης φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου από τον Gartner (1987) και στο πλαίσιο του δυναμικού καταμερισμού από τους Peeta και Mahmassani (1995).

Τα κύρια πεδία εφαρμογών του δυναμικού μεσοσκοπικού καταμερισμού είναι οι αναλύσεις πραγματικού χρόνου, καθώς και ο λειτουργικός σχεδιασμός του συστήματος που σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την δυναμική διάσταση του φαινομένου του καταμερισμού της κυκλοφορίας. Η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων παρατηρείται σε μικρού μεγέθους δίκτυα, που αφορούν σε περιορισμένες περιοχές, διαδρόμους, κόμβους, κτλ., αλλά και σε εκτεταμένα δίκτυα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους. Ενδεικτικά οι εφαρμογές αυτές αφορούν:

- στην αξιολόγηση ευφύων συστημάτων σε πληθώρα εφαρμογών τους
- στη διαχείριση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο
- στην εύρεση και την αξιολόγηση σχεδίων εκκένωσης πόλεων
- στην αξιολόγηση συστημάτων κομίστρου με χρονική διακύμανση του συστήματος
- στην αξιολόγηση των φαινομένων της προοδευτικής αύξησης της συμφόρησης
- στην εκτίμηση δυναμικών μητρώων προέλευσης – προορισμού
- στη βελτιστοποίηση και αξιολόγηση συστημάτων σηματοδότησης
- στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και αξιολόγηση ρυθμίσεων και σχεδίων

- στην ενσωμάτωσή τους σε λογισμικά που προσφέρουν υπηρεσίες συνδυάζοντας τις χωρικές και χρονικές ιδιότητες των οντοτήτων που περιγράφουν.

Η διερεύνηση των βέλτιστων ρυθμίσεων της κυκλοφορίας σε ένα αστικό δίκτυο, το οποίο λειτουργεί υπό συνθήκες κορεσμού είναι ένα πρόβλημα που έχει απασχολήσει την ακαδημαϊκή κοινότητα, αλλά και τη βιομηχανία πολλές δεκαετίες. Για την επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητο ένα περιβάλλον ανάλυσης και πρόβλεψης της λειτουργίας του δικτύου και αξιολόγησης των προτεινόμενων ρυθμίσεων της σηματοδότησης. Η ανάλυση των φαινομένων συμφόρησης και υπερκορεσμού σε αστικά σηματοδοτούμενα δίκτυα επιβάλλει τη δυναμική θεώρηση του προβλήματος κατά την οποία μπορεί να αναλυθεί η χρονική και χωρική έκταση της δημιουργίας ουρών και επιβραδύνσεων στην κίνηση των οχημάτων, καθώς και η επίπτωση αυτών των φαινομένων στη λειτουργία του δικτύου και στην επιλογή διαδρομής από τον χρήστη. Η δυναμική ανάλυση των φαινομένων της συμφόρησης και η δυναμική επιλογή της διαδρομής από τον χρήστη αποδίδει στο πρόβλημα ένα ακόμα επίπεδο πολυπλοκότητας.

Η επίλυση αυτού του πολύπλοκου προβλήματος επιβάλλει τη χρήση μίας πλατφόρμας που είναι σε θέση να προσομοιώσει τα φαινόμενα της δυναμικής εξέλιξης της συμφόρησης, αλλά και της δυναμικής επιλογής των χρηστών παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων σηματοδότησης. Ένα δυναμικό μεσοσκοπικό μοντέλο έχει αποδειχθεί από τη διεθνή πρακτική ότι μπορεί να αποτελέσει ιδανικό μέσο προσομοίωσης των συνθηκών κυκλοφορίας χωρίς να απαιτεί για τη ρύθμιση και την εφαρμογή του πληθώρα στοιχείων που να καθιστούν δύσκολη τη χρήση του. Τα τελευταία χρόνια πολλά κέντρα κυκλοφορίας, αλλά και συστήματα ρύθμισης της σηματοδότησης χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο δυναμικά μεσοσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφορίας για την επίτευξη των στόχων τους αναφορικά με την παρακολούθηση των συνθηκών των δικτύων και τη ρύθμιση της κυκλοφορίας. Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στα δυναμικά μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφορίας (simulation-based) με μεσοσκοπική προσέγγιση και ενσωματώνει το μοντέλο Aimsun για την προσομοίωση των κυκλοφοριακών μεγεθών. Το Aimsun αποτελεί ένα εργαλείο που περιέχει προσομοιωτές κίνησης οχημάτων σε μικροσκοπικό και μεσοσκοπικό επίπεδο και δυναμικά μοντέλα καταμερισμού της κυκλοφορίας που χρησιμοποιούν τη δυναμική ισορροπία του χρήστη ή στοχαστική επιλογή διαδρομών.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι βασικές θεωρητικές προσεγγίσεις που εμπεριέχονται στο Aimsun σε σχέση με τους προσομοιωτές κίνησης των οχημάτων στο πλαίσιο του δυναμικού καταμερισμού και πιο συγκεκριμένα στο πλαίσιο της μεσοσκοπικής προσέγγισης και της υβριδικής προσέγγισης, αναφέρονται επίσης βασικά χαρακτηριστικά του ενιαίου μοντέλου που περιλαμβάνει την υβριδική χρήση όλων των επιπέδων προσομοίωσης

και παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού βασικών στατιστικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή.

4.3.3.2 Προσομοίωση κίνησης οχημάτων στο Aimsun

Το Aimsun χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικούς προσομοιωτές κίνησης των μεμονωμένων οχημάτων, τον μικροσκοπικό, τον μεσοσκοπικό και τον υβριδικό προσομοιωτή. Η διαφορά μεταξύ του μικροσκοπικού και μεσοσκοπικού προσομοιωτή σχετίζεται με το επίπεδο λεπτομέρειας και τη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την ενημέρωση της κατάστασης του κάθε οχήματος.

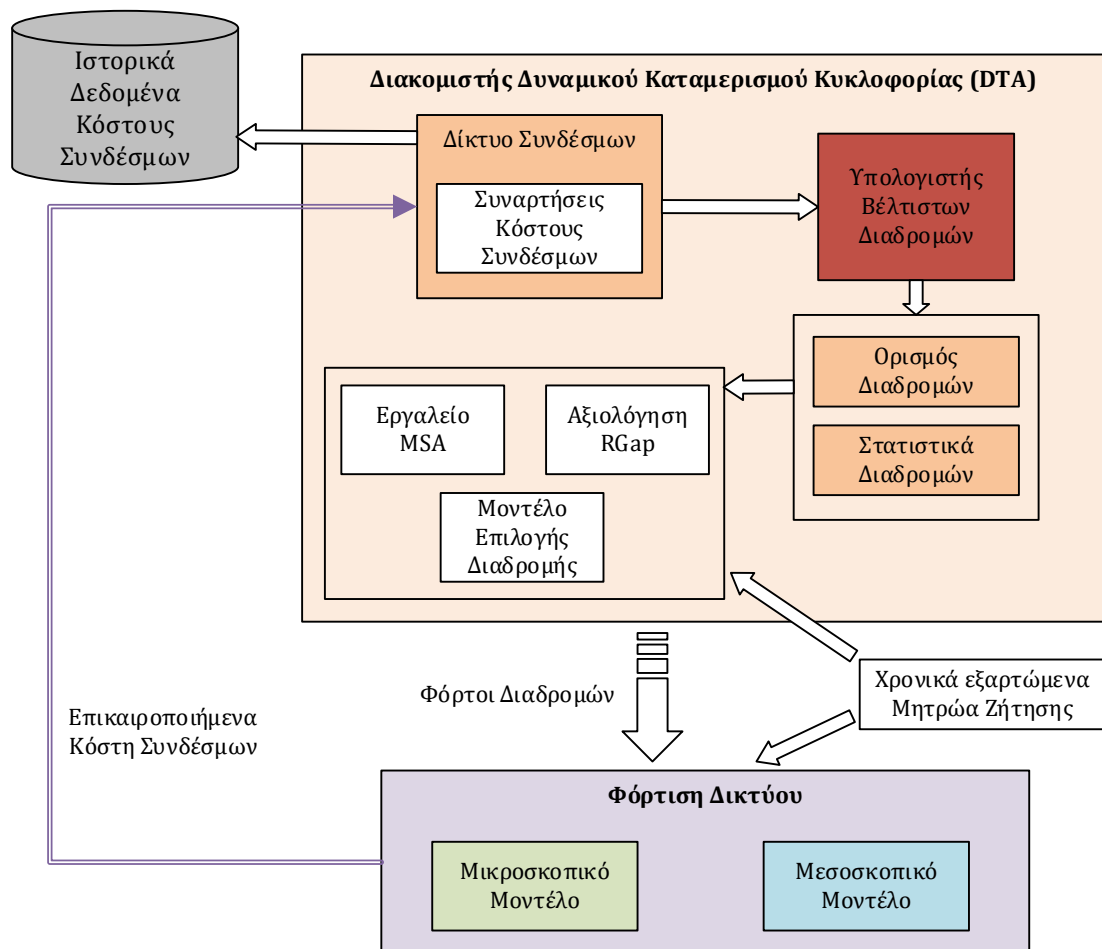
Στη μικροσκοπική προσέγγιση ο χρόνος διαχωρίζεται σε σύντομα σταθερά διαστήματα και οι ενέργειες κάθε οχήματος υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα. Επομένως η συμπεριφορά κάθε οχήματος στο δίκτυο διαμορφώνεται καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης καθώς μετακινείται στο δίκτυο, αλληλοεπιδρά με άλλα οχήματα και με συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας και αντιδρά σε περιστατικά κωδικοποιημένα στο μοντέλο. Διαφορετικοί τύποι οχημάτων μπορούν να προσομοιωθούν με διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, όπως και διαφορετικοί τύποι οδηγών με διαφορετική οδηγική συμπεριφορά.

Στη μεσοσκοπική προσέγγιση, το όχημα κωδικοποιείται ως μεμονωμένη οντότητα, όπως και στην μικροσκοπική προσέγγιση, αλλά τα μοντέλα συμπεριφοράς, όπως το μοντέλο ακολουθίας οχημάτων (car-following model) και το μοντέλο αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας (lane-changing model), είναι τροποποιημένα, έτσι ώστε να προβλέπουν την ταχύτητα και την επιλογή λωρίδας στην αρχή και στο τέλος ενός οδικού τμήματος και όχι σε κάθε χρονικό βήμα. Επομένως η μεσοσκοπική προσομοίωση βασίζεται σε γεγονότα, όπως η άφιξη ενός οχήματος σε ένα κόμβο. Η πορεία του οχήματος δεν προσομοιώνεται με ακρίβεια κατά μήκος ενός οδικού τμήματος. Αντιθέτως, η πρόβλεψη για τον χρόνο άφιξης του στο τέλος του τμήματος λαμβάνει υπόψη τις κυκλοφοριακές συνθήκες στο τμήμα, όπως ο φόρτος, η πυκνότητα, οι στάσεις λεωφορείων, κτλ. Έτσι δεν ενημερώνεται η θέση όλων των οχημάτων σε κάθε χρονική στιγμή, παρά μόνο αυτών που έχουν μία αλλαγή στην κατάστασή τους, προσφέροντας με αυτό τον τρόπο πολύ πιο ταχείς χρόνους προσομοίωσης σε σχέση με τη μικροσκοπική προσέγγιση.

Στην υβριδική προσέγγιση, η προσομοίωση εφαρμόζει το μικροσκοπικό μοντέλο σε επιλεγμένες περιοχές και το μεσοσκοπικό στην υπόλοιπη περιοχή, εξοικονομώντας έτσι σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και χρόνο σε περιπτώσεις που το συνολικό δίκτυο είναι μεγάλης έκτασης και υπάρχει παράλληλο ενδιαφέρον για μικροσκοπική ανάλυση σε συγκεκριμένες περιοχές.

Η διαδικασία του δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας αποτελείται από δύο κύρια μέρη: το μηχανισμό επιλογής διαδρομής που προσδιορίζει τον καταμερισμό των χρονικά εξαρ-

τώμενων φόρτων στις εναλλακτικές διαδρομές σε κάθε χρονικό βήμα και το μηχανικό μετακίνησης των οχημάτων στο δίκτυο. Τα δυναμικά μοντέλα καταμερισμού μπορούν να διαχωριστούν σε αυτά που ενσωματώνουν στο μηχανισμό επιλογής διαδρομής τη δυναμική επέκταση της ισορροπίας του χρήστη και σε αυτά που εστιάζουν στην επιλογή διαδρομής σε μία επανάληψη βάσει της διαθέσιμης πληροφορίας για την κατάσταση του δικτύου. Η δυναμική επέκταση της ισορροπίας του χρήστη (Dynamic User Equilibrium, DUE) από τους Ran & Boyce (1996) ορίζεται ως: «Αν, για κάθε ζεύγος προέλευσης προορισμού σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή, ο πραγματικός χρόνος διαδρομής των χρηστών που αναχωρούν την ίδια χρονική στιγμή είναι ίδιος και ελάχιστος, η δυναμική φόρτιση του δικτύου είναι μία χρονικά εξαρτώμενη δυναμική ισορροπία του χρήστη». Το Aimsun προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών προσεγγίσεων και για τους δύο μηχανισμούς. Στον μηχανισμό επιλογής διαδρομής χρησιμοποιεί αλγόριθμους που ενσωματώνουν στον δυναμικό καταμερισμό τη δυναμική ισορροπία του χρήστη και εναλλακτικά το μοντέλο επιλογής διαδρομής των Ben-Akiva & Bierlaire (1999), ενώ στο μηχανισμό μετακίνησης οχημάτων στο δίκτυο χρησιμοποιεί τη μικροσκοπική ή τη μεσοσκοπική προσέγγιση.



Σχήμα 4-10: Εννοιολογική δομή του διακομιστή δυναμικού καταμερισμού κυκλοφορίας στο Aimsun

Υποθέτοντας έτσι ότι υπάρχει συνοχή μεταξύ της μικροσκοπική και μεσοσκοπικής προσέγγισης, η επιλογή της διαδρομής που βασίζεται στο κόστος των συνδέσμων είναι η ίδια, με μόνη διαφορά τις τιμές των συναρτήσεων κόστους από τους δύο προσομοιωτές. Γι' αυτό το λόγο το Aimsun χρησιμοποιεί κοινή αναπαράσταση των χαρακτηριστικών και των οντοτήτων του δικτύου, τα οποία αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων που είναι προσβάσιμη από όλα τα μοντέλα. Η εννοιολογική δομή του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-10. Ο δυναμικός διακομιστής (DTA server) υπολογίζει τις βέλτιστες διαδρομές μέσω των συναρτήσεων κόστους των συνδέσμων με βάση είτε τα υφιστάμενα κόστη είτε τα κόστη από προηγούμενες επαναλήψεις. Στη συνέχεια, το κόστος των συνδέσμων επικαιροποιείται είτε από τη μεσοσκοπική είτε από τη μικροσκοπική προσέγγιση.

Αναπαράσταση των χαρακτηριστικών του δικτύου

Για τη διευκόλυνση των αλγορίθμων εύρεσης διαδρομής, το Aimsun μετασχηματίζει κάθε οδικό τμήμα σε απλοποιημένους κόμβους και συνδέσμους, έτσι κάθε τμήμα διαχωρίζεται σε ισάριθμους απλοποιημένους συνδέσμους και κόμβους ανάλογα με τον αριθμό των στρεφουσών κινήσεων στο τέλος του τμήματος. Το κόστος του κάθε απλοποιημένου συνδέσμου αντιστοιχεί στο κόστος του τμήματος και στο κόστος της στρέφουσας κίνησης. Υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στον ορισμό των διαδρομών από μία προέλευση σε έναν προορισμό: οι διαδρομές (OD Routes) που ορίζονται εξωτερικά από το χρήστη και αποτελούνται από έναν κατάλογο διαδοχικών απλοποιημένων συνδέσμων από μία προέλευση προς έναν προορισμό, και οι διαδρομές από προηγούμενους καταμερισμούς που αποτελούνται από μία δομή που ορίζει επιμέρους διαδρομές από κάθε απλοποιημένο σύνδεσμο του δικτύου προς έναν προορισμό. Το κόστος των απλοποιημένων συνδέσμων είναι συναρτήσεις του χρόνου διάνυσης των τμημάτων και στρεφουσών κινήσεων και της ελκυστικότητας του συνδέσμου. Η ελκυστικότητα του συνδέσμου είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει τον απλοποιημένο σύνδεσμο και εξαρτάται από την ονομαστική χωρητικότητα του τμήματος, τον αριθμό των λωρίδων του τμήματος και τον αριθμό των στρεφουσών κινήσεων. Ο χρόνος διάνυσης του τμήματος προκύπτει είτε από τα χαρακτηριστικά ελεύθερης ροής είτε από το χρόνο των οχημάτων που έχουν διανύσει τον σύνδεσμο και την αντίστοιχη στρέφουσα κίνηση στο προηγούμενο χρονικό βήμα. Στην ειδική περίπτωση που κανένα όχημα δεν έχει διανύσει τον σύνδεσμο λόγω συμφόρησης, τότε ο χρόνος αντιστοιχεί στον χρόνο αναμονής στην ουρά.

Εύρεση και επιλογή βέλτιστης διαδρομής

Για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής, το Aimsun χρησιμοποιεί δύο προσεγγίσεις, την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής και τον καταμερισμό των μετακινήσεων σε αυτή ή την εύρεση k εναλλακτικών διαδρομών και τον καταμερισμό των μετακινήσεων χρησιμοποιώντας μία σταδιακή φόρτιση. Ο αλγόριθμος εύρεσης βέλτιστων διαδρομών είναι μία παραλλαγή του

κλασσικού αλγορίθμου που έχει προταθεί από τον Dijkstra (1959) και αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 0: Υπολογισμός των αρχικών βέλτιστων διαδρομών για κάθε ζεύγος προέλευσης προορισμού χρησιμοποιώντας τα αρχικά κόστη.

Βήμα 1: Καταμερισμός των μετακινήσεων που αντιστοιχούν σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (όπως 5 λεπτά) στις βέλτιστες διαδρομές ανάλογα με την επιλεγμένη προσέγγιση δυναμικού καταμερισμού και εξαγωγή των νέων χρόνων διαδρομής του δικτύου που προκύπτουν από την προσομοίωση των οχημάτων.

Βήμα 2: Επανυπολογισμός των βέλτιστων διαδρομών χρησιμοποιώντας τους προσομοιωμένους χρόνους διαδρομής.

Βήμα 3: Αν συμπεριλαμβάνεται στο δίκτυο δυνατότητα επανυπολογισμού της διαδρομής μέσω καθοδηγούμενων οχημάτων ή VMS, η πληροφορία που εκτιμήθηκε στο 2^ο βήμα παρέχεται στους οδηγούς που επιτρέπεται να τροποποιήσουν δυναμικά τη διαδρομή τους.

Βήμα 4: Επανάληψη του 1^{ου} βήματος.

Σε κάθε χρονικό βήμα, υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός εναλλακτικών διαδρομών για κάθε ζεύγος προέλευσης προορισμού και η διαδικασία καταμερισμού της ζήτησης σε μία διαδρομή πραγματοποιείται μέσω του μοντέλου επιλογής διαδρομής. Τα μοντέλα αυτά συνήθως βασίζονται στη θεωρία διακριτών επιλογών (discrete choice theory). Στο Aimsun είναι υλοποιημένα τέσσερα μοντέλα επιλογής διαδρομής, το διωνυμικό (binomial), το αναλογικό (proportional), το πολυωνυμικό (multinomial) Logit και το C-Logit.

Στην περίπτωση του δυναμικού καταμερισμού που συμπεριλαμβάνει τη δυναμική ισορροπία του χρήστη, το Aimsun πραγματοποιεί N επαναλήψεις προσομοιώσεων και αποθηκεύει για κάθε επανάληψη, n , το κόστος του κάθε συνδέσμου, j , για κάθε χρονικό βήμα $t, t + 1, \dots, L$ (όπου $L = T/t$, T είναι ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης και t είναι το χρονικό βήμα στο οποίο επικαιροποιούνται οι διαδρομές και τα κόστη αυτών). Έτσι σε κάθε επανάληψη n τα κόστη από την προηγούμενη επανάληψη $n - 1$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του αναμενόμενου κόστους των συνδέσμων στην παρούσα επανάληψη. Έστω ότι $S_a^{j,l}(v)$ είναι το υφιστάμενο κόστος ενός συνδέσμου με φόρτο v , στο χρονικό βήμα l της επανάληψης j , τότε το μέσο κόστος του συνδέσμου για τα μελλοντικά χρονικά βήματα $L - l$, βάσει του προσομοιωμένου χρόνου διάνυσης του συνδέσμου για τα προηγούμενα $j - 1$ βήματα δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{S}_a^{j,l+1}(v) = \frac{1}{(j-1)} \sum_{m=1}^{j-1} S_a^{m,l+i}(v) \quad (4-10)$$

όπου $i = 1, \dots, L-1$.

Το προβλεπόμενο κόστος του συνδέσμου τότε υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{S}_a^{j,l+1}(v) = \frac{1}{(j-1)} \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \bar{S}_a^{j,l+1}(v) \quad (4-11)$$

όπου $\sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \bar{S}_a^{j,l+1}(v) = 1$ όταν $\alpha_i \geq 0, \forall i$ είναι συντελεστές βαρύτητας.

Το υπολογιζόμενο κόστος της διαδρομής k για το ζεύγος προέλευσης προορισμού i είναι:

$$\tilde{S}_k(h^{l+1}) = \sum_{a \in A} \bar{S}_a^{j,l+1}(v) \delta_{ak} \quad (4-12)$$

όπου το δ_{ak} είναι μονάδα όταν ο σύνδεσμος a ανήκει στη διαδρομή k ή διαφορετικά μηδέν.

Τα κόστη $\tilde{S}_k(h^{l+1})$ των διαδρομών χρησιμοποιούνται από το μοντέλο επιλογής διαδρομής στο χρονικό βήμα $l+1$ για να διαχωριστεί η ζήτηση g_i^{l+1} στις εναλλακτικές διαδρομές του ζεύγους i . Στο Aimsun χρησιμοποιείται μία απλοποιημένη εκδοχή για τον υπολογισμό του κόστους του συνδέσμου:

$$c_a^{j,l} = \lambda c_a^{j-1,l} + (1-\lambda) \tilde{c}_a^{j-1,l} \quad (4-13)$$

όπου $c_a^{j,l}$ είναι το κόστος διάνυσης ενός συνδέσμου a στο χρονικό διάστημα l στην επανάληψη j , $c_a^{j-1,l}$ και $\tilde{c}_a^{j-1,l}$ είναι το αναμενόμενο και εκτιμώμενο κόστος αντίστοιχα στο χρονικό διάστημα l στην επανάληψη $j-1$.

Η προσέγγιση DUE μπορεί να υλοποιηθεί με την επίλυση του ακόλουθου μαθηματικού μοντέλου:

$$[\tau_{rsp}(t) - \theta_{rs}(t)] f_{rsp}(t) = 0 \quad \forall p \in P_{rs}(t), \forall (r,s) \in J, t \in [0, T] \quad (4-14)$$

$$\tau_{rsp}(t) - \theta_{rs}(t) \geq 0 \quad \forall p \in P_{rs}(t), \forall (r,s) \in J, t \in [0, T] \quad (4-15)$$

$$\tau_{rsp}(t), \theta_{rs}(t), f_{rsp}(t) \geq 0 \quad (4-16)$$

και τις εξισώσεις εξισορρόπησης των φόρτων:

$$\sum_{p \in P_{rs}(t)} f_{rsp}(t) = d_{rs}(t) \quad \forall (r,s) \in J, t \in [0, T] \quad (4-17)$$

όπου $f_{rsp}(t)$ είναι ο φόρτος στη διαδρομή p από την προέλευση r προς τον προορισμό s που αναχωρεί στο χρονικό βήμα t , $\tau_{rsp}(t)$ είναι το πραγματικό κόστος της διαδρομής από r προς s στη διαδρομή p στο χρονικό βήμα t , $\theta_{rs}(t)$ είναι το κόστος της βέλτιστης διαδρομής p από r προς s στο χρονικό βήμα t , $P_{rs}(t)$ είναι το σύνολο όλων των εναλλακτικών διαδρομών από r

προς s στο χρονικό βήμα t , J είναι το σύνολο όλων των ζευγών προέλευσης προορισμού (r, s) στο δίκτυο και $d_{rs}(t)$ είναι η ζήτηση από r προς s στο χρονικό βήμα t . Το πρόβλημα αυτό είναι ισοδύναμο με ένα πρόβλημα πεπερασμένων διαστάσεων μεταβολικής ανισότητας, που συνίσταται στην εύρεση ενός διανύσματος φόρτων διαδρομών f^* τέτοιο που:

$$[f - f^*]^T \geq 0, \forall f \in N \quad (4-18)$$

$$N = \left\{ f_{rsp}(t) \left| \sum_{p \in P_{rs}(t)} f_{rsp}(t) = d_{rs}(t) \quad \forall (r, s) \in J, t \in [0, T], f_{rsp}(t) \geq 0 \right. \right\} \quad (4-19)$$

Οι Wu et al. (1998a, 1998b) απέδειξαν ότι αυτό το πρόβλημα είναι ισοδύναμο με την μεταβολική ανισότητα διακριτών τιμών:

$$\sum_t \sum_{p \in R} \tau_{rsp}(t) [f_{rsp}(t) - f^*_{rsp}(t)] \geq 0 \quad (4-20)$$

όπου $R = \cup_{(r,s) \in J} P_{rs}$ είναι το σύνολο των εναλλακτικών διαδρομών. Η επίλυση αυτού του προβλήματος στο Aimsun υλοποιείται μέσω μίας παραλλαγής της κλασσικής Μεθόδου Διαδοχικών Μέσων Όρων (Method of Successive Averages, MSA) που είχε προταθεί από τους Florian et al. (2002), έτσι ώστε να περιορίζεται ο αριθμός των εναλλακτικών διαδρομών για κάθε ζεύγος προέλευσης προορισμού. Αυτή η μέθοδος αρχικοποιεί τη διαδικασία με βάση ένα αλγόριθμο διαδοχικής φόρτισης που κατανέμει τη ζήτηση στις εναλλακτικές διαδρομές και επαναλαμβάνεται για ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων μέχρι να μην προστίθενται άλλες εναλλακτικές διαδρομές και το αντίστοιχο τμήμα της ζήτησης να έχει κατανεμηθεί σύμφωνα με την MSA. Έστω ότι K είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, n , για τον προσδιορισμό νέων διαδρομών:

Περίπτωση a:

Για $n \leq K$ εντοπίζεται μία νέα βέλτιστη διαδρομή $c_{rs}(t) \notin P_{rs}^n(t)$

$$f_{rsp}^{n+1}(t) = \frac{1}{n+1} d_{rs}(t), \forall p \in P_{rs}^n(t), \forall (r, s) \in J, t \in [0, T]$$

$$P_{rs}^{n+1}(t) = P_{rs}^n(t) \cup c_{rs}(t)$$

Περίπτωση b:

Για $n > K$ η νέα βέλτιστη διαδρομή υπολογίζεται από τις υφιστάμενες διαδρομές $c_{rs}(t) \in P_{rs}^n(t)$ και το σύνολο P_{rs} δεν αλλάζει

$$f_{rsp}^{n+1}(t) = \begin{cases} \frac{n}{n+1} f_{rsp}^n(t) & \text{αν } p \neq c_{rs}(t) \\ \frac{n}{n+1} f_{rsp}^n(t) + \frac{1}{n+1} d_{rs}(t) & \text{αν } p = c_{rs}(t) \end{cases} \quad \forall p \in P_{rs}^n(t), \forall (r, s) \in J, t \in [0, T]$$

Στο Aimsun υπάρχει υλοποιημένη και μία παραλλαγή του αλγορίθμου WMSA που έχει προταθεί από τους Liu et al. (2007) όπου αντί να κατανέμεται στην κάθε επανάληψη n το $1/n$ της ζήτησης κατανέμεται το $2/(n + 1)$.

Για την επίλυση του προβλήματος DUE στο Aimsun υπάρχει υλοποιημένος και ένας αλγόριθμος βασιζόμενος σε κλίσεις (Gradient-Based) των Lu et al. (2009). Το πρόβλημα της εύρεσης της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη αναδιατυπώνεται ως ένα πρόβλημα μη γραμμικής ελαχιστοποίησης (nonlinear minimization problem, NMP). Το πρόβλημα επιλύεται με μία διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία ενσωματώνει (α) ένα δυναμικό μοντέλο φόρτισης δικτύου βασισμένο σε προσομοίωση που εκτιμά τη δυναμική της κυκλοφορίας και προσδιορίζει το κόστος ταξιδιού των διαδρομών για ένα δεδομένο πρότυπο μετακινήσεων και (β) μία μέθοδο κατεύθυνσης καθόδου αλλαγής διαδρομών για την επίλυση του περιορισμένου NMP που ορίζεται από ένα υποσύνολο εφικτών διαδρομών.

Η μέθοδος καθοδικής κατεύθυνσης παρακάμπτει την ανάγκη να υπολογιστεί η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης κατά την εύρεση κατευθύνσεων αναζήτησης ή να προσδιοριστούν τα κατάλληλα μεγέθη βημάτων, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές δικτύων μεγάλης κλίμακας. Επίσης, ο αλγόριθμος αυτός προσφέρει περιορισμό στη χρήση εναλλακτικών διαδρομών που προτείνονται από το μοντέλο και θεωρείται πιο αποδοτικός στην περίπτωση δικτύων που οι εναλλακτικές διαδρομές έχουν μεγάλο τμήμα τους επικαλυπτόμενο.

Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις στην επίλυση του προβλήματος DUE που βασίζονται στην προσομοίωση του καταμερισμού της ζήτησης στο δίκτυο είναι ευρετικές και επομένως δεν παρέχεται απόδειξη σχετικά με τη σύγκλισή τους. Επομένως, ο εμπειρικός προσδιορισμός της σύγκλισης στην αρχή που διέπει τη δυναμική ισορροπία του χρήστη βασίζεται στην αξιολόγηση του μεγέθους του σχετικού χάσματος (Relative Gap, $Rgap$) που έχει προταθεί από τον Janson (1991) και που αντιστοιχεί στο συνολικό επιπλέον κόστος σε σχέση με το συνολικό ελάχιστο κόστος, αν όλοι οι μετακινούμενοι είχαν χρησιμοποιήσει τις ελάχιστες διαδρομές:

$$Rgap(n) = \frac{\sum_t \sum_{(r,s) \in J} \sum_{p \in P_{rs}(t)} f_{rsp}^n(t) [\tau_{rsp}^n(t) - \theta_{rs}^n(t)]}{\sum_t \sum_{(r,s) \in J} d_{rs}(t) \theta_{rs}^n(t)} \quad (4-21)$$

4.3.3.3 Δυναμική μεσοσκοπική προσέγγιση στο Aimsun

Στο Aimsun, η δυναμική μεσοσκοπική προσομοίωση αναφέρεται στη προσομοίωση μεμονωμένων οχημάτων σε επίπεδο συνδέσμου και λωρίδας, όπου το επίπεδο λεπτομέρειας της δραστηριότητας του οχήματος είναι κατά πολύ μειωμένο σε σχέση με την μικροσκοπική προσομοίωση. Στη μεσοσκοπική προσέγγιση του Aimsun, το όχημα εξετάζεται μόνο όταν εισέρχεται και όταν εξέρχεται από ένα οδικό τμήμα και η ενδιάμεση κίνησή του δεν προσομοιώνεται.

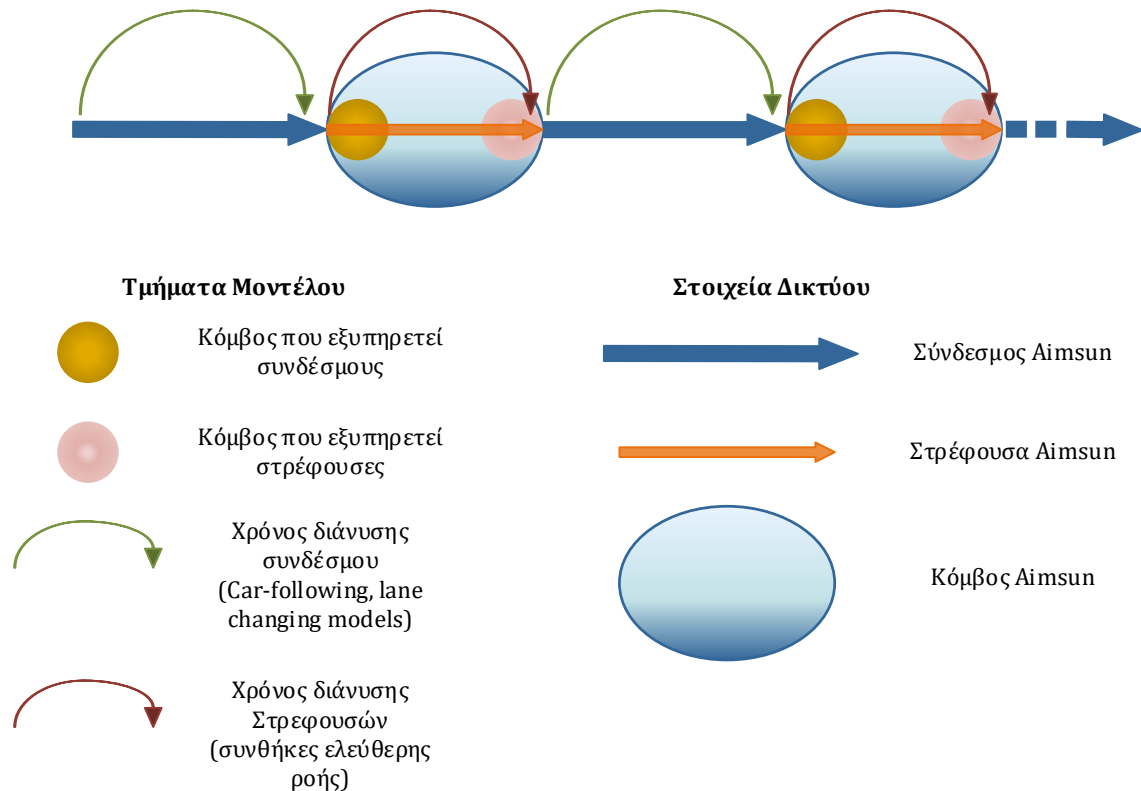
Η μεσοσκοπική προσέγγιση προσομοίωσης βασίζεται σε μια προσομοίωση διακριτών συμβάντων, όπου κάθε κόμβος λειτουργεί ως διακομιστής ουράς για όλα τα οδικά τμήματα εισόδου. Ο χρόνος προσομοίωσης αλλάζει καθώς η προσομοίωση προχωρά στα χρονικά σημεία στα οποία συμβαίνει ένα συμβάν. Ένα συμβάν ορίζεται ως ένα στιγμιαίο περιστατικό που μπορεί να αλλάξει την κατάσταση του συστήματος, δηλαδή την κατάσταση του κυκλοφοριακού δικτύου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συμβάντων, όπως η εισαγωγή οχήματος (είσοδος οχήματος), η είσοδος οχήματος στο σύστημα (μέσω εικονικής ουράς), η κίνηση οχήματος σε κόμβο (δυναμική κίνηση οχήματος), η αλλαγή στη σηματοδότηση (έλεγχος κυκλοφορίας), η εξαγωγή στατιστικών στοιχείων και η αλλαγή στο μητρώο ζήτησης μετακινήσεων.

Όλα τα συμβάντα στο Aimsun χαρακτηρίζονται από τον χρόνο και την προτεραιότητά τους, για την ταξινόμησή τους στη λίστα συμβάντων. Για παράδειγμα, τα γεγονότα που σχετίζονται με την αλλαγή σηματοδότησης ή την εισαγωγή ενός νέου οχήματος θα αντιμετωπιστούν πριν από γεγονότα που σχετίζονται με εξαγωγή στατιστικών στοιχείων ή κινήσεις οχημάτων σε κόμβους.

Τα σημαντικότερα μέρη της προσομοίωσης διακριτών συμβάντων είναι:

- Η κατάσταση του δικτύου, που αναφέρεται στον αριθμό των οχημάτων στα τμήματα, στη σηματοδότηση, κτλ.
- Το ρολόι προσομοίωσης, που παρακολουθεί την προσομοίωση όχι ανά συγκεκριμένα χρονικά βήματα, αλλά ανάλογα με τα συμβάντα
- Η λίστα συμβάντων, που περιέχει τα συμβάντα, το χρόνο και την προτεραιότητά των συμβάντων και τους στατιστικούς φωρατές, που συλλέγουν τα στοιχεία του δικτύου σε κάθε χρονικό βήμα.
- Η διαδικασία των συμβάντων, που για κάθε τύπο συμβάντος, ενημερώνει το ρολόι προσομοίωσης και την κατάσταση του συστήματος.
- Η παραγωγή τυχαίων αριθμών, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή οχημάτων αλλά και στην κίνησή τους στο δίκτυο.
- Το κύριο πρόγραμμα, που υλοποιεί τα συμβάντα και ελέγχει την προσομοίωση με κύρια καθήκοντα την αρχικοποίηση των δομών του δικτύου και της κατάστασης προσομοίωσης, τον προσδιορισμό του επόμενου συμβάντος, την επανάκληση της διαδικασίας που αφορά το κάθε συμβάν για την ενημέρωση της κατάστασης του δικτύου και τον έλεγχο της συνθήκης λήξης της προσομοίωσης.

Η προσομοίωση διακριτών συμβάντων που χρησιμοποιείται στη μεσοσκοπική προσέγγιση είναι η βασική διαφορά μεταξύ της μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής προσέγγισης στο Aimsun. Τα περισσότερα όμως εργαλεία και οντότητες είναι κοινά και στις δύο προσεγγίσεις, όπως η διαδικασία εισόδου οχήματος, η ζήτηση μετακινήσεων, η γεωμετρία του δικτύου, τα χαρακτηριστικά του οχήματος και τα χαρακτηριστικά της σηματοδότησης.



Σχήμα 4-11: Προσομοίωση της κίνησης ενός οχήματος στη μεσοσκοπική προσέγγιση στο Aimsun

Η προσομοίωση της κίνησης ενός οχήματος στη μεσοσκοπική προσέγγιση διακρίνεται σε δύο μοντέλα (Βλ. Σχήμα 4-11):

- Την προσομοίωση κίνησης οχήματος σε οδικό τμήμα μέσω του μοντέλου ακολουθίας οχημάτων (car-following model) και του μοντέλου αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας (lane-changing model) για τον προσδιορισμό του χρόνου μετακίνησης βασιζόμενα στις εργασίες του Mahut (1999a, 1999b, 2001). Ο χρόνος μετακίνησης αντιστοιχεί στον μικρότερο χρόνο που το όχημα μπορεί να φτάσει στο τέλος του τμήματος, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση που επικρατεί (μέσω του αριθμού των οχημάτων στο τμήμα).
- Την προσομοίωση οχήματος σε κόμβο, που περιλαμβάνει την προσομοίωση κίνησης σε στρέφουσες κινήσεις και την προσομοίωση μετάβασης από τμήμα σε στρέφουσα κίνηση μέσω των μοντέλων αποδοχής διάκενου (gap-acceptance) και επιλογής λωρίδας (lane selection). Η εκτίμηση του επόμενου οχήματος που θα εισέλθει στον κόμβο υλοποιείται χρησιμοποιώντας το μοντέλο αποδοχής διάκενου και στην συνέχεια ο χρόνος εξόδου υπολογίζεται από τα μοντέλα ακολουθίας οχημάτων και αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας.

Αντίστοιχα η εκτίμηση του επόμενου οχήματος που θα εξέλθει από τον κόμβο υλοποιείται χρησιμοποιώντας τα μοντέλα ακολουθίας οχημάτων και αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας για τον υπολογισμό του χρόνου μετακίνησης και λαμβάνοντας τον μικρότερο χρόνο που το όχημα μπορεί να εισέλθει στο επόμενο τμήμα.

Σε αυτή την προσέγγιση θεωρείται λοιπόν, ότι τα οδικά τμήματα και οι στρέφουσες κινήσεις εμπεριέχουν οχήματα. Η χωρητικότητα ενός οδικού τμήματος ως προς τον αριθμό οχημάτων που μπορούν να βρίσκονται την ίδια χρονική στιγμή στο τμήμα, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την πυκνότητα συνωστισμού πολλαπλασιασμένη με το μήκος του τμήματος και τον αριθμό των λωρίδων αυτού. Κατ' αναλογία, υπολογίζεται και η χωρητικότητα της στρέφουσας κίνησης, χρησιμοποιώντας της πιθανές συνδέσεις του κόμβου, αντί του αριθμού των λωρίδων.

4.3.3.4 Εκτίμηση στατιστικών μεγεθών στο Aimsun

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία εκτίμησης των βασικών στατιστικών μεγεθών στο Aimsun. Το Aimsun συλλέγει τα στοιχεία από την κίνηση των οχημάτων και σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα τα επεξεργάζεται και παράγει στατιστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση της κατάστασης του δικτύου. Για κάθε όχημα συλλέγονται τα ακόλουθα στοιχεία:

$TGEN_{veh}$: Ο χρόνος δημιουργίας του οχήματος veh στο σύστημα (δευτερόλεπτα).

TEN_{veh} : Ο χρόνος εισόδου του οχήματος veh στο δίκτυο (δευτερόλεπτα).

TEX_{veh} : Ο χρόνος εξόδου του οχήματος veh στο δίκτυο (δευτερόλεπτα).

D_{veh} : Η συνολική απόσταση μετακίνησης του οχήματος veh στο δίκτυο (μέτρα).

TDT_{veh} : Η συνολική καθυστέρηση του οχήματος veh στο δίκτυο αθροιστικά από κάθε σύνδεσμο που διέρχεται (δευτερόλεπτα).

TST_{veh} : Ο συνολικός χρόνος στάσης του οχήματος veh στο δίκτυο αθροιστικά από κάθε σύνδεσμο που διέρχεται (δευτερόλεπτα).

TNS_{veh} : Ο συνολικός αριθμός στάσεων του οχήματος veh στο δίκτυο αθροιστικά από κάθε σύνδεσμο που διέρχεται.

TFC_{veh} : Η συνολική κατανάλωση καυσίμου από το όχημα veh (λίτρα).

$TPE_{veh,j}$: Οι συνολικές εκπομπές του ρύπου j από το όχημα veh (κιλά).

Λαμβάνοντας αυτή την πληροφορία, όταν ένα όχημα εξέρχεται από το δίκτυο, υπολογίζονται τα ακόλουθα:

TT_{veh} : Μέσος χρόνος μετακίνησης ανά χιλιόμετρο για το όχημα veh (δευτερόλεπτα):

$$TT_{veh} = \frac{TEX_{veh} - TEN_{veh}}{D_{veh}} \quad (4-22)$$

DT_{veh} : Μέση καθυστέρηση ανά χιλιόμετρο για το όχημα veh (δευτερόλεπτα):

$$DT_{veh} = \frac{TDT_{veh}}{D_{veh}} \quad (4-23)$$

S_{veh} : Μέση ταχύτητα για το όχημα veh (δευτερόλεπτα):

$$S_{veh} = \frac{D_{veh}}{TEX_{veh} - TEN_{veh}} \quad (4-24)$$

ST_{veh} : Μέσος χρόνος στάσης ανά χιλιόμετρο για το όχημα veh (δευτερόλεπτα):

$$TS_{veh} = TST_{veh} / D_{veh} \quad (4-25)$$

NS_{veh} : Μέσος αριθμός στάσεων ανά χιλιόμετρο για το όχημα veh :

$$NS_{veh} = TNS_{veh} / D_{veh} \quad (4-26)$$

VQ_{veh} : Χρόνος παραμονής σε εικονική ουρά για το όχημα veh (δευτερόλεπτα):

$$VQ_{veh} = TEN_{veh} - TGEN_{veh} \quad (4-27)$$

Έτσι για κάθε βήμα προσομοίωσης υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση ανά όχημα ανά χιλιόμετρο από όλα τα οχήματα, N_{veh} , που εξέρχονται από το δίκτυο στο βήμα αυτό:

$$DT_{sys} = \frac{\sum_{veh=1}^{N_{veh}} DT_{veh}}{N_{veh}} \quad (4-28)$$

Άλλα στατιστικά μεγέθη που υπολογίζονται για το σύνολο του δικτύου ανά βήμα προσομοίωσης, διάρκειας I (σε δευτερόλεπτα), είναι ο μέσος κυκλοφοριακός φόρτος οχημάτων, ο μέσος χρόνος μετακίνησης ανά όχημα ανά χιλιόμετρο, η μέση ταχύτητα ανά όχημα, ο μέσος χρόνος στάσης ανά όχημα ανά χιλιόμετρο, ο μέσος αριθμός στάσεων ανά όχημα ανά χιλιόμετρο, ο συνολικός αριθμός οχηματοχιλιομέτρων και οχηματοωρών που διένυσαν όλα τα οχήματα στο δίκτυο, ο μέσος χρόνος παραμονής σε εικονική ουρά ανά όχημα, η μέση πυκνότητα λωρίδας του συστήματος, οι περιβαλλοντικοί ρύποι και η κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον, το Aimsun έχει τη δυνατότητα να παρέχει αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία για τις στρέφουσες κινήσεις και τα οδικά τμήματα, τις διαδρομές και τα ζεύγη προέλευσης προορισμού, καθώς και τις γραμμές μέσων μαζικής μεταφοράς.

Τέλος, στο Aimsun υπάρχει η δυνατότητα για συλλογή στοιχείων από φωρατές που έχουν τοποθετηθεί σε τμήματα του δικτύου χρησιμοποιώντας δύο τύπους μετρήσεων, την ομαδοποίηση των μετρήσεων σε μία περίοδο (interval detection) και τη συλλογή μετρήσεων σε κάθε κύκλο μετρήσεων (cycle detection). Έτσι για κάθε κύκλο μετρήσεων μπορούν να συλλεχθούν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Veh_{cycle} : Σύνολο οχημάτων που έχουν εισαχθεί στη διάρκεια του τελευταίου κύκλου
- $VehOver_{cycle}$: Σύνολο οχημάτων που έχουν διέλθει από τον φωρατή στη διάρκεια του τελευταίου κύκλου
- $NbVeh_{cycle}$: Αριθμός οχημάτων που έχουν εισέλθει στη διάρκεια του τελευταίου κύκλου
- $NbVehOver_{cycle}$: Αριθμός οχημάτων που έχουν διέλθει από τον φωρατή στη διάρκεια του τελευταίου κύκλου
- $Speed_{v,cycle}$: Ταχύτητα οχήματος v στη διάρκεια του τελευταίου κύκλου
- $EntranceTime_{v,cycle}$: Χρόνος που το όχημα v έχει εισέλθει στη διάρκεια του τελευταίου κύκλου

Έτσι κατά τη διάρκεια του τελευταίου κύκλου, αλλά και ομαδοποιημένα ανά περίοδο μετρήσεων παρέχονται στοιχεία για τον μέσο αριθμό οχημάτων, τη μέση ταχύτητα, το μέσο χρόνο κατάληψης του φωρατή, τη μέση πυκνότητα και το χρονικό διάκενο οχημάτων.

4.4 Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόβλημα της διαδικασίας λήψης αποφάσεων και γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές των θεμελιωδών θεωριών στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ) που έχουν ως σκοπό τη διαχείριση του όγκου της πληροφορίας, της πολυπλοκότητας των παραμέτρων ενός ή πολλαπλών προβλημάτων, της ευρύτητας των εναλλακτικών λύσεων και της επιλογής της καταλληλότερης λύσης. Μέσω της ανασκόπησης στους βασικούς ορισμούς, τα κύρια χαρακτηριστικά και τους τύπους των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, οριοθετείται το πλαίσιο και οι βασικές ενότητες λειτουργίας ενός συστήματος. Η αναδρομή των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας στη διεθνή βιβλιογραφία και η έλλειψη της χρήσης μεθόδων που συμπεριλαμβάνουν την ανάλυση του ρίσκου στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα του σχεδιασμού, οδήγησε στη διατύπωση του προτεινόμενου Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων ανάλυσης ρίσκου.

Η προτεινόμενη γενική αρχιτεκτονική δομή του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας στηρίζεται στην ανάλυση του ρίσκου της μετακίνησης των χρηστών σε ένα χρονικό ορίζοντα και αποτελείται από πέντε υποσυστήματα:

- της παρακολούθησης της κατάστασης του δικτύου
- της πρόβλεψης και προσομοίωσης της κυκλοφορίας

- του εντοπισμού προβλημάτων
- του σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας
- της εφαρμογής και αξιολόγησης στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας

Η χρήση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) ενσωματώνεται στα τρία υποσυστήματα του ΣΥΑ που αφορούν στον εντοπισμό προβλημάτων, στο σχεδιασμό στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας και στην εφαρμογή και αξιολόγηση των στρατηγικών. Η προτεινόμενη ανάλυση ρίσκου της απόδοσης του δικτύου παρέχει στο πλαίσιο ανάπτυξης του προτεινόμενου ΣΥΑ τη δυνατότητα για τη μείωση τόσο των συνεπειών από την εμφάνιση υψηλών επιπέδων συμφόρησης όσο και της πιθανότητας εμφάνισης αυτών των επιπέδων στους χρήστες εντός του χρονικού ορίζοντα που αναλύεται. Επιπλέον, ορίστηκε το πλαίσιο λειτουργίας του συστήματος με τη χρήση πολλαπλών πρακτόρων έτσι ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή του σε πολύπλοκα και μεγαλύτερα δίκτυα βελτιώνοντας τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.

Τέλος, παρουσιάστηκε το δυναμικό μεσοσκοπικό πρότυπο καταμερισμού της κυκλοφορίας, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα του προτεινόμενου συστήματος και συμπεριλαμβάνεται σε όλα τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής του δομής. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Aimsun που αποτελεί ένα εργαλείο που περιέχει προσομοιωτές κίνησης οχημάτων σε μικροσκοπικό και μεσοσκοπικό επίπεδο και δυναμικά μοντέλα καταμερισμού της κυκλοφορίας που χρησιμοποιούν τη δυναμική ισορροπία του χρήστη ή τη στοχαστική επιλογή διαδρομών.

Κεφάλαιο 5

Μεθοδολογία Εύρεσης Βέλτιστης Σηματοδότησης Ελαχιστοποίησης Ρίσκου

Στην παρούσα διατριβή διερευνάται το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου στο πλαίσιο ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεως για τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Ο σκοπός της μεθόδου είναι η ανάπτυξη αξιόπιστων και αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας που ελαχιστοποιούν ή περιορίζουν τους χρονικά εξαρτώμενους κινδύνους και αβεβαιότητες του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση και τον περιορισμό του ρίσκου των χρόνων μετακίνησης των χρηστών. Αναπτύσσεται, λοιπόν, το μεθοδολογικό πλαίσιο και οι αλγόριθμοι εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης που εντάσσονται στο υποσύστημα σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας. Η μεθοδολογία αρχικά ορίζεται στο επίπεδο του μεμονωμένου κόμβου, όπου αναλύεται το συνδυασμένο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστων φάσεων και χρόνων σηματοδότησης σταθερού χρόνου ως προγνωστικό εργαλείο εκτός σύνδεσης (offline) για την ελαχιστοποίηση του ρίσκου της μετακίνησης με μεσοσκοπική προσέγγιση. Παρουσιάζεται το μοντέλο ελαχιστοποίησης του ρίσκου για την περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου, καθώς και το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης όπως ορίζεται στο HCM2010 (TRB, 2010). Προτείνεται η χρήση δύο εναλλακτικών αλγορίθμων αναζήτησης λύσεων του προβλήματος, ο ευρέως διαδεδομένος γενετικός αλγόριθμος και ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης, που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη διαδικασία επίλυσης. Στη συνέχεια, διατυπώνεται το μεσοσκοπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου που εντάσσεται στο υποσύστημα σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας του προτεινόμενου ΣΥΑ και μπορεί να λειτουργήσει ως προγνωστικό εργαλείο εκτός σύνδεσης (offline), αλλά και εντός σύνδεσης (online). Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται μέσω του γενετικού αλγορίθμου πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, με τη μία αντικειμενική συνάρτηση να αφορά στη μεσοσκοπική εκτίμηση της καθυστέρησης όλων των σηματοδοτούμενων κόμβων του δικτύου και τη δεύτερη να αφορά στο συντονισμό των σηματοδοτούμενων κόμβων, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις.

5.1 Διατύπωση προβλήματος εύρεσης βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης της σηματοδότησης αρχικά ορίζεται στο επίπεδο του μεμονωμένου κόμβου, όπου αναλύεται το συνδυασμένο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστων φάσεων και χρόνων σηματοδότησης σταθερού χρόνου για ένα μεμονωμένο κόμβο, χρησιμοποιώντας μία βιβλιοθήκη εναλλακτικών συνδυασμών φάσεων.

Η εφαρμογή ενός αλγορίθμου που παρέχει ταχεία επίλυση του προβλήματος προσφέρει τη δυνατότητα για αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος και έτσι τη μείωση των περιορισμών και απλοποιήσεων που είναι απαραίτητοι στην εφαρμογή ενός απαιτητικού αλγορίθμου. Έτσι στην προτεινόμενη μεθοδολογία ενσωματώθηκε:

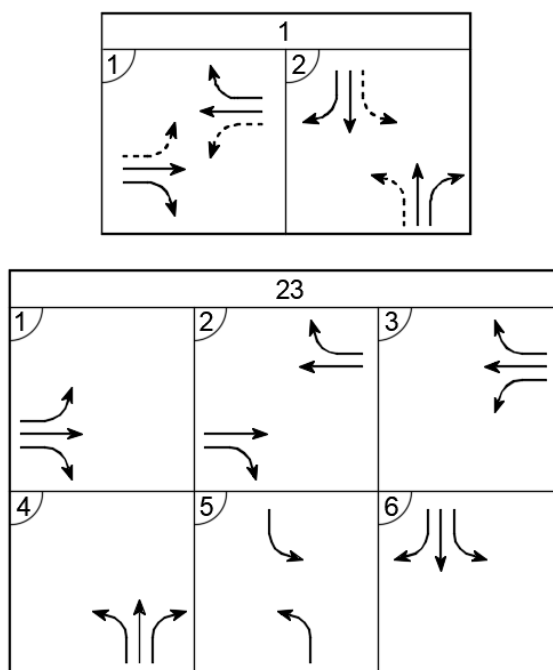
- Η χρονοβόρα διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου συνδυασμού φάσεων σηματοδότησης χρησιμοποιώντας μία βιβλιοθήκη πιθανών συνδυασμών φάσεων που δημιουργείται από ειδικούς και προσφέρει καλύτερη διαχείριση του χρόνου, σε σχέση με την εξέταση όλων των δυνατών συνδυασμών φάσεων.
- Η πολύπλοκη διαδικασία εύρεσης της καθυστέρησης με μεσοσκοπική θεώρηση χωρίς απλοποιήσεις στον ορισμό των βασικών μεγεθών που περιγράφουν το πρόβλημα σύμφωνα με τη μεθοδολογία του HCM2010.
- Η χρονική διάσταση του προβλήματος, αναλύοντας και βελτιστοποιώντας την καθυστέρηση λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση του κυκλοφοριακού φόρτου σε εκτεταμένη χρονική περίοδο αιχμής.
- Η ανάλυση και ελαχιστοποίηση του ρίσκου του χρόνου μετακίνησης των χρηστών, θεωρώντας ως μέγεθος του ρίσκου την καθυστέρηση που προκύπτει από τη λειτουργία του σηματοδοτούμενου κόμβου.

Το πρόγραμμα σηματοδότησης ενός κόμβου αποτελείται από τον σχεδιασμό των φάσεων (phasing) και των χρόνων των επιμέρους φάσεων (timing). Ο σχεδιασμός των φάσεων αφορά στον κατάλληλο συνδυασμό των κινήσεων του κόμβου σε φάσεις, ενώ οι χρόνοι του προγράμματος σηματοδότησης αφορούν στη χρονική διάρκεια της πράσινης, κίτρινης και κόκκινης ένδειξης των επιμέρους φάσεων του προγράμματος.

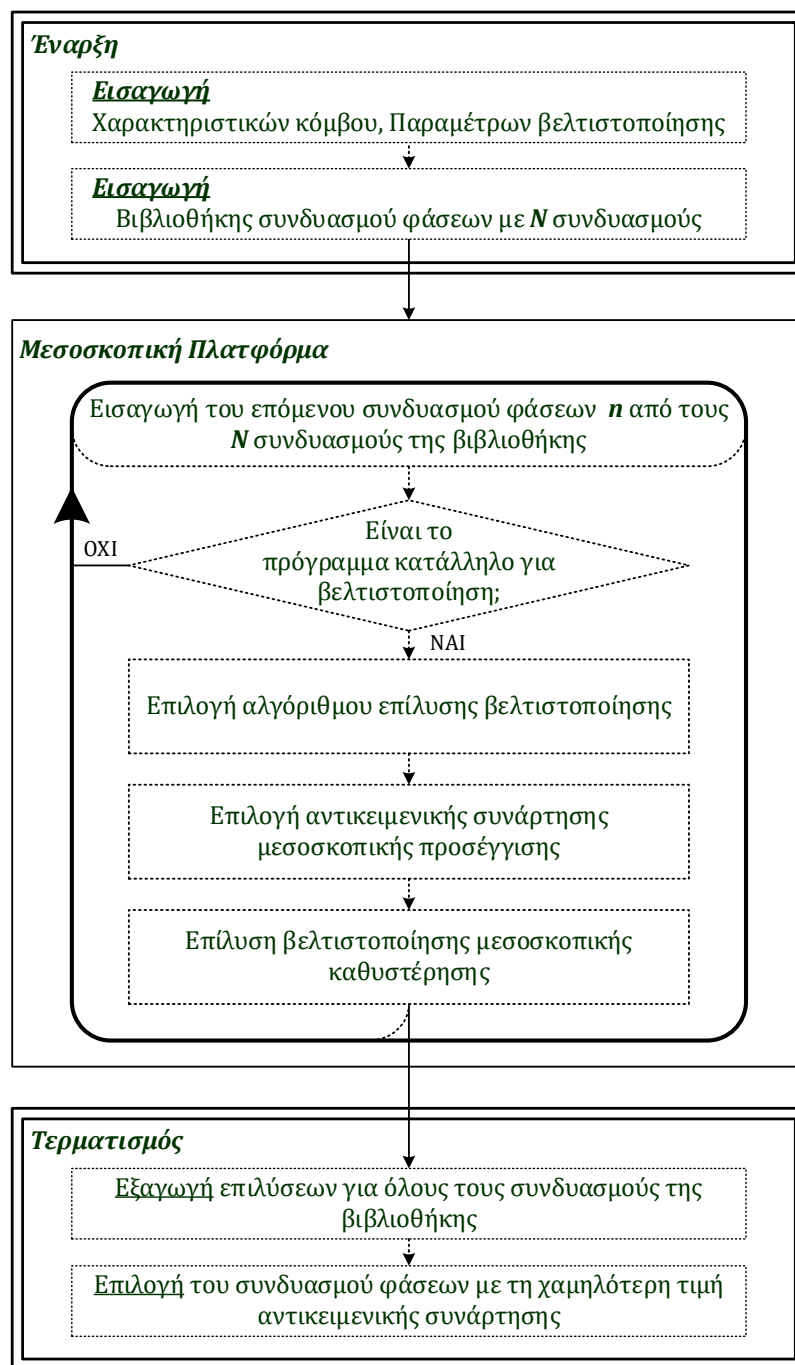
Η εύρεση βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης, εξετάζοντας τον σχεδιασμό των φάσεων και των χρόνων αυτών, πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα, στο ένα επίπεδο υπάρχουν όλες οι εναλλακτικές διαμορφώσεις του προγράμματος με τους διαφορετικούς συνδυασμούς φάσεων, ενώ στο άλλο επίπεδο πραγματοποιείται η διαδικασία βελτιστοποίησης των χρόνων του προγράμματος για κάθε εναλλακτικό συνδυασμό φάσεων. Μετά τη βελτιστοποίηση

όλων των εναλλακτικών συνδυασμών, ο συνδυασμός φάσεων με την μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης είναι η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα εύρεσης σηματοδοτικού προγράμματος.

Οι πιθανές λύσεις στο πρώτο επίπεδο προέρχονται από μία *βιβλιοθήκη συνδυασμών φάσεων* που έχει δημιουργηθεί στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και αποτελείται από 169 διαφορετικούς συνδυασμούς. Οι συνδυασμοί φάσεων της βιβλιοθήκης περιλαμβάνουν εναλλακτικές για έναν κόμβο με τέσσερις προσβάσεις και με δώδεκα επιτρεπόμενες στρέφουσες κινήσεις. Οι εναλλακτικοί συνδυασμοί αποτελούνται από δύο έως έξι φάσεις. Σε κάθε φάση συμπεριλαμβάνονται οι μη εμπλεκόμενες κινήσεις, ενώ οι αριστερές στροφές συμπεριλαμβάνονται, είτε ως προστατευόμενες κινήσεις, είτε ως επιτρεπόμενες κινήσεις. Επίσης, στους εναλλακτικούς συνδυασμούς έχουν συμπεριληφθεί και εναλλακτικές προσεγγίσεις λωρίδων κοινής χρήσης από δύο στρέφουσες κινήσεις, έτσι ώστε να καλύπτονται διαφορετικές διαμορφώσεις κόμβων και κατανομής λωρίδων κυκλοφορίας. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται ενδεικτικά εναλλακτικοί συνδυασμοί φάσεων που έχουν συμπεριληφθεί στη βιβλιοθήκη, ενώ ο αναλυτικός κατάλογος των 169 συνδυασμών που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 5-1: Ενδεικτικά παραδείγματα συνδυασμών φάσεων



Σχήμα 5-2: Αλγοριθμική διαδικασία εύρεσης βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου

Η διαδικασία εύρεσης βέλτιστου προγράμματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2 και ακολουθεί τα επόμενα βήματα:

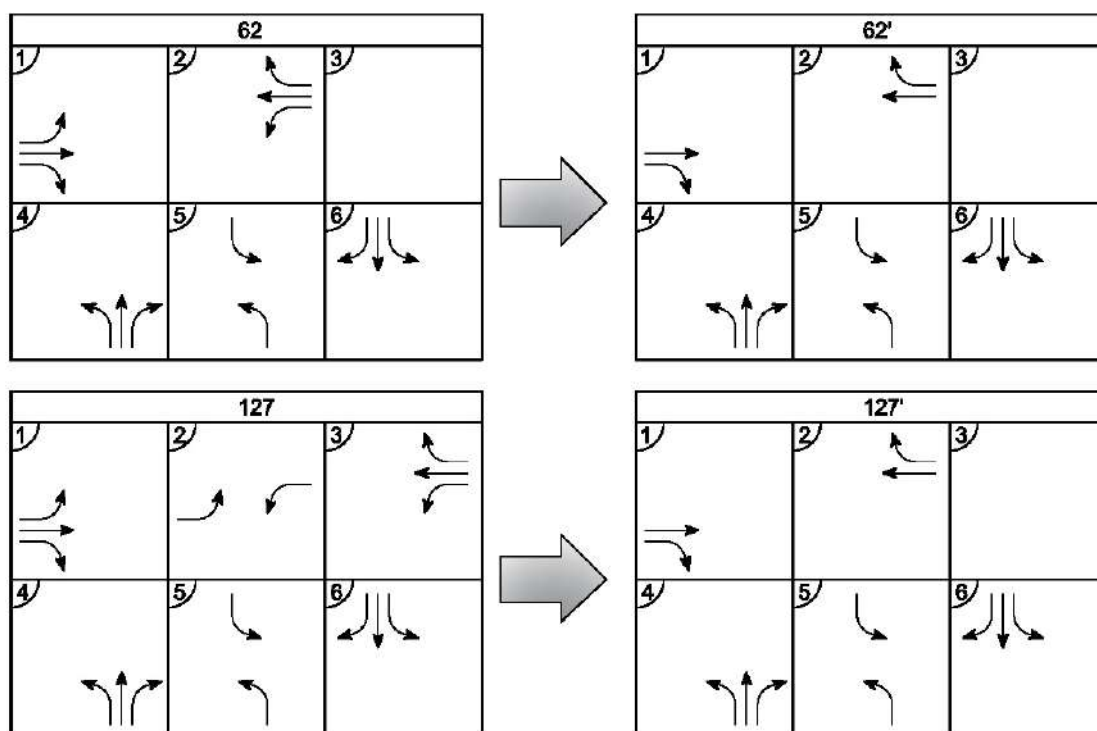
Βήμα 1: Έναρξη: Εισαγωγή χαρακτηριστικών κόμβου, Παραμέτρων βελτιστοποίησης και 'Βιβλιοθήκης συνδυασμών φάσεων'

Βήμα 2: Για κάθε πιθανό συνδυασμό φάσεων από τη 'βιβλιοθήκη' πραγματοποιούνται ορισμένοι έλεγχοι για να διαπιστωθεί αν το πρόγραμμα αυτό θα συμμετέχει στη διαδικασία βελτιστοποίησης των χρόνων.

Βήμα 3: Για κάθε συνδυασμό φάσεων που περνάει τον έλεγχο του Βήματος 2, πραγματοποιείται βελτιστοποίηση με τον αντίστοιχο αλγόριθμο επίλυσης για την εύρεση των βέλτιστων χρόνων πρασίνου της κάθε φάσης, ελαχιστοποιώντας την επιλεγμένη αντικειμενική συνάρτηση μεσοσκοπικής προσέγγισης και λαμβάνοντας υπόψη ορισμένους περιορισμούς, όπως ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου, ο ελάχιστος και ο μέγιστος χρόνος περιόδου σηματοδότησης.

Βήμα 4: Εξαγωγή των στοιχείων από την επίλυση της βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης μεσοσκοπικής προσέγγισης για όλους τους συνδυασμούς της βιβλιοθήκης. Επιλογή του συνδυασμού φάσεων που εμφανίζει την χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης.

Στο δεύτερο βήμα πραγματοποιείται μία σειρά ελέγχων έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν ο συνδυασμός αυτός θα προχωρήσει στο επόμενο βήμα όπου πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των χρόνων πρασίνου. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από τη διαμόρφωση του κόμβου, όπως τον αριθμό προσβάσεων και κινήσεων και τη διάταξη κινήσεων ανά λωρίδα κυκλοφορίας, πραγματοποιείται η οριστικοποίηση του συνδυασμού. Έτσι για παράδειγμα, αν δεν υπάρχουν αριστερές κινήσεις στις δύο κατευθύνσεις μεταξύ δύσης και ανατολής, τότε οι συνδυασμοί 62 και 127 (βλ. Σχήμα 5-3) αντιστοιχούν στο ίδιο πρόγραμμα και ο συνδυασμός 127 δεν συνεχίζει στο τρίτο βήμα.



Σχήμα 5-3: Παράδειγμα οριστικοποίησης συνδυασμού φάσεων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κόμβου

Επιπλέον, πραγματοποιείται έλεγχος της καταλληλότητας των αποκλειστικών στροφών που περιλαμβάνει τον έλεγχο της γεωμετρίας και τον έλεγχο της κυκλοφοριακής κατάστασης του κόμβου. Μέσω του ελέγχου της γεωμετρίας αποκλείονται από το 3^ο βήμα οι συνδυασμοί φάσεων που παρουσιάζουν ασυμβατότητες που προκύπτουν από τις λωρίδες κοινής χρήσης από δύο κινήσεις. Έτσι αν για παράδειγμα η αριστερή στροφή με κατεύθυνση προς βορρά δεν έχει αποκλειστική λωρίδα κυκλοφορίας, τότε ο συνδυασμός αυτός απορρίπτεται από το τρίτο βήμα. Ο έλεγχος αυτός γίνεται και στις περιπτώσεις των δεξιών στροφών. Τέλος, στον έλεγχο της κυκλοφοριακής κατάστασης πραγματοποιείται η διαδικασία ελέγχου που προτείνεται από το HCM 2010 για τον προσδιορισμό της λειτουργίας των αριστερών κινήσεων ως επιτρεπόμενων ή ως προστατευόμενων μόνο. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία απορρίπτονται οι συνδυασμοί που έχουν ως επιτρεπόμενη μία αριστερή στροφή όταν ισχύει μία από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Ο αριθμός λωρίδων της αριστερής κίνησης είναι μεγαλύτερος από ένα.
- Ο φόρτος της αριστερής κίνησης είναι μεγαλύτερος από 240 οχήματα/ ώρα.
- Το γινόμενο του φόρτου της αριστερής κίνησης και της αντίθετης κύριας κίνησης (opposing mainline) είναι μεγαλύτερο από 50.000 οχήματα/ ώρα στην περίπτωση μίας λωρίδας αντίθετης κίνησης, μεγαλύτερο από 90.000 οχήματα/ ώρα στην περίπτωση δύο λωρίδων αντίθετης κίνησης και μεγαλύτερο από 110.000 οχήματα/ ώρα στην περίπτωση τριών λωρίδων αντίθετης κίνησης.
- Ο φόρτος της αριστερής στροφής είναι μεγαλύτερος από την δυνητική χωρητικότητα των οχημάτων που μπορούν να διασχίσουν το αντίθετο ρεύμα κυκλοφορίας (sneaker capacity) ή αν ο συντελεστής ισοδυναμίας των οχημάτων που πραγματοποιούν αριστερή επιτρεπόμενη στροφή είναι μεγαλύτερος από 3,5 (equivalence factor, E_{L1}). Ο συντελεστής ισοδυναμίας, E_{L1} , υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το φόρτο της αντίθετης κύριας κίνησης.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο ελαχιστοποίησης ρίσκου που χρησιμοποιείται στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης, το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης που θεωρείται ως η απώλεια της μετακίνησης του χρήστη στην ανάλυση ρίσκου, καθώς και οι εναλλακτικοί αλγόριθμοι αναζήτησης λύσεων του προβλήματος που διερευνήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

5.1.1 Μοντέλο ελαχιστοποίησης ρίσκου καθυστερήσεων σε μεμονωμένο σηματοδοτούμενο κόμβο

Εξετάζοντας τον κόμβο ως ένα σύστημα στο οποίο παρατηρούνται απώλειες χρόνου μετακίνησης κατά την περίοδο ανάλυσης, ο στόχος της προτεινόμενης βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του ρίσκου αυτών των απωλειών για τους χρήστες του κόμβου. Έτσι, θεωρούμε ως περίοδο ανάλυσης την εκτεταμένη χρονική περίοδο αιχμής, η οποία ξεκινάει και τελειώνει με συνθήκες που δεν χαρακτηρίζονται κορεσμένες.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ανάλυση και η βελτιστοποίηση του προγράμματος σηματοδότησης βασίζεται σε ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα 15 λεπτών, το οποίο αντιπροσωπεύει το διάστημα με τον υψηλότερο φόρτο. Με αυτό τον τρόπο όμως δεν λαμβάνεται υπόψη, είτε στην ανάλυση είτε στη βελτιστοποίηση, ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται η ουρά στον κόμβο, όταν ο φόρτος αυξάνει, αλλά και η δυνατότητα που παρέχει το πρόγραμμα σηματοδότησης για γρήγορη αποκατάσταση του επιπέδου εξυπηρέτησης μετά τον υπερκορεσμό. Στην παρούσα μεθοδολογία η συνολική περίοδος ανάλυσης των κυκλοφοριακών συνθηκών και της καθυστέρησης αναλύεται σε πολλαπλά διαδοχικά χρονικά βήματα.

Η αντικειμενική συνάρτηση που ο αλγόριθμος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει είναι η ελαχιστοποίηση του $CVaR$ των καθυστερήσεων. Ως απώλειες του χρόνου θεωρούνται οι καθυστερήσεις που προκύπτουν από τη λειτουργία του σηματοδοτούμενου κόμβου και εκφράζονται ως η μέση καθυστέρηση ανά όχημα για κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα ανάλυσης, ενώ η πιθανότητα εμφάνισης αυτής της απώλειας ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού οχημάτων που βιώνουν αυτή την καθυστέρηση προς το συνολικό αριθμό οχημάτων της εκτεταμένης περιόδου ανάλυσης. Έτσι, σύμφωνα με τη επέκταση της θεώρησης των Rockafellar & Uryasev (2002) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, η γενική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\min_{g, \xi} CVaR_\alpha \xrightarrow{g=[g_1, g_2, \dots, g_{N_\varphi}]} \min_{g, \xi} \left[\xi + \frac{1}{1-\alpha} \sum_i^I p_i \cdot \max\{(d_i(g) - \xi), 0\} \right] \quad (5-1)$$

με τους περιορισμούς:

$$\left. \begin{aligned} C_{min} &\leq \sum L_\varphi + \sum g_\varphi \leq C_{max} \\ L_b &\leq g_\varphi \leq U_b \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

όπου:

g είναι το άνυσμα που καθορίζει τις συνθήκες απωλειών του προβλήματος και που στην περίπτωση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου είναι οι χρόνοι πρασίνου, g_φ , των N_φ φάσεων του προγράμματος

α είναι το επίπεδο εμπιστοσύνης

ξ είναι μία επιπλέον μεταβλητή του προβλήματος, που αντιστοιχεί στο VaR_α για το επίπεδο εμπιστοσύνης

d_i είναι η μέση καθυστέρηση των χρηστών του κόμβου κατά τη διάρκεια του βήματος προσομοίωσης i

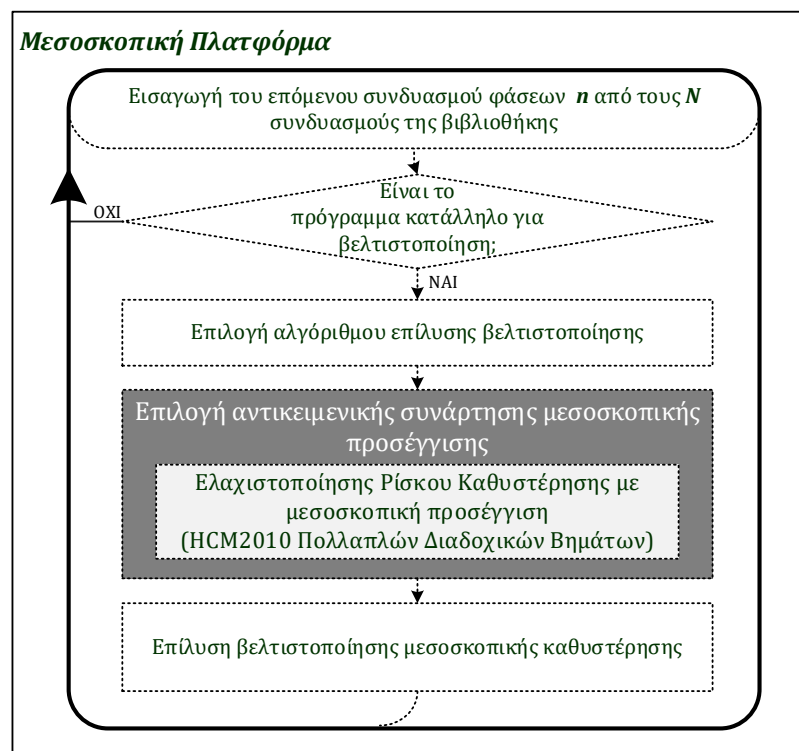
p_i είναι η πιθανότητα εμφάνισης αυτής της καθυστέρησης (δηλαδή ο λόγος του αριθμού των χρηστών αυτού του βήματος προς τον συνολικό αριθμό των χρηστών όλων των χρονικών βημάτων, I , της περιόδου ανάλυσης)

C_{max} και C_{min} είναι η μέγιστη και ελάχιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης

$\sum L_\varphi$ είναι το άθροισμα των χαμένων χρόνων (lost time) της κάθε φάσης φ

L_b είναι το κατώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου, και

U_b είναι το ανώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο μέγιστος χρόνος πρασίνου.



Σχήμα 5-4: Το μοντέλο ελαχιστοποίησης ρίσκου καθυστερήσεων μεσοσκοπικής προσέγγισης στην προτεινόμενη αλγοριθμική διαδικασία βελτιστοποίησης σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου

Το προτεινόμενο μοντέλο ελαχιστοποίησης του ρίσκου καθυστέρησης είναι ένα μοντέλο μεσοσκοπικής προσέγγισης που για την υλοποίησή του απαιτείται ο υπολογισμός της καθυστέρησης σε διαδοχικά χρονικά βήματα που να συνθέτουν συνολικά μία εκτεταμένη χρονική περίοδο ανάλυσης. Η εκτίμηση της καθυστέρησης είναι βασικό στοιχείο της μεθοδολογίας, αλλά όχι και δεσμευτικό. Στην παρούσα διατριβή για την εκτίμηση της καθυστέρησης έχει χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία που προτείνεται στο HCM2010 για τα πολλαπλά διαδοχικά χρονικά βήματα.

5.1.2 Μοντέλο εκτίμησης καθυστέρησης

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης που προτείνεται από το HCM2010 για τα πολλαπλά διαδοχικά χρονικά βήματα και διατυπώνονται οι αδυναμίες και περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση του μοντέλου.

Οι βασικές διαφορές της μεθοδολογίας από την προηγούμενη έκδοση του HCM2000 (TRB, 2000) αναφορικά με την εκτίμηση της καθυστέρησης υπό τη λειτουργία σταθερού προγράμματος, εντοπίζονται στον ορισμό των ομάδων λωρίδων και στην εκτίμηση της καθυστέρησης, η οποία πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης αυξητικής ουράς (Incremental Queue Analysis, IQA), που παρέχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια ανάλυσης των κατανομών άφιξης και αναχώρησης οχημάτων.

Οι θεμελιώδεις έννοιες της μεθοδολογίας του HCM2010 αφορούν στις ακόλουθες έννοιες:

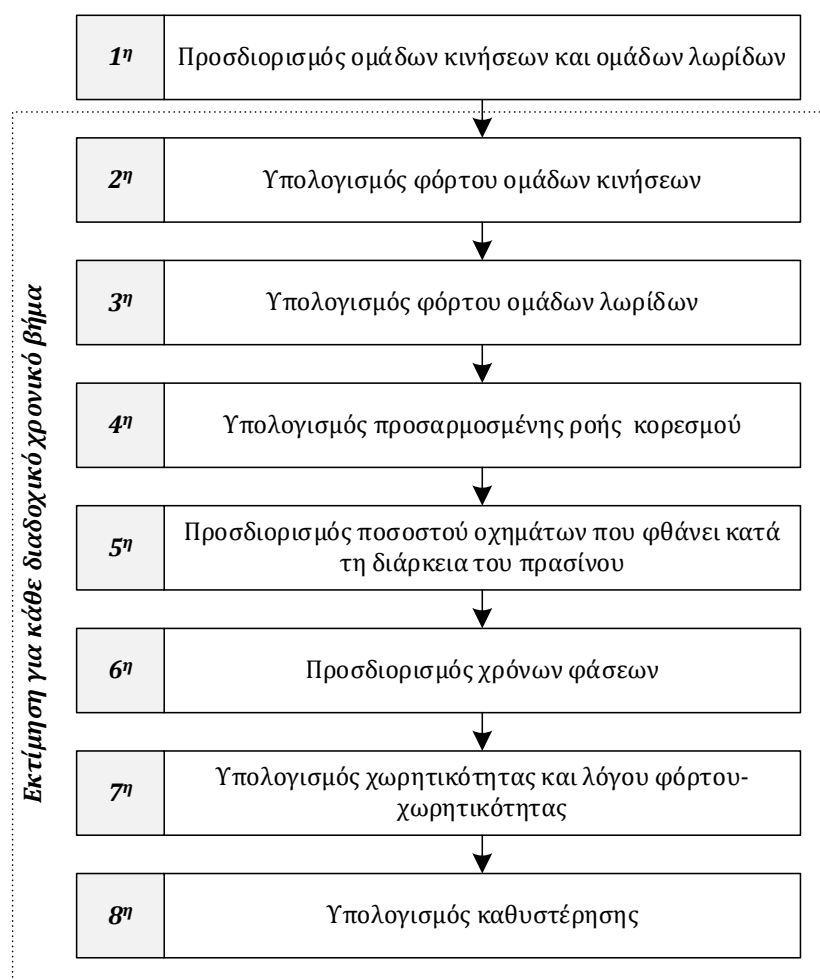
- Η έννοια της κρίσιμης ομάδας λωρίδων (critical lane group). Η μεθοδολογία του HCM2010 ακολουθεί μία μεσοσκοπική προσέγγιση όπου οι λωρίδες δεν εξετάζονται ως μεμονωμένες οντότητας, αλλά ως μία οντότητα εξετάζοντας ενιαία τη χωρητικότητα, τη ροή κορεσμού και τη ζήτησή τους θεωρώντας ότι λειτουργούν υπό τη συνθήκη ισορροπίας.
- Ο λόγος του φόρτου προς τη ροή κορεσμού για την ανάλυση της ζήτησης. Η μεθοδολογία του HCM2010 δεν τροποποιεί τη ζήτηση ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, αλλά χρησιμοποιώντας συντελεστές προσαρμογής τροποποιεί τη ροή κορεσμού και τη χωρητικότητα της ομάδας λωρίδων έτσι ώστε να αναπαριστούν αυτές τις συνθήκες. Για την ανάλυση της ζήτησης και προσφοράς της ομάδας λωρίδων χρησιμοποιείται ο λόγος φόρτου – ροής κορεσμού που αναπαριστά τις επικρατούσες συνθήκες τόσο στην έκφραση του φόρτου όσο και στην έκφραση της ροής κορεσμού.
- Η έννοια της χωρητικότητας και της ροής κορεσμού ορίζεται για κάθε ομάδα λωρίδων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη κατανομή πρασίνου ανάλογα με τη ζήτηση και την προσφορά της κάθε ομάδας. Για τον υπολογισμό της ροής κορεσμού μίας ομάδας χρησιμοποιείται η ροή κορεσμού ιδανικών συνθηκών, ο αριθμός των λωρίδων και ένα

γινόμενο έντεκα συντελεστών προσαρμογής που αναπαριστούν τις επικρατούσες συνθήκες. Ο κάθε συντελεστής προσαρμογής ακολουθεί μία διαδικασία υπολογισμού που παρατίθεται στη συνέχεια. Η χωρητικότητα μίας ομάδας λωρίδων εξαρτάται από τη ροή κορεσμού και από το λόγο του ενεργού 'πρασίνου' προς την περίοδο σηματοδότησης. Ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται στο HCM2010 για την ανάλυση της ζήτησης και των κρίσιμων ομάδων λωρίδων είναι ο βαθμός κορεσμού που είναι ο λόγος του φόρτου προς τη χωρητικότητα της ομάδας.

- Τα επίπεδα εξυπηρέτησης, που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του κόμβου ανάλογα με τη συνολική καθυστέρηση του κόμβου σε έξι επίπεδα.
- Οι έννοιες του χρόνου 'ενεργού' πρασίνου (effective green) και του χαμένου χρόνου (lost time). Ο χρόνος 'ενεργού' πρασίνου αφορά στον χρόνο που χρησιμοποιείται για την κίνηση των οχημάτων και αντιστοιχεί στο άθροισμα της πράσινης και κίτρινης ένδειξης μείον τον χαμένο χρόνο της φάσης λόγω εκκίνησης και εκκένωσης οχημάτων. Ο χαμένος χρόνος συνολικά αφορά στον χαμένο χρόνο για την εκκίνηση και εκκένωση των οχημάτων, αλλά και στο ενδιάμεσο χρόνο κοινής κόκκινης ένδειξης για όλες τις φάσεις.

Το HCM2010 μοντέλο για την εκτίμηση της καθυστέρησης συμπεριλαμβάνει δύο βασικές θεωρήσεις που αυξάνουν την πολυπλοκότητα των υπολογισμών του. Η μία περίπτωση αφορά στην ανάλυση των επιτρεπόμενων αριστερών κινήσεων, που εξετάζονται οι σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οχημάτων της επιτρεπόμενης κίνησης και της αντίθετης κίνησης. Η δεύτερη περίπτωση αφορά στην ανάλυση των πολλαπλών διαδοχικών χρονικών βημάτων η οποία θεωρείται απαραίτητη σε περιπτώσεις υπερκορεσμού που η εναπομείνουσα ουρά ενός βήματος ανάλυσης μεταφέρεται στο επόμενο βήμα καταλήγοντας έτσι σε επιπλέον καθυστέρηση στη μετακίνηση των οχημάτων.

Η βασική ροή εργασιών του HCM2010 μοντέλου για την εκτίμηση της καθυστέρησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-5 και περιγράφεται στη συνέχεια. Η εκτίμηση της καθυστέρησης επεκτείνεται στη διαδικασία των πολλαπλών διαδοχικών χρονικών βημάτων ορίζοντας διαφορετικούς φόρτους και χαρακτηριστικά μεγέθη (όπως ροή κορεσμού και χωρητικότητα) ανά βήμα και θεωρώντας ότι η ουρά που προκύπτει από κάθε βήμα είναι η αρχική ουρά του επόμενου βήματος.



Σχήμα 5-5: Η βασική ροή εργασιών του HCM2010 μοντέλου για την εκτίμηση της καθυστέρησης (TRB, 2010)

1^η Εργασία: Προσδιορισμός ομάδων κινήσεων και ομάδων λωρίδων

Η ομάδα κινήσεων και η ομάδα λωρίδων είναι παρεμφερείς έννοιες και διαφοροποιούνται μόνο στην περίπτωση που υπάρχει λωρίδα κοινής χρήσης σε μία πρόσβαση με μία ή περισσότερες λωρίδες. Για τον προσδιορισμό των ομάδων κινήσεων ακολουθούνται οι εξής δύο κανόνες:

- Μία στρέφουσα κίνηση που εξυπηρετείται από μία ή περισσότερες αποκλειστικές λωρίδες και όχι από λωρίδες κοινής χρήσης θεωρείται μία ομάδα κίνησης.
- Όσες λωρίδες δεν κατανέμονται σε μία ομάδα κίνησης βάσει του προηγούμενου κανόνα, αποτελούν μία ξεχωριστή ομάδα κίνησης.

Για τον προσδιορισμό των ομάδων λωρίδων (lg) ακολουθούνται οι εξής κανόνες:

- Μία δεξιά ή αριστερή στρέφουσα κίνηση που εξυπηρετείται από μία ή περισσότερες αποκλειστικές λωρίδες θεωρείται μία ξεχωριστή ομάδα λωρίδων.

- Κάθε λωρίδα κοινής χρήσης θεωρείται ξεχωριστή ομάδα λωρίδων.
- Οι λωρίδες που δεν είναι ούτε αποκλειστικές ούτε κοινής χρήσης διαμορφώνουν ξεχωριστή ομάδα λωρίδων.

2η Εργασία: Υπολογισμός φόρτου ομάδων κινήσεων

Ο υπολογισμός του φόρτου κυκλοφορίας πραγματοποιείται για κάθε ομάδα κινήσεων για κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα, i .

3η Εργασία: Υπολογισμός φόρτου ομάδων λωρίδων

Ο υπολογισμός του φόρτου κυκλοφορίας, $v_{i,lg}$, πραγματοποιείται για κάθε ομάδα λωρίδων, lg , για κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα, i . Στην περίπτωση που η ομάδα δεν έχει λωρίδες κοινής χρήσης ή η ομάδα έχει μόνο μία λωρίδα τότε ο φόρτος αντιστοιχεί επακριβώς στον φόρτο της ομάδας κίνησης. Στην περίπτωση όμως που υπάρχουν μία ή περισσότερες λωρίδες κοινής χρήσης και μία ή περισσότερες λωρίδες, τότε ακολουθείται μία προσέγγιση που υποθέτει ότι οι οδηγοί επιλέγουν λωρίδα κυκλοφορίας έτσι ώστε να μειώσουν το χρόνο μετακίνησης. Αν η ομάδα αποτελείται από πολλαπλές αποκλειστικές λωρίδες τότε το κριτήριο της μείωσης του χρόνου μετακίνησης αντιστοιχεί στις περισσότερες περιπτώσεις σε ισο-μοιρασμένη χρήση λωρίδων. Αν μία λωρίδα είναι κοινής χρήσης, τότε ο χρόνος μετακίνησης επηρεάζεται από το ποσοστό οχημάτων που πραγματοποιούν δεξιά ή αριστερή στροφή. Επιπλέον, αν η δεξιά ή αριστερή στροφή είναι επιτρεπόμενη και όχι προστατευόμενη τότε ο χρόνος μετακίνησης είναι ακόμα μεγαλύτερος επηρεαζόμενος από την εύρεση του κατάλληλου διάκενου για την πραγματοποίηση της στροφής. Το μοντέλο εύρεσης της αναλογίας φόρτου ανά λωρίδα στηρίζεται στον προσδιορισμό του χρόνου μετακίνησης της κάθε λωρίδας ως γινόμενο του φόρτου λωρίδας και του χρονικού διαχωρισμού (headway), στην αναπαράσταση αυτού του γινομένου ως τον λόγο της ζήτησης της λωρίδας προς τη ροή κορεσμού και στην εξίσωση των λόγων αυτών μεταξύ των εναλλακτικών λωρίδων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι επαναληπτική, εκκινώντας από μία εκτίμηση του φόρτου σε κάθε λωρίδα της ομάδας υπολογίζονται οι προσαρμοσμένοι συντελεστές ισοδυναμίας των κινήσεων που πραγματοποιούν ευθεία (modified through-car equivalents), η ροή κορεσμού της ομάδας, ο σταθμισμένος λόγος του φόρτου – ροής κορεσμού και ο νέος εκτιμώμενος φόρτος. Συγκρίνοντας σε κάθε επανάληψη την αρχική εκτίμηση του φόρτου με τον φόρτο που προκύπτει από τη διαδικασία, αν η διαφορά της εκτίμησης είναι μεγαλύτερη του 0,1 οχήματος/ώρα, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παρουσιάζεται στο 31^ο Κεφάλαιο του HCM2010 (σελίδες 31-32 έως 31-37).

4η εργασία: Υπολογισμός προσαρμοσμένης ροής κορεσμού

Η προσαρμοσμένη ροή κορεσμού της κάθε λωρίδας της ομάδας λωρίδων υπολογίζεται σε αυτή την εργασία βάσει της ροής κορεσμού ιδανικών συνθηκών και της εφαρμογής συντελεστών προσαρμογής που προσαρμόζουν την ροή κορεσμού στις επικρατούσες συνθήκες στην κάθε πρόσβαση του κόμβου. Η διαδικασία του παρουσιάζεται στη συνέχεια αφορά την απλή περίπτωση που μία ομάδα λωρίδων αποτελείται από αποκλειστικές λωρίδες που λειτουργούν ως προστατευόμενες κινήσεις και χωρίς την αλληλεπίδραση πεζών και ποδηλάτων. Στην περίπτωση πιο σύνθετων δομών ομάδων λωρίδων (όπως είναι οι λωρίδες κοινής χρήσης και η επιτρεπόμενη λειτουργία) η διαδικασία που ακολουθείται είναι πιο πολύπλοκη λαμβάνοντας υπόψη την εύρεση του αντιπροσωπευτικού χρόνου που αντιστοιχεί στον κάθε συνδυασμό επιτρεπόμενης λειτουργίας, το ποσοστό στρεφουσών κινήσεων ανά χρονικό βήμα i και τον φόρτο των αντίθετων κινήσεων ανά χρονικό βήμα i . Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παρουσιάζεται στο 31^ο Κεφάλαιο του HCM2010 (σελίδες 31-42 έως 31-59).

Η προσαρμοσμένη ροή κορεσμού ανά λωρίδα κυκλοφορίας υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης για κάθε ομάδα λωρίδων σε κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα:

$$S_{lg,i} = s_{0lg} f_{wlg} f_{HVlg,i} f_{glg,i} f_{p_{lg,i}} f_{bb_{lg,i}} f_{a_{lg}} f_{LUlg} f_{RTlg,i} f_{LTlg,i} f_{Lpb_{lg,i}} f_{Rpb_{lg,i}} \quad (5-3)$$

όπου για την ομάδα lg κατά το i χρονικό βήμα

$S_{lg,i}$: η προσαρμοσμένη ροή κορεσμού (οχήματα/ ώρα/ λωρίδα)

s_{0lg} : η ροή κορεσμού σε ιδανικές συνθήκες (ισοδύναμα οχήματα/ ώρα/ λωρίδα)

$f_{...lg}$: οι συντελεστές προσαρμογής

Ροή κορεσμού σε ιδανικές συνθήκες (s_{0lg}): Τυπικά επιλέγεται μία ροή κορεσμού που αντιστοιχεί σε ιδανικές κυκλοφοριακές και γεωμετρικές συνθήκες που θεωρείται αντιπροσωπευτική για όλο τον κόμβο (όπως 1800-2200 ισοδύναμα οχήματα/ ώρα/ λωρίδα).

Συντελεστής προσαρμογής για το πλάτος λωρίδας (f_{wlg}): Συνυπολογίζεται η αρνητική επίδραση που έχει το πλάτος της λωρίδας στη ροή κορεσμού και αντιστοιχεί σε τιμή 0,96 για λωρίδες μικρότερες των 3,05 μέτρων, 1 για λωρίδες μεταξύ 3,05 και 3,9 μέτρων και 1,04 για λωρίδες μεγαλύτερες των 3,9 μέτρων.

Συντελεστής προσαρμογής για το ποσοστό βαρέων οχημάτων ($f_{HVlg,i}$): Συνυπολογίζεται ο επιπλέον χώρος που καταλαμβάνουν τα βαρέα οχήματα καθώς και τα διαφορετικά λειτουργικά τους χαρακτηριστικά σε σχέση με τα επιβατικά οχήματα και υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$f_{HV_{lg,i}} = \frac{100}{100 + P_{HV_{lg,i}}(E_T - 1)} \quad (5-4)$$

όπου $P_{HV_{lg,i}}$ είναι το ποσοστό βαρέων οχημάτων της ομάδας λωρίδων lg στο χρονικό βήμα i και E_T είναι ο ισοδύναμος αριθμός οχημάτων για τα βαρέα οχήματα (που λαμβάνεται ως 2 συνήθως).

Συντελεστής προσαρμογής για την κλίση της πρόσβασης ($f_{g_{lg}}$): Συνυπολογίζεται η επίδραση του ποσοστού ανωφέρειας ή κατωφέρειας της πρόσβασης ($P_{g_{lg}}$) στην κίνηση των οχημάτων και υπολογίζεται για τιμές που κυμαίνονται από -6% έως 10% από την εξίσωση:

$$f_{g_{lg}} = 1 - \frac{P_{g_{lg}}}{200} \quad (5-5)$$

Συντελεστής προσαρμογής για τη στάθμευση ($f_{p_{lg,i}}$): Συνυπολογίζεται η επίδραση στην κίνηση των οχημάτων από τους ελιγμούς κατά τη διαδικασία στάθμευσης στη λωρίδα που γειτνιάζει με τη λωρίδα στάθμευσης παρά το κράσπεδο σε απόσταση 76 μέτρων από τη γραμμή στάσης (storpline) και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f_{p_{lg,i}} = \frac{N_{lg} - 0,1 - \frac{18N_{m_{lg,i}}}{3600}}{N_{lg}} \quad (5-6)$$

όπου N_{lg} είναι ο αριθμός των λωρίδων και $N_{m_{lg,i}}$ είναι ο ρυθμός των ελιγμών στάθμευσης (αριθμός ελιγμών/ ώρα) κατά το χρονικό βήμα i .

Συντελεστής προσαρμογής για τη στάση λεωφορείων ($f_{bb_{lg,i}}$): Συνυπολογίζεται η επίδραση στην κίνηση των οχημάτων από τη στάση των λεωφορείων σε απόσταση 76 μέτρων από τη γραμμή στάσης (storpline) και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f_{bb_{lg,i}} = \frac{N_{lg} - \frac{14,4N_{b_{lg,i}}}{3600}}{N_{lg}} \quad (5-7)$$

όπου N_{lg} είναι ο αριθμός των λωρίδων και $N_{b_{lg,i}}$ είναι ο ρυθμός στάσης λεωφορείων (αριθμός στάσεων/ ώρα) κατά το χρονικό βήμα i .

Συντελεστής προσαρμογής για την περιοχή ($f_{a_{lg}}$): Συνυπολογίζεται η επίδραση συνθηκών που συνήθως παρατηρούνται σε κεντρικές αστικές περιοχές, που αυξάνουν το χρονικό διάκενο μεταξύ των οχημάτων λόγω γεωμετρικών συνθηκών, αυξημένες ροές πεζών, κτλ. Αν ισχύουν τέτοιες συνθήκες τότε ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται ως 0,9.

Συντελεστής προσαρμογής χρήσης λωρίδας (f_{LUlg}): Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που υπάρχουν περισσότερες της μίας αποκλειστικής λωρίδας κυκλοφορίας. Σε περίπτωση που υπάρχει μία λωρίδα κοινής χρήσης ή αποκλειστική λωρίδα τότε ο συντελεστής για όλα τα χρονικά βήματα είναι σταθερός και ίσος με 1. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τυπικές τιμές του συντελεστή.

Πίνακας 5-1: Τιμές συντελεστή προσαρμογής χρήσης λωρίδας (HCM, 2010)

Ομάδα λωρίδων	Αριθμός λωρίδων	Συντελεστή προσαρμογής χρήσης λωρίδας
Αποκλειστική ευθεία	1	1,000
	2	0,952
	3	0,908
Αποκλειστική αριστερή	1	1,000
	2	0,971
Αποκλειστική δεξιά	1	1,000
	2	0,885

Συντελεστής προσαρμογής λόγω δεξιών/ αριστερών στροφών ($f_{RTlg,i}, f_{LTlg,i}$): Οι συντελεστές αυτοί προορίζονται πρωτίστως να αντικατοπτρίσουν την επίδραση της γεωμετρίας της διαδρομής της δεξιάς ή αριστερής στροφής στη ροή κορεσμού. Ο υπολογισμός τους στην περίπτωση της αποκλειστικής προστατευόμενης δεξιάς στροφής για όλα τα χρονικά βήματα i πραγματοποιείται από την εξίσωση:

$$f_{RTlg,i} = \frac{1}{E_R} \quad (5-8)$$

όπου E_R είναι ο ισοδύναμος αριθμός οχημάτων της δεξιάς στροφής (λαμβάνεται ως 1,18).

Ο αντίστοιχος υπολογισμός του συντελεστή στην περίπτωση της αποκλειστικής προστατευόμενης αριστερής στροφής για όλα τα χρονικά βήματα i πραγματοποιείται από την εξίσωση:

$$f_{LTlg,i} = \frac{1}{E_L} \quad (5-9)$$

όπου E_L είναι ο ισοδύναμος αριθμός οχημάτων της αριστερής στροφής (λαμβάνεται ως 1,05).

Στην περίπτωση της λωρίδας κοινής χρήσης προστατευόμενης λειτουργίας ισχύει η εξίσωση:

$$f_{L-RTlg,i} = \frac{1}{1 + P_{Llg,i}(E_L - 1) + P_{Rlg,i}(E_R - 1)} \quad (5-10)$$

όπου E_L είναι ο ισοδύναμος αριθμός οχημάτων της αριστερής στροφής (λαμβάνεται ως 1,05), $P_{Llg,i}$ είναι το ποσοστό των οχημάτων που πραγματοποιούν αριστερή στρέφουσα κίνηση στο χρονικό βήμα i και $P_{Rlg,i}$ είναι το ποσοστό των οχημάτων που πραγματοποιούν δεξιά στρέφουσα κίνηση στο χρονικό βήμα i . Έτσι, αν η λωρίδα κοινής χρήσης συμπεριλαμβάνει την αριστερή και δεξιά στροφή τότε οι δύο συντελεστές αντικαθίστανται από τον συντελεστή $f_{L-RTlg,i}$, διαφορετικά υπολογίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής $f_{LTlg,i}$ ή $f_{RTlg,i}$ βάσει της προηγούμενης εξίσωσης και θέτοντας τα αντίστοιχα ποσοστά στρεφουσών κινήσεων.

Ο προσδιορισμός των αντίστοιχων συντελεστών στην περίπτωση της επιτρεπόμενης και της επιτρεπόμενης-προστατευόμενης λειτουργίας είναι πιο πολύπλοκος, συμπεριλαμβάνοντας την εύρεση του αντιπροσωπευτικού χρόνου που αντιστοιχεί στον κάθε συνδυασμό επιτρεπόμενης λειτουργίας, το ποσοστό στρεφουσών κινήσεων ανά χρονικό βήμα i και τον φόρτο των αντίθετων κινήσεων ανά χρονικό βήμα i . Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παρουσιάζεται στο 31^ο Κεφάλαιο του HCM2010 (σελίδες 31-51 έως 31-59).

Συντελεστής προσαρμογής λόγω πεζών και ποδηλάτων ($f_{Lpb_{lg,i}}, f_{Rpb_{lg,i}}$): Οι συντελεστές αυτοί βασίζονται στην έννοια της κατάληψης της ζώνης εμπλεκόμενων κινήσεων μεταξύ των οχημάτων που πραγματοποιούν αριστερή ή δεξιά στροφή και των πεζών ή ποδηλάτων. Η σχετική κατάληψη της ζώνης εμπλεκόμενων κινήσεων λαμβάνει υπόψη επίσης αν το αντίθετο ρεύμα κυκλοφορίας εμπλέκεται με την αριστερή στρέφουσα κίνηση. Το ποσοστό του χρόνου πρασίνου που καταλαμβάνεται η ζώνη καθορίζεται συναρτήσει της σχετικής κατάληψης ανά χρονικό βήμα i και του αριθμού των λωρίδων στον οποίο κατευθύνονται τα οχήματα στρεφουσών κινήσεων. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παρουσιάζεται στο 31^ο Κεφάλαιο του HCM2010 (σελίδες 31-42 έως 31-47).

5^η εργασία: Προσδιορισμός ποσοστού οχημάτων που φθάνει κατά τη διάρκεια του πρασίνου

Για κάθε ομάδα λωρίδων προσδιορίζεται το ποσοστό των οχημάτων που φθάνουν στον κόμβο κατά τη διάρκεια της πράσινης ένδειξης βάσει του τύπου αφίξεων και του λόγου του ενεργού χρόνου πρασίνου προς την περίοδο σηματοδότησης.

6^η εργασία: Προσδιορισμός χρόνων φάσεων

Ο προσδιορισμός των χρόνων πρασίνου των φάσεων αφορά στην περίπτωση των επενεργούμενων προγραμμάτων σηματοδότησης. Στην περίπτωση του προγράμματος σταθερού χρόνου, οι χρόνοι πρασίνου, είτε εισάγονται στη ροή εργασιών ως γνωστοί παράμετροι για την ανάλυση της κατάστασης ενός κόμβου, είτε εισάγονται ως οι παράμετροι βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης από τον αλγόριθμο επίλυσης. Στην απλή περίπτωση της ανάλυσης ενός χρονικού βήματος και όχι πολλαπλών διαδοχικών βημά-

των, η εύρεση των χρόνων φάσεων μπορεί να προσεγγιστεί μέσω της ανάλυσης κρίσιμων ομάδων λωρίδων ανά φάση. Στην παρούσα διατριβή η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται στην αρχικοποίηση των παραμέτρων βελτιστοποίησης που υπεισέρχονται στους αλγορίθμους αναζήτησης λύσεων του προβλήματος. Ο κρίσιμος λόγος φόρτου - χωρητικότητας για έναν κόμβο ορίζεται ως το άθροισμα των κρίσιμων λόγων φόρτου - ροής κορεσμού και του λόγου της περιόδου σηματοδότησης προς το διαθέσιμο χρόνο για τις πράσινες ενδείξεις των φάσεων. Κατανέμεται έτσι, ο διαθέσιμος χρόνος στην κάθε φάση ανάλογα με τον κρίσιμο λόγο φόρτου - ροής κορεσμού της κάθε φάσης.

7η εργασία: Υπολογισμός χωρητικότητας και λόγου φόρτου-χωρητικότητας

Στην απλή περίπτωση που μία ομάδα λωρίδων αφορά προστατευόμενες λωρίδες αποκλειστικής χρήσης, η χωρητικότητα, $c_{lg,i}$, της ομάδας λωρίδων lg για το χρονικό βήμα i υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$c_{lg,i} = N_{lg} s_{lg,i} \frac{g_{lg}}{C} \quad (5-11)$$

όπου N_{lg} ο αριθμός των λωρίδων, $s_{lg,i}$ η ροή κορεσμού στο χρονικό βήμα i , g_{lg} ο ενεργός χρόνος πρασίνου και C η περίοδος σηματοδότησης.

Ο λόγος φόρτου-χωρητικότητας, $X_{lg,i}$, της ομάδας λωρίδων lg για το χρονικό βήμα i υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$X_{lg,i} = \frac{v_{lg,i}}{c_{lg,i}} \quad (5-12)$$

όπου $v_{lg,i}$ είναι ο φόρτος στο χρονικό βήμα i .

Για την πιο πολύπλοκη περίπτωση των λωρίδων κοινής χρήσης και των επιτρεπόμενων κινήσεων χρησιμοποιείται διαφορετική διαδικασία ανάλογα με την κάθε ειδική περίπτωση που λαμβάνει υπόψη και άλλους παράγοντες που παρουσιάζουν τη διακύμανση σε κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα, όπως:

- τον ενεργό χρόνο πρασίνου για την περίπτωση των επιτρεπόμενων αριστερών κινήσεων (g_p),
- τον χρόνο πριν από την άφιξη του πρώτου οχήματος που πραγματοποιεί αριστερή επιτρεπόμενη στροφή σε μία λωρίδα κοινής χρήσης με αποτέλεσμα να παρεμποδίζει την κίνηση των άλλων οχημάτων στη λωρίδα κοινής χρήσης (g_f),
- τον χρόνο του επιτρεπόμενου πρασίνου που δεν παρεμποδίζεται από τον φόρτο αντίθετης ροής (g_u),

- το ποσοστό των στρεφουσών κινήσεων (P_L),
- τον φόρτο αντίθετης ροής (v_o).

Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παρουσιάζεται στο 31^ο Κεφάλαιο του HCM2010 (σελίδες 31-64 έως 31-67).

8^η εργασία: Υπολογισμός καθυστέρησης

Η εκτίμηση της μέσης καθυστέρησης ανά όχημα πραγματοποιείται για κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα και συμπεριλαμβάνει όποιες καθυστερήσεις προκαλούνται από οχήματα που παραμένουν στην ουρά μετά το πέρας του κάθε βήματος. Η μέση καθυστέρηση λόγω σηματοδότησης διακρίνεται σε τρεις επιμέρους θεωρήσεις της καθυστέρησης που αθροιστικά την ορίζουν: την ομοιόμορφη καθυστέρηση (uniform delay, d_1), τη σταδιακή καθυστέρηση (incremental delay, d_2) και την καθυστέρηση λόγω αρχικής ουράς (initial queue delay, d_3).

Έτσι η καθυστέρηση κατά το χρονικό βήμα i για μία ομάδα λωρίδων lg υπολογίζεται από το άθροισμα των τριών επιμέρους καθυστερήσεων:

$$d_{lg,i} = d_{1lg,i} + d_{2lg,i} + d_{3lg,i} \quad (5-13)$$

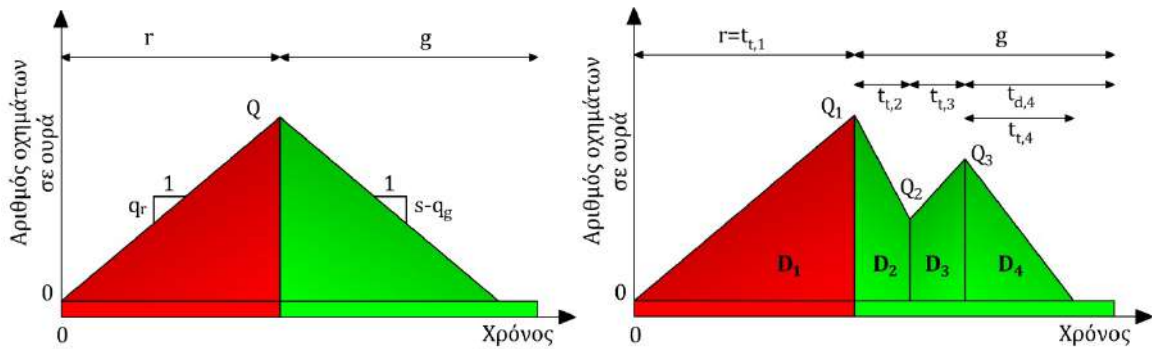
Η ομοιόμορφη καθυστέρηση αποτελεί τον βασικό όρο της καθυστέρησης. Θεωρώντας ομοιόμορφες αφίξεις και μία ροή κορεσμού κατά το χρονικό βήμα η ομοιόμορφη καθυστέρηση ισούται με:

$$d_{1lg,i} = \frac{0.5 C (1 - g_{i,lg}/C)^2}{1 - [\min(1, X_{i,lg}) g_{i,lg}/C]} \quad (5-14)$$

όπου C η περίοδος σηματοδότησης, $g_{i,lg}$ ο ενεργός χρόνος πρασίνου της ομάδας λωρίδων lg κατά το χρονικό βήμα i και $X_{i,lg}$ ο λόγος φόρτου-χωρητικότητας της ομάδας λωρίδων lg κατά το χρονικό βήμα i .

Στις περιπτώσεις των μη ομοιόμορφων αφίξεων, των διαφορετικών χρόνων πρασίνου και των διαφορετικών ροών κορεσμού (όπως ισχύει με τη λειτουργία προστατευόμενων-επιτρεπόμενων κινήσεων) χρησιμοποιείται η ανάλυση αυξητικής ουράς (Incremental Queue Analysis, IQA), η οποία προσομοιώνει τις αφίξεις και αναχωρήσεις όπως πραγματοποιούνται στο μέσο κύκλο. Η ανάλυση στηρίζεται στον υπολογισμό των μεγεθών μέσω της ανάλυσης του πολυγώνου αφίξεων, αναχωρήσεων και ουράς σε ένα σύνολο τραπεζοειδών και τριγώνων για τον υπολογισμό της καθυστέρησης που ορίζουν διαφορετικά υποδιαστήματα ανάλυσης (j). Έτσι η ομοιόμορφη καθυστέρηση υπολογίζεται σε πρώτη φάση ως βασική ομοιόμορφη καθυστέρηση στην περίπτωση που δεν υπάρχει αρχική ουρά που εξυπηρετείται κατά

το χρονικό βήμα. Μετά την ανάλυση για την εύρεση της αρχικής ουράς οριστικοποιείται ο υπολογισμός της ομοιόμορφης καθυστέρησης λαμβάνοντας υπόψη και την κορεσμένη ομοιόμορφη καθυστέρηση.



Σχήμα 5-6: Πολύγωνο για τον υπολογισμό της ομοιόμορφης καθυστέρησης σύμφωνα με το HCM2010 (TRB, 2010) για την περίπτωση αποκλειστικής λωρίδας και την περίπτωση επιτρεπόμενης στρέφουσας σε μεικτή λωρίδα

Η βασική ομοιόμορφη καθυστέρηση δίνεται από την εξίσωση:

$$d_{1b_{lg,i}} = \frac{0.5 \sum_i (Q_{lg,i}^{j-1} + Q_{lg,i}^j) t_{t_{lg,i}}^j}{q_{lg,i} C} \quad (5-15)$$

όπου για την ομάδα λωρίδων lg κατά το χρονικό βήμα i ορίζονται ως $q_{lg,i}$ ο ρυθμός αφίξεων ($q_{lg,i} = v_{lg,i}/3600$ οχήματα/ώρα), C η περίοδος σηματοδότησης, $Q_{lg,i}^j$ η ουρά στο τέλος του υποδιαστήματος ανάλυσης j που δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{lg,i}^j = Q_{lg,i}^{j-1} - (s_{lg,i}/3600 q_{lg,i}/N_{lg}) t_{d_{lg,i}}^j \geq 0 \quad (5-16)$$

με $s_{lg,i}$ η ροή κορεσμού της ομάδας λωρίδων lg κατά το χρονικό βήμα i , N_{lg} ο αριθμός λωρίδων της ομάδας lg , $t_{d_{lg,i}}^j$ η διάρκεια του υποδιαστήματος j κατά την οποία ο ρυθμός αφίξεων και η ροή κορεσμού είναι σταθερά και $t_{t_{lg,i}}^j$ ο χρόνος του τραπεζοειδούς ή του τριγώνου κατά το υποδιάστημα j που δίνεται από την εξίσωση:

$$t_{t_{lg,i}}^j = \min(t_{d_{lg,i}}^j, Q_{lg,i}^{j-1}/w_{q_{lg,i}}) \quad (5-17)$$

όπου $w_{q_{lg,i}}$ είναι ο ρυθμός αλλαγής της ουράς που ορίζεται από τη διαφορά του ρυθμού εκκένωσης της ουράς μείον το ρυθμό αφίξεων.

Εφόσον υπάρχει αρχική ουρά για μία ομάδα λωρίδων στον κόμβο, τότε ακολουθείται ο υπολογισμός αυτής της ουράς μέσω μίας διαδικασίας πολυγώνων. Ο ρυθμός αφίξεων των οχημάτων στις ομάδες λωρίδων με αρχική ουρά εξισώνεται με τη χωρητικότητα της ομάδας, ενώ οι

υπόλοιπες ομάδες έχουν ρυθμό αφίξεων ίσο με τη μικρότερη τιμή μεταξύ του φόρτου εισόδου και της χωρητικότητάς τους.

Η διάρκεια της ζήτησης που δεν εξυπηρετείται για κάθε ομάδα λωρίδων υπολογίζεται από την ακόλουθη διαδικασία:

$$\begin{aligned} \text{Αν } v_{lg,i} &\geq c_{slg,i}, \text{ τότε } t_{lg,i} = T \\ \text{Αν } v_{lg,i} &< c_{slg,i}, \text{ τότε } t_{lg,i} = Q_{b_{lg,i}} / (c_{slg,i} - v_{lg,i}) \leq T \end{aligned} \quad (5-18)$$

όπου για κάθε ομάδα λωρίδων lg σε κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα i ορίζονται ως $t_{lg,i}$ ο χρόνος της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης (ώρες), T η διάρκεια του χρονικού βήματος i , $Q_{b_{lg,i}}$ η αρχική ουρά στην αρχή του βήματος i (οχήματα), $v_{lg,i}$ ο φόρτος (οχήματα/ ώρα) και $c_{slg,i}$ η χωρητικότητα κορεσμού (οχήματα/ ώρα) που έχει υπολογιστεί κατά την κορεσμένη περίοδο λειτουργίας λόγω της αρχικής ουράς.

Έτσι η μέση διάρκεια της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης για όλες τις ομάδες λωρίδων (N_{g_i}) που το $t_{lg,i} > 0$ ισούται με:

$$t_{\alpha_i} = \frac{1}{N_{g_i}} \sum_{lg \in N_{g_i}} t_{lg,i} \quad (5-19)$$

Ο υπολογισμός της κορεσμένης ομοιόμορφης καθυστέρησης ($d_{slg,i}$) πραγματοποιείται ακολουθώντας την αντίστοιχη διαδικασία που περιγράφηκε από τις εξισώσεις (5-15)-(5-17).

Ο υπολογισμός της ομοιόμορφης καθυστέρησης $d_{1lg,i}$ της ομάδας λωρίδων lg κατά το χρονικό βήμα i στην περίπτωση που δεν παρατηρείται αρχική ουρά σε καμία ομάδα λωρίδων αντιστοιχεί στη βασική ομοιόμορφη καθυστέρηση ($d_{1b_{lg,i}}$), ενώ στην περίπτωση που παρατηρείται αρχική ουρά έστω και σε μία ομάδα ισούται με:

$$d_{1lg,i} = \begin{cases} d_{slg,i} \frac{t_{lg,i}}{T} + d_{1b_{lg,i}} \frac{T - t_{lg,i}}{T} & \text{αν } Q_{b_{lg,i}} > 0 \\ d_{slg,i} \frac{t_{\alpha_i}}{T} + d_{1b_{lg,i}} \frac{T - t_{\alpha_i}}{T} & \text{αν } Q_{b_{lg,i}} = 0 \end{cases} \quad \exists lg: Q_{b_{lg,i}} > 0 \quad (5-20)$$

Η αυξητική καθυστέρηση (incremental delay, d_2) συμπεριλαμβάνει την επιπλέον καθυστέρηση λόγω υπερκορεσμού, αλλά και εξαιτίας της τυχαιότητας των αφίξεων διορθώνοντας την ομοιόμορφη καθυστέρηση. Η εξίσωση υπολογισμού της σταδιακής καθυστέρησης στηρίζεται στην υπόθεση ότι δεν υπάρχει αρχική ουρά πριν από την περίοδο ανάλυσης.

$$d_{2lg,i} = 900 T \left[(X_{A_{lg,i}} - 1) + \sqrt{(X_{A_{lg,i}} - 1)^2 + \frac{8 k l X_{A_{lg,i}}}{c_{A_{i,lg}} T}} \right] \quad (5-21)$$

όπου $X_{A_{lg,i}}$ είναι ο μέσος λόγος φόρτου-χωρητικότητας για την ομάδα lg κατά το χρονικό βήμα i , k είναι ο συντελεστής σταδιακής καθυστέρησης (που συνήθως λαμβάνεται ως 0,5 για τις περιπτώσεις σηματοδότησης σταθερού χρόνου), l είναι ο συντελεστής προσαρμογής αφίξεων (που συνήθως λαμβάνεται ίσος με 1). Ο μέσος λόγος φόρτου-χωρητικότητας ισχύει για όλες τις περιπτώσεις ομάδων λωρίδων ακόμα και στις περιπτώσεις υπερκορεσμού και αντιστοιχεί στο λόγο του φόρτου, $v_{lg,i}$, της ομάδας lg στο χρονικό βήμα i προς τη μέση αντίστοιχη χωρητικότητα, $c_{A_{i,lg}}$.

$$X_{A_{lg,i}} = \frac{v_{lg,i}}{c_{A_{i,lg}}} \quad (5-22)$$

Η μέση χωρητικότητα αντιστοιχεί στη χωρητικότητα της ομάδας που έχει υπολογιστεί στην 7^η εργασία αν στον κόμβο δεν παρατηρείται αρχική ουρά. Αν υπάρχει αρχική ουρά έστω και για μία ομάδα λωρίδων τότε η μέση χωρητικότητα, $c_{A_{i,lg}}$, υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$c_{A_{lg,i}} = \begin{cases} c_{s_{lg,i}} \frac{t_{lg,i}}{T} + c_{lg,i} \frac{T - t_{lg,i}}{T} & Q_{b_{lg,i}} > 0 \\ c_{s_{lg,i}} \frac{t_{\alpha_i}}{T} + c_{lg,i} \frac{T - t_{\alpha_i}}{T} & Q_{b_{lg,i}} = 0 \end{cases} \quad \text{αν} \quad \begin{cases} Q_{b_{lg,i}} > 0 \\ Q_{b_{lg,i}} = 0 \end{cases} \quad \exists lg: Q_{b_{lg,i}} > 0 \quad (5-23)$$

Τέλος, η καθυστέρηση λόγω αρχικής ουράς (initial queue delay, d_3) εάν δεν υπάρχει αρχική ουρά θεωρείται ίση με μηδέν, ενώ αν παρατηρείται αρχική ουρά έστω και σε μία ομάδα λωρίδων, τότε ισούται με:

$$d_{3lg,i} = \frac{3600}{v_{lg,i} T} \left(t_{A_{lg,i}} \frac{Q_{b_{lg,i}} + Q_{e_{lg,i}} - Q_{e_{o_{lg,i}}}}{2} + \frac{Q_{e_{lg,i}}^2 + Q_{e_{o_{lg,i}}}}{2c_{A_{i,lg}}} - \frac{Q_{b_{lg,i}}^2}{2c_{A_{i,lg}}} \right) \quad (5-24)$$

όπου για κάθε ομάδα λωρίδων lg και κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα i ορίζονται ως $v_{lg,i}$ ο φόρτος, T η διάρκεια του βήματος i , $t_{A_{lg,i}}$ η προσαρμοσμένη διάρκεια της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης, $Q_{b_{lg,i}}$ η αρχική ουρά, $Q_{e_{lg,i}}$ η ουρά στο τέλος του βήματος i , $Q_{e_{o_{lg,i}}}$ η ουρά στο τέλος του βήματος i όταν $v_{lg,i} \geq c_{A_{lg,i}}$ και $Q_{b_{lg,i}} = 0$.

Η ουρά στο τέλος του βήματος i ισούται με:

$$Q_{e_{lg,i}} = Q_{b_{lg,i}} + t_{A_{lg,i}} (v_{lg,i} - c_{A_{lg,i}}) \quad (5-25)$$

Η ουρά στο τέλος του βήματος i ισούται με:

$$Q_{eol_{lg},i} = \begin{cases} T(v_{lg,i} - c_{Alg,i}) & \text{αν } v_{lg,i} \geq c_{Alg,i} \\ 0 & \text{αν } v_{lg,i} < c_{Alg,i} \end{cases} \quad (5-26)$$

Η προσαρμοσμένη διάρκεια της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης του βήματος i ισούται με:

$$t_{Alg,i} = \begin{cases} T & \text{αν } v_{lg,i} \geq c_{Alg,i} \\ Q_{b_{lg},i}/(c_{Alg,i} - v_{lg,i}) \leq T & \text{αν } v_{lg,i} < c_{Alg,i} \end{cases} \quad (5-27)$$

Έτσι η μέση καθυστέρηση, $d_{i,lg}$, της ομάδας λωρίδων lg κατά το διαδοχικό χρονικό βήμα i στην περίπτωση των ομοιόμορφων αφίξεων, των ίδιων χρόνων πρασίνου και των ίδιων ροών κορεσμού ανά βήμα συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5-14), (5-21) και (5-24) ισούται με:

$$\begin{aligned} d_{lg,i} = & \frac{0.5 C (1 - g_{lg,i}/C)^2}{1 - [\min(1, X_{lg,i}) g_{lg,i}/C]} + \\ & + 900 T \left[(X_{Alg,i} - 1) + \sqrt{(X_{Alg,i} - 1)^2 + \frac{8 k l X_{Alg,i}}{c_{Alg,i} T}} \right] + \\ & + \frac{3600}{v_{lg,i} T} \left(t_{Alg,i} \frac{Q_{b_{lg},i} + Q_{e_{lg},i} - Q_{eol_{lg},i}}{2} + \frac{Q_{e_{lg},i}^2 + Q_{eol_{lg},i}^2}{2c_{Alg,i}} - \frac{Q_{b_{lg},i}^2}{2c_{Alg,i}} \right) \end{aligned} \quad (5-28)$$

ενώ στην περίπτωση των μη ομοιόμορφων αφίξεων, των διαφορετικών χρόνων πρασίνου και των διαφορετικών ροών κορεσμού ανά διαδοχικό χρονικό βήμα i , η μέση καθυστέρηση, $d_{i,lg}$, της ομάδας λωρίδων lg , όταν δεν παρατηρείται αρχική ουρά σε καμία ομάδα λωρίδων, συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5-15), (5-21) και (5-24), ισούται με:

$$\begin{aligned} d_{lg,i} = & \frac{0.5 \sum_i (Q_{lg,i}^{j-1} + Q_{lg,i}^j) t_{lg,i}^j}{q_{lg,i} C} + \\ & + 900 T \left[(X_{Alg,i} - 1) + \sqrt{(X_{Alg,i} - 1)^2 + \frac{8 k l X_{Alg,i}}{c_{Alg,i} T}} \right] + \\ & + \frac{3600}{v_{lg,i} T} \left(t_{Alg,i} \frac{Q_{b_{lg},i} + Q_{e_{lg},i} - Q_{eol_{lg},i}}{2} + \frac{Q_{e_{lg},i}^2 + Q_{eol_{lg},i}^2}{2c_{Alg,i}} - \frac{Q_{b_{lg},i}^2}{2c_{Alg,i}} \right) \end{aligned} \quad (5-29)$$

και όταν παρατηρείται αρχική ουρά έστω και σε μία ομάδα λωρίδων, η μέση καθυστέρηση, $d_{i,lg}$, της ομάδας λωρίδων lg στο χρονικό βήμα i , προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων (5-15), (5-20), (5-21) και (5-24), και ισούται με:

$$\begin{aligned}
 d_{lg,i} = & d_{s_{lg,i}} \frac{t_{lg,i} \lambda_{lg,i}^1 + t_{\alpha_i} (1 - \lambda_{lg,i}^1)}{T} + d_{b_{lg,i}} \frac{T - t_{lg,i} \lambda_{lg,i}^1 - t_{\alpha_i} (1 - \lambda_{lg,i}^1)}{T} + \\
 & + 900 T \left[(X_{A_{lg,i}} - 1) + \sqrt{(X_{A_{lg,i}} - 1)^2 + \frac{8 k l X_{A_{lg,i}}}{c_{A_{lg,i}} T}} \right] + \\
 & + \frac{3600}{v_{lg,i} T} \left(t_{A_{lg,i}} \frac{Q_{b_{lg,i}} + Q_{e_{lg,i}} - Q_{eo_{lg,i}}}{2} + \frac{Q_{e_{lg,i}}^2 + Q_{eo_{lg,i}}^2}{2 c_{A_{lg,i}}} - \frac{Q_{b_{lg,i}}^2}{2 c_{A_{lg,i}}} \right)
 \end{aligned} \tag{5-30}$$

όπου $\lambda_{lg,i}^1=1$ όταν $Q_{b_{lg,i}} > 0$ και $\lambda_{lg,i}^1=0$ όταν $Q_{b_{lg,i}}=0$

Η συνολική καθυστέρηση του κόμβου στο χρονικό βήμα i δίνεται από την εξίσωση:

$$d_i = \sum_{lg} v_{lg,i} d_{lg,i} \tag{5-31}$$

Η συνολική καθυστέρηση του κόμβου σε όλη την περίοδο ανάλυσης δίνεται από την εξίσωση:

$$d = \sum_i \sum_{lg} v_{lg,i} d_{lg,i} \tag{5-32}$$

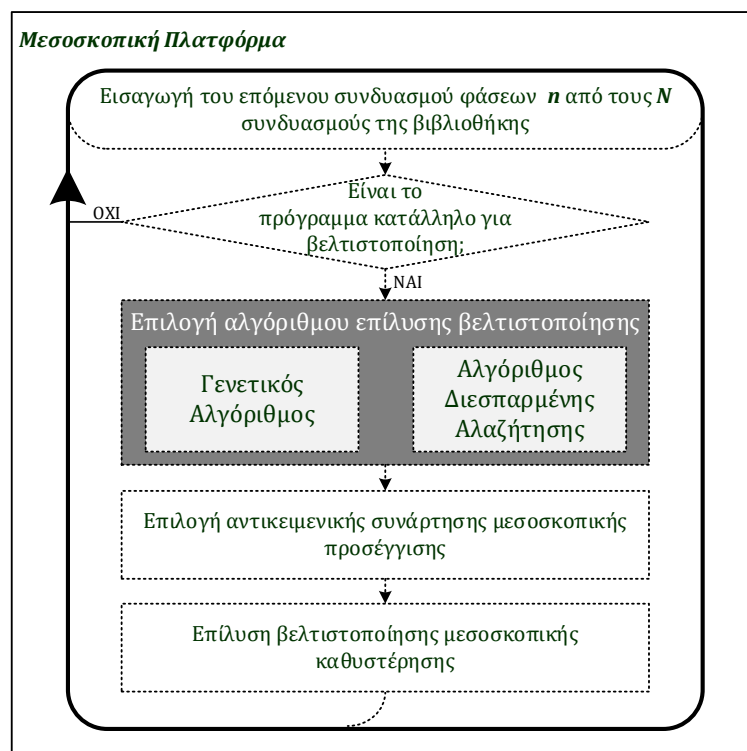
Η μεθοδολογία του HCM 2010 που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης των περισσότερων προσβάσεων που διέρχονται από έναν κόμβο. Παρόλα αυτά η μεθοδολογία παρουσιάζει περιορισμούς σε ορισμένες κυκλοφοριακές συνθήκες ή γεωμετρικές διαμορφώσεις κόμβων. Η μεθοδολογία δεν λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις των ακόλουθων περιπτώσεων για τη σηματοδότηση σταθερού χρόνου:

- α) Υπερκορεσμός των λωρίδων στρεφουσών κινήσεων, με αποτέλεσμα τη διάχυση ουρών σε άλλες λωρίδες κυκλοφορίας.
- β) Εξυπηρέτηση στρεφουσών κινήσεων από περισσότερες από δύο αποκλειστικές λωρίδες.
- γ) Δεξιά στρέφουσα κίνηση που δεν σηματοδοτείται.
- δ) Επιπλέον λωρίδες κυκλοφορίας ευθείας κίνησης που προστίθενται στα όρια του κόμβου.
- ε) Δυνατότητα προσπέρασης των σταματημένων οχημάτων που αναμένουν σε ουρά για πραγματοποίηση στρέφουσας κίνησης από τα οχήματα που κινούνται ευθεία σε περιπτώσεις λωρίδων κυκλοφορίας μεικτής χρήσης από στρέφουσες και ευθείες κινήσεις.
- στ) Περιορισμός της κυκλοφοριακής ροής λόγω ύπαρξης κοντινού ανάντη κόμβου.
- ζ) Επέκταση της ουράς από ή προς γειτονικό κόμβο.

Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης οι παραπάνω περιορισμοί δεν θεωρείται ότι επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των μεμονωμένων κόμβων που εξετάζονται στην παρούσα ενότητα και επομένως θεωρείται ότι η ενσωμάτωση της μεθόδου HCM2010 δεν επηρεάζει μεθοδολογικά την προτεινόμενη προσέγγιση. Στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου που παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα (5.2), οι δύο τελευταίοι περιορισμοί που αφορούν την αλληλοσυσχετίση των κόμβων επηρεάζουν τον σχεδιασμό της σηματοδότησης, χρησιμοποιώντας όμως την προτεινόμενη διατύπωση θεωρούμε ότι η επιρροή τους δεν είναι σημαντική ώστε να αποτελέσει αποτρεπτικό παράγοντα στη χρήση του μοντέλου. Σε κάθε περίπτωση όμως, το μοντέλο εκτίμησης της καθυστέρησης στην παρούσα διατριβή αποτελεί μία παράμετρο και μπορεί να αντικατασταθεί με οποιοδήποτε άλλο μοντέλο κρίνεται καταλληλότερο αναλόγως των συνθηκών, μέσω μίας ανάλυσης ευαισθησίας των εναλλακτικών μοντέλων που υπολογίζουν την καθυστέρηση. Η ενσωμάτωση μίας διαφορετικής μεθοδολογίας εκτίμησης της καθυστέρησης, ενδεχομένως να είχε διαφορετικά αποτελέσματα από την εφαρμογή και σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

5.1.3 Εναλλακτικοί αλγόριθμοι αναζήτησης λύσεων του προβλήματος

Στην διατριβή διερευνώνται δύο εναλλακτικοί αλγόριθμοι αναζήτησης λύσεων του προβλήματος της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου.



Σχήμα 5-7: Οι εναλλακτικοί αλγόριθμοι επίλυσης στην προτεινόμενη αλγοριθμική διαδικασία βελτιστοποίησης προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου

Οι αλγόριθμοι που εξετάζονται είναι ο Γενετικός Αλγόριθμος, μία μέθοδος υπολογιστικής νοημοσύνης που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην επίλυση προβλημάτων σηματοδότησης και

ο Αλγόριθμος Διεσπαρμένης Αναζήτησης, μία μέθοδος μετα-ευρετικής τεχνικής, με περιορισμένες εφαρμογές στο εν λόγω πρόβλημα (βλ. Κεφάλαιο 2.3).

Γενετικός Αλγόριθμος

Ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithms, GA) αποτελεί μια μέθοδο βελτιστοποίησης υπολογιστικής νοημοσύνης και έχει χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα που αποτελούνται από πολλές και σύνθετες παραμέτρους που δεν μπορούν να επιλυθούν απαραίτητα με αναλυτικό τρόπο. Ο γενετικός αλγόριθμος είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία και υλοποιείται με τεχνικές γενετικής μετάλλαξης (mutation), φυσικής επιλογής (selection) και διασταύρωσης (crossover).

Μορφές του Γενετικού Αλγορίθμου δημοσιεύτηκαν και χρησιμοποιήθηκαν από τα μέσα του 20ου αιώνα, αλλά η χρήση του έγινε πιο εκτεταμένη μετά το 1970 (Fraser & Burnell, 1970, Crosby, 1973). Ο γενετικός αλγόριθμος είναι μία μέθοδος για την επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων με ή χωρίς περιορισμούς (γραμμικούς ή μη). Ο αλγόριθμος μιμείται τη διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης, καθώς σε κάθε επανάληψη τροποποιεί τον πληθυσμό των μεμονωμένων λύσεων. Ο αλγόριθμος σε κάθε επανάληψη επιλέγει τυχαίες μεμονωμένες λύσεις από τον υφιστάμενο πληθυσμό των λύσεων και χρησιμοποιεί αυτές τις λύσεις ως 'γονείς' για την εξέλιξη των 'απογόνων' που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή της επόμενης 'γενιάς'. Η επαναληπτική διαδικασία έχει ως σκοπό την εξέλιξη του πληθυσμού προς μία βέλτιστη λύση. Η γενική μορφή του γενετικού αλγορίθμου είναι (Mitchell, 1999):

Βήμα 1: Εισαγωγή των μεταβλητών, εξισώσεων και περιορισμών. Αρχικοποίηση με τυχαία δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού P , με N υποψήφιας λύσεις.

Βήμα 2: Αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης χρησιμοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση και μετατρέποντάς την αξιολόγηση σε σταθμισμένη αξιολόγηση (πόσο κοντά στην αποδεκτή λύση είναι;).

Βήμα 3: Επιλογή γονέων βάσει της αξιολόγησής τους.

Βήμα 4: Επιλογή μελών στον υφιστάμενο πληθυσμό που έχουν καλύτερη αξιολόγηση ως καλύτερες λύσεις (elite) που συμπεριλαμβάνονται τον νέο πληθυσμό.

Βήμα 5: Δημιουργία απογόνων από τους γονείς χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της μετάλλαξης (mutation) των δύο απογόνων μέσω της πιθανότητα μετάλλαξης (p_m) και τη διαδικασία της διασταύρωσης (crossover) σε ένα τυχαίο σημείο για να δημιουργηθούν δύο απόγονοι μέσω της πιθανότητας διασταύρωσης (p_c).

Βήμα 6: Αντικατάσταση του υφιστάμενου πληθυσμού με τον νέο πληθυσμό.

Βήμα 7: Επιστροφή στο βήμα 2 ή τερματισμός αν ισχύει κάποια συνθήκη τερματισμού, που συνήθως είναι η σύγκλιση των λύσεων σε ένα αποδεκτό όριο ή η υπέρβαση του επιτρεπόμενου ορίου επαναλήψεων.

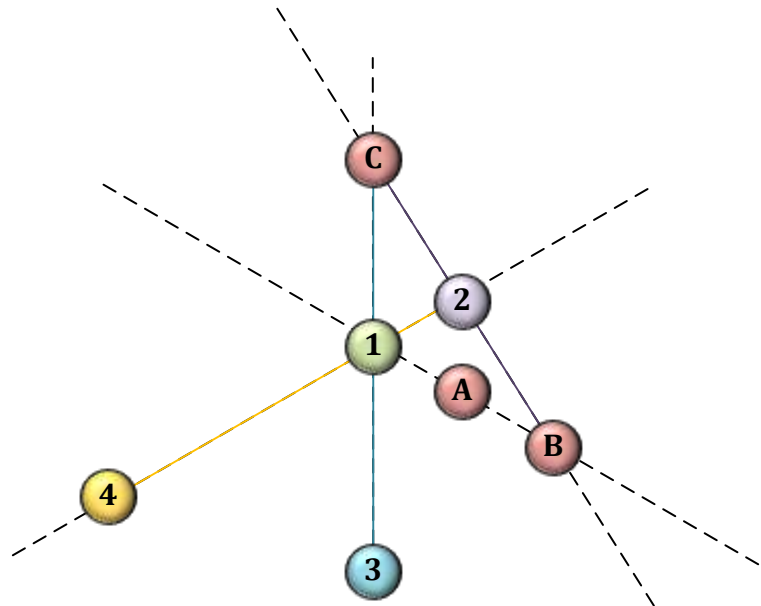
Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται σε πολλά επιστημονικά πεδία και κυρίως σε προβλήματα που παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο πολυπλοκότητας, συμπεριλαμβανομένων των προβλημάτων που έχουν συναρτήσεις που δεν είναι γραμμικές, συνεχείς ή που είναι στοχαστικές, κ.α. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του γενικού αλγορίθμου είναι η εύρεση πολλών λύσεων σε κάθε επανάληψη, οι οποίες αφενός παρέχουν τη δυνατότητα για μία ποιοτικότερη λύση, αλλά αφετέρου απαιτούν σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και χρόνο για την σύγκλισή τους.

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ο γενετικός αλγόριθμος όπως έχει υλοποιηθεί στο MATLAB R2014a. Το πρόβλημα που υλοποιήθηκε περιγράφεται από τις εξισώσεις (5-1)-(5-2) με έναν επιπλέον περιορισμό, έτσι ώστε όλες οι δυνατές λύσεις να είναι μόνο ακέραιοι αριθμοί.

Αλγόριθμος Διεσπαρμένης Αναζήτησης

Ο Αλγόριθμος Διεσπαρμένης Αναζήτησης (Scatter Search Algorithm, ScS) είναι μία μέθοδος μετα-ευρετικής τεχνικής, μπορεί όμως να θεωρηθεί και ως εξελικτικός αλγόριθμος, αφού οι νέες λύσεις κάθε επανάληψης προκύπτουν από τον συνδυασμό των υπαρχόντων λύσεων. Σύμφωνα με την αρχική διατύπωση του αλγορίθμου από τον Glover (1998), ο αλγόριθμος ScS είναι μια επαναληπτική διαδικασία δημιουργίας λύσεων αναζητώντας και αναλύοντας με ευφυή τρόπο τον χώρο του προβλήματος. Ο αλγόριθμος διαφέρει από τον γενετικό αλγόριθμο (αλλά και από άλλους εξελικτικούς αλγορίθμους) κυρίως στην διαδικασία παραγωγής νέων λύσεων, επειδή δίνει περισσότερο έμφαση στον ντετερμινιστικό συνδυασμό των προηγούμενων λύσεων, σε αντίθεση με άλλες στοχαστικές προσεγγίσεις. Σε κάθε επανάληψη, ο αλγόριθμος στηρίζεται σε ένα σύνολο σημείων προηγούμενων επαναλήψεων που αναπαράγουν 'καλές' λύσεις. Αυτά τα σημεία ορίζουν το σύνολο αναφοράς (reference set), το οποίο χρησιμοποιείται για την εύρεση του επόμενου συνόλου και τελικώς την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Ο μηχανισμός δημιουργίας νέων λύσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 5-8. Έστω ότι το αρχικό σύνολο αναφοράς περιλαμβάνει τα σημεία A, B και C. Μετά το συνδυασμό των λύσεων A και B δημιουργείται ένας αριθμός λύσεων στο γραμμικό τμήμα που ορίζεται από τα σημεία A και B, αλλά σε αυτή τη φάση μόνο η λύση 1 συμπεριλαμβάνεται στο σύνολο αναφοράς. Με παρόμοιο τρόπο συνδυάζοντας γραμμικά τα σημεία του αρχικού και νέου συνόλου αναφοράς δημιουργούνται οι λύσεις 2, 3 και 4. Το νέο σύνολο αναφοράς λοιπόν περιέχει αυτά τα επτά σημεία και πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 5-8 παρουσιάζεται μία πρόδρομη μορφή του νέου συνόλου αναφοράς, αφού ο αλγόριθμος δεν λαμβάνει αυτές τις τιμές ως λύ-

σεις, αλλά τις υποβάλλει σε μία ευρετική βελτιστοποίηση για την εισαγωγή τους στο σύνολο αναφοράς. Σε αντίθεση με τον πληθυσμό του γενετικού αλγορίθμου, το σύνολο αναφοράς είναι σχετικά μικρό. Στον γενετικό αλγόριθμο, όπως αναφέρεται και προηγουμένως, δύο λύσεις επιλέγονται τυχαία από τον πληθυσμό και μέσω του μηχανισμού 'διασταύρωσης' δημιουργείται ένας 'απόγονος'. Αντιθέτως, ο ScS επιλέγει δύο ή περισσότερα σημεία από το σύνολο αναφοράς με ένα συστηματικό τρόπο, έτσι ώστε να προκύψουν νέες λύσεις.



Σχήμα 5-8: Μηχανισμός εύρεσης νέου συνόλου αναφοράς στον αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης (Glover et al., 2000)

Έστω ένα σύνολο αναφοράς που περιέχει b λύσεις, η διαδικασία που ακολουθείται εξετάζει περίπου $(3b - 7)b/2$ συνδυασμού τεσσάρων διαφορετικών τύπων. Ο βασικός τύπος αποτελείται από το συνδυασμό των δύο λύσεων, ο επόμενος τύπος συνδυάζει τρεις λύσεις και ούτω καθεξής. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο γενετικός αλγόριθμος χρειάζεται μεγάλο πληθυσμό για να διατηρήσει ένα επιθυμητό επίπεδο ποικιλομορφίας (που παράγεται από την τυχαία δειγματοληψία του μηχανισμού αναζήτησης), ενώ ο ScS εισάγει συστηματικά τη διαφορετικότητα στο σύνολο αναφοράς.

Ο περιορισμός του εύρους αναζήτησης σε μία επιλεγμένη ομάδα τύπων συνδυασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας μηχανισμός για τον έλεγχο του αριθμού των πιθανών συνδυασμών σε ένα δεδομένο σύνολο αναφοράς. Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να υποδιαιρεθεί το σύνολο αναφοράς σε 'βαθμίδες' και να απαιτηθεί οι συνδυασμένες λύσεις να συμπεριλαμβάνουν τουλάχιστον ένα (ή ένα συγκεκριμένο αριθμό) στοιχείο από τις επιλεγμένες βαθμίδες.

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του ScS αφορά στη δομημένη διαδικασία συνδυασμού των λύσεων που στοχεύει στη δημιουργία ενός σταθμισμένου κέντρου των επιλεγμένων υ-

ποπεριοχών του προβλήματος, προσφέροντας έτσι μη-κυρτούς συνδυασμούς που προβάλλουν νέα κέντρα σε περιοχές εξωτερικά του αρχικού συνόλου αναφοράς (όπως στην περίπτωση του σημείου 3 στο Σχήμα 5-8). Η διασπορά που δημιουργείται με αυτό τον τρόπο και οι εξωτερικές προβολές των λύσεων έχουν αποδειχθεί χρήσιμα χαρακτηριστικά σε πολλές εφαρμογές. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου αφορά στις στρατηγικές επιλογής συγκεκριμένων υποσυνόλων λύσεων για το συνδυασμό. Αυτές οι στρατηγικές χρησιμοποιούν μία συσταδοποίηση, έτσι ώστε να δημιουργούνται νέες λύσεις εντός και εκτός των συστάδων. Τέλος, η μέθοδος χρησιμοποιεί βοηθητικούς μηχανισμούς βελτίωσης που είναι σε θέση να επεμβαίνουν σε μη εφικτές λύσεις, αφαιρώντας τον περιορισμό της εφικτότητας της λύσης προκειμένου να συμπεριληφθούν στο σύνολο αναφοράς.

Ο υλοποιημένος αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης στο MATLAB R2014a ακολουθεί τα βήματα (Ugray et al., 2007):

- Βήμα 1: Εισαγωγή των μεταβλητών, εξισώσεων και περιορισμών και δημιουργία ενός αρχικού συνόλου ($R0$) τριών σημείων, βάσει των δεδομένων ορίων του προβλήματος, ή τεσσάρων αν έχει δοθεί και αρχικό σημείο.
- Βήμα 2: Δημιουργία ενός διαφοροποιούμενου συνόλου αναφοράς R (diverse reference set), αυξάνοντας το $R0$ με επιπλέον σημεία με χρήση μεθόδου παραγωγής διαφοροποιήσεων (diversification generation method), έτσι ώστε το μέγεθός του να είναι b .
- Βήμα 3: Αξιολόγηση κάθε υποψήφιου σημείου του R χρησιμοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση και τις συναρτήσεις των περιορισμών και εκτίμηση της συνάρτησης ποινής P_{00} (penalty function), η οποία χρησιμοποιείται ως μέτρο ακρίβειας της λύσης του κάθε σημείου.

Όσο δεν ισχύει κάποια συνθήκη τερματισμού:

Όσο διακριτά ζευγάρια του R δεν έχουν επεξεργαστεί:

Βήμα 4: Επιλογή ενός νέου ζευγαριού σημείων του R .

Βήμα 5: Δημιουργία ενός μικρού συνόλου δοκιμαστικών σημείων από το ζευγάρι του βήματος 4 και χρησιμοποιώντας μία μέθοδο συνδυασμού λύσεων.

Βήμα 6: Αξιολόγηση της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών και εκτίμηση της εξίσωσης ποινής για κάθε δοκιμαστικό σημείο.

Βήμα 7: Επικαιροποίηση του συνόλου αναφοράς.

Βήμα 8: Αν το σύνολο αναφοράς έχει τροποποιηθεί, επαναλαμβάνονται τα βήματα 4-7. Διαφορετικά, γίνεται επανεκκίνηση της διαδικασίας επιστρέφοντας στο βήμα 2 και επιλέγοντας ως $R0$ το υποσύνολο (συνήθως το καλύτερο μισό) των καλύτερων σημείων στο σύνολο αναφοράς.

Ο Αλγόριθμος Διεσπαρμένης Αναζήτησης μπορεί να αντιμετωπίσει πολύπλοκα προβλήματα παρέχοντας ποιοτικές λύσεις σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, αφού αναζητά λύσεις με έναν πιο συστηματικό ντετερμινιστικό τρόπο και δέχεται ως σημεία του συνόλου αναφοράς σημεία που έχουν αυξημένη πιθανότητα να παρουσιάσουν καλές λύσεις. Ένα πιθανό πρόβλημα που μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση του αλγορίθμου αυτού σε μη συνεχή προβλήματα είναι η εύρεση τοπικών και όχι ολικών βέλτιστων λύσεων, αφού δεν εμπεριέχει στοχαστικότητα στη διαδικασία αναζήτησης του χώρου του προβλήματος.

Το πρόβλημα που υλοποιήθηκε με τον αλγόριθμο GlobalSearch του MATLAB R2014a περιγράφεται από τις εξισώσεις (5-1)-(5-2).

5.2 Διατύπωση μεσοσκοπικού προβλήματος βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου

Η λειτουργία ενός συγκοινωνιακού συστήματος μελετάται και σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη που εκφράζουν τη λειτουργία και την απόδοση του δικτύου υπό μέσες ή ακραίες συνθήκες. Η καθημερινή λειτουργία, όμως, διαφοροποιείται λόγω στοχαστικών μεταβολών της κυκλοφορίας, αλλά και συμβάντων που πραγματοποιούνται είτε τυχαία είτε προγραμματισμένα δημιουργώντας αβεβαιότητες και αστοχίες στην λειτουργία του συστήματος. Αυτές οι μεταβλητές συνθήκες έχουν σαν αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της απόδοσης του δικτύου και σε πολλές περιπτώσεις την αύξηση των χρόνων διαδρομής και των καθυστερήσεων των χρηστών. Προκύπτει λοιπόν, η ανάγκη για τον περιορισμό και την ελαχιστοποίηση των χρονικά εξαρτώμενων κινδύνων του συστήματος, η οποία επιβάλλει την ανάπτυξη και χρήση μεθόδων ανάλυσης και βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συγκοινωνιακού δικτύου που ενσωματώνουν την έννοια του ρίσκου στον χρόνο μετακίνησης.

Το εργαλείο που αναπτύσσεται στο πλαίσιο του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων (Κεφάλαιο 4.3) για τον σχεδιασμό στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας, εξειδικεύεται στην παρούσα ενότητα σε υποσύστημα για την περίπτωση της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου. Αντικείμενο του υποσυστήματος είναι η εύρεση εναλλακτικών ρυθμίσεων σηματοδότησης, η επικοινωνία με το υποσύστημα πρόβλεψης/ προσομοίωσης για την προσομοίωση των επιπτώσεων των εναλλακτικών ρυθμίσεων σηματοδότησης, η αξιολόγηση και η επιλογή των καταλληλότερων ρυθμίσεων και η επικοινωνία με το υποσύστημα εφαρμογής και αξιολόγησης στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας για την εφαρμογή των ρυθμίσεων

στο δίκτυο. Η βελτιστοποίηση της σηματοδότησης και η αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου που πραγματοποιείται στο υποσύστημα στοχεύει στη διαχείριση και τον περιορισμό του ρίσκου του χρόνου μετακίνησης των χρηστών του δικτύου στον χρονικό ορίζοντα ανάλυσης.

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται το υποσύστημα στην περίπτωση της μη απευθείας σύνδεσης για την παραγωγή ρυθμίσεων σηματοδότησης στο δίκτυο. Η εξειδίκευση του υποσυστήματος στην περίπτωση της απευθείας σύνδεσης περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.3.

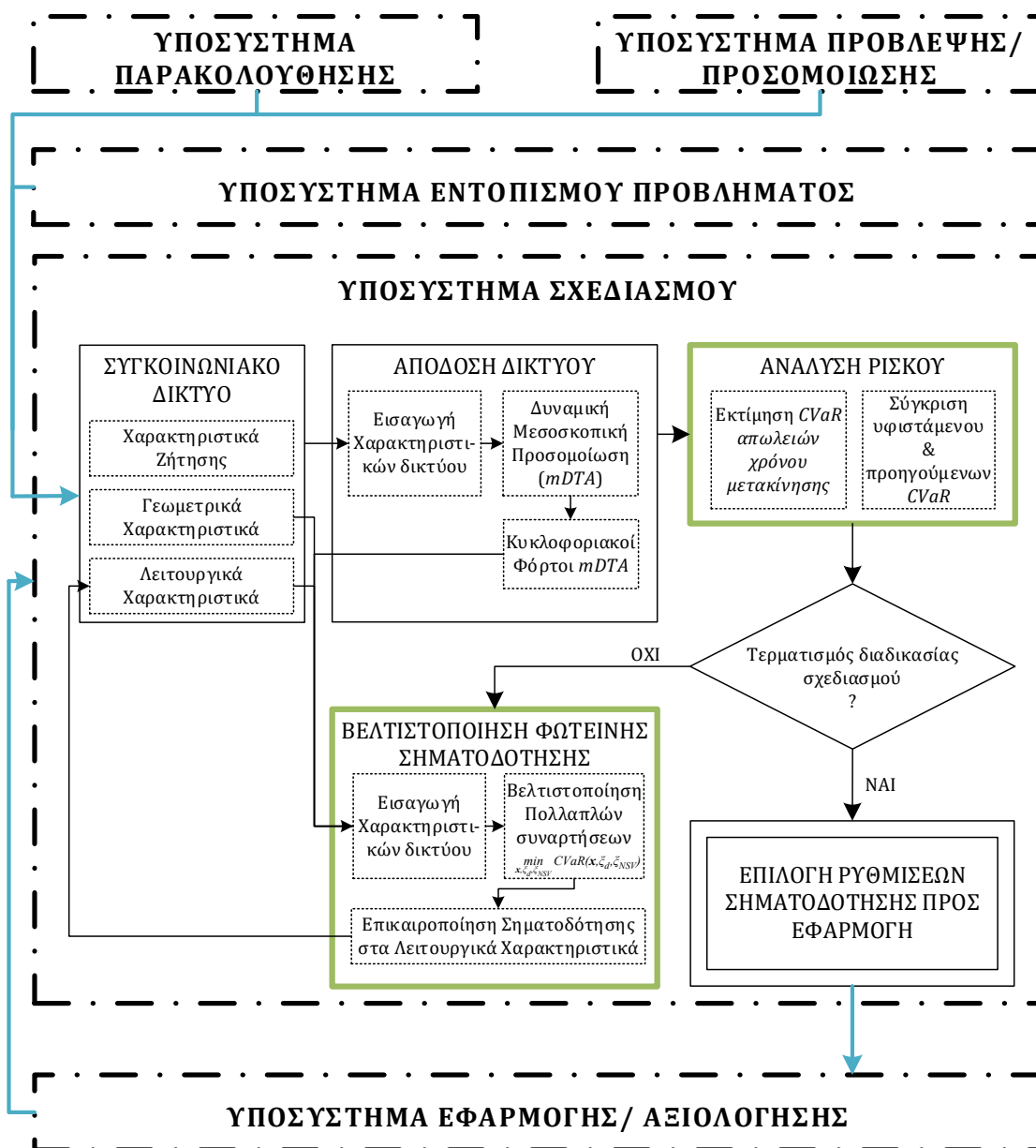
Η διαδικασία εύρεσης εναλλακτικών ρυθμίσεων σηματοδότησης στηρίζεται σε μία επαναληπτική διαδικασία που έχει δύο κύρια μέρη: την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων βάσει των κυκλοφοριακών φόρτων που έχουν προκύψει από τον δυναμικό καταμερισμό της κυκλοφορίας στο δίκτυο και τη μεσοσκοπική προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών στο δίκτυο υπό δυναμικές συνθήκες. Η αξιολόγηση των κυκλοφοριακών συνθηκών χρησιμοποιώντας την ανάλυση ρίσκου υποδεικνύει τελικώς το σύνολο των βέλτιστων σηματοδοτικών παραμέτρων που προτείνεται για εφαρμογή στο δίκτυο.

Σε αυτό το πλαίσιο η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης της σηματοδότησης σταθερού χρόνου για τον μεμονωμένο κόμβο επεκτείνεται στην περίπτωση του κορεσμένου αστικού δικτύου, όπου οι παράμετροι ρύθμισης της σηματοδότησης αφορούν στους χρόνους πρασίνων των φάσεων των σηματοδοτούμενων κόμβων, στην περίοδο σηματοδότησης, αλλά και στις χρονικές μετατοπίσεις έναρξης του προγράμματος σηματοδότησης κάθε κόμβου (offsets).

Οι εργασίες που πραγματοποιούνται στο υποσύστημα παρουσιάζονται διαγραμματικά στο Σχήμα 5-9 και είναι οι ακόλουθες:

- Εισαγωγή των βασικών χαρακτηριστικών του δικτύου και κωδικοποίησή τους στο μεσοσκοπικό μοντέλο δυναμικού καταμερισμού (*mDTA*) και στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης της σηματοδότησης. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά της ζήτησης, χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του δικτύου και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Η εισαγωγή των χαρακτηριστικών ζήτησης μετακινήσεων αφορά στην εισαγωγή του δυναμικού μητρώου προέλευσης προορισμού των μετακινήσεων για την περίοδο ανάλυσης στο μεσοσκοπικό μοντέλο για την προσομοίωση υπό δυναμική φόρτιση και την εύρεση των κυκλοφοριακών φόρτων στις διαδρομές του δικτύου και στους επιμέρους σηματοδοτούμενους κόμβους. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου αφορούν στους κόμβους και στους συνδέσμους του δικτύου παρέχοντας στοιχεία σχετικά με τον αριθμό λωρίδων, τα πλάτη και μήκη των συνδέσμων, τις κλίσεις ανωφέρειας/κατωφέρειας των συνδέσμων, τον τύπο της οδού, κτλ. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά εισάγονται στο μεσοσκοπικό μοντέλο και στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης κατάλληλα

κωδικοποιημένα για την κάθε εφαρμογή. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου αφορούν στις σηματοδοτικές ρυθμίσεις, στις επιτρεπόμενες κινήσεις στους κόμβους, στα όρια ταχύτητας, σε χαρακτηριστικά παρόδιας στάθμευσης, στη λειτουργία μέσω μαζικής μεταφοράς (συχνότητες λεωφορειακών γραμμών), στη χρήση ειδικών λωρίδων κυκλοφορίας, κτλ. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά επίσης εισάγονται στο μεσοσκοπικό μοντέλο και στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης κατάλληλα κωδικοποιημένα για την κάθε εφαρμογή.



Σχήμα 5-9: Επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου

- Μεσοσκοπική δυναμική προσομοίωση του δικτύου για μία εκτεταμένη χρονική περίοδο ανάλυσης που να αντιπροσωπεύει όλη την εξέλιξη της λειτουργίας αιχμής του δικτύου, εκκινώντας από μη κορεσμένες συνθήκες και καταλήγοντας σε μη κορεσμένες συνθήκες.

Η περίοδος προσομοίωσης αναλύεται σε διακριτά βήματα που να παρέχουν ικανοποιητική διακριτοποίηση των συνθηκών του δικτύου στην ανάλυση ρίσκου και στη βελτιστοποίηση χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα αστάθειας. Ιδανική χρονική διάρκεια βήματος θεωρούνται τα πέντε λεπτά, τα οποία περιλαμβάνουν παραπάνω από μία περίοδο σηματοδότησης. Έτσι η μεσοσκοπική προσέγγιση δεν επηρεάζεται από διαφοροποιήσεις από περίοδο σε περίοδο, οι οποίες εξομαλύνονται. Στην παρούσα προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του Aimsun που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.3.3 με μεσοσκοπική προσέγγιση προσομοίωσης και εύρεση και επιλογή διαδρομών μέσω της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη. Οι εναλλακτικές ρυθμίσεις σηματοδότησης κωδικοποιούνται στο Aimsun. Από το δυναμικό μεσοσκοπικό καταμερισμό προκύπτουν οι φόρτοι στους σηματοδοτούμενους κόμβους και οι κυκλοφοριακές συνθήκες στο δίκτυο. Οι φόρτοι στους σηματοδοτούμενους κόμβους εισέρχονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης της σηματοδότησης για την τροφοδότηση της επαναληπτικής διαδικασίας. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου εισέρχονται στην ανάλυση ρίσκου για την αξιολόγηση των εναλλακτικών σηματοδοτικών ρυθμίσεων.

- Βελτιστοποίηση φωτεινής σηματοδότησης δικτύου για μία εκτεταμένη χρονική περίοδο ανάλυσης που να αντιπροσωπεύει όλη την εξέλιξη της λειτουργίας αιχμής του δικτύου, εκκινώντας από μη κορεσμένες συνθήκες και καταλήγοντας σε μη κορεσμένες συνθήκες. Τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου, καθώς και οι κυκλοφοριακοί φόρτοι ανά χρονικό βήμα ανάλυσης εισέρχονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων με ελαχιστοποίηση του ρίσκου καθυστέρησης στο δίκτυο με χρήση του μοντέλου της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR). Στην παρούσα προσέγγιση για την εύρεση της βέλτιστης λύσης έχει χρησιμοποιηθεί ο γενετικός αλγόριθμος πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση αφορά στην μεσοσκοπική εκτίμηση της καθυστέρησης σε όλους τους σηματοδοτούμενους κόμβους του δικτύου και η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση αφορά στη μεσοσκοπικά κίνηση των οχημάτων λόγω συντονισμού των σηματοδοτούμενων κόμβων. Η λύση που επιλέγεται από το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto προκύπτει κανονικοποιώντας τις αποδόσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την ελάχιστη τιμή τους και επιλέγοντας τη λύση που παρέχει μικρότερο άθροισμα κανονικοποιημένων αποδόσεων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να αναλύει την επιρροή του συντονισμού σε προκαθορισμένες αρτηρίες που επιθυμείται να συντονιστούν. Έτσι θεωρείται ότι το δίκτυο αναλύεται σε αλληλοσυνδεόμενες αρτηρίες και ως βάρος της κάθε αρτηρίας έχει θεωρηθεί ο φόρτος που διανύει την κάθε αρτηρία συγκριτικά με τις άλλες αρτηρίες του δικτύου. Αναλυτικά οι αντικειμενικές συναρτήσεις βελτιστοποίησης της σηματοδότησης ελαχιστοποιώντας το ρίσκο

των καθυστερήσεων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.2.1, ενώ ο αλγόριθμος επίλυσης της βελτιστοποίησης παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.2.2.

- Ανάλυση ρίσκου χρόνου μετακίνησης για την εκτεταμένη χρονική περίοδο προσομοίωσης. Τα στοιχεία απόδοσης του δικτύου από το δυναμικό μεσοσκοπικό καταμερισμό αναλύονται και πραγματοποιείται η εκτίμηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) των απωλειών του χρόνου μετακίνησης στο δίκτυο με τις εναλλακτικές ρυθμίσεις σηματοδότησης. Ως απώλεια στο χρόνο μετακίνησης θεωρείται ο επιπλέον χρόνος μετακίνησης των χρηστών που υπερβαίνει τον χρόνο μετακίνησης στο δίκτυο υπό ιδανικές συνθήκες, ελεύθερης ροής. Οι απώλειες αυτές λαμβάνονται από το στατιστικό μέγεθος της μέσης καθυστέρησης του δικτύου, που υπολογίζεται από το Aimsun ανά χρονικό βήμα, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.3.3.4. Η ανάλυση ρίσκου για την εκτεταμένη χρονική περίοδο προσομοίωσης παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.2.3.
- Επιλογή των βέλτιστων ρυθμίσεων σηματοδότησης. Το CVaR όλων των εναλλακτικών ρυθμίσεων σηματοδότησης χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης λύσης και την πρότασή της προς εφαρμογή. Η εναλλακτική με το χαμηλότερο CVaR των απωλειών του χρόνου μετακίνησης στο δίκτυο είναι η βέλτιστη πρόταση προς εφαρμογή. Η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται είτε για ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων είτε αν οι δυναμικοί κυκλοφοριακοί φόρτοι των κόμβων δεν διαφέρουν από την προηγούμενη επανάληψη σε ποσοστό 1%.

5.2.1 Μοντέλο ελαχιστοποίησης ρίσκου καθυστερήσεων σε σηματοδοτούμενο δίκτυο

Η εύρεση της βέλτιστης λύσης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου στο δίκτυο έχει επιλυθεί με την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση δύο αντικειμενικών συναρτήσεων που ορίζουν με αντίστροφο τρόπο την εύρεση ελάχιστης τιμής του προβλήματος ως προς την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων στους κόμβους και την επίτευξη βέλτιστου συντονισμού κόμβων. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης με δύο συναρτήσεις, μία συνάρτηση μπορεί να οδηγήσει την επίλυση του προβλήματος σε τέτοιο σημείο ώστε κάθε προσπάθεια επιπλέον βελτιστοποίησής του να αποτελεί υποβάθμιση της άλλης συνάρτησης. Η εύρεση τέτοιων λύσεων και ο υπολογισμός της ανωτερότητάς τους μεταξύ τους αποτελεί τον σκοπό της βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Η γενική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων είναι η εξής:

$$\begin{aligned} & \min_x \{f_1(x), f_2(x)\} \\ & \text{με περιορισμούς} \begin{cases} \text{constraint}_1(x) \leq 0 \\ \text{constraint}_2(x) = 0 \\ x_L \leq x \leq x_U \end{cases} \end{aligned} \quad (5-33)$$

όπου x το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, f_i οι αντικειμενικές συναρτήσεις, $constraints_j$ οι περιορισμοί ανισότητας και ισότητας και x_L, x_U τα κάτω και άνω όρια των μεταβλητών απόφασης.

5.2.1.1 Πρώτη αντικειμενική συνάρτηση

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση αφορά στη μεσοσκοπική εκτίμηση της καθυστέρησης σε όλους τους σηματοδοτούμενους κόμβους του δικτύου. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πολλαπλών διαδοχικών βημάτων του HCM2010, όπως και στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου, εκτιμάται η μέση καθυστέρηση ανά χρονικό βήμα i για κάθε ομάδα λωρίδων του κάθε κόμβου n για όλη την περίοδο ανάλυσης I :

$$d_{lg,i}^n = d_{1lg,i}^n + 900 T \left[\left(X_{A lg,i}^n - 1 \right) + \sqrt{\left(X_{A lg,i}^n - 1 \right)^2 + \frac{8 k l X_{A lg,i}^n}{c_{A lg,i}^n T}} \right] + \frac{3600}{v_{lg,i}^n T} \left(t_{A lg,i}^n \frac{Q_{b lg,i}^n + Q_{e lg,i}^n - Q_{eo lg,i}^n}{2} + \frac{Q_{e lg,i}^n{}^2 + Q_{eo lg,i}^n{}^2}{2 c_{A lg,i}^n} - \frac{Q_{b lg,i}^n{}^2}{2 c_{A lg,i}^n} \right) \quad (5-34)$$

όπου για την ομάδα λωρίδων lg του κόμβου n κατά το χρονικό βήμα i ορίζονται ως $d_{n,lg,i}$ η μέση καθυστέρηση, T η διάρκεια του χρονικού βήματος i , $X_{A lg,i}^n$ ο μέσος λόγος φόρτου – χωρητικότητας, k ο συντελεστής σταδιακής καθυστέρησης (που συνήθως λαμβάνεται ως 0,5 για τις περιπτώσεις σηματοδότησης σταθερού χρόνου), l ο συντελεστής προσαρμογής αφίξεων (που συνήθως λαμβάνεται ίσος με 1), $c_{A lg,i}^n$ η μέση χωρητικότητα, $v_{lg,i}^n$ ο φόρτος, $t_{A lg,i}^n$ η προσαρμοσμένη διάρκεια της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης, $Q_{b lg,i}^n$ η αρχική ουρά, $Q_{e lg,i}^n$ η ουρά στο τέλος του βήματος i , $Q_{eo lg,i}^n$ η ουρά στο τέλος του βήματος i όταν $v_{lg,i}^n \geq c_{A lg,i}^n$ και $Q_{b lg,i}^n = 0$, και $d_{1n,lg,i}$ η ομοιόμορφη καθυστέρηση που υπολογίζεται από την ανάλυση της σταδιακής ουράς ανάλογα με τις θεωρήσεις που αφορούν στις αφίξεις, στη μία ή διαφορετικές ροές κορεσμού και στην ύπαρξη ουράς (βλ. Κεφάλαιο 5.1.2)

Η μέση καθυστέρηση του κόμβου n στο χρονικό βήμα i δίνεται από την εξίσωση:

$$d_i^n = \frac{\sum_{lg \in n} v_{lg,i}^n d_{lg,i}^n}{\sum_{lg \in n} v_{lg,i}^n} \quad (5-35)$$

και η μέση καθυστέρηση όλων των N σηματοδοτούμενων κόμβων του δικτύου στο χρονικό βήμα i δίνεται από την εξίσωση:

$$d_i = \frac{\sum_n (d_i^n (\sum_{lg \in n} v_{lg,i}^n))}{\sum_n \sum_{lg \in n} v_{lg,i}^n} \quad (5-36)$$

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση που ο αλγόριθμος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει είναι η ελαχιστοποίηση του CVaR των καθυστερήσεων. Ως απώλειες του χρόνου θεωρούνται οι καθυστερήσεις που προκύπτουν από τη λειτουργία των σηματοδοτούμενων κόμβων και εκφράζονται ως η σταθμισμένη μέση καθυστέρηση ανά όχημα για κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα ανάλυσης (d_i). Ως πιθανότητα, p_{d_i} , εμφάνισης αυτής της απώλειας ορίζεται ο λόγος του αριθμού οχημάτων που βιώνουν αυτή την καθυστέρηση ($v_i = \sum_n \sum_{lg \in n} v_{lg,i}^n$) προς το συνολικό αριθμό οχημάτων της εκτεταμένης περιόδου ανάλυσης ($v = \sum_i \sum_n \sum_{lg \in n} v_{lg,i}^n$):

$$p_{d_i} = v_i / v \quad (5-37)$$

Έτσι σύμφωνα με τη επέκταση της θεώρησης των Rockafellar & Uryasev (2002) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, η διατύπωση της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ακόλουθη:

$$CVaR - d_a(\mathbf{g}, \xi_d) = \xi_d + \frac{1}{(1 - \alpha)} \sum_{i=1}^I p_{d_i} \cdot \max\{(d_i(\mathbf{g}) - \xi_d), 0\} \quad (5-38)$$

όπου:

$\mathbf{g}$ είναι το άνωσυμα το οποίο καθορίζει τις συνθήκες απωλειών του προβλήματος που υπεισέρχονται στην πρώτη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου. Το $\mathbf{g}$ περιλαμβάνει τους χρόνους πρασίνου, g_φ^n , των N_φ^n φάσεων των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$).

α είναι το επίπεδο εμπιστοσύνης

ξ_d είναι μία επιπλέον μεταβλητή του προβλήματος, που αντιστοιχεί στο VaR_α για το επίπεδο εμπιστοσύνης

d_i είναι η μέση καθυστέρηση όλων των N σηματοδοτούμενων κόμβων του δικτύου στο χρονικό βήμα i και υπολογίζεται από τις εξισώσεις (5-34) -(5-36)

p_{d_i} είναι η πιθανότητα εμφάνισης αυτής της καθυστέρησης (δηλαδή ο λόγος του αριθμού των χρηστών αυτού του βήματος προς τον συνολικό αριθμό των χρηστών όλων των χρονικών βημάτων, I , της περιόδου ανάλυσης) και υπολογίζεται από την εξίσωση (5-37)

Οι περιορισμοί που σχετίζονται με την ελαχιστοποίηση της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης είναι οι ακόλουθοι:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{min} \leq \sum_{N_{\varphi}^n} L_{\varphi}^n + \sum_{N_{\varphi}^n} g_{\varphi}^n \leq C_{max} , \forall n \in N \\ L_b \leq g_{\varphi}^n \leq U_b \end{array} \right\} \quad (5-39)$$

όπου

C_{max} είναι η μέγιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης

C_{min} είναι η ελάχιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης

$\sum_{N_{\varphi}^n} L_{\varphi}^n$ είναι το άθροισμα των χαμένων χρόνων (lost time) της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_{\varphi}^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$)

$\sum_{N_{\varphi}^n} g_{\varphi}^n$ είναι το άθροισμα του χρόνου πρασίνου της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_{\varphi}^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$)

L_b είναι το κατώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου, και

U_b είναι το ανώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο μέγιστος χρόνος πρασίνου.

5.2.1.2 Δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση

Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση αφορά στην εύρεση του χρονικών μετατοπίσεων έναρξης του προγράμματος σηματοδότησης κάθε κόμβου. Ως δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις που αναλύουν μεσοσκοπικά την επιρροή των χρονικών μετατοπίσεων στην κίνηση των οχημάτων και είναι οι εξής:

- Η ελαχιστοποίηση του $CVaR$ του αριθμού των οχημάτων που εμφανίζουν διακοπόμενη διέλευση κατά μήκος των προκαθορισμένων αρτηριών του δικτύου (MultiGA - CVaR Number of stopping vehicles, **mGA-CVaR-NSV**). Ο αριθμός οχημάτων αδιάκοπης διέλευσης είναι η αντίστροφη έννοια της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης (bandwidth) σταθμισμένη με το φόρτο που αντιστοιχεί στην δεδομένη ροή κυκλοφορίας της αρτηρίας.
- Η ελαχιστοποίηση του $CVaR$ του μεσοσκοπικού χρόνου αναμονής οχημάτων λόγω συντονισμού (MultiGA - CVaR Stopping Delay, **mGA-CVaR-SD**) , που για λόγους απλοποίησης δεν λαμβάνεται υπόψη η ουρά των οχημάτων στον κάθε κόμβο, όπως και ο ρυθμός συσσώρευσης και εκκένωσης της ουράς. Θεωρείται δηλαδή ότι η ουρά σχηματίζεται «κατακόρυφα» στη γραμμή στάσης (stopline) και όχι κατά μήκος του συνδέσμου.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει σχεδιαστεί, έτσι ώστε να αναλύει την επιρροή του συντονισμού σε προκαθορισμένες αρτηρίες που επιθυμείται να συντονιστούν. Έτσι το δίκτυο ανα-

λύεται σε αλληλοσυνδεόμενες αρτηρίες και ως βάρος της κάθε αρτηρίας θεωρείται ο φόρτος που διανύει την κάθε αρτηρία συγκριτικά με τις άλλες αρτηρίες του δικτύου.

Στη συνέχεια ακολουθεί η διατύπωση της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης της προσέγγισης **mGA-CVaR-NSV**.

Έστω ότι το δίκτυο αναλύεται σε Δ διαδρόμους προς συντονισμό. Ο κάθε διάδρομος δ προς συντονισμό έχει N_δ σηματοδοτούμενους κόμβους ως υποσύνολο των συνολικών N σηματοδοτούμενων κόμβων ($N_\delta \subset N$). Στον κάθε σηματοδοτούμενο κόμβο, n_δ , επιλέγεται προς συντονισμό μία ομάδα λωρίδων, $lg_{n_\delta}^\delta$, στην πρωτεύουσα κατεύθυνση και μία ομάδα λωρίδων, $\overline{lg_{n_\delta}^\delta}$, στη δευτερεύουσα (αντίθετη) κατεύθυνση. Έτσι για κάθε διαδρομή δ ορίζεται το σύνολο των ομάδων λωρίδων των κόμβων $[1_\delta, 2_\delta, \dots, N_\delta]$ που συμπεριλαμβάνονται στην πρωτεύουσα κατεύθυνση ($lg^\delta = [lg_1^\delta, lg_2^\delta, \dots, lg_{N_\delta}^\delta]$) και αντίστοιχα των κόμβων $[\overline{N}_\delta, \dots, \overline{2}_\delta, \overline{1}_\delta]$ που συμπεριλαμβάνονται στη δευτερεύουσα κατεύθυνση ($\overline{lg}^\delta = [\overline{lg}_{N_\delta}^\delta, \dots, \overline{lg}_2^\delta, \overline{lg}_1^\delta]$).

Έστω $g_{n_\delta}^\delta$ Ο χρόνος πρασίνου της συντονισμένης ομάδας $lg_{n_\delta}^\delta$ του κόμβου n_δ για την πρωτεύουσα κατεύθυνση και $\overline{g_{n_\delta}^\delta}$ για τη δευτερεύουσα κατεύθυνση. Ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου εκ των συντονισμένων ομάδων λωρίδων της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας κατεύθυνσης ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} G_{min}^\delta &= \min\{g_{n_\delta}^\delta : lg_{n_\delta}^\delta \in lg^\delta\} \\ \overline{G_{min}^\delta} &= \min\{\overline{g_{n_\delta}^\delta} : \overline{lg_{n_\delta}^\delta} \in \overline{lg}^\delta\} \end{aligned} \quad (5-40)$$

Ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου, G_{min}^δ και $\overline{G_{min}^\delta}$, θεωρείται ως κρίσιμος χρόνος πρασίνου και αντιστοιχεί στο ανώτατο δυνατό όριο της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης για την κάθε κατεύθυνση. Η τελική χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης, B^δ και $\overline{B}^\delta$ για την κάθε κατεύθυνση αντίστοιχα, μειώνεται αν υπάρξει μία παρεμβολή από άλλο κόμβο. Ως παρεμβολή ορίζεται η μείωση της δυνητικής χρονικής ζώνης από την κόκκινη ένδειξη μίας συντονισμένης ομάδας λωρίδων ενός κόμβου. Η παρεμβολή λοιπόν, ορίζει το άνω ή/ και κάτω όριο της τελικής χρονικής ζώνης και σε κάθε κόμβο (εκτός αυτού με το ελάχιστο χρόνο πρασίνου) μπορεί να εμφανίζεται μόνο ως άνω (I_{U,n_δ}^δ και $\overline{I_{U,n_\delta}^\delta}$) ή κάτω παρεμβολή (I_{L,n_δ}^δ και $\overline{I_{L,n_\delta}^\delta}$) στην κάθε κατεύθυνση.

Η χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων για την πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα κατεύθυνση δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$B^\delta = G_{min}^\delta - \left\{ \max_{\forall lg^\delta} I_{U,n_\delta}^\delta + \max_{\forall \overline{lg}^\delta} \overline{I_{L,n_\delta}^\delta} \right\} \quad (5-41)$$

$$\overline{B^\delta} = \overline{G_{min}^\delta} - \left\{ \max_{\forall lg^\delta} \overline{I_{U,n_\delta}^\delta} + \max_{\forall lg^\delta} \overline{I_{L,n_\delta}^\delta} \right\}$$

Οι παρεμβολές υπολογίζονται πραγματοποιώντας προβολές των σημείων έναρξης και λήξης κάθε συντονισμένης διάρκειας πρασίνου στον άξονα χρόνου του κρίσιμου κόμβου. Ως κρίσιμος κόμβος θεωρείται ο κόμβος με τον ελάχιστο χρόνο πρασίνου σε κάθε κατεύθυνση. Οι προβολές $p_{U,n_\delta}^\delta (\overline{p_{U,n_\delta}^\delta})$ στον άξονα χρόνου του κρίσιμου κόμβου $cr_\delta (\overline{cr_\delta})$ της αρχής του πρασίνου της συντονισμένης ομάδας λωρίδων $lg_{n_\delta}^\delta (\overline{lg_{n_\delta}^\delta})$ του κόμβου $n_\delta (\overline{n_\delta})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} p_{U,n_\delta}^\delta &= mod\{o_{n_\delta}^\delta - o_{cr,\delta}^\delta, C\} + T_{cr,\delta}^\delta - T_{n_\delta}^\delta \\ \overline{p_{U,n_\delta}^\delta} &= mod\{\overline{o_{n_\delta}^\delta} - \overline{o_{cr,\delta}^\delta}, C\} + \overline{T_{cr,\delta}^\delta} - \overline{T_{n_\delta}^\delta} \end{aligned} \quad (5-42)$$

Οι προβολές $p_{L,n_\delta}^\delta (\overline{p_{L,n_\delta}^\delta})$ στον άξονα χρόνου του κρίσιμου κόμβου $cr (\overline{cr})$ του τέλους του πρασίνου της συντονισμένης ομάδας λωρίδων $lg_{n_\delta}^\delta (\overline{lg_{n_\delta}^\delta})$ του κόμβου $n_\delta (\overline{n_\delta})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} p_{L,n_\delta}^\delta &= C - T_{cr,\delta}^\delta + T_{n_\delta}^\delta - mod\{o_{n_\delta}^\delta - o_{cr,\delta}^\delta, C\} - mod\{g_{n_\delta}^\delta - G_{min,\delta}^\delta, C\} \\ \overline{p_{L,n_\delta}^\delta} &= C - \overline{T_{cr,\delta}^\delta} + \overline{T_{n_\delta}^\delta} - mod\{\overline{o_{n_\delta}^\delta} - \overline{o_{cr,\delta}^\delta}, C\} - mod\{\overline{g_{n_\delta}^\delta} - \overline{G_{min,\delta}^\delta}, C\} \end{aligned} \quad (5-43)$$

όπου

C : η περίοδος σηματοδότησης

$T_{n_\delta}^\delta (\overline{T_{n_\delta}^\delta})$: ο χρόνος διάνυσης στην πρωτεύουσα (δευτερεύουσα) κατεύθυνση μεταξύ του πρώτου κόμβου της αντίστοιχης κατεύθυνσης της διαδρομής δ και του κόμβου $n_\delta (\overline{n_\delta})$

$T_{cr,\delta}^\delta$: ο χρόνος διάνυσης στην πρωτεύουσα (δευτερεύουσα) κατεύθυνση μεταξύ του πρώτου κόμβου της αντίστοιχης κατεύθυνσης της διαδρομής δ και του κρίσιμου κόμβου $cr_\delta (\overline{cr_\delta})$

$g_{n_\delta}^\delta (\overline{g_{n_\delta}^\delta})$: ο χρόνος πρασίνου της συντονισμένης ομάδας λωρίδων $lg_{n_\delta}^\delta (\overline{lg_{n_\delta}^\delta})$ του κόμβου $n_\delta (\overline{n_\delta})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ

$G_{min}^\delta (\overline{G_{min}^\delta})$: ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ

$o_{n_\delta}^\delta (\overline{o_{n_\delta}^\delta})$: η χρονική μετατόπιση της αρχής του πρασίνου της συντονισμένης ομάδας λωρίδων $lg_{n_\delta}^\delta (\overline{lg_{n_\delta}^\delta})$ του κόμβου $n_\delta (\overline{n_\delta})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ

$o_{cr}^{\delta}(\overline{o_{cr}^{\delta}})$: η χρονική μετατόπιση της αρχής του πρασίνου της συντονισμένης ομάδας λωρίδων $lg_{n_{\delta}}^{\delta}(\overline{lg_{n_{\delta}}^{\delta}})$ που αντιστοιχεί στον κρίσιμο κόμβο $cr_{\delta}(\overline{cr_{\delta}})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ . Ως κρίσιμος κόμβος θεωρείται ο κόμβος με $g_{n_{\delta}}^{\delta} = G_{min}^{\delta}(\overline{g_{n_{\delta}}^{\delta}} = \overline{G_{min}^{\delta}})$ για την πρωτεύουσα (δευτερεύουσα) κατεύθυνση.

Οι χρονικές μετατοπίσεις της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας κατεύθυνσης συνδέονται μεταξύ τους αφού είναι αλληλοεξαρτώμενες από την ίδια δομή προγράμματος. Έτσι η χρονική μετατόπιση της δευτερεύουσας κατεύθυνσης εκφράζεται μέσω της χρονικής μετατόπισης της πρωτεύουσας κατεύθυνσης και της σχετικής τους χρονικής μετατόπισης, $\overline{Ro_{n_{\delta}}^{\delta}}$, ως εξής:

$$\overline{o_{n_{\delta}}^{\delta}} = o_{n_{\delta}}^{\delta} + \overline{Ro_{n_{\delta}}^{\delta}} \quad (5-44)$$

Η σχετική χρονική μετατόπιση της δευτερεύουσας κατεύθυνσης μπορεί να είναι είτε θετική στην περίπτωση που η φάση της δευτερεύουσας κατεύθυνσης εκκινεί μετά από την αντίστοιχη της πρωτεύουσας, είτε αρνητική στην αντίθετη περίπτωση, είτε μηδενική σε περίπτωση που οι φάσεις των δύο κατευθύνσεων συμπίπτουν.

Η χρονική μετατόπιση του προγράμματος σηματοδότησης w_n ενός κόμβου n που συμπεριλαμβάνεται σε μία διαδρομή δ (συμβολισμένος ως n_{δ}) συνδέεται με τη χρονική μετατόπιση της πρωτεύουσας κατεύθυνσης $o_{n_{\delta}}^{\delta}$ ως εξής:

$$o_{n_{\delta}}^{\delta} = Ro_{n_{\delta}}^{\delta} + w_n \quad (5-45)$$

Η σχετική χρονική μετατόπιση $Ro_{n_{\delta}}^{\delta}$ του κόμβου n_{δ} μίας πρωτεύουσας κατεύθυνσης δ εξαρτάται από τη διαδοχή των φάσεων και μπορεί να είναι είτε μηδενική (αν η ομάδα λωρίδων που συντονίζεται $lg_{n_{\delta}}^{\delta}$ είναι η πρώτη φάση του προγράμματος) ή μπορεί να ισούται με τους χρόνους πρασίνου και τους χαμένους χρόνους των προγενέστερων φάσεων αυτής.

Η άνω παρεμβολή $I_{U,n_{\delta}}^{\delta}(\overline{I_{U,n_{\delta}}^{\delta}})$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση για την πρωτεύουσα (δευτερεύουσα) κατεύθυνση της διαδρομής δ :

$$I_{U,n_{\delta}}^{\delta} = \begin{cases} p_{U,n_{\delta}}^{\delta} - C & \text{αν } p_{U,n_{\delta}}^{\delta} \geq G_{min}^{\delta} \\ p_{U,n_{\delta}}^{\delta} & \text{αν } p_{U,n_{\delta}}^{\delta} < G_{min}^{\delta} \end{cases} \quad (5-46)$$

$$\overline{I_{U,n_{\delta}}^{\delta}} = \begin{cases} \overline{p_{U,n_{\delta}}^{\delta}} - C & \text{αν } \overline{p_{U,n_{\delta}}^{\delta}} \geq \overline{G_{min}^{\delta}} \\ \overline{p_{U,n_{\delta}}^{\delta}} & \text{αν } \overline{p_{U,n_{\delta}}^{\delta}} < \overline{G_{min}^{\delta}} \end{cases}$$

και η κάτω παρεμβολή $I_{L,n_{\delta}}^{\delta}(\overline{I_{L,n_{\delta}}^{\delta}})$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση για την πρωτεύουσα (δευτερεύουσα) κατεύθυνση της διαδρομής δ :

$$\begin{aligned}
 I_{L,n_\delta}^\delta &= \begin{cases} p_{L,n_\delta}^\delta - C & \text{αν } p_{L,n_\delta}^\delta \geq G_{min}^\delta \\ p_{L,n_\delta}^\delta & \text{αν } p_{L,n_\delta}^\delta < G_{min}^\delta \end{cases} \\
 \overline{I_{L,n_\delta}^\delta} &= \begin{cases} \overline{p_{L,n_\delta}^\delta} - C & \text{αν } \overline{p_{L,n_\delta}^\delta} \geq \overline{G_{min}^\delta} \\ \overline{p_{L,n_\delta}^\delta} & \text{αν } \overline{p_{L,n_\delta}^\delta} < \overline{G_{min}^\delta} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5-47}$$

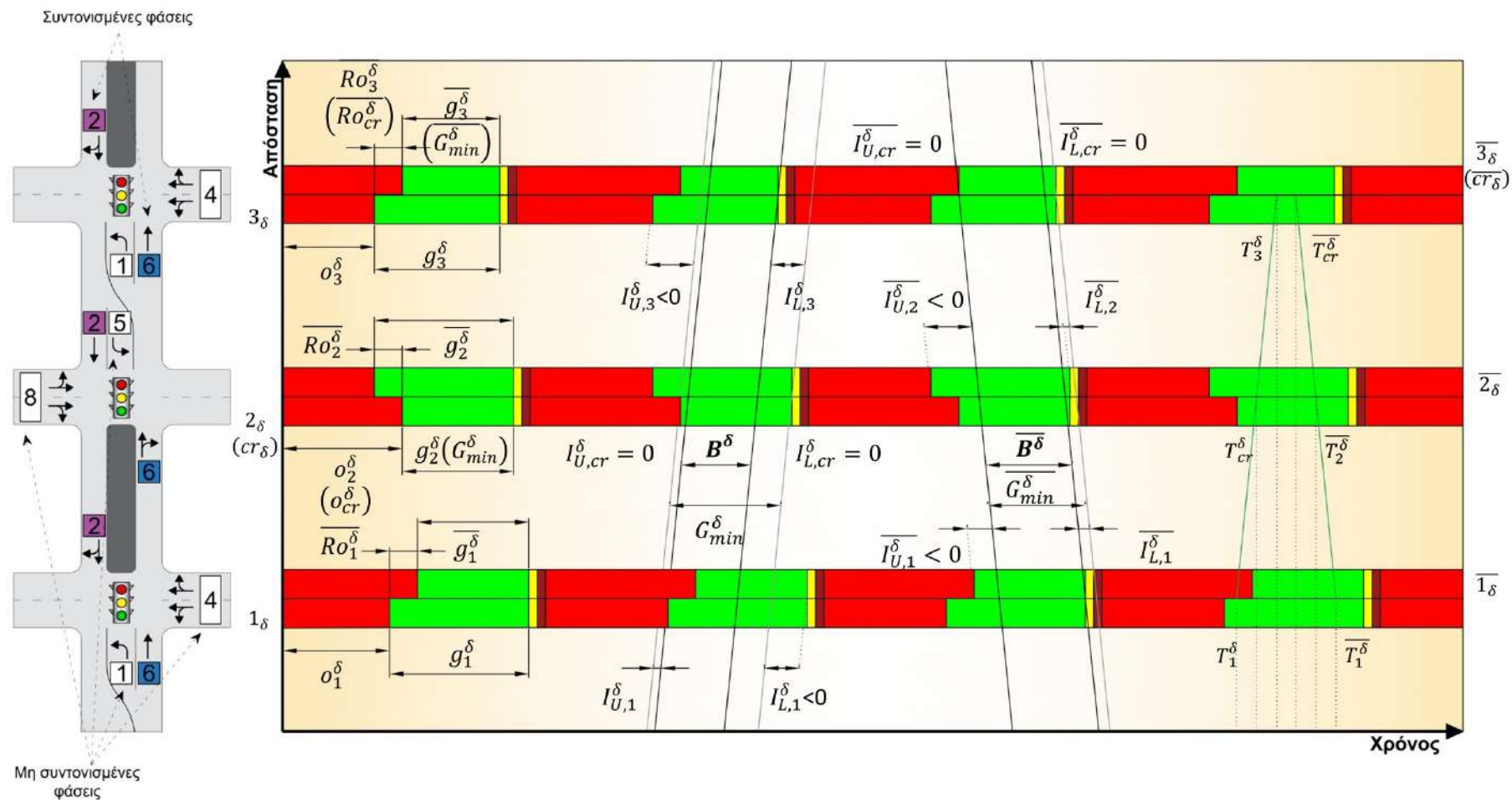
Οι προηγούμενοι ορισμοί παρουσιάζονται σε ένα απλό παράδειγμα τριών κόμβων στο Σχήμα 5-10.

Στο παράδειγμα αυτό, η πρωτεύουσα κατεύθυνση της διαδρομής είναι αυτή με κατεύθυνση προς βορρά όπου οι ομάδες λωρίδων που συντονίζονται είναι οι $\mathbf{l}g^\delta = [6_1^\delta, 6_2^\delta, 6_3^\delta]$, ενώ στη δευτερεύουσα κατεύθυνση συντονίζονται οι ομάδες $\overline{\mathbf{l}g^\delta} = [\overline{2_3^\delta}, \overline{2_2^\delta}, \overline{2_1^\delta}]$. Ο κρίσιμος κόμβος, δηλαδή αυτός με το μικρότερο χρόνο πρασίνου, στην πρωτεύουσα κατεύθυνση είναι ο κόμβος 2 ($cr_\delta = 2_\delta$), ενώ στη δευτερεύουσα ο κόμβος 3 ($\overline{cr_\delta} = \overline{3_\delta}$).

Επομένως η δυνητική χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης στην πρωτεύουσα κατεύθυνση ορίζεται από το $G_{min}^\delta = g_{2_\delta}^\delta$ και στη δευτερεύουσα από το $\overline{G_{min}^\delta} = \overline{g_{3_\delta}^\delta}$.

Η άνω παρεμβολή της πρωτεύουσας κατεύθυνσης στον κόμβο 1 προκύπτει θετική και μειώνει τη δυνητική ζώνη κατά $I_{U,1_\delta}^\delta$, ενώ η άνω παρεμβολή στον κόμβο 3 προκύπτει αρνητική, δηλαδή η προβολή του σημείου έναρξης του πρασίνου είναι νωρίτερα από την έναρξη του πρασίνου του κρίσιμου κόμβου. Αντίστοιχα η κάτω παρεμβολή της πρωτεύουσας κατεύθυνσης του κόμβου 1 είναι αρνητική (η προβολή έρχεται σε μεταγενέστερο χρόνο από τη λήξη του πρασίνου του κρίσιμου κόμβου), ενώ η κάτω παρεμβολή του κόμβου 3 περιορίζει τη δυνητική ζώνη.

Η τελική χρονική ζώνη της πρωτεύουσας κατεύθυνσης είναι $B^\delta = G_{min}^\delta - \{I_{U,1_\delta}^\delta + I_{L,3_\delta}^\delta\}$. Στη δευτερεύουσα κατεύθυνση και οι δύο άνω παρεμβολές είναι αρνητικές και δεν επηρεάζουν τη δυνητική χρονική ζώνη, ενώ και οι δύο κάτω παρεμβολές είναι θετικές με μεγαλύτερη την παρεμβολή του κόμβου 1. Η τελική χρονική ζώνη της δευτερεύουσας κατεύθυνσης είναι $\overline{B^\delta} = \overline{G_{min}^\delta} - \{0 + \overline{I_{L,1_\delta}^\delta}\}$.



Σχήμα 5-10: Χαρακτηριστικά μεγέθη στον υπολογισμό της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων

Η εύρεση της βέλτιστης χρονικής ζώνης αξιοποιώντας όλο το κρίσιμο χρόνο πρασίνου μπορεί να επιτευχθεί για τη μία κατεύθυνση ορίζοντας κατάλληλες χρονικές μετατοπίσεις που συντονίζουν τους διαδοχικούς κόμβους στην αρχή, στο τέλος ή στη μέση του εκάστοτε χρόνου πρασίνου. Η βελτιστοποίηση της χρονικής ζώνης σε δύο κατευθύνσεις απαιτεί το συμβιβασμό από μία κατεύθυνση ή και από τις δύο, ενώ θα πρέπει να τεθεί και κάποιο κριτήριο για το συμβιβασμό μεταξύ των κατευθύνσεων. Κριτήριο για το συμβιβασμό του συντονισμού στις δύο αντίθετες κατευθύνσεις μπορούν να τεθούν, είτε βάσει προτίμησης κάποιας κατεύθυνσης (π.χ. μέγιστη δυνατή χρονική ζώνη στην πρωτεύουσα κατεύθυνση), είτε επιλέγοντας κάποιο βάρος στην κάθε κατεύθυνση (π.χ. ίσες χρονικές μετατοπίσεις στις δύο κατευθύνσεις), είτε χρησιμοποιώντας κάποιο συντελεστή βάρους. Στην παρούσα προσέγγιση ως κριτήριο συμβιβασμού λαμβάνεται ο συντελεστής βάρους που αντιστοιχεί στον φόρτο της κάθε κατεύθυνσης (v_i^δ για την πρωτεύουσα και $\overline{v_i^\delta}$ για τη δευτερεύουσα κατεύθυνση της διαδρομής δ), έτσι ώστε να δίνεται προτεραιότητα στην κατεύθυνση που εξυπηρετεί τον μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων.

Κατά το χρονικό βήμα i ο φόρτος της συντονισμένης ομάδας λωρίδων $lg_{n_\delta}^\delta$ του κόμβου n_δ της πρωτεύουσας κατεύθυνσης συμβολίζεται ως $v_{i,lg_{n_\delta}^\delta}$, ενώ ο φόρτος της δευτερεύουσας κατεύθυνσης συμβολίζεται ως $\overline{v_{i,lg_{n_\delta}^\delta}}$. Ο φόρτος που έχει θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στην κάθε κατεύθυνση (v_i^δ για την πρωτεύουσα και $\overline{v_i^\delta}$ για τη δευτερεύουσα κατεύθυνση) της διαδρομής δ ορίζεται ως ο ελάχιστος φόρτος των συντονισμένων ομάδων λωρίδων των κόμβων n_δ για την κάθε κατεύθυνση για το κάθε χρονικό βήμα i :

$$\begin{aligned} v_i^\delta &= \min \{v_{i,lg_{n_\delta}^\delta} : lg_{n_\delta}^\delta \in \mathbf{lg}^\delta\} \\ \overline{v_i^\delta} &= \min \{\overline{v_{i,lg_{n_\delta}^\delta}} : \overline{lg_{n_\delta}^\delta} \in \overline{\mathbf{lg}^\delta}\} \end{aligned} \quad (5-48)$$

Επειδή δε η παρούσα προσέγγιση αναπτύσσεται στο πλαίσιο ενός συνόλου αλληλοσυνδεόμενων διαδρομών που απαρτίζουν ένα δίκτυο, το κριτήριο του συμβιβασμού επεκτείνεται σε όλες τις διαδρομές, έτσι ώστε οι διαδρομές που εξυπηρετούν περισσότερα οχήματα να έχουν προτεραιότητα στην εύρεση μεγαλύτερης χρονικής ζώνης.

Έτσι για την κάθε κατεύθυνση της κάθε διαδρομής $\delta \in \Delta$ υπολογίζεται ο λόγος του χρόνου διακοπτόμενης διέλευσης οχημάτων (έτσι ώστε να υπεισέλθει στη βελτιστοποίηση ως ελαχιστοποίηση τιμής) προς την περίοδο σηματοδότησης:

$$\begin{aligned} \lambda^\delta &= 1 - B^\delta / C \\ \overline{\lambda^\delta} &= 1 - \overline{B^\delta} / C \end{aligned} \quad (5-49)$$

και ο αριθμός των οχημάτων που διακόπτεται η διέλευσή τους ανά χρονικό βήμα i :

$$\begin{aligned} NSV_i^\delta &= \lambda^\delta v_i^\delta \\ \overline{NSV_i^\delta} &= \overline{\lambda^\delta v_i^\delta} \end{aligned} \quad (5-50)$$

Για κάθε χρονικό βήμα i υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος του αριθμού των οχημάτων που διακόπτεται η διέλευσή τους από όλες τις διαδρομές Δ :

$$NSV_i = \sum_{\delta=1}^{\Delta} (NSV_i^\delta v_i^\delta + \overline{NSV_i^\delta v_i^\delta}) / \sum_{\delta=1}^{\Delta} (v_i^\delta + \overline{v_i^\delta}) \quad (5-51)$$

Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση της προσέγγισης **mGA-CVaR-NSV** που ο αλγόριθμος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει είναι η ελαχιστοποίηση του CVaR του αριθμού των οχημάτων που εμφανίζουν διακοπτόμενη διέλευση κατά μήκος των προκαθορισμένων αρτηριών του δικτύου. Ως απώλειες σε αυτή την προσέγγιση θεωρούνται τα οχήματα (NSV_i) που παρουσιάζουν διακοπτόμενη διέλευση ως σταθμισμένη μέση τιμή για όλες τις διαδρομές του δικτύου ανά χρονικό βήμα i . Ως πιθανότητα, p_{NSV_i} , εμφάνισης αυτής της απώλειας ορίζεται ο λόγος του αριθμού οχημάτων που βιώνουν αυτή την απώλεια ($v_{NSV_i} = \sum_{\delta=1}^{\Delta} v_i^\delta + \overline{v_i^\delta}$) στο χρονικό βήμα i προς το συνολικό αριθμό οχημάτων της εκτεταμένης περιόδου ανάλυσης ($v_{NSV} = \sum_i \sum_{\delta=1}^{\Delta} v_i^\delta + \overline{v_i^\delta}$):

$$p_{NSV_i} = \frac{v_{NSV_i}}{v_{NSV}} = \sum_{\delta=1}^{\Delta} (v_i^\delta + \overline{v_i^\delta}) / \sum_i \sum_{\delta=1}^{\Delta} (v_i^\delta + \overline{v_i^\delta}) \quad (5-52)$$

Έτσι σύμφωνα με τη επέκταση της θεώρησης των Rockafellar & Uryasev (2002) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, η διατύπωση της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης της προσέγγισης **mGA-CVaR-NSV** είναι η ακόλουθη:

$$CVaR - NSV_a(\mathbf{g}, \mathbf{w}, \xi_{NSV}) = \xi_{NSV} + \frac{1}{(1-a)} \sum_{i=1}^I p_{NSV_i} \max\{(NSV_i(\mathbf{g}, \mathbf{w}) - \xi_{NSV}), 0\} \quad (5-53)$$

όπου:

$\mathbf{g}$ και $\mathbf{w}$ είναι τα διανύσματα τα οποία καθορίζουν τις συνθήκες απωλειών του προβλήματος που υπεισέρχονται στη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου. Το $\mathbf{g}$ περιλαμβάνει τους χρόνους πρασίνου, g_φ^n , των N_φ^n φάσεων των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$) και το $\mathbf{w}$ περιλαμβάνει τις χρονικές μετατοπίσεις w^n της έναρξης των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$).

α είναι το επίπεδο εμπιστοσύνης.

ξ_{NSV} είναι μία επιπλέον μεταβλητή του προβλήματος, που αντιστοιχεί στο VaR_α για το επίπεδο εμπιστοσύνης.

NSV_i είναι ο μέσος αριθμός οχημάτων που παρουσιάζουν διακοπτόμενη διέλευση αναλύοντας όλες τις Δ προκαθορισμένες διαδρομές του δικτύου στο χρονικό βήμα i και υπολογίζεται από τις εξισώσεις (5-40)- (5-51).

p_{NSV_i} είναι η πιθανότητα εμφάνισης της απώλειας που υπολογίζεται από την εξίσωση (5-52).

Οι περιορισμοί που σχετίζονται με την ελαχιστοποίηση της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης της προσέγγισης **mGA-CVaR-NSV** είναι οι ακόλουθοι:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{min} \leq \sum_{N_\varphi^n} L_\varphi^n + \sum_{N_\varphi^n} g_\varphi^n \leq C_{max} \quad , \quad \forall n \in N \\ L_b \leq g_\varphi^n \leq U_b \\ 0 \leq w^n \leq C \\ -G_{min}^\delta < I_{L,n_\delta}^\delta < G_{min}^\delta \quad \text{και} \quad -\overline{G_{min}^\delta} < \overline{I_{L,n_\delta}^\delta} < \overline{G_{min}^\delta} \\ -G_{min}^\delta < I_{U,n_\delta}^\delta < G_{min}^\delta \quad \text{και} \quad -\overline{G_{min}^\delta} < \overline{I_{U,n_\delta}^\delta} < \overline{G_{min}^\delta} \\ 0 \leq B^\delta \leq G_{min}^\delta \quad \text{και} \quad 0 \leq \overline{B^\delta} \leq \overline{G_{min}^\delta} \end{array} \right. \quad (5-54)$$

όπου

C_{max} είναι η μέγιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης

C_{min} είναι η ελάχιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης

L_φ^n είναι ο χαμένος χρόνος (lost time) της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_\varphi^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$)

g_φ^n είναι ο χρόνος πρασίνου της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_\varphi^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$)

L_b είναι το κατώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου φάσης

U_b είναι το ανώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο μέγιστος χρόνος πρασίνου φάσης

w^n είναι η χρονική μετατόπιση του προγράμματος τους κόμβου n ($n \in N$)

C είναι η περίοδος σηματοδότησης

G_{min}^δ ($\overline{G_{min}^\delta}$) είναι ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ ($\delta \in \Delta$)

$I_{L,n_\delta}^\delta \left(\overline{I_{L,n_\delta}^\delta} \right)$ είναι η κάτω παρεμβολή στη δυνητική χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων του κόμβου n_δ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ ($\delta \in \Delta$)

$I_{U,n_\delta}^\delta \left(\overline{I_{U,n_\delta}^\delta} \right)$ είναι η άνω παρεμβολή στη δυνητική χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων του κόμβου n_δ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ ($\delta \in \Delta$)

$B^\delta \left(\overline{B^\delta} \right)$ είναι η χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων του κόμβου n_δ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ ($\delta \in \Delta$)

Οι πρώτοι δύο περιορισμοί σχετίζονται και με την ελαχιστοποίηση της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης.

Στη συνέχεια ακολουθεί η διατύπωση της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης της προσέγγισης **mGA-CVaR-SD**.

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα χρόνου απόστασης της κάθε προκαθορισμένης διαδρομής $\delta \in \Delta$, πραγματοποιείται υπολογισμός των πορειών (trajectories) των οχημάτων κατά τη διάρκεια της περιόδου μεταξύ των κόμβων και αθροίζεται ο χρόνος αναμονής σε κάθε κόμβο της διαδρομής χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η ουρά των οχημάτων στον κάθε κόμβο, όπως και ο ρυθμός συσσώρευσης και εκκένωσης της ουράς. Θεωρείται δηλαδή ότι η ουρά σχηματίζεται «κατακόρυφα» στη γραμμή στάσης (stopline) και όχι κατά μήκος του συνδέσμου. Η περίοδος σηματοδότησης διαχωρίζεται σε υποδιαστήματα του ενός δευτερολέπτου ($\Delta t \in [0, C]$). Σε κάθε υποδιάστημα Δt μία νέα πορεία εκκινεί από τον πρώτο κόμβο της πρωτεύουσας ($n_\delta = 1_\delta$) και δευτερεύουσας κατεύθυνσης ($\overline{n_\delta} = \overline{N_{\delta_\delta}}$) της διαδρομής δ . Η πορεία της πρωτεύουσας κατεύθυνσης που εκκινεί σε χρόνο Δt από τον πρώτο κόμβο συμβολίζεται με $Traj_{\Delta t}^\delta$ και της δευτερεύουσας κατεύθυνσης με $\overline{Traj_{\Delta t}^\delta}$. Η χρονική εξέλιξη της πορείας κατά μήκος της διαδρομής των κόμβων της υπολογίζεται ανάλογα με τον χρόνο άφιξης κατά τη διάρκεια της πράσινης ένδειξης ή όχι σε έναν κόμβο. Η πορεία του $Traj_{\Delta t}^\delta \left(\overline{Traj_{\Delta t}^\delta} \right)$ περιγράφεται από τρεις συνιστώσες:

- τη θέση της πορείας $Traj_{\Delta t}^\delta \left(\overline{Traj_{\Delta t}^\delta} \right)$ που αντιστοιχεί στους διαδοχικούς κόμβους $n_\delta = [1_\delta, 2_\delta, \dots, N_{\delta_\delta}]$ ($\overline{n_\delta} = [\overline{N_\delta}, (\overline{N_\delta} - 1)_\delta, \dots, 2_\delta, 1_\delta]$) της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ

- τον χρόνο άφιξης σε έναν κόμβο $\alpha_{\Delta t}^{n_\delta} \left(\overline{\alpha_{\Delta t}^{n_\delta}} \right)$ της πορείας $Traj_{\Delta t}^\delta \left(\overline{Traj_{\Delta t}^\delta} \right)$, που αντιστοιχεί στο άθροισμα του χρόνου αναχώρησης από τον προηγούμενο κόμβο και του χρόνου διάνυσης της απόστασης μεταξύ των δύο κόμβων.
- τον χρόνο αναχώρησης από έναν κόμβο $t_{\Delta t}^{n_\delta} \left(\overline{t_{\Delta t}^{n_\delta}} \right)$ της πορείας $Traj_{\Delta t}^\delta \left(\overline{Traj_{\Delta t}^\delta} \right)$, που αντιστοιχεί στο άθροισμα του χρόνου άφιξης στον κόμβο και στον χρόνο αναμονής στον κόμβο για την έναρξη της πράσινης ένδειξης της συντονισμένης ομάδας λωρίδων.

Έτσι σε κάθε κόμβο $n_\delta(\overline{n_\delta})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης υπολογίζονται οι χρόνοι έναρξης, $s_{n_\delta}^\delta \left(\overline{s_{n_\delta}^\delta} \right)$, και λήξης, $e_{n_\delta}^\delta \left(\overline{e_{n_\delta}^\delta} \right)$, της πράσινης ένδειξης:

$$\begin{aligned} s_{n_\delta}^\delta &= \text{mod}(o_{n_\delta}^\delta - o_{1_\delta}^\delta, C) \\ \overline{s_{n_\delta}^\delta} &= \text{mod}(\overline{o_{n_\delta}^\delta} - \overline{o_{N_\delta}^\delta}, C) \end{aligned} \quad (5-55)$$

όπου $o_{n_\delta}^\delta \left(\overline{o_{n_\delta}^\delta} \right)$ είναι η χρονική μετατόπιση της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ .

Η συσχέτιση των χρονικών μετατοπίσεων $(o_{n_\delta}^\delta \text{ και } \overline{o_{n_\delta}^\delta})$ των κόμβων των δύο κατευθύνσεων των διαδρομών μεταξύ τους περιγράφεται από την εξίσωση (5-44), ενώ η συσχέτιση της χρονικής μετατόπισης του προγράμματος σηματοδότησης ενός κόμβου w_n και της χρονικής μετατόπισης της πρωτεύουσας κατεύθυνσης της κάθε διαδρομής περιγράφεται από την εξίσωση (5-45).

Ο χρόνος άφιξης της πορείας $Traj_{\Delta t}^\delta \left(\overline{Traj_{\Delta t}^\delta} \right)$ στον κόμβο $n_\delta(\overline{n_\delta})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης αναχωρώντας από τον προηγούμενο κόμβο είναι:

$$\begin{aligned} \alpha_{\Delta t}^{n_\delta} &= \text{mod}(t_{\Delta t}^{n_\delta-1} + T_{n_\delta}^\delta - T_{n_\delta-1}^\delta, C) \\ \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_\delta}} &= \text{mod}(\overline{t_{\Delta t}^{n_\delta+1}} + \overline{T_{n_\delta}^\delta} - \overline{T_{n_\delta+1}^\delta}, C) \end{aligned} \quad (5-56)$$

όπου

$n_\delta(\overline{n_\delta})$: ο κόμβος προς ανάλυση για την πρωτεύουσα (δευτερεύουσα) κατεύθυνση της διαδρομής δ

$n_\delta - 1(\overline{n_\delta + 1})$: ο προηγούμενος κόμβος για την πρωτεύουσα (δευτερεύουσα) κατεύθυνση της διαδρομής δ

$T_{n_\delta}^\delta \left(\overline{T_{n_\delta}^\delta} \right)$: ο χρόνος διάνυσης στην πρωτεύουσα (δευτερεύουσα) κατεύθυνση μεταξύ του πρώτου κόμβου της αντίστοιχης κατεύθυνσης της διαδρομής δ και του κόμβου $n_\delta(\overline{n_\delta})$

Για τον υπολογισμό του χρόνου αναμονής της πορείας $Traj_{\Delta t}^{\delta}$ ($\overline{Traj_{\Delta t}^{\delta}}$) στο κόμβο $n_{\delta}(\overline{n_{\delta}})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

$$SD_{\Delta t}^{n_{\delta}} = \begin{cases} 0 & s_{n_{\delta}}^{\delta} \leq \alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}} < e_{n_{\delta}}^{\delta} \\ 0 & \alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}} < e_{n_{\delta}}^{\delta} < s_{n_{\delta}}^{\delta} \\ 0 & e_{n_{\delta}}^{\delta} < s_{n_{\delta}}^{\delta} \leq \alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}} \\ s_{n_{\delta}}^{\delta} - \alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}} & \alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}} < s_{n_{\delta}}^{\delta} < e_{n_{\delta}}^{\delta} \\ mod(C - \alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}} + s_{n_{\delta}}^{\delta}, C) & s_{n_{\delta}}^{\delta} < e_{n_{\delta}}^{\delta} \leq \alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}} \end{cases} \quad \text{αν} \quad (5-57)$$

$$\overline{SD_{\Delta t}^{n_{\delta}}} = \begin{cases} 0 & \overline{s_{n_{\delta}}^{\delta}} \leq \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}}} < \overline{e_{n_{\delta}}^{\delta}} \\ 0 & \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}}} < \overline{e_{n_{\delta}}^{\delta}} < \overline{s_{n_{\delta}}^{\delta}} \\ 0 & \overline{e_{n_{\delta}}^{\delta}} < \overline{s_{n_{\delta}}^{\delta}} \leq \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}}} \\ \overline{s_{n_{\delta}}^{\delta}} - \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}}} & \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}}} < \overline{s_{n_{\delta}}^{\delta}} < \overline{e_{n_{\delta}}^{\delta}} \\ mod(C - \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}}} + \overline{s_{n_{\delta}}^{\delta}}, C) & \overline{s_{n_{\delta}}^{\delta}} < \overline{e_{n_{\delta}}^{\delta}} \leq \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}}} \end{cases} \quad \text{αν}$$

Ο χρόνος αναχώρησης της πορείας $Traj_{\Delta t}^{\delta}$ ($\overline{Traj_{\Delta t}^{\delta}}$) από τον κόμβο $n_{\delta}(\overline{n_{\delta}})$ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης είναι:

$$t_{\Delta t}^{n_{\delta}} = \alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}} + SD_{\Delta t}^{n_{\delta}} \quad (5-58)$$

$$\overline{t_{\Delta t}^{n_{\delta}}} = \overline{\alpha_{\Delta t}^{n_{\delta}}} + \overline{SD_{\Delta t}^{n_{\delta}}}$$

Για την κάθε πορεία $Traj_{\Delta t}^{\delta}$ ($\overline{Traj_{\Delta t}^{\delta}}$) υπολογίζεται συνολικά ο χρόνος αναμονής λόγω κόκκινης ένδειξης στην πρωτεύουσα και δευτερεύουσα κατεύθυνση αντίστοιχα και συνολικά ο χρόνος αναμονής της κάθε κατεύθυνσης της διαδρομής δ , που είναι:

$$SD^{\delta} = \sum_{\Delta t=1}^C \sum_{n_{\delta}=1_{\delta}}^{N_{\delta}} SD_{\Delta t}^{n_{\delta}} \quad (5-59)$$

$$\overline{SD^{\delta}} = \sum_{\Delta t=1}^C \sum_{\overline{n_{\delta}}=\overline{1_{\delta}}}^{\overline{N_{\delta}}} \overline{SD_{\Delta t}^{n_{\delta}}}$$

Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση της προσέγγισης **mGA-CVaR-SD** που ο αλγόριθμος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει είναι η ελαχιστοποίηση του CVaR του χρόνου αναμονής των οχημάτων λόγω έλλειψης συντονισμού κατά μήκος των προκαθορισμένων αρτηριών του δικτύου. Ως απώλειες σε αυτή την προσέγγιση θεωρείται ο χρόνος αναμονής (SD_i) των οχημάτων της διαδρομής που παρουσιάζουν διακοπτόμενη διέλευση για όλες τις διαδρομές του δικτύου ανά χρονικό βήμα i :

$$SD_i = \sum_{\delta=1}^{\Delta} (SD^{\delta} v_i^{\delta} + \overline{SD^{\delta}} \overline{v_i^{\delta}}) \quad (5-60)$$

Ως πιθανότητα, p_{SD_i} , εμφάνισης αυτής της απώλειας ορίζεται ο λόγος του αριθμού οχημάτων που βιώνουν αυτή την απώλεια ($v_{SD_i} = \sum_{\delta=1}^{\Delta} v_i^{\delta} + \overline{v_i^{\delta}}$) στο χρονικό βήμα i προς το συνολικό αριθμό οχημάτων της εκτεταμένης περιόδου ανάλυσης ($v_{SD} = \sum_i \sum_{\delta=1}^{\Delta} v_i^{\delta} + \overline{v_i^{\delta}}$):

$$p_{SD_i} = v_{SD_i} / v_{SD} = \sum_{\delta=1}^{\Delta} (v_i^{\delta} + \overline{v_i^{\delta}}) / \sum_i \sum_{\delta=1}^{\Delta} (v_i^{\delta} + \overline{v_i^{\delta}}) \quad (5-61)$$

Έτσι σύμφωνα με τη επέκταση της θεώρησης των Rockafellar & Uryasev (2002) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, η διατύπωση της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης της προσέγγισης **mGA-CVaR-SD** είναι η ακόλουθη:

$$CVaR - SD_a(\mathbf{g}, \mathbf{w}, \xi_{SD}) = \xi_{SD} + \frac{1}{(1-a)} \sum_{i=1}^I p_{SD_i} \cdot \max\{(SD_i(\mathbf{g}, \mathbf{w}) - \xi_{SD}), 0\} \quad (5-62)$$

όπου:

$\mathbf{g}$ και $\mathbf{w}$ είναι τα διανύσματα τα οποία καθορίζουν τις συνθήκες απωλειών του προβλήματος που υπεισέρχονται στη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου. Το $\mathbf{g}$ περιλαμβάνει τους χρόνους πρασίνου, g_{φ}^n , των N_{φ}^n φάσεων των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$) και το $\mathbf{w}$ περιλαμβάνει τις χρονικές μετατοπίσεις w^n της έναρξης των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$).

α είναι το επίπεδο εμπιστοσύνης.

ξ_{SD} είναι μία επιπλέον μεταβλητή του προβλήματος, που αντιστοιχεί στο VaR_{α} για το επίπεδο εμπιστοσύνης.

SD_i είναι ο χρόνος αναμονής των οχημάτων που παρουσιάζουν διακοπόμενη διέλευση αναλύοντας όλες τις Δ προκαθορισμένες διαδρομές του δικτύου στο χρονικό βήμα i και υπολογίζεται από τις εξισώσεις (5-55)-(5-60).

p_{SD_i} είναι η πιθανότητα εμφάνισης της απώλειας που υπολογίζεται από την εξίσωση (5-61).

Οι περιορισμοί που σχετίζονται με την ελαχιστοποίηση της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης της προσέγγισης **mGA-CVaR-SD** είναι οι ακόλουθοι:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{min} \leq \sum_{N_{\varphi}^n} L_{\varphi}^n + \sum_{N_{\varphi}^n} g_{\varphi}^n \leq C_{max} \quad , \quad \forall n \in N \\ L_b \leq g_{\varphi}^n \leq U_b \\ 0 \leq w^n \leq C \end{array} \right\} \quad (5-63)$$

όπου

C_{max} είναι η μέγιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης

C_{min} είναι η ελάχιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης

L_φ^n είναι ο χαμένος χρόνος (lost time) της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_\varphi^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$)

g_φ^n είναι ο χρόνος πρασίνου της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_\varphi^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$)

L_b είναι το κατώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου φάσης

U_b είναι το ανώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο μέγιστος χρόνος πρασίνου φάσης

w^n είναι η χρονική μετατόπιση του προγράμματος τους κόμβου n ($n \in N$)

C είναι η περίοδος σηματοδότησης

Οι πρώτοι δύο περιορισμοί σχετίζονται και με την ελαχιστοποίηση της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης.

5.2.1.3 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων

Η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων με τις δύο προσεγγίσεις συνδυάζοντας τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων για την προσέγγιση **mGA-CVaR-NSV** είναι η εξής:

$$\min_x \{CVaR - d_a(\mathbf{g}, \xi_a), CVaR - NSV_a(\mathbf{g}, \mathbf{w}, \xi_{NSV})\}$$

με περιορισμούς

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{min} \leq \sum_{N_\varphi^n} L_\varphi^n + \sum_{N_\varphi^n} g_\varphi^n \leq C_{max} \quad , \quad \forall n \in N \\ L_b \leq g_\varphi^n \leq U_b \\ 0 \leq w^n \leq C \\ -G_{min}^\delta < I_{L,n_\delta}^\delta < G_{min}^\delta \quad \text{και} \quad -\overline{G_{min}^\delta} < \overline{I_{L,n_\delta}^\delta} < \overline{G_{min}^\delta} \\ -G_{min}^\delta < I_{U,n_\delta}^\delta < G_{min}^\delta \quad \text{και} \quad -\overline{G_{min}^\delta} < \overline{I_{U,n_\delta}^\delta} < \overline{G_{min}^\delta} \\ 0 \leq B^\delta \leq G_{min}^\delta \quad \text{και} \quad 0 \leq \overline{B^\delta} \leq \overline{G_{min}^\delta} \end{array} \right\} \quad (5-64)$$

όπου

$\mathbf{x} = [\mathbf{g}, \mathbf{w}, \xi_a, \xi_{NSV}]$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, τα οποία καθορίζουν τις συνθήκες απωλειών του προβλήματος.

$\mathbf{g}$ είναι το διάνυσμα των χρόνων πρασίνου, g_φ^n , των N_φ^n φάσεων των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$).

$\mathbf{w}$ είναι το διάνυσμα των χρονικών μετατοπίσεων w^n της έναρξης των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$).

ξ_d είναι μία επιπλέον μεταβλητή του προβλήματος της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης, που αντιστοιχεί στο $VaR - d_a$ για το επίπεδο εμπιστοσύνης α .

ξ_{NSV} είναι μία επιπλέον μεταβλητή του προβλήματος της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης, που αντιστοιχεί στο $VaR - NSV_a$ για το επίπεδο εμπιστοσύνης α .

$CVaR - d_a(\mathbf{g}, \xi_d)$ είναι η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση και υπολογίζεται από την εξίσωση (5-38).

$CVaR - NSV_a(\mathbf{g}, \xi_d)$ είναι η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση και υπολογίζεται από την εξίσωση (5-53).

C_{max} είναι η μέγιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης.

C_{min} είναι η ελάχιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης.

L_φ^n είναι ο χαμένος χρόνος (lost time) της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_\varphi^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$).

g_φ^n είναι ο χρόνος πρασίνου της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_\varphi^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$).

L_b είναι το κατώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου φάσης.

U_b είναι το ανώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο μέγιστος χρόνος πρασίνου φάσης.

w^n είναι η χρονική μετατόπιση του προγράμματος τους κόμβου n ($n \in N$).

C είναι η περίοδος σηματοδότησης.

$G_{min}^\delta \left(\overline{G_{min}^\delta} \right)$ είναι ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ ($\delta \in \Delta$).

$I_{L, n_\delta}^\delta \left(\overline{I_{L, n_\delta}^\delta} \right)$ είναι η κάτω παρεμβολή στη δυνητική χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων του κόμβου n_δ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ ($\delta \in \Delta$).

$I_{U,n_\delta}^\delta \left(\overline{I_{U,n_\delta}^\delta} \right)$ είναι η άνω παρεμβολή στη δυνητική χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων του κόμβου n_δ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ ($\delta \in \Delta$).

$B^\delta \left(\overline{B^\delta} \right)$ είναι η χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων του κόμβου n_δ της πρωτεύουσας (δευτερεύουσας) κατεύθυνσης της διαδρομής δ ($\delta \in \Delta$).

Η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων για την προσέγγιση **mGA-CVaR-SD** είναι η εξής:

$$\begin{aligned} & \min_x \{CVaR - d_a(\mathbf{g}, \xi_a), CVaR - SD_a(\mathbf{g}, \mathbf{w}, \xi_{SD})\} \\ & \text{με περιορισμούς} \\ & \left\{ \begin{array}{l} C_{min} \leq \sum_{N_\varphi^n} L_\varphi^n + \sum_{N_\varphi^n} g_\varphi^n \leq C_{max} \quad , \quad \forall n \in N \\ L_b \leq g_\varphi^n \leq U_b \\ 0 \leq w^n \leq C \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (5-65)$$

όπου

$\mathbf{x} = [\mathbf{g}, \mathbf{w}, \xi_a, \xi_{SD}]$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, τα οποία καθορίζουν τις συνθήκες απωλειών του προβλήματος.

$\mathbf{g}$ είναι το διάνυσμα των χρόνων πρασίνου, g_φ^n , των N_φ^n φάσεων των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$).

$\mathbf{w}$ είναι το διάνυσμα των χρονικών μετατοπίσεων w^n της έναρξης των προγραμμάτων σηματοδότησης όλων των κόμβων n ($n \in N$).

ξ_a είναι μία επιπλέον μεταβλητή του προβλήματος της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης, που αντιστοιχεί στο $VaR - d_a$ για το επίπεδο εμπιστοσύνης α .

ξ_{SD} είναι μία επιπλέον μεταβλητή του προβλήματος της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης, που αντιστοιχεί στο $VaR - SD_a$ για το επίπεδο εμπιστοσύνης α .

$CVaR - d_a(\mathbf{g}, \xi_a)$ είναι η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση και υπολογίζεται από την εξίσωση (5-38).

$CVaR - SD_a(\mathbf{g}, \xi_a)$ είναι η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση και υπολογίζεται από την εξίσωση (5-62).

C_{max} είναι η μέγιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης.

C_{min} είναι η ελάχιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης.

L_φ^n είναι ο χαμένος χρόνος (lost time) της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_\varphi^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$).

g_φ^n είναι ο χρόνος πρασίνου της κάθε φάσης φ ($\varphi \in N_\varphi^n$) για τον κάθε κόμβο n ($n \in N$).

L_b είναι το κατώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου φάσης.

U_b είναι το ανώτατο όριο των μεταβλητών, δηλαδή ο μέγιστος χρόνος πρασίνου φάσης.

w^n είναι η χρονική μετατόπιση του προγράμματος τους κόμβου n ($n \in N$).

C είναι η περίοδος σηματοδότησης.

Οι ψευδοκώδικες της αλγοριθμικής διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου με τη μέθοδο mGA-CVaR-NSV και mGA-CVaR-SD παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

5.2.2 Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος

Στην παρούσα προσέγγιση για την εύρεση της βέλτιστης λύσης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου στο δίκτυο έχει χρησιμοποιηθεί η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση δύο αντικειμενικών συναρτήσεων μέσω του γενετικού αλγορίθμου πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, gamultiobj, όπως είναι υλοποιημένος στο MATLAB R2014a.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί έναν ελεγχόμενο, ελιτιστικό γενετικό αλγόριθμο, που είναι μια παραλλαγή του NSGA-II του Deb (2001). Οι ελιτιστικοί γενετικοί αλγόριθμοι ευνοούν τις λύσεις με καλύτερη απόδοση, ενώ οι ελεγχόμενοι ελιτιστικοί γενετικοί αλγόριθμοι ευνοούν τις λύσεις που ενισχύουν την αύξηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού, ακόμη και αν έχουν χαμηλότερη απόδοση. Η διατήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού είναι σημαντική στη σύγκλιση για την εύρεση ενός βέλτιστου μετώπου Pareto. Η ποικιλομορφία αυτή διατηρείται στην εξέλιξη του αλγορίθμου ελέγχοντας τον αριθμό των καλύτερων μελών του πληθυσμού, αλλά και ευνοώντας τα μέλη εκείνα που είναι σχετικά πιο απομακρυσμένα από το μέτωπο. Ο αλγόριθμος τερματίζει την αναζήτηση αν η εξάπλωση των μελών είναι σχετικά μικρή.

Η γενική διατύπωση του αλγορίθμου είναι παραπλήσια της διατύπωσης του γενετικού αλγορίθμου (Mathworks, 2018):

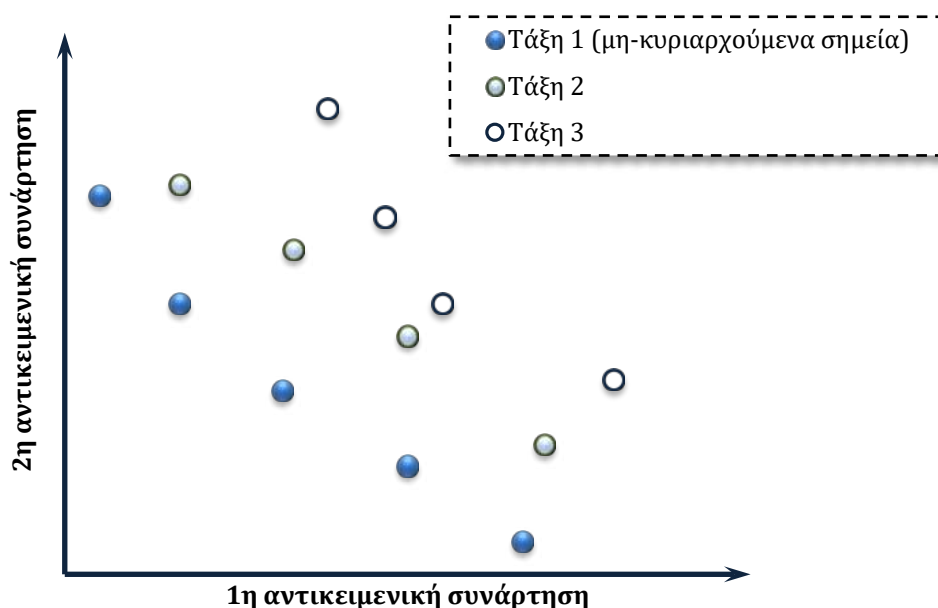
Βήμα 1: Εισαγωγή των μεταβλητών, εξισώσεων και περιορισμών. Αρχικοποίηση με τυχαία δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού Π , με N υποψήφιες λύσεις.

Βήμα 2: Αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης χρησιμοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση και μετατρέποντάς την αξιολόγηση σε σταθμισμένη αξιολόγηση (πόσο κοντά στην αποδεκτή λύση είναι;).

- Βήμα 3: Επιλογή γονέων βάσει της αξιολόγησής τους.
- Βήμα 4: Δημιουργία απογόνων από τους γονείς χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της μετάλλαξης (mutation) των δύο απογόνων μέσω της πιθανότητα μετάλλαξης (p_m) και τη διαδικασία της διασταύρωσης (crossover) σε ένα τυχαίο σημείο για να δημιουργηθούν δύο απόγονοι μέσω της πιθανότητας διασταύρωσης (p_c).
- Βήμα 5: Αξιολόγηση των απογόνων μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης και της εφικτότητας τους.
- Βήμα 6: Συνδυασμός του υφιστάμενου πληθυσμού και των απογόνων σε ένα μητρώο διαμορφώνοντας τον εκτεταμένο πληθυσμό.
- Βήμα 7: Υπολογισμός της κατάταξης και της απόστασης συνωστισμού (crowding distance) για όλα τα μέλη του εκτεταμένου πληθυσμού.
- Βήμα 8: Περικοπή του εκτεταμένου πληθυσμού σε N μέλη διατηρώντας τον κατάλληλο αριθμό ατόμων σε κάθε τάξη.
- Βήμα 9: Αντικατάσταση του υφιστάμενου πληθυσμού με το νέο πληθυσμό.
- Βήμα 10: Επιστροφή στο βήμα 2 ή τερματισμός αν ισχύει κάποια συνθήκη τερματισμού, που συνήθως είναι η σύγκλιση των λύσεων σε ένα αποδεκτό όριο ή η υπέρβαση του επιτρεπόμενου ορίου επαναλήψεων ή η ύπαρξη μικρότερης της αποδεκτής τιμής της εξάπλωση των μελών.

Οι βασικές διαφοροποιήσεις στον ορισμό της αλγοριθμικής διαδικασίας με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις εντοπίζονται στη διαδικασία επιλογής μελών στο νέο πληθυσμό βάσει της κατάταξης των μελών σε τάξεις και της απόστασης συνωστισμού και στην επιπλέον συνθήκη τερματισμού της εξάπλωσης των μελών.

Η κατάταξη των εφικτών μελών σε τάξεις πραγματοποιείται μέσω του ορισμού της κυριαρχίας (dominance) των σημείων που βασίζεται στη σύγκριση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων μεταξύ των σημείων (βλ. Σχήμα 5-11). Στην πρώτη τάξη συμπεριλαμβάνονται τα μέλη που υπερέχουν σε σχέση με όλα τα άλλα μέλη (μη-κυριαρχούμενα σημεία). Στην δεύτερη τάξη συμπεριλαμβάνονται τα μέλη που δεν υπερέχουν σε σχέση μόνο με τα μέλη της πρώτης τάξης και ούτω καθεξής. Τα μη εφικτά μέλη συμπεριλαμβάνονται σε υψηλότερες τάξεις από τα εφικτά μέλη. Τα μέλη που ανήκουν σε χαμηλότερες τάξεις έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής στο νέο πληθυσμό.



Σχήμα 5-11: Κατάταξη μελών πληθυσμού σε τάξεις βάσει υπεροχής στο γενετικό αλγόριθμο πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων

Η απόσταση συνωστισμού μετράει την εγγύτητα ενός μέλους με το κοντινότερο γειτονικό μέλος. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την απόσταση μεταξύ των μελών της ίδια τάξης στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Τα ακραία σημεία έχουν άπειρη απόσταση συνωστισμού, ενώ για τα υπόλοιπα μέλη η απόσταση συνωστισμού σε κάθε διάσταση (αντικειμενική συνάρτηση) υπολογίζεται ως το άθροισμα των κανονικοποιημένων απόλυτων αποστάσεων μεταξύ των δύο γειτονικών μελών. Τα μέλη που ανήκουν σε ίδια τάξη και έχουν μεγαλύτερη απόσταση συνωστισμού έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής στο νέο πληθυσμό. Η απόσταση συνωστισμού είναι επίσης και ένας παράγοντας της εξάπλωσης των μελών του πληθυσμού που χρησιμοποιείται ως κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου.

Η εξάπλωση του πληθυσμού μετράει την κίνηση του συνόλου Pareto, η οποία υπολογίζεται βάσει της τυπικής απόκλισης των πεπερασμένων αποστάσεων συνωστισμού των μελών που συμπεριλαμβάνονται στο μέτωπο Pareto και των διαφορών των αντικειμενικών συναρτήσεων στα μικρότερα σημεία μεταξύ της υφιστάμενης και της προηγούμενης επανάληψης. Η εξάπλωση του πληθυσμού θεωρείται μικρή όταν οι ακραίες τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων δεν αλλάζουν πολύ μεταξύ των επαναλήψεων και όταν τα μέλη του μετώπου Pareto κατανέμονται ομοιόμορφα. Η εξάπλωση χρησιμοποιείται ως συνθήκη τερματισμού του αλγορίθμου, όταν αυτή δεν τροποποιείται μεταξύ των επαναλήψεων και όταν η τελευταία τιμή της είναι μικρότερη από το μέσο όρο των πρόσφατων τιμών εξάπλωσης.

Στο πλαίσιο λοιπόν του ορισμού του προβλήματος ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο αντιστρόφων αντικειμενικών συναρτήσεων, ο γενετικός αλγόριθμος πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων εξάγει ως αποτέλεσμα τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων της

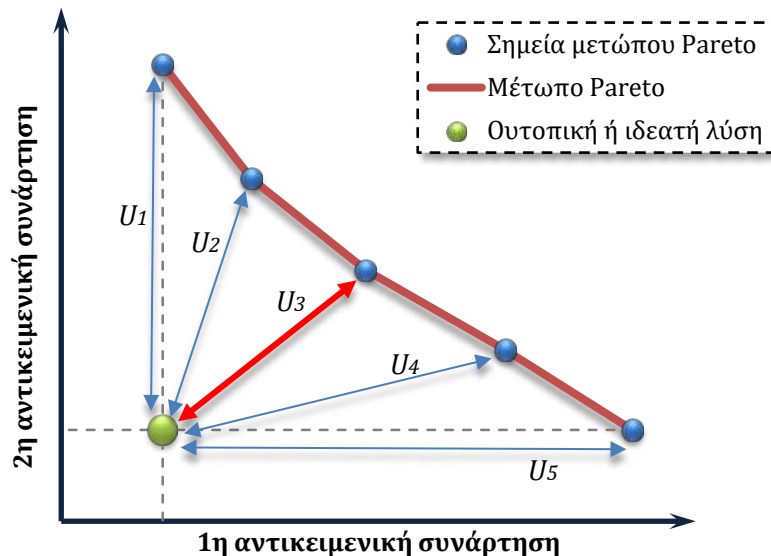
μη-κυριαρχούμενης λύσης (non-dominance) που αποτελούν το μέτωπο Pareto (Pareto Front). Βασικό πλεονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων στην αντιμετώπιση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων είναι ο τρόπος εξέλιξης του πληθυσμού των λύσεων του προβλήματος που τις καθιστά πιο γρήγορες και αποτελεσματικές στην απόδοση της μορφής του μετώπου Pareto ακόμα και στην περίπτωση κοίλων ή διακοπτόμενων μετώπων (Coello, 2006). Το επόμενο βήμα στη βελτιστοποίηση του προβλήματος είναι η επιλογή από το μέτωπο Pareto μίας λύσης ως βέλτιστης, ως το σημείο καλύτερου συμβιβασμού των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων είτε κατά την κρίση του αναλυτή είτε χρησιμοποιώντας ένα μέτρο συνάθροισης των αντικειμενικών συναρτήσεων, δηλαδή χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση χρησιμότητας. Στην παρούσα προσέγγιση για την επιλογή της βέλτιστης λύσης από το μέτωπο Pareto επιλέχθηκε η μέθοδος της κοντινότερης εφικτής λύσης ως προς την ουτοπική (ιδεατή) λύση, που δεν είναι εφικτή, μέσω της Ευκλείδειας απόστασης. Η διατύπωση της συνάρτησης χρησιμότητας είναι η ακόλουθη:

$$\min U(x) = \sqrt{\sum_{w=1}^2 [f'_w(x) - O_w]^2} \quad (5-66)$$

όπου $U(x)$ είναι η συνάρτηση χρησιμότητας για τις μεταβλητές απόφασης, $f'_1(x), f'_2(x)$ είναι οι μετασχηματισμένες αντικειμενικές συναρτήσεις και O_w είναι το μετασχηματισμένο σημείο ουτοπικής λύσης.

Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων μετασχηματίζονται έτσι ώστε το εύρος της διακύμανσής τους να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Το μετασχηματισμένο σημείο ουτοπικής λύσης έχει τις ακόλουθες τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων:

$$O_1 = \min f'_1(x) \text{ και } O_2 = \min f'_2(x) \quad (5-67)$$



Σχήμα 5-12: Επιλογή βέλτιστου σημείου από το μέτωπο Pareto

5.2.3 Εκτίμηση και ανάλυση ρίσκου χρόνου μετακίνησης δυναμικής μεσοσκοπικής προσομοίωσης δικτύου

Στην προτεινόμενη ανάλυση ρίσκου της απόδοσης ενός κυκλοφοριακού δικτύου ως απώλεια έχει θεωρηθεί η απώλεια του χρόνου που αντιστοιχεί στην καθυστέρηση με την οποία επιβαρύνεται ένας χρήστης του συγκοινωνιακού δικτύου για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το ρίσκο της ενδεχόμενης καθυστέρησης για έναν χρήστη εξαρτάται από τον χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται το ρίσκο. Οι απώλειες στη μετακίνηση των χρηστών, όταν αναλύουμε τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο σε έναν χρονικό ορίζοντα, εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η μετακίνηση του κάθε χρήστη και επομένως από τις συνθήκες που θα επικρατούν στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της κάθε διαδρομής. Ανάλογα λοιπόν με τις συνθήκες συμφοράς στο δίκτυο, οι χρήστες βιώνουν διαφορετικά επίπεδα απωλειών χρόνου μετακίνησης (καθυστερήσεων) κατά τη διαδρομή τους. Αναλύοντας την απόδοση του δικτύου δυναμικά για ένα δεδομένο χρονικό ορίζοντα παρατηρούνται διαφορετικά επίπεδα καθυστέρησης από διαφορετικά ποσοστά χρηστών. Αυτές οι απώλειες κυμαίνονται από μηδενικές τιμές έως τις μέγιστες τιμές καθυστέρησης που εμφανίζονται στο δίκτυο. Οι απώλειες στο χρόνο μετακίνησης λόγω καθυστερήσεων, $z_{d_i}^x = f(x, y_i)$, που βιώνουν οι χρήστες θεωρούνται ως η συνέπεια της κυκλοφοριακής ζήτησης που συγκεντρώνεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων, y_i , εντός του χρονικού ορίζοντα ανάλυσης, $[i=1, \dots, I]$, και των παραμέτρων που ορίζουν τις μεταβλητές αποφάσεως του δικτύου, x (όπως ρυθμίσεις σηματοδότησης, γεωμετρικά χαρακτηριστικά κτλ.).

Στο Aimsun υπολογίζεται η συνολική απώλεια χρόνου μετακίνησης, TTL_{veh}^x , ενός οχήματος veh στο δίκτυο αφαιρώντας από τον προσομοιωμένο χρόνο μετακίνησης τον ιδανικό χρόνο μετακίνησης, που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερης ροής. Ο προσομοιωμένος χρόνος μετακίνησης αντιστοιχεί στο δυναμικό μεσοσκοπικό καταμερισμό των μετακινήσεων με τις ρυθμίσεις σηματοδότησης, x . Για το κάθε όχημα veh υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση ανά χιλιόμετρο, DT_{veh}^x , διαιρώντας τη συνολική απώλεια χρόνου μετακίνησης, TTL_{veh}^x , με την απόσταση μετακίνησης, D_{veh}^x , του οχήματος στο δίκτυο:

$$DT_{veh}^x = \frac{TTL_{veh}^x}{D_{veh}^x} \quad (5-68)$$

Σε κάθε βήμα προσομοίωσης, i , υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση ανά όχημα ανά χιλιόμετρο, $z_{d_i}^x$, από όλα τα οχήματα, $N_{veh,i}^x$, που εξέρχονται από το δίκτυο στο βήμα αυτό:

$$z_{d_i}^x = \frac{\sum_{veh=1}^{N_{veh,i}^x} DT_{veh}^x}{N_{veh,i}^x} \quad (5-69)$$

Η πιθανότητα, $p_{d_i}^x$, εμφάνισης αυτών των συνεπειών λαμβάνεται στη παρούσα θεώρηση ως το ποσοστό των χρηστών που βιώνει το κάθε επίπεδο καθυστέρησης έναντι όλων των χρηστών του δικτύου στον χρονικό ορίζοντα ανάλυσης.

$$p_{d_i}^x = \frac{N_{veh,i}^x}{\sum_{i=1}^I N_{veh,i}^x} \quad (5-70)$$

Οι απώλειες των χρονικών βημάτων ταξινομούνται με αύξουσα σειρά:

$$z_{d_1}^x < \dots < z_{d_m}^x < \dots < z_{d_q}^x \quad (5-71)$$

Το μέγεθος ρίσκου των απωλειών, R^x , λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές

$$R^x = \begin{cases} 0 & \text{με πιθανότητα } p_{d_0}^x \\ z_{d_1}^x & \text{με πιθανότητα } p_{d_1}^x \\ \vdots & \vdots \\ z_{d_m}^x & \text{με πιθανότητα } p_{d_m}^x \\ \vdots & \vdots \\ z_{d_q}^x & \text{με πιθανότητα } p_{d_q}^x \end{cases} \quad (5-72)$$

όπου $p_{d_0}^x = 1 - \sum_{m=1}^q p_{d_m}^x$.

Η Αξία σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR_a^x) μίας λύσης x για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης α είναι η ελάχιστη τιμή απώλειας του χρόνου μετακίνησης λόγω καθυστερήσεων, όπου η πιθανότητα παρατήρησης μεγαλύτερων απωλειών, είναι ίση ή μικρότερη του $(1 - \alpha)$. Το VaR_a^x των απωλειών λόγω καθυστερήσεων είναι:

$$VaR_a^x = z_{d_{m_a}}^x \quad (5-73)$$

Τέτοια ώστε ο δείκτης m_a να αντιστοιχεί στο επίπεδο εμπιστοσύνης α και να ισχύει:

$$\sum_{m=1}^{m_a} p_{d_m}^x \geq \alpha > \sum_{m=1}^{m_a-1} p_{d_m}^x \quad (5-74)$$

Η Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, $CVaR_a^x$) της λύσης x για το ίδιο επίπεδο εμπιστοσύνης, α , είναι η αναμενόμενη απώλεια του χρόνου μετακίνησης λόγω καθυστερήσεων καθ' όλη την περίοδο ανάλυσης στην περίπτωση υπέρβασης της τιμής VaR_a^x . Το $CVaR_a^x$ των απωλειών λόγω καθυστερήσεων είναι:

$$CVaR_a^x = \frac{1}{(1 - \alpha)} \left[\left(\sum_{m=1}^{m_a} p_{d_m}^x - \alpha \right) z_{d_{m_a}}^x + \sum_{m=m_a+1}^q p_{d_m}^x z_{d_m}^x \right] \quad (5-75)$$

Για κάθε εναλλακτική λύση, x , πραγματοποιείται δυναμική μεσοσκοπική προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών και εκτιμάται το $CVaR_a^x$ που της αντιστοιχεί. Η επιλογή της λύσης που προκρίνεται προς εφαρμογή είναι η λύση που έχει το χαμηλότερο $CVaR_a^x$.

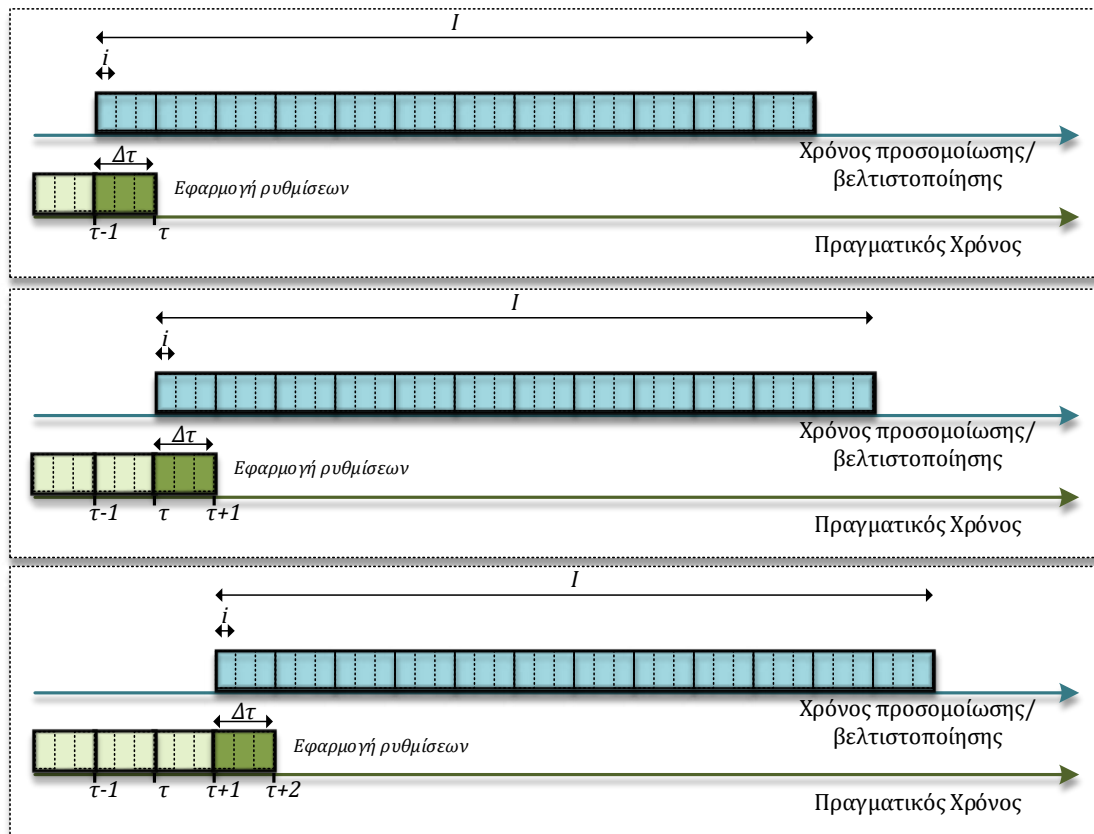
5.3 Διατύπωση μεσοσκοπικού προβλήματος βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου σε απευθείας σύνδεση

Το υποσύστημα εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα για τον σχεδιασμό της σηματοδότησης στο πλαίσιο μη απευθείας σύνδεσης εξειδικεύεται στη συνέχεια για την περίπτωση της απευθείας σύνδεσης.

Η διαδικασία εύρεσης εναλλακτικών ρυθμίσεων σηματοδότησης αναλύεται στο πλαίσιο ενός κυλιόμενου ορίζοντα που διαχωρίζεται σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα (βλ. Σχήμα 5-13). Η διαδικασία, που επαναλαμβάνεται σε κάθε διαδοχικό χρονικό διάστημα του κυλιόμενου ορίζοντα, έχει τρία κύρια μέρη:

- την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων για τον επόμενο κυλιόμενο ορίζοντα βάσει των κυκλοφοριακών φόρτων που έχουν προκύψει από τον δυναμικό καταμερισμό της κυκλοφορίας στο δίκτυο εφαρμόζοντας τις ρυθμίσεις του προηγούμενου χρονικού διαστήματος
- τη μεσοσκοπική προσομοίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών στο δίκτυο υπό δυναμικές συνθήκες με τις νέες ρυθμίσεις
- την αξιολόγηση των κυκλοφοριακών συνθηκών με τις δύο εναλλακτικές ρυθμίσεις χρησιμοποιώντας την ανάλυση ρίσκου και την επιλογή τελικώς των βέλτιστων σηματοδοτικών παραμέτρων που εφαρμόζονται στο δίκτυο για το επόμενο χρονικό διάστημα.

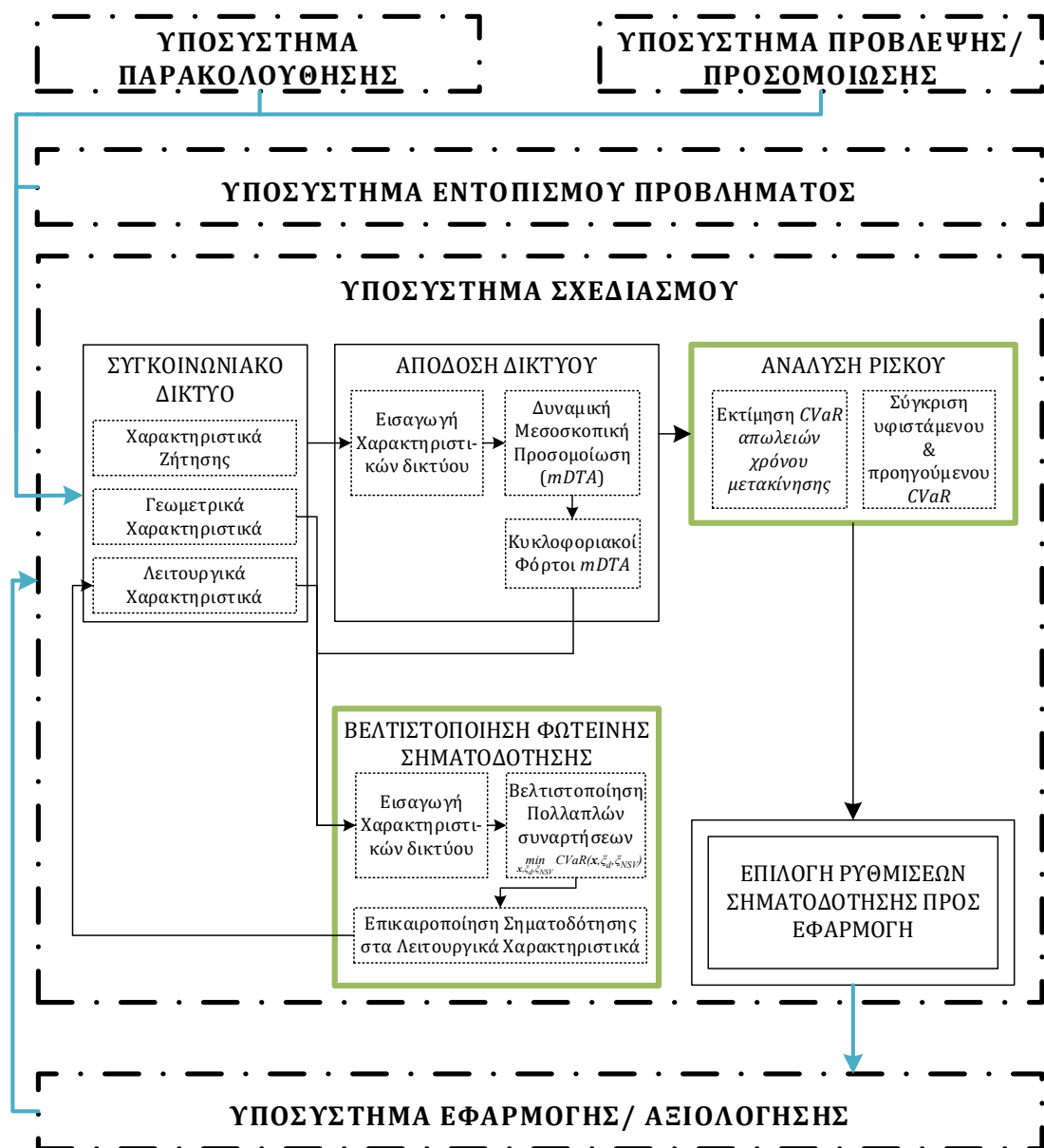
Η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται για κάθε χρονικό διάστημα του κυλιόμενου ορίζοντα ανάλυσης. Ο κυλιόμενος ορίζοντας επιλέγεται να είναι μία εκτεταμένη χρονική περίοδος ανάλυσης που να αντιπροσωπεύει όλη την εξέλιξη της λειτουργίας αιχμής του δικτύου, εκκινώντας από μη κορεσμένες συνθήκες και καταλήγοντας σε μη κορεσμένες συνθήκες. Η διάρκεια του κάθε χρονικού διαστήματος της διαδικασίας απευθείας σύνδεσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της περιόδου σηματοδότησης, έτσι ώστε να εξομαλύνονται οι διαφοροποιήσεις από περίοδο σε περίοδο. Ένας πρακτικός περιορισμός επιβάλλεται στη διάρκεια του διαστήματος ανάλυσης από τις διαδικασίες συλλογής, ανάλυσης και πρόβλεψης μετακινήσεων του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων, όπως και από τον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της σηματοδότησης.



Σχήμα 5-13: Λειτουργία κυλιόμενου ορίζοντα στη βελτιστοποίηση σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου σε απευθείας σύνδεση

Αρχικά πραγματοποιείται ρύθμιση και βαθμονόμηση του μεσοσκοπικού δυναμικού προτύπου η οποία πραγματοποιείται εκτός απευθείας σύνδεσης. Οι εργασίες που πραγματοποιούνται στο υποσύστημα σε κάθε χρονικό διάστημα του κυλιόμενου ορίζοντα παρουσιάζονται διαγραμματικά στο Σχήμα 5-14 και είναι οι ακόλουθες:

- Εισαγωγή των βασικών χαρακτηριστικών του δικτύου και κωδικοποίησή τους στο μεσοσκοπικό μοντέλο δυναμικού καταμερισμού (*mDTA*) και στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης της σηματοδότησης, όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 5.2. Σε κάθε χρονικό διάστημα τροποποιούνται τα χαρακτηριστικά της ζήτησης έτσι όπως προκύπτουν σε απευθείας σύνδεση από την επεξεργασία που γίνεται μέσω των υποσυστημάτων παρακολούθησης και πρόβλεψης κυκλοφοριακών συνθηκών. Σε περίπτωση συμβάντος που τροποποιεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως περιορισμός κίνησης σε κάποιο σύνδεσμο, απαγόρευση στρέφουσας κίνησης, μείωση χωρητικότητας συνδέσμου ή στρέφουσας κίνησης, τότε και αυτά τα χαρακτηριστικά επικαιροποιούνται τόσο στο μεσοσκοπικό μοντέλο όσο και στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης για την προβλεπόμενη χρονική διάρκεια των συμβάντων. Οι ρυθμίσεις σηματοδότησης επιπλέον τροποποιούνται σε κάθε χρονικό διάστημα που έχει προκύψει διαφοροποίηση της σηματοδότησης σε σχέση με το προηγούμενο διάστημα.



Σχήμα 5-14: Επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου σε απευθείας σύνδεση

- Μεσοσκοπική δυναμική προσομοίωση του δικτύου για τον εξεταζόμενο κυλιόμενο ορίζοντα βάσει του δυναμικού μητρώου μετακινήσεων και των υφιστάμενων ρυθμίσεων σηματοδότησης, δηλαδή των ρυθμίσεων που έχουν προκύψει από την προηγούμενη επανάληψη και έχουν εφαρμοστεί στο δίκτυο για το τρέχον χρονικό διάστημα. Στην παρούσα προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του Aimsun που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.3.3 με μεσοσκοπική προσέγγιση προσομοίωσης και εύρεση και επιλογή διαδρομών μέσω της δυναμικής ισορροπίας του χρήστη. Από το δυναμικό μεσοσκοπικό καταμερισμό προκύπτουν οι φόρτοι στους σηματοδοτούμενους κόμβους για τον κυλιόμενο ορίζοντα, οι οποίοι εισέρχονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης της σηματοδότησης για την εύρεση νέας πρότασης σηματοδότησης. Επιπλέον, οι κυκλοφοριακές συνθήκες

με την προηγούμενη σηματοδότηση εισέρχονται στην ανάλυση ρίσκου για την αξιολόγηση τους για τον εξεταζόμενο κυλιόμενο ορίζοντα.

- Βελτιστοποίηση φωτεινής σηματοδότησης δικτύου για τον εξεταζόμενο κυλιόμενο ορίζοντα. Τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου, καθώς και οι κυκλοφοριακοί φόρτοι ανά χρονικό διάστημα ανάλυσης εισέρχονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης για την εύρεση σηματοδοτικών ρυθμίσεων με ελαχιστοποίηση του ρίσκου καθυστερήσεων στο δίκτυο με χρήση του μοντέλου της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR). Η διαδικασία εύρεσης βέλτιστων ρυθμίσεων είναι αντίστοιχη με τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στα Κεφάλαια 5.2.1-5.2.2.
- Μεσοσκοπική δυναμική προσομοίωση του δικτύου για τον εξεταζόμενο κυλιόμενο ορίζοντα βάσει του δυναμικού μητρώου μετακινήσεων και των νέων ρυθμίσεων σηματοδότησης, δηλαδή των ρυθμίσεων που έχουν προκύψει από την παρούσα επανάληψη. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες με την υφιστάμενη σηματοδότηση εισέρχονται στην ανάλυση ρίσκου για την αξιολόγηση τους για τον εξεταζόμενο κυλιόμενο ορίζοντα.
- Ανάλυση ρίσκου χρόνου μετακίνησης για τον εξεταζόμενο κυλιόμενο ορίζοντα των δύο σεναρίων σηματοδότησης (των υφιστάμενων ρυθμίσεων και των προτεινόμενων ρυθμίσεων από την παρούσα επανάληψη). Τα στοιχεία απόδοσης του δικτύου από το δυναμικό μεσοσκοπικό καταμερισμό αναλύονται και πραγματοποιείται η εκτίμηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, CVaR) των απωλειών του χρόνου μετακίνησης στο δίκτυο με τις εναλλακτικές ρυθμίσεις σηματοδότησης. Ως απώλειες στο χρόνο μετακίνησης θεωρείται ο επιπλέον χρόνος μετακίνησης των χρηστών που υπερβαίνει τον χρόνο μετακίνησης στο δίκτυο υπό ιδανικές συνθήκες, ελεύθερης ροής. Η ανάλυση ρίσκου για την εκτεταμένη χρονική περίοδο προσομοίωσης παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.2.3.
- Επιλογή των βέλτιστων ρυθμίσεων σηματοδότησης. Το CVaR των δύο εναλλακτικών ρυθμίσεων σηματοδότησης χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης λύσης και την πρότασή της προς εφαρμογή. Η εναλλακτική με το χαμηλότερο CVaR των απωλειών του χρόνου μετακίνησης στο δίκτυο είναι η βέλτιστη πρόταση προς εφαρμογή.

5.4 Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου βάσει της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk) εξειδικεύοντας το προτεινόμενο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων για τις περιπτώσεις σηματοδότησης του μεμονωμένου κόμβου και του δικτύου σε απευθείας σύνδεση και μη. Ο

σκοπός της μεθόδου είναι η αξιόπιστη και αποτελεσματική ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας που ελαχιστοποιούν ή περιορίζουν τους χρονικά εξαρτώμενους κινδύνους και αβεβαιότητες του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση και τον περιορισμό του ρίσκου των χρόνων μετακίνησης των χρηστών σε μία χρονική περίοδο. Αναλυτικά αναφέρονται οι αντικειμενικές συναρτήσεις βελτιστοποίησης του κάθε προβλήματος, οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι αναζήτησης λύσεων και η αλγοριθμική διαδικασία υλοποίησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης του ρίσκου σε κάθε περίπτωση.

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογές Μεθοδολογίας

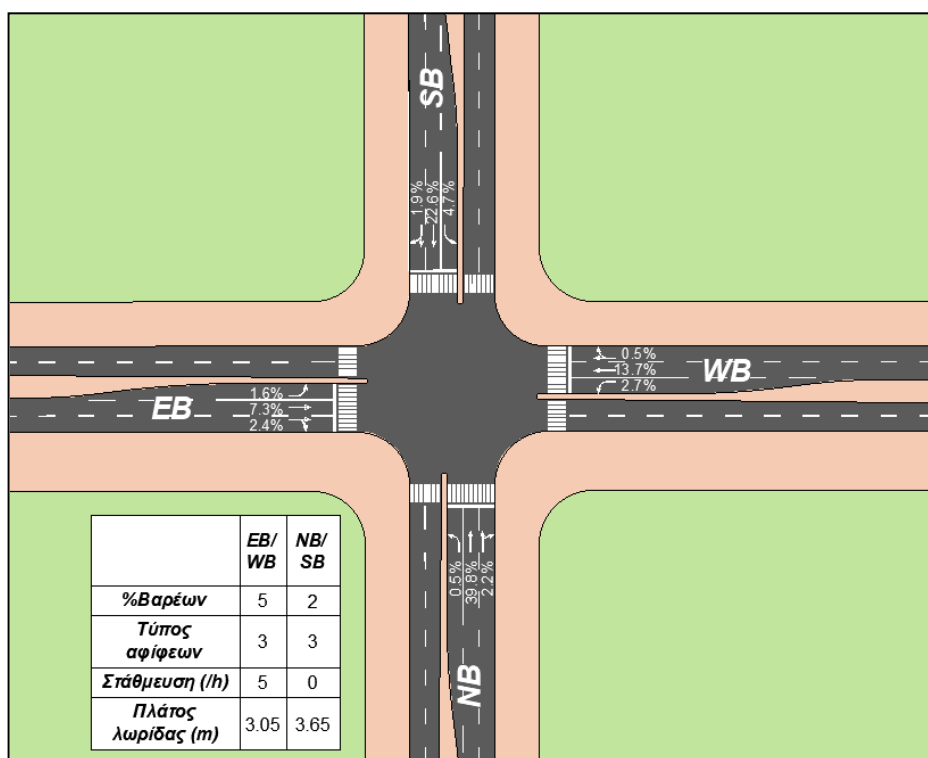
Η προτεινόμενη μεθοδολογία ελαχιστοποίησης ρίσκου σε μεσοσκοπικό επίπεδο για την εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης εφαρμόστηκε στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου και στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου. Ο κόμβος και το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των ωφελειών από τη χρήση της ελαχιστοποίησης του ρίσκου στην εύρεση των ρυθμίσεων σηματοδότησης προέρχονται από αντίστοιχες εφαρμογές της βιβλιογραφίας. Στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου εξετάστηκαν διαφορετικοί αλγόριθμοι επίλυσης του προβλήματος της σηματοδότησης ως προς την ταχύτητα και την ακρίβεια της προκύπτουσας λύσης, και πραγματοποιήθηκε σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Στο πλαίσιο της ανάλυσης των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε επαλήθευση της εκτιμώμενης καθυστέρησης του κόμβου με μεσοσκοπική και μικροσκοπική προσέγγιση. Στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου οι προτεινόμενες προσεγγίσεις ελαχιστοποίησης του ρίσκου με μεσοσκοπική προσέγγιση εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που παρέχονται από τη χρήση του λογισμικού TRANSYT-7F σε τρία επίπεδα ζήτησης, ενώ πραγματοποιήθηκε και σύγκριση με προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα επικεντρώνοντας μόνο στην ώρα αιχμής και όχι στην εξέταση της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου της ζήτησης και της προκύπτουσας καθυστέρησης.

6.1 Εύρεση σταθερού προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου σε μεσοσκοπικό επίπεδο

6.1.1 Περιγραφή του κόμβου υποδείγματος

Η προτεινόμενη μεθοδολογία για την εύρεση του βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης εφαρμόστηκε σε έναν κόμβο της βιβλιογραφίας με τέσσερις προσβάσεις και δώδεκα επιτρεπόμενες κινήσεις, όπως περιγράφεται στο HCM 2000 (TRB, 2000). Στο Σχήμα 6-1 απεικονίζεται το σκαρίφημα του κόμβου, βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του και τα ποσοστά στρεφουσών κινήσεων σε σχέση με το συνολικό φόρτο του κόμβου, έτσι όπως αναφέρονται στο HCM 2000. Οι διατομές όλων των προσβάσεων του κόμβου έχουν δύο λωρίδες ανά κατεύθυνση με διαχωριστική κεντρική νησίδα για τον διαχωρισμό των κατευθύνσεων και μία επιπλέον λωρίδα αναμονής για την αριστερή στροφή με μήκος 80 μέτρα. Το πλάτος των λω-

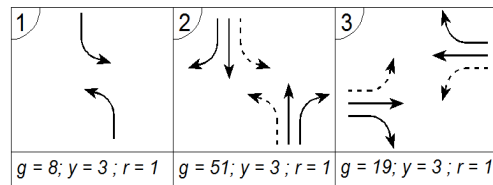
ρίδων κυκλοφορίας για τις προσβάσεις με κατεύθυνση προς βορρά (Northbound, NB) και νότο (Southbound, SB) είναι 3,65 μέτρα και για τις προσβάσεις με κατεύθυνση προς ανατολή (Eastbound, EB) και δύση (Westbound, WB) είναι 3,05 μέτρα. Θεωρείται ότι δεν υπάρχει ανωφέρεια και κατωφέρεια σε όλες τις προσβάσεις. Στάθμευση παρατηρείται επί των προσβάσεων με κατεύθυνση προς ανατολή (EB) και δύση (WB) με 5 ελιγμούς στάθμευσης ανά ώρα. Το ποσοστό των βαρέων οχημάτων στις προσβάσεις με κατεύθυνση προς βορρά (NB) και νότο (SB) είναι 2% και στις προσβάσεις κατεύθυνση προς ανατολή (EB) και δύση (WB) είναι 5%. Θεωρείται τέλος ότι ο κόμβος λειτουργεί ως μεμονωμένος και έτσι οι αφίξεις των οχημάτων στον κόμβο θεωρούνται πλήρως τυχαίες, διασπαρμένες σε όλη τη διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης.



Σχήμα 6-1: Γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά κόμβου υποδείγματος

Το αρχικό σηματοδοτικό πρόγραμμα του κόμβου, σύμφωνα με το HCM 2000, απεικονίζεται στο Σχήμα 6-2. Το πρόγραμμα έχει τρεις φάσεις σηματοδότησης. Στην πρώτη φάση εξυπηρετούνται οι αριστερές κινήσεις των προσβάσεων με κατεύθυνση προς βορρά (NBL) και προς νότο (SBL) ως προστατευμένες κινήσεις. Στη δεύτερη φάση οι αριστερές κινήσεις NBL και SBL εξυπηρετούνται ως επιτρεπόμενες, αφού στην ίδια φάση εξυπηρετούνται και οι ευθείες και δεξιές κινήσεις των προσβάσεων με κατεύθυνση προς βορρά (NBT και NBR) και προς νότο (SBT και SBR). Τέλος, στην τρίτη φάση εξυπηρετούνται όλες οι κινήσεις των προσβάσεων με κατεύθυνση προς ανατολή (αριστερή επιτρεπόμενη, EBL, ευθεία, EBT, και δεξιά, EBR) και προς δύση (αριστερή επιτρεπόμενη, WBL, ευθεία, WBT, και δεξιά, WBR). Οι χρόνοι της πράσινης ένδειξης των τριών φάσεων είναι 8, 51 και 19 δευτερόλεπτα, αντίστοιχα. Οι χρόνοι της

κίτρινης ένδειξης για όλες τις φάσεις είναι 3 δευτερόλεπτα και ο χρόνος κοινής κόκκινης ένδειξης είναι 1 δευτερόλεπτο.

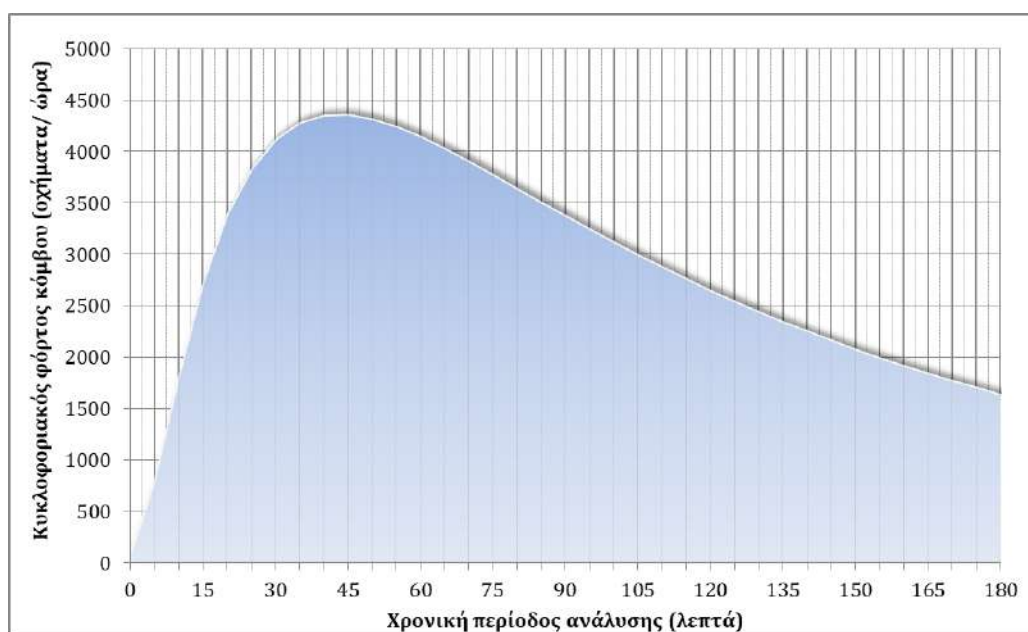


Σχήμα 6-2: Αρχικό σηματοδοτικό πρόγραμμα κόμβου υποδείγματος

Οι ωριαίοι κυκλοφοριακοί φόρτοι των στρεφουσών κινήσεων του κόμβου έτσι όπως αναφέρονται στο HCM2000 αντιστοιχούν στη μέγιστη ώρα αιχμής που παρατηρείται στον κόμβο (βλ. Πίνακα 6-1). Στην παρούσα εργασία η χρονική περίοδος ανάλυσης των κυκλοφοριακών συνθηκών του κόμβου πραγματοποιείται για μία εκτεταμένη περίοδο αιχμής τριών ωρών, η οποία είναι μία τυπική περίοδος εφαρμογής ενός προγράμματος σταθερού χρόνου. Η χρονική διακύμανση της ζήτησης έχει θεωρηθεί ότι ακολουθεί μία λογαριθμοκανονική κατανομή, η οποία αναπαριστά μία συνήθη κατανομή ζήτησης πρωινής αιχμής σε αστικό περιβάλλον και απεικονίζεται στο Σχήμα 6-3.

Πίνακας 6-1: Ωριαίοι κυκλοφοριακοί φόρτοι ώρας αιχμής (HCM, 2000)

Πρόσβαση προέλευσης	Αριστερά	Ευθεία	Δεξιά	Σύνολο Προέλευ- σης
Ανατολή (EB)	60	270	90	420
Δύση (WB)	100	510	20	630
Νότο (NB)	120	1480	80	1680
Βορρά (SB)	175	840	70	1085



Σχήμα 6-3: Διακύμανση κυκλοφοριακού φόρτου κόμβου υποδείγματος

Η διακύμανση του φόρτου στην τρίωρη περίοδο ανάλυσης δημιουργήθηκε λαμβάνοντας ως μέγιστο φόρτο περιόδου 15 λεπτών το φόρτο που αναφέρεται στο HCM 2000, οποίος είναι 4380 οχήματα/ ώρα για όλο τον κόμβο, και χρησιμοποιώντας τις συχνότητες της λογαριθμικανονικής κατανομής για κάθε χρονικό βήμα ανάλυσης.

6.1.2 Σύγκριση εναλλακτικών αλγορίθμων επίλυσης

Στο πλαίσιο της ανάλυσης και αξιολόγησης της αλγοριθμικής διαδικασίας ταχείας εύρεσης του βέλτιστου συνδυασμού των φάσεων σηματοδότησης πραγματοποιήθηκε σύγκριση τόσο της ταχύτητας των εξεταζόμενων αλγορίθμων επίλυσης, όσο και της ακρίβειας της λύσης που αυτοί προσφέρουν.

6.1.2.1 Σύγκριση ταχύτητας και ακρίβειας αλγορίθμων επίλυσης

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εύρεσης του βέλτιστου σηματοδοτικού προγράμματος εφαρμόστηκε στο κόμβο υποδείγματος με τη χρήση του αλγορίθμου διεσπαρμένης αναζήτησης (ScS) και του γενετικού αλγορίθμου (GA), έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται από τον κάθε αλγόριθμο, αλλά και της προτεινόμενης λύσης που έχει προκύψει από τον κάθε αλγόριθμο. Η αντικειμενική συνάρτηση που ο αλγόριθμος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει είναι η συνολική καθυστέρηση όλων των οχημάτων που διέρχονται από τον κόμβο καθ' όλη την περίοδο ανάλυσης. Η εκτίμηση της μέσης καθυστέρησης ανά όχημα ανά χρονικό βήμα όπως ορίζεται στο HCM2010 με την ανάλυση των πολλαπλών διαδοχικών βημάτων περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.1.2 και η συνολική καθυστέρηση που υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (5-32) αντιστοιχεί στο άθροισμα γινομένων της μέσης καθυστέρησης ανά όχημα ανά χρονικό βήμα με τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται στον κόμβο ανά χρονικό βήμα. Η επιλογή της συγκεκριμένης αντικειμενικής συνάρτησης και όχι της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης του ρίσκου πραγματοποιήθηκε, έτσι ώστε τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των δύο αλγορίθμων επίλυσης να βασιστούν σε μία μεθοδολογία βελτιστοποίησης σηματοδότησης που χρησιμοποιείται ευρέως και αποτελεί κοινή πρακτική.

Συνολικά η βιβλιοθήκη συνδυασμών φάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης περιείχε 169 συνδυασμούς κινήσεων σε φάσεις. Ο έλεγχος της αντιμετώπισης των αριστερών κινήσεων ως προστατευόμενες μόνο ή ως και επιτρεπόμενες κατέληξε στην απόρριψη των προγραμμάτων που περιλαμβάνουν ως επιτρεπόμενες τις αριστερές κινήσεις προς βορρά (NBL) ή/ και προς νότο (SBL). Επίσης, απορρίφθηκαν προγράμματα που δεν ήταν συμβατά με τη γεωμετρική διαμόρφωση του κόμβου ή που μετά την οριστικοποίησή τους ήταν ίδια με άλλα προγράμματα. Έτσι, η επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης των χρόνων πρασίνου πραγματοποιήθηκε σε 28 προγράμματα διαφορετικών συνδυασμών κινήσεων σε φάσεις από τα συνολικά 169 της βιβλιοθήκης προγραμμάτων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel®

Core™ i7 CPU 870 @2,93GHz με μνήμη 8GB και λειτουργικό σύστημα Windows 10 Pro 64bit και ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε στο λογισμικό MATLAB 2014a. Οι παράμετροι των αλγορίθμων βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα στατιστικά στοιχεία από την εκτέλεση των αλγορίθμων. Ο απαιτούμενος χρόνος για την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου (GA) είναι κατά μέσο όρο 15 φορές μεγαλύτερος σε σχέση με τον αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης (ScS), αφού πραγματοποιεί περίπου 15 φορές περισσότερες εκτιμήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο μέσος χρόνος για την εύρεση βέλτιστης λύσης ανά πρόγραμμα είναι 17 περίπου δευτερόλεπτα για τον ScS και 264 για τον GA. Συνολικά η διαδικασία ανάλυσης των 169 προγραμμάτων και εύρεσης βέλτιστης λύσης για τα 28 προγράμματα διήρκεσε μόλις 8 λεπτά με τον ScS, ενώ με τον GA περισσότερο από 2 ώρες.

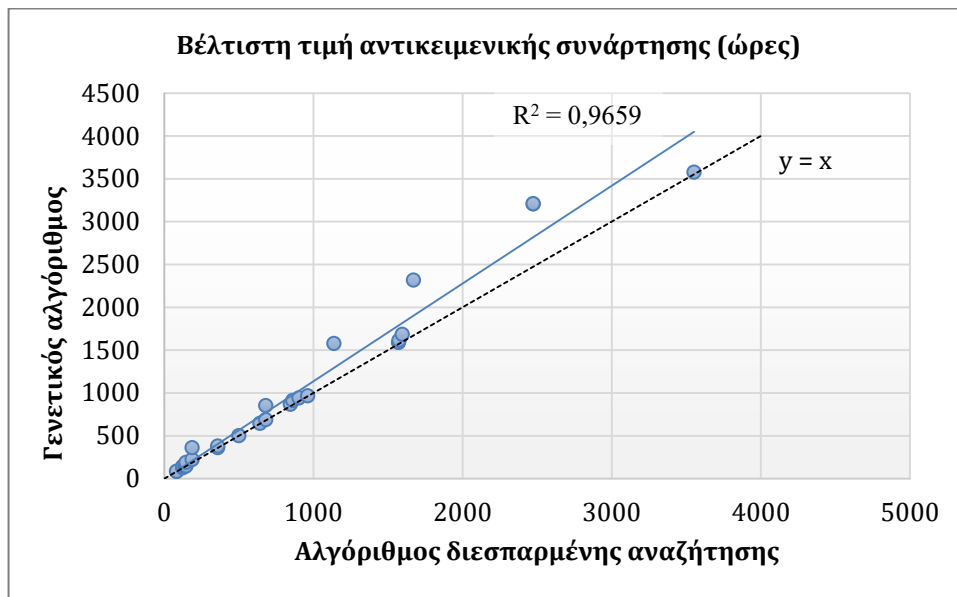
Πίνακας 6-2: Στατιστικά στοιχεία υλοποίησης αλγορίθμων επίλυσης

Περιγραφή	Αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης	Γενετικός Αλγόριθμος
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης ¹ (sec)	480,95	7.399,49
Μέσος χρόνος εκτέλεσης ανά πρόγραμμα (sec)	17,17	264,26
Ελάχιστος χρόνος εκτέλεσης ανά πρόγραμμα (sec)	12,33	114,31
Μέγιστος χρόνος εκτέλεσης ανά πρόγραμμα (sec)	24,34	678,37
Αριθμός συνολικών εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης	13.756	208.328
Μέσος αριθμός εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης ανά πρόγραμμα	491,29	7.440,29
Ελάχιστος αριθμός εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης ανά πρόγραμμα	345	3.441
Μέγιστος αριθμός εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης ανά πρόγραμμα	741	18.751

¹ Ο συνολικός χρόνος συμπεριλαμβάνει τη διαδικασία ανάλυσης όλων των προγραμμάτων (δηλαδή και το χρόνο για την ανάλυση των προγραμμάτων που τελικά απορρίφθηκαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης).

Στο Σχήμα 6-4 παρουσιάζεται η σύγκριση των βέλτιστων λύσεων που παράχθηκαν από τους δύο αλγορίθμους, όπου κάθε σημείο αντιπροσωπεύει τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει παραχθεί από τους δύο αλγορίθμους για κάθε πρόγραμμα. Μέσω της σύγκρισης των εκτιμήσεων της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης φαίνεται ότι οι αλγόριθμοι έχουν καταλήξει σε λύσεις που οι τιμές τους παρουσιάζουν καλή συσχέτιση ($R^2=0,9659$). Παρά την ευρύτερη διερεύνηση από τον γενετικό αλγόριθμο, σε όλες τις περιπτώσεις των διαφορετικών προγραμμάτων, η μέθοδος της διεσπαρμένης αναζήτησης έχει καταλήξει σε λύσεις που προσφέρουν χαμηλότερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τον γενετικό αλγόριθμο, παρέχοντας κατά μέσο όρο 12% περίπου μικρότερη συνολική καθυστέρηση στον κόμβο. Παρατηρώντας τη διαγώνιο $y = x$ στο Σχήμα 6-4, όπου συγκρίνονται ο GA και ο ScS, φαίνεται ότι κανένα σημείο δεν παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή α-

ντικειμενικής συνάρτησης με τον γενετικό αλγόριθμο σε σχέση με το αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης.



Σχήμα 6-4: Σύγκριση αλγορίθμων επίλυσης στην βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης

Επομένως, ο αλγόριθμος της διεσπαρμένης αναζήτησης φαίνεται να υπερισχύει τόσο στη σύγκριση της εκτιμώμενης βέλτιστης λύσης όσο και του απαιτούμενου χρόνου εύρεσής της.

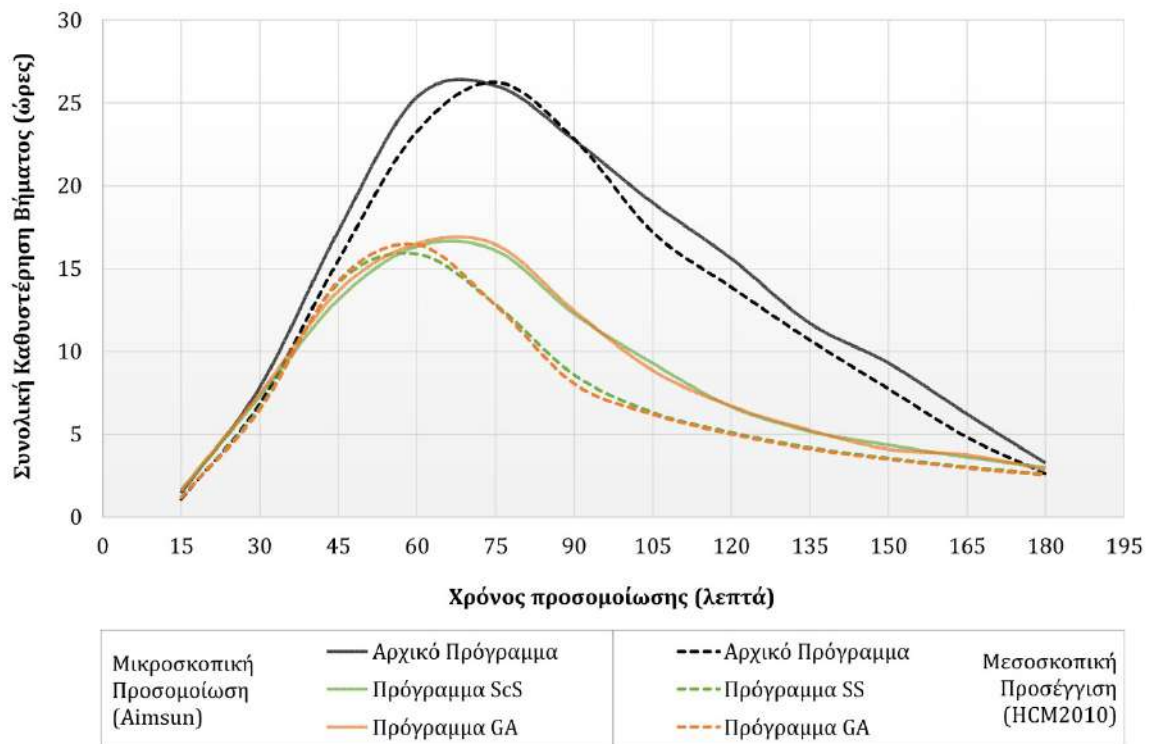
Τα σηματοδοτούμενα προγράμματα που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση των εναλλακτικών αλγορίθμων επίλυσης κωδικοποιήθηκαν στο λογισμικό Aimsun και πραγματοποιήθηκε δυναμική μικροσκοπική προσομοίωση των εναλλακτικών προγραμμάτων σηματοδότησης. Έτσι διερευνήθηκε κατά πόσο η μεσοσκοπική θεώρηση που χρησιμοποιήθηκε στη βελτιστοποίηση των προγραμμάτων σηματοδότησης είναι συγκρίσιμη με τη μικροσκοπική προσομοίωση που μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστά με λεπτομέρεια τη λειτουργία ενός κόμβου. Η επαλήθευση της εκτιμώμενης καθυστέρησης, με τη χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης στο Aimsun παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 6.1.4. Από την ανάλυση των προσομοιώσεων (βλ. Πίνακα 6-3) προέκυψε ότι το πρόγραμμα που βελτιστοποιήθηκε με τον αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης παρέχει χαμηλότερη συνολική καθυστέρησης (98,8 ώρες) σε σχέση με το πρόγραμμα που προέκυψε από τον γενετικό αλγόριθμο (99,7 ώρες). Η χρονική διακύμανση της καθυστέρησης και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, τόσο από τη μεσοσκοπική προσέγγιση του HCM2010, όσο και από τη μικροσκοπική προσέγγιση του Aimsun, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα και στο Σχήμα 6-5.

Εξετάζοντας τη χρονική διακύμανση της συνολικής καθυστέρησης στον κόμβο παρατηρείται αντίστοιχη απόδοση και με τα δύο προγράμματα. Επομένως, εξετάζοντας τις τιμές της απόδοσης του κόμβου και συνολικά για όλη την περίοδο, αλλά και στα διακριτά βήματα, φαίνεται ότι ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης παρέχει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα

στην απόδοση του κόμβου, και παράλληλα ο απαιτούμενος χρόνος εύρεση της βέλτιστης λύσης είναι σημαντικά χαμηλότερος.

Πίνακας 6-3: Αξιολόγηση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης καθυστέρησης εναλλακτικών αλγορίθμων επίλυσης

Προσέγγιση	Δείκτες	Αρχικό Πρόγραμμα	Πρόγραμμα Διεσπαρμένης Αναζήτησης (ScS)	Πρόγραμμα Γενετικού Αλγορίθμου (GA)
Μεσοσκοπική (HCM 2010)	Συνολική καθυστέρηση (ώρες)	152,7	83,0	83,5
	Μέγιστη τιμή μέσης καθυστέρησης (δλεπτα/ όχημα)	95,2	53,5	55,7
Μικροσκοπική (aimsun)	Συνολική καθυστέρηση (ώρες)	165,8	98,8	99,7
	Μέγιστη τιμή μέσης καθυστέρησης (δλεπτα/ όχημα)	93,3	57,9	58,1



Σχήμα 6-5: Συνολική καθυστέρηση κόμβου υποδείγματος εκτιμώμενη μικροσκοπικά (Aimsun) και μεσοσκοπικά (HCM2010)

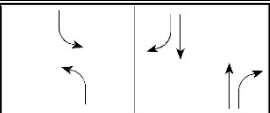
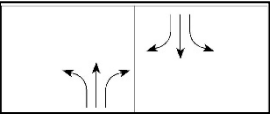
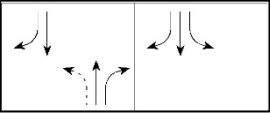
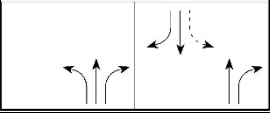
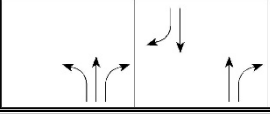
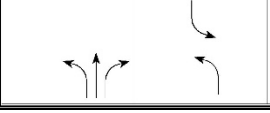
6.1.2.2 Έλεγχος συνολικά βέλτιστης λύσης

Ο έλεγχος της συνολικά βέλτιστης λύσης έχει ως σκοπό τη διερεύνηση της ακρίβειας της εκτιμώμενης λύσης, που προκύπτει από τους δύο υπό εξέταση αλγορίθμους αναζήτησης λύσης. Έτσι, για ένα περιορισμένο αριθμό εναλλακτικών συνδυασμών φάσεων πραγματοποιήθηκε εξαντλητικός υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πιθανών λύσεων, έτσι ώστε να εντοπιστεί η συνολικά βέλτιστη λύση και να εκτιμηθεί η απόστασή της από τις λύσεις που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με τους δύο αλγορίθμους επίλυσης. Ο έλεγχος της ακρίβειας της λύσης πραγματοποιήθηκε σε μία πιο απλοποιημένη εκδοχή του κόμβου

υποδείγματος, στην οποία ο κόμβος έχει μόνο τις δύο προσβάσεις με τα υψηλότερα επίπεδα κυκλοφοριακού φόρτου, δηλαδή τις κατευθύνσεις προς βορρά (NB) και προς νότο (SB). Οι εναλλακτικοί συνδυασμοί φάσεων που συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση είναι τέσσερις με δύο φάσεις και δύο με τρεις φάσεις. Για να περιοριστεί ο αριθμός των δυνατών λύσεων, επιβλήθηκαν ορισμένοι περιορισμοί: (α) οι δυνατές λύσεις να είναι ακέραιοι αριθμοί, (β) η ελάχιστη περίοδος σηματοδότησης να είναι 50 δευτερόλεπτα και η μέγιστη να είναι 150 δευτερόλεπτα, (γ) ο ενδιάμεσος χαμένος χρόνος να είναι 4 δευτερόλεπτα για κάθε φάση, (δ) ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου να είναι 7 δευτερόλεπτα και ο μέγιστος για τις περιπτώσεις προγραμμάτων με δύο και τρεις φάσεις να είναι 135 και 124 δευτερόλεπτα αντίστοιχα.

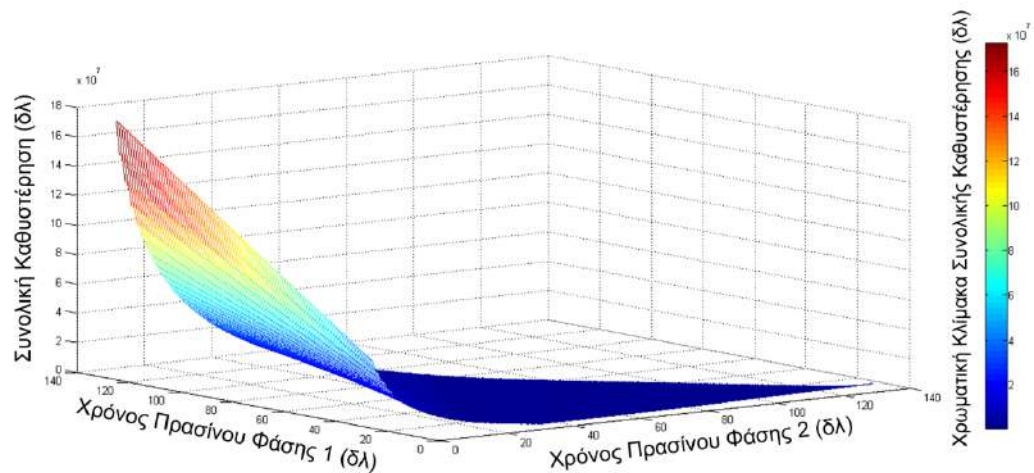
Ο συνολικός αριθμός των δυνατών λύσεων στην περίπτωση των προγραμμάτων με δύο φάσεις είναι 7.979, ενώ στην περίπτωση των τριών φάσεων είναι 1.643.032. Στα επόμενα διαγράμματα απεικονίζεται η εκτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης για όλες τις δυνατές λύσεις (για τα προγράμματα με δύο φάσεις) και στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι χρόνοι πρασίνου των βέλτιστων λύσεων και η εκτίμηση της βέλτιστης αντικειμενικής συνάρτησης.

Πίνακας 6-4: Επαλήθευση συνολικής βέλτιστης λύσης

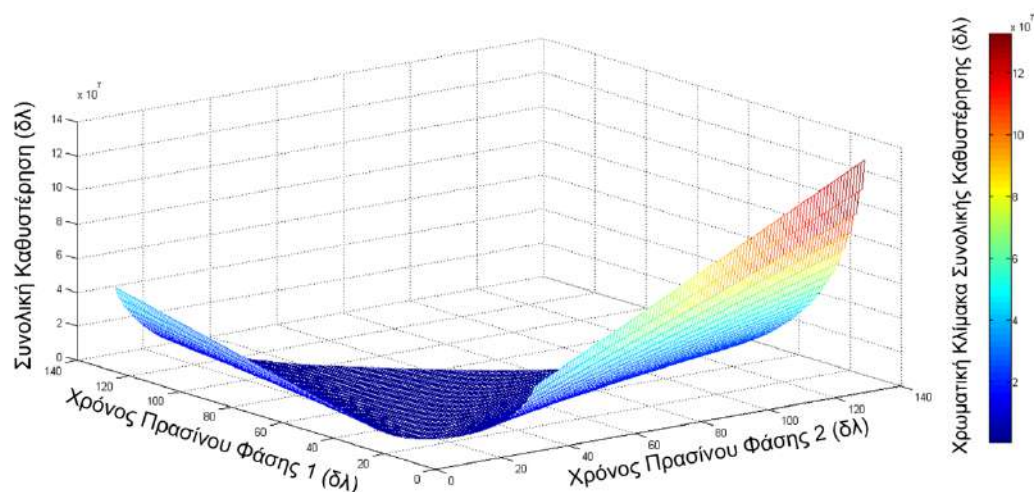
Α/ α	Εναλλακτικοί Συνδυασμοί Φάσεων	Βέλτιστοι χρόνοι πρασίνου			Αντικειμενική Συνάρτηση		
		Συνολική Βέλτιστη Λύση	Γενετικός Αλγόριθμος	Αλγόριθμος Διεσπαρμένης Αναζήτησης	Συνολική Βέλτιστη Λύση	Γενετικός Αλγόριθμος	Αλγόριθμος Διεσπαρμένης Αναζήτησης
A		[7; 35]	[7; 35]	[7,2; 34,8]	46.362		46.324
B		[32; 19]	[32; 19]	[32,4; 19,0]	117.914		116.929
C		[35; 7]	[35; 7]	[34,9; 7,1]	34.409		34.394
D		[8; 65]	[8; 65]	[8,1; 65,7]	30.208		30.191
E		[7; 24; 7]	[7; 24; 7]	[7,1; 23,7; 7,2]	46.362		46.322
F		[70; 7; 41]	[70; 7; 41]	[70,5; 6,9; 41,2]	222.780		221.762

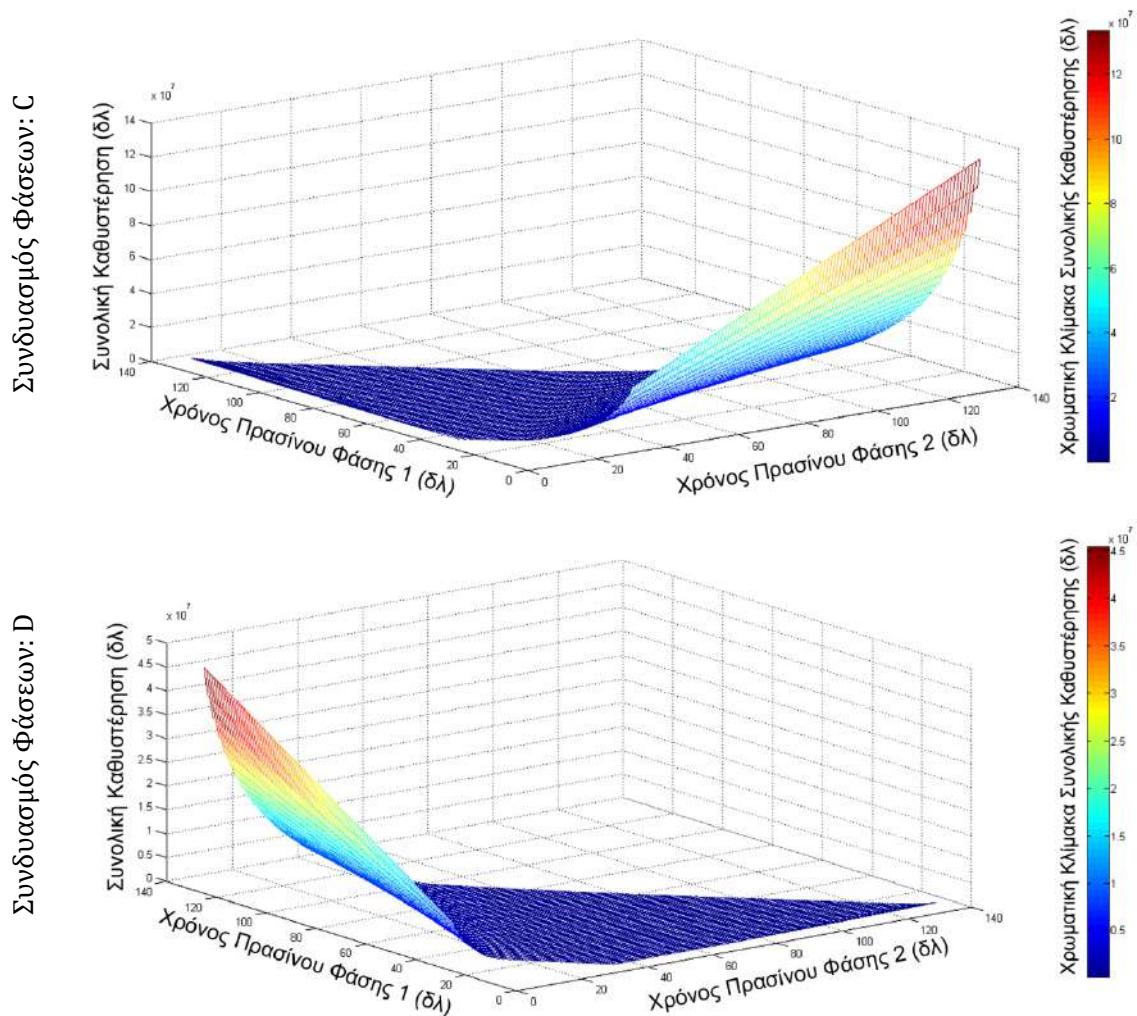
Ο αλγόριθμος της διεσπαρμένης αναζήτησης δεν περιορίζει τις λύσεις του σε ακέραιους αριθμούς, έτσι φαίνεται να εντοπίζει λύσεις με χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, οι οποίες, όμως, πρέπει να προσαρμοστούν σε ακέραιες λύσεις, καταλήγοντας έτσι στο ίδιο αποτέλεσμα. Σε μία περίπτωση μόνο (Συνδυασμός D) παρατηρείται μία μικρή αστοχία του αλγορίθμου διεσπαρμένης αναζήτησης, η οποία προκύπτει από την προσέγγιση της προτεινόμενης λύσης στο πλησιέστερο ακέραιο αριθμό. Σε αυτή την περίπτωση, η βέλτιστη λύση που προκύπτει από τον αλγόριθμο ως πραγματικός αριθμός [8,1 και 65,7], όταν μετατρέπεται σε ακέραιο αριθμό (δηλαδή [8 και 66]) παύει να είναι η βέλτιστη λύση. Αυτή η αστοχία είναι γνωστή ως ακέραιο χάσμα (integrality gap) και έχει παρατηρηθεί ότι σε περιπτώσεις συνεχών μεταβλητών που αντιστοιχούν σε ορισμένες διακριτές τιμές (όπως στην περίπτωση μας είναι οι ακέραιες λύσεις), η βέλτιστη τιμή μπορεί να μην εντοπίζεται στην διακριτή τιμή που αντιστοιχεί η συνεχής μεταβλητή, αλλά σε γειτονική διακριτή τιμή. Έτσι, μετατρέποντας την πραγματική λύση σε ακέραια λύση, η αντικειμενική συνάρτηση γίνεται 30.877 από 30.191, ενώ η συνολική βέλτιστη ακέραιη λύση που εντοπίζεται στο γειτονικό σημείο έχει τιμή 30.208. Η αστοχία δηλαδή είναι της τάξης του 2%.

Συνδυασμός Φάσεων: A



Συνδυασμός Φάσεων: B





Σχήμα 6-6: Εκτιμώμενη συνολική καθυστέρηση κόμβου για όλες τις δυνατές λύσεις [Στην περίπτωση των προγραμμάτων με 2 φάσεις στον άξονα των z απεικονίζεται η συνολική καθυστέρησης. Η χρωματική κλίμακα απεικονίζει την εκτίμηση της συνολικής καθυστέρησης.]

6.1.3 Σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων

Η προτεινόμενη μεθοδολογία της εύρεσης της βέλτιστης σηματοδότησης κόμβου με ελαχιστοποίηση του ρίσκου καθυστέρησης με μεσοσκοπική προσέγγιση (**CVaR.D**) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5.1, συγκρίθηκε με την κλασσική μεθοδολογία που προτείνεται από το HCM2010. Οι εναλλακτικές αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι:

- Η ελαχιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης (**Tot.D**) καθ' όλη την εκτεταμένη περίοδο ανάλυσης. Η εκτίμηση της μέσης καθυστέρησης ανά όχημα ανά χρονικό βήμα όπως ορίζεται στο HCM2010 για την ανάλυση των πολλαπλών διαδοχικών βημάτων περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.1.2 και η συνολική καθυστέρηση αντιστοιχεί στο άθροισμα γινομένων της μέσης καθυστέρησης ανά όχημα ανά χρονικό βήμα με τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται στον κόμβο ανά χρονικό βήμα.

- Η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης του 15λέπτου με την υψηλότερη ζήτηση (**PH.D**). Λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική διακύμανση της ζήτησης επιλέγεται το 15λεπτο με την υψηλότερη ζήτηση και εκτιμάται η μέση καθυστέρηση ανά όχημα για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα όπως ορίζεται στο HCM2010.

Η αλγοριθμική διαδικασία εύρεσης βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου εφαρμόστηκε στον κόμβο του υποδείγματος χρησιμοποιώντας ως αλγόριθμο επίλυσης της βελτιστοποίησης τον Αλγόριθμο Διεσπαρμένης Αναζήτησης. Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε στη βελτιστοποίηση σηματοδότησης με την προτεινόμενη προσέγγιση (*CVaR.D*) και την προσέγγιση της συνολικής καθυστέρησης (*Tot.D*) επιλέχθηκε να έχει διάρκεια 5 λεπτά. Η διάρκεια του χρονικού βήματος επιλέχθηκε έτσι ώστε να παρέχει αρκετή διακριτότητα στα στοιχεία που περιγράφουν την απόδοση του δικτύου, αλλά και να μη δημιουργούνται προβλήματα μη σταθερότητας των αποτελεσμάτων.

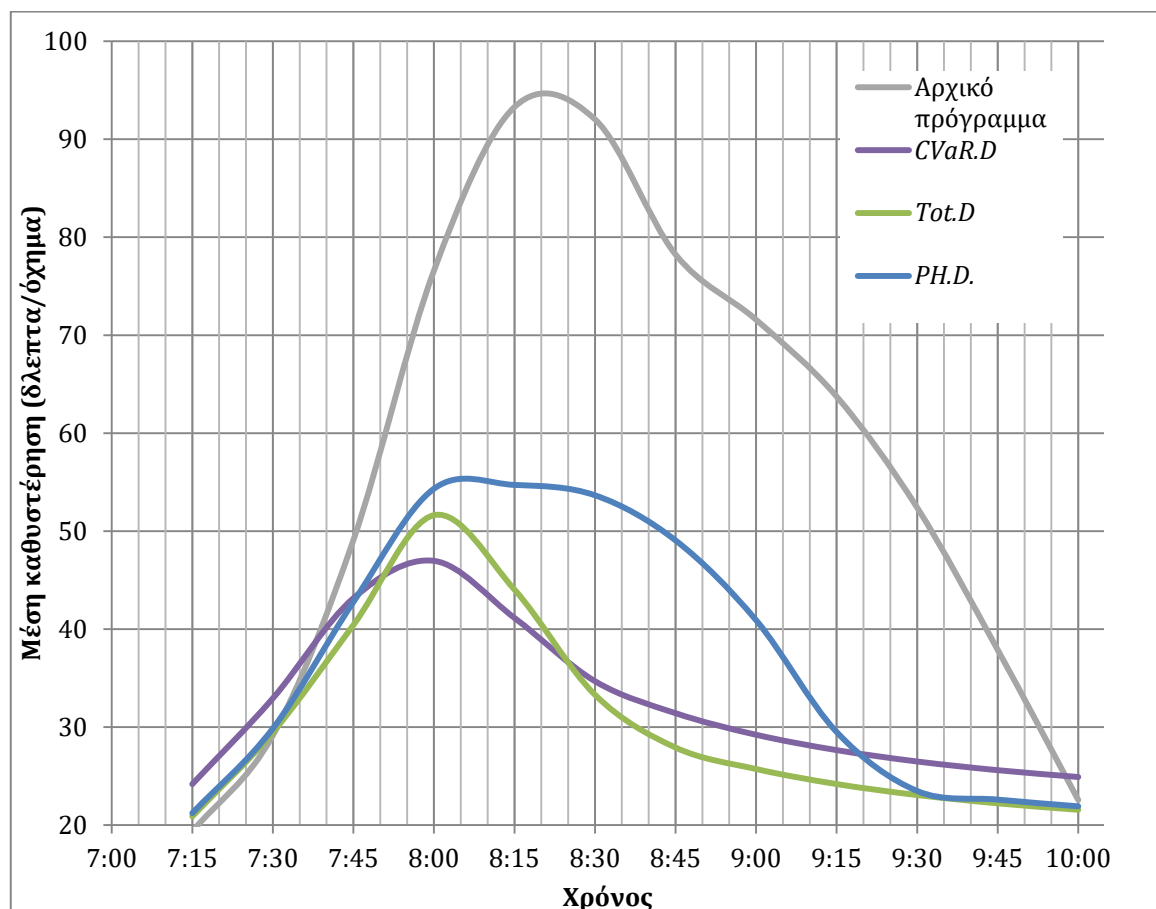
Συνολικά η Βιβλιοθήκη συνδυασμών φάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης περιείχε 169 συνδυασμούς κινήσεων σε φάσεις, εκ των οποίων πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση για τους 28 συνδυασμούς βάσει των γεωμετρικών και κυκλοφοριακών κριτηρίων που αναλύθηκαν στην ενότητα 5.1. Τα προγράμματα σηματοδότησης που προέκυψαν από τη χρήση των τριών εναλλακτικών συναρτήσεων (*CVaR.D*, *Tot.D*, *PH.D*) είχαν την ίδια δομή, δηλαδή συνδυασμό κινήσεων σε φάσεις, αλλά διαφορετικούς χρόνους πρασίνου σε κάθε φάση και διαφορετικές προκύπτουσες περιόδους σηματοδότησης (βλ. Σχήμα 6-7). Η περίοδος σηματοδότησης ήταν 116 δευτερόλεπτα μέσω της βελτιστοποίησης του *CVaR* της μέσης καθυστέρησης, 97 μέσω της βελτιστοποίησης της συνολικής καθυστέρησης της εκτεταμένης περιόδου ανάλυσης και 100 μέσω του 15λέπτου υψηλότερης ζήτησης. Η ποσοστιαία κατανομή του πρασίνου της περιόδου σηματοδότησης σε κάθε φάση από τις τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις ήταν αντίστοιχη.

	1	2	3
<i>CVaR.D</i>			
	$g = 14; y = 3; r = 1$	$g = 63; y = 3; r = 1$	$g = 27; y = 3; r = 1$
<i>Tot.D</i>	$g = 11; y = 3; r = 1$	$g = 52; y = 3; r = 1$	$g = 22; y = 3; r = 1$
<i>PH.D</i>	$g = 10; y = 3; r = 1$	$g = 54; y = 3; r = 1$	$g = 24; y = 3; r = 1$

Σχήμα 6-7: Βελτιστοποιημένα προγράμματα σηματοδότησης με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελαχιστοποίησης ρίσκου (*CVaR.D*), την ελαχιστοποίηση συνολικής καθυστέρησης (*Tot.D*) και την ελαχιστοποίηση 15λέπτου αιχμής (*PH.D*)

Στο Σχήμα 6-8 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση της μέσης καθυστέρησης των διαδοχικών χρονικών βημάτων, έτσι όπως εκτιμήθηκε από τη μεσοσκοπική μεθοδολογία του

HCM2010 με τις αρχικές ρυθμίσεις και τα τρία βελτιστοποιημένα προγράμματα, ενώ στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στοιχεία από την ανάλυση της τριώρης περιόδου. Η προτεινόμενη προσέγγιση της ελαχιστοποίησης του ρίσκου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας διακύμανσης της καθυστέρησης που δεν εμφανίζει τόσο υψηλές τιμές όσο η μεθοδολογία ελαχιστοποίησης της συνολικής καθυστέρησης, η οποία παρουσιάζει υψηλότερες τιμές, αλλά χαμηλότερη συνολική καθυστέρηση καθ' όλη την περίοδο ανάλυσης. Η μεθοδολογία ελαχιστοποίησης της μέσης καθυστέρησης του 15λέπτου υψηλότερης ζήτησης παρουσιάζει χειρότερα αποτελέσματα τόσο στη χρονική διακύμανση της μέσης καθυστέρησης, όσο και στα συνολικά μεγέθη, αφού δεν λαμβάνει υπόψη την ουρά που σχηματίζεται μεταξύ των διαδοχικών χρονικών βημάτων και επομένως δεν επιτυγχάνει την ικανοποιητική εξυπηρέτηση της συσσωρευμένης ουράς. Το *CVaR* της μέσης καθυστέρησης, που έχει προκύψει από την προτεινόμενη μεθοδολογία, είναι μικρότερο από αυτό των δύο άλλων προσεγγίσεων, όπως ήταν αναμενόμενο, όπως αντίστοιχα και η συνολική καθυστέρηση είναι μικρότερη με την προσέγγιση που επιδιώκει την ελαχιστοποίησή της (*Tot.D*). Ένας άλλος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων είναι η μέγιστη τιμή της μέσης καθυστέρησης, ο οποίος λαμβάνει μικρότερη τιμή με τις ρυθμίσεις της προτεινόμενης μεθοδολογίας.



Σχήμα 6-8: Εκτίμηση μέσης καθυστέρησης ανά όχημα με τη μέθοδο HCM2010 πολλαπλών διαδοχικών βημάτων

Πίνακας 6-5: Αξιολόγηση μεσοσκοπικής εκτίμησης καθυστέρησης εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων

Δείκτες	Αρχικό πρόγραμμα	Βελτιστοποιημένα προγράμματα		
		<i>CVaR.D</i>	<i>Tot.D</i>	<i>PH.D</i>
<i>CVaR</i> μέσης καθυστέρησης (δλεπτα/ όχημα)	94,6	46,9	52,1	55,5
Συνολική καθυστέρηση (οχηματο-ώρες)	151,9	83,5	80,1	98,5
Μέγιστη τιμή μέσης καθυστέρησης (δλεπτα/ όχημα)	95,3	48,0	54,0	56,3

Τα σηματοδοτούμενα προγράμματα που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση των εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων κωδικοποιήθηκαν στο λογισμικό Aimsun και πραγματοποιήθηκε δυναμική μικροσκοπική προσομοίωση των εναλλακτικών προσεγγίσεων. Έτσι, δύναται να διαπιστωθεί αν η μεσοσκοπική θεώρηση που χρησιμοποιήθηκε στη βελτιστοποίηση των προγραμμάτων σηματοδότησης είναι συγκρίσιμη με τη μικροσκοπική προσομοίωση, δεδομένου ότι αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστά την πραγματική λειτουργία ενός κόμβου. Η επαλήθευση της εκτιμώμενης καθυστέρησης με τη χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης στο Aimsun παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 6.1.4.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της μικροσκοπικής προσομοίωσης στο Aimsun προέκυψε ότι ο κόμβος εμφανίζει ρίσκο (*CVaR*) 69 δευτερόλεπτα/ όχημα όταν λειτουργεί με το πρόγραμμα που έχει προκύψει από τη βελτιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης. Το ρίσκο αυτό είναι κατά 23,5% υψηλότερο σε σχέση με το πρόγραμμα που έχει προκύψει από την ελαχιστοποίηση του ρίσκου και είναι 55,8 δευτερόλεπτα/όχημα. Ακόμα υψηλότερη τιμή ρίσκου έχει ο κόμβος όταν λειτουργεί με το πρόγραμμα που έχει προκύψει από τη βελτιστοποίηση στο 15λεπτο υψηλότερης ζήτησης που εκτιμάται σε 75,6 δευτερόλεπτα/όχημα, δηλαδή κατά 35,5% υψηλότερο από την τιμή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Επίσης, η υψηλότερη τιμή μέσης καθυστέρησης στον κόμβο με τη λειτουργία του προγράμματος βελτιστοποίησης της συνολικής καθυστέρησης είναι 77,2 δευτερόλεπτα/όχημα, η οποία είναι κατά 27% μεγαλύτερη σε σχέση με το πρόγραμμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, που παρουσιάζει μέγιστη τιμή 60,8 δευτερόλεπτα/όχημα. Αντίστοιχα, η υψηλότερη τιμή μέσης καθυστέρησης στον κόμβο με τη λειτουργία του προγράμματος βελτιστοποίησης του 15λέπτου υψηλότερης ζήτησης είναι 85 δευτερόλεπτα/όχημα, δηλαδή 40% μεγαλύτερο από την τιμή της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης του ρίσκου. Τέλος, το πρόγραμμα που έχει προκύψει από την ελαχιστοποίηση του ρίσκου, φαίνεται να υπερέχει ακόμα και εξετάζοντας τη μέση καθυστέρηση των οχημάτων μέσω της μικροσκοπικής προσομοίωσης, αφού το πρόγραμμα που έχει προκύψει από τη βελτιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης παρουσιάζει μέση καθυστέρηση 45,3 δευτερόλεπτα/όχημα, δηλαδή 17% αυξημένη σε σχέση με την

αντίστοιχη απόδοση του κόμβου όταν λειτουργεί με την προτεινόμενη μεθοδολογία, που εκτιμάται σε 38,8 δευτερόλεπτα/όχημα. Κατ' αναλογία με τους προηγούμενες δείκτες, το πρόγραμμα που έχει προκύψει από τη βελτιστοποίηση του 15λέπτου υψηλότερης ζήτησης επιφέρει τη μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση στον κόμβο (49,4 δευτερόλεπτα/όχημα), που είναι κατά 27,3% αυξημένη σε σχέση με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6-6: Αξιολόγηση μικροσκοπικής εκτίμησης καθυστέρησης εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων

Δείκτες	<i>CVaR.D</i>	<i>Tot.D</i>	<i>PH.D</i>
<i>CVaR</i> μέσης καθυστέρησης (δλεπτα/ όχημα)	55,8	69,0	75,6
Μέση καθυστέρηση (δλεπτα/ όχημα)	38,8	45,3	49,4
Μέγιστη τιμή μέσης καθυστέρησης (δλεπτα/ όχημα)	60,8	77,2	85,0

6.1.4 Επαλήθευση εκτιμώμενης καθυστέρησης με χρήση μικροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης

Η επαλήθευση της εκτιμώμενης καθυστέρησης, καθώς και της βέλτιστης λύσης πραγματοποιήθηκε μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης στο λογισμικό Aimsun. Ερευνητές που έχουν εξετάσει την επαλήθευση της εκτιμώμενης καθυστέρησης με τη μέθοδο του HCM αναφέρουν ότι τα απόλυτα ποσοστά σφαλμάτων μεταξύ των εκτιμώμενων και μετρημένων μεγεθών είναι κυρίως μικρότερα από 30% (Dion et al., 2004, Wang et al., 2016, Buckholz & Courage, 2008).

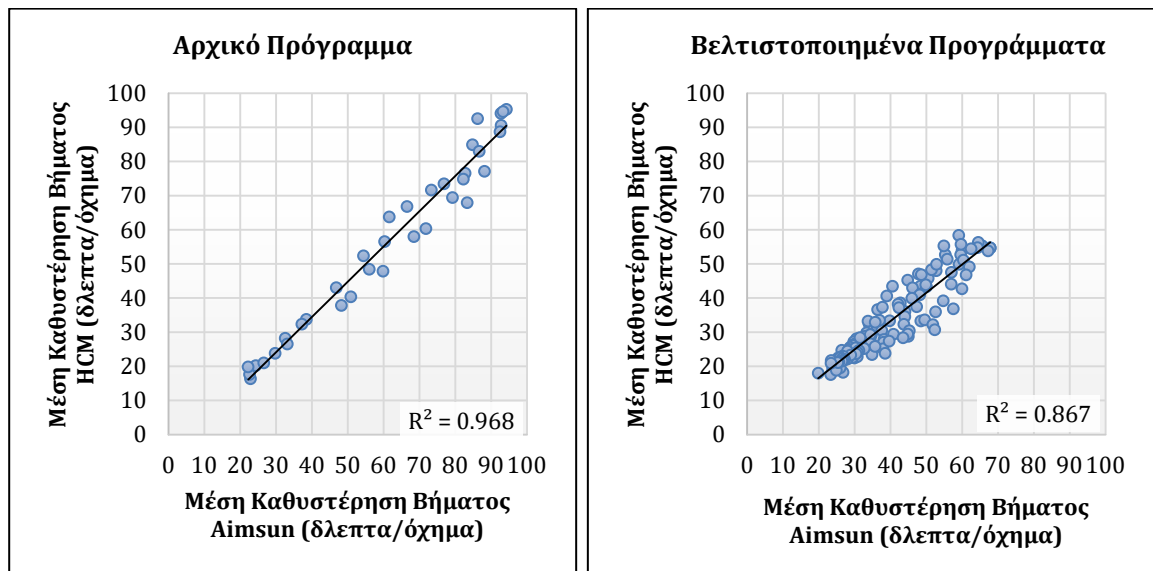
Ο κόμβος υποδείγματος με τα γεωμετρικά, λειτουργικά και κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά του κωδικοποιήθηκε στο μικροσκοπικό μοντέλο Aimsun με το αρχικό πρόγραμμα, βάσει του οποίου πραγματοποιήθηκε η ρύθμιση του μοντέλου. Η διαδικασία της ρύθμισης συμπεριλάμβανε τη σύγκριση της μέσης καθυστέρησης οχήματος για κάθε χρονικό βήμα διάρκειας 15 λεπτών. Η μέση καθυστέρηση οχήματος του κάθε βήματος υπολογίστηκε από τα στοιχεία τροχιάς (trajectories) όλων των οχημάτων που εισέρχονταν στην περιοχή ανάλυσης του κόμβου κατά το συγκεκριμένο βήμα. Σύμφωνα με τον ορισμό του HCM2010, η καθυστέρηση του κάθε οχήματος υπολογίστηκε αφαιρώντας από τον πραγματικό χρόνο διάνυσης τον ελάχιστο χρόνο διάνυσης που πραγματοποίησαν τα οχήματα για τη συγκεκριμένη κίνηση του κόμβου. Η επαλήθευση της εκτίμησης της μέσης καθυστέρησης καθώς και της ανωτερότητας της λύσης που προέκυψε από την επίλυση του προβλήματος με τους δύο αλγορίθμους (*Tot.D-GA* και *Tot.D-SS*, βλ. 6.1.2) και με τις τρεις εναλλακτικές αντικειμενικές συναρτήσεις (*Tot.D-SS*, *CVaR.D-SS*, *PH.D-SS*, βλ. 6.1.3) πραγματοποιήθηκε από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα προτεινόμενα προγράμματα σηματοδότησης.

Η ρύθμιση και η επαλήθευση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του R^2 και του δείκτη GEH (βλ. Πίνακα 6-7 και Σχήμα 6-9). Τα αποτελέσματα από τη σύγκριση της εκτιμώμενης μέσης καθυστέρησης ανά βήμα παρουσιάζουν μία ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ της μεθοδολογίας του HCM2010 και των προσομοιώσεων στο Aimsun. Για όλα τα χρονικά βήματα και για όλες τις προσομοιώσεις ο δείκτης GEH ήταν πολύ μικρότερος από 5, το οποίο είναι το προτεινόμενο αποδεκτό ανώφλι για μία ικανοποιητική συσχέτιση, σύμφωνα με τις οδηγίες του Highway Agency (1996) της Μεγάλης Βρετανίας, ενώ στις περιπτώσεις του αρχικού προγράμματος και του προγράμματος *CVaR.D-SS* ο δείκτης GEH ήταν μικρότερος του 1 σε περισσότερα από το 60% των χρονικών βημάτων. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο μεθοδολογιών εκτίμησης της καθυστέρησης παρουσιάζει επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα, με το δείκτη R^2 να είναι υψηλότερος από 96,8% για το αρχικό πρόγραμμα και 86,7% συνολικά για τα βελτιστοποιημένα προγράμματα.

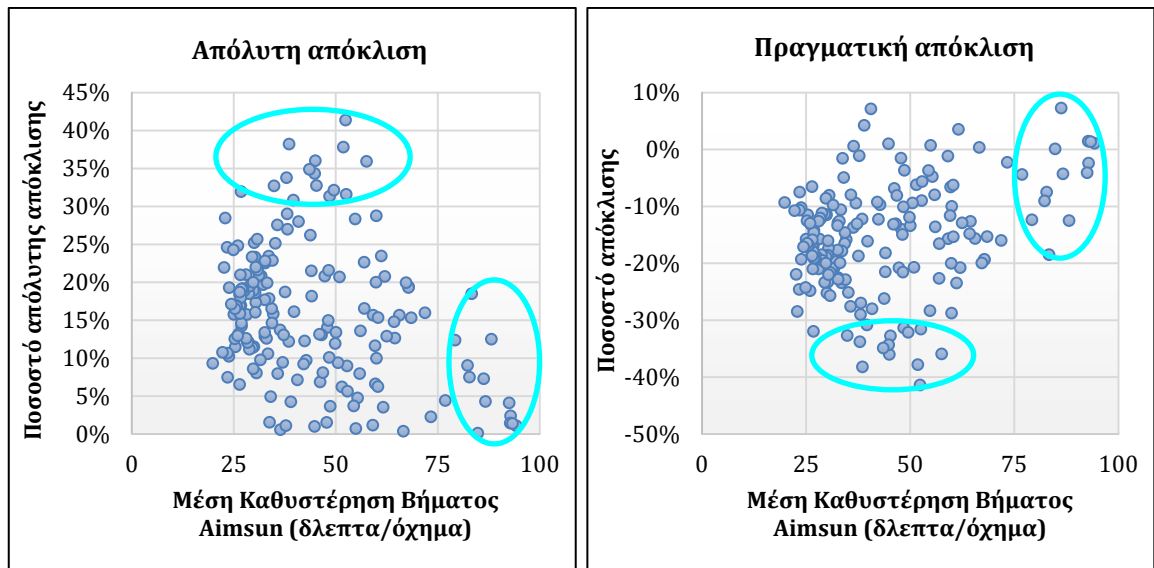
Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των απόλυτων αποκλίσεων που παρουσιάζονται μεταξύ της μεσοσκοπικής εκτίμησης της καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα και της μικροσκοπικής εκτίμησης από το Aimsun. Παρατηρήθηκε, λοιπόν ότι η μέση ποσοστιαία απόκλιση στο αρχικό πρόγραμμα είναι 11%, ότι στα βελτιστοποιημένα προγράμματα η μέση απόκλιση είναι 17,1%, και ότι όλα έχουν τιμή μικρότερη από 20%. Οι μέγιστες τιμές των ποσοστιαίων αποκλίσεων για το αρχικό πρόγραμμα είναι 28,5%, ενώ για τα βελτιστοποιημένα προγράμματα είναι υψηλότερη έως 41,4%. Η απόκλιση που παρουσιάζεται κυρίως είναι αρνητική, δηλαδή η μεσοσκοπική θεώρηση υποεκτιμά τη μέση καθυστέρηση σε σχέση με τη μικροσκοπική προσέγγιση. Μία θετική παρατήρηση που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι οι μεγαλύτερες τιμές αποκλίσεων στις περισσότερες περιπτώσεις δεν εμφανίζονται στις ακραίες τιμές των καθυστερήσεων (βλ. Σχήμα 6-10).

Πίνακας 6-7: Σύγκριση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης

Δείκτες	Ποσοστό βημάτων με			R^2	Απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση	
	GEH ≤ 1	$1 < \text{GEH} \leq 5$	$5 < \text{GEH}$		Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
Αρχικό πρόγραμμα	61,1%	38,9%	-	96,8%	11,0%	28,5%
<i>Tot.D - GA</i>	47,2%	52,8%	-	80,5%	18,9%	41,4%
<i>Tot.D - SS</i>	55,6%	44,4%	-	85,3%	17,8%	36,0%
<i>CVaR.D - SS</i>	66,7%	33,3%	-	85,2%	12,8%	26,2%
<i>PH.D - SS</i>	30,6%	69,4%	-	93,6%	19,0%	38,2%
Συνολικές τιμές για τα βελτιστοποιημένα προγράμματα	50,0%	50,0%	-	86,7%	17,1%	41,4%



Σχήμα 6-9: Σύγκριση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης στο (α) αρχικό πρόγραμμα και στα (β) βελτιστοποιημένα προγράμματα

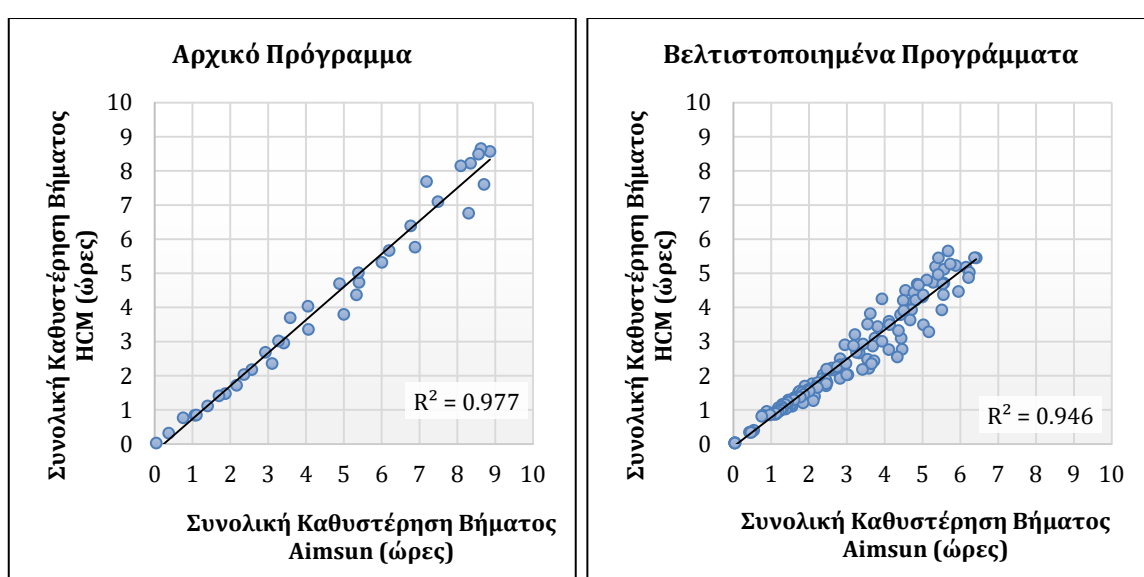


Σχήμα 6-10: Απόλυτη και πραγματική απόκλιση της μεσοσκοπικής εκτίμησης μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης

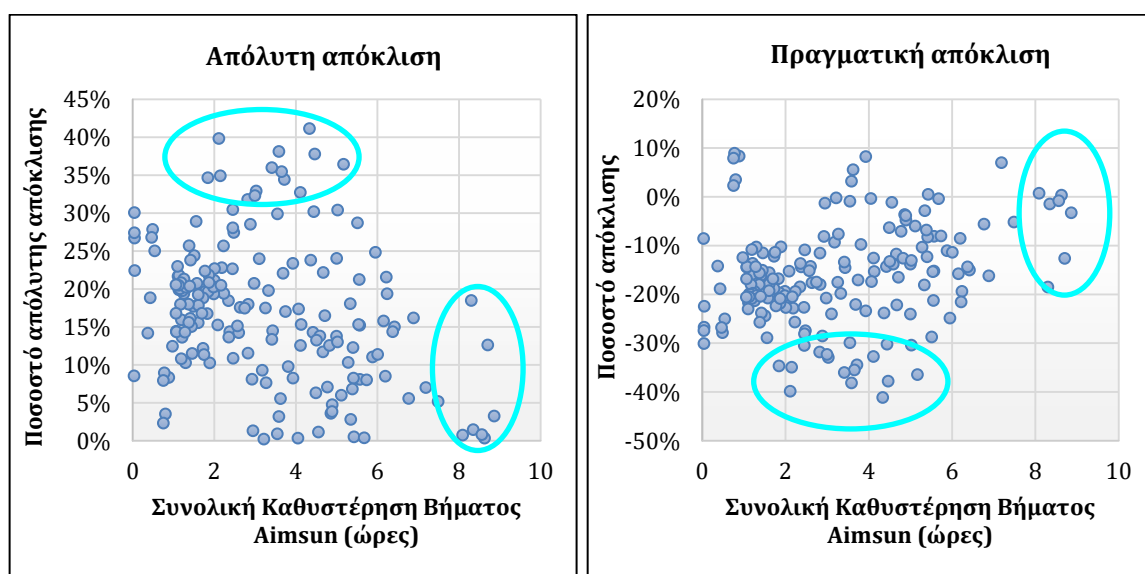
Επιπλέον της σύγκρισης της μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα αναλύθηκε και η συνολική καθυστέρηση ανά χρονικό βήμα μεταξύ της μεσοσκοπικής θεώρησης του HCM2010 και της μικροσκοπικής προσομοίωσης του aimsun (βλ. Πίνακα 6-8, Σχήμα 6-11 και Σχήμα 6-12). Σε αυτή την περίπτωση ο δείκτης GEH για όλα τα χρονικά βήματα όλων των πειραμάτων ήταν μικρότερος του 1, που κρίνεται πολύ ικανοποιητικός. Ο δείκτης R^2 είναι υψηλότερος στην περίπτωση της σύγκρισης της συνολικής καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα με τιμές που ξεπερνούν το 92% σε όλα τα πειράματα, ενώ οι αποκλίσεις έχουν αντίστοιχη τάξη μεγέθους με τις αποκλίσεις της μέσης καθυστέρησης, αλλά με μεγαλύτερη διασπορά.

Πίνακας 6-8: Σύγκριση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης συνολικής καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης

Δείκτες	Ποσοστό βημάτων με $GEH \leq 1$	R^2	Απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση	
			Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
Αρχικό πρόγραμμα	100%	97,7%	11,9%	30,1%
<i>Tot.D - GA</i>	100%	92,0%	20,1%	41,1%
<i>Tot.D - SS</i>	100%	93,7%	18,4%	38,1%
<i>CVaR.D - SS</i>	100%	96,1%	14,6%	29,9%
<i>PH.D - SS</i>	100%	97,8%	20,2%	39,8%
Συνολικά βελτιστοποιημένων προγραμμάτων	100%	94,6%	18,3%	41,1%



Σχήμα 6-11: Σύγκριση μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής εκτίμησης συνολικής καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης στο (α) αρχικό πρόγραμμα και στα (β) βελτιστοποιημένα προγράμματα



Σχήμα 6-12: Απόλυτη και πραγματική απόκλιση της μεσοσκοπικής εκτίμησης συνολικής καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα προσομοίωσης

6.2 Εφαρμογή του προβλήματος εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου σε μεσοσκοπικό επίπεδο

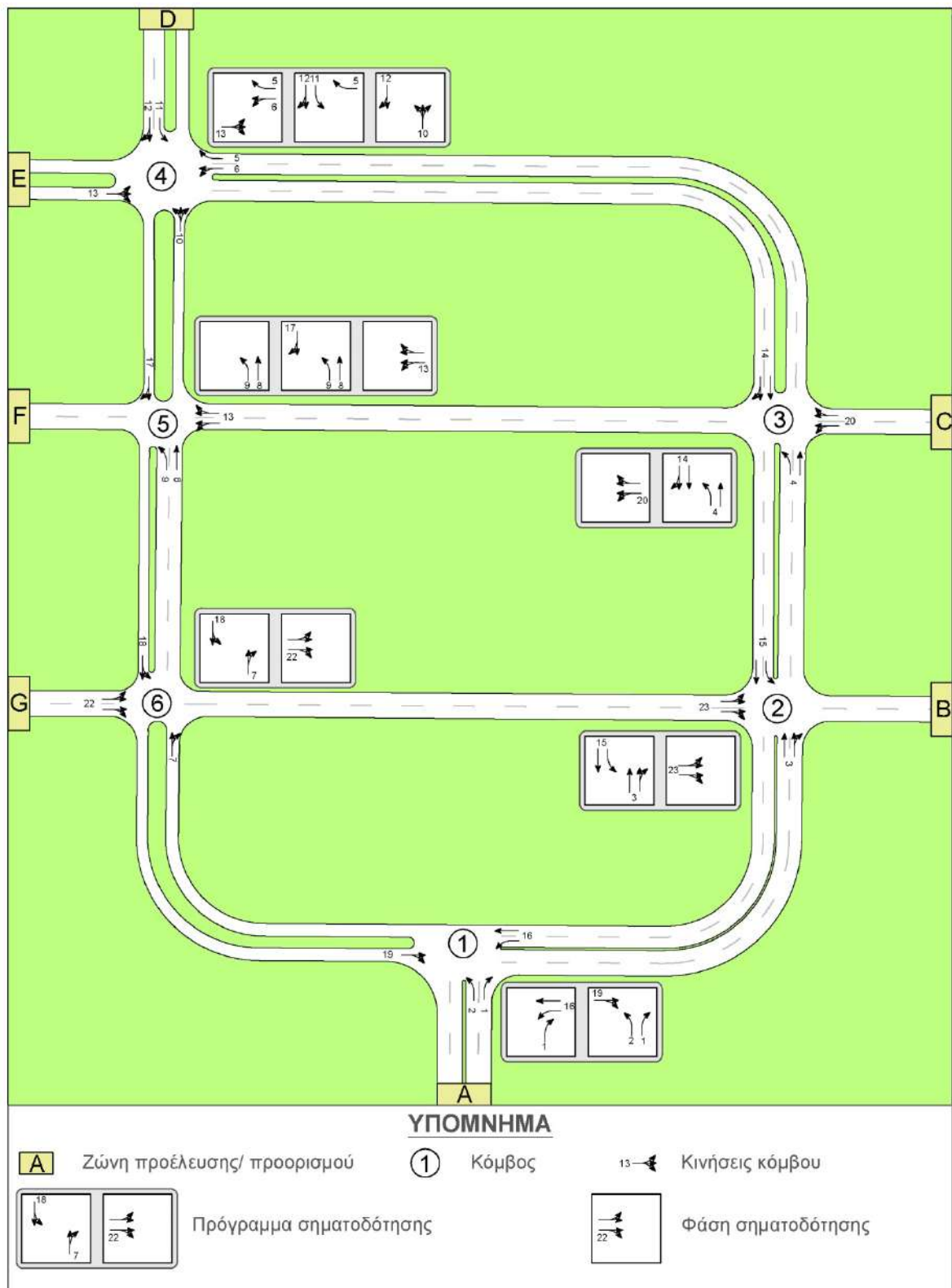
6.2.1 Περιγραφή του δικτύου υποδείγματος

Η προτεινόμενη μεθοδολογία για την εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου εφαρμόστηκε σε ένα δίκτυο της βιβλιογραφίας με έξι σηματοδοτούμενους κόμβους και είκοσι δύο ζεύγη προέλευσης – προορισμού, όπως περιγράφεται από τους Allsop & Charlesworth (1977). Το συγκεκριμένο δίκτυο έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές αντίστοιχες εφαρμογές βελτιστοποίησης δικτύου από την ακαδημαϊκή κοινότητα, όπως Chiou (1999), Chiou (2003), Ceylan & Bell (2004a, 2004b), Chiou (2005), Chiou (2008), Chiou (2009a, 2009b), Baskan & Haldenbilen (2011), Ceylan & Ceylan (2012), Hu & Chen (2012), Dell'Orco et al. (2013), Ceylan (2013), Maher et al. (2013), Ozan et al. (2014), Dell'Orco et al. (2014), Chiou (2014), Lu & Wagner (2014), Chiou (2015b), Papatzikou & Stathopoulos (2015), Chiou (2017a).

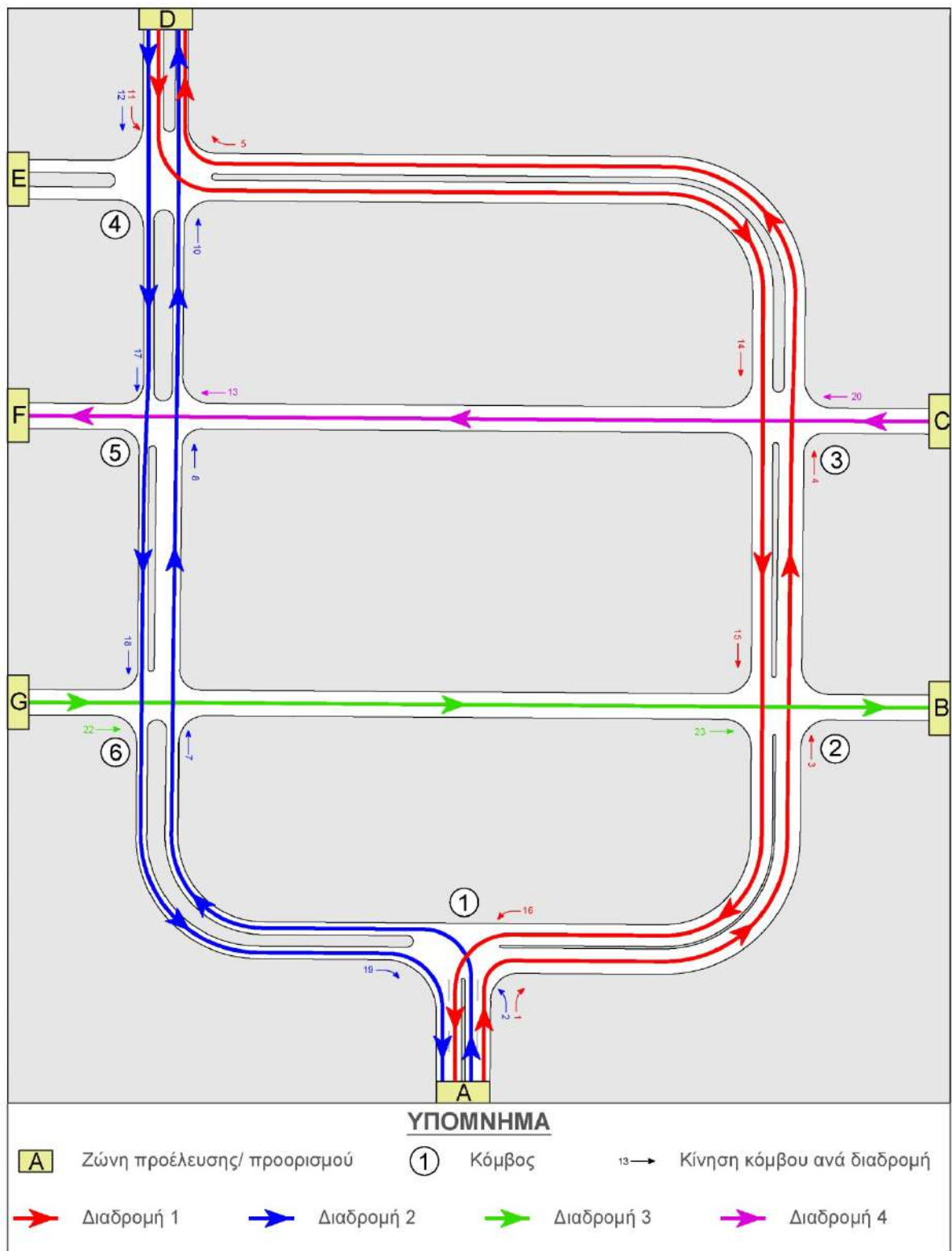
Στο Σχήμα 6-13 απεικονίζεται το σκαρίφημα του δικτύου, τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και η δομή των προγραμμάτων σηματοδότησης. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συνδέσμων του δικτύου παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 6-9: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συνδέσμων δικτύου (Allsop & Charlesworth, 1977)

Κόμβος	Σύνδεσμος - Κίνηση	Χρόνος μετακίνησης ελεύθερης ροής (δλεπτα)	Ροή κορεσμού (οχ/ώρα)
1	1	-	2000
	2	-	1600
	16	10	2900
	19	10	1500
2	3	10	3200
	15	15	2600
	23	15	3200
3	4	15	3200
	14	20	3200
	20	-	2800
4	5	20	1800
	6	20	1850
	10	10	2200
	11	-	2000
	12	-	1800
	13	-	2200
5	8	15	1850
	9	15	1700
	17	10	1700
	21	15	3200
6	7	10	1800
	18	15	1700
	22	-	3600



Σχήμα 6-13: Χαρακτηριστικά δικτύου υποδείγματος (Allsop & Charlesworth, 1977)



Σχήμα 6-14: Διαδρομές συντονισμού στο δίκτυο υποδείγματος

Το δίκτυο αναλύθηκε σε τέσσερις διαδρομές, οι οποίες περιλαμβάνουν όλους τους κόμβους και εισάχθηκαν στη διαδικασία βελτιστοποίησης των χρονικών μετατοπίσεων της έναρξης των προγραμμάτων σηματοδότησης των κόμβων. Οι διαδρομές αυτές συνδέουν όλα τα κεντροειδή του δικτύου και επιλέχθηκαν με κριτήριο αφενός το φόρτο που δυνητικά εξυπηρετούν και αφετέρου τη σύνδεση των κόμβων, έτσι ώστε οι όλοι κόμβοι να συμπεριλαμβάνο-

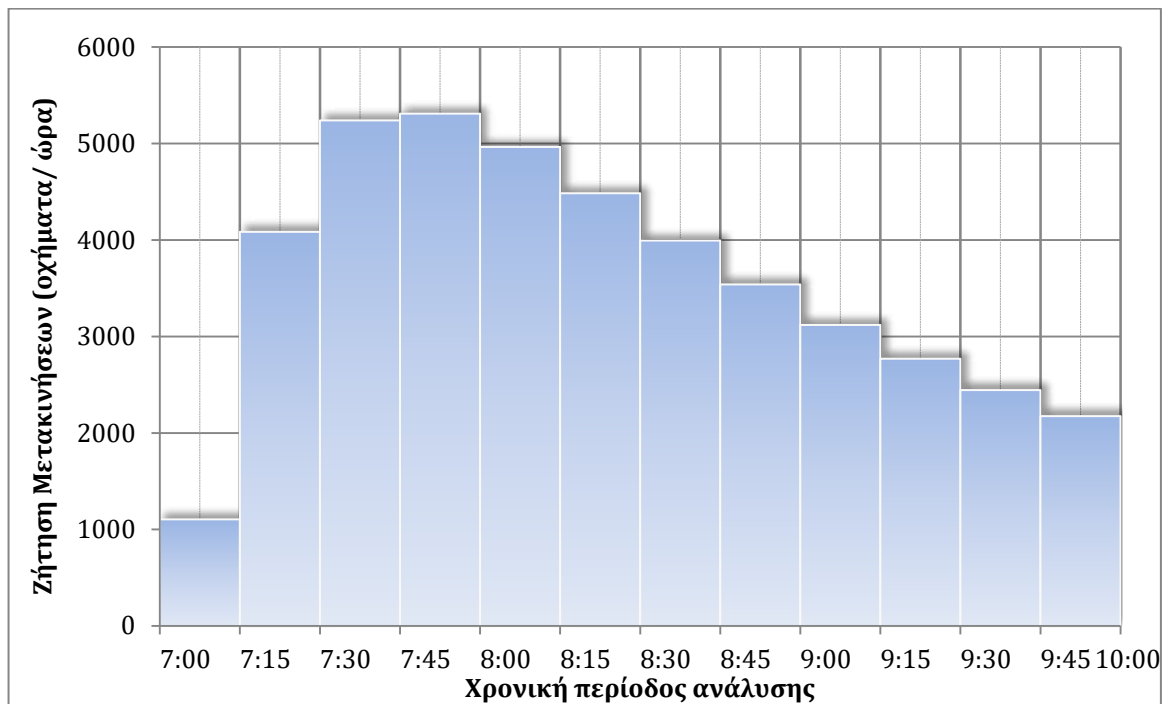
νται σε τουλάχιστον δύο διαδρομές. Οι επιλεχθείσες διαδρομές απεικονίζονται στο Σχήμα 6-14 και περιγράφονται στα επόμενα:

- 1) Η διαδρομή 1 έχει δύο κατευθύνσεις συνδέοντας τους κόμβους 1, 2, 3 και 4. Στη μία κατεύθυνση συμπεριλαμβάνονται οι κινήσεις 1, 3 (ευθεία), 4 (ευθεία), 5 και στην αντίρροπη κατεύθυνση οι κινήσεις 11, 14 (ευθεία), 15 (ευθεία), 16 (αριστερή).
- 2) Η διαδρομή 2 έχει δύο κατευθύνσεις συνδέοντας τους κόμβους 1, 6, 5 και 4. Στη μία κατεύθυνση συμπεριλαμβάνονται οι κινήσεις 2, 7 (ευθεία), 8, 10 (ευθεία) και στην αντίρροπη κατεύθυνση οι κινήσεις 12 (ευθεία), 17 (ευθεία), 18 (ευθεία), 19 (δεξιά).
- 3) Η διαδρομή 3 έχει μία κατεύθυνση συνδέοντας τους κόμβους 6 (ευθεία κίνηση 22) και 2 (ευθεία κίνηση 23).
- 4) Η διαδρομή 4 έχει μία κατεύθυνση συνδέοντας τους κόμβους 3 (ευθεία κίνηση 20) και 5 (ευθεία κίνηση 13).

Η χρονική περίοδος ανάλυσης των κυκλοφοριακών συνθηκών του κόμβου πραγματοποιείται σε μία εκτεταμένη περίοδο αιχμής τριών ωρών, η οποία είναι μία τυπική περίοδος εφαρμογής ενός προγράμματος σταθερού χρόνου. Η χρονική διακύμανση της ζήτησης έχει θεωρηθεί ότι ακολουθεί μία λογαριθμοκανονική κατανομή, η οποία αναπαριστά μία συνήθη κατανομή ζήτησης πρωινής αιχμής σε αστικό περιβάλλον. Η αναγωγή της ζήτησης στο τρίωρο από τη ζήτηση της μέγιστης ώρας αιχμής που δίνεται από τους Allsop & Charlesworth (1977), πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές, έτσι ώστε η μέγιστη ώρα αιχμής να έχει τον ίδιο αριθμό μετακινήσεων με την ώρα αιχμής της βιβλιογραφίας (βλέπε Σχήμα 6-15). Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η ζήτηση της μέγιστης ώρας αιχμής, έτσι όπως αναφέρεται από τους Allsop & Charlesworth (1977). Ο αριθμός μετακινήσεων κατά τη μέγιστη ώρα αιχμής είναι 5000, ενώ ο συνολικός αριθμός μετακινήσεων για την τριώρη περίοδο ανάλυσης είναι 10880.

Πίνακας 6-10: Ζήτηση μέγιστης ώρας αιχμής (Allsop & Charlesworth, 1977)

Ζώνη Προέλευσης/ Προορισμού	A	B	D	E	F	Σύνολο Με- τακινήσεων Προέλευσης
A	-	250	700	30	200	1180
C	40	20	200	130	900	1290
D	400	250	-	50	100	800
E	300	130	30	-	20	480
G	550	450	170	60	20	1250
Σύνολο Με- τακινήσεων Προορισμού	1290	1100	1100	270	1240	5000



Σχήμα 6-15: Διακύμανση ζήτησης μετακινήσεων στο δίκτυο υποδείγματος

Το συγκεκριμένο δίκτυο επιλέχθηκε για την εφαρμογή της προτεινόμενης προσέγγισης, επειδή παρουσιάζει χαρακτηριστικά που προσδίδουν επιπλέον πολυπλοκότητα στο πρόβλημα. Τα μήκη των συνδέσμων κυμαίνονται μεταξύ 140 και 280 μέτρα δημιουργώντας ένα πυκνό σηματοδοτούμενο δίκτυο. Το δίκτυο παρουσιάζει μία μορφή ορθογωνικού δικτύου, αλλά παράλληλα, οι κόμβοι στις διαδρομές συντονισμού δεν έχουν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους και επομένως η διαδικασία συντονισμού είναι πιο πολύπλοκη. Κύριες διαδρομές συντονισμού εντοπίζονται σε παράλληλους και εγκάρσιους άξονες δύο κατευθύνσεων. Επιπλέον, οι διαδρομές δύο κατευθύνσεων έχουν αντίστοιχο φόρτο και στις δύο κατευθύνσεις, γεγονός που δυσχεραίνει το συντονισμό τους αφού και οι δύο κατευθύνσεις θα πρέπει ισάξια να συντονιστούν. Ο καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο μεταξύ των σημαντικότερων ζευγών προέλευσης - προορισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί σε εναλλακτικές διαδρομές, επομένως ο καταμερισμός του φόρτου δεν είναι μονοσήμαντος ειδικά κατά τη δυναμική εξέλιξη των φαινομένων συμφόρησης, που αποτελεί βασικό στοιχείο της προτεινόμενης προσέγγισης. Τέλος, οι σηματοδοτούμενοι κόμβοι στο δίκτυο παρουσιάζουν διαφορετικές μορφές και διατάξεις διοχετευτικής διαρρύθμισης της κυκλοφορίας, όπως και τα προγράμματα σηματοδότησης περιλαμβάνουν διαφορετικές ομάδες κινήσεων ανά φάση, αριθμό φάσεων, αλλά και κατηγορίες κινήσεων, όπως προστατευόμενες και επιτρεπόμενες στρέφουσες κινήσεις.

6.2.2 Εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου

Η εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου υλοποιήθηκε στο δίκτυο του υποδείγματος χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις αντικειμενικής συνάρτησης στον αλγόριθμο επίλυσης της βελτιστοποίησης, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφ. 5.2.

Ο γενετικός αλγόριθμος πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων περιλαμβάνει δύο αντικειμενικές συναρτήσεις:

- Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση αφορά στην μεσοσκοπική εκτίμηση της καθυστέρησης σε όλους τους σηματοδοτούμενους κόμβους του δικτύου και είναι η ελαχιστοποίηση του *CVaR* της μέσης καθυστέρησης με χρήση του HCM μοντέλου πολλαπλών διαδοχικών βημάτων για την εύρεση της καθυστέρησης στους κόμβους.
- Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση αφορά στην εύρεση των χρονικών μετατοπίσεων έναρξης του προγράμματος σηματοδότησης κάθε κόμβου. Ως δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις που αναλύουν μεσοσκοπικά την επιρροή των χρονικών μετατοπίσεων στην κίνηση των οχημάτων και είναι οι εξής:
 - Η ελαχιστοποίηση του *CVaR* του αριθμού των οχημάτων που εμφανίζουν διακοπτόμενη διέλευση κατά μήκος των προκαθορισμένων αρτηριών του δικτύου (***mGA-CVaR-NSV***)
 - Η ελαχιστοποίηση του *CVaR* του μεσοσκοπικού χρόνου αναμονής οχημάτων λόγω συντονισμού (***mGA-CVaR-SD***).

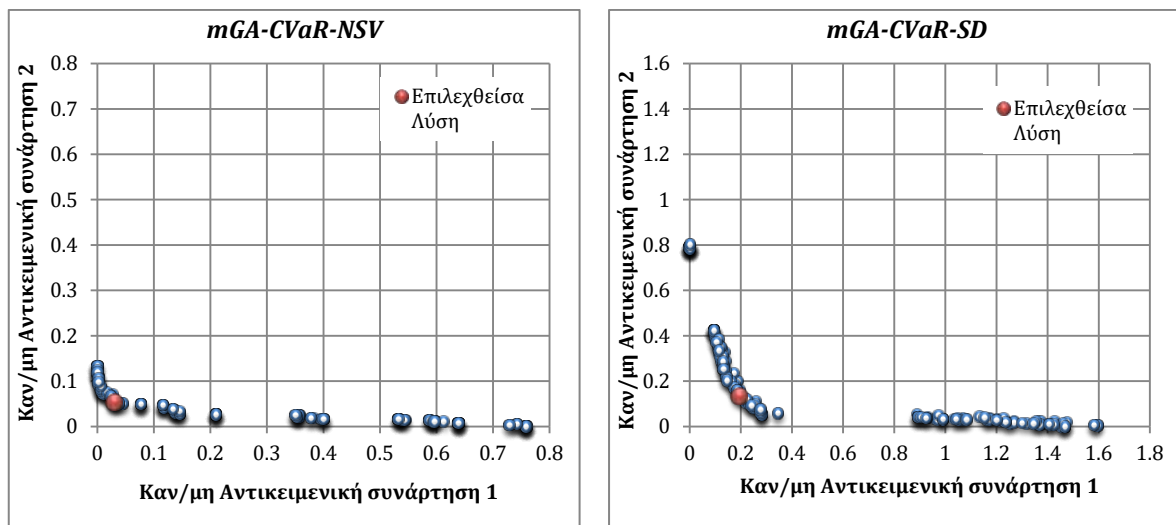
Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε στη βελτιστοποίηση σηματοδότησης επιλέχθηκε να έχει διάρκεια 5 λεπτά. Η διάρκεια του χρονικού βήματος επιλέχθηκε έτσι ώστε να παρέχει αρκετή διακριτότητα στα στοιχεία που περιγράφουν την απόδοση του δικτύου, αλλά και να μην δημιουργούνται προβλήματα μη σταθερότητας των αποτελεσμάτων.

Στην επαναληπτική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο τερματισμού οι 25 επαναλήψεις ή σύγκλιση των αποτελεσμάτων σε ποσοστό 1% στην εκτιμώμενη μέση καθυστέρηση του δικτύου. Ως ρυθμίσεις σηματοδότησης του βήματος έναρξης χρησιμοποιήθηκαν οι αρχικές ρυθμίσεις των Ceylan & Bell (2004b), οι οποίες έχουν περίοδο σηματοδότησης 70 δευτερόλεπτα και ισομοιρασμένους χρόνους πρασίνου σε κάθε φάση. Οι περιορισμοί και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης του δικτύου παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Αναλυτικά οι παράμετροι του αλγόριθμου βελτιστοποίησης και της δυναμικής μεσοσκοπικής προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

Πίνακας 6-11: Περιορισμοί και παράμετροι βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου

Παράμετρος	Τιμή
Ελάχιστος χρόνος περιόδου σηματοδότησης	50 δ/λεπτα
Μέγιστος χρόνος περιόδου σηματοδότησης	150 δ/λεπτα
Ελάχιστος χρόνος πρασίνου φάσης σηματοδότησης	7 δ/λεπτα
Ταχύτητα συντονισμού	50 χλμ/ώρα
Επίπεδο εμπιστοσύνης, α , του CVaR	0.1

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται το μέτωπο Pareto (Pareto Front) της κάθε προσέγγισης, που έχει προκύψει από την επανάληψη με το μικρότερο ρίσκο καθυστερήσεων στο δίκτυο. Φαίνεται ότι δεν είναι καλά κατανεμημένα τα σημεία στο μέτωπο Pareto της mGA-CVaR-SD μεθόδου, παρουσιάζοντας ένα διακοπτόμενο μέτωπο.



Σχήμα 6-16: Διαγράμματα μετώπου Pareto βασικού σεναρίου

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των εναλλακτικών προσεγγίσεων αναλύθηκαν βάσει των στοιχείων της μέσης καθυστέρησης του δικτύου, του συνολικού χρόνου μετακίνησης και του CVaR της μέσης καθυστέρησης που προέκυψαν από τη μεσοσκοπική προσομοίωση (βλ. Πίνακα 6-12). Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV είναι καλύτερη από την προσέγγιση mGA-CVaR-SD σε όλους τους εξεταζόμενους δείκτες. Όταν το δίκτυο λειτουργεί με τις ρυθμίσεις σηματοδότησης της προσέγγισης mGA-CVaR-NSV παρατηρείται χαμηλότερη τιμή στη μέση καθυστέρηση των οχημάτων κατά 3,5%, χαμηλότερες συνολικές οχηματοώρες που διανύθηκαν στο δίκτυο κατά 3,4% και χαμηλότερο CVaR καθυστερήσεων κατά 6,6%.

Πίνακας 6-12: Σύγκριση εναλλακτικών προσεγγίσεων στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης του ρίσκου

Προσέγγιση	Μέση Καθυστέρηση (δλεπτα/χλμ)	Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης (οχηματο-ώρες)	CVaR Μέσης Καθυστέρησης (δλεπτα/χλμ)
mGA-CVaR-NSV	33,94 (-3,5%)	291,52 (-3,4%)	38,34 (-6,6%)
mGA-CVaR-SD	35,18	301,82	41,03

Οι προτεινόμενες προσεγγίσεις συγκρίθηκαν και με δύο άλλες ρυθμίσεις σηματοδότησης που προέκυψαν στις εργασίες των Allsop & Charlesworth (1977), με τη αμοιβαία συνεπή λύση, MC, και των Ceylan & Bell (2004b), που πρότειναν τη μέθοδο GATRANSPFE που βασίζεται στον γενετικό αλγόριθμο, στο TRANSYT και στην εκτίμηση ροής διαδρομών, χρησιμοποιώντας, όμως, την ώρα αιχμής και όχι τη δυναμική της εξέλιξη για τη βελτιστοποίηση. Οι προτεινόμενες προσεγγίσεις mGA-CVaR-NSV και mGA-CVaR-SD παρουσιάζουν βελτιωμένη μέση καθυστέρηση σε σχέση με τη λειτουργία του δικτύου με τις ρυθμίσεις MC (16% και 13% αντίστοιχα) και με τις ρυθμίσεις GATRANSPFEE (11,5% και 8,2% αντίστοιχα). Αντίστοιχα, ο συνολικός αριθμός οχηματοωρών του δικτύου με τη προτεινόμενη λειτουργία mGA-CVaR-NSV είναι χαμηλότερος σε σχέση με τη λειτουργία υπό τις ρυθμίσεις MC και GATRANSPFEE (6,0% και 6,5% αντίστοιχα), αλλά και με την mGA-CVaR-SD (2,7% και 3,2% αντίστοιχα). Ο κίνδυνος εμφάνισης υψηλών καθυστερήσεων (δηλαδή η τιμή *CVaR*) είναι αυξημένος και με τις ρυθμίσεις MC και με τις ρυθμίσεις GATRANSPFEE σε σχέση με τις δύο προτεινόμενες συναρτήσεις (με εύρος 13,3% έως 26,3%).

Πρέπει βεβαίως να σημειωθεί ότι οι βελτιστοποιήσεις των μεθόδων MC και GATRANSPFEE έχουν γίνει βάσει της μέγιστης ώρας αιχμής και όχι της συνολικής απόδοσης του δικτύου για την εκτεταμένη περίοδο ανάλυσης. Έτσι πραγματοποιήθηκε επιπλέον προσομοίωση μόνο κατά τη μέγιστη ώρα αιχμής και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις τέσσερις διαφορετικές ρυθμίσεις σηματοδότησης. Τα αποτελέσματα της απόδοσης του δικτύου παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Με τις ρυθμίσεις της προσέγγισης mGA-CVaR-NSV, η μείωση της μέσης καθυστέρησης είναι 21,5% σε σχέση με τις ρυθμίσεις των μεθόδων MC και GATRANSPFEE, ενώ ο συνολικός χρόνος μετακίνησης είναι μειωμένος κατά 7% σε σχέση με την MC και 10% σε σχέση με την GATRANSPFEE.

Πίνακας 6-13: Σύγκριση εναλλακτικών προσεγγίσεων στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης του ρίσκου με τις μεθόδους MC και GATRANSPFEE στη μέγιστη ώρα αιχμής

Προσέγγιση	Μέση Καθυστέρηση (δλεπτα/χλμ)	Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης (οχηματο-ώρες)
mGA-CVaR-NSV	36,00	139,30
mGA-CVaR-SD	37,84	143,50
MC	43,70	148,88
GATRANSPFE	43,78	153,30

6.2.3 Σύγκριση μεθοδολογίας με το μεσοσκοπικό λογισμικό TRANSYT-7F

Η προτεινόμενη μεθοδολογία συγκρίθηκε με την αντίστοιχη επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία η εύρεση της βέλτιστης σηματοδότησης πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού TRANSYT-7F χρησιμοποιώντας πολλαπλά διαδοχικά βήματα (20 λεπτών) για την κάλυψη των τριών ωρών της περιόδου ανάλυσης. Η επαναληπτική διαδικασία εκκίνησε με τις ίδιες

τιμές παραμέτρων σηματοδότησης όπως και στην περίπτωση των προτεινόμενων εναλλακτικών προσεγγίσεων. Οι περιορισμοί και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης του δικτύου με το TRANSYT-7F παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Αναλυτικά οι παράμετροι του αλγόριθμου βελτιστοποίησης και της δυναμικής μεσοσκοπικής προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

Πίνακας 6-14: Περιορισμοί και παράμετροι βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου στο TRANSYT

Παράμετρος	Τιμή
Ελάχιστος χρόνος περιόδου σηματοδότησης	50 δ/λεπτα
Μέγιστος χρόνος περιόδου σηματοδότησης	150 δ/λεπτα
Βήμα περιόδου σηματοδότησης	1 δ/λεπτο
Ελάχιστος χρόνος πρασίνου φάσης σηματοδότησης	7 δ/λεπτα
Ταχύτητα συντονισμού	50 χλμ/ώρα

Αντίστοιχα με τις προτεινόμενες προσεγγίσεις, σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας οι ρυθμίσεις σηματοδότησης που προκύπτουν από το TRANSYT-7F εισάγονται στο Aimsun στο οποίο πραγματοποιείται ο δυναμικός μεσοσκοπικός καταμερισμός της κυκλοφορίας. Τα αποτελέσματα των επαναληπτικών βημάτων που προκύπτουν από τη μεσοσκοπική προσομοίωση χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των βημάτων και την επιλογή των βέλτιστων ρυθμίσεων σηματοδότησης συγκρίνοντας τη μέση καθυστέρηση για όλο το δίκτυο καθ' όλο το χρόνο προσομοίωσης.

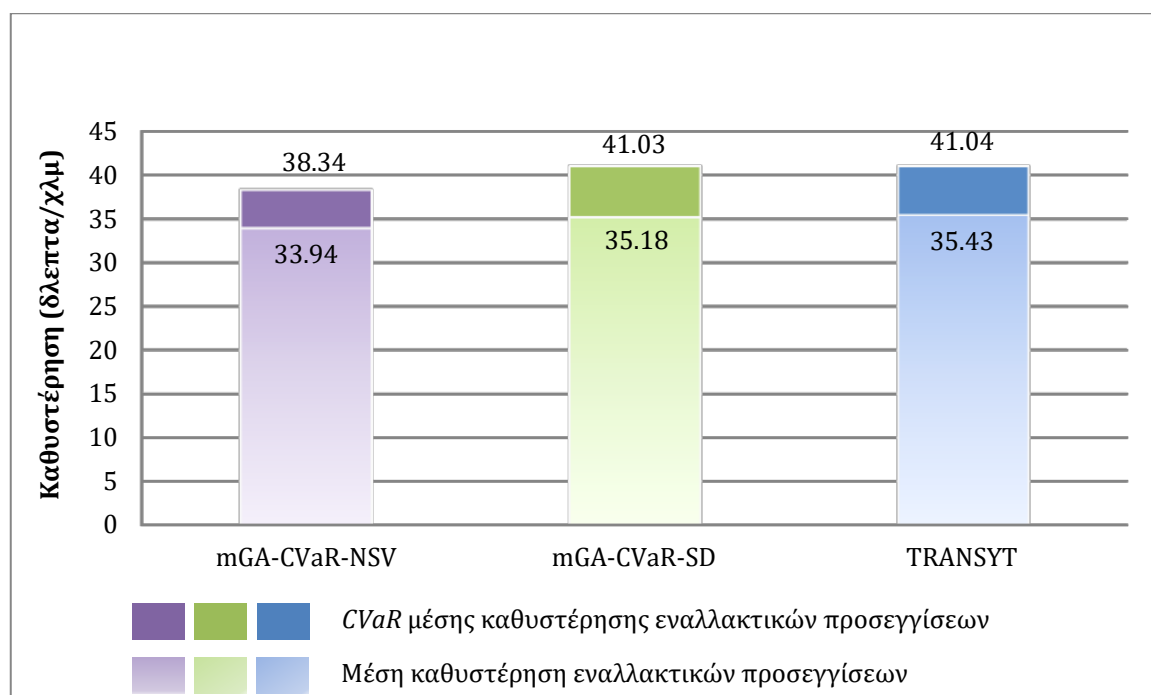
Η επαναληπτική διαδικασία με το TRANSYT-7F καταλήγει σε διαφορετικές σηματοδοτικές ρυθμίσεις όταν εξετάζεται η μέση καθυστέρηση και ο συνολικός αριθμός των διανυόμενων οχηματοωρών. Και στις δύο περιπτώσεις, όμως, η μεθοδολογία ελαχιστοποίησης του ρίσκου καθυστερήσεων παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα στη λειτουργία του δικτύου. Τελικώς, επιλέχθηκαν οι ρυθμίσεις που αντιστοιχούν στη μικρότερη μέση καθυστέρηση του δικτύου, με τις οποίες και ο συνολικός χρόνος μετακίνησης διαφέρει από τον ελάχιστο κατά 0,4%.

Η απόδοση του δικτύου με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F και τις ρυθμίσεις της προσέγγισης mGA-CVaR-SD είναι αντίστοιχη, παρουσιάζοντας ελαφρώς βελτιωμένη μέση καθυστέρηση σε σχέση με το TRANSYT-7F (-0,7%), βελτιωμένο συνολικό χρόνο μετακίνησης (-0,3%) και αντίστοιχο CVaR μέσης καθυστέρησης (-0,01%). Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV παρουσιάζει μεγαλύτερη βελτίωση σε σχέση με το TRANSYT-7F, αφού η μέση καθυστέρηση είναι κατά 4,4% μειωμένη, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης είναι μικρότερος κατά 3,9% και το CVaR μέσης καθυστέρησης είναι μικρότερο κατά 7%. Καλύτερη απόδοση παρουσιάζουν οι προτεινόμενες προσεγγίσεις και εξετάζοντας την ανάλυση της τυπικής απόκλισης των καθυστερήσεων ανά χρονικό βήμα, όπου είναι μία ένδειξη των διακυμάνσεων που αντιμετωπίζουν οι χρήστες. Στο Σχήμα 6-17 παρουσιάζονται διαγραμματικά η μέση καθυστέρηση του δικτύου στο σύνολο του χρόνου προσομοίωσης και το CVaR της μέσης καθυστέρησης του δικτύου,

ενώ στο ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά μεγέθη και η σύγκριση των δύο προτεινόμενων μεθόδων με το TRANSYT-7F.

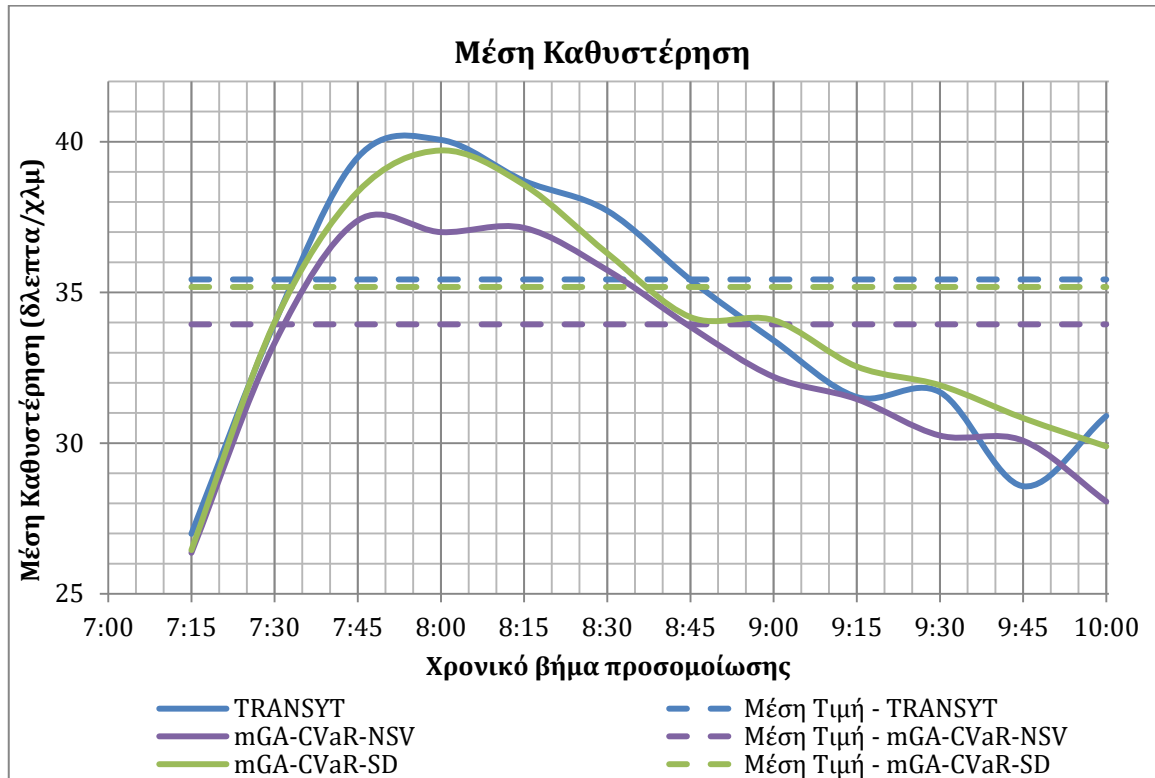
Πίνακας 6-15: Σύγκριση εναλλακτικών προσεγγίσεων στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης του ρίσκου

Προσέγγιση	Μέση Καθυστέρηση (δλεπτα/χλμ)		Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης (οχηματο-ώρες)	CVaR Μέσης Καθυστέρησης (δλεπτα/χλμ)
	Μέση Τιμή	Τυπ. Απόκλιση		
mGA-CVaR-NSV	33,94	3,67	291,52	38,34
mGA-CVaR-SD	35,18	3,99	301,82	41,03
TRANSYT-7F	35,43	4,39	302,81	41,04
Προσέγγιση	Βελτίωση σε σχέση με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F			
mGA-CVaR-NSV	-4,4%	-16,5%	-3,9%	-7,0%
mGA-CVaR-SD	-0,7%	-9,1%	-0,3%	0,0%



Σχήμα 6-17: Μέση καθυστέρηση και CVaR μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων

Εξετάζοντας τη χρονική διακύμανση της μέσης καθυστέρησης (βλ. Σχήμα 6-18) παρατηρείται μία μείωση των μέγιστων τιμών της μέσης καθυστέρησης με τις προσεγγίσεις ελαχιστοποίησης του ρίσκου, που είναι πιο προφανής με την προσέγγιση mGA-CVaR-NSV. Αυτή η μείωση των μέγιστων τιμών της μέσης καθυστέρησης που παρατηρείται στο μεγαλύτερο αριθμό των οχημάτων αποτελεί και το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου που προτείνεται. Η μείωση αυτή είναι σημαντική όχι μόνο γιατί στατιστικά παρατηρείται από το μεγαλύτερο όγκο οχημάτων, αλλά κυρίως επειδή αποτρέπει την εμφάνιση υψηλών τιμών στο σύστημα, οι οποίες δεν είναι εύκολα διαχειρίσιμες και ανατρέψιμες σε ένα ανεπάντεχο συμβάν που μπορεί να προκαλέσει είτε αύξηση της ζήτησης είτε μείωση της ικανότητας του δικτύου.



Σχήμα 6-18: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων

Για τη σύγκριση των εναλλακτικών προσεγγίσεων αναφορικά με το συντονισμό των διαδρομών στο δίκτυο, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι τρεις δείκτες της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης (bandwidth):

- Χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης (bandwidth, BW , σε δευτερόλεπτα), που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου οχήματος που μπορούν να διασχίσουν μία διαδρομή χωρίς να διακοπεί η πορεία τους από κόκκινη ένδειξη σηματοδότησης.
- Αποδοτικότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης (bandwidth efficiency, BW_{eff}), που αντιστοιχεί στο ποσοστό της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης ως προς την περίοδο σηματοδότησης

$$BW_{eff} = \frac{BW}{C} 100\% \quad (6-1)$$

όπου C είναι η περίοδος σηματοδότησης σε δευτερόλεπτα και BW η χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης σε δευτερόλεπτα.

- Χωρητικότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης (bandwidth capacity, BW_{cap} , σε οχήματα/ώρα), που αντιστοιχεί στον αριθμό των οχημάτων που μπορούν να διασχίσουν μία διαδρομή χωρίς να διακοπεί η πορεία τους από κόκκινη ένδειξη σηματοδότησης.

$$BW_{cap} = \frac{3600 \cdot BW \cdot n}{C \cdot h} \quad (6-2)$$

όπου n είναι ο αριθμός των λωρίδων και h είναι ο χρονικός διαχωρισμός κορεσμού (saturation headway) σε δευτερόλεπτα, που για τη συγκεκριμένη εφαρμογή θεωρήθηκε 2,5 δευτερόλεπτα/ όχημα.

Επίσης, ορίστηκε ένας δείκτης που σταθμίζει την αποδοτικότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης με το φόρτο της κάθε διαδρομής έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης σε συνδυασμό με τον κυκλοφοριακό φόρτο που τελικά χρησιμοποιήσει την κάθε διαδρομή:

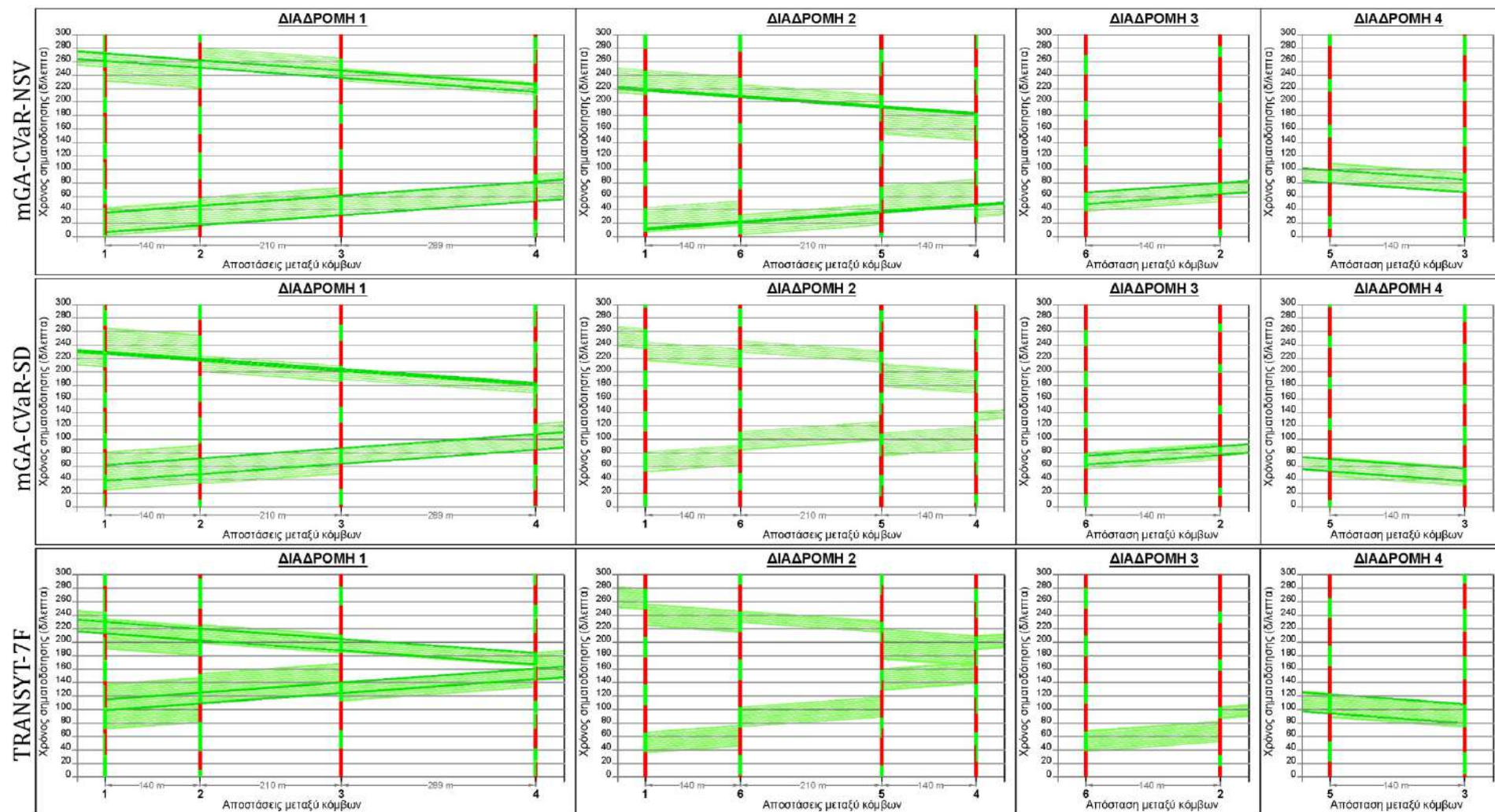
$$BW_{eff}^{vol} = BW_{eff} \cdot Volume \quad (6-3)$$

Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV επιτυγχάνει το συντονισμό όλων των διαδρομών και των κατευθύνσεών τους, ενώ η προσέγγιση mGA-CVaR-SD και το TRANSYT-7F δεν επιτυγχάνουν να συντονίσουν τη διαδρομή 2. Επιπλέον, το TRANSYT-7F δεν επιτυγχάνει να συντονίσει την τρίτη διαδρομή, η οποία φέρει σημαντικό φόρτο. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που η δευτερεύουσα κατεύθυνση της διαδρομής 2 έχει χαμηλή αποδοτικότητα της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης προτιμάται σε σχέση με την ανταγωνιστική κατεύθυνση της διαδρομής 1 στην προσομοίωση. Αυτή η επιλογή δεν δικαιολογείται από το εύρος της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης όταν λαμβάνεται υπόψη όλο το μήκος της διαδρομής. Όταν όμως εξαιρεθεί από τον υπολογισμό ο πρώτος κόμβος της διαδρομής η ζώνη αυξάνεται (συγκεκριμένα στην προσέγγιση mGA-CVaR-NSV η ζώνη γίνεται 19 δ/λεπτα από 2 δ/λεπτα), έτσι μετά την αναμονή στην πρώτο κόμβο η υπόλοιπη κίνηση των οχημάτων σε αυτή τη διαδρομή είναι πολύ πιο ευνοϊκή από ότι στην εναλλακτική της. Από την ανάλυση των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων φαίνεται ότι η συνολική χωρητικότητα των χρονικών ζωνών αδιάκοπης διέλευσης των διαδρομών είναι κατά 32% αυξημένη με την προσέγγιση mGA-CVaR-NSV και 7% με την προσέγγιση mGA-CVaR-SD σε σχέση με το TRANSYT-7F. Αντίστοιχα η συνολική σταθμισμένη αποδοτικότητα των χρονικών ζωνών αδιάκοπης διέλευσης των διαδρομών είναι αυξημένη κατά 23% με την προσέγγιση mGA-CVaR-NSV και 14% με την προσέγγιση mGA-CVaR-SD σε σχέση με το TRANSYT-7F.

Τα αποτελέσματα των δεικτών αξιολόγησης του συντονισμού των προκαθορισμένων διαδρομών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-16. Τα διαγράμματα αποστάσεων – χρόνων συντονισμού διαδρομών με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις προσφέρουν την εποπτική παρατήρηση του συντονισμού στις διαδρομές του δικτύου (βλ. Σχήμα 6-19).

Πίνακας 6-16: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού διαδρομών σηματοδότησης

Δείκτης	Διαδρομές/ Κατευθύνσεις		mGA-CVaR-NSV	mGA-CVaR-SD	TRANSYT-7F
Συνολικός φόρτος (οχ/ώρα)	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	1508	1508	1508
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	128	73	290
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	0	0	0
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	736	791	574
	3		971	970	602
	4		1937	1937	1937
Χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης (δ/λεπτα)	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	28,79	22,79	15,88
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	10,88	2,85	17,06
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	1,92	0	0
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	2,08	0	0
	3		17	13	0
	4		18,6	18	28,4
Περίοδος (δ/λεπτα)			68	61	71
Αποδοτικότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευ- σης	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	42,3%	37,4%	22,4%
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	16,0%	4,7%	24,0%
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	2,8%	0,0%	0,0%
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	3,1%	0,0%	0,0%
	3		25,0%	21,3%	0,0%
	4		27,4%	29,5%	40,0%
Σταθμισμένη αποδοτικότη- τα χρονικής ζώνης αδιάκο- πης διέλευσης	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	638	563	337
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	20	3	70
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	0	0	0
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	23	0	0
	3		243	207	0
	4		530	572	775
Σύνολο Διαδρομών		1454	1345	1182	
Χωρητικότητα χρονικής ζώ- νης αδιάκοπης διέλευσης	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	1219	1076	644
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	461	135	692
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	41	0	0
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	44	0	0
	3		720	614	0
	4		788	850	1152
Σύνολο Διαδρομών		3273	2674	2488	



Σχήμα 6-19: Διαγράμματα αποστάσεων - χρόνων συντονισμού διαδρομών με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις

Επιπλέον για την αξιολόγηση των διαδρομών δύο κατευθύνσεων χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες σύμφωνα με το Traffic Signal Timing Manual (Koonce et al., 2015):

- Αποδοτικότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης (bandwidth efficiency, BW_{eff}^r) συνολικά για τη διαδρομή λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο κατευθύνσεις της

$$BW_{eff}^r = \frac{BW^1 + BW^2}{2 \cdot C} 100\% \quad (6-4)$$

όπου C είναι η περίοδος σηματοδότησης σε δευτερόλεπτα και BW^i η χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης σε δευτερόλεπτα για την κάθε κατεύθυνση, i , της διαδρομής.

- Εφικτότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης (bandwidth attainability, BW_{att}^r) συνολικά για τη διαδρομή λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο κατευθύνσεις της

$$BW_{att}^r = \frac{BW^1 + BW^2}{g_{min}^1 + g_{min}^2} 100\% \quad (6-5)$$

όπου BW^i η χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης σε δευτερόλεπτα για την κάθε κατεύθυνση, i , της διαδρομής και g_{min}^i ο ελάχιστος χρόνος πρασίνου των κόμβων της κάθε κατεύθυνσης, i , της διαδρομής.

Στους επόμενους πίνακες παρέχεται η αξιολόγηση των δύο δεικτών σύμφωνα με το Traffic Signal Timing Manual (Koonce et al., 2015).

Πίνακας 6-17: Επίπεδα αποδοτικότητας χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης διαδρομών δύο κατευθύνσεων

Αποδοτικότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης	Αξιολόγηση PASSER II
0% - 12%	Χαμηλό επίπεδο συντονισμού
13% - 24%	Μέτριο επίπεδο συντονισμού
25% - 36%	Καλό επίπεδο συντονισμού
37% - 100%	Πολύ καλό επίπεδο συντονισμού

Πίνακας 6-18: Επίπεδα εφικτότητας χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης διαδρομών δύο κατευθύνσεων

Εφικτότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης	Οδηγίες PASSER II για καλύτερη ρύθμιση
100% - 99%	Αύξηση ελάχιστου χρόνου φάσης (αν απαιτείται)
99% - 70%	Μικρές προσαρμογές για καλύτερη απόδοση
69% - 0%	Απαίτηση για σημαντικές προσαρμογές

Στον επόμενο πίνακα φαίνεται με χρωματική διαβάθμιση η αξιολόγηση των διαδρομών δύο κατευθύνσεων. Στο δίκτυο υποδείγματος επειδή οι διαδρομές 3 και 4 είναι παράλληλες και

αντίρροπες, έχουν θεωρηθεί ως μία ενοποιημένη διαδρομή με δύο κατευθύνσεις. Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV έχει επιτύχει καλό συντονισμό στη διαδρομή 1 και στην ενοποιημένη διαδρομή 3-4, ενώ για την εναλλακτική διαδρομή 2 που συνδέει βορρά – νότο έχει επιτύχει χαμηλό επίπεδο συντονισμού. Η προσέγγιση mGA-CVaR-SD έχει επιτύχει μέτριο συντονισμό στη διαδρομή 1 και καλό συντονισμό στη διαδρομή 3 – 4, ενώ στη διαδρομή 2 δεν υπάρχει καθόλου συντονισμός. Τέλος, το TRANSYT-7F έχει επιτύχει λίγο καλύτερο συντονισμό στη διαδρομή 1 σε σχέση με την προσέγγιση mGA-CVaR-SD και λίγο χειρότερο στη διαδρομή 3 – 4. Αντίστοιχα, φαίνεται ότι η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV υπερέχει όταν εξεταστούν συνολικά όλες οι διαδρομές αφού η συνολική αποδοτικότητα είναι 19,4%, ενώ στις άλλες προσεγγίσεις είναι περίπου 15%. Εξετάζοντας την εφικτότητα συντονισμού, η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV υπερέχει, αφού φαίνεται ότι έχει αξιοποιηθεί το μεγαλύτερο ποσοστό του διαθέσιμου πρασίνου στο συντονισμό των δύο κατευθύνσεων των διαδρομών 1 και 3 – 4. Αντίστοιχα, η προσέγγιση mGA-CVaR-SD έχει αξιοποιήσει πλήρως το διαθέσιμο πράσινο στη διαδρομή 3 – 4, αλλά στη διαδρομή 1 παρουσιάζει το χαμηλότερο ποσοστό εφικτότητας από τις τρεις προσεγγίσεις. Τέλος, το TRANSYT-7F έχει αξιοποιήσει περισσότερο το πράσινο της διαδρομής 1 σε σχέση με την προσέγγιση mGA-CVaR-SD, αλλά στη διαδρομή 3 - 4 έχει επιτύχει χαμηλή εφικτότητα.

Πίνακας 6-19: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού διαδρομών σηματοδότησης

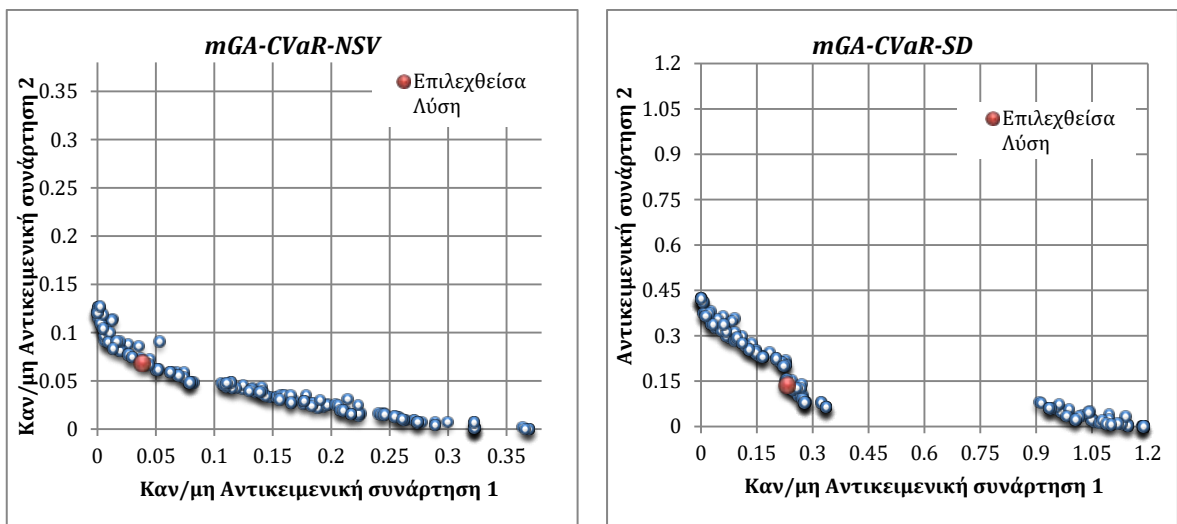
Δείκτες	Διαδρομές Δύο Κατευθύνσεων	mGA-CVaR-NSV	mGA-CVaR-SD	TRANSYT-7F
Αποδοτικότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης	1	29,2%	21,0%	23,2%
	2	2,9%	0,0%	0,0%
	3 – 4	26,2%	25,4%	20,0%
	Σύνολο Διαδρομών	19,4%	15,5%	14,4%
Εφικτότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης	1	84,4%	67,5%	71,6%
	2	10,8%	0,0%	0,0%
	3 – 4	98,9%	100,0%	60,4%
	Σύνολο Διαδρομών	66%	58%	48%

6.2.4 Εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης και σύγκριση μεθοδολογιών σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης

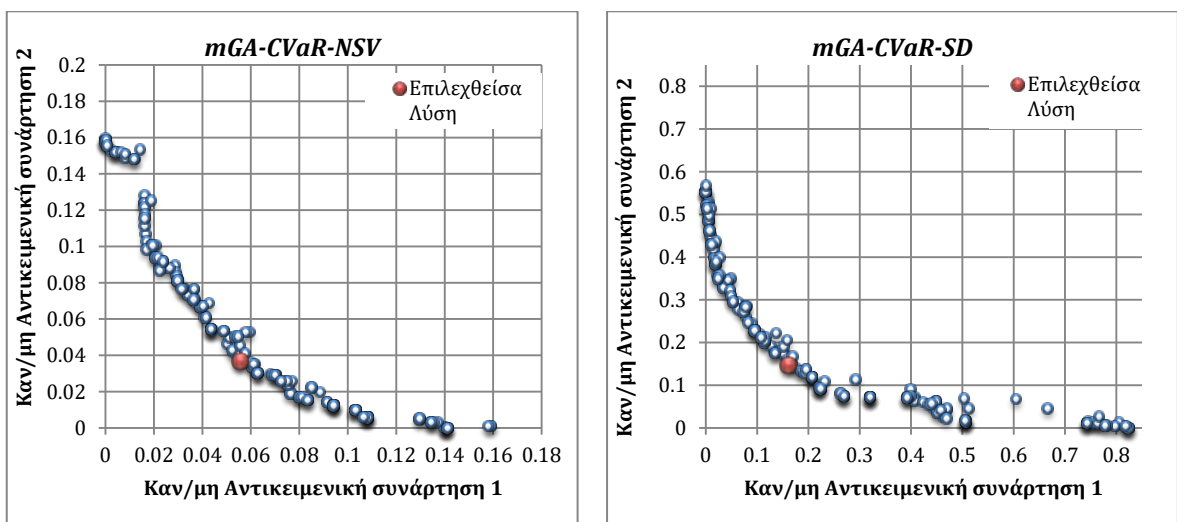
Η αντίστοιχη σύγκριση των τριών μεθοδολογιών πραγματοποιήθηκε στο δίκτυο σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης, έτσι ώστε να εξεταστεί το όφελος από την προτεινόμενη μεθοδολογία όταν οι κυκλοφοριακές συνθήκες είναι πιο κορεσμένες. Έτσι διαμορφώθηκαν δύο σενάρια, της υψηλής ζήτησης που αντιστοιχεί σε αύξηση 20% και της πολύ υψηλής ζήτησης που αντιστοιχεί σε αύξηση 40%.

Οι βέλτιστες λύσεις στις προσεγγίσεις mGA-CVaR-NSV και mGA-CVaR-SD επιλέχθηκαν βάσει της μικρότερης τιμής του CVaR της μέσης καθυστέρησης, σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, ενώ στην προσέγγιση με το TRANSYT-7F επιλέχθηκαν βάσει της χαμηλότερης τιμής της μέσης καθυστέρησης, αφού και η βελτιστοποίηση στο TRANSYT-7F δεν λαμβάνει υπόψη το CVaR της μέσης καθυστέρησης.

Τα σημεία του μετώπου Pareto και η επιλεγθείσα λύση των δύο προσεγγίσεων mGA-CVaR-NSV και mGA-CVaR-SD, που έχουν προκύψει από την επανάληψη που παρουσιάζει το μικρότερο ρίσκο καθυστερήσεων στο δίκτυο στα δύο σενάρια ζήτησης, απεικονίζονται στα Σχήμα 6-20 και Σχήμα 6-21. Φαίνεται ότι στην περίπτωση της υψηλής ζήτησης δεν είναι καλά κατανεμημένα τα σημεία του μετώπου Pareto της mGA-CVaR-SD παρουσιάζοντας ένα διακοπόμενο μέτωπο.



Σχήμα 6-20: Διαγράμματα μετώπου Pareto σεναρίου υψηλής ζήτησης

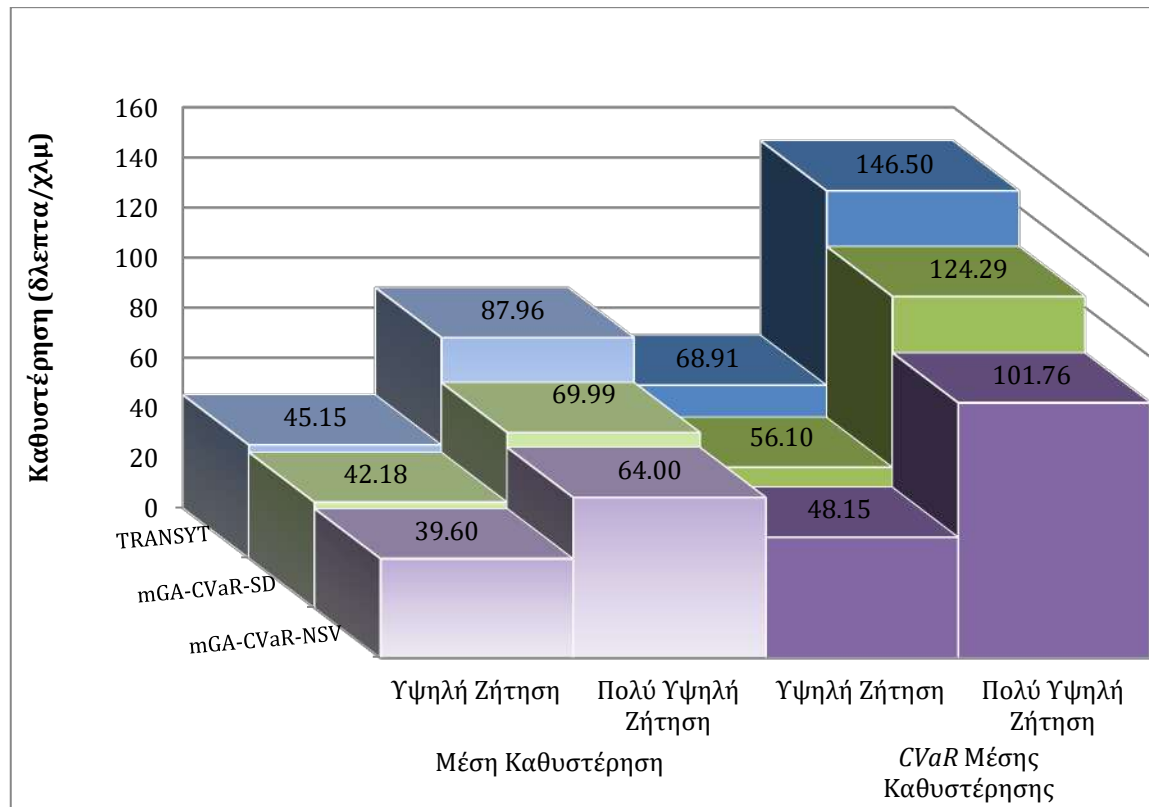


Σχήμα 6-21: Διαγράμματα μετώπου Pareto σεναρίου πολύ υψηλής ζήτησης

Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV υπερέχει σε σχέση με τη προσέγγιση mGA-CVaR-SD και με το TRANSYT-7F σε όλες τις περιπτώσεις σύγκρισης της απόδοσης του δικτύου με τους εξεταζό-

μενους δείκτες της μέσης καθυστέρησης, του συνολικού χρόνου μετακίνησης και του *CVaR* της μέσης καθυστέρησης.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα και η σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών προσεγγίσεων στα δύο σενάρια ζήτησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-22 και στον ακόλουθο πίνακα, όπου φαίνεται ότι όσο η ζήτηση αυξάνεται και οι συνθήκες υπερκορεσμού γίνονται πιο κρίσιμες υπάρχει μεγαλύτερο όφελος από τις προτεινόμενες προσεγγίσεις σε σχέση με το TRANSYT-7F.



Σχήμα 6-22: Μέση καθυστέρηση και *CVaR* μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων σεναρίων αυξημένης ζήτησης

Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV παρουσιάζει βελτιωμένες συνθήκες στο δίκτυο σε σχέση και με τις δύο μεθόδους και στα δύο σενάρια ζήτησης. Παρατηρείται, λοιπόν, χαμηλότερη μέση καθυστέρηση σε σχέση με το TRANSYT-7F κατά 12% και 27% στα σενάρια υψηλής και πολύ υψηλής ζήτησης. Αντίστοιχα, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης στο δίκτυο με τις ρυθμίσεις της προσέγγισης mGA-CVaR-NSV είναι μειωμένος κατά 5% και 14% στα δύο σενάρια. Το *CVaR* της μέσης καθυστέρησης στο δίκτυο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφορά σε σύγκριση με το TRANSYT-7F, αφού και στα δύο σενάρια ζήτησης υπάρχει βελτίωση 30%. Η προσέγγιση mGA-CVaR-SD παρουσιάζει μικρότερη βελτίωση από το TRANSYT-7F σε σχέση με την προσέγγιση mGA-CVaR-NSV. Η μέση καθυστέρηση του δικτύου με τις ρυθμίσεις της mGA-CVaR-SD είναι κατά 7% χαμηλότερη σε σχέση με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F στο σενάριο υψηλής ζήτησης και 20% στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης. Ο συνολικός χρόνος μετακίνη-

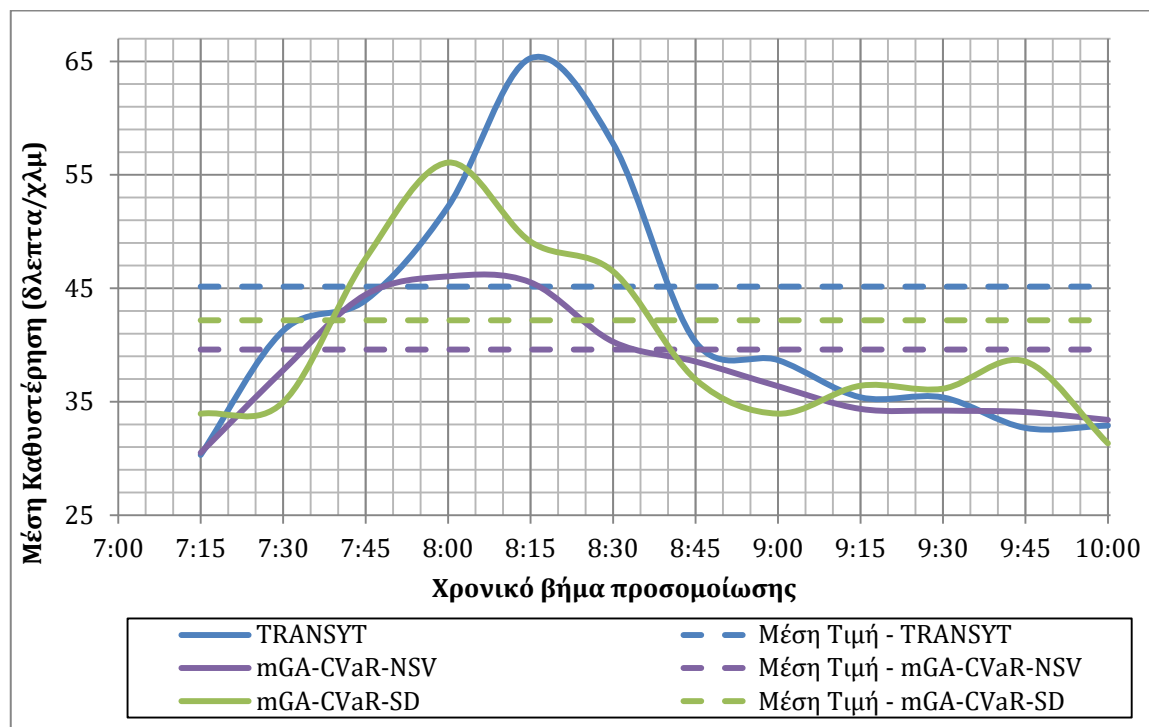
σης με την mGA-CVaR-SD είναι μειωμένος κατά 3% και 9% στα δύο σενάρια υψηλής και πολύ υψηλής ζήτησης. Η μείωση του CVaR με την προσέγγιση mGA-CVaR-SD σε σχέση με το TRANSYT-7F είναι 19% στο σενάριο υψηλής ζήτησης, και κατά 3,5% ποσοστιαίες μονάδες μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη βελτίωση στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης. Επίσης, καλύτερη απόδοση παρουσιάζουν οι προτεινόμενες προσεγγίσεις και εξετάζοντας την ανάλυση της τυπικής απόκλισης των καθυστερήσεων ανά χρονικό βήμα, όπου είναι μία ένδειξη των διακυμάνσεων που αντιμετωπίζουν οι χρήστες.

Πίνακας 6-20: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού διαδρομών σηματοδότησης

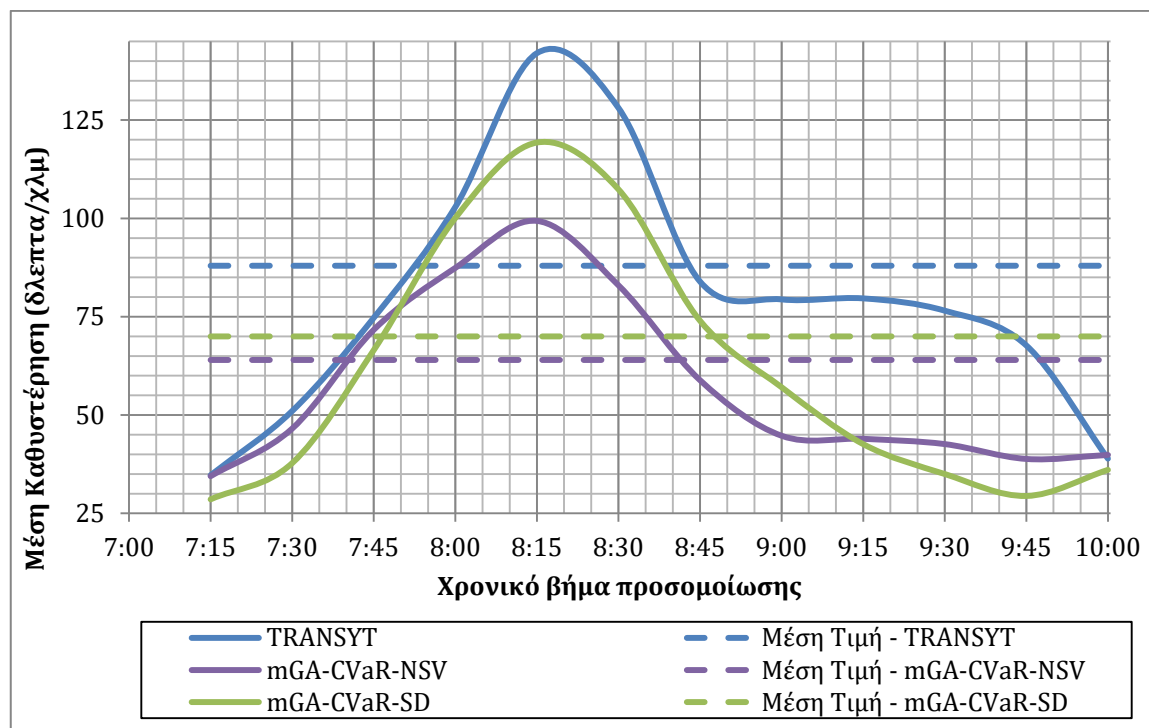
Σενάριο	Προσέγγιση	Μέση Καθυστέρηση (δλεπτα/χλμ)		Συν. Χρόνος Μετακίνησης (οχηματο-ώρες)	CVaR Μέσης Καθυστέρησης (δλεπτα/χλμ)
		Μέση Τιμή	Τυπ. Α-πόκλιση		
Υψηλής Ζήτησης	mGA-CVaR-NSV	39,60	5,15	374,87	48,15
	mGA-CVaR-SD	42,18	7,88	381,85	56,10
	TRANSYT-7F	45,15	11,19	394,80	68,91
	Προσέγγιση	Βελτίωση σε σχέση με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F			
	mGA-CVaR-NSV	-12,3%	-54,0%	-5,0%	-30,1%
	mGA-CVaR-SD	-6,6%	-29,5%	-3,3%	-18,6%
Πολύ Υψηλής Ζήτησης	mGA-CVaR-NSV	64,00	22,20	547,58	101,76
	mGA-CVaR-SD	69,99	32,44	579,73	124,29
	TRANSYT-7F	87,96	32,28	639,80	146,50
	Προσέγγιση	Βελτίωση σε σχέση με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F			
	mGA-CVaR-NSV	-27,2%	-31,2%	-14,4%	-30,5%
	mGA-CVaR-SD	-20,4%	0,5%	-9,4%	-15,2%

Το όφελος από τη βελτιστοποίηση της ελαχιστοποίησης του ρίσκου στην εύρεση των βέλτιστων σηματοδοτικών ρυθμίσεων απεικονίζεται χαρακτηριστικά μέσω της διακύμανσης της μέσης καθυστέρησης του δικτύου και του συνολικού χρόνου μετακίνησης στο σενάριο υψηλής ζήτησης (βλ. Σχήμα 6-23). Αντίστοιχα με την περίπτωση του βασικού σεναρίου, όταν το δίκτυο λειτουργεί με τις ρυθμίσεις της προσέγγισης mGA-CVaR-NSV παρατηρείται μία μείωση των μεγάλων τιμών καθυστερήσεων κατά τη μέγιστη ώρα αιχμής, διατηρώντας έτσι το δίκτυο σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης με παράλληλη μείωση του ρίσκου παρατήρησης αυξημένων επιπέδων συμφόρησης. Σημαντική βελτίωση παρατηρείται επίσης και με τις ρυθμίσεις της προσέγγισης mGA-CVaR-SD σε σχέση με την αντίστοιχη διακύμανση της μέσης καθυστέρησης που έχει το δίκτυο με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F, όπου και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές της μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα είναι πιο περιορισμένες. Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι στο πρώτο τέταρτο της μέγιστης ώρας αιχμής η μέση καθυστέρηση με την mGA-CVaR-SD είναι μεγαλύτερη σε σχέση με του TRANSYT-7F. Στη συνέχεια, όμως, η εκθετική αύξηση της μέσης καθυστέρησης του δικτύου με τις ρυθμί-

σεις του TRANSYT-7F καλύπτει αυτή τη διαφορά εμφανίζοντας τελικώς πολύ μεγαλύτερες καθυστερήσεις και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 6-23: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων σεναρίου υψηλής ζήτησης



Σχήμα 6-24: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων σεναρίου πολύ υψηλής ζήτησης

Στο Σχήμα 6-24 παρουσιάζεται η διακύμανση της μέσης καθυστέρησης των εναλλακτικών προσεγγίσεων στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης. Σε αυτή την περίπτωση η μορφολογία των καμπυλών των τριών προσεγγίσεων είναι αντίστοιχη, γεγονός που δικαιολογείται αφού πλέον και στις τρεις περιπτώσεις τα επίπεδα συμφόρησης στο δίκτυο κατά τη μέγιστη ώρα αιχμής είναι πολύ αυξημένα δημιουργώντας μεγάλες καθυστερήσεις. Παρόλ' αυτά η ανωτερότητα της προσέγγισης mGA-CVaR-NSV και δευτερευόντως της προσέγγισης mGA-CVaR-SD, σε σχέση με την κλασσική προσέγγιση που χρησιμοποιείται από το TRANSYT-7F, είναι ορατή κυρίως κατά την εμφάνιση των κρίσιμων υψηλών τιμών καθυστερήσεων.

Ο συντονισμός των διαδρομών που προέκυψε από τις εναλλακτικές προσεγγίσεις στα δύο σενάρια ζήτησης αξιολογήθηκε με τους δείκτες της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης, όπως στο βασικό σενάριο και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6-21: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού σηματοδότησης στα σενάρια αυξημένης ζήτησης

Δείκτης	Διαδρομές/ Κατευθύνσεις		Σενάριο υψηλής ζήτησης			Σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης		
			mGA- CVaR- NSV	mGA- CVaR- SD	TRANS YT-7F	mGA- CVaR- NSV	mGA- CVaR- SD	TRANS YT-7F
Συνολικός φόρτος (οχ/ώρα)	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	1807	1652	1173	1848	1611	308
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	752	484	46	489	600	53
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	7	159	600	202	481	1801
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	272	539	974	697	577	1148
	3		1168	1095	1016	1364	1363	1363
	4		2331	2329	2331	2720	2720	2720
Χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης (δ/λεπτα)	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	22,79	17,79	11,88	36,79	7,12	0
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	19,09	3,94	12,73	9,88	6,91	0
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	10,92	16,65	3,85	0	0	19,65
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	2,2	3,12	2,12	0	0	12,8
	3		17,4	14	7,4	32	15,6	12,4
	4		24,6	7,6	8,6	28	20	15,6
Περίοδος (δ/λεπτα)			77	67	72	83	64	87
Αποδοτικότητα χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευ- σης	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	29,6%	26,6%	16,5%	44,3%	11,1%	0,0%
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	24,8%	5,9%	17,7%	11,9%	10,8%	0,0%
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	14,2%	24,9%	5,3%	0,0%	0,0%	22,6%
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	2,9%	4,7%	2,9%	0,0%	0,0%	14,7%
	3		22,6%	20,9%	10,3%	38,6%	24,4%	14,3%
	4		31,9%	11,3%	11,9%	33,7%	31,3%	17,9%

Δείκτης	Διαδρομές/ Κατευθύνσεις		Σενάριο υψηλής ζήτησης			Σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης		
			mGA- CVaR- NSV	mGA- CVaR- SD	TRANS YT-7F	mGA- CVaR- NSV	mGA- CVaR- SD	TRANS YT-7F
Σταθμισμένη αποδοτικότητα τα χρονικής ζώνης αδιάκο- πης διέλευσης	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	535	439	194	819	179	0
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	186	28	8	58	65	0
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	1	40	32	0	0	407
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	8	25	29	0	0	169
	3		264	229	104	526	332	194
	4		745	264	278	918	850	488
	Σύνολο Διαδρομών		1739	1025	645	2321	1426	1258
Χωρητικότητα χρονικής ζώ- νης αδιάκοπης διέλευσης	1	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	852	765	475	1277	320	0
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	714	169	509	343	311	0
	2	Πρωτεύουσα κατεύθυνση	204	358	77	0	0	325
		Δευτερεύουσα κατεύθυνση	41	67	42	0	0	212
	3		651	602	296	1110	702	410
	4		920	327	344	972	900	516
	Σύνολο Διαδρομών		3383	2287	1744	3701	2233	1464

Στο σενάριο υψηλής ζήτησης όλες οι προσεγγίσεις επιτυγχάνουν το συντονισμό όλων των διαδρομών και κατευθύνσεων, παρέχοντας έστω και μία πολύ μικρή χρονική ζώνη αδιάκοπης διέλευσης, ενώ στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης οι προτεινόμενες προσεγγίσεις δεν συντονίζουν καθόλου τις κατευθύνσεις της διαδρομής 2, επιπλέον το TRANSYT-7F δεν συντονίζει και τις κατευθύνσεις της διαδρομής 1. Από την ανάλυση των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων στο σενάριο υψηλής ζήτησης φαίνεται ότι η συνολική χωρητικότητα των χρονικών ζωνών αδιάκοπης διέλευσης των διαδρομών είναι κατά 94% μεγαλύτερη με την προσέγγιση mGA-CVaR-NSV και κατά 31% με την προσέγγιση mGA-CVaR-SD σε σχέση με το TRANSYT-7F, ενώ στην περίπτωση του σεναρίου πολύ υψηλής ζήτησης η διαφορά της συνολικής χωρητικότητας σε σχέση με το TRANSYT-7F είναι 153% με την mGA-CVaR-NSV και 53% με την mGA-CVaR-SD. Αντίστοιχα, η συνολική σταθμισμένη αποδοτικότητα των χρονικών ζωνών χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης των διαδρομών είναι αυξημένη κατά 169% με την προσέγγιση mGA-CVaR-NSV και 59% με την προσέγγιση mGA-CVaR-SD σε σχέση με το TRANSYT-7F στο σενάριο υψηλής ζήτησης και στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης είναι αυξημένη κατά 85% με την mGA-CVaR-NSV και 13% με την mGA-CVaR-SD.

Τα βασικά σημεία από την ανάλυση των δεικτών στην περίπτωση του σεναρίου υψηλής ζήτησης είναι τα ακόλουθα:

- Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV πριμοδοτεί τη διαδρομή 1 έναντι της ανταγωνιστικής της (2) σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι οι άλλες δύο προσεγγίσεις και επομένως περισσότεροι χρήστες επέλεξαν αυτή τη διαδρομή. Επίσης, η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV επιτυγχάνει πολύ ικανοποιητικό συντονισμό των δύο διαδρομών 3 και 4 που εξυπηρετούν σημαντικό φόρτο και προσδίδουν περιορισμό στο συντονισμό των άλλων δύο διαδρομών. Γενικά ο συντονισμός κρίνεται πολύ ικανοποιητικός, αφού μόνο η 2^η κατεύθυνση της διαδρομής 2 αξιολογείται ως χαμηλή, αλλά ακόμα και σε αυτή την περίπτωση ο συντονισμός των τριών τελευταίων κόμβων είναι πολύ ικανοποιητικός.
- Η προσέγγιση mGA-CVaR-SD έχει ουσιαστικά δώσει προτεραιότητα στο συντονισμό των κατευθύνσεων νότο – βορρά των δύο διαδρομών 1 και 2, καθώς και στην εγκάρσια διαδρομή 3, με αποτέλεσμα οι αντίρροπες κατευθύνσεις των διαδρομών 1 και 2 να έχουν πολύ χαμηλό επίπεδο συντονισμού, όπως και η εγκάρσια διαδρομή 4, η οποία φέρει και μεγάλο όγκο οχημάτων. Στην κατεύθυνση βορρά – νότο η διαδρομή 1 έχει έναν καλό συντονισμό στους τρεις τελευταίους κόμβους, κάτι που όμως δεν ισχύει για την αντίστοιχη κατεύθυνση της διαδρομής 2.
- Το TRANSYT-7F παρουσιάζει μέτριο συντονισμό στις δύο κατευθύνσεις της πρώτης διαδρομής, αλλά όλες οι υπόλοιπες έχουν χαμηλό επίπεδο συντονισμού. Συγκεκριμένα, η διαδρομή 2 έχει συντονισμένους κόμβους ανά ζεύγη και στις δύο κατευθύνσεις, γεγονός που συντελεί και στην επιλογή της από μεγάλο ποσοστό χρηστών. Άλλος ένας λόγος για την επιλογή της διαδρομής 2 έναντι της εναλλακτικής διαδρομής αποτελεί και ο καταμερισμός της ζήτησης που αντιστοιχεί στη διαδρομή 3 που δεν έχει καλό συντονισμό σε εναλλακτική διαδρομή που διέρχεται από τον κόμβο 1 επιβαρύνοντας έτσι τον πρώτο κόμβο της διαδρομής 1.

Τα βασικά σημεία από την ανάλυση των δεικτών στην περίπτωση του σεναρίου πολύ υψηλής ζήτησης είναι τα ακόλουθα:

- Οι προσεγγίσεις mGA-CVaR-NSV και mGA-CVaR-SD έχουν επιτύχει το συντονισμό της διαδρομής 1, ενώ το TRANSYT-7F επιτυγχάνει το συντονισμό της διαδρομής 2. Συγκεκριμένα η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV επιτυγχάνει ένα πολύ καλό συντονισμό στην κατεύθυνση 1 της διαδρομής 1. Επομένως, η ζήτηση μεταξύ βορρά – νότου στις προτεινόμενες κατευθύνσεις καταμερίζεται κυρίως στη διαδρομή 1, ενώ στο TRANSYT-7F στη διαδρομή 2, η οποία όμως λόγω του μικρότερου αριθμού λωρίδων προσφέρει χα-

μηλότερη χωρητικότητα στο σύστημα και επομένως τελικώς χειρότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά.

- Επιπλέον, η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV επιτυγχάνει τον πολύ καλό συντονισμό των εγκάρσιων διαδρομών 3 – 4, που οι άλλες δύο προσεγγίσεις συντονίζουν μεν αλλά όχι τόσο επιτυχημένα.
- Εξετάζοντας τη σταθμισμένη αποδοτικότητα της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης φαίνεται ότι οι χρήστες με τις επιλογές διαδρομών τους, αξιοποιούν το όφελος από τον παρεχόμενο συντονισμό της προσέγγισης mGA-CVaR-NSV, αφού το σταθμισμένο όφελος από το συντονισμό των διαδρομών είναι πολύ μεγαλύτερο στην προσέγγιση αυτή.

Επιπλέον, για την αξιολόγηση των διαδρομών δύο κατευθύνσεων στην περίπτωση των σεναρίων αυξημένης ζήτησης χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες του Traffic Signal Timing Manual (Koonce et al., 2015), όπως αναλύθηκαν στο Κεφ. 6.2.3, και τα αποτελέσματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται με χρωματική διαβάθμιση στον Πίνακα 6-22 (σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που αναφέρεται στους Πίνακες 6-17 και 6-18).

Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV και στα σενάρια αυξημένης ζήτησης έχει επιτύχει καλό συντονισμό στη διαδρομή 1 και στην ενοποιημένη διαδρομή 3-4, ενώ για την εναλλακτική διαδρομή 2 που συνδέει το βορρά – νότο έχει επιτύχει χαμηλό επίπεδο συντονισμού. Η προσέγγιση mGA-CVaR-SD έχει επιτύχει μέτριο συντονισμό σε όλες τις διαδρομές στο σενάριο υψηλής ζήτησης, ενώ στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης έχει επιτύχει καλό συντονισμό στη διαδρομή 3 – 4, ενώ στη διαδρομή 2 δεν υπάρχει καθόλου συντονισμός και στη διαδρομή 1 το επίπεδο συντονισμού κρίνεται χαμηλό. Τέλος, το TRANSYT-7F φαίνεται να έχει καταλήξει σε διαφορετική προσέγγιση στο συντονισμό του δικτύου στα δύο σενάρια ζήτησης, αφού στο σενάριο υψηλής ζήτησης έχει επιτύχει μέτριο συντονισμό στη διαδρομή 1 και χαμηλό στις άλλες δύο, ενώ στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης έχει επιτύχει μέτριο συντονισμό στις δύο διαδρομές 2 και 3-4 και καθόλου συντονισμό στη διαδρομή 1. Φαίνεται ότι η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV υπερέχει όταν εξεταστούν συνολικά όλες οι διαδρομές, αφού η συνολική αποδοτικότητα είναι 21% περίπου και στα δύο σενάρια αυξημένης ζήτησης, ενώ το TRANSYT-7F έχει 11% περίπου και στα δύο σενάρια ζήτησης και η mGA-CVaR-SD έχει 16% στο σενάριο υψηλής ζήτησης και 13% στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης.

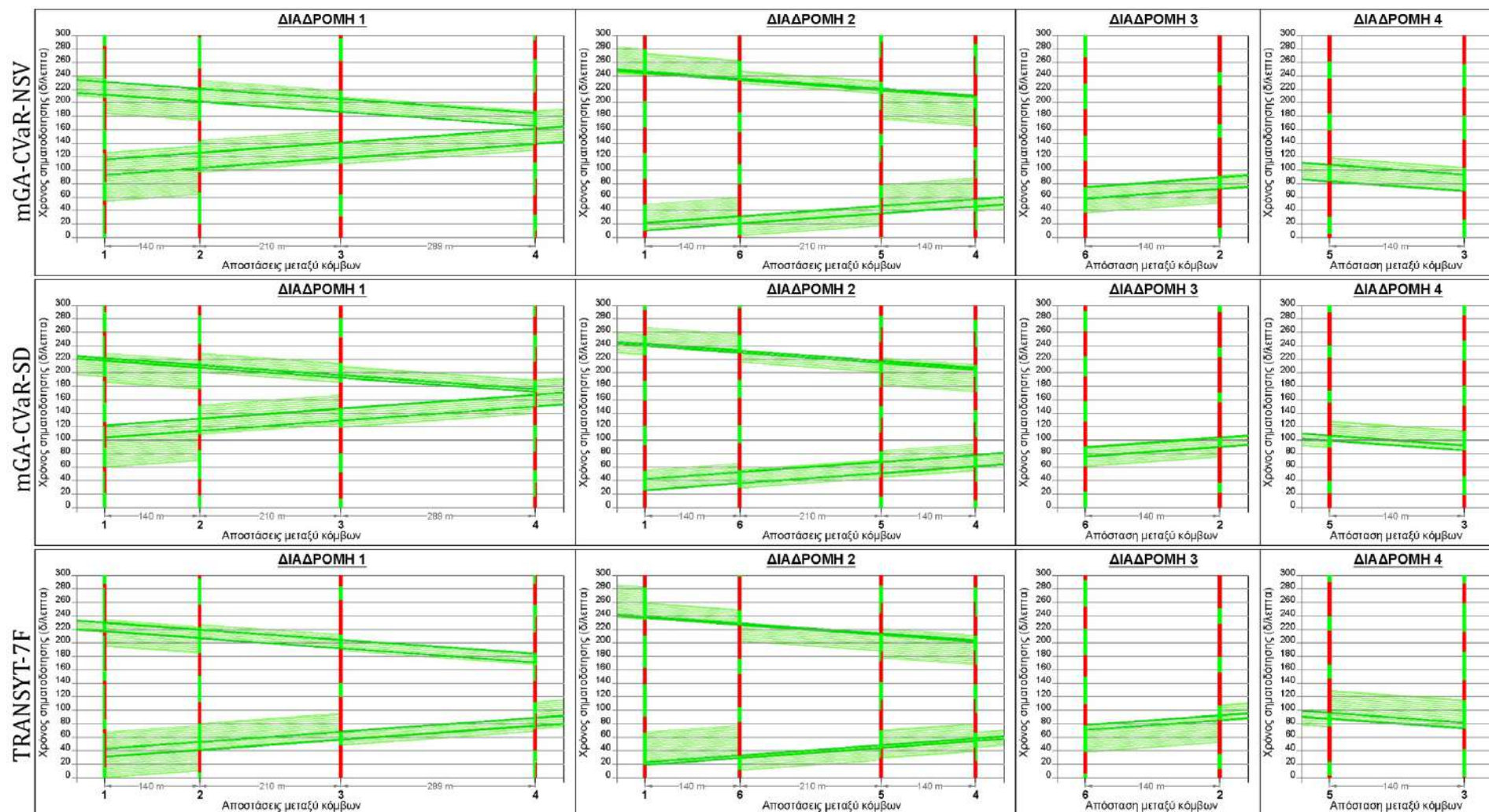
Εξετάζοντας την εφικτότητα συντονισμού, η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV υπερέχει πάλι, αφού φαίνεται ότι έχει αξιοποιηθεί το μεγαλύτερο ποσοστό του διαθέσιμου πρασίνου στο συντονισμό των δύο κατευθύνσεων των διαδρομών 1 και 3 – 4. Συγκεκριμένα, για τη διαδρομή 3-4 στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης έχει πλήρως αξιοποιηθεί το διαθέσιμο πράσινο στο συντονισμό και στο σενάριο υψηλής ζήτησης η εφικτότητα είναι 93%. Η προσέγγιση mGA-

CVaR-SD έχει αξιοποιήσει αρκετά καλά το διαθέσιμο πράσινο στη διαδρομή 3 – 4 και στα δύο σενάρια ζήτησης. Στο σενάριο υψηλής ζήτησης έχει αντίστοιχη εφικτότητα στις δύο εναλλακτικές διαδρομές βορρά – νότου (1 και 2), ενώ στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης η διαδρομή 2 δεν έχει συντονισμό και η διαδρομή 1 έχει χαμηλό επίπεδο. Τέλος, το TRANSYT-7F στο σενάριο υψηλής ζήτησης έχει σε όλες τις διαδρομές χαμηλότερη εφικτότητα σε σχέση με αυτή της προσέγγισης mGA-CVaR-NSV, ενώ στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης υπερέρχει μόνο στη διαδρομή 2 σε σχέση με την mGA-CVaR-NSV, αλλά και πάλι το επίπεδο που έχει επιτύχει θεωρείται χαμηλό. Εξετάζοντας την εφικτότητα στο σύνολο των διαδρομών η υπεροχή της προσέγγισης mGA-CVaR-NSV σε σχέση με το TRANSYT-7F είναι προφανής, αφού και στα δύο σενάρια η mGA-CVaR-NSV έχει διπλάσια συνολική εφικτότητα. Η προσέγγιση mGA-CVaR-SD είναι καλύτερη από το TRANSYT-7F, αλλά όχι και από την mGA-CVaR-NSV που συνολικά έχει περίπου είκοσι ποσοστιαίες μονάδες υψηλότερη εφικτότητα.

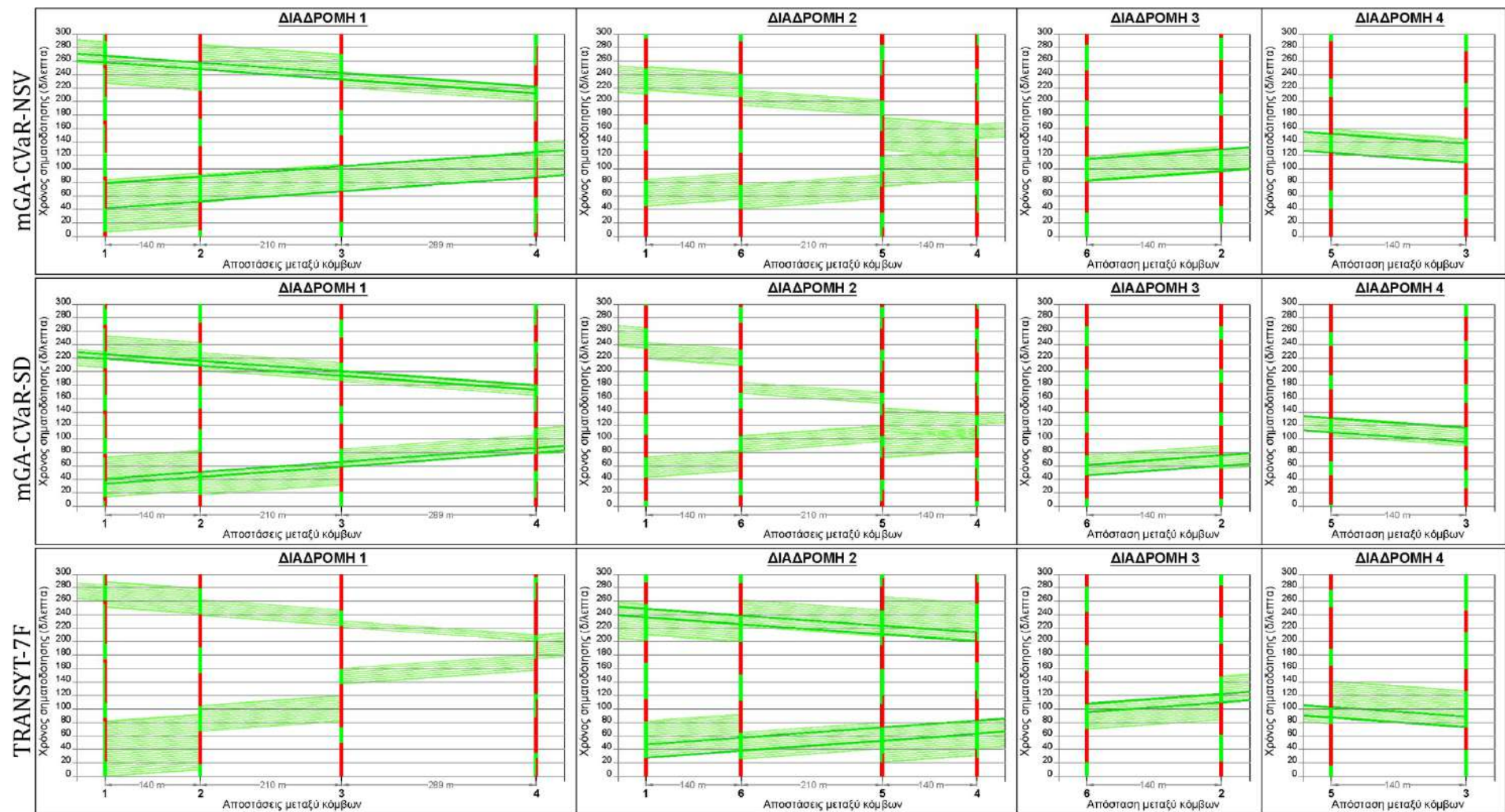
Πίνακας 6-22: Δείκτες αξιολόγησης συντονισμού διαδρομών σηματοδότησης σεναρίων αυξημένης ζήτησης

Δείκτες	Διαδρομές Δύο Κατευθύνσεων	Σενάριο υψηλής ζήτησης			Σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης		
		mGA-CVaR-NSV	mGA-CVaR-SD	TRANSYT-7F	mGA-CVaR-NSV	mGA-CVaR-SD	TRANSYT-7F
Αποδοτικότητα	1	27,2%	16,2%	17,1%	28,1%	11,0%	0,0%
	2	8,5%	14,8%	4,1%	0,0%	0,0%	18,6%
	3 – 4	27,3%	16,1%	11,1%	36,1%	27,8%	16,1%
	Σύνολο Διαδρομών	21,0%	15,7%	10,8%	21,4%	12,9%	11,6%
Εφικτότητα	1	77,6%	48,3%	72,4%	79,1%	34,2%	0,0%
	2	36,4%	56,5%	13,6%	0,0%	0,0%	41,6%
	3 – 4	93,3%	67,5%	36,4%	100,0%	86,8%	44,4%
	Σύνολο Διαδρομών	72%	56%	38%	66%	44%	35%

Τα διαγράμματα αποστάσεων – χρόνων συντονισμού διαδρομών με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις για τα δύο σενάρια ζήτησης απεικονίζονται στο Σχήμα 6-25 και στο Σχήμα 6-26.



Σχήμα 6-25: Διαγράμματα αποστάσεων – χρόνων συντονισμού διαδρομών με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις στο σενάριο υψηλής ζήτησης



Σχήμα 6-26: Διαγράμματα αποστάσεων – χρόνων συντονισμού διαδρομών με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης

Κεφάλαιο 7

Ανάλυση Ευαισθησίας

Η βασική υπόθεση της μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου που προτείνεται είναι ότι ένα πρόγραμμα σηματοδότησης σχεδιασμένο και βελτιστοποιημένο με την ελαχιστοποίηση του *CVaR*, θα προσφέρει στους χρήστες μικρότερο κίνδυνο να βιώνουν υψηλότερες τιμές καθυστερήσεων. Αυτή η υπόθεση ελέγχθηκε μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας διαφορετικών επιπέδων ζήτησης και συμβάντων που παρατηρούνται κοντά στο μεμονωμένο κόμβο υποδείγματος, αλλά και σε συνδέσμους του δικτύου υποδείγματος. Επιπλέον, η προτεινόμενη προσέγγιση εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης δικτύου σταθερού χρόνου ελαχιστοποιώντας το ρίσκο των καθυστερήσεων συγκρίθηκε, σε επιλεγμένα σενάρια, με τη στρατηγική προσαρμοστικού ελέγχου, έτσι ώστε να εντοπιστούν τα οφέλη από την ανάλυση του ρίσκου της εξέλιξης των φαινομένων για εκτεταμένο χρονικό διάστημα με χρήση μεσοσκοπικών μεθόδων.

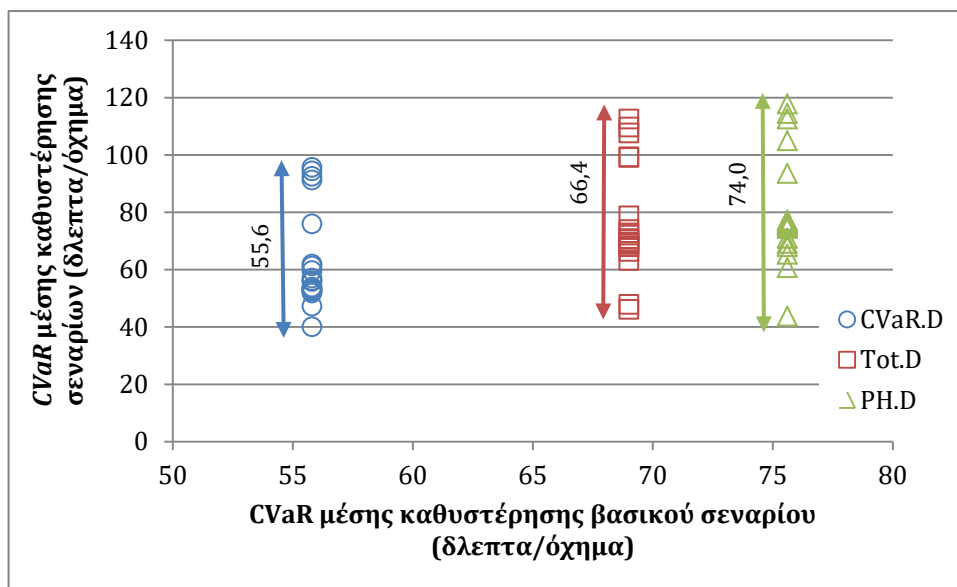
7.1 Ανάλυση ευαισθησίας μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου σε μεμονωμένο κόμβο

Τα σενάρια που δημιουργήθηκαν και επεξεργάστηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας εύρεσης βέλτιστου προγράμματος σηματοδότησης σε μεμονωμένο κόμβο με ελαχιστοποίηση του ρίσκου περιλαμβάνουν διακυμάνσεις της ζήτησης και συμβάντων που παρατηρούνται κοντά στο μεμονωμένο κόμβο υποδείγματος, διαμορφώνοντας ένα σύνολο 16 σεναρίων.

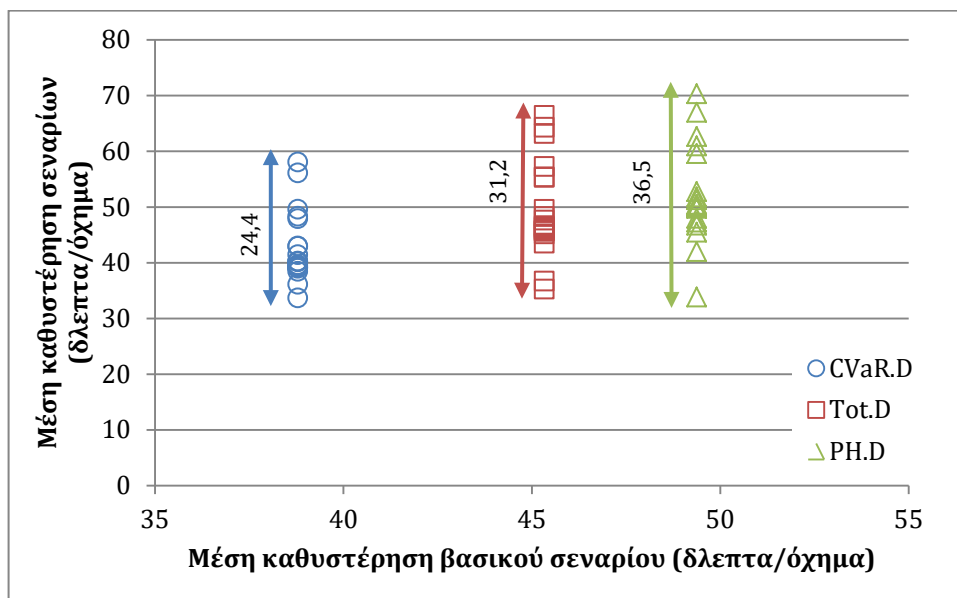
Τα σενάρια περιλάμβαναν την ανάλυση των επιπτώσεων των διαφοροποιήσεων των επιπέδων ζήτησης κατά 5% και 10% στην αύξηση και μείωση της ζήτησης. Τα συμβάντα που αναλύθηκαν εντοπίστηκαν στις δύο πιο κορεσμένες προσεγγίσεις: Στην προσέγγιση που κατευθύνεται προς βορρά (Northbound, 'NB') και στην προσέγγιση που κατευθύνεται προς νότο (Southbound, 'SB'). Τα συμβάντα χωροθετήθηκαν είτε 100 m ανάντη είτε 100 m κατάντη του κόμβου. Συνεπώς, το συμβάν που είναι ανάντη του κόμβου δημιουργεί ένα φαινόμενο παρεμπόδισης πριν τον κόμβο, περιορίζοντας και επεκτείνοντας την ένταση ροής των εισερχόμενων οχημάτων. Τα συμβάντα που είναι κατάντη του κόμβου δημιουργούν ένα φαινόμενο συμφόρησης στην έξοδο του κόμβου, η οποία μειώνει την ικανότητα του συνδέσμου εξόδου και επεκτείνει την ένταση των φαινομένων συμφόρησης. Και οι δύο κατηγορίες συμβάντων εφαρμόστηκαν για δύο χρονικές περιόδους, για 30 και 60 λεπτά, και για δύο περιόδους ε-

φαρμογής, δηλαδή κατά τη διάρκεια της μέγιστης ζήτησης ('P') και κατά τη διάρκεια της περιόδου μετά τη μέγιστη ζήτηση ('rP'), προκειμένου να παρατηρηθούν οι επιπτώσεις της ανάλυσης της ικανότητας και της ευαισθησίας της ζήτησης κατά τη μέγιστη ζήτηση του κόμβου και όταν ο κόμβος λειτουργεί στο υψηλότερο επίπεδο συμφόρησης.

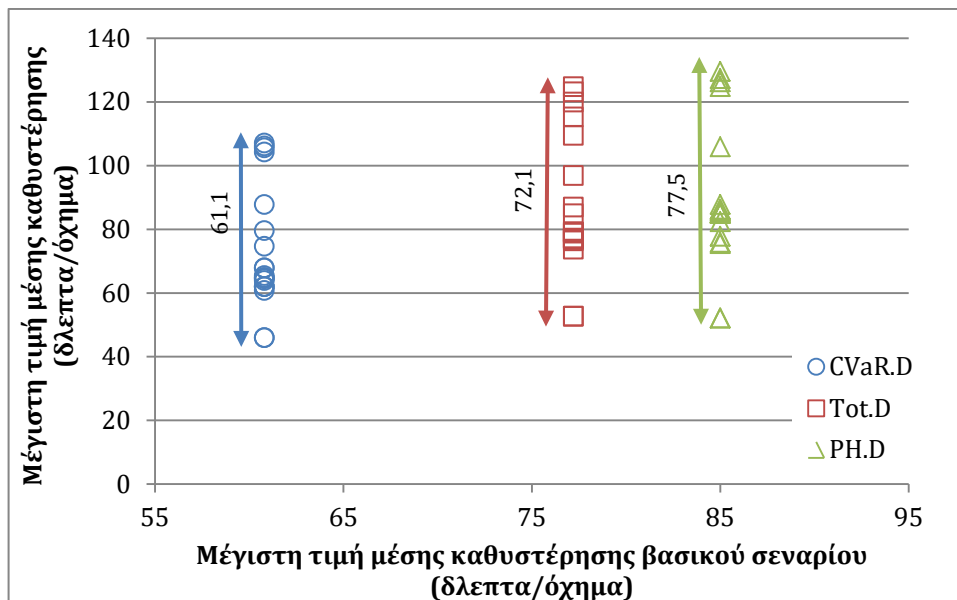
Για τα 16 σενάρια της ανάλυσης ευαισθησίας, πραγματοποιήθηκαν 48 πειράματα (16x3) στο λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης Aimsun για τα προγράμματα σηματοδότησης που προέκυψαν από τις τρεις εναλλακτικές αντικειμενικές συναρτήσεις, της ελαχιστοποίησης του ρίσκου της μέσης καθυστέρησης (*CVaR.D*), της ελαχιστοποίησης της συνολικής καθυστέρησης (*Tot.D*) και της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης του 15λέπτου με την υψηλότερη ζήτηση (*PH.D*), όπως περιγράφονται στην ενότητα 6.1.3. Το *CVaR* της μέσης καθυστέρησης, η μέση καθυστέρηση συνολικά και η μέγιστη καθυστέρηση, που παρουσιάζεται στην περίοδο προσομοίωσης, υπολογίστηκαν για κάθε πείραμα. Σε όλα τα σενάρια, ο κόμβος παρουσίαζε χαμηλότερο κίνδυνο, δηλαδή το *CVaR* ήταν χαμηλότερο, όταν λειτουργούσε με το πρόγραμμα που είχε προκύψει από την ελαχιστοποίηση του ρίσκου. Επίσης, ο κόμβος παρουσίασε χαμηλότερες τιμές της μέσης και της μέγιστης τιμής της μέσης καθυστέρησης ανά όχημα, όταν λειτουργούσε με το πρόγραμμα που είχε προκύψει από την ελαχιστοποίηση του ρίσκου (βλ. Πίνακα 7-1). Το εύρος των εξεταζόμενων δεικτών ήταν επίσης μικρότερο όταν ο κόμβος λειτουργούσε με το πρόγραμμα που προέκυψε από την ελαχιστοποίηση του ρίσκου, παρέχοντας στους χρήστες σταθερότερες συνθήκες σε περιπτώσεις τροποποιημένων συνθηκών είτε ζήτησης είτε προσφοράς (βλ. Σχήμα 7-1, Σχήμα 7-2, Σχήμα 7-3).



Σχήμα 7-1: Διακύμανση *CVaR* μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας μεμονωμένου κόμβου – Σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων



Σχήμα 7-2: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας μεμονωμένου κόμβου – Σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων



Σχήμα 7-3: Διακύμανση μέγιστη τιμής μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας μεμονωμένου κόμβου – Σύγκριση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων

Συνολικά, λοιπόν, θεωρείται ότι η βασική παραδοχή της μεθοδολογίας ικανοποιείται, αφού σε όλες τις περιπτώσεις που τροποποιούνται οι συνθήκες σχεδιασμού και λειτουργίας του κόμβου το πρόγραμμα ελαχιστοποίησης ρίσκου παρέχει καλύτερη απόδοση σε όλους τους εξεταζόμενους δείκτες και μικρότερο εύρος διακύμανσης τιμών καθυστέρησης, που αποτελεί ένα κριτήριο σταθερότητας της απόδοσης του προγράμματος σταθερού χρόνου σε συνθήκες αβεβαιότητας.

Πίνακας 7-1: Σύγκριση σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας βελτιστοποίησης σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου

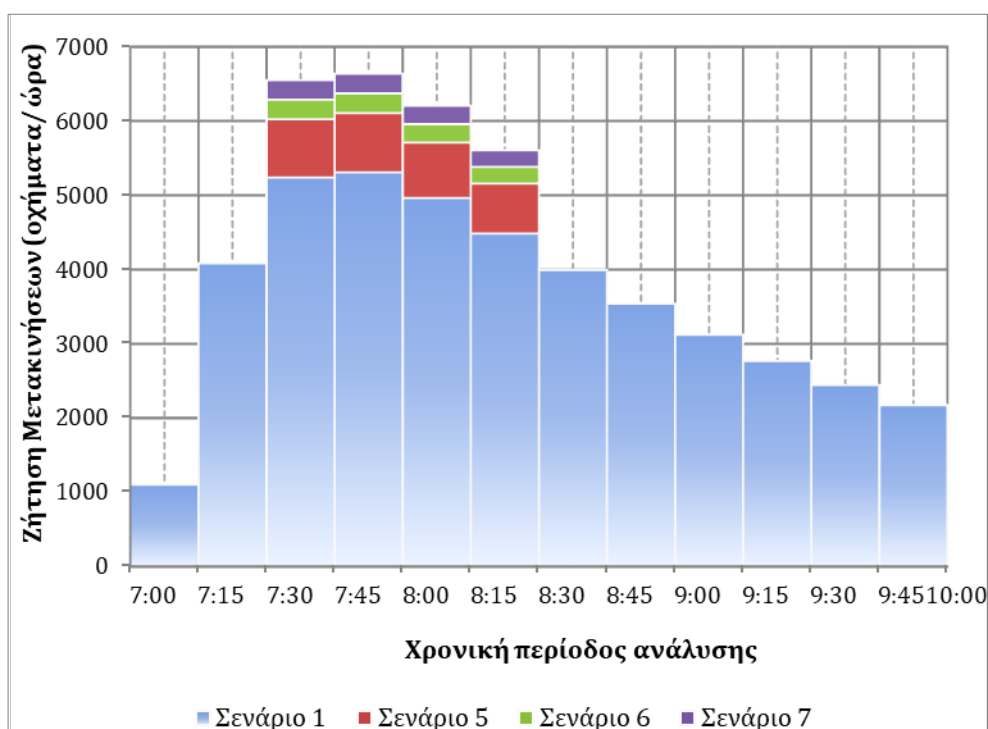
Προγράμματα Σηματοδότησης		Δείκτες									
		CVaR Μέσης καθυστέρησης (δλεπτα/όχημα)			Μέγιστη τιμή μέσης καθυστέρησης (δλεπτα/όχημα)			Μέση καθυστέρηση (δλεπτα/όχημα)			
Σενάρια		CVaR.D	Tot.D	PH.D	CVaR.D	Tot.D	PH.D	CVaR.D	Tot.D	PH.D	
Βασικό σενάριο		55,8	69,0	75,6	60,8	77,2	85,0	38,8	45,3	49,4	
Μείωση ζήτησης 10%		40,1	46,2	43,8	46	52,7	52,1	33,7	35,3	33,8	
Μείωση ζήτησης 5%		47,3	47,9	60,7	46	52,7	52,1	36,2	36,7	42,0	
Αύξηση ζήτησης 5%		61,3	78,8	75,4	79,6	96,9	86,3	43,0	55,3	52,8	
Αύξηση ζήτησης 10%		76,0	99,2	93,6	87,8	115,3	105,9	47,9	64,3	62,7	
Πριν τον κόμβο	NB	30 P	62,0	72,8	76,8	60,8	77,2	85	41,5	47,7	51,3
		30 pP	57,1	70,6	76,7	67,9	79,2	87,8	40,3	46,5	50,5
		60 P	59,7	74,0	77,3	64,9	77,1	85,2	43,0	48,3	51,8
		60 pP	55,9	70,9	75,9	64,8	78,8	85,2	40,3	46,3	50,4
	SB	30 P	53,7	68,0	65,4	64,5	76,8	85,7	39,7	46,7	45,5
		30 pP	56,2	72,1	68,0	67,9	87	77,8	40,2	49,6	46,8
		60 P	51,9	63,2	69,2	74,7	84,9	75,5	38,5	43,5	48,0
		60 pP	53,9	66,4	71,0	63,9	73,8	82,4	39,0	45,2	47,3
Πριν τον κόμβο	NB	30 P	91,3	99,4	105	65,5	76,4	75,9	49,6	57,3	61,0
		30 pP	92,6	107,7	112,6	106,2	109,5	124,8	48,4	55,4	59,6
		60 P	95,7	109,8	114,5	104,3	120	127,3	58,1	66,5	70,4
		60 pP	94,5	112,6	117,8	105,6	124,8	126,3	56,2	63,2	67,0
	SB	30 P	52,8	68,3	74,4	107,1	123,2	129,6	39,2	45,7	49,9
		30 pP	52,9	69,0	75,0	62,0	77,2	85,0	39,1	45,7	49,8
		60 P	53,4	69,4	75,4	62,0	79,1	85,0	39,5	46,0	50,2
		60 pP	52,5	69,7	76,2	62,0	79,1	86,1	39,3	45,9	49,9

7.2 Ανάλυση ευαισθησίας μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ρίσκου σε σηματοδοτούμενο δίκτυο

Τα σενάρια που δημιουργήθηκαν και επεξεργάστηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης σε δίκτυο με ελαχιστοποίηση του ρίσκου περιλαμβάνουν διακυμάνσεις της ζήτησης και συμβάντων που παρατηρούνται σε συνδέσμους του δικτύου, διαμορφώνοντας ένα σύνολο 46 σεναρίων.

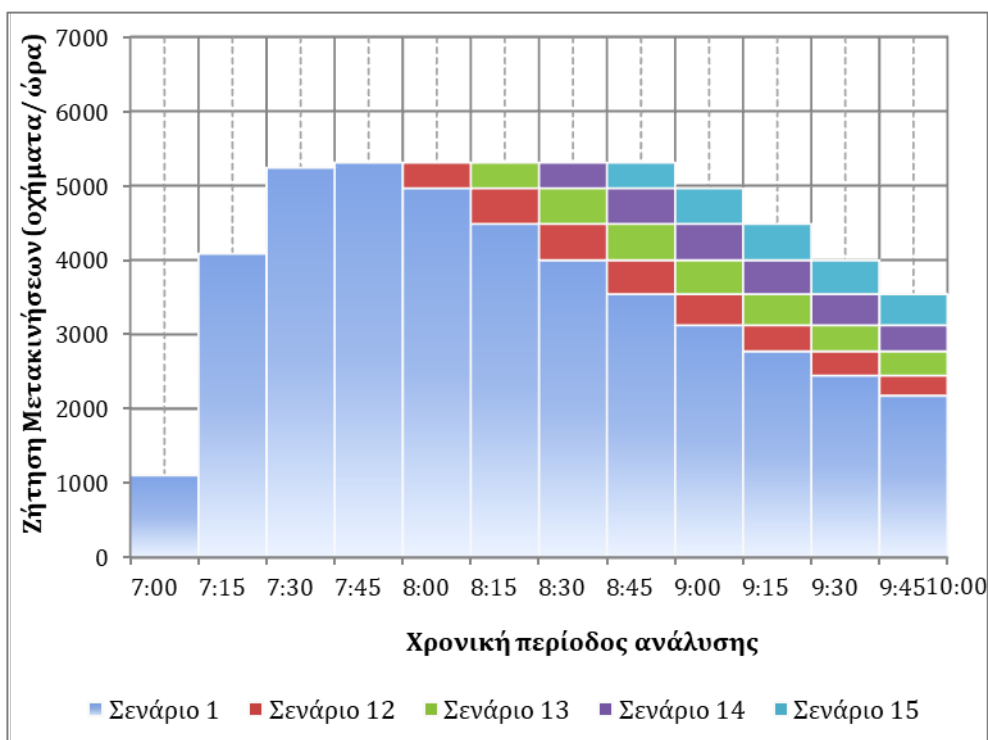
Τα σενάρια που ελέγχθηκαν είναι τα ακόλουθα:

- Το βασικό σενάριο (σενάριο 1)
- Αύξηση της συνολικής ζήτησης κατά 15%, 20% και 25% (σενάρια 2, 3, 4)
- Αύξηση της ζήτησης στην ώρα αιχμής (07:30-08:30) κατά 15%, 20% και 25% (σενάρια 5, 6, 7)



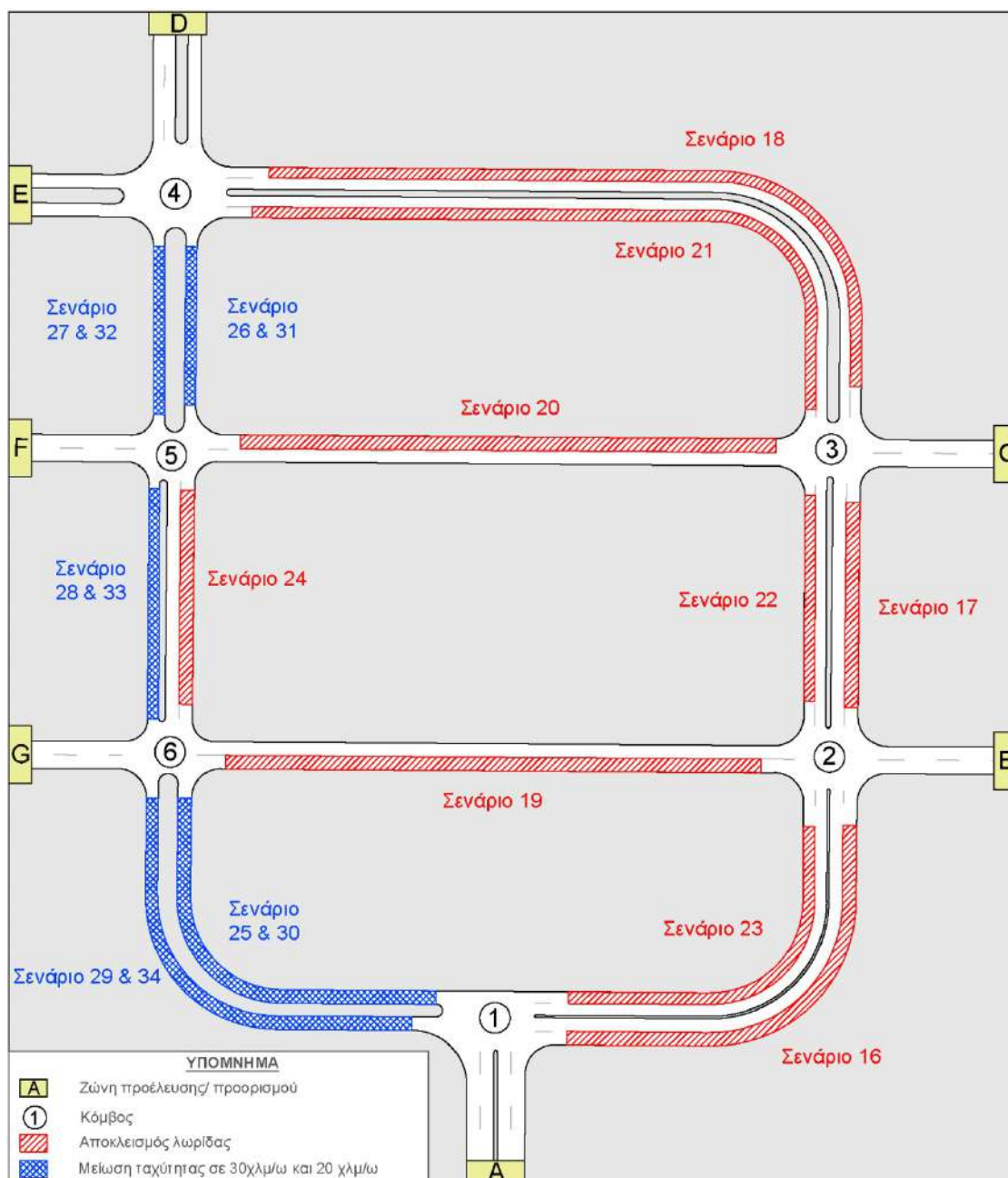
Σχήμα 7-4: Διακύμανση ζήτησης σεναρίων αύξησης ζήτησης στην ώρα αιχμής (5-7)

- Αύξηση της συνολικής ζήτησης κατά 20% μεμονωμένα για τα τρία ζεύγη Π-Π με την υψηλότερη ζήτηση: {C,F} , {A,D}, {G,A} (σενάρια 8, 9, 10)
- Αύξηση της συνολικής ζήτησης κατά 20% ταυτόχρονα για τα τρία ζεύγη Π-Π με την υψηλότερη ζήτηση: {C,F} , {A,D}, {G,A} (σενάριο 11)
- Επέκταση της ώρας αιχμής κατά 15, 30, 45, 60 λεπτά (σενάρια 12, 13, 14, 15)



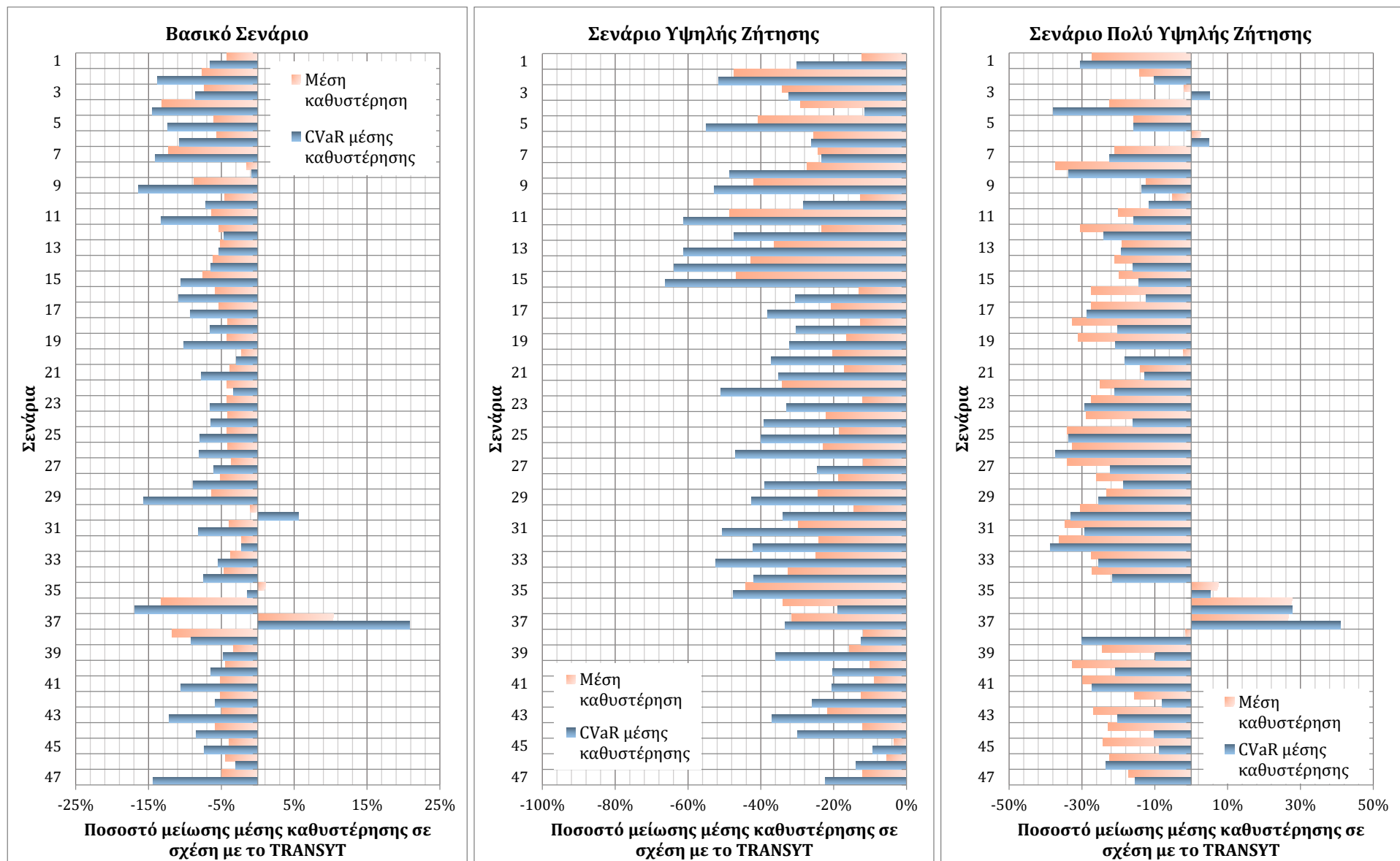
Σχήμα 7-5: Διακύμανση ζήτησης σεναρίων επέκτασης ώρας αιχμής (12-15)

- Αποκλεισμός μίας λωρίδας κυκλοφορίας για 30 λεπτά σε συνδέσμους του δικτύου μεμονωμένα:
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [1,2] (σενάριο 16)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [2,3] (σενάριο 17)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [3,4] (σενάριο 18)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [6,2] (σενάριο 19)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [3,5] (σενάριο 20)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [4,3] (σενάριο 21)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [3,2] (σενάριο 22)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [2,1] (σενάριο 23)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [6,5] (σενάριο 24)
- Μείωση της ταχύτητας σε 30χλμ/ώρα για 30 λεπτά σε συνδέσμους του δικτύου μεμονωμένα:
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [1,6] (σενάριο 25)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [5,4] (σενάριο 26)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [4,5] (σενάριο 27)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [5,6] (σενάριο 28)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [6,1] (σενάριο 29)
- Μείωση της ταχύτητας σε 20χλμ/ώρα για 30 λεπτά σε συνδέσμους του δικτύου μεμονωμένα:
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [1,6] (σενάριο 30)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [5,4] (σενάριο 31)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [4,5] (σενάριο 32)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [5,6] (σενάριο 33)
 - στον σύνδεσμο που συνδέει τους κόμβους [6,1] (σενάριο 34)
- Μείωση της ταχύτητας σε 30χλμ/ώρα σε όλους τους συνδέσμους για όλη την περίοδο ανάλυσης (σενάριο 35)
- Μείωση της ταχύτητας σε 20χλμ/ώρα σε όλους τους συνδέσμους για όλη την περίοδο ανάλυσης (σενάριο 36)
- Μείωση της ταχύτητας σε 30χλμ/ώρα σε όλους τους συνδέσμους για όλη την ώρα αιχμής (07:30-08:30) (σενάριο 37)
- Μείωση της ταχύτητας σε 20χλμ/ώρα σε όλους τους συνδέσμους για όλη την ώρα αιχμής (07:30-08:30) (σενάριο 38)
- Διαφορετικούς αριθμούς εκκίνησης (seed numbers) στην προσομοίωση: 38299, 33549, 24947, 17158, 10237, 6975, 30700, 14212, 2856 (σενάρια 39-47)



Σχήμα 7-6: Σενάρια συμβάντων αποκλεισμού λωρίδας και μείωσης ταχύτητας (16-34)

Πραγματοποιήθηκε, λοιπόν, σύγκριση της απόδοσης του δικτύου χρησιμοποιώντας τις ρυθμίσεις σηματοδότησης που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία ελαχιστοποίησης του ρίσκου mGA-CVaR-NSV, που στη βασική ανάλυση κρίθηκε ως καλύτερη από την προσέγγιση mGA-CVaR-SD. Η απόδοση του δικτύου εκτιμήθηκε και αξιολογήθηκε για κάθε ένα από τα 47 σενάρια με τη χρήση αυτών των ρυθμίσεων της κυκλοφορίας που προέκυψαν από τις προσεγγίσεις mGA-CVaR-NSV και TRANSYT-7F, και στα τρία σενάρια ζήτησης (βασικό, υψηλής ζήτησης και πολύ υψηλής ζήτησης). Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα, ενώ οι συγκριτικές αποδόσεις ανά σενάριο σε σχέση με το TRANSYT-7F παρουσιάζονται στο Σχήμα 7-7.



Σχήμα 7-7: Διαγράμματα σύγκρισης μέσης τιμής και CVaR μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης στο δίκτυο ευαισθησίας σε σχέση με το TRANSYT-7F

Πίνακας 7-2: Δείκτες ανάλυσης ευαισθησίας σε σχέση με το TRANSYT-7F

Σενάριο Ζήτησης	Δείκτης βελτίωσης σε σχέση με το TRANSYT-7F	mGA-CVaR-NSV		
		Μέση Καθυστερήση	Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης	CVaR Μέσης Καθυστερήσης
Βασικό Σενάριο	Αριθμός δοκιμών με βελτίωση	45	46	45
	Ποσοστό δοκιμών με βελτίωση	95,7%	97,9%	95,7%
	Μέση τιμή ποσοστιαίας βελτίωσης	-5,47%	-4,26%	-8,43%
Υψηλής Ζήτησης	Αριθμός δοκιμών με βελτίωση	47	47	47
	Ποσοστό δοκιμών με βελτίωση	100,0%	100,0%	100,0%
	Μέση τιμή ποσοστιαίας βελτίωσης	-23,58%	-14,87%	-36,75%
Πολύ Υψηλής Ζήτησης	Αριθμός δοκιμών με βελτίωση	43	41	42
	Ποσοστό δοκιμών με βελτίωση	91,5%	87,2%	89,4%
	Μέση τιμή ποσοστιαίας βελτίωσης	-23,42%	-15,50%	-21,51%
Σύνολο	Αριθμός δοκιμών με βελτίωση	135	134	134
	Ποσοστό δοκιμών με βελτίωση	95,7%	95,0%	95,0%
	Μέση τιμή ποσοστιαίας βελτίωσης	-17,49%	-11,42%	-22,47%

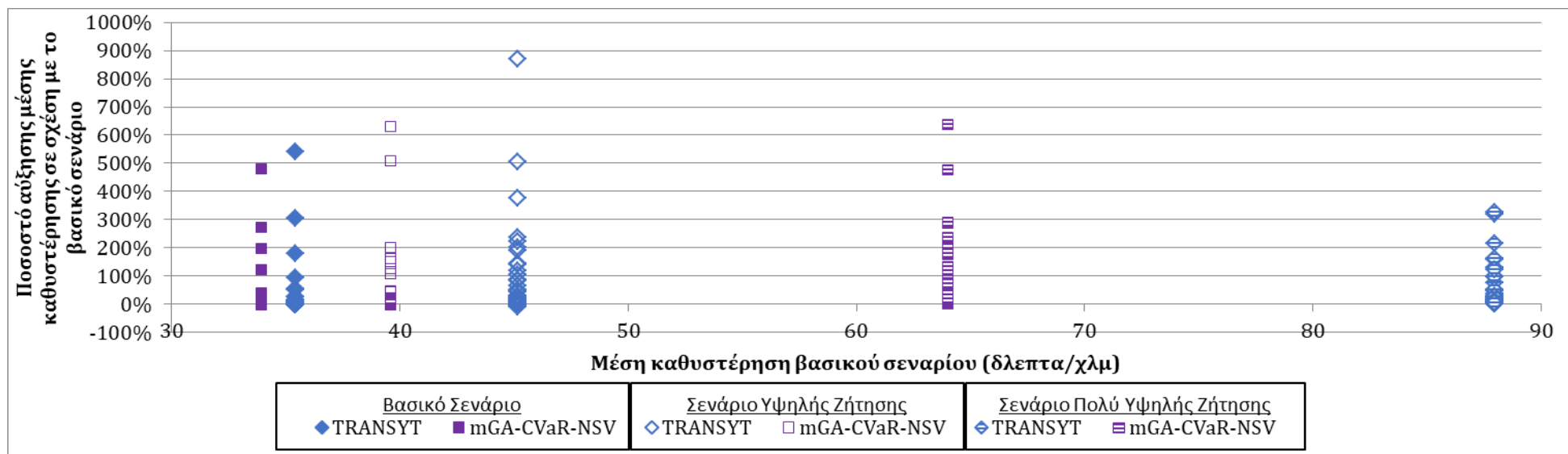
* Μέση καθυστέρηση και CVaR Μέσης Καθυστερήσης: δελεπτα/ χλμ, Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης: (ο-χηματο-ώρες)

Διαπιστώθηκε ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων η σηματοδότηση που έχει προκύψει από την προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει καλύτερη απόδοση του δικτύου ακόμα και όταν υπάρχουν διαφορετικές συνθήκες από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της κάθε ρύθμισης συγκρίνοντας τις αποδόσεις του δικτύου με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F. Η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV παρουσιάζει στο 95,7% και 97,9% των σεναρίων χαμηλότερες μέσες καθυστερήσεις και συνολικό χρόνο μετακίνησης με μέσο ποσοστό βελτίωσης της τάξης του 5% για το βασικό σενάριο ζήτησης, ενώ το CVaR μέσης καθυστέρησης παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση κατά 8,43%. Στο σενάριο υψηλής ζήτησης όλα τα σενάρια είχαν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα αντίστοιχα σενάρια που προσομοιώθηκαν με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F, ενώ το ποσοστό βελτίωσης είναι της τάξης του 23,5% στη μέση καθυστέρηση, 15% στο συνολικό χρόνο μετακίνησης και 37% στο CVaR μέσης καθυστέρησης. Τέλος, στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης με την προσέγγιση mGA-CVaR-NSV το 90% περίπου των σεναρίων παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με το TRANSYT-7F με ποσοστό βελτίωσης κατά 23,5% στη μέση καθυστέρηση, 15,5% στο συνολικό χρόνο μετακίνησης και 21,5% στο CVaR μέσης καθυστέρησης.

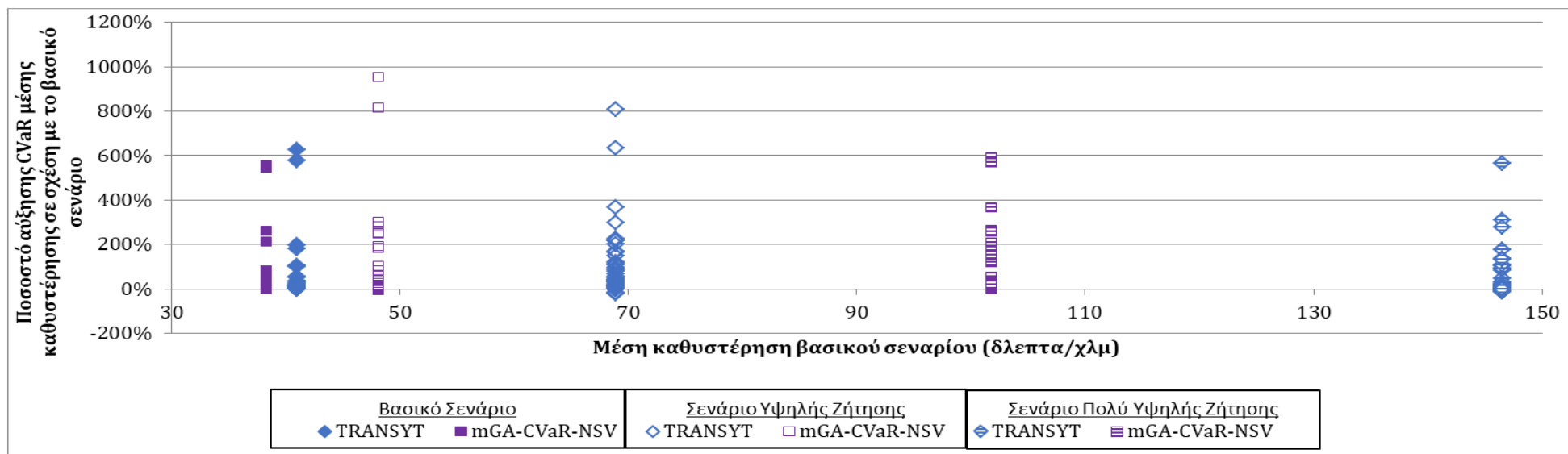
Από τα στοιχεία που αναλύθηκαν, φαίνεται ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία που βελτιστοποιεί τις ρυθμίσεις σηματοδότησης ελαχιστοποιώντας το ρίσκο καθυστερήσεων, ικανοποιεί τη βασική παραδοχή της μεθοδολογίας. Εξασφαλίζοντας έτσι, καλύτερη απόδοση στο δίκτυο όχι μόνο στο βασικό σενάριο, αλλά και στην περίπτωση που οι συνθήκες τροποποιούνται είτε λόγω αύξησης της ζήτησης είτε λόγω συμβάντων που επηρεάζουν την χωρητικότητα του δικτύου.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε και ανάλυση των αποτελεσμάτων των σεναρίων σε σχέση με το αντίστοιχο βασικό σενάριο (Σενάριο 1) της κάθε προσέγγισης στο κάθε σενάριο ζήτησης, έτσι ώστε να αξιολογηθούν οι διακυμάνσεις των σεναρίων και οι επιπτώσεις στους χρήστες του δικτύου. Στα Σχήμα 7-8, Σχήμα 7-9 και Σχήμα 7-10 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της μέσης καθυστέρησης, του συνολικού χρόνου μετακίνησης και του CVaR της μέσης καθυστέρησης του κάθε σεναρίου ανάλυσης σε σχέση με το Σενάριο 1 της αντίστοιχης προσέγγισης και του αντίστοιχου επιπέδου ζήτησης.

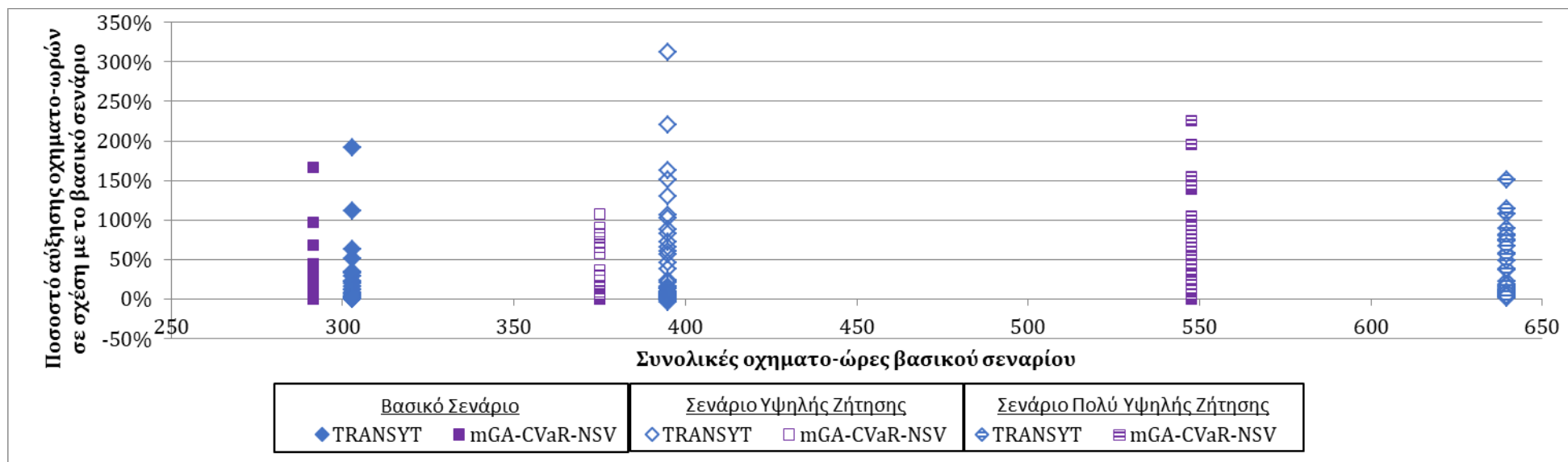
Φαίνεται λοιπόν, ότι η προσέγγιση mGA-CVaR-NSV στο βασικό σενάριο ζήτησης και στο σενάριο υψηλής ζήτησης παρουσιάζει και στους τρεις δείκτες (μέση τιμή, τυπική απόκλιση και ποσοστιαία διαφορά από το Σενάριο 1) χαμηλότερη μέση καθυστέρηση, συνολικό χρόνο μετακίνησης και CVaR μέσης καθυστέρησης σε σχέση με το TRANSYT-7F. Στο σενάριο πολύ υψηλής ζήτησης ενώ οι μέσες τιμές των μεγεθών της μέσης καθυστέρησης και του συνολικού χρόνου μετακίνησης στα σενάρια που εξετάστηκαν είναι χαμηλότερες με την προσέγγιση mGA-CVaR-NSV σε σχέση με το TRANSYT-7F, οι διακυμάνσεις των μεγεθών αυτών είναι μεγαλύτερες. Το γεγονός αυτό προσδίδει ένα σημαντικό στοιχείο αβεβαιότητας στη λειτουργία του δικτύου σε περιπτώσεις διαφοροποίησης των συνθηκών ζήτησης ή προσφοράς. Αξίζει να σημειωθεί ότι συνολικά στα σενάρια που εξετάστηκαν, το δίκτυο έχει 15% μειωμένη μέση καθυστέρηση με τις ρυθμίσεις mGA-CVaR-NSV σε σχέση με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F, επομένως συμπερασματικά παρατηρείται ότι στην περίπτωση του σεναρίου της πολύ υψηλής ζήτησης το δίκτυο με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F έχει γενικά χειρότερη απόδοση, αλλά καλύτερη σταθερότητα. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά προσέγγιση και σενάριο ζήτησης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Σχήμα 7-8: Διάγραμμα σύγκρισης μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας στο δίκτυο σε σχέση με το βασικό σενάριο



Σχήμα 7-9: Διάγραμμα σύγκρισης CVaR μέσης καθυστέρησης σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας στο δίκτυο σε σχέση με το βασικό σενάριο



Σχήμα 7-10: Διάγραμμα σύγκρισης συνολικού χρόνου διαδρομής σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας στο δίκτυο σε σχέση με το βασικό σενάριο

Πίνακας 7-3: Δείκτες ανάλυσης ευαισθησίας στο δίκτυο σε σχέση με το Σενάριο 1

Σενάριο Ζήτησης	Δείκτης βελτίωσης σε σχέση με το Σενάριο 1	TRANSYT-7F			mGA-CVaR-NSV		
		Μέση Καθυστερήση	Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης	CVaR Μέσης Καθυστερήσης	Μέση Καθυστερήση	Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης	CVaR Μέσης Καθυστερήσης
Βασικό Σενάριο Ζήτησης	Μέση τιμή	45,8	346,2	59,2	43,1	330,7	54,5
	Τυπική απόκλιση	32,9	101,5	51,8	28,8	87,4	45,9
	Μέση τιμή ποσοστιαίας διαφοράς	29,8%	14,6%	45,2%	27,5%	13,7%	43,1%
Υψηλής Ζήτησης	Μέση τιμή	81,3	552,2	135,0	59,1	442,9	87,1
	Τυπική απόκλιση	70,9	257,8	110,8	48,6	111,4	91,7
	Μέση τιμή ποσοστιαίας διαφοράς	81,8%	40,7%	98,0%	50,4%	18,5%	82,7%
Πολύ Υψηλής Ζήτησης	Μέση τιμή	132,1	829,6	216,57	112,0	749,7	182,66
	Τυπική απόκλιση	67,4	234,6	153,12	82,9	302,9	138,71
	Μέση τιμή ποσοστιαίας διαφοράς	51,3%	30,3%	48,9%	76,6%	37,7%	81,2%

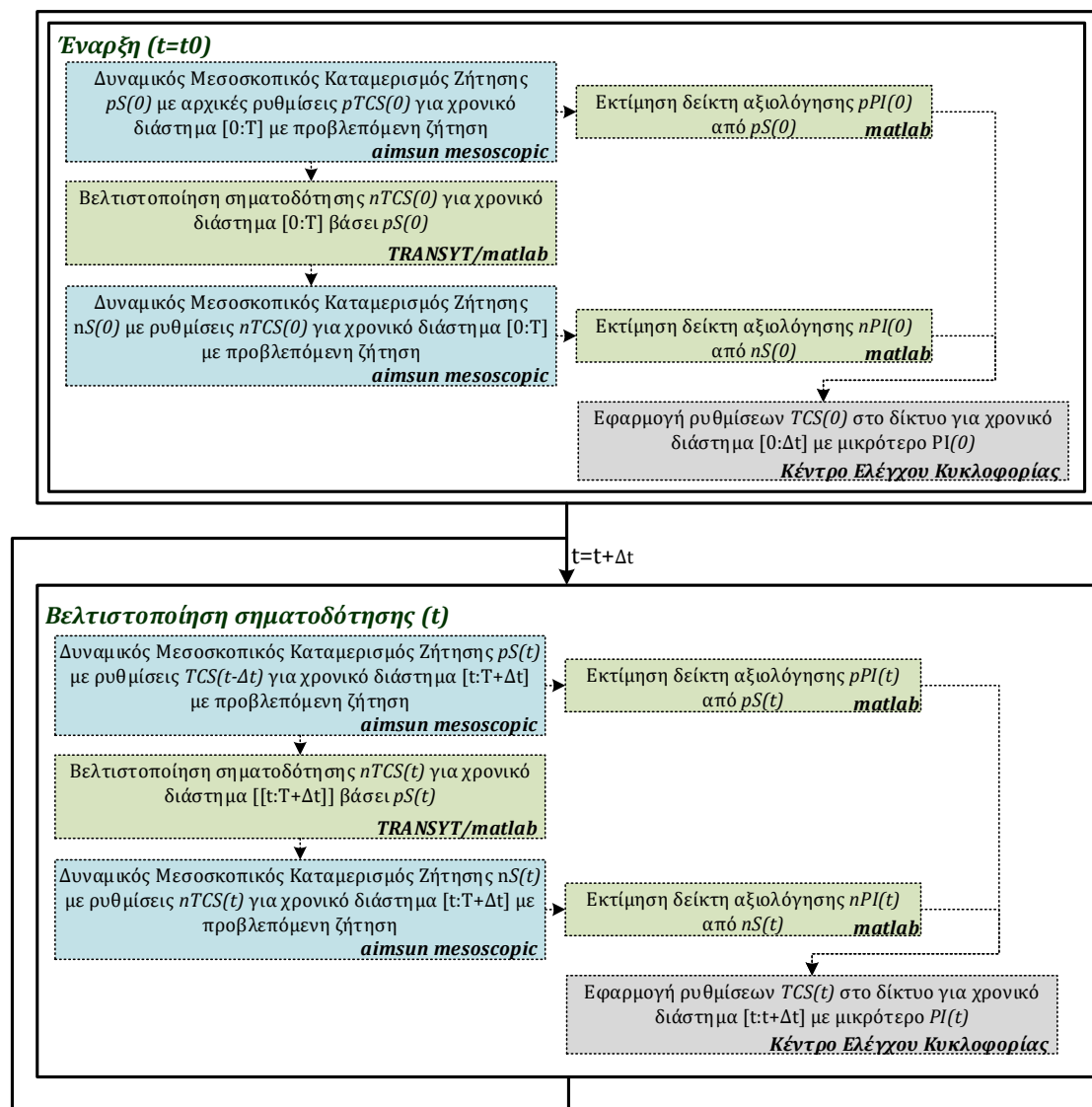
* Μέση καθυστέρηση και CVaR Μέσης Καθυστερήσης: δελεπτα/ χλμ, Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης: (οχηματο-ώρες)

7.3 Σύγκριση μεθοδολογίας σε προσομοίωση προσαρμοστικού ελέγχου

Η προτεινόμενη επαναληπτική μεθοδολογία εύρεσης σταθερών προγραμμάτων σηματοδότησης συγκρίθηκε με την προσέγγιση προσαρμοστικού ελέγχου (adaptive) κατά την οποία πραγματοποιείται εύρεση των ρυθμίσεων σηματοδότησης σε κάθε προκαθορισμένο βήμα, βάσει των προβλεπόμενων συνθηκών στο δίκτυο. Στην παρούσα διατριβή, θεωρείται ότι κάθε 15 λεπτά το μεσοσκοπικό μοντέλο προβλέπει τις κυκλοφοριακές συνθήκες που θα ισχύουν στο δίκτυο για το επόμενο χρονικό βήμα (15 λεπτών) χρησιμοποιώντας την υφιστάμενη σηματοδότηση. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, πραγματοποιείται εύρεση νέων ρυθμίσεων σηματοδότησης για το επόμενο χρονικό διάστημα, χρησιμοποιώντας τους προβλεπόμενους κυκλοφοριακούς φόρτους του μοντέλου για το εν λόγω χρονικό διάστημα. Η συγκεκριμένη ανάλυση πραγματοποιήθηκε με δύο αλγορίθμους βελτιστοποίησης, (α) το λογισμικό TRANSYT-7F, (β) τον αλγόριθμο της προτεινόμενης μεθοδολογίας που ελαχιστοποιεί το ρίσκο καθυστερήσεων λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των οχημάτων που εμφανίζουν αδιάκοπη διέλευση κατά μήκος των προκαθορισμένων αρτηριών του δικτύου, mGA-CVaR-NSV, στο MATLAB.

Η βελτιστοποίηση στο TRANSYT-7F πραγματοποιείται για μία περίοδο ανάλυσης διάρκειας 15 λεπτών ($T=\Delta t=15$ λεπτά). Τα αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση εισάγονται στο μο-

ντέλο και πραγματοποιείται αφενός προσομοίωση του υφιστάμενου χρονικού βήματος, αλλά και πρόβλεψη του επόμενου βήματος 15 λεπτών. Η βελτιστοποίηση με τη προσέγγιση mGA-CVaR-NSV πραγματοποιείται για έναν κυλιόμενο ορίζοντα τριών ωρών ($T=180$ λεπτά), έτσι ώστε να προκύψει από την προσομοίωση η χρονική διακύμανση της μέσης καθυστέρησης για χρονικά βήματα 5 λεπτών και ο αλγόριθμος να προσπαθήσει να ελαχιστοποιήσει το CVaR της μέσης καθυστέρησης για την προβλεπόμενη περίοδο. Οι ρυθμίσεις σηματοδότησης που έχουν προκύψει από τη βελτιστοποίηση, εισάγονται στο μοντέλο και εφαρμόζονται σε όλη την περίοδο που πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση, καθώς και στο επόμενο 15λεπτο από την περίοδο βελτιστοποίησης ($\Delta t=15$ λεπτά).



Σχήμα 7-11: Αλγοριθμική διαδικασία εύρεσης βέλτιστων ρυθμίσεων σηματοδότησης με προσαρμοστικό έλεγχο

Οι ρυθμίσεις σηματοδότησης που έχουν το μικρότερο δείκτη αξιολόγησης εφαρμόζονται στο δίκτυο για το επόμενο διάστημα 15 λεπτών ($\Delta t=15$ λεπτά). Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης με το TRANSYT-7F ο δείκτης αξιολόγησης είναι η μέση τιμή καθυστέρησης, ενώ

στην περίπτωση της προτεινόμενης προσέγγισης ελαχιστοποίησης ρίσκου, ο δείκτης αξιολόγησης είναι το *CVaR* για τον κυλιόμενο ορίζοντα ανάλυσης. Η αλγοριθμική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εύρεση των ρυθμίσεων σηματοδότησης, ακολουθώντας τη προσέγγιση του προσαρμοστικού ελέγχου στο δίκτυο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-11.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση του βασικού σεναρίου, αλλά και για τις περιπτώσεις των σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας 4 και 36 που παρουσίασαν τις δυσμενέστερες κυκλοφοριακές συνθήκες από άποψη ζήτησης και προσφοράς δικτύου αντίστοιχα. Αναλύθηκε μόνο το βασικό σενάριο ζήτησης, που παρουσιάζει και τις χαμηλότερες αποκλίσεις μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τη προσομοίωση της εκτεταμένης περιόδου ανάλυσης των τριών ωρών με τις δύο προσεγγίσεις βελτιστοποίησης, καθώς και η σύγκριση μεταξύ του προσαρμοστικού ελέγχου και του ελέγχου σταθερού χρόνου που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.2.

Πίνακας 7-4: Σύγκριση προσαρμοστικού ελέγχου και ελέγχου σταθερού χρόνου

Διαδικασία Ελέγχου	Σενάριο	mGA - CvaR - NSV			TRANSYT-7F		
		Μέση Καθυστέρηση	Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης	CVaR Μέσης Καθυστέρησης	Μέση Καθυστέρηση	Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης	CVaR Μέσης Καθυστέρησης
Προσαρμοστικός Έλεγχος	Βασικό	34,67	296,81	40,15	39,09	316,27	56,09
	4	48,53	426,57	61,44	73,10	530,98	122,95
	36	211,98	828,35	261,25	216,55	846,72	335,49
Σύγκριση με τον προσαρμοστικό έλεγχο με το TRANSYT-7F	Βασικό	-11,3%	-6,2%	-28,4%			
	4	-33,6%	-19,7%	-50,0%			
	36	-2,1%	-2,2%	-22,1%			
Έλεγχος Σταθερού Χρόνου	Βασικό	33,94	291,52	38,34	35,43	302,81	41,04
	4	47,37	419,60	70,77	54,56	456,28	82,73
	36	197,44	776,05	247,64	227,57	880,99	297,93
Σύγκριση Στρατηγικών Ελέγχου (Προσαρμοστικός/ Σταθερού χρόνου)	Βασικό	2,2%	1,8%	4,7%	10,3%	4,4%	36,7%
	4	2,4%	1,7%	-13,2%	34,0%	16,4%	48,6%
	36	7,4%	6,7%	5,5%	-4,8%	-3,9%	12,6%

* Μέση καθυστέρηση και CVaR Μέσης Καθυστέρησης: δελεπτα/ χλμ, Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης: (οχηματο-ώρες)

Ο προσαρμοστικός έλεγχος με την προσέγγιση βελτιστοποίησης mGA-CVaR-NSV και στα τρία σενάρια που αναλύθηκαν παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από την αντίστοιχη διαδικασία προσαρμοστικού ελέγχου βελτιστοποίησης με το TRANSYT-7F σε όλους τους δείκτες. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται λόγω της διαφορετικής προσέγγισης που έχει χρησιμοποιηθεί στις δύο στρατηγικές, αλλά και λόγω της μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης του

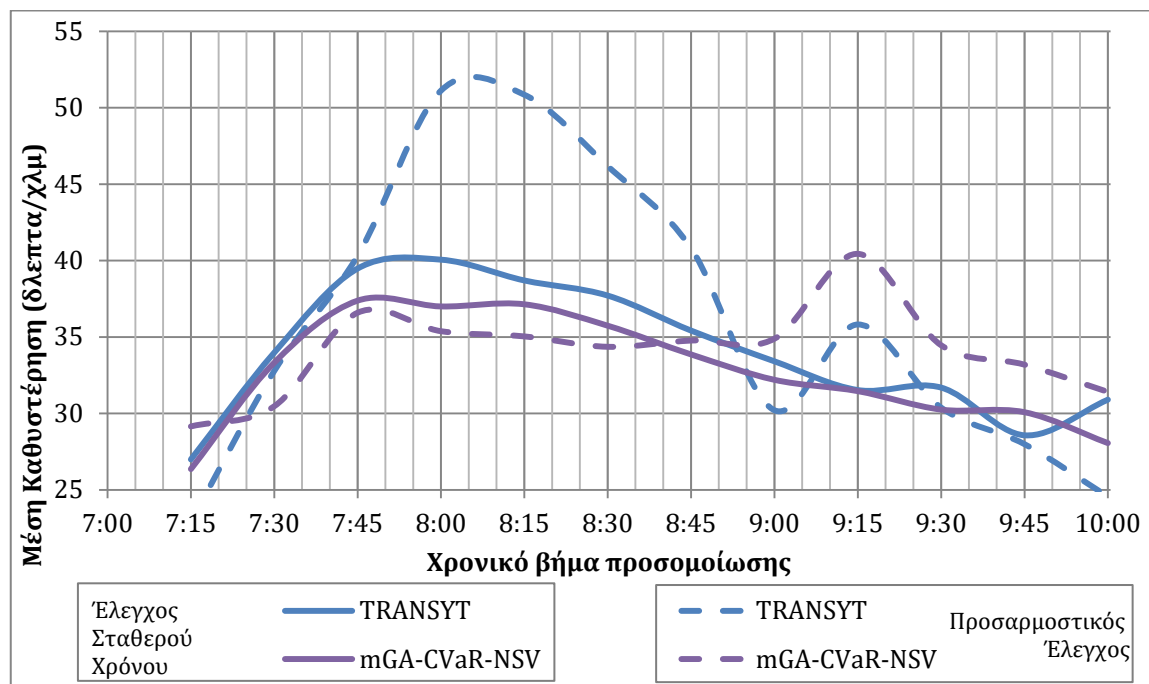
ρίσκου. Η μεθοδολογία ελαχιστοποίησης του ρίσκου λαμβάνει υπόψη στο σχεδιασμό του επόμενου δεκαπεντάλεπτου τη λειτουργία του δικτύου σε εκτεταμένη χρονική περίοδο, ενώ η μεθοδολογία που δοκιμάστηκε με το TRANSYT-7F επιχειρεί τη βελτιστοποίηση των συνθηκών εξετάζοντας μόνο το επόμενο δεκαπεντάλεπτο κάθε φορά και όχι την εξέλιξη των φαινομένων μετά από αυτό το διάστημα. Έτσι η βελτιστοποίηση μπορεί να χαρακτηριστεί ως τοπικό βέλτιστο και όχι ως ολικό βέλτιστο χρονικά.

Ελέγχοντας τους συγκεντρωτικούς δείκτες της περιόδου ανάλυσης φαίνεται ότι ο προσαρμοστικός έλεγχος έχει χειρότερη απόδοση στο δίκτυο σε σχέση με τον έλεγχο σταθερού χρόνου στο βασικό σενάριο, αλλά και στο σενάριο 4 που τροποποιούνται οι συνθήκες σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, στο βασικό σενάριο και οι δύο προσεγγίσεις βελτιστοποίησης υπερτερούν όταν χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του ελέγχου σταθερού χρόνου σε σχέση με τον προσαρμοστικό έλεγχο σε όλους τους δείκτες ανάλυσης. Στο σενάριο 36, όπου οι κυκλοφοριακές συνθήκες στο δίκτυο διαφέρουν κατά πολύ από τις συνθήκες σχεδιασμού (550% αύξηση της μέσης καθυστέρησης περίπου σε σχέση με το βασικό σενάριο), ο προσαρμοστικός έλεγχος είναι ανώτερος του ελέγχου σταθερού χρόνου στην περίπτωση της βελτιστοποίησης με το TRANSYT-7F. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απολύτως δικαιολογημένο, αφού μία τέτοια διαφοροποίηση στις συνθήκες σχεδιασμού του ελέγχου σταθερού χρόνου είναι λογικό να επιφέρει αστοχίες στο πρόγραμμα σηματοδότησης. Παρόλα αυτά η μεθοδολογία mGA-CVaR-NSV σταθερού χρόνου παρέχει καλύτερα αποτελέσματα και σε αυτή την περίπτωση σε σχέση με τον προσαρμοστικό έλεγχο, γεγονός που ενισχύει την ανάπτυξη μεθοδολογιών ελαχιστοποίησης του ρίσκου.

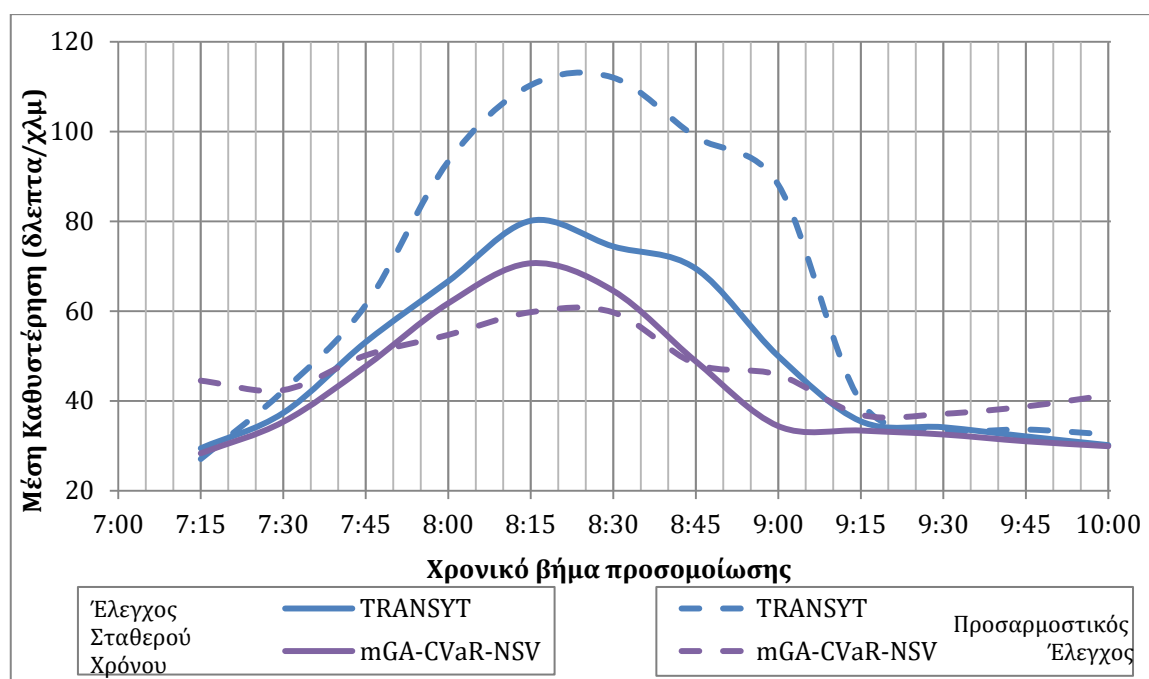
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση της μέσης καθυστέρησης βήματος με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις στις περιπτώσεις προσαρμοστικού ελέγχου και ελέγχου σταθερού χρόνου στα τρία σενάρια.

Η ανάλυση της διακύμανσης της καθυστέρησης παρουσιάζει διαφορετική εικόνα στην περίπτωση της προτεινόμενης προσέγγισης mGA-CVaR-NSV στη σύγκριση του προσαρμοστικού ελέγχου και του ελέγχου σταθερού χρόνου. Σε αυτή την περίπτωση φαίνεται ότι κατά την ώρα αιχμής παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα με τον προσαρμοστικό έλεγχο σε σχέση με τον έλεγχο σταθερού χρόνου, σε αντίθεση με τη συνολική μέση καθυστέρηση καθ' όλη την περίοδο ανάλυσης που είναι υψηλότερη. Αυτή η διαφορά στη διακύμανση της μέσης καθυστέρησης είναι πιο ορατή στα δύο σενάρια που τροποποιούνται οι συνθήκες λειτουργίας από τις συνθήκες σχεδιασμού. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η μεθοδολογία του προσαρμοστικού ελέγχου που λαμβάνει υπόψη στην εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης την εξέλιξη του φαινομένου και την ελαχιστοποίηση του ρίσκου των καθυστερήσεων μπορεί να προσαρμόσει καλύτερα τη σηματοδότηση ανάλογα με τις ανά-

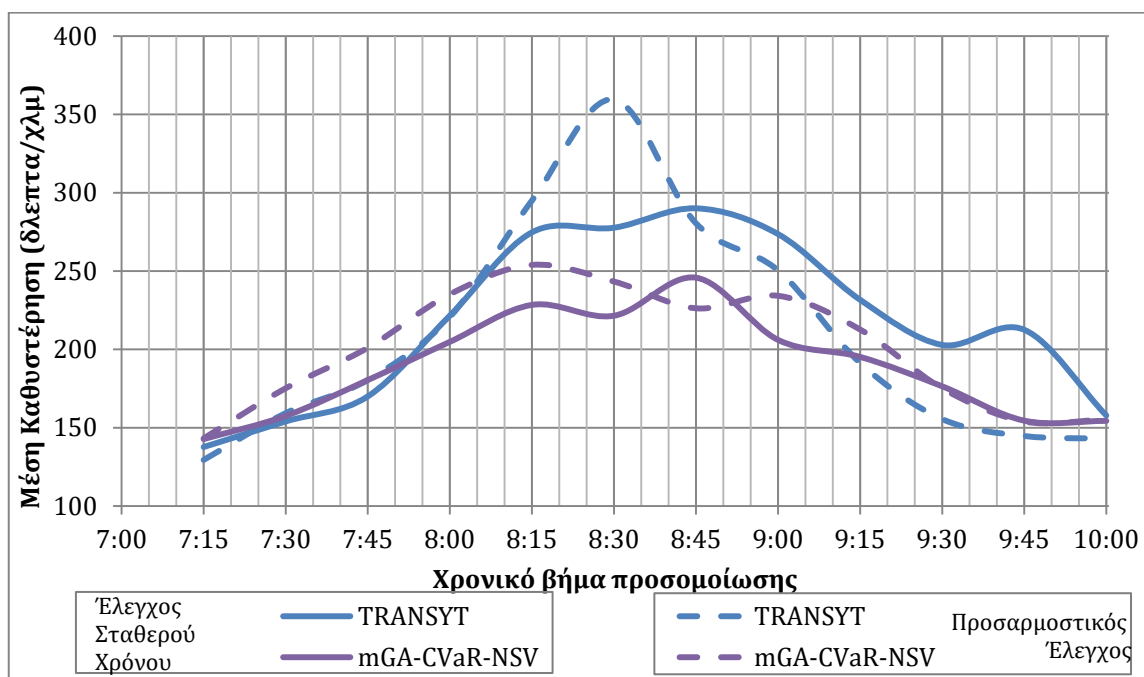
γκες του δικτύου περιορίζοντας τις ακραίες τιμές, παρόλο που δεν υπάρχει η διαδικασία της επανάληψης για την εύρεση της ισορροπίας.



Σχήμα 7-12: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων βασικού σεναρίου με προσαρμοστικό έλεγχο και έλεγχο σταθερού χρόνου



Σχήμα 7-13: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων 4^{ου} σεναρίου με προσαρμοστικό έλεγχο και έλεγχο σταθερού χρόνου



Σχήμα 7-14: Διακύμανση μέσης καθυστέρησης εναλλακτικών προσεγγίσεων 36^{ου} σεναρίου με προσαρμοστικό έλεγχο και έλεγχο σταθερού χρόνου

Συμπερασματικά, η προτεινόμενη προσέγγιση σταθερού χρόνου mGA-CVaR-NSV φαίνεται να υπερτερεί της προσέγγισης με το TRANSYT-7F εξετάζοντας τις στρατηγικές ελέγχου, αλλά και από την αντίστοιχη προσέγγιση στο πλαίσιο του προσαρμοστικού ελέγχου, αφού σε όλες τις περιπτώσεις το δίκτυο έχει καλύτερη απόδοση. Επιπλέον, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι δεν υπάρχει καθαρά μία κατεύθυνση ως προς την επιλογή μεταξύ προσαρμοστικού ελέγχου και ελέγχου σταθερού χρόνου, όταν οι συνθήκες αλλάζουν δραματικά σε σχέση με τις συνθήκες σχεδιασμού της σηματοδότησης σταθερού χρόνου, όπως στο σενάριο 36 που η αύξηση στη μέση καθυστέρηση είναι της τάξης του 500% σε σχέση με το βασικό σενάριο.

Αξίζει, δε, να σημειωθεί ότι στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την προσομοίωση του προσαρμοστικού ελέγχου, η πρόβλεψη της ζήτησης που πραγματοποιείται θεωρητικά σε κάθε χρονικό βήμα δεν αποκλίνει από τη ζήτηση που τελικώς προσομοιώνεται στο δίκτυο, γεγονός που ευνοεί τη διαδικασία προσαρμοστικού ελέγχου. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν ακόμα περισσότερο την πεποίθηση ότι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψη του την εξέλιξη των φαινομένων για εκτεταμένο χρονικό διάστημα και την έννοια του ρίσκου είναι προτιμότερος ακόμα και από μία προσέγγιση προσαρμοστικού ελέγχου που μπορεί να λαμβάνει πραγματικά στοιχεία για τη ρύθμιση των συνθηκών την κάθε δεδομένη στιγμή, αλλά δεν αναλύει τις επιπτώσεις που αυτές οι ρυθμίσεις θα έχουν με την πάροδο του χρόνου στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 8

Συνεισφορά και Συμπεράσματα

8.1 Συνεισφορά της Διατριβής

Το θέμα της παρούσας διατριβής πραγματεύεται τη διαχείριση των δυναμικών φαινομένων της κυκλοφορίας με μεθόδους μεσοσκοπικής προσέγγισης. Η διαχείριση της κυκλοφορίας κόμβων και δικτύων είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την ακαδημαϊκή κοινότητα τα τελευταία χρόνια προτείνοντας μεθόδους εκτίμησης των μεγεθών που εκφράζουν την απόδοση των συστημάτων, μεθόδους και εργαλεία για την αναπαράσταση των κυκλοφοριακών φαινομένων, αλγορίθμους για την εύρεση βέλτιστων λύσεων και συλλογιστικές για την προσέγγιση της επίλυσης του προβλήματος.

Κύριος στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η διερεύνηση και ανάπτυξη κατάλληλης συλλογιστικής, μεθόδων και εργαλείων για την αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας και των προβλημάτων συμφόρησης που παρουσιάζονται σε αστικά δίκτυα, προσφέροντας μία διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα μέσω της ανάλυσης και διαχείρισης ρίσκου.

Η διαχείριση της συμφόρησης αποτελεί συνεχή και αναγκαία πρακτική στην καθημερινή λειτουργία των κυκλοφοριακών συστημάτων. Οι διαχειριστές μεταφορικών συστημάτων θέτουν στρατηγικούς στόχους, όπως η αξιόπιστη και αποτελεσματική μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, και αναπτύσσουν και εφαρμόζουν στρατηγικές και μέτρα για την επίτευξή τους. Οι εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία και την απόδοση των μεταφορικών συστημάτων αποτελούν τους καθημερινούς κινδύνους στην επίτευξη των στόχων. Οι συνήθεις διακυμάνσεις, τόσο της μεταφορικής ζήτησης, όσο και των χαρακτηριστικών του δικτύου, είναι η πιο συχνή πηγή δημιουργίας μεταβαλλόμενων συνθηκών κυκλοφορίας, οι οποίες δημιουργούν ασάφειες στη προσέγγιση και αβεβαιότητες στην απόδοση του δικτύου. Η ανάλυση των χρονικά μεταβαλλόμενων καταστάσεων του δικτύου αποτελεί, λοιπόν, σημαντική παράμετρο στην επιτυχημένη ανάπτυξη και αξιολόγηση στρατηγικών ρύθμισης και ελέγχου της κυκλοφορίας που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των προβλημάτων της μη ομαλής λειτουργίας του δικτύου και στη διασφάλιση της εξισορρόπησης (δηλαδή του ελέγχου) του δικτύου στη πάροδο του χρόνου.

Υπό αυτό το πρίσμα ο κύριος στόχος της διατριβής αναλύεται σε επιμέρους στόχους που αποτελέσαν και τη κύρια συνεισφορά της διατριβής.

Στόχος: Ανάπτυξη μεθόδου ανάλυσης των χρονικά εξαρτώμενων κινδύνων και αβεβαιοτήτων του συστήματος που σχετίζονται με την απώλεια του χρόνου μετακίνησης των χρηστών.

Με την ευρεία έννοια του όρου, κίνδυνος είναι οτιδήποτε αποτελεί εμπόδιο στην επίτευξη των οριοθετημένων στόχων στην απόδοση ενός συστήματος, ενώ ρίσκο είναι ο συνδυασμός της πιθανότητας εμφάνισης μίας κατάστασης (ενός κινδύνου) και της έκτασης των συνεπειών της που μετρούνται μέσω των απωλειών. Ως κίνδυνοι λοιπόν ορίζονται οι χρονικά εξαρτώμενες συνέπειες της συμφόρησης ενός δικτύου. Αντίστοιχα, ως απώλεια, στην παρούσα ανάλυση ρίσκου της απόδοσης ενός κυκλοφοριακού δικτύου, ορίστηκε η απώλεια χρόνου που αντιστοιχεί στις καθυστερήσεις με τις οποίες επιβαρύνονται οι χρήστες του δικτύου για ένα χρονικό διάστημα ανάλυσης. Στην παρούσα προσέγγιση θεωρήθηκε ότι η καθυστέρηση στη μετακίνηση των χρηστών, όταν αναλύονται οι συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο σε ένα χρονικό ορίζοντα, εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η μετακίνηση του κάθε χρήστη και επομένως από τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της κάθε διαδρομής. Οι χρήστες λοιπόν, βιώνουν διαφορετικά επίπεδα συμφόρησης κατά τη διαδρομή τους και οι απώλειες στο χρόνο μετακίνησης λόγω καθυστερήσεων που βιώνουν οι χρήστες θεωρούνται η συνέπεια της δυναμικής ζήτησης μετακινήσεων που εξυπηρετείται από το δίκτυο, καθώς και των παραμέτρων που ορίζουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του δικτύου.

Η ανάλυση του ρίσκου στον κυκλοφοριακό σχεδιασμό έχει χρησιμοποιηθεί και από άλλους ερευνητές, αλλά δεν είχε εξεταστεί στο πλαίσιο που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή ως ανάλυση των χρονικά εξαρτώμενων κινδύνων του συστήματος.

Η μεθοδολογία ανάλυσης ρίσκου που υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή στηρίζεται στις έννοιες της Αξίας σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR) και της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value-at-Risk, $CVaR$) που αρχικά είχαν διατυπωθεί στο πλαίσιο χρηματοοικονομικών εφαρμογών. Έτσι, η Αξία σε Κίνδυνο για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης α είναι η ελάχιστη τιμή απώλειας, όπου η πιθανότητα παρατήρησης μεγαλύτερων απωλειών του παραγωγικού χρόνου, λόγω καθυστερήσεων στη μετακίνηση κατά την περίοδο ανάλυσης, είναι μικρότερη ή ίση του $(1 - \alpha)$. Αντίστοιχα, η Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο για το αντίστοιχο επίπεδο εμπιστοσύνης είναι η αναμενόμενη απώλεια που επέρχεται στον παραγωγικό χρόνο λόγω καθυστερήσεων στην περίπτωση υπέρβασης της τιμής της Αξίας σε Κίνδυνο.

Στόχος: Ανάπτυξη αξιόπιστων και αποτελεσματικών μεθόδων διαχείρισης της κυκλοφορίας που συμπεριλαμβάνουν την ανάλυση του ρίσκου στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα.

Οι μέθοδοι διαχείρισης της κυκλοφορίας βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα διαχείρισης μεταφορικών δικτύων πόλεων και επομένως είναι απαραίτητη η ανάπτυξή τους μέσω εργαλείων που μπορούν τόσο να αναπαριστούν τα δυναμικά μεγέθη της κυκλοφορίας με ακρίβεια, όσο και να είναι εφαρμόσιμα στη λειτουργία τους εντάσσοντάς τα σε Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας.

Η αναδρομή των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας κατέδειξε την έλλειψη της χρήσης μεθόδων που συμπεριλαμβάνουν την ανάλυση του ρίσκου στις χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα της διαχείρισης της κυκλοφορίας. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται η γενική αρχιτεκτονική δομή ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας που στηρίζεται στην ανάλυση του ρίσκου της μετακίνησης των χρηστών σε ένα χρονικό ορίζοντα. Η χρήση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο για την ανάλυση της απόδοσης του δικτύου παρέχει τη δυνατότητα στο προτεινόμενο Σύστημα να μειώσει τόσο τις συνέπειες από την εμφάνιση υψηλών επιπέδων συμφόρησης όσο και την πιθανότητα εμφάνισης αυτών των επιπέδων στους χρήστες εντός του χρονικού ορίζοντα που αναλύεται. Επιπλέον, ορίζεται το πλαίσιο λειτουργίας του Συστήματος με τη χρήση πολλαπλών πρακτόρων (agents), έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύπλοκα και μεγαλύτερα δίκτυα βελτιώνοντας τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.

Το προτεινόμενο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων στηρίζεται στη μεσοσκοπική προσέγγιση, η οποία παρέχει τη δυνατότητα για την ανάπτυξη εργαλείων που είναι εφαρμόσιμα στην πρακτική χρήση τους από συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας πόλεων. Το μεσοσκοπικό επίπεδο προσομοίωσης των κυκλοφοριακών φαινομένων είναι αρκετά αναλυτικό έτσι ώστε να παρέχει ακρίβεια στην αναπαράσταση των χαρακτηριστικών και των περιορισμών των δικτύων, ενσωματώνοντας παράλληλα τη δυναμική εξέλιξη των φαινομένων και την αλληλεξάρτησή τους εντοπίζοντας και αναλύοντας τις κινήσεις των οχημάτων και των διαδρομών τους, ενώ περιορίζουν τις απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους και υπολογιστικό χρόνο.

Στην παρούσα διατριβή διερευνήθηκε σε βάθος το πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου στο πλαίσιο ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεως για τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Ο σκοπός των μεθόδων που αναπτύχθηκαν είναι η ανάπτυξη αξιόπιστων και αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφορίας που ελαχιστοποιούν ή περιορίζουν τους χρονικά εξαρτώμενους κινδύνους και αβεβαιότητες του συ-

στήματος, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση και τον περιορισμό του ρίσκου των χρόνων μετακίνησης των χρηστών.

Στόχος: Διαμόρφωση μεθόδου εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου για μεμονωμένο κόμβο

Αναπτύχθηκε, λοιπόν, το μεθοδολογικό πλαίσιο και περιεγράφηκαν οι αλγόριθμοι εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης αρχικά για το επίπεδο του μεμονωμένου κόμβου. Η συνεισφορά της διατριβής έγκειται στην επίλυση του συνδυασμένου προβλήματος της εύρεσης βέλτιστων φάσεων και χρόνων σηματοδότησης σταθερού χρόνου διαμορφώνοντας ένα προγνωστικό εργαλείο εκτός σύνδεσης (offline) για την ελαχιστοποίηση του ρίσκου της μετακίνησης με μεσοσκοπική προσέγγιση. Αναπτύχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που εξερευνά το χώρο αναζήτησης λύσεων του προβλήματος μέσω μιας ευρετικής διαδικασίας για την εύρεση των βέλτιστων φάσεων χρησιμοποιώντας μία βιβλιοθήκη πιθανών συνδυασμών φάσεων και μέσω ενός μετα-ευρετικού αλγορίθμου για την εύρεση των βέλτιστων χρόνων σηματοδότησης του κόμβου. Η ανάλυση και ελαχιστοποίηση του ρίσκου του χρόνου μετακίνησης των χρηστών ενσωματώθηκε στην παρούσα προσέγγιση θεωρώντας ως απώλεια την καθυστέρηση που προκύπτει από τη λειτουργία του σηματοδοτούμενου κόμβου και ως πιθανότητα εμφάνισης του κάθε επιπέδου καθυστέρησης το ποσοστό των χρηστών που βιώνουν την κάθε διακριτή απώλεια. Μία άλλη καινοτομία της μεθόδου, που είναι επακόλουθο της χρήσης της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο, έγκειται στη χρήση αυτής της δυναμικής κατανομής της εκτιμώμενης καθυστέρησης για τη βελτιστοποίηση της σηματοδότησης και όχι μόνο ως ένα μέσο για την ακριβέστερη εκτίμηση της συνολικής καθυστέρησης, όπως έχει χρησιμοποιηθεί από άλλους ερευνητές. Με αυτό τον τρόπο θεωρείται ότι η βελτιστοποίηση προσεγγίζει ένα καθολικό βέλτιστο στη διάσταση του χρόνου.

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος οδήγησε στη διερεύνηση αλγορίθμων που μπορούν να παρέχουν ταχεία επίλυση του προβλήματος στην αναζήτηση του ολικού βέλτιστου. Μέσα από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας αναφορικά με τους αλγόριθμους αναζήτησης εντοπίστηκε και ενσωματώθηκε στην παρούσα προσέγγιση ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης, ο οποίος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη διαδικασία επίλυσης. Ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης δεν έχει χρησιμοποιηθεί από ερευνητές για την εύρεση βέλτιστης σηματοδότησης κόμβων, ενώ εφαρμογές του εντοπίστηκαν μόνο στην επίλυση του συνδυαστικού προβλήματος της εύρεσης κατάστασης ισορροπίας και ρυθμίσεων σηματοδότησης στο δίκτυο.

Στόχος: Αξιολόγηση του μοντέλου εκτίμησης καθυστέρησης HCM2010 για μεμονωμένο κόμβο

Το προτεινόμενο μοντέλο ελαχιστοποίησης του ρίσκου καθυστερήσεων είναι ένα μοντέλο μεσοσκοπικής προσέγγισης που για την υλοποίησή του απαιτείται ο υπολογισμός της καθυ-

στέρησης σε διαδοχικά χρονικά βήματα που συνθέτουν συνολικά μία εκτεταμένη χρονική περίοδο ανάλυσης. Η μέθοδος εκτίμησης της καθυστέρησης είναι βασικό στοιχείο της μεθοδολογίας, αλλά όχι και δεσμευτικό. Στην παρούσα διατριβή για την εκτίμηση της καθυστέρησης έχει χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία που προτείνεται στο HCM2010 για τα πολλαπλά διαδοχικά χρονικά βήματα. Η μεθοδολογία λόγω της πολυπλοκότητας των ορισμών των βασικών μεγεθών και της μη γραμμικότητας και κυρτότητας της συνάρτησης εκτίμησης της καθυστέρησης δεν ενσωματώνεται από ερευνητές στη διαδικασία βελτιστοποίησης με την χρήση των διαδοχικών χρονικών βημάτων. Μία δευτερεύουσα συνεισφορά της διατριβής είναι η επαλήθευση του μοντέλου εκτίμησης της καθυστέρησης μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης του μεμονωμένου κόμβου.

Στόχος: Διαμόρφωση μεθόδου εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου για δίκτυο στο πλαίσιο ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεως διαχείρισης της κυκλοφορίας

Το μεσοσκοπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης σηματοδότησης δικτύου ελαχιστοποίησης ρίσκου που εντάσσεται στο υποσύστημα σχεδιασμού στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας του προτεινόμενου Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων διατυπώθηκε στην παρούσα διατριβή ως προγνωστικό εργαλείο εκτός σύνδεσης (offline), αλλά και απευθείας σύνδεσης (online). Η καινοτομία της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγκειται στη χρήση της ανάλυσης ρίσκου, τόσο στο επίπεδο της βελτιστοποίησης της σηματοδότησης, όσο και στο επίπεδο της αξιολόγησης των λύσεων μέσω δυναμικής μεσοσκοπικής προσομοίωσης.

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης για την εύρεση των χρόνων πρασίνου και των χρονικών μετατοπίσεων πραγματοποιείται μέσω του γενετικού αλγορίθμου πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η μία αντικειμενική συνάρτηση αφορά στην ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο των καθυστερήσεων όλων των σηματοδοτούμενων κόμβων του δικτύου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πολλαπλών διαδοχικών βημάτων του HCM2010, όπως και στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου για την εκτίμηση της καθυστέρησης που εκφράζει τις απώλειες. Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση αφορά στο συντονισμό των σηματοδοτούμενων κόμβων, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Για την έκφραση των απωλειών από την έλλειψη του συντονισμού οι δύο προσεγγίσεις που διατυπώθηκαν είναι (α) η ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο του αριθμού των οχημάτων που εμφανίζουν διακοπτόμενη διέλευση κατά μήκος των προκαθορισμένων αρτηριών του δικτύου, και (β) η ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο του μεσοσκοπικού χρόνου αναμονής οχημάτων λόγω έλλειψης συντονισμού.

Για τη διερεύνηση των βέλτιστων ρυθμίσεων σηματοδότησης σε ένα δίκτυο υπό κορεσμό, που πραγματοποιείται μέσω μίας ευρετικής διαδικασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα περιβάλλον ανάλυσης και πρόβλεψης της λειτουργίας του δικτύου, το οποίο λαμβάνει υπόψη τη δυναμι-

κή εξέλιξη των φαινομένων της συμφόρησης και τη δυναμική επιλογή διαδρομής των χρηστών. Το εργαλείο αναπαράστασης των κυκλοφοριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκε στην προσέγγιση είναι η δυναμική μεσοσκοπική πλατφόρμα του λογισμικού Aimsun, η οποία μπορεί επιπλέον να αναλύει το δίκτυο και σε διαφορετικά επίπεδα μέσω μιας υβριδικής προσέγγισης που την καθιστά χρήσιμη και εύχρηστη στην ενσωμάτωσή της σε Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας.

8.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή των μεθόδων

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης σηματοδότησης με την προσέγγιση ελαχιστοποίησης ρίσκου σε μεσοσκοπικό επίπεδο εφαρμόστηκε στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου και στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου. Ο κόμβος και το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των ωφελειών από τη χρήση της ελαχιστοποίησης του ρίσκου στην εύρεση των ρυθμίσεων σηματοδότησης προέρχονται από αντίστοιχες εφαρμογές της βιβλιογραφίας. Η χρήση υποδειγμάτων της βιβλιογραφίας για την ανάλυση των εφαρμογών επιλέχθηκε έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων και με άλλες μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί από άλλους ερευνητές, αλλά και για να εφαρμοστεί η μεθοδολογία σε υποδείγματα που εμπεριέχουν πολλές σύνθετες παραμέτρους που προσδίδουν επιπλέον βαθμούς δυσκολίας στο εξεταζόμενο πρόβλημα.

8.2.1.1 Διαχείριση της κυκλοφορίας στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου

Στην περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου εξετάστηκαν διαφορετικοί αλγόριθμοι επίλυσης του προβλήματος της σηματοδότησης ως προς την ταχύτητα και την ακρίβεια της προκύπτουσας λύσης. Ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης που προτείνεται στην παρούσα προσέγγιση συγκρίθηκε με τον γενετικό αλγόριθμο, όπου και διαπιστώθηκε η υπεροχή του αλγόριθμου διεσπαρμένης αναζήτησης, τόσο στην εύρεση καλύτερων λύσεων, όσο και στην ταχύτητα εύρεσής τους. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης έχει καταλήξει σε λύσεις που προσφέρουν κατά μέσο όρο 12% περίπου μικρότερη συνολική καθυστέρηση στον κόμβο σε σχέση με τον γενετικό αλγόριθμο, ενώ είναι 15 φορές ταχύτερος από τον γενετικό αλγόριθμο. Έτσι φαίνεται ότι η διαδικασία αναζήτησης στον χώρο του προβλήματος με τον αλγόριθμο διεσπαρμένης αναζήτησης είναι πιο αποτελεσματική, καταλήγοντας σε καλύτερες λύσεις ταχύτερα. Γεγονός που φαίνεται και από τον αριθμό των εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, αφού ο μέσος χρόνος εκτέλεσης μίας βελτιστοποίησης είναι περίπου 17 δευτερόλεπτα σε συμβατικές υπολογιστικές μηχανές. Η ακρίβεια της εκτιμώμενης λύσης από τους δύο υπό εξέταση αλγόριθμους επαληθεύτηκε μέσω ενός ελέγχου για την αξιολόγηση της απόστασης των εκτιμώμενων λύσεων από την συνολικά βέλτιστη λύση. Για έναν περιορισμένο αριθμό συνδυασμών φάσεων εντοπίστηκε η συνολικά βέλτιστη λύση με εξαντλητικό υπολογισμό των εναλλακτικών χρόνων πρασίνου και περιόδου

σηματοδότησης. Μέσω αυτής της ανάλυσης εντοπίστηκε μία συνέπεια ενός περιορισμού του αλγορίθμου διεσπαρμένης αναζήτησης όπως είναι υλοποιημένος στο MATLAB Η οποία οδηγεί σε αστοχία του αλγορίθμου που οφείλεται στη μη επιβολή περιορισμού ακεραίων αριθμών στις μεταβλητές. Αυτή η αστοχία είναι γνωστή ως ακέραιο χάσμα (integrality gap) και έχει παρατηρηθεί ότι σε περιπτώσεις συνεχών μεταβλητών που αντιστοιχούν σε ορισμένες διακριτές τιμές (όπως στην παρούσα περίπτωση των ακέραιων λύσεων), η βέλτιστη τιμή μπορεί να μην εντοπίζεται στην διακριτή τιμή που αντιστοιχεί η συνεχής μεταβλητή, αλλά σε γειτονική διακριτή τιμή. Τα οφέλη όμως από τη χρήση του αλγορίθμου διεσπαρμένης αναζήτησης στην ταχύτητα εκτέλεσης είναι πολύ πιο σημαντικά λαμβάνοντας υπόψη ότι η αστοχία αυτή είναι της τάξης του 2% και ότι αντιστοιχεί σε διαφορά ενός δευτερολέπτου στους χρόνους πρασίνου.

Η μεθοδολογία βελτιστοποίησης σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου με ελαχιστοποίηση του ρίσκου καθυστερήσεων συγκρίθηκε με άλλες προσεγγίσεις αντικειμενικών συναρτήσεων που συνήθως χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία. Οι συγκρινόμενες μεθοδολογίες χρησιμοποιούν τη μεθοδολογία του HCM2010 στην εκτίμηση της καθυστέρησης, αλλά ως αντικειμενική συνάρτηση στη διαδικασία της βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν, είτε την ελαχιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης, είτε την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης του χρονικού βήματος με την υψηλότερη ζήτηση. Από τη σύγκριση των μεθόδων αποδεικνύεται ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία οδηγεί στην εμφάνιση χαμηλότερων τιμών μέσης καθυστέρησης στον κόμβο. Επιπλέον, εξετάζοντας τη διακύμανση της καθυστέρησης, η προτεινόμενη μεθοδολογία οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές των υψηλών επιπέδων συμφόρησης συγκρινόμενη με τις άλλες προσεγγίσεις. Διαπιστώνεται λοιπόν, ότι ο κύριος στόχος της παρούσας προσέγγισης, δηλαδή να περιοριστούν οι συνέπειες των υψηλών διακυμάνσεων της ζήτησης που αντιστοιχούν σε υψηλές διακυμάνσεις της καθυστέρησης, επιτυγχάνεται στο επίπεδο του μεμονωμένου κόμβου στην περίπτωση που οι συνθήκες σχεδιασμού είναι ίδιες με τις συνθήκες λειτουργίας του κόμβου. Τι γίνεται όμως στην συνήθη περίπτωση που οι συνθήκες σχεδιασμού αναφορικά είτε με τη ζήτηση είτε με την προσφορά τροποποιούνται; Για να επαληθευτεί η βασική υπόθεση, ότι ένα πρόγραμμα σηματοδότησης σχεδιασμένο και βελτιστοποιημένο με την ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο προσφέρει στους χρήστες μικρότερο κίνδυνο εμφάνισης υψηλών τιμών καθυστέρησης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας διαφορετικών επιπέδων ζήτησης και εμφάνισης συμβάντων που τροποποιούνται τα προσφερόμενα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κόμβου. Διαπιστώθηκε λοιπόν, ότι η προτεινόμενη προσέγγιση υπερέχει των εναλλακτικών προσεγγίσεων και διαμορφώνει τέτοιες λειτουργικές συνθήκες στον κόμβο, που εμφανίζουν και χαμηλότερα συνολικά μεγέθη καθυστερήσεων, αλλά και χαμηλότερο εύρος διακυμάνσεων καθυστερήσεων σε σχέση με τις συνθήκες σχεδιασμού.

Ο δευτερεύων στόχος, της αξιολόγησης της προσέγγισης πολλαπλών διαδοχικών βημάτων του HCM2010 για την εκτίμηση της καθυστέρησης, πραγματοποιήθηκε στη παρούσα διατριβή μέσω επαλήθευσης της εκτιμώμενης καθυστέρησης και σύγκρισής της με την εκτίμηση της καθυστέρησης σε μικροσκοπικό επίπεδο χρησιμοποιώντας το Aimsun. Η μικροσκοπική προσομοίωση θεωρείται ότι προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες. Επομένως, αφού ο κόμβος υποδείγματος προέρχεται από τη βιβλιογραφία, όπου δεν υπάρχουν πραγματικά στοιχεία για τη σύγκριση της μεθόδου HCM2010, μέσω της μικροσκοπικής προσομοίωσης πραγματοποιείται σύγκριση για το αν και κατά πόσο η μέθοδος είναι αξιόπιστη. Από τη σύγκριση των εκτιμήσεων της καθυστέρησης διαπιστώνεται ότι υπάρχει πολύ ικανοποιητική συσχέτιση των δύο μεθόδων εκτίμησης, ενώ η μέση ποσοστιαία απόκλιση δεν ξεπερνάει το 20% μεταξύ των δύο μεθόδων. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι οι μέγιστες τιμές αποκλίσεων δεν παρατηρούνται στις υψηλές τιμές των καθυστερήσεων, αλλά στο μέσο εύρος τιμών. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος πολλαπλών διαδοχικών βημάτων του HCM2010 υποεκτιμά τη μέση καθυστέρηση σε σχέση με τα στοιχεία που προκύπτουν από τη μικροσκοπική προσομοίωση.

8.2.1.2 Διαχείριση της κυκλοφορίας στην περίπτωση του συντονισμένου δικτύου

Στην περίπτωση του σηματοδοτούμενου δικτύου οι προτεινόμενες προσεγγίσεις ελαχιστοποίησης του ρίσκου με μεσοσκοπική προσέγγιση εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που παρέχονται από τη χρήση του λογισμικού TRANSYT-7F σε τρία επίπεδα ζήτησης. Διαπιστώθηκε ότι οι προτεινόμενες προσεγγίσεις ελαχιστοποίησης του ρίσκου προσφέρουν συνθήκες λειτουργίας στο δίκτυο με χαμηλότερη μέση καθυστέρηση συνολικά, αλλά και χαμηλότερη διακύμανσης καθυστέρησης αναφορικά με το TRANSYT-7F. Το όφελος αυτό αυξάνεται όσο η ζήτηση, και επομένως, και τα επίπεδα συμφόρησης αυξάνονται. Αντίστοιχα με την περίπτωση του μεμονωμένου κόμβου και στην περίπτωση του δικτύου, ο κύριος στόχος της ανάπτυξης ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων ως προγνωστικό εργαλείο για τη διαχείριση του ρίσκου της μετακίνησης επιτυγχάνεται. Δηλαδή, με την εφαρμογή της μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης του ρίσκου περιορίζονται οι υψηλές διακυμάνσεις της καθυστέρησης που είναι συνέπειες των υψηλών διακυμάνσεων της ζήτησης. Συγκεκριμένα, η πρώτη προσέγγιση παρουσιάζει καλύτερη μέση τιμή καθυστέρησης από το TRANSYT-7F που κυμαίνεται μεταξύ 4% και 27%, ενώ η δεύτερη προσέγγιση παρουσιάζει καλύτερη μέση τιμή καθυστέρησης από το TRANSYT-7F που κυμαίνεται μεταξύ 1% και 20%. Αντίστοιχα, η τυπική απόκλιση της μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα με την πρώτη προσέγγιση είναι μικρότερη αναφορικά με το TRANSYT-7F από 16,5% έως 54%, ενώ με τη δεύτερη προσέγγιση από 0% έως 29,5%. Τα οφέλη των προτεινόμενων προσεγγίσεων αναφορικά με το TRANSYT-7F διαπιστώθηκαν και από την εξέταση του συντονισμού που επιτυγχάνεται στις διαδρομές του δικτύου βάσει ανάλυσης δεικτών της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης, σε συνάρτηση και με τις επιλογές διαδρομών των χρηστών. Από αυτή την

ανάλυση διαπιστώθηκε ότι οι προτεινόμενες προσεγγίσεις, και πολύ περισσότερο η πρώτη προσέγγιση, συντονίζουν πιο αποτελεσματικά τις διαδρομές του δικτύου και ως προς την αποδοτικότητα αλλά και ως προς την εφικτότητα της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ο δυναμικός καταμερισμός της ζήτησης μετακινήσεων αξιοποιεί σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό τα οφέλη του συντονισμού που έχει προκύψει από τις προτεινόμενες προσεγγίσεις σε σχέση με το TRANSYT-7F.

Συγκρίνοντας τις δύο προσεγγίσεις ελαχιστοποίησης του ρίσκου, παρατηρήθηκε ότι η προσέγγιση που στοχεύει στη βελτιστοποίησης της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την εναλλακτική προσέγγιση που βελτιστοποιεί τον χρόνο αναμονής. Η χαμηλότερη απόδοση της δεύτερης προσέγγισης θεωρείται όμως ότι οφείλεται στην απλουστευμένη προσέγγιση που έχει διατυπωθεί για τη μεσοσκοπική κίνηση των οχημάτων και όχι στη μεθοδολογία ελαχιστοποίησης ρίσκου, αφού σε σχέση με το TRANSYT-7F παρουσιάζει καλύτερη απόδοση, είτε εξετάζοντας τις καθυστερήσεις στο δίκτυο, είτε εξετάζοντας τους δείκτες της χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης.

Για να επαληθευτεί η βασική υπόθεση που στηρίζεται το προτεινόμενο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων, ότι οι ρυθμίσεις σηματοδότησης βελτιστοποιημένες και επιλεγμένες με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο προσφέρει στους χρήστες μικρότερο κίνδυνο εμφάνισης υψηλών τιμών καθυστέρησης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας διαφορετικών επιπέδων ζήτησης και εμφάνισης συμβάντων που τροποποιούν τα προσφερόμενα χαρακτηριστικά λειτουργίας του δικτύου. Η ανάλυση ευαισθησίας περιλάμβανε 47 σενάρια διαφορετικών συνθηκών και σύγκριση της απόδοσης του δικτύου με τις ρυθμίσεις που προέκυψαν εκτός σύνδεσης με την πρώτη προσέγγιση ελαχιστοποίησης ρίσκου και αυτές που προέκυψαν από το TRANSYT-7F. Διαπιστώθηκε ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων (>95% των σεναρίων), η σηματοδότηση που έχει προκύψει από την προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει καλύτερη απόδοση του δικτύου ακόμα και όταν υπάρχουν διαφορετικές συνθήκες από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της κάθε ρύθμισης συγκρίνοντας τις αποδόσεις του δικτύου με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F. Συγκεκριμένα, το δίκτυο έχει καλύτερη μέση ποσοστιαία απόδοση με τις ρυθμίσεις ελαχιστοποίησης του ρίσκου κατά 17,5% εξετάζοντας τη μέση καθυστέρηση, 22,5% εξετάζοντας την Υπό Συνθήκη Αξία σε Κίνδυνο της μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα και 11,5% εξετάζοντας το συνολικό χρόνο μετακίνησης. Εξετάζοντας το εύρος των διακυμάνσεων από το βασικό σενάριο διαπιστώνεται πάλι η υπεροχή της προτεινόμενης προσέγγισης σε σχέση με το TRANSYT-7F, εκτός από την περίπτωση των σεναρίων της πολύ υψηλής ζήτησης. Σε αυτή την περίπτωση, ενώ οι μέσες τιμές των μεγεθών της μέσης καθυστέρησης και του συνολικού χρόνου μετακίνησης στα σενάρια που εξετάστηκαν είναι χαμηλότερες με την προτεινόμενη προσέγγιση σε σχέση με το TRANSYT-7F, οι διακυμάνσεις των μεγεθών αυτών είναι μεγαλύτερες. Προσδί-

δοντας έτσι ένα σημαντικό στοιχείο αβεβαιότητας στη λειτουργία του δικτύου σε περιπτώσεις διαφοροποίησης των συνθηκών ζήτησης ή προσφοράς. Αξίζει να σημειωθεί ότι συνολικά στα σενάρια που εξετάστηκαν το δίκτυο έχει 15% μειωμένη μέση καθυστέρηση με τις ρυθμίσεις της προτεινόμενης προσέγγισης, επομένως συμπερασματικά παρατηρείται ότι στην περίπτωση του σεναρίου της πολύ υψηλής ζήτησης το δίκτυο με τις ρυθμίσεις του TRANSYT-7F έχει γενικά χειρότερη απόδοση, αλλά καλύτερη σταθερότητα.

Το προτεινόμενο Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων για τη ρύθμιση της σηματοδότησης απευθείας σύνδεσης εφαρμόστηκε και συγκρίθηκε τόσο με τα αποτελέσματα του Συστήματος εκτός σύνδεσης όσο και με τα αποτελέσματα της προσαρμοστικής σηματοδότησης που προέκυψαν από το TRANSYT-7F. Συγκρίνοντας λοιπόν την προτεινόμενη προσέγγιση ελαχιστοποίησης ρίσκου μεταξύ του προσαρμοστικού ελέγχου και του ελέγχου σταθερού χρόνου φαίνεται ότι η προγνωστική προσέγγιση σταθερού χρόνου είναι ελαφρώς καλύτερη από τον προσαρμοστικό έλεγχο ακόμα και στο σενάριο που οι κυκλοφοριακές συνθήκες τροποποιούνται σημαντικά. Η διαφορά όμως των αποδόσεων των δικτύων δεν είναι τόσο σημαντικές έτσι ώστε να προκύπτει μία καθαρή κατεύθυνση. Αφενός, η διαδικασία εύρεσης ρυθμίσεων σηματοδότησης σταθερού χρόνου έχει το πλεονέκτημα ότι μέσω της ευρετικής διαδικασίας αναλύει και προτείνει ρυθμίσεις για κυκλοφοριακές καταστάσεις που είναι αποτέλεσμα διαφορετικών επιλογών των χρηστών στις διαδρομές τους. Έτσι θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει τη συνολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος³. Αφετέρου, ο προσαρμοστικός έλεγχος παρέχει τη δυνατότητα της προσαρμογής του συστήματος σηματοδότησης σε συνθήκες που διαφέρουν σημαντικά από τις συνθήκες σχεδιασμού με αποτέλεσμα να απαιτούν διαφορετικές ρυθμίσεις για την αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας. Ιδανικά λοιπόν, το Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων χρησιμοποιώντας την ανάλυση ρίσκου μπορεί να εντοπίζει τις περιπτώσεις που υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά σχεδιασμού της σηματοδότησης και μόνο σε αυτή την περίπτωση να προτείνει την ενεργοποίηση του προσαρμοστικού ελέγχου.

Τέλος, συγκρίθηκε ο προσαρμοστικός έλεγχος με την προσέγγιση βελτιστοποίησης ελαχιστοποίησης ρίσκου και ο προσαρμοστικός έλεγχος με το TRANSYT-7F πραγματοποιώντας ανάλυση μόνο του χρονικού διαστήματος της επόμενης εφαρμογής ρυθμίσεων (π.χ. 15 λεπτά). Σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη προσέγγιση της ανάλυσης όχι μόνο του ρίσκου αλλά και της εκτεταμένης περιόδου παρουσιάζει σημαντικά καλύτερη απόδοση, αφού οι ρυθμίσεις που σχεδιάζονται δεν αποτελούν χρονικά ένα τοπικό βέλτιστο, αλλά επιχειρούν την πρόγνωση προβλημάτων που θα εμφανιστούν σε μεταγενέστερο χρονι-

³ αν θεωρήσουμε ότι οι επιλογές των χρηστών δεν είναι ως επί το πλείστον 'μυωπικές'

κό ορίζοντα, αλλά η αντιμετώπισή τους πρέπει να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί πριν την εκδήλωσή τους.

Καταλήγοντας λοιπόν, από την εφαρμογή τόσο στο επίπεδο του μεμονωμένου κόμβου όσο και στο επίπεδο του συντονισμένου δικτύου, διαπιστώθηκε ότι η προσέγγιση της ανάλυσης της εξέλιξης των φαινομένων συμφόρησης για εκτεταμένο χρονικό διάστημα, και η εισαγωγή της ανάλυσης του ρίσκου στη διαχείριση της κυκλοφορίας παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι περιορίζεται το ρίσκο του χρόνου μετακίνησης και το ρίσκο εμφάνισης υψηλών διακυμάνσεων της συμφόρησης. Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι με την προτεινόμενη προσέγγιση παρατηρείται συνολικά μία καλύτερη λειτουργία του συστήματος (κόμβος και δίκτυο), δηλαδή και η συνολική καθυστέρηση όλων των οχημάτων σε όλη τη χρονική περίοδο ανάλυσης είναι καλύτερη. Η ανάλυση των μεθοδολογιών και τα αποτελέσματα των εφαρμογών τους που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια θεωρείται ότι καλύπτουν τον κύριο στόχο της διατριβής, αναπτύσσοντας αλγοριθμικές διαδικασίες, μεθόδους και εργαλεία για την αποτελεσματική διαχείρισης της κυκλοφορίας και των προβλημάτων συμφόρησης αστικών δικτύων. Συνολικά, η διατριβή διαπιστώνεται ότι συνέβαλε στην ανάλυση του προβλήματος μέσω μίας διαφορετικής προσέγγισης που δεν έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν ενισχύοντας τις μεθόδους ανάλυσης των κυκλοφοριακών δικτύων και τις μεθόδους βελτιστοποίησης της διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω της ανάλυσης και διαχείρισης του ρίσκου. Η διατριβή εξέτασε ένα θέμα που έχει τόσο ερευνητικό όσο και πρακτικό ενδιαφέρον και η συμβολή της δύναται να μεγιστοποιηθεί εάν οι μέθοδοι και οι διαδικασίες που διατυπώθηκαν εφαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες ανάλυσης και διαχείρισης δικτύων, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής των χρηστών του μεταφορικού συστήματος και συμβάλλοντας θετικά στην οικονομία και στο περιβάλλον.

8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η περαιτέρω έρευνα και εμβάθυνση του προβλήματος της διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω μεσοσκοπικών δυναμικών προσεγγίσεων στο πλαίσιο της ανάλυσης ρίσκου, που παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των ακόλουθων προτάσεων:

- Εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών σε κόμβους και δίκτυα διαφορετικών δομών και εκτάσεων, όπως σε πραγματικές εφαρμογές για τη διερεύνηση της συνεισφοράς της ανάλυσης ρίσκου υπό διαφορετικές συνθήκες. Ο κόμβος και το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκαν στις εφαρμογές της παρούσας διατριβής προσδίδουν πολλούς περιορισμούς και δυσκολίες στην επίλυση του προβλήματος, αλλά η εξέταση και εναλλακτικών υποδειγμάτων εφαρμογών θα παρέχει τη δυνατότητα για περαιτέρω διερεύνηση των

περιορισμών που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό και για κατανόηση των επιπτώσεων από την εφαρμογή των μεθόδων.

- Η προτεινόμενη ανάλυση ρίσκου επιχειρεί τον περιορισμό της αβεβαιότητας των διακυμάνσεων της συμφόρησης σε ένα χρονικό ορίζοντα ανάλυσης. Η ανάλυση ρίσκου στη βελτιστοποίηση σηματοδότησης έχει προταθεί από άλλους ερευνητές (όπως Yin, 2008 και Zhang et al., 2010) για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της αβεβαιότητας του προσδιορισμού της ζήτησης ως παράμετρος σχεδιασμού του προβλήματος. Μία επέκταση της παρούσας διατριβής είναι η ενσωμάτωση και αυτής της αβεβαιότητας στο πρόβλημα μέσω ανάλυσης διαφορετικών σεναρίων και μέσω βελτιστοποίησης της αθροιστικής Υπό Συνθήκη Αξίας σε Κίνδυνο χρησιμοποιώντας την ιδιότητα της προσθετικότητας που ικανοποιεί το μέτρο.
- Στην παρούσα διατριβή διατυπώθηκε η αρχιτεκτονική δομή ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων που χρησιμοποιεί και εντάσσει στις λειτουργίες του την ανάλυση ρίσκου έτσι όπως έχει οριστεί στην παρούσα διατριβή. Όμως, εξειδικεύτηκε και ελέγχθηκε μόνο η περίπτωση του υποσυστήματος σχεδιασμού της σηματοδότησης. Η ανάπτυξη και εφαρμογή των υπόλοιπων υποσυστημάτων αποτελεί πρόταση για περαιτέρω έρευνα για την παρακολούθηση και εφαρμογή στρατηγικών και μέτρων για τον περιορισμό του ρίσκου της μετακίνησης από κέντρα διαχείρισης της κυκλοφορίας. Επίσης, πρόταση για περαιτέρω έρευνα αποτελεί στην περίπτωση του δικτύου, η υλοποίηση του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων με χρήση πρακτόρων για τη βελτίωση του υπολογιστικού χρόνου εκτέλεσης των αλγορίθμων ειδικά στην περίπτωση μεγάλης έκτασης δικτύων.
- Στην παρούσα διατριβή η εκτίμηση της καθυστέρησης πραγματοποιήθηκε με χρήση του μοντέλου πολλαπλών διαδοχικών βημάτων του HCM2010. Το μοντέλο αυτό είναι αφενός ένα έγκυρο και διεθνώς αναγνωρισμένο μοντέλο, αλλά αφετέρου έχει ορισμένους περιορισμούς στη χρήση του, όπως διατυπώθηκαν στο Κεφάλαιο 5.1.2. Προτείνεται λοιπόν, η χρήση διαφορετικών μοντέλων εκτίμησης της καθυστέρησης ενός χρονικού ορίζοντα σε διαδοχικά βήματα ανάλυσης, έτσι ώστε να διερευνηθούν οι επιπτώσεις και περιορισμοί που συνεπάγονται από την εφαρμογή τους στην προτεινόμενη ανάλυση ρίσκου. Αντίστοιχα, στην περίπτωση του δικτύου, η προτεινόμενη ανάλυση μπορεί να επεκταθεί σε διαφορετικές διατυπώσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψη παράλληλα και τις ουρές που δημιουργούνται στις προσβάσεις των κόμβων στον συντονισμό των προκαθορισμένων αρτηριών.
- Η εύρεση σταθερού προγράμματος σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου μπορεί επίσης να επεκταθεί στην εύρεση πολλαπλών προγραμμάτων για διαφορετικά χρονικά

βήματα του ορίζοντα ανάλυσης, έτσι ώστε συνολικά να επιτυγχάνεται αποτελεσματική διαχείριση της δυναμικής ζήτησης που εξυπηρετείται από τη σηματοδότηση.

- Η προτεινόμενη ανάλυση και βελτιστοποίηση της σηματοδότησης δικτύου μπορεί να επεκταθεί σε μία παράλληλη δυναμική μεσοσκοπική προσέγγιση της διατύπωσης του προβλήματος της εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης και του προβλήματος της εύρεσης δυναμικής ισορροπίας των χρηστών μέσω μεσοσκοπικού καταμερισμού. Έτσι θα μπορούσε να επιτευχθεί η συνολικά βέλτιστη λύση και η εύρεση της κατάστασης μεσοπρόθεσμης ισορροπίας του δικτύου.
- Στην παρούσα διατριβή η επιλογή της βέλτιστης λύσης των ρυθμίσεων σηματοδότησης του δικτύου από το μέτωπο Pareto χρησιμοποίησε τη μέθοδο της κοντινότερης εφικτής λύσης ως προς την ουτοπική (ιδεατή) λύση, μέσω της Ευκλείδειας απόστασης. Μία εναλλακτική προσέγγιση στην επιλογή της βέλτιστης λύσης από το μέτωπο Pareto αποτελεί μία πρόταση για περαιτέρω διερεύνηση. Εναλλακτικές προσεγγίσεις που θα μπορούσαν να διερευνηθούν είναι η εφαρμογή διαφορετικών εξισώσεων χρησιμότητας ή και η στοχαστική επιλογή του βέλτιστου σημείου από το μέτωπο Pareto. Με αυτό τον τρόπο θα διερευνηθεί η επιρροή της επιλογής του βέλτιστου σημείου τόσο στην εύρεση συνολικά βέλτιστης λύσης όσο και στην αποτελεσματική διερεύνηση του χώρου του προβλήματος.
- Η διερεύνηση των αλγορίθμων αναζήτησης λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή στο επίπεδο του κόμβου κατέληξε ότι ο αλγόριθμος διεσπαρμένης αναζήτησης είναι πολύ πιο αποτελεσματικός από τον γενετικό αλγόριθμο. Η εφαρμογή λοιπόν, του αλγορίθμου διεσπαρμένης αναζήτησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων στην επίλυση του προβλήματος θεωρείται ότι θα συντελέσει στην ταχύτερη επίλυσή του με εξίσου αποτελεσματικό τρόπο όπως ο γενετικός αλγόριθμος πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί εφαρμογές του αλγορίθμου διεσπαρμένης αναζήτησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων σε άλλα προβλήματα (όπως από τους Beausoleil, 2006, Molina et al., 2007, Nebro et al., 2008, Bajestani et al., 2009, Kerkhove & Vanhoucke, 2017), στα οποία έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά του σε σύγκριση με άλλους αλγορίθμους.
- Για την ταχύτερη επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της σηματοδότησης προτείνεται η κωδικοποίηση του προβλήματος είτε μέσω παράλληλων υπολογισμών χρησιμοποιώντας το Parallel Computing Toolbox™ που διατίθεται στο MATLAB, είτε διατυπώνοντας τις αντικειμενικές εξισώσεις και τους περιορισμούς σε διανύσματα (vectorized) έτσι ώστε να αποφεύγονται βρόγχοι και να πραγματοποιείται παράλληλη αξιολόγηση εναλλακτικών τιμών των παραμέτρων.

- Τέλος, η προτεινόμενη προσέγγιση της ανάλυσης του ρίσκου του χρόνου μετακίνησης μπορεί να ενταχθεί πέρα από συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας σε συστήματα διαχείρισης της ζήτησης, όπως για παράδειγμα στην επιλογή του χρόνου αναχώρησης από τους χρήστες με κριτήριο την ελαχιστοποίηση όχι μόνο του χρόνου μετακίνησης αλλά και του ρίσκου καθυστερήσεων. Επιπλέον, μπορεί να ενταχθεί σε συστήματα πλοήγησης για την επιλογή της διαδρομής από τους χρήστες με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του ρίσκου των καθυστερήσεων σε αντίθεση με την ελαχιστοποίηση του χρόνου, του κόστους ή της απόστασης μετακίνησης.

Κεφάλαιο 9

Βιβλιογραφία

- Abbas, M., Bullock, D., Head, L. (2001). Real-time offset transitioning algorithm for coordinating traffic signals. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1748), 26-39.
- Abdelfatah, A.S., Mahmassani, H.S. (1998). System optimal time-dependent path assignment and signal timing in traffic network. *Transportation Research Record*, 1645. Washington D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.
- Abdelghany, K., Hashemi, H., Khodayar, M.E. (2018). A Decision Support System for Proactive-Robust Traffic Network Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Abdelghany, K., Valdes, D., Abdelfatah, A., & Mahmassani, H. (1999). Real-Time Dynamic Traffic Assignment and Path-Based Signal Coordination; Application to Network Traffic Management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1667), 67-76.
- Abdoos, M., Mozayani, N., & Bazzan, A. L. (2011). Traffic light control in non-stationary environments based on multi agent Q-learning. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011 14th International IEEE Conference on (pp. 1580-1585). IEEE.
- Abdoos, M., Mozayani, N., Bazzan, A. L. (2013). Holonic multi-agent system for traffic signals control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(5-6), 1575-1587.
- Abdulhai, B., Pringle, R., & Karakoulas, G. J. (2003). Reinforcement learning for true adaptive traffic signal control. *Journal of Transportation Engineering*, 129(3), 278-285.
- Aboudolas, K. M. A. E., Papageorgiou, M., Kouvelas, A., & Kosmatopoulos, E. (2010). A rolling-horizon quadratic-programming approach to the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5), 680-694.
- Aboudolas, K., Papageorgiou, M., & Kosmatopoulos, E. (2009). Store-and-forward based methods for the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(2), 163-174.
- Abu-Lebdeh, G., & Benekohal, R. (1997). Development of traffic control and queue management procedures for oversaturated arterials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1603), 119-127.
- Agbolosu-Amison, S. J., & Park, B. B. (2009). Performance evaluation of dynamic gap-out feature at actuated traffic signal controller using a simulation based optimization method. *The 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, No. 09-2802.
- Agbolosu-Amison, S. J., Park, B., & Yun, I. (2009). Comparative evaluation of heuristic optimization methods in urban arterial network optimization. In *Intelligent Transportation Systems*, 2009. ITSC'09. 12th International IEEE Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- Aimsun (2018). Aimsun. <https://www.aimsun.com/>. Accessed August 18, 2018.
- Akçelik, R. (2015). Development of network signal timing methodology in SIDRA INTERSECTION. NZMUGS 2015, Auckland, New Zealand.

- Alem, D., Clark, A., Moreno, A. (2016). Stochastic network models for logistics planning in disaster relief. *European Journal of Operational Research*, 255(1), 187-206.
- Alexiadis, V. & Chu, A. (2016). Integrated corridor management analysis, modeling, and simulation for the I-15 corridor in San Diego, California post-deployment assessment report (No. FHWA-JPO-16-403). United States. Dept. of Transportation. ITS Joint Program Office.
- Allsop, R.E. (1968). Selection of offsets to minimize delay to traffic in a network controlled by fixed-time signals. *Transportation Science* 2(1), 1-13.
- Allsop, R.E. (1971). SIGSET: A Computer Program for Calculating Traffic Capacity of Signal-controlled Road Junctions. *Traffic Engineering Control*, 12, 58-60.
- Allsop, R.E. (1974). Some possibilities for using traffic control to influence trip distribution and route choice. In *Proceedings of Buckley, D.J. (ed.). 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Sydney, Australia. New York: Elsevier.
- Allsop, R.E., & Charlesworth, J.A. (1977). Traffic in a signal-controlled road network: example of different signal timings including different routings. *Traffic Engineering Control*, 18(5), 262-264.
- Almejalli, K., Dahal, K., Hossain, M.A. (2007). Intelligent traffic control decision support system. In: *Workshops on Applications of Evolutionary Computation*, Springer, Berlin, Heidelberg, 688-701.
- Alter, S.L. (1980). *Decision Support Systems: Current Practice and Continuing Challenge*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Ampountolas, K., Zheng, N., & Geroliminis, N. (2017). Macroscopic modelling and robust control of bi-modal multi-region urban road networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 616-637.
- Antoniou, C., Barceló, J., Breen, M., Bulles, M., Casas, J., Cipriani, E., Ciuffo, B., Djukic, T., Hoogendoorn, S., Marzano, V., Montero, L., (2016). Towards a generic benchmarking platform for origin-destination flows estimation/updating algorithms: Design, demonstration and validation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, 79-98.
- Antoniou, C., Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N. (2007). Nonlinear Kalman filtering algorithms for on-line calibration of dynamic traffic assignment models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(4), 661-670.
- Araghi, S., Khosravi, A., Johnstone, M., & Creighton, D. (2013). Intelligent traffic light control of isolated intersections using machine learning methods. In *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 3621-3626). IEEE.
- Arel, I., Liu, C., Urbanik, T., & Kohls, A. G. (2010). Reinforcement learning-based multi-agent system for network traffic signal control. *IET Intelligent Transport Systems*, 4(2), 128-135.
- Arnott, D. & Pervan, G. (2016). A critical analysis of Decision Support Systems research revisited: the rise of design science. In *Enacting Research Methods in Information Systems* (43-103). Palgrave Macmillan, Cham.
- Artzner, P., Delbaen, F., Eber, J., Heath, D. (1999). Coherent measures of risk. *Mathematical Finance*, 9, 203-228.
- Ashok, K., & Ben-Akiva, M. E. (2002). Estimation and prediction of time-dependent origin-destination flows with a stochastic mapping to path flows and link flows. *Transportation Science*, 36(2), 184-198.
- Axer, S., & Friedrich, B. (2016). A methodology for signal timing estimation based on low frequency floating car data: Analysis of needed sample sizes and influencing factors. *Transportation Research Procedia*, 15, 220-232.
- Αμπουντώλας, Κ. (2009). Βέλτιστος έλεγχος φωτεινής σηματοδότησης μέσω τετραγωνικού προγραμματισμού. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης. Τομέας Επιστήμης Αποφάσεων.

- Bajestani, M. A., Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A. R., & Khoshkhou, G. B. (2009). A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem. *Computers & operations research*, 36(3), 777-794.
- Balaji, P. G., & Srinivasan, D. (2010). Multi-agent system in urban traffic signal control. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 5(4), 43-51.
- Baldi, S., Michailidis, I., Ntampasi, V., Kosmatopoulos, E., Papamichail, I., & Papageorgiou, M. (2017). A simulation-based traffic signal control for congested urban traffic networks. *Transportation Science*.
- Bang, K. L. (1976). Optimal control of isolated traffic signals. *Traffic Engineering and Control*, 17(7), 288-292.
- Barceló, J. (Ed.) (2010). *Fundamentals of traffic simulation*. Vol.145. New York: Springer.
- Barceló, J., Delgado, M., Funes, G., García, D., Torday, A. (2007). An on-line approach based on microscopic traffic simulation to assist real time traffic management. In *14th World Congress on ITS*, Beijing.
- Barnes, J., (1984). *Flexible control*. Institute of Electrical Engineers, Conference on Road Traffic Signalling (Publication No 207). IEE, London.
- Baskan, O., & Haldenbilen, S. (2011). Ant colony optimization approach for optimizing traffic signal timings. In: *Ant colony optimization-methods and applications*, 205-220.
- Bawa, V. S. & Lindenberg, E. B. (1977). Capital market equilibrium in a mean-lower partial moment framework. *Journal of Financial Economics*, 5(2), 189-200.
- Bawa, V. S. (1975). Optimal rules for ordering uncertain prospects. *Journal of Financial Economics*, 2(1), 95-121.
- Beausoleil, R. P. (2006). "MOSS" multiobjective scatter search applied to non-linear multiple criteria optimization. *European Journal of Operational Research*, 169(2), 426-449.
- Ben-Akiva, M. & Bierlaire, M. (1999). Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. In: Hall RW (ed) *Handbook of Transportation science*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.
- Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N., Toledo, T., Yang, Q., Choudhury, C. F., Antoniou, C., & Balakrishna, R. (2010). Traffic simulation with MITSIMLab. In *Fundamentals of Traffic Simulation* (233-268). Springer, New York, NY.
- Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N., Walker, J. (2001). DynaMIT-P. Dynamic assignment model system for transportation planning. *Proceedings of the 2001 world conference in transportation research (WCTR)*, Seoul, Korea.
- Benkheris, N., & Ghoul, R. (2013). Simulation and optimization of an isolated intersection with genetic algorithms. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(11).
- Bi, Y., Lu, X., Srinivasan, D., Sun, Z., & Sun, Z. (2017). Optimal Type-2 Fuzzy System For Arterial Traffic Signal Control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, (99), 1-19.
- Bielefeldt, C., & Busch, F. (1994). MOTION: A new on-line model for urban traffic signal control. In: *Proc. 7th IFAC/IFORS Symposium on Transportation Systems: Theory and Applications of Advanced Technology*. Tianjin, China, 603-607.
- Bingham, E. (2001). Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control. *European Journal of Operational Research*, 131(2), 232-241.
- Boginski, V. L., Commander, C. W., & Turko, T. (2009). Polynomial-time identification of robust network flows under uncertain arc failures. *Optimization Letters*, 3(3), 461-473.
- Bonczek, R.H., C.W. Holsapple, Whinston, A.B. (1980). The Evolving Roles of Models in Decision Support Systems. *Decision Science*, 11(2), 337-356.
- Boto-Giralda, D., Díaz-Pernas, F. J., González-Ortega, D., Díez-Higuera, J. F., Antón-Rodríguez, M., Martínez-Zarzuela, M., Torre-Díez, I. (2010). Wavelet-based denoising for traffic volume time series forecasting with self-organizing neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(7), 530-545.

- Buckholz, J., & Courage, K. (2008). Microscopic and macroscopic approaches to delay estimation with oversaturated conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2071), 52-62.
- Burghout, W., Koutsopoulos, H.N., Andreasson, I. (2006). A discrete-event mesoscopic traffic simulation model for hybrid traffic simulation. *Proceedings of the IEEE ITSC*, 2006.
- Cabezas, X., & García, S. (2018). A Heuristic Algorithm for Traffic Light Synchronization Based on the MAXBAND Model. arXiv preprint arXiv:1805.03982.
- Caliper (2018a). TransCAD. <https://www.caliper.com/tcovu.htm>. Accessed August 18, 2018.
- Caliper (2018b). TransDNA. <https://www.caliper.com/transdna/transdna-dta-software.htm>. Accessed August 18, 2018.
- Caliper (2018c). TransModeler. <https://www.caliper.com/transmodeler/default.htm>. Accessed August 18, 2018.
- Cantarella, G.E., Cascetta, E. (1995). Dynamic processes and equilibrium in transportation networks: towards a unifying theory. *Transportation Science*, 29(4), 1995, 305-329.
- Casas, J., Torday, A., Perarnau, J., Breen, M., de Villa, A.R. (2014). Decision Support Systems (DSS) for traffic management assessment: Notes on current methodology and future requirements for the implementation of a DSS. *Transport Research Arena*.
- Cavazzuti, M. (2012). Optimization methods: from theory to design scientific and technological aspects in mechanics. Springer Science & Business Media.
- Ceylan, H. (2006). Developing combined genetic algorithm—Hill-climbing optimization method for area traffic control. *Journal of Transportation Engineering*, 132(8), 663-671.
- Ceylan, H. (2013). Optimal design of signal controlled road networks using differential evolution optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
- Ceylan, H., & Bell, M. G. (2004a). Sensitivity analysis on stochastic equilibrium transportation networks using genetic algorithm. *Journal of advanced transportation*, 38(3), 291-321.
- Ceylan, H., & Bell, M. G. (2004b). Traffic signal timing optimisation based on genetic algorithm approach, including drivers' routing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(4), 329-342.
- Ceylan, H., & Ceylan, H. (2012). A hybrid harmony search and TRANSYT hill climbing algorithm for signalized stochastic equilibrium transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 25, 152-167.
- Chang, E. (1996). Guidelines for actuated controllers in coordinated systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1554), 61-73.
- Chang, E. C., Cohen, S. L., Liu, C., Chaudhary, N. A., & Messer, C. (1988). MAXBAND-86: Program for optimizing left-turn phase sequence in multiarterial closed networks. *Transportation Research Record*, (1181).
- Chang, H., Baek, S., Kim, H., Shah, A.A., Lee, J.D., Mahalik, N.P. (2007). Development of distributed real-time decision support system for traffic management centers using microscopic CA model. *Iranian Journal of Science and Technology*, 31(B2), 155.
- Chang, T. H., & Lin, J. T. (2000). Optimal signal timing for an oversaturated intersection. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(6), 471-491.
- Chang, T. H., & Sun, G. Y. (2004). Modeling and optimization of an oversaturated signalized network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(8), 687-707.
- Chanloha, P., Usaha, W., Chinrungrueng, J., & Aswakul, C. (2012). Performance comparison between queueing theoretical optimality and q-learning approach for intersection traffic signal control. In *Computational Intelligence, Modelling and Simulation (CIMSIM)*, 2012 Fourth International Conference on (pp. 172-177). IEEE.
- Charlesworth, J.A. (1977). The Calculation of mutually consistent signal settings and traffic assignment for a signal controlled network. *Proceedings: 7th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Kyoto, Japan.

- Chaudhary, N. A., & Messer, C. J. (1993). Passer IV: A program for optimizing signal timing in grid networks. 72th Annual Meeting Transportation Research Board.
- Chen, A. & Zhou, Z. (2010). The α -reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(4), 493-513.
- Chen, A., Zhou, Z., Lam, W.H. (2011). Modeling stochastic perception error in the mean-excess traffic equilibrium model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(10), 1619-1640.
- Chen, S., & Sun, D. J. (2016). An improved adaptive signal control method for isolated signalized intersection based on dynamic programming. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 8(4), 4-14.
- Chen, X. F., & Shi, Z. K. (2002). Real-coded genetic algorithm for signal timing optimization of a single intersection. In *Machine Learning and Cybernetics, 2002. Proceedings. 2002 International Conference on* (Vol. 3, pp. 1245-1248). IEEE.
- Chen, X., Osorio, C., & Santos, B. F. (2013). Travel time reliability in signal control problem: Simulation-based optimization approach (No. 13-2716).
- Chen, Y., Mahmassani, H.S., Hong, Z., Hou, T., Kim, J., Halat, H., Alfelor, R.M. (2015). Online implementation and evaluation of weather-responsive coordinated signal timing operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2488, 71-86.
- Chen, Y., van Zuylen, H. J., van der Hoeven, W. (2010). A Large-scale Urban Traffic Decision Support System with Dynamic Traffic Assignment. In *Proceedings of International Workshop on Dynamic Traffic Assignment*, Leuven.
- Chiou, S. W. (1999). Optimization of area traffic control for equilibrium network flows. *Transportation Science*, 33(3), 279-289.
- Chiou, S. W. (2003). TRANSYT Derivatives for Area Traffic Control Optimisation with Network Equilibrium Flows. *Journal of Transportation Research part B*, 37(3), 263-290.
- Chiou, S. W. (2005). Join optimization for area traffic control and network flow. *Computers and Operations Research*, 32(11), 2821-2841.
- Chiou, S. W. (2008). A non-smooth model for signalized road network design problems. *Applied Mathematical Modelling*, 32(7), 1179-1190.
- Chiou, S. W. (2009a). An efficient algorithm for optimal design of area traffic control with network flows. *Applied Mathematical Modelling*, 33(6), 2710-2722.
- Chiou, S. W. (2009b). Simultaneously optimizing link tolls and signal settings in a road network. *Applied Mathematical Modelling*, 33(5), 2311-2323.
- Chiou, S. W. (2014). Optimization of robust area traffic control with equilibrium flow under demand uncertainty. *Computers & Operations Research*, 41, 399-411.
- Chiou, S. W. (2015a). A bi-level decision support system for uncertain network design with equilibrium flow. *Decision Support Systems*, 69 50-58.
- Chiou, S. W. (2015b). Vulnerability Analysis of a Signal-Controlled Road Network for Equilibrium Flow. In *Advanced Business Analytics* (109-142). Springer, Cham.
- Chiou, S. W. (2016). A robust urban traffic network design with signal settings. *Information Sciences*, 334, 144-160.
- Chiou, S. W. (2017a). A risk-averse signal setting policy for regulating hazardous material transportation under uncertain travel demand. *Transportation research part D: transport and environment*, 50, 446-472.
- Chiou, S. W. (2017b). Robust stochastic design of signal-controlled road network under uncertain travel demands. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(7), 3152-3164.
- Chiou, S. W. (2018). A robust signal control system for equilibrium flow under uncertain travel demand and traffic delay. *Automatica*, 96, 240-252.

- Chiou, Y. C., & Huang, Y. F. (2012). Stepwise genetic fuzzy logic signal control under mixed traffic conditions. *Journal of advanced transportation*, 47(1), 43-60.
- Chiu, Y.-C., Bottom, J., Mahut, M., Paz, A., Balakrishna, R., Waller, T., Hicks, J. (2011). *Dynamic Traffic Assignment: A Primer*. Transportation Research Circular E-C153. Publication Transportation Research Board, Transportation Network Modeling Committee.
- Chiu, Y.-C., Nava, E. (2018). DynusT. <http://dynust.net/>. Accessed March 4, 2018.
- Choy, M.C., Srinivasan, D., Cheu, R.L. (2003). Cooperative, hybrid agent architecture for real-time traffic control. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, A33(5), 597-607.
- Christofa, E., Ampountolas, K., & Skabardonis, A. (2016). Arterial traffic signal optimization: A person-based approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, 27-47.
- Chunlin, D. & Liu, Y. (2012). Sample Average Approximation Method for Chance Constrained Stochastic Programming in Transportation Model of Emergency Management. *Systems Engineering Procedia*, 5, 137-143.
- Cipriani, E., & Fusco, G. (2004). Combined signal setting design and traffic assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 155(3), 569-583.
- Citilabs (2018a). Cube Avenue. <http://www.citilabs.com/software/cube/cube-avenue/>. Accessed August 18, 2018.
- Citilabs (2018b). Cube Dynasim. <http://www.citilabs.com/software/cube/cube-dynasim/>. Accessed August 18, 2018.
- Citilabs (2018c). Cube Voyager. <http://www.citilabs.com/software/cube/cube-voyager/>. Accessed August 18, 2018.
- Coello, C. C. (2006). Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(1), 28-36.
- Cohen, S. L. (1983). Concurrent use of MAXBAND and TRANSYT signal timing programs for arterial signal optimization (No. 906).
- Cohen, S. L., & Liu, C. C. (1986). The bandwidth-constrained TRANSYT signal optimization program. *Transportation Research Record*, 1057, 1-7.
- Comert, G., Cetin, M., & Nichols, A. P. (2009). Incorporating queue length measurements into actuated signal control: evaluation of efficiency benefits at an intersection. *The 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, No. 09-2566.
- Courtney, J.F. (2001). Decision Making and Knowledge Management in Inquiring Organizations: Towards a New Decision-Making Paradigm for Decision Support System. *Decision Support System*, 31(1), 17-38.
- Crosby, J.L. (1973). *Computer Simulation in Genetics*. London: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-18880-8.
- Cuena, J., Hernandez, J., Molina, M. (1995). Knowledge-based models for adaptive traffic management systems. *Transportation Research C* 3(5), 311-337.
- D'Ignazio, J., Hallowell, M. R, Molenaar, K.R (2011). Executive Strategies for Risk Management by State Departments of Transportation NCHRP 20-24(74) Report, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- Daganzo, C.E. (1994). The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B*, vol. 28B, No.4, 269-287.
- Dahal, K., Almejalli, K., Hossain, M.A. (2013). Decision support for coordinated road traffic control actions. *Decision Support Systems*, 54(2), 962-975.
- Damjanovic, I.D., Wimsatt, A.J., Butenko, S.I., Seyedshohadaie, R. (2008). Impact of Reconstruction Strategies on System Performance Measures: Maximizing Safety and Mobility While Minimizing Life-Cycle Costs. University Transportation Center for Mobility, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, No. UTCM# 07-04.

- De Nunzio, G., Gomes, G., de Wit, C. C., Horowitz, R., & Moulin, P. (2015). Arterial bandwidth maximization via signal offsets and variable speed limits control. In *Decision and Control (CDC), 2015 IEEE 54th Annual Conference on* (pp. 5142-5148). IEEE.
- De Schutter, B. (2002). Optimizing acyclic traffic signal switching sequences through an extended linear complementarity problem formulation. *European Journal of Operational Research*, 139(2), 400-415.
- De Schutter, B., Hoogendoorn, S. P., Schuurman, H., Stramigioli, S. (2003). A multi-agent case-based traffic control scenario evaluation system. In *Intelligent Transportation Systems Proceedings IEEE*, Vol. 1, 678-683.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- Delbaen, F. (2002). Coherent risk measures on general probability spaces. *Advances in Finance and Stochastics*, 1-37.
- Dell'Olmo, P., & Mirchandani, P.B. (1995). REALBAND: An approach for real-time coordination of traffic flows on networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1494), 106-116.
- Dell'Orco, M., Başkan, Ö., & Marinelli, M. (2014). Artificial bee colony-based algorithm for optimising traffic signal timings. In *Soft Computing in Industrial Applications* (327-337). Springer, Cham.
- Dell'Orco, M., Baskan, O., & Marinelli, M. (2013). A Harmony Search Algorithm approach for optimizing traffic signal timings. *PROMET-Traffic&Transportation*, 25(4), 349-358.
- Di Gangi, M. (2011). Modeling evacuation of a transport system: Application of a multimodal mesoscopic dynamic traffic assignment model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4), 1157-1166.
- Di Gangi, M., Cantarella, G. E., Di Pace, R., & Memoli, S. (2016). Network traffic control based on a mesoscopic dynamic flow model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, 3-26.
- Diakaki, C. (1999). Integrated control of traffic flow in corridor road networks. Ph.D. thesis, Technical University of Crete, Chania, Greece.
- Diakaki, C., Dinopoulou, V., Aboudolas, K., Papageorgiou, M., Ben-Shabat, E., Seider, E., Leibov, A. (2003). Extensions and new applications of the traffic-responsive urban control strategy: Coordinated signal control for urban networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1856), 202-211.
- Diakaki, C., Papageorgiou, M., Aboudolas, K. (2002). A multivariable regulator approach to traffic responsive network-wide signal control. *Control Engineering Practice* 10, 183-195.
- Dijkstra, E.W. (1959). A Note on Two Problems in Connection with Graphs. *Numerische Mathematic*, 1, 269-271.
- Dion, F., & Skabardonis, A. (2015). San Diego I-15 Demonstration Integrated Corridor Management System: PATH Report on Stage 3: Site Demonstration and Evaluation. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology.
- Dion, F., Rakha, H., Kang, Y. S. (2004). Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(2), 99-122.
- Djukic, T., Flötteröd, G., Van Lint, H., Hoogendoorn, S. (2012). Efficient real time OD matrix estimation based on Principal Component Analysis. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on* (115-121). IEEE.
- Dong, C., Huang, S., & Liu, X. (2011, September). Comparative study of several intelligent optimization algorithms for traffic control applications. In *Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on* (pp. 4219-4223). IEEE.

- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29-41.
- Dowd, K., Blake, D. (2006). After VaR: The theory, estimation and insurance applications of quantile-based risk measures. *Journal of Risk and Insurance*, 73(2), 193-229.
- Dunkel, J., Fernández, A., Ortiz, R., Ossowski, S. (2011). Event-driven architecture for decision support in traffic management systems. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6530-6539.
- Elam, J.J., Henderson, J.C., Keen, P.G.W., Konsynski, B.R. (1986). A Vision for DSS Research. *MIS Quarterly*.
- Elliott, R.J. & Kopp, P.E. (2005). *Mathematics of Financial Market*, 2nd Edition. Springer, USA.
- El-Tantawy, S., & Abdulhai, B. (2010). An agent-based learning towards decentralized and coordinated traffic signal control. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on* (pp. 665-670). IEEE.
- European Commission (2017). EUROPE ON THE MOVE - An agenda for a socially fair transition towards clean, competitive and connected mobility for all. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels.
- European Commission (2018). Hours spent in road congestion annually. https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/energy-union-innovation/road-congestion_en. Accessed September 23, 2018.
- Fabozzi, F.J., Kolm, P.N., Pachamanova, D.A., Focardi, S.M. (2007). *Robust Portfolio Optimization and Management*. John Wiley & Sons.
- Faghih-Roohi, S., Ong, Y.-S., Asian, S., Zhang, A.N. (2016). Dynamic Conditional Value-at-Risk model for routing and scheduling of hazardous material transportation networks. *Annals of Operations Research*, 247, 715-734. doi: 10.1007/s10479-015-1909-2.
- Farges, J. L., Henry, J. J., Tufal, J. (1983). The PRODYN real-time traffic algorithm. In: *Proc. 4th IFAC Symposium on Transportation Systems*. Baden-Baden, Germany, 307-312.
- FHWA (2008). Concept of Operations for the I-15 Corridor in San Diego, California. Document FHWA-JPO-08-009, ITS Joint Program Office, Research and Innovative Technology Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Filippi, C., Guastaroba, G., Speranza, M.G. (2017) Applications of Conditional Value-at-Risk Beyond Finance: A Literature Review. Working Paper.
- Fishburn, P. C. (1977). Mean-risk analysis with risk associated with below-target returns. *The American Economic Review*, 67(2), 116-125.
- Florian, M., Mahut, M., & Tremblay, N. (2002). Application of a Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment Model. Presented at the International Symposium on Transport Simulation, Yokohama.
- Florian, M., Mahut, M., Tremblay, N. (2008). Application of a Simulated - Based Dynamic Traffic Assignment Model. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 2008, 1381-1392.
- Foraste, B., & Scemama, G. (1987). An expert System approach to congestion. *INRETS Recherche Transports Securite English Issue*, 2, 35-40.
- Foy, M. D., Benekohal, R. F., & Goldberg, D. E. (1992). Signal timing determination using genetic algorithms. *Transportation Research Record*, 1365.
- Fraser, A., & Burnell, D. (1970). *Computer Models in Genetics*. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-021904-4.
- Friesz, T. L., Cho, H. J., Mehta, N. J., Tobin, R. L., & Anandalingam, G. (1992). A simulated annealing approach to the network design problem with variational inequality constraints. *Transportation Science*, 26(1), 18-26.

- Friesz, T. L., D. Bernstein, Stough, R.. (1996). Dynamic Systems, Variational Inequalities and Control Theoretic Models for Predicting Urban Network Flows. *Transportation Science*, Vol. 30, No. 1, 14–31.
- Friesz, T.L., Bernstein, D., Mehta, N.J., Tobin R.L., Ganjalizadeh, S. (1994). Day-to-day dynamic network disequilibria and idealized traveller information systems. *Operations Research*, 42(6), 1120-1136.
- Gallo, M., D’Acierno, L., & Montella, B. (2010). A meta-heuristic approach for solving the urban network design problem. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 144-157.
- Gallo, M., D’Acierno, L., & Montella, B. (2014). Global Optimisation of Signal Settings: meta-heuristic algorithms for solving real-scale problems. In *Computer-based Modelling and Optimization in Transportation* (177-193). Springer, Cham.
- Gao, J. Z., Yuan, J. F., & Zou, Z. Y. (2014). A semi-fuzzy logic signal optimization model of an isolated oversaturated intersection. In *Advanced Materials Research* (Vol. 905, pp. 481-486). Trans Tech Publications.
- Gao, K., Zhang, Y., Sadollah, A., Lentzakis, A., & Su, R. (2017). Jaya, harmony search and water cycle algorithms for solving large-scale real-life urban traffic light scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 37, 58-72.
- Gao, K., Zhang, Y., Su, R., & Lentzakis, A. (2016). Discrete harmony search algorithm for solving urban traffic light scheduling problem. In *American Control Conference (ACC)*, 2016 (6239-6244). IEEE.
- Gao, K., Zhang, Y., Zhang, Y., Su, R., & Suganthan, P. N. (2018). Meta-Heuristics for Bi-Objective Urban Traffic Light Scheduling Problems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- García-Nieto, J., Alba, E., & Olivera, A. C. (2012). Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2), 274-283.
- Gartner, N. H. (1983). OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (906), 75-84.
- Gartner, N. H., Assmann, S. F., Lasaga, F., & Hous, D. L. (1990). MULTIBAND--a variable-bandwidth arterial progression scheme. *Transportation Research Record*, (1287).
- Gartner, N. H., Tarnoff, P., Andrews, C. (1991). Evaluation of optimized policies for adaptive control strategy. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1324), 105–114.
- Gartner, N.H. (1987). Simulation study of OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal control. In Gartner N.H. and Wilson N.H.M. (eds.), *Transportation and Traffic Theory* (233-250). New York: Elsevier Science Publishing Company.
- Gartner, N.H., & Stamatiadis, C. (1997). Integration of dynamic traffic assignment with real-time adaptive control. 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C.
- Gazis, D., & Potts, R. (1963). The oversaturated intersection. In *Proceedings of the second international symposium on the theory of traffic flow* (pp. 221–237). London.
- Gazis, D.C. (1964). Optimum control of a system of oversaturated intersections. *Operations Research*, 12(6), 815-831.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *simulation*, 76(2), 60-68.
- Ghali, M.O., Smith, M.J. (1993). Traffic assignment, traffic control and road pricing. In Daganzo (ed.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 147-170. California.

- Girianna, M., & Benekohal, R. (2002). Dynamic signal coordination for networks with oversaturated intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1811), 122-130.
- Glover, F. (1998). A template for scatter search and path relinking. *Lecture notes in computer science*, 1363, 13-54.
- Glover, F., & Laguna, M. (1998). Tabu search. In *Handbook of combinatorial optimization* (2093-2229). Springer, Boston, MA.
- Glover, F., Laguna, M., Marti, R. (2000). Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking. *Control and Cybernetics*, 29 (3), 653-684.
- Gorry, G. A., & Scott Morton, M. S. (1971). A framework for information systems. *Sloan Management Review*, 13(1), 56-79.
- Gu, H. Z., & Wang, W. (1998). A global optimization simulated annealing algorithm for intersection signal timing. *Journal of southeast university*, 28(3), 68-72.
- Guardabassi, G., Locatelli, A., & Papageorgiou, M. (1984). A note on the optimal control of an oversaturated intersection. *Transportation Research Part B: Methodological*, 18(2), 111-113.
- Haag, S., Cummings, M., McCubbrey, D.J. (2004). *Management information systems for the information age*, Fourth Edition. NY: McGraw Hill/ Irwin.
- Haddad, J., De Schutter, B., Mahalel, D., Gutman, P. O. (2009). Steady-state and N-stages control for isolated controlled intersections. In *Proceedings of the 2009 American control conference* (2843-2848). St. Louis, MO, USA.
- Hadi, M. A., & Wallace, C. E. (1993). Hybrid genetic algorithm to optimize signal phasing and timing. *Transportation Research Record*, 1421.
- Hadi, M. A., & Wallace, C. E. (1994). Optimization of signal phasing and timing using cauchy simulated annealing. *Transportation Research Record*, 1456.
- Hale, D. K., Antoniou, C., Park, B. B., Ma, J., Zhang, L., & Paz, A. (2017). Revisiting the application of simultaneous perturbation stochastic approximation towards signal timing optimization. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 1-11.
- Hale, D. K., Park, B. B., Stevanovic, A., Su, P., Ma, J. (2015). Optimality versus run time for isolated signalized intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 191-202.
- Hallworth, M. S. (1980). High-performance signal controllers. *Traffic Engineering and Control*, 21(5), 242-248.
- Han, B. (1996). Optimising traffic signal settings for periods of time-varying demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 30(3), 207-230.
- Han, K., Gayah, V. V., Piccoli, B., Friesz, T. L., & Yao, T. (2014). On the continuum approximation of the on-and-off signal control on dynamic traffic networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 61, 73-97.
- Han, K., Liu, H., Gayah, V. V., Friesz, T. L., & Yao, T. (2016). A robust optimization approach for dynamic traffic signal control with emission considerations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 70, 3-26.
- Han, K., Sun, Y., Liu, H., Friesz, T. L., & Yao, T. (2015). A bi-level model of dynamic traffic signal control with continuum approximation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 409-431.
- Han, L. D., & May, A. D. (1989). Automatic detection of traffic operational problems on urban arterials. *Research Report UCB-ITS-RR-89-15*, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, CA.
- Han, L. D., & May, A. D. (1990). Artificial intelligence approaches for urban network incident detection and control. In *Traffic Control Methods. Proceedings Of The Fifth Ng Foundation Conference*, Santa Barbara, California.

- Hao, W., Ma, C., Moghimi, B., Fan, Y., & Gao, Z. (2018). Robust Optimization of Signal Control Parameters for Unsaturated Intersection Based on Tabu Search-Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE Access*.
- Hasan, M.K. (2010). A framework for intelligent decision support system for traffic congestion management system. *Engineering*, 2(4), 270-289.
- Hashemi, H. & Abdelghany, K.F. (2016). Real-time traffic network state estimation and prediction with decision support capabilities: Application to integrated corridor management. *Transportation Research Part C*, 73, 128-146.
- He, J., & Hou, Z. (2012). Ant colony algorithm for traffic signal timing optimization. *Advances in Engineering Software*, 43(1), 14-18.
- He, Q., Head, K. L., & Ding, J. (2014). Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 65-82.
- Head, L., Gettman, D., & Wei, Z. (2006). Decision model for priority control of traffic signals. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1978), 169-177.
- Hegyi, A., De Schutter, B., Hoogendoorn, S.P., Babuska, R., van Zuylen, H. (2000). Fuzzy decision support system for traffic control centers. *Proceedings of the European Symposium on Intelligent Techniques*, 389-395.
- Heydecker, B. (1987). Uncertainty and variability in traffic signal calculations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 21(1), 79-85.
- Highways Agency (1996). *Design Manual for Roads and Bridges*, Volume 12, Section 2. UK.
- Holsapple, C. W. (2008). DSS architecture and types. In *Handbook on Decision Support Systems 1* (163-189). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hong, Y. S., Kim, J., Kwangson, J., & Park, C. (1999). Estimation of optimal green time simulation using fuzzy neural network. In *Fuzzy Systems Conference Proceedings, 1999. FUZZ-IEEE'99. 1999 IEEE International* (Vol. 2, 761-766). IEEE.
- Hoogendoorn, S.P., De Schutter, B., Schuurman, H. (2003). Decision support in dynamic traffic management. Real-time scenario evaluation. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 3(1):21-38.
- Hooke, R., & Jeeves, T. A. (1961). Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 8(2), 212-229.
- Horni, A., Nagel, K., Axhausen, K.W. (Eds.) (2016). *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London: Ubiquity Press.
- Hosseini, S.D. & Verma, M. (2018). Conditional value-at-risk (CVaR) methodology to optimal train configuration and routing of rail hazmat shipments. *Transportation Research Part B: Methodological*, 110, 79-103.
- Hu, T. Y., & Chen, L. W. (2012). Traffic signal optimization with greedy randomized tabu search algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 138(8), 1040-1050.
- Hunt, P. B., Robertson, D. I., Bretherton, R. D., Royle, M. C. (1982). The SCOOT on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Engineering and Control* 23, 190-192.
- Improta, G., & Cantarella, G. E. (1984). Control system design for an individual signalized junction. *Transportation Research Part B: Methodological*, 18(2), 147-167.
- INRO (2018). Emme. <https://www.inrosoftware.com/en/products/emme/>. Accessed August 18, 2018.
- Institute of Risk Management, IRM (2002). *A Risk Management Standard*. Institute of Risk Management. London, UK.
- Ioslovich, I., Haddad, J., Gutman, P. O., & Mahalel, D. (2011). Optimal traffic control synthesis for an isolated intersection. *Control Engineering Practice*, 19(8), 900-911.

- ISO (2009). ISO/IEC Guide 73:2009 Risk management — Vocabulary – Guidelines. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- Isukapati, I. K., & List, G. F. (2015). Agent based framework for modeling operations at isolated signalized intersections. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on (2900-2906)*. IEEE.
- Janson, B. N. (1991). Dynamic Assignment for Urban Road Networks. *Transportation Research B*, Vol. 25 (2/3), 143-161.
- Jin, J., & Ma, X. (2017). A group-based traffic signal control with adaptive learning ability. *Engineering applications of artificial intelligence*, 65, 282-293.
- Jin, J., Ma, X., & Kosonen, I. (2017). A stochastic optimization framework for road traffic controls based on evolutionary algorithms and traffic simulation. *Advances in Engineering Software*, 114, 348-360.
- Jovanis, P. P., & Gregor, J. A. (1986). Coordination of actuated arterial traffic signal systems. *Journal of Transportation Engineering*, 112(4), 416-432.
- Jovanović, A. D., & Kukić, K. S. (2017). Controlling an isolated oversaturated intersection in real time. *Military Technical Courier*, 65(4), 866-881.
- Jovanović, A., & Teodorović, D. (2017). Pre-timed control for an under-saturated and oversaturated isolated intersection: a Bee Colony Optimization approach. *Transportation Planning and Technology*, 40(5), 556-576.
- Jovanović, A., Nikolić, M., & Teodorović, D. (2017). Area-wide urban traffic control: A Bee Colony Optimization approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 329-350.
- Karimi, A., & Gupta, A. (1993). Incident management system for the Santa Monica smart corridor. *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers*, 180-185.
- Karoonsoontawong, A., & Waller, S. T. (2009). Application of reactive tabu search for combined dynamic user equilibrium and traffic signal optimization problem. *Transportation Research Record*, 2090(1), 29-41.
- Karoonsoontawong, A., & Waller, S. T. (2010). Integrated network capacity expansion and traffic signal optimization problem: robust bi-level dynamic formulation. *Networks and Spatial Economics*, 10(4), 525-550.
- Keen, P.G.W. & Scott Morton, M.S. (1978). *Decision support systems: an organizational perspective*. Reading, Mass., Addison-Wesley Pub. Co.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV*, pages (Vol. 1000).
- Kerkhove, L. P., & Vanhoucke, M. (2017). A parallel multi-objective scatter search for optimising incentive contract design in projects. *European Journal of Operational Research*, 261(3), 1066-1084.
- Kesur, K. B. (2009). Advances in genetic algorithm optimization of traffic signals. *Journal of Transportation Engineering*, 135(4), 160-173.
- Khanjary, M. (2013). Using game theory to optimize traffic light of an intersection. In *Computational Intelligence and Informatics (CINTI), 2013 IEEE 14th International Symposium on (pp. 249-253)*. IEEE.
- Khooban, Z., Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., & Szeto, W. Y. (2015). Mixed network design using hybrid scatter search. *European Journal of Operational Research*, 247(3), 699-710.
- Kim, S., Hajbabaie, A., Williams, B. M., & Rouphail, N. M. (2015). Dynamic Bandwidth Analysis for Coordinated Arterial Streets. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 20(3), 294-310.

- Kim, S., Warchol, S., Schroeder, B. J., & Cunningham, C. (2016). Innovative Method for Remotely Fine-Tuning Offsets Along a Diverging Diamond Interchange Corridor. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2557), 33-43.
- Kirkpatrick, S. (1984). Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. *Journal of statistical physics*, 34(5-6), 975-986.
- Knight, F.H. (2012). *Risk, uncertainty and profit*. Courier Corporation: NY.
- Koehler, E., Strehler, M. (2012). Combining static and dynamic models for traffic signal optimization. 15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation. Paris.
- Köhler, E., & Strehler, M. (2018). Traffic signal optimization: combining static and dynamic models. *Transportation Science*.
- Konno, H. & Yamazaki, H. (1991). Mean-absolute deviation portfolio optimization model and its applications to the Tokyo stock market. *Management Science*, 37 (5), 519-531.
- Koonce, P., Rodegerdts, L., Lee, K., Quayle, S., Beaird, S., Braud, C., Bonneson, J., Tarnoff, P., Urbanik, T. (2015). Traffic signal timing manual (No. FHWA-HOP-08-024). United States. Federal Highway Administration.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., & Bieker, L. (2012). Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4).
- Lai, T.Y. (1991). Portfolio selection with skewness: a multiple-objective approach. *Review of Quantitative Finance and Accounting*, 1(3), 293-305.
- Lan, C. J. (2004). New optimal cycle length formulation for pretimed signals at isolated intersections. *Journal of transportation engineering*, 130(5), 637-647.
- Lee, S., & Wong, S. C. (2017). Group-based approach to predictive delay model based on incremental queue accumulations for adaptive traffic control systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 98, 1-20.
- Lee, S., Wong, S. C., & Varaiya, P. (2017a). Group-based hierarchical adaptive traffic-signal control part I: Formulation. *Transportation research part B: methodological*, 105, 1-18.
- Lee, S., Wong, S. C., & Varaiya, P. (2017b). Group-based hierarchical adaptive traffic-signal control Part II: Implementation. *Transportation research part B: methodological*, 104, 376-397.
- Li, H., & Prevedouros, P. D. (2004). Traffic adaptive control for oversaturated isolated intersections: model development and simulation testing. *Journal of Transportation Engineering*, 130(5), 594-601.
- Li, J. Q. (2011). Discretization modeling, integer programming formulations and dynamic programming algorithms for robust traffic signal timing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 708-719.
- Li, X., & Sun, J. Q. (2018). Signal Multiobjective Optimization for Urban Traffic Network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, (99), 1-9.
- Li, Y., Chow, A. H., & Zhong, R. (2018). Control strategies for dynamic motorway traffic subject to flow uncertainties. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 1-17.
- Li, Y., Wu, R., & Li, W. (2004). The coordination between traffic signal control agents based on q-learning. In *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on* (Vol. 3, pp. 2690-2693). IEEE.
- Li, Z. H., Sun, D., Jin, X. X., Yu, D., Zhang, Z. (2008). Pattern-Based Study on Urban Transportation System States and Properties with Fuzzy Reasoning Methods [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 5, 015.
- Li, Z., & Schonfeld, P. (2015). Hybrid simulated annealing and genetic algorithm for optimizing arterial signal timings under oversaturated traffic conditions. *Journal of advanced transportation*, 49(1), 153-170.

- Lian, A.-P., & Gao, Z.-Y. (2005). Research on Combined Dynamic Traffic Assignment and Signal Control. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 31(5).
- Liang, X., Du, X., Wang, G., & Han, Z. (2018). Deep reinforcement learning for traffic light control in vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, preprint arXiv:1803.11115.
- Linglong, T., Xiaohua, Z., Dunli, H., Yanzhang, S., & Ren, W. (2010). A study of single intersection traffic signal control based on two-player cooperation game model. In *Information Engineering (ICIE), 2010 WASE International Conference on* (Vol. 2, pp. 322-327). IEEE.
- Little, J. D. (1966). The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-Integer Linear Programming. *Operations Research*, Vol. 14, No. 4, 568–594.
- Little, J. D., Kelson, M. D., & Gartner, N. H. (1981). MAXBAND: A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks.
- Liu, C. C. (1988). Bandwidth-constrained delay optimization for signal systems. *ITE Journal*, 58(12), 21-26.
- Liu, H., Han, K., Gayah, V., Friesz, T., & Yao, T. (2015). Data-driven linear decision rule approach for distributionally robust optimization of on-line signal control. *Transportation Research Procedia*, 7, 536-555.
- Liu, H.X., He, X., & He, B. (2007). Method of successive weighted averages (MSWA) and self-regulated averaging schemes for solving stochastic user equilibrium problem. *Networks and Spatial Economics*.
- Liu, R. (2010). Traffic simulation with DRACULA. In *Fundamentals of traffic simulation* (295-322). Springer, New York, NY.
- Liu, R., & Smith, M. (2015). Route choice and traffic signal control: A study of the stability and instability of a new dynamical model of route choice and traffic signal control. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 123-145.
- Liu, Y., & Chang, G. L. (2011). An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage. *Transportation research part C: emerging technologies*, 19(1), 130-144.
- Lo, H. (1999). A Novel Traffic Signal Control Formulation. *Transportation Research, Part A*, Vol. 44, 433–448.
- Lo, H. (2001). A Cell-Based Traffic Control Formulation: Strategies and Benefits of Dynamic Timing Plan. *Transportation Science*, Vol. 35, 148–164.
- Lo, H. (2006). A reliability framework for traffic signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(2), 250-260.
- Lowrie, P. R. (1982). SCATS: The Sydney coordinated adaptive traffic system: Principles, methodology, algorithms. In: *Proc. IEE International Conference on Road Traffic Signalling*. London, UK, 67–70.
- Lu, C. C., Mahmassani, H. S., & Zhou, X. (2009). Equivalent gap function-based reformulation and solution algorithm for the dynamic user equilibrium problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(3), 345-364.
- Lu, J., Gupte, A., Huang, Y. (2018). A mean-risk mixed integer nonlinear program for transportation network protection. *European Journal of Operational Research*, 265(1), 277-289.
- Lu, S., Liu, X., & Dai, S. (2008). Incremental multistep Q-learning for adaptive traffic signal control based on delay minimization strategy. In *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on* (2854-2858). IEEE.
- Lu, T., & Wagner, P. (2014). Sorting Model of Optimization Order in Traffic Signal Planning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2439), 53-61.

- Lučić, P., & Teodorović, D. (2001). Bee System: Modeling Combinatorial Optimization Transportation Engineering Problems by Swarm Intelligence. In Preprints of the TRISTAN IV Triennial Symposium on Transportation Analysis, 441–445. Sao Miguel, Azores Islands.
- Maher, M. (2008). The optimization of signal settings on a signalized roundabout using the cross-entropy method. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(2), 76-85.
- Maher, M. J., Zhang, X., & Van Vliet, D. (2001). A bi-level programming approach for trip matrix estimation and traffic control problems with stochastic user equilibrium link flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(1), 23-40.
- Maher, M., Liu, R., & Ngoduy, D. (2013). Signal optimisation using the cross entropy method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 76-88.
- Maher, M., Liu, R., & Ngoduy, D. (2013). Signal optimisation using the cross entropy method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 76-88.
- Maher, M., Zhang, X. (1999). Algorithms for the solution of the congested trip matrix estimation problem. In Ceder, A. (ed.). *Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Israel. U.K.: Pergamon, Elsevier Science Ltd.
- Mahmassani, H. (2001). Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications. *Networks and Spatial Economics*, vol. 1, 2001, 267-292.
- Mahut, M. (1999a). Speed-maximizing car-following models based on safe stopping rules. *Transportation Research Board*, 78th Annual Meeting.
- Mahut, M. (1999b). Behavioural Car Following Models. Report CRT-99-31. Centre for Research on Transportation. University of Montreal. Montreal, Canada.
- Mahut, M. (2001). A Discrete Flow Model for Dynamic Network Loading, Ph.D. thesis, Department d'IRO and CRI, Université de Montreal.
- Małeck, K., Pietruszka, P., & Iwan, S. (2017). Comparative analysis of selected algorithms in the process of optimization of traffic lights. In *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems* (pp. 497-506). Springer, Cham.
- Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *Journal of Finance*, 7, 77–91.
- Markowitz, H. (1959). *Portfolio selection: Efficient diversification of investments*. New York: John Wiley & Sons.
- Marsini, R., Orgyczak, W., Speranza, M. (2007). Conditional value at risk and related linear programming models for portfolio optimization. *Annals of Operations Research*, 152(1), 227-256.
- Mathworks (2018). Gamultiobj Algorithm. <https://uk.mathworks.com/help/gads/gamultiobj-algorithm.html>. Accessed September 20, 2018.
- Mauro, V., & Di Taranto, C. (1989). UTOPIA. In: *Proc. 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications on Transportations*. Paris, France, 245–252.
- McShane, C. (1999). The Origins and Globalization of Traffic Control Signals. *Journal of Urban History*, Vol. 25, No. 3, 379-404.
- McTrans (2018a) HCS. <https://mctrans.ce.ufl.edu/mct/index.php/hcs/>. Accessed March 4, 2018.
- McTrans (2018b). TSIS-CORSIM. <https://mctrans.ce.ufl.edu/mct/index.php/tsis-corsim/>. Accessed August 18, 2018.
- Mehrabipour, M., & Hajbabaie, A. (2017). A Cell-Based Distributed-Coordinated Approach for Network-Level Signal Timing Optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(7), 599-616.
- Merchant, D.K., Nemhauser, G.L. (1978). A Model and an Algorithm for the Dynamic Traffic Assignment Problem. *Transportation Science*, 12, 183-199.

- Messer, C. J., Whitson, R. H., Dudek, C. L., & Romano, E. J. (1973). A variable-sequence multi-phase progression optimization program (No. 445).
- Michalopoulos, P. G., & Pisharody, V. B. (1981). Derivation of delays based on improved macroscopic traffic models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(5), 299-317.
- Michalopoulos, P. G., & Stephanopoulos, G. (1977a). Oversaturated signal systems with queue length constraints—I: Single intersection. *Transportation Research*, 11(6), 413-421.
- Michalopoulos, P. G., & Stephanopoulos, G. (1977b). Oversaturated signal systems with queue length constraints—II: Systems of intersections. *Transportation Research*, 11(6), 423-428.
- Michalopoulos, P. G., & Stephanopoulos, G. (1978). Optimal control of oversaturated intersections: theoretical and practical considerations. *Traffic Engineering & Control*, 19(5).
- Michalopoulos, P. G., Stephanopoulos, G., & Stephanopoulos, G. (1981). An application of shock wave theory to traffic signal control. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(1), 35-51.
- Miller, A.J. (1965). A computer control system for traffic networks. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow*, Paris, OECD.
- Min, H. (2017). On Signal Timing Optimization in Isolated Intersection Based on the Improved Ant Colony Algorithm. In *International Symposium on Parallel Architecture, Algorithm and Programming* (pp. 439-443). Springer, Singapore.
- Mintzberg, H., D. Raisinghani, Theoret, A. (1976). The Structure of 'Unstructured' Decision Processes. *Administrative science quarterly*, 21, 246-275.
- Mirchandani, P. B., & Zou, N. (2007). Queuing models for analysis of traffic adaptive signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(1), 50-59.
- Mirchandani, P., & Head, L. (1998). RHODES: A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. In: *Third Triennial Symposium on Transportation Analysis*. San Juan, Puerto Rico.
- Mitchell, M. (1999). *An Introduction to Genetic Algorithms*, Massachusetts: MIT Press.
- Mitsakis, E., Salanova, J. M., & Giannopoulos, G. (2011). Combined dynamic traffic assignment and urban traffic control models. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 20, 427-436.
- Moghimi, B., Kalantari, N., Kamga, C., & Mouskos, K. (2018). Simultaneous Optimization of Signal Timing and Capacity Improvement in Urban Transportation Networks Using Simulated Annealing. *arXiv preprint arXiv:1802.01717*.
- Molina, J., Laguna, M., Martí, R., & Caballero, R. (2007). SSPMO: A scatter tabu search procedure for non-linear multiobjective optimization. *INFORMS Journal on Computing*, 19(1), 91-100.
- Molina, M., Hernandez, J., Cuenca, J. (1998). A structure of problem-solving methods for real-time decision support in traffic control. *International Journal of Human Computer Studies* 49(4), 577-600.
- Montazeri-Gh M. & Fotouhi A. (2011). Traffic condition recognition using the k-means clustering method. *Transportation Research Part B*, 18(4), 930-937.
- Morgan, J.T. & Little, J.D. (1964). Synchronizing traffic signals for maximal bandwidth. *Operation Research*, 12(6), 896-912.
- Nakatsuji, T., & Kaku, T. (1991). Development of a self-organizing traffic control system using neural network models. *Transportation Research Record*, 1324, 137-145.
- Nakatsuyama, M., Nagahashi, H., & Nishizuka, N. (1984). Fuzzy logic phase controller for traffic junctions in the one-way arterial road. *IFAC Proceedings Volumes*, 17(2), 2865-2870.
- Nebro, A. J., Luna, F., Alba, E., Dorronsoro, B., Durillo, J. J., & Beham, A. (2008). AbYSS: Adapting scatter search to multiobjective optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(4), 439-457.
- Newell, G.F. (1998). The rolling horizon scheme of traffic signal control. *Transportation Research, Part A*, 32(1), 39-44.

- Ngoduy, D., & Maher, M. (2011). Cross entropy method for a deterministic optimal signalization in an urban network (No. 11-1946).
- Noyan, N. (2012). Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management. *Computers & Operations Research*, 39(3), 541-559.
- Oda, T., Otokita, T., Tsugui, T., & Mashiyama, Y. (1997). Application of simulated annealing to optimization of traffic signal timings. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(8), 733-736.
- Ola, B. O., Omidiora, E. O., & Ganiyu, R. A. (2014). Modeling and Controlling Isolated Intersections using Simulated Annealing Approach. *International Journal of Applied Information Systems*, 2249-0868.
- OptTek (2018). OptQuest. <http://www.opttek.com/products/optquest/>. Accessed September 4, 2018.
- Osawa, R. & Honda, R. (2016). Risk quantification for life-cycle management of infrastructure considering the effect of maintenance behavior. In *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure: Proceedings of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016)*, Delft, The Netherlands, p. 185. CRC Press.
- Ossowski, S., Hernández, J.Z., Belmonte, M.V., Fernández, A., García-Serrano, A., Pérez-de-la-Cruz, J.L., Serrano, J.M., Triguero, F. (2005). Decision support for traffic management based on organisational and communicative multiagent abstractions. *Transportation Research part C*, 13(4), 272-298.
- Ozan, C., Ceylan, H., & Haldenbilen, S. (2014). Solving network design problem with dynamic network loading profiles using modified Reinforcement Learning Method. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, 38-47.
- Palma, A.D., Lefevre, C. (1987). The theory of deterministic and stochastic compartmental models and its applications. In: Bertuglia, C.S., Leonardi, G., Occelli, S., Rabino, G.A., Tadei, R., Wilson, A.G., (Eds.), *Urban Systems: Contemporary Approaches to Modelling*. Croom Helm, Kent, UK, 490±540.
- Papageorgiou, M. (1995). An integrated control approach for traffic corridors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3(1), 19-30.
- Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., & Wang, Y. (2003). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12), 2043-2067.
- Papatzikou, E. & Stathopoulos, A. (2015). An optimization method for sustainable traffic control in urban areas. *Transportation Research Part C*, 55, 179-190.
- Papatzikou, E. & Stathopoulos, A. (2017). Conditional value-at-risk optimization of traffic control at isolated intersection. In: *5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*, 627-632.
- Park, B. B., Roupail, N., & Sacks, J. (2001). Assessment of stochastic signal optimization method using microsimulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1748), 40-45.
- Park, B., & Kamarajugadda, A. (2007). Development and evaluation of a stochastic traffic signal optimization method. *International journal of sustainable transportation*, 1(3), 193-207.
- Park, B., Messer, C., & Urbanik, T. (1999). Traffic signal optimization program for oversaturated conditions: genetic algorithm approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1683), 133-142.
- Peeta, S., & Mahmassani, H. (1995). Multiple user classes real-time traffic assignment for online operations: a rolling horizon solution framework. *Transportation Research Part C*, vol. 3, No.2, 83-98.
- Peeta, S., Ziliaskopoulos, A. (2001). Foundations of Dynamic Traffic Assignment: The Past, the Present and the Future. *Networks and Spatial Economics*, 1, 233-265.
- Peng, L., Wang, M. H., Du, J. P., & Luo, G. (2009). Isolation niches particle swarm optimization applied to traffic lights controlling. In *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009*

- 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on (pp. 3318-3322). IEEE.
- Power, D. J. (2002). Decision support systems: concepts and resources for managers. Greenwood Publishing Group.
- Prashanth, L. A., & Bhatnagar, S. (2011). Reinforcement learning with function approximation for traffic signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(2), 412-421.
- PTV Group (2018a). PTV VISSIM. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>. Accessed August 18, 2018.
- PTV Group (2018b). PTV Visum. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-visum/>. Accessed August 18, 2018.
- Putha, R., Quadrifoglio, L., & Zechman, E. (2012). Comparing ant colony optimization and genetic algorithm approaches for solving traffic signal coordination under oversaturation conditions. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(1), 14-28.
- Qin, L., Yufei, H., & Zhuoqun, W. (2018). Signal Timing Simulation of Single Intersection based on Fuzzy-Genetic Algorithm. In *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation* (pp. 28-32). ACM.
- Qu, G. F., Chen, S. Y., Zhu, Q. B., & Zhang, Y. (2008). Determine traffic signal timing plan with particle swarm optimization. *Journal of Computational Information Systems*, 4(6), 2809-2816.
- Ran, B. & Boyce, D. (1996). Modeling dynamic transportation networks. Springer, Lecture Notes on Transportation, Berlin.
- Ren, H., Liu, H., Long, J., & Gao, Z. (2013). Dynamic user optimal signal design at isolated intersections. *Promet-Traffic & Transportation*, 25(1), 13-22.
- Ribeiro, I. M., & Simões, M. D. L. D. O. (2016). The fully actuated traffic control problem solved by global optimization and complementarity. *Engineering Optimization*, 48(2), 199-212.
- Ribeiro, P. C. M. (1994). Handling traffic fluctuation with fixed-time plans calculated by TRANSYT. *Traffic engineering & control*.
- Ritcher, S. (2007). Traffic light scheduling using policy-gradient reinforcement learning. In *The International Conference on Automated Planning and Scheduling*, ICAPS.
- Ritchie, S. G. (1990). A knowledge-based decision support architecture for advanced traffic management. *Transportation Research A*, 24(1), 27-37.
- Ritchie, S. G., & Prosser, N.A. (1991). Real-Time Expert System Approach to Freeway Incident Management. *Transportation Research Record 1320*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 7-16.
- Robert, J., & Montano, S. (2017). Decision support tool for traffic management centre in an urban environment. In *Proceeding 12th ITS European Congress*, Strasbourg, France.
- Robertson, D. I. (1969). TRANSYT: a traffic network study tool. Ministry of Transport, RRL Report LR253, Crowthorne, Berkshire, United Kingdom.
- Robertson, D. I., & Bretherton, R. D. (1974). Optimum control of an intersection for any known sequence of vehicle arrivals. *Second IFAC/IFIP/IFORS symposium on Traffic Control and Transportation Systems (proceedings)*. Monte Carlo.
- Robillard, P. (1974). Multipath Traffic Assignment with Dynamic Input Flows. *Transportation Research*, 8, 567-573.
- Robinson, E., Motamed, M., Newton, D., Olyai, K., Bedsole, L. K. (2017). Elements of Business Rules and Decision Support Systems within Integrated Corridor Management: Understanding the Intersection of These Three Components (No. FHWA-HOP-17-027).
- Rockafellar, R.T., Uryasev, S. (2000). Optimization of Conditional Value-at-Risk. *Journal of Risk*, 2, 21-42.

- Rockafellar, R.T., Uryasev, S. (2002). Conditional value-at-risk for general loss distributions. *Journal of Banking & Finance*, 26(7), 1443-1471.
- Rorbech, J. (1968). Determining the length of the approach lanes required at signal-controlled intersections on through highways. *Transportation Research/UK/*, 2(3).
- Roughail, N., & Akcelik, R. (1992). Oversaturation delay estimates with consideration of peaking. *Transportation Research Record*, 1365, 71-81.
- Rowe S. E. (1989). Los Angeles' smart corridor project. Engineering Foundation Conference on Traffic Control Methods, Santa Barbara, CA.
- Roy, A. D. (1952). Safety first and the holding of assets. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 431-449.
- Sacco, N. (2014). Robust optimization of intersection capacity. *Transportation Research Procedia*, 3, 1011-1020.
- Schrank, D., Eisale, B., Lomax, T., Bak, J. (2015). 2015 URBAN MOBILITY SCORECARD. Texas A&M Transportation Institute - INRIX, Inc.
- Schwerdtfeger, Th. (1984). DYNEMO: a model for the simulation of traffic flow in motorway networks. *Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Flow Theory*. Lyon France.
- Sen, S., & Head, K. L. (1997). Controlled optimization of phases at an intersection. *Transportation science*, 31(1), 5-17.
- Seyedshohadaie, S.R., Damnjanovic, I., Butenko, S. (2010). Risk-based maintenance and rehabilitation decisions for transportation infrastructure networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(4), 236-248.
- Sheffi, Y., & Powell, W. (1983). Optimal Signal Settings over Transportation Networks. *Journal of Transportation Engineering*, 109(6), 824-839.
- Shiri, M. S., & Maleki, H. R. (2017). Maximum Green Time Settings for Traffic-Actuated Signal Control at Isolated Intersections Using Fuzzy Logic. *International Journal of Fuzzy Systems*, 19(1), 247-256.
- Shoup, G. E., & Bullock, D. (1999). Dynamic offset tuning procedure using travel time data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1683), 84-94.
- Simon, H. A. (1960). The Ford distinguished lectures: Vol. 3. The new science of management decision. New York, NY, US: Harper & Brothers.
- Singh, L., Tripathi, S., & Arora, H. (2009). Time optimization for traffic signal control using genetic algorithm. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2(2), 4.
- Skabardonis, A. (1996). Determination of Timings in Signal Systems with Traffic-Actuated Controllers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1554), 18-26.
- Smith, M. J. (1979). Existence, uniqueness and stability of traffic equilibria. *Transportation Research*, 13B, 295-304.
- Smith, M. J. (1981). The existence of an equilibrium solution to the traffic assignment problem when there are junction iterations. *Transportation Research*, 15B, 443-451.
- Smith, M. J. (1984). The stability of a dynamic model of traffic assignment—an application of a method of Lyapunov. *Transportation Science*, 18(3), 245-252.
- Smith, M. J. (2015). Traffic signal control and route choice: A new assignment and control model which designs signal timings. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 451-473.
- Smith, M. J., & Van Vuren, T. (1993). Traffic equilibrium with responsive traffic control. *Transportation science*, 27(2), 118-132.

- Smith, M., Duncan, G., & Druitt, S. (1995). PARAMICS: microscopic traffic simulation for congestion management. Dynamic Control of Strategic Inter-Urban Road Networks, IEE Colloquium on, IET.
- Sol, H. G., Cees, A. T., de Vries Robbé, P. F. (Eds.). (1987). Expert systems and artificial intelligence in decision support systems: proceedings of the Second Mini Euroconference, Lunteren, The Netherlands, 17–20 November 1985. Springer Science & Business Media.
- Sprague Jr, R. H., & Carlson, E. D. (1982). Building effective decision support systems. Prentice Hall Professional Technical Reference.
- SRA (1991). LHOVRA, A Traffic Signal Control Strategy for Isolated Junctions. Swedish Road Administration SRA (VV) Publication 1991:51E, Sweden.
- Stamatiadis, C., & Gartner, N. (1996). MULTIBAND-96: a program for variable-bandwidth progression optimization of multiarterial traffic networks. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1554), 9-17.
- Stephanopoulos, G., Michalopoulos, P. G., & Stephanopoulos, G. (1979). Modelling and analysis of traffic queue dynamics at signalized intersections. Transportation Research Part A: General, 13(5), 295-307.
- Stevanovic, J., Stevanovic, A., Martin, P. T., & Bauer, T. (2008). Stochastic optimization of traffic control and transit priority settings in VISSIM. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 16(3), 332-349.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. Journal of global optimization, 11(4), 341-359.
- Sun, D., Benekohal, R. F., & Waller, S. T. (2006). Bi-level programming formulation and heuristic solution approach for dynamic traffic signal optimization. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21(5), 321-333.
- Sun, H. & Gao, Z. (2012). Stochastic traffic equilibrium based on travel time robust reliability. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 12(2), 76-84.
- Sun, W., Wang, Y., Yu, G., & Liu, H. X. (2016). Quasi-optimal feedback control for an isolated intersection under oversaturation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 67, 109-130.
- Sundaram, S., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M., Antoniou, C., Balakrishna, R. (2011). Simulation-based dynamic traffic assignment for short-term planning applications. Simulation Modelling Practice and Theory, 19(1), 450-462.
- Talmor, I., & Mahalel, D. (2007). Signal design for an isolated intersection during congestion. Journal of the Operational Research Society, 58(4), 454-466.
- Tan, H. N., Gershwin, S. B., Athans, M. (1979). Hybrid Optimization in Urban Traffic Networks. Laboratory for Information and Decision Systems Technical Report DOT-TSC-RSPA-79-7. The Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Taylor, N. B. (1990). *CONTRAM 5: An enhanced traffic assignment model*, Report RR249. Publication Transport and Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- Teklu, F., Sumalee, A., & Watling, D. (2007). A genetic algorithm approach for optimizing traffic control signals considering routing. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22(1), 31-43.
- Tettamanti, T., Luspay, T., Kulcsár, B., Péni, T., & Varga, I. (2014). Robust control for urban road traffic networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15(1), 385-398.
- Thonhofer, E., Kozek, M., & Jakubek, S. (2017). Dynamic signal optimization for traffic networks. In Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017 IEEE 20th International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- Tian, Z., & Urbanik, T. (2007). System partition technique to improve signal coordination and traffic progression. Journal of Transportation Engineering, 133(2), 119-128.

- TIS Group (2018). TRITONE. <http://tis.unical.it/index.php/development/tritone/>. Accessed August 18, 2018.
- TomTom (2018). TomTom Traffic Index. https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/. Accessed October 14, 2018.
- Tong, Y., Zhao, L., Li, L., Zhang, Y. (2015). Stochastic programming model for oversaturated intersection signal timing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 474-486.
- Toumazis, I., Kwon, C., Batta, R. (2013). Value-at-Risk and Conditional Value-at-Risk minimization for hazardous materials routing. In R. Batta and C. Kwon, editors, *Handbook of OR/MS Models in Hazardous Materials Transportation*, 127-154. Springer, 2013.
- Toumazis, I. & Kwon, C. (2013). Routing hazardous materials on time-dependent networks using Conditional Value-at-Risk. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 37, 73-92.
- Trafficware. (2018). SYNCHR2010. <http://www.trafficware.com/>. Accessed March 4, 2018.
- TRANSIMS. (2018). <http://sourceforge.net/projects/transims/>. Accessed March 4, 2018.
- TRB. (1985). Highway Capacity Manual 1985 (HCM1985). Washington, DC: TRB.
- TRB. (2000). Highway Capacity Manual 2000 (HCM2000). Washington, DC: TRB.
- TRB. (2010). Highway Capacity Manual 2010 (HCM2010). Washington, DC: TRB.
- Turban, E., Aronson, J.E., Liang, T.P. (2005). *Decision Support Systems and Intelligent Systems*, 7th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Ugray, Z., Lasdon, L., Plummer, J., Glover, F., Kelly, J., Martí, R. (2007). Scatter search and local NLP solvers: A multistart framework for global optimization. *INFORMS Journal on Computing*, 19(3), 328-340.
- Ukkusuri, S. V., Han, L., & Doan, K. (2012). Dynamic user equilibrium with a path based cell transmission model for general traffic networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10), 1657-1684.
- Ukkusuri, S. V., Mathew, T. V., & Waller, S. T. (2007). Robust transportation network design under demand uncertainty. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1), 6-18.
- Ukkusuri, S. V., Ramadurai, G., & Patil, G. (2010). A robust transportation signal control problem accounting for traffic dynamics. *Computers & Operations Research*, 37(5), 869-879.
- Ukkusuri, S., Doan, K., & Aziz, H. A. (2013). A bi-level formulation for the combined dynamic equilibrium based traffic signal control. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 80, 729-752.
- Utama, D. N., Zaki, F. A., Munjeri, I. J., Putri, N. U. (2017). FWFA Optimization based Decision Support System for Road Traffic Engineering. In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 801, No. 1, 012016.
- Valdes, D., & Paz, A. (2004). An integration of adaptive traffic control and travel information. In: *Proc. 83rd Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, D.C., U.S.A.
- Van Aerde, M., Yagar, S. (1988a). Dynamic integrated freeway/traffic signal networks: Problems and proposed solutions. *Transportation Research Part A: General*, 22(6), 435-443.
- Van Aerde, M., Yagar, S. (1988b). Dynamic integrated freeway/ traffic signal networks: a routing-based modeling approach. *Transportation Research Part A*, vol. 22A, No.6, 445-453.
- Varia, H. R., & Dhingra, S. L. (2004). Dynamic optimal traffic assignment and signal time optimization using genetic algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19(4), 260-273.
- Varia, H.R., Gundaliya, P.J., Dhingra, S.L. (2013). Application of genetic algorithm for joint optimization of signal setting parameters and dynamic traffic assignment for the real network data. *Research in Transportation Economics*, 38, 35-44.

- Villalobos, I. A., Poznyak, A. S., Tamayo, A. M. (2008). Urban traffic control problem: a game theory approach. In Proceedings of the 17th world congress, the international federation of automatic control. Seoul, Korea.
- Vincent, R.A., & Peirce, J.R. (1988). 'MOVA': Traffic Responsive, Self-optimising Signal Control for Isolated Intersections. Transport and Road Research Laboratory, Research Report No. 170.
- Viti, F., & Van Zuylen, H. J. (2010). A probabilistic model for traffic at actuated control signals. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(3), 299-310.
- Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. (2014). Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 43, 3-19.
- Wan, W., & Chen, F. (2007). Optimal control for isolated intersection signal based on genetic algorithm. *Computer Engineering*, 33(16), 217-219.
- Wang, C. Y., Yen, K. C., Hu, S. R., Chu, C. P., & Jhuang, Y. T. (2017). A Network Signal Timing Design Bilevel Optimization Model with Traveler Trip-Chain Route Choice Behavior Consideration. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 5, 203-216.
- Wang, J., Shang, P., Zhao, X. (2011). A new traffic speed forecasting method based on bi-pattern recognition. *Fluctuation and Noise Letters* 10 (1), 59-75.
- Wang, X. B., Yin, K., & Liu, H. (2018). Vehicle actuated signal performance under general traffic at an isolated intersection. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 582-598.
- Wang, Y., Messmer, A., & Papageorgiou, M. (2001). Freeway network simulation and dynamic traffic assignment with METANET tools. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1776), 178-188.
- Wang, Z., Chen, S., Yang, H., Wu, B., Wang, Y. (2016). Comparison of delay estimation models for signalised intersections using field observations in Shanghai. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(3), 165-174.
- Webster, F.V. (1958). Traffic Signal Settings. Road Research Laboratory Technical Paper No. 39, HMSO, London.
- Wei, R. H., Xu, L. H., Hu, H. G., Yang, X. G. (2011). Traffic signal timing for isolated intersection based on robust optimization model, *Mechatronics*, 17(5), 13-17.
- Wen, K., Qu, S., & Zhang, Y. (2007). A stochastic adaptive control model for isolated intersections. In *Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on* (pp. 2256-2260). IEEE.
- Wen, Y., & Wu, T. (2004). Regional signal coordinated control system based on an ant algorithm. In *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on* (Vol. 6, pp. 5222-5226). IEEE.
- Wiering, M. A. (2000). Multi-agent reinforcement learning for traffic light control. In *Machine Learning: Proceedings of the Seventeenth International Conference (ICML'2000)* (pp. 1151-1158).
- Wiering, M. A., Vreeken, J., Veenen, J., & Koopman, A. (2004). Simulation and optimization of traffic in a city. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'04)*.
- Wong, S. C., Wong, W. T., Leung, C. M., & Tong, C. O. (2002). Group-based optimization of a time-dependent TRANSYT traffic model for area traffic control. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(4), 291-312.
- Wu, J.H., Chen, Y., & Florian, M. (1998a). The Continuous Dynamic Network Loading Problem: A Mathematical Formulation and Solution Method. *Transportation Research B*, Vol. 32 (3), 173-187.

- Wu, J.H., Florian, M., Xu, Y.W., & Rubio-Ardanaz, J.M. (1998b). A projection algorithm for the dynamic network equilibrium problem. *Traffic and Transportation Studies, Proceedings of the ICTTS'98*, (379-390), Ed. By Zhaoxia Yang, Kelvin C.P. Wang and Baohua Mao, ASCE.
- Yagar, S. (1971). Dynamic Traffic Assignment by Individual Path Minimization and Queuing. *Transportation Research*, 5, 179-196.
- Yang, H., & Yagar, S. (1995). Traffic assignment and signal control in saturated road networks. *Transportation Research A*, 29(2), 125-139.
- Yang, M., Bie, Y., & Pei, Y. (2015). A traffic signal control algorithm for an oversaturated isolated intersection based on video detection data. In *CICTP 2015* (pp. 2018-2029).
- Yang, W., Zhang, L., He, Z., Yang, Y., & Fang, Y. (2012). Urban traffic signal two-stage combination fuzzy control and Paramics simulation. In *Systems and Informatics (ICSAI), 2012 International Conference on* (pp. 771-775). IEEE.
- Yang, X. K. (2001). Comparison among computer packages in providing timing plans for Iowa Arterial in Lawrence, Kansas. *Journal of Transportation Engineering*, 127(4), 311-318.
- Yin, Y. (2008). Robust optimal traffic signal timing. *Transportation Research Part B*, 42, 911-924.
- Yin, Y., Li, M., Skabardonis, A. (2007). Offline offset refiner for coordinated actuated signal control systems. *Journal of transportation engineering*, 133(7), 423-432.
- Yu, H., Ma, R., & Zhang, H. M. (2018). Optimal traffic signal control under dynamic user equilibrium and link constraints in a general network. *Transportation research part B: methodological*, 110, 302-325.
- Yun, I., & Park, B. B. (2006). Application of stochastic optimization method for an urban corridor. In *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation* (pp. 1493-1499). Winter Simulation Conference.
- Zhang, G., & Wang, Y. (2011). Optimizing minimum and maximum green time settings for traffic actuated control at isolated intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1), 164-173.
- Zhang, H., & Ritchie, S. G. (1994). Real-time decision-support system for freeway management and control. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 8(1), 35-51.
- Zhang, L. G., Zhong, Y. Y., Li, Z. L., & Chen, Y. Z. (2008). PSO-based optimization for isolated intersections signal timings and simulation. In *Machine Learning and Cybernetics, 2008 International Conference on* (Vol. 2, pp. 993-996). IEEE.
- Zhang, L., & Lou, Y. (2015). Coordination of semi-actuated signals on arterials. *Journal of Advanced Transportation*, 49(2), 228-246.
- Zhang, L., & Yin, Y. (2008). Robust synchronization of actuated signals on arterials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2080), 111-119.
- Zhang, L., Yin, Y., & Chen, S. (2013). Robust signal timing optimization with environmental concerns. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 29, 55-71.
- Zhang, L., Yin, Y., & Lou, Y. (2010). Robust signal timing for arterials under day-to-day demand variations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2192), 156-166.
- Zhang, M. M., Jia, L., Zou, N., & Zhou, L. (2011). Robust optimal traffic signal timing of urban single-point intersection. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 28(1), 107-111.
- Zhang, Y., Song, S., Shen, Z.J.M., Wu, C. (2018). Robust Shortest Path Problem with Distributional Uncertainty. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(4), 1080-1090.
- Zhang, Y., Zhu, H. B., Liu, X. Q., & Chen, X. B. (2017). Optimal control for region of the city traffic signal base on Selective particle swarm optimization algorithm. In *Control Conference (CCC), 2017 36th Chinese* (pp. 2723-2728). IEEE.

- Zhao, J., Jia, L., Chen, Y., & Wang, X. (2006). Urban traffic flow forecasting model of double rbf neural network based on pso. In *Intelligent Systems Design and Applications, 2006. ISDA'06. Sixth International Conference on* (Vol. 1, pp. 892-896). IEEE.
- Zhao, S. & Zhang, K. (2018). A Data-Driven Dynamic Route Choice Model Under Uncertainty Using Connected Vehicle Trajectory Data. 97th Annual Meeting Transportation Research Board, No. 18-04210.
- Zheng, F., van Zuylen, H. J., Liu, X., & Le Vine, S. (2017). Reliability-Based Traffic Signal Control for Urban Arterial Roads. *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, 18(3), 643-655.
- Zhong, R. X., Chen, C., Huang, Y. P., Sumalee, A., Lam, W. H. K., & Xu, D. B. (2017). Robust perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: a control-lyapunov function approach. *Transportation Research Part B: Methodological*.
- Zhou, X., & Mahmassani, H. S. (2007). A structural state space model for real-time traffic origin-destination demand estimation and prediction in a day-to-day learning framework. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(8), 823-840.
- Zhou, X., & Taylor, J. (2014). DTALite: A queue-based mesoscopic traffic simulator for fast model evaluation and calibration. *Cogent Engineering*, 1(1), 961345.
- Ziliaskopoulos, A. K., Waller, S. T. (2000). An Internet-based geographic information system that integrates data, models and users for transportation applications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 8, 427-444.

Παράρτημα Α:

Βιβλιοθήκη συνδυασμών φάσεων

Πίνακας: Βιβλιοθήκη συνδυασμού φάσεων
(Σε κάθε κίνηση αναγράφεται ο αριθμός της φάσης/ των φάσεων που έχει πράσινη ένδειξη)

Αριθμός φάσης	Προς Ανατολή			Προς Δύση			Προς Βορρά			Προς Νότο		
Αριθμός Συνδυασμού												
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
2	1	1	1	1	1	1	2	2,3	2,3	4	3,4	3,4
3	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	2,3	2,3
4	1	1	1	1	1	1	3	2,3	2,3	2	2	2
5	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
6	1	1	1	1	1	1	2	3	3	2	3	3
7	1	1	1	1	1	1	2	3	2,3	2	3	2,3
8	1	1	1	1	1	1	2	3	2,3	2	3	3
9	1	1	1	1	1	1	2	3	3	2	3	2,3
10	1	1	1	1	1	1	2,3	2	2	3,4	4	4
11	1	1	1	1	1	1	2,3	2	2,3	3,4	4	3,4
12	1	1	1	1	1	1	2,3	2	2,3	3,4	4	4
13	1	1	1	1	1	1	2,3	2	2	3,4	4	3,4
14	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4	4	4	4	4	4
15	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4	4,5	4,5	6	5,6	5,6
16	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4	4	4	5	4,5	4,5
17	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	5	4,5	4,5	4	4	4
18	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4	4	4	5	5	5
19	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4	5	5	4	5	5
20	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4	5	4,5	4	5	4,5
21	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4	5	4,5	4	5	5
22	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4	5	5	4	5	4,5
23	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4,5	4	4	5,6	6	6
24	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4,5	4	4,5	5,6	6	5,6
25	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4,5	4	4,5	5,6	6	6
26	1	1,2	1,2	3	2,3	2,3	4,5	4	4	5,6	6	5,6
27	1	1	1	2	1,2	1,2	3	3	3	3	3	3
28	1	1	1	2	1,2	1,2	3	3,4	3,4	5	4,5	4,5
29	1	1	1	2	1,2	1,2	3	3	3	4	3,4	3,4
30	1	1	1	2	1,2	1,2	4	3,4	3,4	3	3	3
31	1	1	1	2	1,2	1,2	3	3	3	4	4	4

Αριθμός φάσης	Προς Ανατολή			Προς Δύση			Προς Βορρά			Προς Νότο		
Αριθμός Συνδυασμού												
32	1	1	1	2	1,2	1,2	3	4	4	3	4	4
33	1	1	1	2	1,2	1,2	3	4	3,4	3	4	3,4
34	1	1	1	2	1,2	1,2	3	4	3,4	3	4	4
35	1	1	1	2	1,2	1,2	3	4	4	3	4	3,4
36	1	1	1	2	1,2	1,2	3,4	3	3	4,5	5	5
37	1	1	1	2	1,2	1,2	3,4	3	3,4	4,5	5	4,5
38	1	1	1	2	1,2	1,2	3,4	3	3,4	4,5	5	5
39	1	1	1	2	1,2	1,2	3,4	3	3	4,5	5	4,5
40	2	1,2	1,2	1	1	1	3	3	3	3	3	3
41	2	1,2	1,2	1	1	1	3	3,4	3,4	5	4,5	4,5
42	2	1,2	1,2	1	1	1	3	3	3	4	3,4	3,4
43	2	1,2	1,2	1	1	1	4	3,4	3,4	3	3	3
44	2	1,2	1,2	1	1	1	3	3	3	4	4	4
45	2	1,2	1,2	1	1	1	3	4	4	3	4	4
46	2	1,2	1,2	1	1	1	3	4	3,4	3	4	3,4
47	2	1,2	1,2	1	1	1	3	4	3,4	3	4	4
48	2	1,2	1,2	1	1	1	3	4	4	3	4	3,4
49	2	1,2	1,2	1	1	1	3,4	3	3	4,5	5	5
50	2	1,2	1,2	1	1	1	3,4	3	3,4	4,5	5	4,5
51	2	1,2	1,2	1	1	1	3,4	3	3,4	4,5	5	5
52	2	1,2	1,2	1	1	1	3,4	3	3	4,5	5	4,5
53	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3
54	1	1	1	2	2	2	3	3,4	3,4	5	4,5	4,5
55	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	3,4	3,4
56	1	1	1	2	2	2	4	3,4	3,4	3	3	3
57	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4
58	1	1	1	2	2	2	3	4	4	3	4	4
59	1	1	1	2	2	2	3	4	3,4	3	4	3,4
60	1	1	1	2	2	2	3	4	3,4	3	4	4
61	1	1	1	2	2	2	3	4	4	3	4	3,4
62	1	1	1	2	2	2	3,4	3	3	4,5	5	5
63	1	1	1	2	2	2	3,4	3	3,4	4,5	5	4,5
64	1	1	1	2	2	2	3,4	3	3,4	4,5	5	5

Αριθμός φάσης	Προς Ανατολή			Προς Δύση			Προς Βορρά			Προς Νότο		
Αριθμός Συνδυασμού												
65	1	1	1	2	2	2	3,4	3	3	4,5	5	4,5
66	1	2	2	1	2	2	3	3	3	3	3	3
67	1	2	2	1	2	2	3	3,4	3,4	5	4,5	4,5
68	1	2	2	1	2	2	3	3	3	4	3,4	3,4
69	1	2	2	1	2	2	4	3,4	3,4	3	3	3
70	1	2	2	1	2	2	3	3	3	4	4	4
71	1	2	2	1	2	2	3	4	4	3	4	4
72	1	2	2	1	2	2	3	4	3,4	3	4	3,4
73	1	2	2	1	2	2	3	4	3,4	3	4	4
74	1	2	2	1	2	2	3	4	4	3	4	3,4
75	1	2	2	1	2	2	3,4	3	3	4,5	5	5
76	1	2	2	1	2	2	3,4	3	3,4	4,5	5	4,5
77	1	2	2	1	2	2	3,4	3	3,4	4,5	5	5
78	1	2	2	1	2	2	3,4	3	3	4,5	5	4,5
79	1	2	1,2	1	2	1,2	3	3	3	3	3	3
80	1	2	1,2	1	2	1,2	3	3,4	3,4	5	4,5	4,5
81	1	2	1,2	1	2	1,2	3	3	3	4	3,4	3,4
82	1	2	1,2	1	2	1,2	4	3,4	3,4	3	3	3
83	1	2	1,2	1	2	1,2	3	3	3	4	4	4
84	1	2	1,2	1	2	1,2	3	4	4	3	4	4
85	1	2	1,2	1	2	1,2	3	4	3,4	3	4	3,4
86	1	2	1,2	1	2	1,2	3	4	3,4	3	4	4
87	1	2	1,2	1	2	1,2	3	4	4	3	4	3,4
88	1	2	1,2	1	2	1,2	3,4	3	3	4,5	5	5
89	1	2	1,2	1	2	1,2	3,4	3	3,4	4,5	5	4,5
90	1	2	1,2	1	2	1,2	3,4	3	3,4	4,5	5	5
91	1	2	1,2	1	2	1,2	3,4	3	3	4,5	5	4,5
92	1	2	1,2	1	2	2	3	3	3	3	3	3
93	1	2	1,2	1	2	2	3	3,4	3,4	5	4,5	4,5
94	1	2	1,2	1	2	2	3	3	3	4	3,4	3,4
95	1	2	1,2	1	2	2	4	3,4	3,4	3	3	3
96	1	2	1,2	1	2	2	3	3	3	4	4	4
97	1	2	1,2	1	2	2	3	4	4	3	4	4

Αριθμός φάσης	Προς Ανατολή			Προς Δύση			Προς Βορρά			Προς Νότο		
Αριθμός Συνδυασμού												
98	1	2	1,2	1	2	2	3	4	3,4	3	4	3,4
99	1	2	1,2	1	2	2	3	4	3,4	3	4	4
100	1	2	1,2	1	2	2	3	4	4	3	4	3,4
101	1	2	1,2	1	2	2	3,4	3	3	4,5	5	5
102	1	2	1,2	1	2	2	3,4	3	3,4	4,5	5	4,5
103	1	2	1,2	1	2	2	3,4	3	3,4	4,5	5	5
104	1	2	1,2	1	2	2	3,4	3	3	4,5	5	4,5
105	1	2	2	1	2	1,2	3	3	3	3	3	3
106	1	2	2	1	2	1,2	3	3,4	3,4	5	4,5	4,5
107	1	2	2	1	2	1,2	3	3	3	4	3,4	3,4
108	1	2	2	1	2	1,2	4	3,4	3,4	3	3	3
109	1	2	2	1	2	1,2	3	3	3	4	4	4
110	1	2	2	1	2	1,2	3	4	4	3	4	4
111	1	2	2	1	2	1,2	3	4	3,4	3	4	3,4
112	1	2	2	1	2	1,2	3	4	3,4	3	4	4
113	1	2	2	1	2	1,2	3	4	4	3	4	3,4
114	1	2	2	1	2	1,2	3,4	3	3	4,5	5	5
115	1	2	2	1	2	1,2	3,4	3	3,4	4,5	5	4,5
116	1	2	2	1	2	1,2	3,4	3	3,4	4,5	5	5
117	1	2	2	1	2	1,2	3,4	3	3	4,5	5	4,5
118	1,2	1	1	2,3	3	3	4	4	4	4	4	4
119	1,2	1	1	2,3	3	3	4	4,5	4,5	6	5,6	5,6
120	1,2	1	1	2,3	3	3	4	4	4	5	4,5	4,5
121	1,2	1	1	2,3	3	3	5	4,5	4,5	4	4	4
122	1,2	1	1	2,3	3	3	4	4	4	5	5	5
123	1,2	1	1	2,3	3	3	4	5	5	4	5	5
124	1,2	1	1	2,3	3	3	4	5	4,5	4	5	4,5
125	1,2	1	1	2,3	3	3	4	5	4,5	4	5	5
126	1,2	1	1	2,3	3	3	4	5	5	4	5	4,5
127	1,2	1	1	2,3	3	3	4,5	4	4	5,6	6	6
128	1,2	1	1	2,3	3	3	4,5	4	4,5	5,6	6	5,6
129	1,2	1	1	2,3	3	3	4,5	4	4,5	5,6	6	6
130	1,2	1	1	2,3	3	3	4,5	4	4	5,6	6	5,6

Αριθμός φάσης	Προς Ανατολή			Προς Δύση			Προς Βορρά			Προς Νότο		
Αριθμός Συνδυασμού												
131	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4	4	4	4	4	4
132	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4	4,5	4,5	6	5,6	5,6
133	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4	4	4	5	4,5	4,5
134	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	5	4,5	4,5	4	4	4
135	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4	4	4	5	5	5
136	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4	5	5	4	5	5
137	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4	5	4,5	4	5	4,5
138	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4	5	4,5	4	5	5
139	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4	5	5	4	5	4,5
140	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4,5	4	4	5,6	6	6
141	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4,5	4	4,5	5,6	6	5,6
142	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4,5	4	4,5	5,6	6	6
143	1,2	1	1,2	2,3	3	2,3	4,5	4	4	5,6	6	5,6
144	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4	4	4	4	4	4
145	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4	4,5	4,5	6	5,6	5,6
146	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4	4	4	5	4,5	4,5
147	1,2	1	1,2	2,3	3	3	5	4,5	4,5	4	4	4
148	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4	4	4	5	5	5
149	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4	5	5	4	5	5
150	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4	5	4,5	4	5	4,5
151	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4	5	4,5	4	5	5
152	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4	5	5	4	5	4,5
153	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4,5	4	4	5,6	6	6
154	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4,5	4	4,5	5,6	6	5,6
155	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4,5	4	4,5	5,6	6	6
156	1,2	1	1,2	2,3	3	3	4,5	4	4	5,6	6	5,6
157	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4	4	4	4	4	4
158	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4	4,5	4,5	6	5,6	5,6
159	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4	4	4	5	4,5	4,5
160	1,2	1	1	2,3	3	2,3	5	4,5	4,5	4	4	4
161	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4	4	4	5	5	5
162	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4	5	5	4	5	5
163	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4	5	4,5	4	5	4,5

Αριθμός φάσης	Προς Ανατολή			Προς Δύση			Προς Βορρά			Προς Νότο		
Αριθμός Συνδυασμού												
164	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4	5	4,5	4	5	5
165	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4	5	5	4	5	4,5
166	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4,5	4	4	5,6	6	6
167	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4,5	4	4,5	5,6	6	5,6
168	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4,5	4	4,5	5,6	6	6
169	1,2	1	1	2,3	3	2,3	4,5	4	4	5,6	6	5,6

Παράρτημα Β:
Ψευδοκώδικας Αλγοριθμικής Διαδικασίας
Βελτιστοποίησης Σηματοδότησης
Συντονισμένου Δικτύου

Στη συνέχεια παρατίθεται ο ψευδοκώδικας της αλγοριθμικής διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου με τη μέθοδο *mGA-CVaR-NSV*.

- Εισαγωγή δεδομένων {φόρτος στρεφουσών κινήσεων, μετακινήσεις δικτύου και καθυστέρηση δικτύου ανά χρονικό βήμα} από τον δυναμικό καταμερισμό στο Aimsun της προηγούμενης επανάληψης
- Εισαγωγή κόμβων προς βελτιστοποίηση και χαρακτηριστικών τους
- Εισαγωγή κινήσεων και διαδρομών προς βελτιστοποίηση συντονισμού διαδρομών
- Εισαγωγή φάσεων σηματοδοτικών προγραμμάτων κόμβων
- Υπολογισμός *CVaR* και μέσης τιμής μέσης καθυστέρησης και συνολικού χρόνου μετακίνησης από τον δυναμικό καταμερισμό στο Aimsun της προηγούμενης επανάληψης
- Υπολογισμός αρχικών τιμών χρόνων πρασίνου βάσει του μέσου κύκλου και της απλοποιημένης διαδικασίας κρίσιμων ροών του Webster για τον συνολικό φόρτο
- Ορισμός αρχικών τιμών χρονικών μετατοπίσεων {μηδενικές τιμές}
- Ανάκληση διαδικασίας βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων
 - ο Αντιστοίχιση κινήσεων στις διαδρομές βελτιστοποίησης
 - ο Ορισμός διαδοχής φάσεων και σχετικών χρονικών μετατοπίσεων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις)
 - ο Υπολογισμός σχετικών χρόνων διαδρομής μεταξύ των κόμβων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις)
 - ο Ορισμός φόρτων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις) ανά χρονικό βήμα
 - ο Υπολογισμός 1^{ης} αντικειμενικής συνάρτησης
 - Εκτίμηση μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα μέσω της HCM2010 μεθοδολογίας διαδοχικών χρονικών βημάτων
 - Προσδιορισμός ομάδων κινήσεων και ομάδων λωρίδων για όλους τους κόμβους
 - Υπολογισμός φόρτου ομάδων κινήσεων για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός φόρτου ομάδων λωρίδων για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός προσαρμοσμένης ροής κορεσμού για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Προσδιορισμός ποσοστού οχημάτων που φθάνει κατά τη διάρκεια του πρασίνου για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Εισαγωγή τιμών χρόνων φάσεων για όλους τους κόμβους
 - Υπολογισμός χωρητικότητας και λόγου φόρτου-χωρητικότητας για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός καθυστέρησης για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός του συνολικού φόρτου όλων των κόμβων ανά χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός της απώλειας σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης της απώλειας σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός *CVaR* μέσης καθυστέρησης όλων των κόμβων
- Υπολογισμός 2^{ης} αντικειμενικής συνάρτησης
 - Εισαγωγή τιμών χρόνων φάσεων για όλους τους κόμβους
 - Εισαγωγή τιμών χρονικών μετατοπίσεων των κόμβων
 - Υπολογισμός σχετικών χρονικών μετατοπίσεων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις)
 - Υπολογισμός χρονικής ζώνης αδιάκοπης διέλευσης οχημάτων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις)
 - Υπολογισμός λόγου χρόνου διακοπτόμενης διέλευσης οχημάτων προς περίοδο

- σηματοδότησης
 - Υπολογισμός αριθμού οχημάτων επί της κάθε κατεύθυνσης της κάθε διαδρομής που διακόπτεται η διέλευσή τους ανά χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός του αριθμού οχημάτων που διακόπτεται η διέλευσή τους επί όλων των κατευθύνσεων όλων των διαδρομών σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός της απώλειας συντονισμού σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης της απώλειας συντονισμού σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός *CVaR* μέσου αριθμού οχημάτων που διακόπτεται η διέλευσή τους
- ο Ορισμός αρχικών τιμών μεταβλητών και περιορισμών προβλήματος
- ο Ανάκληση γενετικού αλγορίθμου πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων (gamultiobj)
- Εξαγωγή μετώπου Pareto
- Κανονικοποίηση μετώπου Pareto
- Εύρεση ελάχιστης τιμής συνάρτησης χρησιμότητας λύσεων του μετώπου Pareto
- Μετασχηματισμός των χρόνων πρασίνων των φάσεων των σηματοδοτούμενων κόμβων και των χρονικών μετατοπίσεων για εισαγωγή στο Aimsun
- Εισαγωγή στο Aimsun των νέων ρυθμίσεων σηματοδότησης
- Πραγματοποίηση δυναμικού μεσοσκοπικού καταμερισμού στο Aimsun
- Εξαγωγή και αποθήκευση αποτελεσμάτων δυναμικού μεσοσκοπικού καταμερισμού από το Aimsun σε βάση δεδομένων

Στη συνέχεια παρατίθεται ο ψευδοκώδικας της αλγοριθμικής διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης σηματοδότησης ελαχιστοποίησης ρίσκου με τη μέθοδο mGA-CVaR-SD.

- Εισαγωγή δεδομένων {φόρτος στρεφουσών κινήσεων, μετακινήσεις δικτύου και καθυστέρηση δικτύου ανά χρονικό βήμα} από τον δυναμικό καταμερισμό στο Aimsun της προηγούμενης επανάληψης
- Εισαγωγή κόμβων προς βελτιστοποίηση και χαρακτηριστικών τους
- Εισαγωγή κινήσεων και διαδρομών προς βελτιστοποίηση συντονισμού διαδρομών
- Εισαγωγή φάσεων σηματοδοτικών προγραμμάτων κόμβων
- Υπολογισμός *CVaR* και μέσης τιμής μέσης καθυστέρησης και συνολικού χρόνου μετακίνησης από τον δυναμικό καταμερισμό στο Aimsun της προηγούμενης επανάληψης
- Υπολογισμός αρχικών τιμών χρόνων πρασίνου βάσει του μέσου κύκλου και της απλοποιημένης διαδικασίας κρίσιμων ροών του Webster για τον συνολικό φόρτο
- Ορισμός αρχικών τιμών χρονικών μετατοπίσεων {μηδενικές τιμές}
- Ανάκληση διαδικασίας βελτιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων
 - ο Αντιστοίχιση κινήσεων στις διαδρομές βελτιστοποίησης
 - ο Ορισμός διαδοχής φάσεων και σχετικών χρονικών μετατοπίσεων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις)
 - ο Υπολογισμός σχετικών χρόνων διαδρομής μεταξύ των κόμβων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις)
 - ο Ορισμός φόρτων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις) ανά χρονικό βήμα
 - ο Υπολογισμός 1^{ης} αντικειμενικής συνάρτησης
 - Εκτίμηση μέσης καθυστέρησης ανά χρονικό βήμα μέσω της HCM2010 μεθοδολογίας διαδοχικών χρονικών βημάτων
 - Προσδιορισμός ομάδων κινήσεων και ομάδων λωρίδων για όλους τους κόμβους
 - Υπολογισμός φόρτου ομάδων κινήσεων για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός φόρτου ομάδων λωρίδων για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός προσαρμοσμένης ροής κορεσμού για όλους τους κόμβους για

- κάθε χρονικό βήμα
 - Προσδιορισμός ποσοστού οχημάτων που φθάνει κατά τη διάρκεια του πρασίνου για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Εισαγωγή τιμών χρόνων φάσεων για όλους τους κόμβους
 - Υπολογισμός χωρητικότητας και λόγου φόρτου-χωρητικότητας για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός καθυστέρησης για όλους τους κόμβους για κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός του συνολικού φόρτου όλων των κόμβων ανά χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός της απώλειας σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης της απώλειας σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός *CVaR* μέσης καθυστέρησης όλων των κόμβων
- Υπολογισμός 2ης αντικειμενικής συνάρτησης
 - Εισαγωγή τιμών χρόνων φάσεων για όλους τους κόμβους
 - Εισαγωγή τιμών χρονικών μετατοπίσεων των κόμβων
 - Υπολογισμός σχετικών χρονικών μετατοπίσεων στις διαδρομές βελτιστοποίησης (πρωτεύουσες και δευτερεύουσες κατευθύνσεις)
 - Υπολογισμός αριθμού οχημάτων επί της κάθε κατεύθυνσης της κάθε διαδρομής ανά χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός χρόνου αναμονής οχημάτων σε κάθε κατεύθυνση κάθε διαδρομής
 - Υπολογισμός της απώλειας του χρόνου αναμονής λόγω έλλειψης συντονισμού σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης της απώλειας του χρόνου αναμονής λόγω έλλειψης συντονισμού σε κάθε χρονικό βήμα
 - Υπολογισμός *CVaR* του χρόνου αναμονής λόγω έλλειψης συντονισμού
- Ορισμός αρχικών τιμών μεταβλητών και περιορισμών προβλήματος
- Ανάκληση γενετικού αλγορίθμου πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων (gamultiobj)
- Εξαγωγή μετώπου Pareto
- Κανονικοποίηση μετώπου Pareto
- Εύρεση ελάχιστης τιμής συνάρτησης χρησιμότητας λύσεων του μετώπου Pareto
- Μετασχηματισμός των χρόνων πρασίνων των φάσεων των σηματοδοτούμενων κόμβων και των χρονικών μετατοπίσεων για εισαγωγή στο Aimsun
- Εισαγωγή στο Aimsun των νέων ρυθμίσεων σηματοδότησης
- Πραγματοποίηση δυναμικού μεσοσκοπικού καταμερισμού στο Aimsun
- Εξαγωγή και αποθήκευση αποτελεσμάτων δυναμικού μεσοσκοπικού καταμερισμού από το Aimsun σε βάση δεδομένων

Παράρτημα Γ:

Παράμετροι Αλγορίθμων Βελτιστοποίησης και
Δυναμικής Μεσοσκοπικής Φόρτισης

Στους πίνακες που ακολουθούν περιλαμβάνονται οι παράμετροι των αλγορίθμων αναζήτησης λύσης που εφαρμόστηκαν στο Κεφάλαιο 6.

Πίνακας Γ-1: Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου στο MATLAB

Παράμετροι	Τιμή
Constraint Tolerance	0.001
Crossover Fraction	0.8
Elite Count	$\text{ceil}(0,05 \times \text{PopulationSize})$
Function Tolerance	$1e-6$
Max Generations	$100 \times \text{Number Of Variables}$
Max Stall Generations	50
Migration Fraction	0,2
Migration Interval	20
Population Size	50 when Number Of Variables ≤ 5 200 otherwise

Πίνακας Γ-2: Παράμετροι Αλγορίθμου Διεσπαρμένης Αναζήτησης στο MATLAB

Παράμετροι	Τιμή
Basin Radius Factor	0,2
Distance Threshold Factor	0,75
Function Tolerance	$1e-6$
Max Wait Cycle	20
Num Stage One Points	50
Num Trial Points	100
Penalty Threshold Factor	0,2
X Tolerance	$1e-6$

Πίνακας Γ-3: Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου Πολλαπλών Αντικειμενικών Συναρτήσεων στο MATLAB

Παράμετροι	Τιμή
Constraint Tolerance	0,001
Crossover Fraction	0,8
Elite Count	$\text{ceil}(0,05 \times \text{PopulationSize})$
Function Tolerance	$1e-4$
Max Generations	$200 \times \text{Number Of Variables}$
Max Stall Generations	100
Migration Fraction	0,2
Migration Interval	20
Pareto Fraction	0,35
Population Size	50 when Number Of Variables ≤ 5 200 otherwise

Πίνακας Γ-4: Παράμετροι Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης στο TRANSYT-7F

Παράμετροι	Τιμή
Number of Generations	200
Crossover probability (%)	30
Mutation probability (%)	1
Convergence Threshold (%)	0.01
Population size	50
Random Number Seed	7781
Elitist method	Yes

Στον πίνακα που ακολουθεί περιλαμβάνονται οι παράμετροι δυναμικού μεσοσκοπικού καταμερισμού του Aimsun.

Πίνακας Γ-5: Παράμετροι Δυναμικού Μεσοσκοπικού Καταμερισμού στο Aimsun

Παράμετροι	Τιμή
Statistics interval	5min
Dynamic Traffic Assignment:	
Network loading	Mesoscopic Simulator
Assignment Approach	Dynamic User Equilibrium
Look-Ahead Distance Variability	40%
Reaction time	1,2 sec
Reaction time at Traffic Light	1,6 sec
Arrivals	Normal
DTA:	
Costs:	
Cycle	5min
Intervals	1
Path cost	Instantaneous
Dynamic User Equilibrium	
Model	Gradient – Based
Stopping Criteria: Max Iterations	20
Stopping Criteria: Relative Gap	0,5%
Max Paths per interval	3