



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

---

## Διπλωματική Εργασία

---

### **Σχεδίαση και Μοντελοποίηση Οδικού Δικτύου Μικρής Κλίμακας**

Φοιτητής: Κανατίδης Ηλίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Λούτα Μαλαματή

Κοζάνη | Ιούλιος 2018



## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου Δρ. Λούτα Μαλαματή που μου πρότεινε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα για τη διπλωματική μου εργασία και με βοήθησε να φέρω εις πέρας. Με τον τεράστιο όγκο γνώσεων που διαθέτει όλα τα προβλήματα και οι δυσκολίες της εργασίας ξεπεράστηκαν αμέσως. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Τσότσα Χρήστο, ο οποίος με βοήθησε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και αφιέρωσε από το χρόνο του στο να μου εξηγήσει τις απορίες μου και να με καθοδηγήσει. Το κλίμα συνεργασίας μας ήταν άριστο, πράγμα το οποίο μετέτρεψε τη διαδικασία ολοκλήρωσης της εργασίας σε ένα φιλικό, επικοδομητικό και δημιουργικό έργο.

# Περιεχόμενα

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>3</b>
<b>Ευρετήριο</b>	<b>6</b>
-Κατάλογος Εικόνων	6
-Κατάλογος Πινάκων	7
<b>Copyright ©</b>	<b>8</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>9</b>
<b>Abstract</b>	<b>10</b>
<b>Κεφάλαιο 1ο - Εισαγωγή</b>	<b>11</b>
1.1 Επιγραμματική εξήγηση του προβλήματος κυκλοφοριακής συμφόρησης	11
1.2 Κατευθύνσεις των ερευνών για την επίλυση του προβλήματος κυκλοφοριακής συμφόρησης	12
1.3 Σκοπός και στόχοι εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας	14
1.4 Συνεισφορά στη γενική γνώση	15
1.5 Σύνοψη διπλωματικής εργασίας	16
<b>Κεφάλαιο 2ο- Επισκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας</b>	<b>17</b>
2.1 Δυναμική μεταβολή σήμανσης φωτεινών σηματοδοτών	17
2.2 Αναδρομολόγηση χρηστών για την αποφυγή συμφόρησης μέσω συντομότερης διαδρομής	23
2.3 Αποτελέσματα των μεθοδολογιών και τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί	27
2.4 Διαφορά των ήδη εφαρμοσμένων τεχνικών με τη δική μας έρευνα	28
<b>Κεφάλαιο 3ο- Μεθοδολογία του πρακτικού τμήματος της εργασίας</b>	<b>30</b>
3.1 Έλεγχος οδικής κυκλοφορίας	30
3.2 Εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στο πρακτικό μέρος της προσομοίωσης	30
3.2.1 Προσομοιωτής - Sumo-Gui (Simulation of Urban Mobility)	30
3.2.2 Γλώσσες προγραμματισμού	34
3.2.2.1 Python	34
3.2.2.2 C++	35
3.2.3 Traci (Traffic Control Interface)	35

3.2.4 Αλγόριθμος Monte Carlo	36
3.2.5 Βελτιστοποιητής	37
3.3 Αλληλεπίδραση των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν και αίτια επιλογής τους προς χρήση	37
3.4 Μεθοδολογία	39
<b>Κεφάλαιο 4ο- Αποτελέσματα Προσομοίωσης</b>	<b>43</b>
4.1 Βασική δομή σεναρίου	43
4.2 Multi-Objective Optimization	55
4.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων μας έπειτα από μελέτη των διαγραμμάτων	61
<b>Κεφάλαιο 5ο- Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις</b>	<b>63</b>
5.1 Συνοπτική περιγραφή του πρακτικού κομματιού και των αποτελεσμάτων	63
5.2 Υποθέσεις και περιορισμοί	64
5.3 Μελλοντικές ενδεχόμενες επεκτάσεις	67
<b>Βιβλιογραφία-Αναφορές</b>	<b>69</b>

# Ευρετήριο

## -Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Συμφόρηση στη γέφυρα του Βοσπόρου στην Κωνσταντινούπολη κατά τις ώρες αιχμής

Εικόνα 2: Κάμερα ανίχνευσης οχημάτων

Εικόνα 3: Περιβάλλον προσομοίωσης διασταύρωσης στο Sumo-gui

Εικόνα 4: Περιβάλλον ρύθμισης δικτύου μέσω NETEDIT

Εικόνα 5: Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας και της δομής μιας προσομοίωσης οδικού δικτύου

Εικόνα 6: Μήνυμα επιβεβαίωσης δημιουργίας δικτύου

Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική TraCI τύπου πελάτη-διακομιστή

Εικόνα 8: Συνένωση των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση

Εικόνα 9: Αλυσίδα εφοδιασμού των εργαλείων/μεθόδων

Εικόνα 10: Συλλογή πληροφοριών κατά τον τερματισμό της προσομοίωσης

Εικόνα 11: Μήνυμα επιβεβαίωσης εξαγωγής των στατιστικών του δικτύου της προσομοίωσης

Εικόνα 12: Αποτέλεσμα των στατιστικών της προσομοίωσης

Εικόνα 13: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 10 διαφορετικά σενάρια

Εικόνα 14: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 100 διαφορετικά σενάρια

Εικόνα 15: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 1000 διαφορετικά σενάρια

Εικόνα 16: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 10000 διαφορετικά σενάρια (1)

Εικόνα 17: Διάγραμμα ταχύτητας - αριθμού οχημάτων

Εικόνα 18: Διάγραμμα διακύμανσης ταχύτητας

Εικόνα 19: Συμπεριφορά ταχύτητας τριών διαφορετικών περιόδων χρόνου σε διασταύρωση με φανάρι

Εικόνα 20: Διάγραμμα αριθμού οχημάτων - χρόνου τριών διαφορετικών σεναρίων

Εικόνα 21: Eastbound Left Lane Travel Time Data [23]

Εικόνα 22: Αρίθμηση φαναριών σε αντιστοιχία με τις φάσεις

Εικόνα 23: Λύσεις στη μείωση ταχύτητας με σκοπό την εξαγωγή βέλτιστου σεναρίου

Εικόνα 24: Η τιμή της ταχύτητας μετά τη βελτιστοποίηση (1)

Εικόνα 25: Η τιμή της ταχύτητας μετά τη βελτιστοποίηση (2)

Εικόνα 26: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 10000 διαφορετικά σενάρια (2)

Εικόνα 27: Μελλοντικά έξυπνα συστήματα μέσω μεταφοράς

### -Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κενό στη γνώση (Gap to Knowledge)

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλείων

Πίνακας 3: Σκοπός χρήσης των μεθόδων και εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν

Πίνακας 4: Πίνακας αξιολόγησης ρίσκου

## Copyright ©

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1968 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “Μοντελοποίηση και Βελτιστοποίηση Σχεδίασης Οδικού Δικτύου” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Λούτα Μαλαματή αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή /και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ’ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright © Κανατίδης Ηλίας - Λούτα Μαλαματή - 2018, Κοζάνη



## Περίληψη

Το κυκλοφοριακό ζήτημα απασχολεί σε πολύ μεγάλο βαθμό τις σύγχρονες αστικές κοινωνίες. Η δραματική αύξηση του αριθμού των οχημάτων στα αστικά κέντρα τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει στην εμφάνιση καθημερινών φαινομένων κυκλοφοριακής συμφόρησης και ατυχημάτων. Στην παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθεί μια εκτενής μελέτη του προβλήματος της διαχείρισης της οδικής κυκλοφορίας και των μεθόδων που εφαρμόζονται για την επίλυσή του ενώ παράλληλα θα χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος με σκοπό την επίλυση προβλημάτων όπως η κυκλοφοριακή συμφόρηση σε αστικές περιοχές περιοχές παράγοντας μια εκτίμηση σχεδίου για τη βελτίωση της κίνησης μειώνοντας τον αριθμό των οχημάτων. Μία τεράστια συνέπεια αυτού του προβλήματος σχετίζεται με θέματα διαχείρισης που ευρύνονται από την κυκλοφοριακή συμφόρηση έως και την ασφαλή οδήγηση. Έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην προσπάθεια αξιοποίησης της προόδου των αισθητήρων, των τηλεπικοινωνιών και των δυναμικών τεχνολογιών για να κάνουν αποτελεσματικότερο το σύστημα διαχείρισης οδικής κυκλοφορίας (Road Traffic Management System-TMS). Η δική μας προσέγγιση θα βασίζεται σε ένα εργαλείο προσομοίωσης οδικού δικτύου που ονομάζεται SUMO σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης MOTSS2 ικανό να αποδώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα ως προς τη μοντελοποίηση ενός οδικού δικτύου αστικής περιοχής. Θέτοντας δηλαδή όρια σε παραμέτρους όπως η ταχύτητα, χρονισμός φωτεινών σηματοδοτών ή αντίθετα αυξάνοντας την τιμή αυτών εκτιμούμε ότι μπορεί να επιφέρει ένα σεβαστό ποσοστό βελτίωσης της ροής της κυκλοφορίας.

**Λέξεις κλειδιά:** βελτιστοποίηση, κυκλοφοριακή συμφόρηση, σύστημα διαχείρισης οδικής κυκλοφορίας.

## Abstract

The traffic control issue is a major concern for modern civil societies. The dramatic increase of population and the number of vehicles during the last decades has led to daily occurrences of traffic congestion and accidents. In the current work we conducted a thorough research of the issue of traffic control management and the methods that are deployed to solve this problem while in the same time will be used a couple of algorithms to solve problems such as traffic congestion in urban environments. A huge consequence of this issue is related to management issues which are spread by traffic congestion to driving safety and environmental impacts. Researches have focused their efforts on the evaluation of sensor progress, telecommunications and dynamic technologies to improve the road traffic management system (Road Traffic Management System- TMS) and make it more efficient. Our approach will be based on a road network simulation tool and an optimization program capable of delivering the optimum result as to the modeling of an urban area road network.

**Keywords: optimization, traffic congestion, road traffic management system.**

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> - Εισαγωγή

## 1.1 Επιγραμματική εξήγηση του προβλήματος κυκλοφοριακής συμφόρησης

Οι σύγχρονες αστικές κοινωνίες υποφέρουν από το κρίσιμο πρόβλημα της κυκλοφοριακής κίνησης. Ο αριθμός των οχημάτων στις αστικές περιοχές έχει αυξηθεί και συνεχίζει να αυξάνεται ολοένα και περισσότερο τις τελευταίες δεκαετίες. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των ατυχημάτων στο οδικό δίκτυο είναι πολύ μεγάλος, καθώς σύμφωνα με την παγκόσμια στατιστική μελέτη τροχαίων ατυχημάτων σε πραγματικό χρόνο [1], ο αριθμός τους ανέρχεται στα 653.523 ατυχήματα το 2017. Η πολιτεία λοιπόν θα πρέπει να αναλάβει δράση, να κινηθεί αποτελεσματικά ως προς τη λειτουργικότητα του οδικού δικτύου, να προχωρήσει σε νέες ρυθμίσεις και σχεδιαστικές μεθόδους.



Εικόνα 1: Συμφόρηση στη γέφυρα του Βοσπόρου στην Κωνσταντινούπολη κατά τις ώρες αιχμής.

Οι συνέπειες της κυκλοφοριακής συμφόρησης γίνονται αισθητές σε πολλούς τομείς:

- Σε περίπτωση κυκλοφοριακής συμφόρησης, οι κύριοι οδικοί δρόμοι υποφέρουν από τον τεράστιο αριθμό οχημάτων και ο χρόνος διαδρομής από το σημείο εκκίνησης ως το σημείο προορισμού ενδέχεται ακόμη και να τριπλασιαστεί.
- Επίσης, υποστηρίζεται ότι το κόστος μετακίνησης σε αστικά κέντρα κατά τη διάρκεια κυκλοφοριακής συμφόρησης ανέρχεται στο 1% του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος κάθε χρόνο.
- Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Κινητικότητας και Μεταφορών (European Commission of Mobility and Transportation) [2], οι στατιστικές μελέτες σχετικά με την ασφάλεια στους δρόμους έχουν σημειώσει ανοδική πορεία από το 2016 με τη μείωση των τροχαίων ατυχημάτων κατά 2% στους Ευρωπαϊκούς δρόμους. Παρόλα αυτά όμως, επισημαίνουν ότι ο αριθμός των τροχαίων ατυχημάτων συνεχίζει να είναι πολύ μεγάλος.

Όλοι αυτοί οι τομείς που επηρεάζονται από τη μη αποτελεσματική σχεδίαση του οδικού δικτύου οδηγούν καθημερινά στην υποβάθμιση του βιοτικού επιπέδου και χρήζουν μεγάλης προσοχής.

## 1.2 Κατευθύνσεις των ερευνών για την επίλυση του προβλήματος κυκλοφοριακής συμφόρησης

Το οδικό δίκτυο που υπάρχει σήμερα δεν είναι αρκετά ανεπτυγμένο για να προσαρμόζεται άμεσα στη μεταβολή των συνθηκών στο δρόμο. Επίσης, το κόστος ανακατασκευής ενός νέου οδικού δικτύου θα είναι τεράστιο. Παρόλα αυτά όμως, κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία ή η επιδιόρθωση του ήδη υπάρχοντος οδικού δικτύου σε βαθμό που θα είναι ικανό να “αντέξει” τον τεράστιο αριθμό των οχημάτων έτσι ώστε να αποφευχθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση και η καθυστέρηση ροής της κίνησης. Γι’ αυτό το λόγο ερευνητές έχουν στρέψει τις έρευνες τους σε κατευθύνσεις που πιστεύουν ότι θα εξαλείψουν το πρόβλημα αυτό και θα δώσουν μια ανάσα κυρίως στα αστικά κέντρα που υποφέρουν. Παρακάτω επισημαίνονται κάποια ενδεικτικά παραδείγματα κατευθύνσεων:

- Ρύθμιση συχνότητας των φωτεινών σηματοδοτών (φανάρια) να ενεργοποιούνται/απενεργοποιούνται δυναμικά με βάση τον αριθμό των οχημάτων για την ομαλή ροή της κίνησης και την αποφυγή συμφόρησης. [3]
- Πρόβλεψη κίνησης με σκοπό την ομαλή κυκλοφορία των οχημάτων παρέχοντας στον οδηγό πληροφορίες για την αυξομείωση της κίνησης και την αποφυγή

δημιουργίας ουρών στους δρόμους για τη διευκόλυνση των οδηγών ώστε να αποφύγουν περιστατικά συμφόρησης. [4]

- Η τεχνική ανακατεύθυνσης (re-routing) είναι ένα από τα σημαντικά εργαλεία των ερευνητών για τη επίλυση τέτοιων φαινομένων. Αποσκοπεί στη μείωση χρόνου ταξιδιού των οχημάτων εντοπίζοντας διαφορετική διαδρομή σε περίπτωση διακοπής της ροής κυκλοφορίας. [5]
- Τεχνική επεξεργασίας εικόνας ή βίντεο από κάμερες για την αποφυγή περιπτώσεων κυκλοφοριακής συμφόρησης, ατυχημάτων και άμεσος εντοπισμός περιστατικού με σκοπό τη γρήγορη προσέγγιση μονάδων άμεσης επέμβασης στο σημείο [6].

Στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στη ρύθμιση και χρήση φωτεινών σηματοδοτών υλοποιώντας μια διασταύρωση οδικού δικτύου με χρήση εργαλείων προσομοίωσης [3].



Εικόνα 2: Κάμερα ανίχνευσης οχημάτων.

Μέχρι και σήμερα στις περισσότερες αστικές περιοχές επικρατεί η τεχνική της ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών. Παρόλο που μέχρι τώρα τα φανάρια ήταν ο κύριος παράγοντας ρύθμισης της κυκλοφορίας, με την τεράστια αύξηση των οχημάτων στους δρόμους δεν υπάρχει δυνατότητα άμεσης προσαρμογής τους στα νέα δεδομένα κίνησης. Σε κομβικά σημεία, όπως οι διασταυρώσεις, αν συγκεντρωθεί μεγάλος αριθμός οχημάτων δεν είναι τόσο αποτελεσματικά τα φανάρια ώστε να ελαφρύνουν το δίκτυο και να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα κυκλοφορίας. Εκτός αυτού, υπάρχουν και οι περιπτώσεις επειγόντων περιστατικών που δεν ευνοούνται καθόλου από τα φανάρια όταν ο αριθμός των οχημάτων είναι μεγάλος στο συγκεκριμένο σημείο. Ο έλεγχος της κίνησης θα είναι ιδιαίτερα σημαντικός όταν στο μέλλον τα αυτόνομα οχήματα εισέλθουν στην αγορά και καταλάβουν ένα μεγάλο μέρος των μέσων μεταφοράς. Όπως αναφέρεται στο [7], το 40% των ατυχημάτων συμβαίνει στις διασταυρώσεις. Επίσης, η ίδια πηγή υποστηρίζει ότι περίπου 165.000 ατυχήματα που συμβαίνουν στις διασταυρώσεις προκαλούνται από παραβίαση του κόκκινου φωτεινού σηματοδότη.

Από την άλλη, η πηγή [26] αναφέρεται στους μεγάλους κινδύνους που υπάρχουν σε μια διασταύρωση και στην προσπάθεια των ερευνητών για τον έλεγχο τέτοιων περιστατικών αναπτύσσοντας τεχνικές εσκεμμένης πρόκλησης ατυχημάτων με σκοπό την πρόβλεψή τους και στη συνέχεια την αντιμετώπισή τους. Όπως τονίζεται στο συγκεκριμένο άρθρο, στόχος των ερευνητών είναι να εντοπίσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την ασφάλεια της κυκλοφορίας σε μια διασταύρωση.

### 1.3 Σκοπός και στόχοι εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Σε αυτή την εργασία θα πραγματοποιηθεί έρευνα σε πειράματα και μελέτες που έχουν γίνει στον τομέα της σχεδίασης και βελτιστοποίησης του οδικού δικτύου σε αστικές περιοχές. Έτσι, συνδυάζοντας τη γνώση και το αποτέλεσμα στο οποίο κατέληξαν θα μπορέσουμε με τη δική μας προσέγγιση να προσπαθήσουμε να προτείνουμε αν είναι δυνατόν μια λύση στο πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης όσο γίνεται με μεγαλύτερη σαφήνεια, λεπτομέρεια και ακρίβεια. Το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις παγκοσμίως και τα ατυχήματα στο δρόμο αυξάνονται ολοένα και περισσότερο. Μελετώντας λοιπόν διαφορετικά άρθρα που δημοσιεύονται κατά καιρούς από ειδικούς ερευνητές και στοχεύουν στη λύση του προβλήματος, έχουμε τη δυνατότητα να παρουσιάσουμε τις μεθόδους και αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί καθώς και τα αποτελέσματά τους. Ο σκοπός και οι στόχοι που θα θέλαμε να πετύχουμε υλοποιώντας αυτή την εργασία είναι:

1. Η δημιουργία μιας μεθόδου που θα ωφελήσει στη μείωση του ποσοστού κυκλοφοριακής συμφόρησης βελτιστοποιώντας παράγοντες του οδικού δικτύου που επηρεάζουν την ροή της κυκλοφορίας. Πιο συγκεκριμένα, οι κύριοι παράγοντες που θα μεταβληθούν έτσι ώστε να φτάσουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η

ταχύτητα των οχημάτων και ο χρόνος εναλλαγής φάσεων των φωτεινών σηματοδοτών. Με τον τρόπο αυτό θα προσπαθήσουμε να ενισχύσουμε το κίνητρο των σχεδιαστών που διεξάγουν συχνά αντίστοιχες μελέτες και είναι υπεύθυνοι για τη ρύθμιση της μεταφοράς στο να προχωρήσουν σε νέες σχεδιαστικές μεθόδους.

2. Ανάλυση σεναρίων βασισμένα σε τρία διαφορετικά χρονικά σενάρια (ώρες αιχμής, ομαλής έντασης κίνησης και χαμηλής έντασης κίνησης) σε μια σηματοδοτούμενη διασταύρωση με σκοπό να δειχθεί η ροή της κίνησης σε διαφορετικές καταστάσεις και στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος βελτιστοποίησης για να μπορέσουμε να εντοπίσουμε τον τρόπο με τον οποίο θα ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση και πρόκληση ατυχημάτων λόγω συμφόρησης. Για να πραγματοποιηθεί αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης και με τη βοήθεια μιας μεθόδου βελτιστοποίησης θα προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε τη βέλτιστη μορφή της ροής της κίνησης.

#### 1.4 Συνεισφορά στη γενική γνώση

Με βάση τους στόχους που έχουμε θέσει παραπάνω ως το κύριο μέλημα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι η κύρια συνεισφορά της εργασίας μας στην κοινωνία και στους τομείς της επιχειρησιακής έρευνας, μεταφοράς και των λεγόμενων “έξυπνων πόλεων” είναι η σχεδίαση μιας μεθόδου προσομοίωσης διασταύρωσης σε ένα οδικό δίκτυο χρησιμοποιώντας τεχνικές μικροπροσομοίωσης. Στην προσομοίωση αυτή όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση θα είναι κατάλληλα ρυθμισμένοι έτσι ώστε να έχουμε μια ομαλή κίνηση της κυκλοφορίας. Εκτιμούμε με αυτό τον τρόπο ότι θα προσφέρουμε ένα επιπλέον πάτημα στη γνώση, ένα νέο προσεγγιστικό τρόπο στο θέμα ώστε να καλύψουμε κάποια κενά προηγούμενων προσπαθειών. Μια τέτοια ενέργεια ευελπιστούμε να φανεί χρήσιμη και αποτελεσματική στις υπηρεσίες συγκοινωνιών καθώς αναμένουμε θετικά αποτελέσματά και βελτίωση του ρυθμού της ροής κίνησης έστω και στο ελάχιστο. Επιπρόσθετα, θεωρούμε ότι οι μέθοδοι και τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τη μετακίνηση, την τεχνητή νοημοσύνη καθώς και το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο θα οδηγήσουν στη δημιουργία ενός πρωτότυπου μοντέλου κίνησης, το οποίο θα ελαχιστοποιήσει το πρόβλημα της συμφόρησης.

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες που θα μεταβάλλονται είναι ο χρόνος που θα διαρκούν τα στάδια των φωτεινών σηματοδοτών, πράγμα που θα βοηθήσει στη μείωση της καθυστέρησης. Ενώ ο δεύτερος παράγοντας που θα μεταβληθεί θα είναι η ταχύτητα των οχημάτων. Στην προσομοίωση θα έχουμε τη δυνατότητα να μεταβάλουμε τις περισσότερες παραμέτρους που θα συμβάλλουν σε αυτή και θα προσπαθήσουμε να εξάγουμε ρεαλιστικά αποτελέσματα έτσι ώστε να έχουμε τη βέλτιστη ροή της κίνησης σε πραγματικά δεδομένα. Αυτό θα μπορέσει να επιτευχθεί με ένα εργαλείο το οποίο έχει τη δυνατότητα να ελέγχει και να μεταβάλλει όλα τα αντικείμενα της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μία λύση στο πρόβλημα της

κυκλοφοριακής συμφόρησης και να μειώσουμε τον αριθμό των ατυχημάτων που δημιουργούνται στα κομβικά αυτά σημεία.

### 1.5 Σύνοψη διπλωματικής εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνει την εισαγωγή και επεξήγηση του ζητήματος που μελετάμε. Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε το σκοπό της εργασίας και τους στόχους που θα προσπαθήσουμε να επιτύχουμε και θα γίνει αναφορά στη μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί. Το επόμενο τμήμα του πρώτου κεφαλαίου θα συμπεριλαμβάνει τη συνεισφορά της εργασίας και των αποτελεσμάτων μας στο γενικό σύνολο και στη γενική γνώση.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελείται από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, στο οποίο θα αναλύσουμε και θα εξηγήσουμε τις μελέτες, τεχνικές και αλγορίθμους που έχουν χρησιμοποιηθεί από άλλους ερευνητές και αρθρογράφους στον τομέα. Θα περιγράψουμε τα αποτελέσματα της εφαρμογής των τεχνικών αυτών καθώς και τις διαφορές τους με τη δική μας διπλωματική εργασία.

Το τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας θα περιλαμβάνει το πειραματικό στάδιο. Συγκεκριμένα, θα περιλαμβάνει μια μικρή αναφορά στα εργαλεία που θα χρησιμοποιήσουμε καθώς θα προσθέσουμε φωτογραφικό υλικό από κάθε λειτουργία και διαδικασία που θα πραγματοποιήσουμε.

Το τέταρτο κεφάλαιο θα αποτελείται από την ολοκληρωμένη διαδικασία της προσομοίωσης του οδικού δικτύου και θα υπάρχει επίσης φωτογραφικό υλικό καθώς και διαγράμματα που θα απεικονίζουν τα αποτελέσματα που θα έχουμε εξάγει από το πρακτικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας.

Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο θα περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και τον επίλογο, όπου θα κάνουμε μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και θα αναλύσουμε το γενικό συμπέρασμα που θα προκύψει ως προς τη λύση του ζητήματος που μας απασχολεί, είτε είναι θετικό είτε αρνητικό. Τέλος, θα υπάρχει μια ξεχωριστή παράγραφος που θα αναφέρεται σε μελλοντικές ενδεχόμενες επεκτάσεις.



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>- Επισκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι βελτιστοποίηση των συστημάτων διαχείρισης της κυκλοφορίας (Traffic Management Systems). Η δομή αυτού του κεφαλαίου αποσκοπεί στην επίδειξη και επεξήγηση διάφορων τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς, στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων που έχουν εξάγει αυτές οι τεχνικές και τέλος στη σύγκρισή τους με τη δική μας προσέγγιση. Οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν από τους ειδικούς και μελετήθηκαν από εμάς διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες που θα αναλυθούν παρακάτω.

### 2.1 Δυναμική μεταβολή σήμανσης φωτεινών σηματοδοτών

Τα άρθρα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι τα εξής:

1. Γενετικός αλγόριθμος, προσαρμοσμένη έκδοση του Dijkstra, εκτίμηση κίνησης [8].
2. Συντονισμός/συγχρονισμός φαναριών σε περισσότερες από μια διασταυρώσεις [9].

Σύμφωνα με το άρθρο [8] οι ερευνητές έχουν εφαρμόσει τον γενετικό αλγόριθμο που είναι μια μέθοδος αναζήτησης βέλτιστων λύσεων για τη βελτιστοποίηση του χρονισμού των φωτεινών σηματοδοτών και μια νέα προσαρμοσμένη μέθοδο του αλγορίθμου Dijkstra για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής. Τα προγράμματα και λογισμικά που βοήθησαν τους ειδικούς να φέρουν εις πέρας το έργο αυτό είναι τα Sumo, Veins, Vissim, ns-3. καθώς και το αστικό περιβάλλον στο οποίο πειραματίστηκαν στο συγκεκριμένο άρθρο είναι το Brno, Czech Republic (τοποθεσία: Kopecného square). Αναλυτικότερα για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, το βασικό κομμάτι του είναι το γονίδιο (genome). Το γονίδιο αντιπροσωπεύει μια μοναδική ρύθμιση των φωτεινών σηματοδοτών που αντιστοιχεί στη διάρκεια των περιόδων του σήματος και στο συγχρονισμό τους. Πολλά γονίδια μαζί αποτελούν μια γενιά πληθυσμού. Για κάθε γονίδιο αυτού του πληθυσμού, πραγματοποιείται μια δυναμική προσομοίωση της κίνησης χρησιμοποιώντας πολύ συγκεκριμένες ιδιότητες σήματος που μεταφέρονται από το εν λόγω γονίδιο. Κατά τη διάρκεια κάθε προσομοίωσης, συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με τη μεταφερόμενη κίνηση και υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενική λειτουργίας της και αποθηκεύεται στις ιδιότητες ενός συγκεκριμένου γονιδίου. Μετά την προσομοίωση, η τρέχουσα κυκλοφοριακή κίνηση διαγράφεται από το μοντέλο και πραγματοποιείται επαναφορά κίνησης. Όταν ολοκληρωθούν οι προσομοιώσεις για ολόκληρο τον πληθυσμό, ξεκινά μια διαδικασία επιλογής γονιδίου. Η επιλογή αυτή βασίζεται στη σύγκριση των τιμών της αντικειμενικής λειτουργίας δύο τυχαίων γονιδίων. Το γονίδιο με τη χειρότερη απόδοση θα διαγράφεται. Υπάρχει όμως μια μικρή πιθανότητα το χειρότερο γονίδιο με τη χειρότερη απόδοση μπορεί να κερδίσει στη διαδικασία της επιλογής. Το κενό που δημιουργείται από τη διαγραφή των γονιδίων στη συνέχεια συμπληρώνεται με νέα γονίδια. Η δημιουργία των νέων αυτών γονιδίων αποτελείται από δύο μεθόδους. Η πρώτη είναι η δημιουργία ενός κλώνου για ένα από τα εναπομείναντα γονίδια και η δεύτερη είναι μια συνεχής εναλλαγή ιδιοτήτων των σημάτων (π.χ. διάρκεια των φωτεινών σηματοδοτών) γνωστή ως διαδικασία διασταύρωσης. Έπειτα

επιλέγεται ένα τυχαίο ζευγάρι γονιδίων και συγκρίνονται οι αντικειμενικές λειτουργίες τους. Στη συνέχεια, δημιουργείται ένα νέο κενό γονίδιο και κληρονομεί τις ιδιότητες του σήματος από τους “γονείς” του. Όταν ο πληθυσμός αποκατασταθεί και φτάσει στο μέγιστο μέγεθός του, τα γονίδια βιώνουν τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, τίθεται σε λειτουργία η νέα προσαρμογή του αλγορίθμου Dijkstra [8]. Αφού δηλαδή δημιουργηθεί η επιθυμητή τοπογραφία και η σηματοδότηση του μοντέλου οδικής κυκλοφορίας, ξεκινά η διαδικασία δημιουργίας κίνησης.

Αρχικά, η διαδικασία δρομολόγησης διαβάζει όλα τα δεδομένα που έχει σχετικά με το μοντέλο, όπως είναι η μέγιστη ταχύτητα, το μήκος ουράς και η κατεύθυνση στη συνέχεια, αφού ο χρήστης καθορίσει την απαιτούμενη πυκνότητα καθώς και τη λωρίδα εισόδου και εξόδου σε κάθε ροή κυκλοφορίας, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Dijkstra που έχει ως σκοπό να εντοπίσει την ιδανικότερη διαδρομή της κάθε ροής κυκλοφορίας ξεχωριστά. Η πυκνότητα της κάθε ροής μπορεί να δημιουργηθεί σαν μια σταθερή ομοιογενής διαδικασία ή σαν συνάρτηση του χρόνου. Επισημαίνεται ότι για να είναι πιο ακριβές το προσαρμοστικό σύστημα ελέγχου της κυκλοφοριακής κίνησης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κάμερες για την ανίχνευση εικόνας έτσι ώστε να καταμετρηθεί η ουρά των οχημάτων σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια, η πληροφορία αυτή θα διανέμεται στα υπόλοιπα οχήματα για να αποφευχθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Για να εφαρμοστεί επιτυχώς ο γενετικός αλγόριθμος, οι ερευνητές του άρθρου [8] προτείνουν κάποιες μεθοδολογίες που χωρίζονται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αποτελείται από το data sensing and gathering χρησιμοποιώντας ετερογενή συστήματα παρακολούθησης που μετρούν και τις παραμέτρους της κίνησης (π.χ. ένταση κίνησης, ταχύτητα οχημάτων κ.α.). Η δεύτερη φάση, βασιζόμενη στις πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί, προτείνει τη δημιουργία ενός νέου οδικού δικτύου πανομοιότυπο με το αρχικό για μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη αυτή λύση απαιτεί χαμηλά ποσοστά ενέργειας (energy efficient) καθώς έχει εφαρμοστεί σε συσκευές χαμηλής ισχύος και με μικρά αποθέματα ενέργειας και λειτούργησε επιτυχώς. Επίσης, για τη ομαλή λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου, συνεισφέρει σημαντικά η πολλά υποσχόμενη μέθοδος της εκτίμησης της κυκλοφορίας [8]. Οι προτεινόμενοι τρόποι που μπορούν να πραγματοποιήσουν μια ρεαλιστική εκτίμηση κυκλοφοριακής κίνησης είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που εγκαθίστανται στο αστικό περιβάλλον με σκοπό τη συλλογή δεδομένων και την παρακολούθηση της κίνησης. Στην περίπτωση αυτή αναφέρεται ότι απαιτείται μια γρήγορη και αξιόπιστη λειτουργία Μέσου Ελέγχου Πρόσβασης (Medium Access Control) ώστε να εξετάζει την αξιοπιστία και ακρίβεια των δεδομένων που συλλέγονται και κάποιος μηχανισμός για να προωθούν αυτά τα δεδομένα στο δίκτυο.

Έπειτα, ο δεύτερος τρόπος που επισημαίνεται είναι η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων γνωστή ως Machine-to-Machine (M2M) που επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων από όχημα σε όχημα μέσω ασύρματων επικοινωνιακών συσκευών που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο όχημα και η επικοινωνία μεταξύ οχήματος και υποδομής του δικτύου ή αλλιώς Machine-to-Infrastructure (M2I). Ένας ακόμη τρόπος ενίσχυσης της προτεινόμενης λύσης για τη βελτιστοποίηση του οδικού

δικτύου είναι η ανίχνευση της κίνησης με τη βοήθεια κινητών τερματικών (mobile sensing). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί κινητές συσκευές για το γρήγορο εντοπισμό των συμβάντων στους δρόμους σε πραγματικό χρόνο αυξάνοντας την ακρίβεια της πληροφορίας.

Τέλος, η τεχνική που μπορεί επίσης να βοηθήσει στην εκτίμηση των συνθηκών που επικρατούν στο οδικό δίκτυο την εκάστοτε χρονική στιγμή είναι τα Μέσα Κοινωνικής Δικτύωσης (Social Media Feeds). Δηλαδή όταν συμβαίνει κάποιο περιστατικό στο δρόμο μπορούν οι οδηγοί να ενημερώνονται για την κατάσταση από τα Μέσα Κοινωνικής Δικτύωσης όπως το Twitter, Facebook κ.α.).

Περιγράφοντας την τοπογραφία του προβλήματος και συνδυάζοντας το με τα χαρακτηριστικά της σηματοδότησης κυκλοφορίας, το αποτέλεσμα φαίνεται να είναι ποιοτικά και ποσοτικά ικανοποιητικό. Η βασική τοπογραφία του μοντέλου που προτείνεται βασίζεται σε κόμβους. Ο κάθε κόμβος έχει συντεταγμένες σημείων όπως η αλλαγή κατεύθυνσης, η διάσχιση ή συγχώνευση λωρίδων ή στροφές. Δύο κόμβοι είναι συνδεδεμένοι με ένα αντικείμενο της λωρίδας το οποίο κρατά τις ιδιότητες του μήκους της, της κατεύθυνσης, του μέγιστου ορίου ταχύτητας των οχημάτων στη συγκεκριμένη λωρίδα, το όριο του αριθμού των οχημάτων μέχρι να προκληθεί συμφόρηση και τα οχήματα που κινούνται σε συγκεκριμένη διαδρομή. Η κατασκευή της τοπογραφίας είτε σχεδιάζεται χειροκίνητα στον πηγαίο κώδικα είτε είναι μια έτοιμη μέθοδος. Μία λωρίδα στην οποία έχει εκχωρηθεί ένα αντικείμενο σήματος μετατρέπεται σε σηματοδοτούμενη λωρίδα. Το αντικείμενο του σήματος αποθηκεύει πληροφορίες κατά τη διάρκεια της κάθε περιόδου σηματοδότησης και των δευτερολέπτων που διαρκεί η κάθε φάση που βρίσκεται το φανάρι. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι μεταβλητές του αντικειμένου σηματοδότησης είναι ακέραιες τιμές των περιόδων του σήματος όταν είναι πράσινο, πράσινο προς πορτοκαλί, πορτοκαλί προς κόκκινο, κόκκινο και της διάρκειας της εναλλαγής του φωτεινού σηματοδότη. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό έχει παρουσιάσει κάποια κενά, δεν έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει σενάρια όπως αυτά της προτεραιότητας. Γι' αυτό το λόγο έχει σχεδιαστεί το λεγόμενο "crossed" lane αντικείμενο σύμφωνα με το οποίο κάθε λωρίδα μπορεί να συμβιβάζεται με διασταυρωμένες λωρίδες. Τότε, η κυκλοφορία που μεταφέρεται σε αυτή τη λωρίδα επιτρέπεται μόνο όταν οι διασταυρωμένες λωρίδες είναι άδειες και το φανάρι είναι πράσινο. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της σχεδίασης της κυκλοφορίας και του συγχρονισμού των φαναριών, τότε ξεκινά η διαδικασία της δημιουργίας των κυκλοφοριακών ρευμάτων.

Η ικανότητα που έχει αυτό το μοντέλο να μπορεί να χαρακτηρίσει μια κυκλοφοριακή συμφόρηση προκύπτει από δύο βασικές ιδιότητες: Πρώτον, κάθε λωρίδα θεωρείται ότι έχει πεπερασμένο μήκος. Όταν η χωρητικότητα μιας λωρίδας φτάσει στο μέγιστο μέγεθος της, τα οχήματα δεν μπορούν να εισέλθουν σε αυτή και μένουν "κολλημένα" σε προηγούμενες λωρίδες έως ότου η διαδρομή είναι και πάλι ελεύθερη. Αρχικά η διαδικασία της δρομολόγησης διαβάζει όλα τα αντικείμενα που υπάρχουν στο σενάριο, συμπεριλαμβανομένου τις κατευθύνσεις, τα μήκη των ουρών και τη μέγιστη ταχύτητά τους. Έπειτα, αφού ο χρήστης καθορίσει την απαιτούμενη ένταση της κίνησης, δηλαδή τα οχήματα που βρίσκονται στην είσοδο και έξοδο μιας λωρίδας, ο αλγόριθμος Dijkstra που χρησιμοποιείται ρυθμίζει την διαδρομή της κάθε ροής ξεχωριστά. Στο

σενάριο αυτό χρησιμοποιείται από τους ειδικούς μια συνάρτηση σύμφωνα με την οποία μπορούν να μειώσουν το μέσο χρόνο ταξιδιού:

$$t_{\text{avg}} = \frac{1}{N_{\text{vehicles}}} \sum_{i=0}^{N_{\text{vehicles}}-1} (t_{\text{out},i} - t_{\text{in},i}) \rightarrow \min$$

Η τελευταία φάση πριν τη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας περιλαμβάνει τη δημιουργία των ιδιοτήτων της ροής. Αυτό σημαίνει ότι η κάθε ροή χαρακτηρίζεται από τις λωρίδες όπου εισέρχονται τα οχήματα, από τις λωρίδες όπου εξέρχονται και από την ένταση της κάθε λωρίδας.

Στο άρθρο [9] επισημαίνονται από τους ειδικούς κάποιες προσεγγίσεις για το συντονισμό των φαναριών καθώς εκτιμάται ότι είναι πρόβλημα μείζονος ενδιαφέροντος.

- Εγκατάσταση καθορισμένων περιόδων και φάσεων που είναι ικανές να μεγιστοποιήσουν την αναμενόμενη ροή κυκλοφορίας.
- Προσπάθεια προσαρμογής περιόδων και φάσεων είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα (στην προκειμένη περίπτωση διαλέγουμε την αυτόματη ρύθμιση) με βάση την εκάστοτε κατάσταση της ροής.
- Απλούστατη αλλαγή των φωτεινών σηματοδοτών με καθορισμένες περιόδους αλλά τυχαίες φάσεις (π.χ. μη συντονισμός των φαναριών μεταξύ τους).

Πιο συγκεκριμένα, οι ερευνητές έχουν υποστηρίξει τρεις μεθόδους που κάθε μια αντιστοιχεί σε μια από τις προσεγγίσεις:

- ❖ *The green-wave method*: αποτελεί κλασική μέθοδο για το συγχρονισμό των φαναριών. Αν η συνεχής εναλλαγή της κατάστασης των φαναριών πραγματοποιείται με καθυστέρηση προς τα οχήματα μεταξύ των διασταυρώσεων, τότε δεν χρειάζεται να σταματήσουν. Έτσι, τα ρεύματα ή “waves” κινούνται με την ίδια ταχύτητα που κινούνται τα οχήματα. Η μέθοδος αυτή έχει κάποια πλεονεκτήματα όταν τα περισσότερα οχήματα ακολουθούν τη ροή κατεύθυνσης των πράσινων ρευμάτων σε χαμηλή πυκνότητα. Από την άλλη, οχήματα που πηγαίνουν προς δύο διαφορετικές κατευθύνσεις σταματούν κάθε φορά που φτάνουν σε κυκλικά όρια και μπορούν εν μέρει να συγχρονιστούν. Παρομοίως και αυτά που πηγαίνουν σε τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις με την διαφορά ότι δεν υπάρχει κανένας συγχρονισμός με το πράσινο ρεύμα. Τέλος, αν ροή κίνησης πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από την αναμενόμενη, τα πράσινα ρεύματα κινούνται γρηγορότερα από τα υπόλοιπα οχήματα.

Η μέθοδος *green wave* αποτελείται από δύο φάσεις:

- *Intermittent*: κάποια από τα οχήματα κινούνται, κάποια άλλα όχι.
- *Gridlock*: όλα τα οχήματα είναι σταματημένα.

Όταν όμως υπάρχει περίπτωση τριπλής διασταύρωσης τότε συμπεριλαμβάνονται επτά φάσεις:

- *Free-flow*: όλα τα οχήματα κινούνται στη μέγιστη δυνατή ταχύτητα.
  - *Quasi-free-flow*: τα περισσότερα οχήματα κινούνται αλλά υπάρχουν μερικά που πρέπει να σταματήσουν στιγμιαία.
  - *Under-utilized intermittent*: κάποια οχήματα σταματούν κατά διάρκεια που άλλα κινούνται.
  - *Full capacity intermittent*: όλες οι διασταυρώσεις χρησιμοποιούνται στη μέγιστη ταχύτητα που τους επιτρέπεται ενώ άλλα οχήματα διασταυρώνουν συνεχώς.
  - *Overutilized intermittent*: Σε περίπτωση έντονης κίνησης κάποιες φορές μπλοκάρονται όλες οι κατευθύνσεις μιας διασταύρωσης αποτρέποντας κάθε όχημα να περάσει.
  - *Quasi-gridlock*: σχεδόν όλα τα οχήματα είναι σταματημένα αλλά αποτρέπεται το μπλοκάρισμα.
  - *Gridlock*: όλα τα οχήματα είναι σταματημένα. Εξαιτίας κάποιων περιστάσεων οι διασταυρώσεις είναι μπλοκαρισμένες και δεν κινείται κανένα όχημα προς καμία κατεύθυνση.
- ❖ *The self-organizing method*: κάθε διασταύρωση ακολουθεί τους ίδιους κανόνες που βασίζονται μόνο στις τοπικές πληροφορίες κίνησης. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αυτορυθμιζόμενα φανάρια (*self-organizing lights*) έχουν ενσωματωμένους αισθητήρες κίνησης. Ο κύριος στόχος είναι η καταμέτρηση των οχημάτων που υπάρχουν πίσω από το κόκκινο φανάρι κάθε διασταύρωσης. Έτσι το όχημα που μετριέται, προστίθεται σε ένα μετρητή που καταμετρά τον αριθμό οχημάτων που πλησιάζουν στη διασταύρωση στην οποία το φανάρι είναι κόκκινο. Όταν ο μετρητής φτάνει σε ένα

συγκεκριμένο όριο τότε το φανάρι γίνεται πράσινο. Αν από την άλλη τα οχήματα που καταφθάνουν είναι λίγα τότε ο μετρητής καθυστερεί περισσότερο στο να φτάσει στο όριο που του έχει καθοριστεί. Η μέθοδος αυτή προσαρμόζεται στην τρέχουσα πυκνότητα κίνησης και ανταποκρίνεται αποτελεσματικά τόσο όταν η ένταση της κίνησης είναι χαμηλή και δεν χρειάζεται να σταματά σχεδόν κανένα όχημα όσο όταν είναι μέτρια και υψηλή. Στη μέτρια κατάσταση της κυκλοφορίας, οι διασταυρώσεις χρησιμοποιούνται στο μέγιστο της χωρητικότητας τους. Όταν όμως η κίνηση είναι έντονη τότε τα περισσότερα οχήματα πρέπει να σταματήσουν. Κάθε διασταύρωση ξεχωριστά χρησιμοποιεί το self-organizing algorithm για να ρυθμίσει την κυκλοφορία. Ο αλγόριθμος self-organizing είναι μια αποτελεσματική και άμεση τεχνική που κατορθώνει να συγχρονίσει την κίνηση τουλάχιστον έξι διαφορετικών κατευθύνσεων και αποτρέπει τη συμφόρηση. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι πολλοί αρθρογράφοι έχουν υιοθετήσει την θεωρία ότι για την επίλυση του προβλήματος συγχρονισμού των φαναριών, ένας μηχανισμός προσαρμογής όπως το self-organization θα μπορούσε να λειτουργήσει καταλυτικά και αποτελεσματικότερα απ' ό,τι ένας καθορισμένος μηχανισμός που βασίζεται στην πρόβλεψη της κίνησης και το υποστηρίζουν ισχυριζόμενοι πως ο συγχρονισμός της κίνησης δεν είναι σταθερός, μεταβάλλεται συνεχώς και χρειάζεται μια τεχνική η οποία θα έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται σε κάθε αλλαγή της κατάστασης. Πρακτικά, ο αλγόριθμος αυτός “αναγκάζει” τα οχήματα που κινούνται ένα-ένα να σταματήσουν και αυξάνει την πιθανότητα να πλησιάσει το ένα όχημα στο άλλο έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα σύνολο. Όταν το σύνολο φτάσει τον προκαθορισμένο αριθμό οχημάτων, τα οχήματα έχουν την δυνατότητα να ζητήσουν την αλλαγή της κατάστασης του φαναριού από κόκκινο σε πράσινο πριν φτάσουν στη διασταύρωση.

- ❖ *Random method:* κάθε φανάρι έχει μια σταθερή περίοδο κατάστασής του με τυχαίες αντισταθμίσεις όπως για παράδειγμα ο μη συγχρονισμός μεταξύ των φαναριών. Μια ακόμη προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της κίνησης και τη μείωση της συμφόρησης είναι το πρωτόκολλο INCIDEnT, που αποτελεί λύση για τη διάδοση των δεδομένων μεταξύ των οχημάτων και ολόκληρου του δικτύου, τον εντοπισμό περιστατικών συμφόρησης και έλεγχο των δρόμων που υποφέρουν από κυκλοφοριακή συμφόρηση. Ο κύριος σκοπός του πρωτοκόλλου είναι η μείωση της συμφόρησης και η βελτίωση της ροής κυκλοφορίας μέσω ενός συστήματος μεταφοράς πληροφοριών μεταξύ των οχημάτων έτσι ώστε να μειωθεί ο μέσος χρόνος ταξιδιού, η κατανάλωση καυσίμων καθώς και η εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα (CO).

## 2.2 Αναδρομολόγηση χρηστών για την αποφυγή συμφόρησης μέσω συντομότερης διαδρομής

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα παρακάτω άρθρα:

1. Εντοπισμός και ταξινόμηση επιπέδων κυκλοφοριακής συμφόρησης [10].
2. Ενδοεπικοινωνία μεταξύ οχημάτων [11].
3. Ant Colony αλγόριθμος [12].

Σύμφωνα με το άρθρο [10], το πρωτόκολλο βασίζεται σε ένα νευρωνικό δίκτυο που ονομάζεται ANN (Artificial Neural Network), τύπου Multi-Layer Perceptron, το οποίο έχει σχεδιαστεί να εντοπίζει και να ταξινομεί τα επίπεδα της κυκλοφοριακής συμφόρησης στο δρόμο καθώς και να προτείνει νέες διαδρομές για να αποφύγουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση τα άλλα οχήματα που κοντεύουν. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο άρθρο αυτό χρησιμοποίησαν το ρεαλιστικά σενάρια που εξήγαγαν οι ερευνητές από το OpenStreetMap, το οποίο προσφέρει δεδομένα χάρτη. Στο άρθρο αυτό τίθενται σε εφαρμογή τα συστήματα επικοινωνίας Vehicle-to-Vehicle και Vehicle-to-Infrastructure για τον εντοπισμό της κατάστασης της κίνησης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τέσσερα μέρη:

1. Νευρωνικό δίκτυο ANN
2. Ανίχνευση και ταξινόμηση των επιπέδων κυκλοφοριακής συμφόρησης
3. Διάδοση πληροφορίας
4. Αλλαγή διαδρομής

Πιο συγκεκριμένα, το νευρωνικό δίκτυο ANN έχει την ιδιότητα της γενίκευσης και της προσαρμογής για τον εντοπισμό των επιπέδων συμφόρησης καθώς και τη δυνατότητα να προσαρμόζεται γρήγορα σε νέες καταστάσεις. Το προτεινόμενο αυτό δίκτυο βασίζεται στην ταχύτητα και πυκνότητα των οχημάτων η οποία υπολογίζεται συνήθως με την εφαρμογή GPS όπως αναφέρεται. Η διαδικασία της ανίχνευσης και ταξινόμησης της συμφόρησης εκτελείται περιοδικά από όλα τα οχήματα ανά δύο δευτερόλεπτα. Αυτό σημαίνει ότι η πληροφορία που θα λαμβάνεται είναι δυναμική και κατά συνέπεια ακριβής και έγκυρη σχετικά με την κατάσταση που επικρατεί στο δρόμο τη δεδομένη στιγμή. Επίσης, κάτι τέτοιο επιτρέπει στην ταξινομητή να δημιουργήσει μια σωστή σύγκλιση του επιπέδου συμφόρησης.

Το νέο προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιεί μηνύματα ελέγχου για να διαθέσει οποιαδήποτε πληροφορία σε όλα τα οχήματα. Το κάθε μήνυμα περιέχει την τοποθεσία, ταχύτητα και κατεύθυνση του οχήματος καθώς και την κατάσταση που επικρατεί στο δρόμο που κινείται το

όχημα εκείνη τη στιγμή. Στη συνέχεια, όταν χρειάζεται να διαδοθεί μια πληροφορία, τα οχήματα δημιουργούν ένα μήνυμα το οποίο θα σταλθεί σε όλα τα οχήματα που βρίσκονται εντός εμβέλειας της κρίσιμης περιοχής Area of Interest (AoI). Με την παραλαβή του πακέτου πληροφορίας, κάθε όχημα ελέγχει αν βρίσκεται εντός της AoI αναλύοντας τη γεωγραφική του θέση. Αν δεν βρίσκεται σε αυτή την περιοχή, το όχημα καταστρέφει το μήνυμα γιατί προφανώς δε του είναι απαραίτητο. Αν από την άλλη βρίσκεται εντός περιοχής, το όχημα ελέγχει το επίπεδο της συμφόρησης και προγραμματίζει την αναμετάδοση του μηνύματος. Τα μηνύματα αυτά συνεισφέρουν επίσης στην αναδρομολόγηση του οχήματος. Όταν ένα όχημα λάβει το μήνυμα, ελέγχει αν η πληροφορία του μηνύματος βασίζεται στην κατάσταση που επικρατεί στην διαδρομή που κινείται. Αν αντιληφθεί ότι σε ένα τμήμα της διαδρομής του υπάρχει συμφόρηση στην κίνηση, ξεκινά τη διαδικασία αναζήτησης νέας διαδρομής και αποθηκεύει την πληροφορία. Υποθέτοντας ότι η κίνηση είναι μέτρια ή καθαρή από οχήματα, το μόνο που κάνει το όχημα είναι να αποθηκεύσει την πληροφορία. Σύμφωνα με τα πειράματα και τις προσομοιώσεις που έχουν γίνει, το INCIDEnT έχει σημειώσει μεγάλα ποσοστά επιτυχίας στην εκτίμηση του επιπέδου της κυκλοφοριακής συμφόρησης, κατορθώνοντας επίσης να μειώσει την εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα, την κατανάλωση καυσίμων και το μέσο χρόνο διαδρομής. Ένας ακόμη τρόπος που θα μπορέσει να ενισχύσει τη συνολική προσπάθεια των ερευνητών και προτείνεται στο άρθρο [11] είναι η ανταλλαγή πληροφοριών μέσω ενδοεπικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο όμως, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο geocast. Το κίνητρο για τη χρήση ενός τέτοιου πρωτοκόλλου αποτελείται από τρεις πτυχές:

- ❑ Η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων θα πραγματοποιείται μόνο στα οχήματα που βρίσκονται εντός γεωγραφικής περιοχής και είναι γνωστή ως ZOR (Zone of Revelance).
- ❑ Το πρωτόκολλο αυτό έχει την ικανότητα να χρησιμοποιεί multicast tree για να αναμεταδώσει πληροφορίες που χρειάζονται τα οχήματα.
- ❑ Έχει απλουστευτεί τόσο ώστε να εξυπηρετεί τον έναν και μοναδικό σκοπό, να προμηθεύει τα οχήματα που βρίσκονται εντός ζώνης με πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση στο δρόμο.

Όταν το όχημα λάβει αυτή την πληροφορία με κάποιο μήνυμα, ελέγχεται αν το μήνυμα αυτό στάλθηκε από όχημα που βρίσκεται εντός ζώνης με τη βοήθεια του GPS. Σύμφωνα με το άρθρο υπάρχουν πολλοί τρόποι για να υπολογίσουν το επίπεδο της συμφόρησης. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο προτείνει ένα νέο τρόπο, που αναφέρεται ως δείκτης συμφόρησης (congestion index) και υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$CI = \frac{T - T_0}{T_0}$$

Ο δείκτης συμφόρησης μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ολόκληρη περιοχή ή σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του οδικού δικτύου (π.χ. μεταξύ δύο διασταυρώσεων). Το όχημα που κινείται σε αυτό το



τμήμα του οδικού δικτύου θα υπολογίζει το χρόνο διαδρομής από τη στιγμή που εισέρχεται στο τμήμα μέχρι τη στιγμή που θα του ζητηθεί η πληροφορία από άλλα οχήματα. Επιπρόσθετα, στο άρθρο προτείνεται ένας αλγόριθμος ο οποίος εντοπίζει τη διαδρομή με την όσο το δυνατόν λιγότερη κίνηση. Λαμβάνουν υπόψιν τους οι ερευνητές μια δυναμική παραλλαγή του αλγορίθμου Dijkstra για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ του σημείου εκκίνησης και του τελικού προορισμού του οχήματος. Εξηγούν επίσης ότι δύο λόγοι τους οδήγησαν να κάνουν μια παραλλαγή στο αλγόριθμο. Πρώτον, σε αντίθεση με την απόσταση που είναι μια σταθερή παράμετρος για τον αλγόριθμο Dijkstra, ο δείκτης συμφόρησης παρόλα αυτά είναι δυναμικός καθώς οι συνθήκες στο δρόμο μεταβάλλονται συνεχώς. Δηλαδή, ενώ ένα όχημα κινείται σε μια διαδρομή για να φτάσει στον προορισμό του έχοντας επιλέξει να ακολουθήσει μια διαδρομή που δεν έχει πολύ κίνηση, μπορεί αυτή η κατάσταση να μεταβληθεί δυναμικά οποιαδήποτε στιγμή, γεγονός που οδηγεί τα οχήματα να υπολογίσουν εκ νέου διαφορετική διαδρομή. Δεύτερον, η διαδρομή με την χαμηλότερη ένταση κίνησης οχημάτων πολλές φορές μπορεί να μην είναι η ιδανικότερη επιλογή για ένα όχημα από άποψη κόστους και απόστασης.

Οι αλγόριθμοι ανίχνευσης συμφόρησης έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα για να εντοπίζουν οδικά τμήματα μεγάλης έντασης κίνησης. Στο άρθρο [13] παρουσιάζουν οι ερευνητές έναν αλγόριθμο, γνωστό ως Decision making Algorithm, ο οποίος προσπαθεί να εντοπίσει συμφόρηση για να αποφευχθεί εγκαίρως. Αν ένα όχημα συναντήσει κάποιο ατύχημα ή κάποιου είδους συμφόρηση στο οποίο έχει κολλήσει, δημιουργεί ένα προειδοποιητικό μήνυμα για να πληροφορήσει τα υπόλοιπα οχήματα που βρίσκονται κοντά. Αφού ενημερωθούν όλα τα οχήματα, τίθεται σε λειτουργία ο αλγόριθμος που προτείνεται και επιτρέπει στο όχημα να λάβει μια λογική απόφαση για το αν θα συνεχίσει την πορεία του ή αν θα ψάξει νέα διαδρομή. Υποστηρίζεται ότι μια τέτοια διαδικασία θα μπορέσει να στεφθεί με επιτυχία με τη βοήθεια των τύπων επικοινωνίας Vehicle-to-Vehicle και Vehicle-to-Infrastructure. Σημειώνεται ότι τα οχήματα που συνεισφέρουν σε τέτοιους είδους επικοινωνία ονομάζονται κόμβοι. Πρακτικά, η διαδικασία του αλγορίθμου ακολουθεί τέσσερα βήματα:

- Λήψη πληροφοριών: η βασικότερη πληροφορία είναι η λήψη δεδομένων από το περιβάλλον στο οποίο κινείται το όχημα. Κάθε όχημα θα πρέπει να έχει ενσωματώσει μία ή περισσότερες συσκευές που είναι ικανές να συλλέγουν πληροφορίες όπως η τοποθεσία και η ταχύτητα.
- Διανομή πληροφοριών: η πληροφορία που συλλέγει το κάθε όχημα θα πρέπει να μεταδοθεί στα υπόλοιπα. Θα πρέπει το κάθε όχημα να διαθέτει μια συσκευή η οποία επιτρέπει την μετάδοση και λήψη πληροφορίας δημιουργώντας ένα vehicular ad-hoc network (VANET).
- Διάδοση της απόφασης: αφού λάβει το όχημα την πληροφορία σχετικά με την κατάσταση που επικρατεί στο οδικό δίκτυο και πάρει μια απόφαση για το αν συνεχίσει την πορεία του ή όχι, στη συνέχεια θα πρέπει να διαδώσει την απόφαση που θα πάρει έτσι ώστε να επωφεληθούν τα οχήματα που δεν είναι σε θέση να δεχτούν κάποια πληροφορία.

- Λήψη απόφασης: όταν ληφθεί η πληροφορία είτε από οχήματα είτε από κάποια μονάδα του οδικού δικτύου, θα πρέπει να παρθεί μια απόφαση έτσι ώστε να εντοπιστεί η συμφόρηση. Η πληροφορία αυτή στέλνεται από οχήματα που έχουν επηρεαστεί άμεσα από την συμφόρηση προς όλα τα οχήματα που βρίσκονται κοντά.

Στο [12] όπως αναφέρεται, εφαρμόστηκαν δύο τεχνικές για τη βελτιστοποίηση της κίνησης. Ο πρώτος αλγόριθμος είναι ο γενετικός και η δεύτερη τεχνική είναι το Hill-Climbing. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε δίκτυα δρόμων μεσαίου μεγέθους με τη βοήθεια του λογισμικού TRANSYT-7F. Μία νέα προσέγγιση που έχει γίνει και αναφέρεται στο άρθρο [12] είναι ο αλγόριθμος ACOTRANS για τον έλεγχο της κίνησης ανά περιοχή. Ο αλγόριθμος αυτός αποτελείται από δύο μέρη, τον αλγόριθμο ACO και το μοντέλο κίνησης TRANSYT-7F. Ο ACO είναι μία από τις πρόσφατες μεθόδους βελτιστοποίησης του χρονισμού του σήματος βασιζόμενος στη θεωρία συμπεριφοράς των μυρμηγκιών. Πιο συγκεκριμένα, το κύριο σκεπτικό αυτού του αλγορίθμου είναι η πραγματοποίηση έμμεσης επικοινωνίας σε τοπικό επίπεδο μεταξύ των ατόμων ενός πληθυσμού τεχνητών μυρμηγκιών. Ο πυρήνας της συμπεριφοράς των μυρμηγκιών είναι η επικοινωνία μεταξύ τους, που τα καθιστά ικανά να βρίσκουν το κοντινότερο μονοπάτι μεταξύ της φωλιάς και της τροφής τους μυρίζοντας φερομόνες, χημικά στοιχεία τα οποία αφήνουν στο έδαφος καθώς περπατούν. Έτσι, όταν όλα τα μυρμηγκία βρουν την βέλτιστη λύση, τότε εφαρμόζουν τον κανόνα της ενημέρωσης των φερομονών που αποτελείται από δυο φάσεις: Την φάση της εξάτμισης, όπου ένα κομμάτι της φερομόνης εξατμίζεται και τη φάση της ενίσχυσης όπου κάθε μυρμηγκί καταθέτει μια ποσότητα φερομόνης. Από την άλλη, ο TRANSYT-7F είναι ένα μοντέλο κίνησης που υπολογίζει το δείκτη απόδοσης (Performance Index), ο οποίος μεταφράζεται ως ο αριθμός διαφορετικών τρόπων προσομοίωσης της κίνησης ρυθμίζοντας το χρονισμό του σήματος.

Σκοπός του άρθρου [18] είναι η έρευνα νέων μεθόδων που συνδυάζουν οχήματα, πεζούς και τηλεπικοινωνίες και όλα αυτά μαζί συντελούν την “ευφυή κινητικότητα” έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της έξυπνης κινητικότητας και να σχεδιαστούν εκ νέου έξυπνες πόλεις. Από την άλλη, συζητούν για τον συνδυασμό της πολυ-αντικειμενικής βελτιστοποίησης (Multi-Objective Optimization) με την πολυ-κριτηριακή εξαγωγή αποφάσεων (Multi-criteria decision making) που θα μπορέσει να εφαρμοστεί σε ένα αστικό περιβάλλον καλύπτοντας τις ανάγκες των πτυχών στον οικονομικό, τεχνολογικό και περιβαλλοντολογικό τομέα. Υποστηρίζουν ότι η διαδικασία του Decision Making θα επιφέρει θετικά αποτελέσματα και στην κίνηση της κυκλοφορίας των οχημάτων αλλά και στη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Τονίζουν ότι μια τέτοια προσπάθεια θα καταφέρει να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των ατυχημάτων. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί το παρόν άρθρο ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Χρήση εργαλείων για τη ρύθμιση της συμπεριφοράς, των διασταυρώσεων και της κίνησης των πεζών και οχημάτων
2. Χρήση προσομοιωτή δικτύων για την υλοποίηση της Vehicle-to-X επικοινωνίας

3. Χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την ολοκλήρωση μελετών ικανές να εξετάσουν την πολυπλοκότητα τους και να εξάγουν αξιοπρεπή αποτελέσματα σε αποδεκτά χρονικά πλαίσια πραγματικού περιβάλλοντος
4. Χρήση μεθόδων ανάλυσης για τον εντοπισμό δυναμικών παραμέτρων σε ένα σύνολο δεδομένων
5. Χρήση τεχνικών στατιστικής μάθησης και εξόρυξης δεδομένων για την ανάλυση δεδομένων
6. Χρήση Multi-Criteria Decision Making μεθόδων βασισμένες στη μέθοδο Monte Carlo για τη ρύθμιση του χαρακτήρα του προβλήματος
7. Εφαρμογή μιας τεχνολογίας (framework) βασισμένης σε δομημένα δεδομένα για την ενεργοποίηση πλήθους παρόμοιων συστημάτων έτσι ώστε να εξαχθούν έγκυρα αποτελέσματα

Το σύστημα ελέγχου της κυκλοφορίας που χρησιμοποιούν για την προσαρμογή της καθυστέρησης και των στάσεων των οχημάτων είναι το SCOOT ενώ το πρόγραμμα προσομοίωσης είναι το VISSIM.

### 2.3 Αποτελέσματα των μεθοδολογιών και τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί

Το βασικό μέρος του άρθρου [8] στο τεχνικό κομμάτι του γενετικού αλγορίθμου σε συνδυασμό με μια προσαρμοσμένη έκδοση του αλγορίθμου Dijkstra που αναπτύχθηκε είναι ο εντοπισμός των απαραίτητων ιδιοτήτων της γενικής συμπεριφοράς της κυκλοφορίας. Σύμφωνα με τους αρθρογράφους, έπειτα από την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης τους κατάφεραν να κάνουν δεκτές όλες τις παραμέτρους που σχετίζονται με το χρονισμό των φωτεινών σηματοδοτών. Το αποτέλεσμα αυτό έχει προκύψει διότι ο γενετικός αλγόριθμος βασίζεται στις δικές του παραμέτρους και οδηγεί στη βελτιστοποίηση φωτεινής σηματοδότησης. Στο άρθρο [9], όπου αναπτύχθηκε ο self-organizing αλγόριθμος και η πράσινο ρεύμα μέθοδος, οι αναλυτές εξήγαγαν το συμπέρασμα ότι αλγόριθμοι βρίσκονται πολύ κοντά στο να εντοπίσουν τη βέλτιστη λύση του προβλήματος της κυκλοφορίας. Από την άλλη, πιστεύουν ότι αυτό είναι σχετικό καθώς δεν υπήρξαν προηγουμένως δείκτες αναφοράς για τη σύγκριση των επιδόσεων παραπάνω του ενός ελεγκτή φωτεινής σηματοδότησης. Το πρωτόκολλο INCIDEnT στο [10] έχει οδηγήσει τους αρθρογράφους στο συμπέρασμα ότι οι προσομοιώσεις που αναπτύσσουν πρωτόκολλα όπως αυτό μπορούν να εντοπίσουν και να εκτιμήσουν με ακρίβεια τα επίπεδα κυκλοφοριακής συμφόρησης και να μειώσουν την καθυστέρηση, δηλαδή το χρόνο διαδρομής από την αφετηρία στον τελικό προορισμό του οχήματος.

Στο [11] σκοπός των ερευνητών ήταν να δείξουν ότι μέθοδοι που βασίζονται στην ενδοεπικοινωνία μεταξύ των οχημάτων και οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται είναι ακριβείας και αντιστοιχούν σε πραγματικά δεδομένα καθώς αποστέλλονται απευθείας από το όχημα που βρίσκεται στο συμβάν. Υποστηρίζεται ότι μπορούν να φανούν αποτελεσματικοί στην ανάπτυξη εφαρμογών που ασχολούνται με την κίνηση και καθοδήγηση διαδρομής. Συνεχίζοντας, το άρθρο [12] αναφέρεται στο αλγόριθμο Ant Colony. Απαρτίζεται από δύο τμήματα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα οποία έχουν συγκριθεί μεταξύ τους από τους αρθρογράφους ως προς την αποτελεσματικότητά τους και έδειξαν πως το ACOTRANS επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα και βελτιώνει περισσότερο το δείκτη απόδοσής ενός δικτύου. Το [13] αναφέρεται στον Decision Making αλγόριθμο και μετά από πειράματα και προσομοιώσεις κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συνεισφορά του στην ροή κίνησης είναι πολύ μεγάλη καθώς ο σκοπός που προσπαθεί να πετύχει αποτελεί λύση στο πολύ σοβαρό πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Στο άρθρο [17] αναπτύχθηκε ο γενετικός αλγόριθμος και το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι οι βελτιώσεις που πραγματοποιούνται αν λάβουμε υπόψιν την αναδρομολόγηση είναι πολύ μεγαλύτερες όταν το επίπεδο της κυκλοφοριακής συμφόρησης στο δίκτυο είναι υψηλό. Το [18] αναφέρεται στο συνδυασμό τριών αρχών: οχήματα, πεζοί, τηλεπικοινωνίες. Το αποτέλεσμα που έχουν εξάγει οι ερευνητές αυτού του άρθρου είναι ότι η συνεργασία του Multi-Objective Optimization και του Multi-Criteria Decision Making οδηγούν σε μία πρωτοφανή σχεδίαση των μελλοντικών “έξυπνων πόλεων” στις οποίες συμβιώνουν αρμονικά οι παραπάνω τρεις αρχές που αναφέρθηκαν.

## 2.4 Διαφορά των ήδη εφαρμοσμένων τεχνικών με τη δική μας έρευνα

Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί και οι μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί έως τώρα στο οδικό δίκτυο σύμφωνα με τα παραπάνω άρθρα αποσκοπούν στην μείωση της καθυστέρησης, μείωση του μονοξειδίου του άνθρακα, εντοπισμό βέλτιστης διαδρομής και αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης. Κατάφεραν να μειώσουν το μέσο χρόνο διαδρομής ενός οχήματος με  $x$  αφετηρία και  $y$  προορισμό με τη βοήθεια των αλγορίθμων που προαναφέρθηκαν. Επίσης, ένα μεγάλο επίτευγμά τους είναι η τεχνική εντοπισμού και εκτίμησης της κυκλοφοριακής συμφόρησης έτσι ώστε να αποφευχθεί εγκαίρως από τα οχήματα που πλησιάζουν στο σημείο.

Η δική μας προσέγγιση στο θέμα της συμφόρησης έχει την εξής διαφορά: ενώ προσπαθούμε μέσω των προσομοιώσεων να μειώσουμε το μέσο χρόνο ταξιδιού, να βοηθήσουμε στην αποφυγή συμφόρησης, αναζητώντας βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα, εστιάζουμε στη βελτιστοποίηση της ροής κίνησης σε ελεγχόμενη από φωτεινούς σηματοδότες διασταύρωση για την ομαλή πορεία των οχημάτων και την αποφυγή ατυχημάτων, καθώς ο αριθμός των ατυχημάτων στις διασταυρώσεις το 2017 έχει σημειώσει τεράστιο άνοδο. Η μείωση του ποσοστού των ατυχημάτων συνεπάγεται στην περίπτωσή μας με τη μείωση της κίνησης. Είναι το κομβικό αυτό σημείο που ελέγχει το κύριο τμήμα του οδικού δικτύου και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

Ο πίνακας 1 δείχνει συνοπτικά ένα τμήμα του τι ακολούθησε στο κεφάλαιο 2, που εστίασαμε, τι αναλύσαμε. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται ο αριθμός της πηγής, η δεύτερη στείλει περιλαμβάνει την τεχνική/μέθοδο/αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στο κάθε άρθρο. Στη συνέχεια, στη τρίτη στήλη αναφέρεται το πρόγραμμα/λογισμικό που εφαρμόστηκε από τον κάθε αρθρογράφο και οδήγησε στο αποτέλεσμα και στην τέταρτη και τελευταία στήλη αναγράφεται το περιβάλλον στο οποίο εφαρμόστηκαν οι προτεινόμενες τεχνικές και αλγόριθμοι.

Source	Optimization	Transport Modeling	Urban Environment
[8]	Genetic Algorithm/Dijkstra's Algorithm	Sumo, Veins, Vissim, ns-3	Brno, Czech Republic (location: Konecneho square)
[12]	Hill-Climbing/Genetic Algorithm	Transyt-7f	medium sized road networks
[5]	Dynamic Traffic Assignment (DTA)	Sumo (Simulation of urban mobility)/TRACI	Brooklyn, Ny,USA and Newark,NJ,USA
[17]	Genetic Algorithm (GA)	Saturn	Chester, UK

Πίνακας 1: Κενό στη γνώση (Gap to Knowledge)

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>- Μεθοδολογία του πρακτικού τμήματος της εργασίας

### 3.1 Έλεγχος οδικής κυκλοφορίας

Οι λύσεις που προτείνονται για το πρόβλημα του ελέγχου της οδικής κυκλοφορίας εστιάζουν στην εύρεση της βέλτιστης ρύθμισης των φωτεινών σηματοδοτών στις διασταυρώσεις. Φυσικά υπάρχουν και άλλοι τρόποι που μπορούν επίσης να συμβάλλουν σε μια καλύτερη διαχείριση της οδικής κυκλοφορίας, π.χ. φωτεινές επιγραφές που είναι εγκατεστημένες σε διάφορα τμήματα του οδικού δικτύου, συνήθως βρίσκονται σε μικρή απόσταση πάνω από το έδαφος για να φαίνονται καλύτερα, που προειδοποιούν τον οδηγό είτε η τοποθέτηση τροχονόμων σε κάποια κομβικά σημεία. Παρόλα αυτά όμως, η βασικότερη λύση που συνεισφέρει ουσιαστικά, άμεσα και αποτελεσματικά σε ένα οδικό δίκτυο είναι οι φωτεινοί σηματοδότες. Το τεράστιο αυτό πρόβλημα της ρύθμισης της κυκλοφοριακής κίνησης απαιτεί εντονότερη κινητοποίηση για την επίλυσή του. Βέβαια, η συμπεριφορά οδήγησης τις περισσότερες φορές εξαρτάται από τον οδηγό καθώς είναι ο πρωταγωνιστής στη λήψη αποφάσεων και η οδηγική του ικανότητα καθορίζει αν το αποτελέσματα θα είναι αρνητικό ή θετικό.

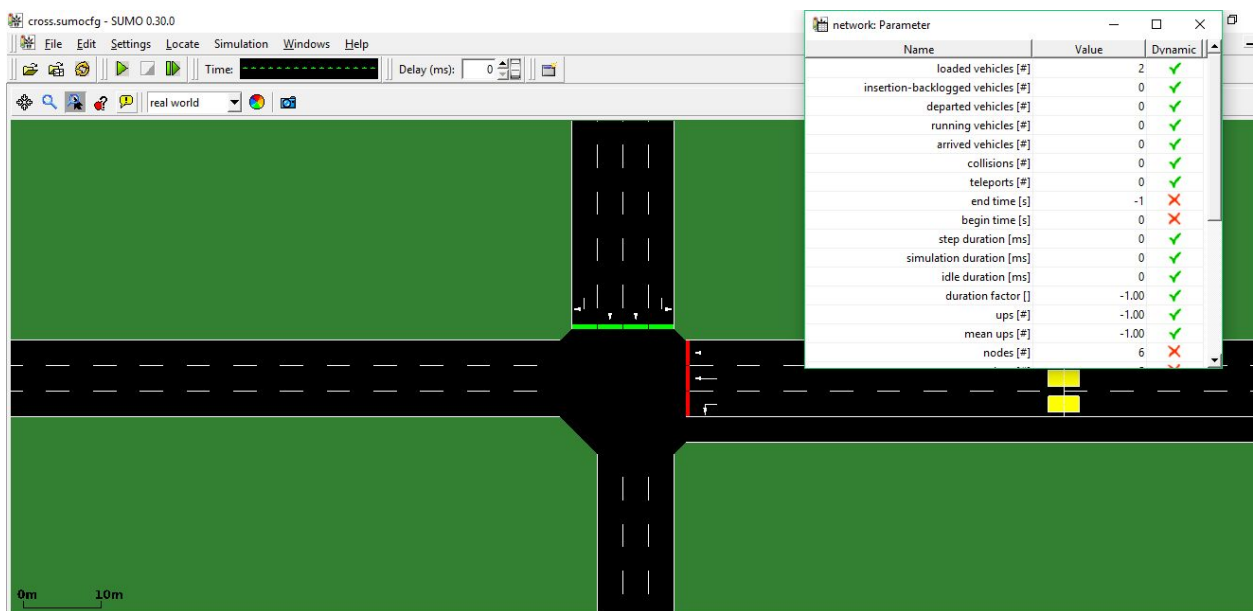
### 3.2 Εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στο πρακτικό μέρος της προσομοίωσης

#### 3.2.1 Προσομοιωτής - Sumo-Gui (Simulation of Urban Mobility)

Στην εργασία αυτή το κύριο πρόγραμμα προσομοίωσης είναι το SUMO . Το πρόγραμμα προσομοίωσης SUMO είναι διαθέσιμο στην αγορά από το 2001. Είναι ένας ελεύθερος και ανοιχτός προσομοιωτής κίνησης που επιτρέπει τη σχεδίαση και μοντελοποίηση συστημάτων οδικής κυκλοφορίας σε ένα γραφικό περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων των οδικών οχημάτων, των δημοσίων συγκοινωνιών και των πεζών θέτοντας κάποιες παραμέτρους όπως η μέγιστη ταχύτητα, επιτάχυνση κ.α. Η ανάπτυξη και εφαρμογή του προσομοιωτή πραγματοποιείται από το Ινστιτούτο Συστημάτων Μετακίνησης του γερμανικού κέντρου αεροδιαστημικής (DLR). Χρησιμοποιεί μοντέλο κίνησης και συνεχείς μεταβλητές για τη λεπτομερή αναπαράσταση του χώρου ενώ διακριτές για την αναπαράσταση του χρόνου. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι η προσομοίωσή μας θα χρησιμοποιήσει τρεις φάσεις εναλλαγής σηματοδότησης (πράσινο, πορτοκαλί, κόκκινο).

Στη συνέχεια, ένα από τα προσόντα που καθιστούν το SUMO ως έναν από τους δημοφιλέστερους προσομοιωτές παγκοσμίως είναι η δυνατότητα ελέγχου των φωτεινών σηματοδοτών σε ένα οδικό δίκτυο είτε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (χειροκίνητα) είτε με τη φόρτωση αποθηκευμένων εντολών και ρυθμίσεων κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης

(αυτόματα). Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε αυτό το πρόγραμμα προσομοίωσης είναι ότι διαθέτει κατάλληλα σχεδιασμένο περιβάλλον που μας δίνει τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε μια διασταύρωση ενός οδικού δικτύου με όσο πιο μεγάλη ακρίβεια και ρεαλιστικότητα γίνεται [14]. Επίσης, καλό θα ήταν να αναφερθεί ότι έχει χρησιμοποιηθεί από ερευνητικές εταιρίες του χώρου όπως η Catapult Transport Systems. Προσφέρει ευκολία στην πρόσβαση και διαχείρισή του καθώς διαθέτει εργαλεία και βιβλιοθήκες που παρέχουν δυνατότητες προσομοίωσης πραγματικών προβλημάτων στο οδικό δίκτυο όπως η πρόκληση ατυχήματος ή η παραβίαση κόκκινου φαναριού. Ο όρος gui (graphical user interface) προσδίδεται στο γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη. Με τη βοήθεια αυτού λοιπόν μπορούμε να δούμε πως είναι το γραφικό περιβάλλον του προσομοιωτή που επιλέξαμε και να κατανοήσουμε καλύτερα τις λειτουργίες του όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.



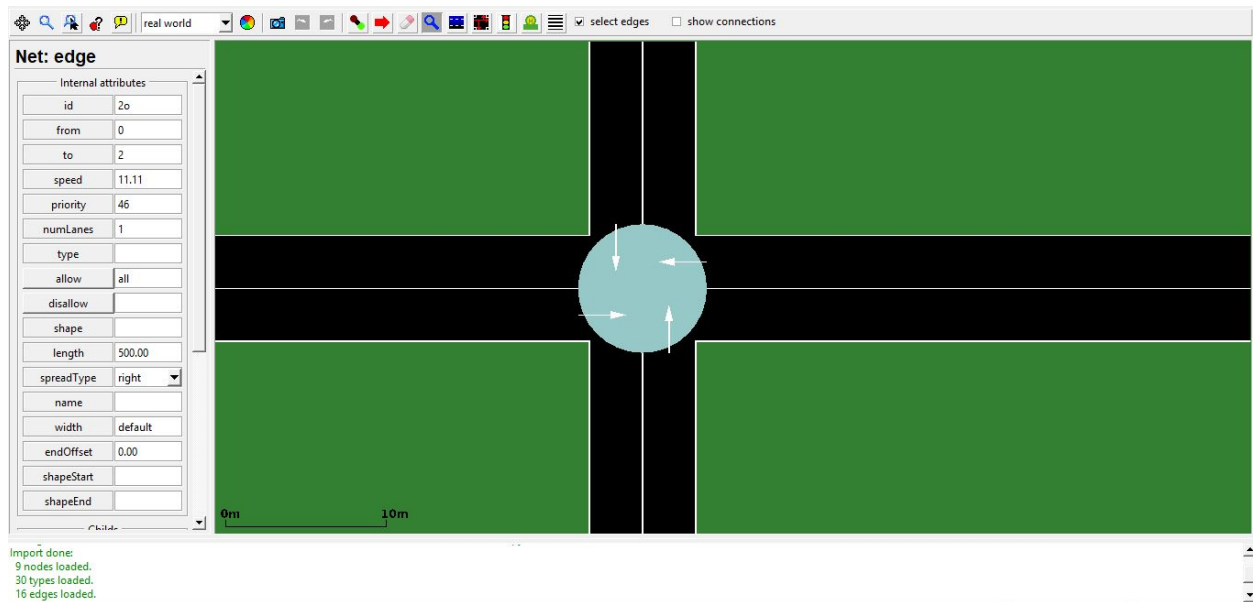
Εικόνα 3: Περιβάλλον προσομοίωσης διασταύρωσης στο Sumo-gui

Κάποια από τα ενσωματωμένα εργαλεία που παρέχει το Sumo για την ομαλή και αποτελεσματική του λειτουργία ώστε να οριστεί ένα δίκτυο είναι τα εξής:

*Netconvert* [15]: εφαρμογή στη γραμμή εντολών (command line), δέχεται το λιγότερο μια παράμετρο, μετατρέπει αρχεία .xml

*NetGenerate* [16]: δημιουργεί τυχαία οδικά δίκτυα

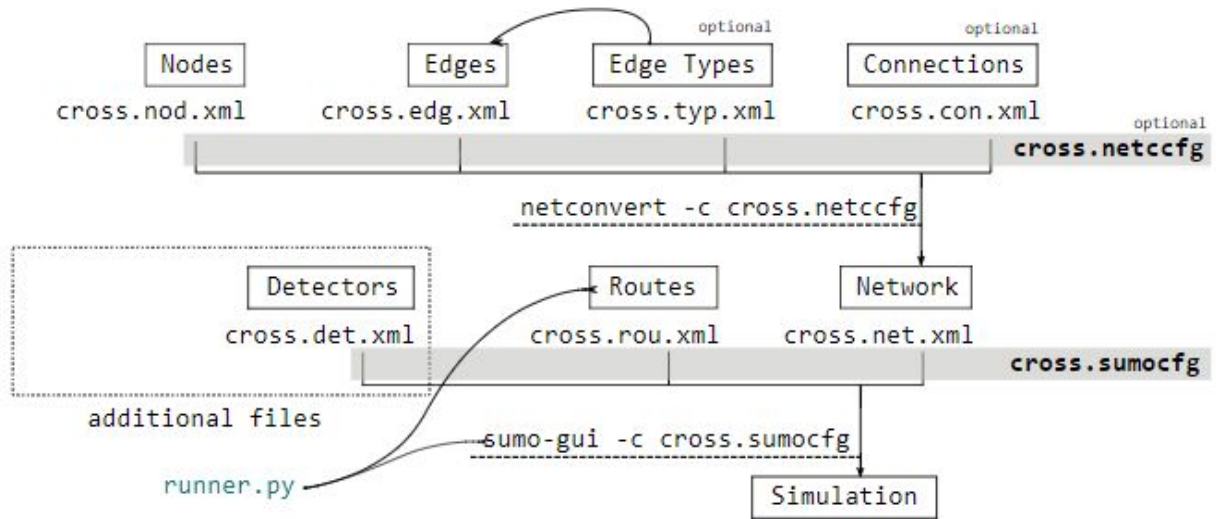
*NetEdit* [22]: μπορεί να δημιουργήσει ένα δίκτυο και να ρυθμίσει τα .xml αρχεία και γενικά όλες τις πτυχές του δικτύου όπως φαίνεται στην εικόνα 4



Εικόνα 4: Περιβάλλον ρύθμισης δικτύου μέσω NETEDIT

Η δημιουργία ενός δικτύου στο Sumo απαιτεί την τη σύνδεση των αρχείων που περιέχουν τους κόμβους \*.nod, τις ακμές \*.edg, τη σύνδεση των λωρίδων \*.con. Η συνένωση των αρχείων αυτών εξάγουν το αποτέλεσμα σε αρχείο \*.net. Στη συνέχεια, πρέπει να δημιουργηθεί η σύνδεση μεταξύ των αρχείων που περιέχουν τις διαδρομές που θα ακολουθήσουν τα οχήματα. Αφού συνδέσουμε τα αρχεία που περιέχουν τους κόμβους, τις ακμές και τη συνδεσιμότητα των λωρίδων, με τη βοήθεια του netconvert είμαστε πλέον έτοιμοι να δημιουργήσουμε το δίκτυο. Στην εικόνα 6 παρακάτω απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν και αλληλεπιδρούν τα εργαλεία και οι μέθοδοι ενός ολοκληρωμένου σεναρίου προσομοίωσης οδικού δικτύου.





Εικόνα 5: Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας και της δομής μιας προσομοίωσης οδικού δικτύου

Χρησιμοποιώντας την εντολή `netconvert -c *.netccfg` στο τερματικό λαμβάνουμε το ακόλουθο μήνυμα επιβεβαίωσης της εικόνας 6. Αφού δημιουργήσουμε το οδικό μας δίκτυο, με τη βοήθεια των επιπρόσθετων αρχείων που θα βοηθήσουν να κυλήσει ομαλά η προσομοίωση, το αρχείο που παράγει τις διαδρομές και εισάγει τα οχήματα σε συνδυασμό με το `sumo-gui` αποτελούν τον κύριο μοχλό της προσομοίωσης που είναι το κύριο αρχείο `*.cfg`.

```

Import done:
 9 nodes loaded,
16 edges loaded.
Removing self-loops... done (0ms).
Removing empty nodes... done (0ms).
 0 nodes removed.
Moving network to origin... done (0ms).
Computing turning directions... done (0ms).
Sorting nodes' edges... done (0ms).
Computing node shapes... done (12ms).
Computing edge shapes... done (9ms).
Computing node types... done (0ms).
Computing priorities... done (1ms).
Computing approached edges... done (0ms).
Computing approaching lanes... done (0ms).
Dividing of lanes on approached lanes... done (8ms).
Processing turnarounds... done (0ms).
Rechecking of lane endings... done (0ms).
Assigning nodes to traffic lights... done (0ms).
Computing traffic light control information... done (0ms).
Computing node logics... done (0ms).
Computing traffic light logics... done (1ms).
 1 traffic light(s) computed.
Building inner edges... done (0ms).
-----
Summary:
Node type statistics:
Unregulated junctions      : 0
Priority junctions         : 9
Right-before-left junctions : 0
Network boundaries:
Original boundary   : -510.00,-510.00,510.00,510.00
Applied offset      : 510.00,510.00
Converted boundary  : 0.00,0.00,1020.00,1020.00
-----
Writing network... done (35ms).
Success.
  
```

Εικόνα 6: Μήνυμα επιβεβαίωσης δημιουργίας δικτύου

Η εικόνα 6 παραπάνω αναφέρει κάποιες λεπτομέρειες που υπάρχουν δημιουργώντας το οδικό δίκτυο όπως είναι ο αριθμός των κόμβων, ακμών κ.α. Πρακτικά, προσπαθεί να προσφέρει μια σφαιρική εικόνα στο τι έχουμε προσαρμόσει στο οδικό δίκτυο για να λειτουργεί σε πραγματικά δεδομένα. Αφού φορτωθεί το δίκτυο έτσι όπως φαίνεται παραπάνω κατά τη διάρκεια τερματισμού της προσομοίωσης είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα, το δίκτυο θα αποφορτωθεί εξάγοντας όλα τα οχήματα που έχουν εισέλθει και επιστρέφοντας στην αρχική του κατάσταση.

## 3.2.2 Γλώσσες προγραμματισμού

### 3.2.2.1 Python

Η γλώσσα προγραμματισμού που επιλέχθηκε για το σχεδιασμό της προσομοίωσης του σεναρίου και θα αναπτυχθεί στο περιβάλλον του Eclipse Neon είναι η Python [19]. Είναι ιδανική γλώσσα για την υλοποίηση της σύνδεσης ανάμεσα στο Sumo και στο Monte Carlo. Είναι μια ισχυρή γλώσσα προγραμματισμού με αποδοτικές δομές δεδομένων υψηλού επιπέδου και πραγματοποιεί μια απλή αλλά αποτελεσματική προσέγγιση στον αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό. Αναπτύχθηκε από τον Guido Van Rossum το 1991. Οι δυναμικοί τύποι της μαζί με την διερμηνευόμενη γλώσσα την καθιστούν ιδανική για τη δημιουργία σεναρίων εντολών και για ταχεία ανάπτυξη εφαρμογών σε πολλούς τομείς και στις περισσότερες πλατφόρμες όπως Linux, Windows, FreeBSD, Macintosh, Solaris, OS/2, Amiga, AROS, AS/400, BeOS, PlayStation, Sharp Zaurus, Windows CE κ.α. Η Python χαρακτηρίζεται ως:

- ★ Διερμηνευόμενη: όταν τρέχει πρόγραμμα γραμμένο σε python δε χρειάζεται να μεταγλωττιστεί σε δυαδικό αρχείο γιατί τρέχει απευθείας από τον πηγαίο κώδικα. Εσωτερικά μετατρέπει τον πηγαίο κώδικα σε μια ενδιάμεση μορφή που ονομάζεται bytecode, το μεταφράζει στη γλώσσα του υπολογιστή και το τρέχει.
- ★ Αντικειμενοστρεφής: Το προγράμματά της δομούνται πάνω σε αντικείμενα που συνδυάζουν δεδομένα και λειτουργικότητα. Διαθέτει πολύ απλό αλλά ισχυρό τρόπο για αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό σε σύγκριση με C++ και JAVA.
- ★ Επεκτάσιμη: Παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης ενός κώδικα C/C++ που είναι ενσωματωμένος σε πρόγραμμα python γρήγορα, αποτελεσματικά και εύκολα.
- ★ Ενσωματώσιμη: μπορεί να ενσωματωθεί η ίδια η python σε κώδικα C/C++ για να τους δώσει δυνατότητες scripting.
- ★ Εκτεταμένες βιβλιοθήκες: η βιβλιοθήκη της Python είναι τεράστια. Παρέχει δυνατότητες δοκιμής μονάδων, βάσεις δεδομένων, περιήγηση ιστού, CGI, FTP, email, XML, HTML, κρυπτογράφηση κ.α.

Είναι ελεύθερη γλώσσα ανοικτού κώδικα, δηλαδή παρέχει δυνατότητα διανομής αντιγράφων του λογισμικού, ανάγνωσης του πηγαίου κώδικα, αλλαγών σε αυτό και χρήση κομματιών του σε άλλα

ελεύθερα προγράμματα. Η επιλογή της συγκεκριμένης γλώσσας προγραμματισμού έγινε για τους εξής λόγους:

- ★ Ένωση όλων των ξεχωριστών στοιχείων της μεθόδου όπως φαίνεται στην εικόνα 3
- ★ Υλοποίηση του αλγορίθμου Monte Carlo
- ★ Εξαγωγή των διαγραμμάτων της μεθόδου (plots)

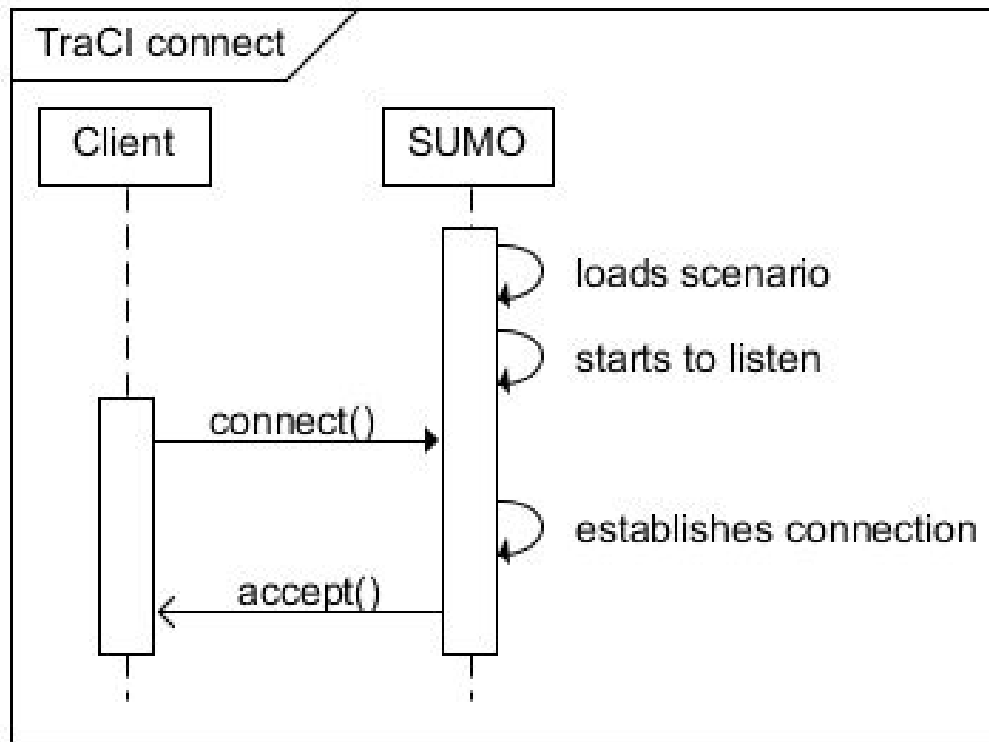
### 3.2.2.2 C++

Η γλώσσα προγραμματισμού C++ είναι αυτή στην οποία έχει σχεδιαστεί ο βελτιστοποιητής που θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της προσομοίωσης του οδικού δικτύου που θα δημιουργήσουμε. Η C++ είναι μία στατική γλώσσα προγραμματισμού [27] συνήθως μεταγλωττισμένη, γενικής χρήσης και μεσαίου προγραμματιστικού επιπέδου. Αναπτύχθηκε από τον Bjarne Stroustrup το 1979. Περιγράφεται ως σοφιστική, αποτελεσματική και βασίζεται στην γλώσσα προγραμματισμού C. Αναφέρεται ότι είναι μια αναντικατάστατη γλώσσα καθώς χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό πολλών σύγχρονων παιχνιδιών, λειτουργικών συστημάτων και φυλλομετρητών.

### 3.2.3 Traci (Traffic Control Interface)

Το TraCI είναι το εργαλείο με το οποίο θα μπορούμε να ελέγχουμε την προσομοίωση ανά πάσα στιγμή και να την τροποποιούμε όπως εμείς θέλουμε. Μας παρέχει τη δυνατότητα να μετατρέπουμε το χρονισμό των φαναριών, τη ροή της κίνησης, το ρυθμό που θα εισέρχονται τα οχήματα όπως και τον αριθμό τους. Γενικότερα, ένα τέτοιο εργαλείο έχει αναπτυχθεί για να μπορεί ο κάθε χρήστης να μεταβάλλει οποιαδήποτε παράμετρο βρίσκεται στην προσομοίωση. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η διεπαφή TraCI [5] είναι μια βιβλιοθήκη που δίνει τη δυνατότητα χρήσης κάποιων παραπάνω εντολών για τον πλήρη έλεγχο της προσομοίωσης συμπεριλαμβανομένων των οχημάτων και των φωτεινών σηματοδοτών ακόμη και όταν η προσομοίωση τρέχει (online).

Η αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί η βιβλιοθήκη είναι τύπου TCP πελάτη- διακομιστή. Το ρόλο του διακομιστή τον κατέχει το πρόγραμμα Sumo ενώ ο πελάτης είναι ο εκάστοτε χρήστης, στην προκειμένη περίπτωση είναι ένα πρόγραμμα γραμμένο σε python που αποκαλείται “ελεγκτής (controller)” το οποίο λαμβάνει πληροφορίες από το διακομιστή σχετικά με τη φάση που βρίσκεται η προσομοίωση και στη συνέχεια στέλνει τις οδηγίες πίσω. Ο σκοπός που εξυπηρετεί η βιβλιοθήκη αυτή είναι η πλήρης πρόσβαση και διαχείριση του προγράμματος προσομοίωσης και η εύκολη ρύθμιση των παραμέτρων κατά τη διάρκεια της. Ιδανικότερα, ο απομακρυσμένος πλήρης έλεγχος της προσομοίωσης. Η παρακάτω εικόνα 7 απεικονίζει την αρχιτεκτονική που ακολουθεί η διεπαφή TraCI.



Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική TraCI τύπου πελάτη-διακομιστή

### 3.2.4 Αλγόριθμος Monte Carlo

Ο αλγόριθμος Monte Carlo είναι μια στοχαστική διαδικασία όπου με χρήση τυχαίων αριθμών και τη στατιστική προσπαθεί να λύσει ένα πρόβλημα. Ουσιαστικά, με τη βοήθεια του αλγορίθμου Monte Carlo, αφού έχουμε χτίσει το σενάριο μας, ελέγχουμε διάφορες τυχαίες τιμές της ταχύτητας των οχημάτων καθώς και του αριθμού των οχημάτων. Η διαδικασία έχει ως εξής: αρχικά μεταβάλλουμε το πλήθος των οχημάτων μέσα στο δίκτυο και υπολογίζουμε το συνολικό χρόνο που απαιτείται για τη διέλευση όλων των οχημάτων. Έπειτα, αφού αυτή η διαδικασία επαναληφθεί πολλές φορές και φτάσουμε σε ένα επιθυμητό αποτέλεσμα η επόμενη μας κίνηση είναι να μεταβάλλουμε την ταχύτητα των οχημάτων. Τέλος, αφού ολοκληρωθεί όλη αυτή η διαδικασία εξάγουμε τα τελικά αποτελέσματα όπως ο υπολογισμός του συνολικού χρόνου προσομοίωσης, η μέγιστη ταχύτητα και ο μέγιστος αριθμός των οχημάτων που δε θα επηρεάσουν αρνητικά το δίκτυο. Το όνομα προέρχεται από την ομώνυμη πόλη του Μονακό και παρουσιάστηκε το 1949 με τη δημοσίευση των N. Metropolis και S. Ulam “Η μέθοδος Monte Carlo” στο περιοδικό Journal of the American Statistics Association. Η μέθοδος αυτή εκτός από αριθμητικά ολοκληρώματα χρησιμοποιείται για βελτιστοποίηση προβλημάτων. Είναι μια πραγματική

προσέγγιση στο ρίσκο που παίρνει ο ερευνητής όταν προσομοιώνει κάτι και μπορεί να λάβει αποφάσεις υπό αβέβαιες συνθήκες. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα μεθόδου Monte Carlo είναι το [21] στο οποίο πραγματοποιείται η ρίψη ενός νομίσματος μερικές φορές και προσπαθεί να βρει όλους τους τυχαίους συνδυασμούς που μπορεί να τύχουν. Ο αλγόριθμος αυτός στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται για την εκτέλεση διαφορετικών σεναρίων μεταβάλλοντας τυχαία τον αριθμό των οχημάτων έτσι ώστε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά τους και να οδηγηθούμε σε ένα αποτέλεσμα το οποίο ικανοποιεί τις προσδοκίες μας. Τα αποτελέσματα που περιμένουμε να δούμε είναι ποικίλα καθώς μεταβάλλουμε τυχαία τον αριθμό των οχημάτων που σημαίνει ότι πιθανών το ένα αποτέλεσμα να έχει πολύ μεγάλη απόκλιση από το άλλο. Παρόλα αυτά όμως, προσδοκούμε να εξάγουμε το αποτέλεσμα το οποίο θα προσδώσει στο δίκτυο το μέγιστο αριθμό οχημάτων χωρίς όμως να επηρεάζει την κίνηση επιβαρύνοντας το και προκαλώντας ατυχήματα και κυκλοφοριακή συμφόρηση.

### 3.2.5 Βελτιστοποιητής

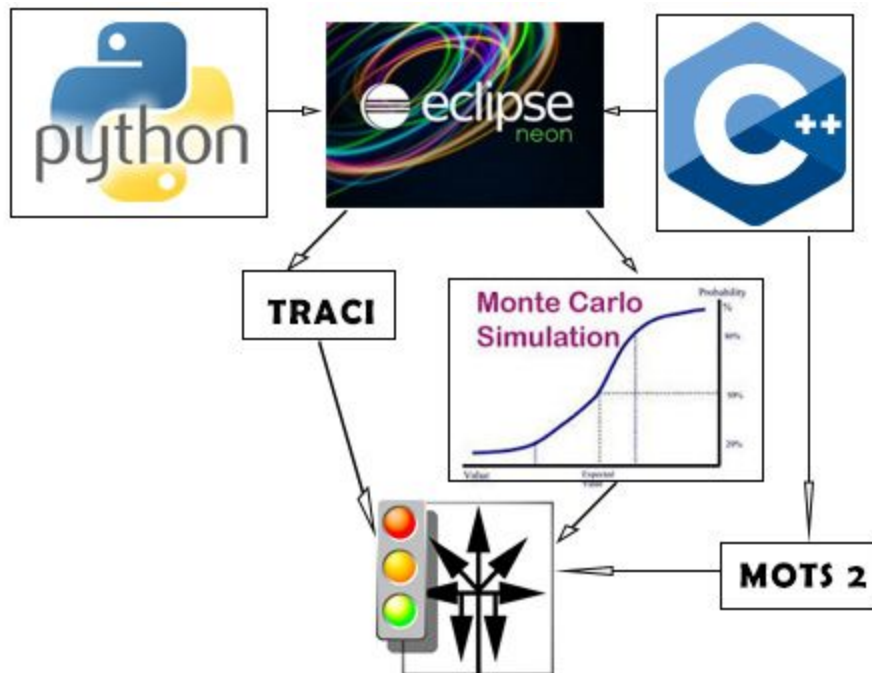
Για την βελτιστοποίηση της κίνησης και της ταχύτητας του συγκεκριμένου σεναρίου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ο βελτιστοποιητής MOTS 2 (Multi-Objective Tabu Search 2) που αναπτύχθηκε το 2014 [28]. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σχεδιάστηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και είναι μια παραλλαγή του γνήσιου Tabu Search αλγορίθμου. Θεωρείται ως μια συνδυαστική επέκταση εργαλείων αριθμητικής ανάλυσης, μεθόδων και τεχνικών βελτιστοποίησης τεχνητής νοημοσύνης. Ο ρόλος του MOTS 2 είναι να λαμβάνει από το χρήστη κάποιες τιμές όπως είναι ο χρονισμός της κάθε φάσης του φαναριού (κόκκινο, πορτοκαλί, πράσινο), να επεξεργαστεί αυτές τις τιμές που δέχτηκε σαν είσοδο και να εξάγει βελτιστοποιημένες τιμές που θα είναι οι πιο επικερδής ανάλογα το σκοπό που τις θέλουμε. Αφού λοιπόν πάρουμε τις βελτιστοποιημένες πλέον τιμές αυτές, τις ενσωματώνουμε στην προσομοίωση μας και παρατηρούμε τη συμπεριφορά των οχημάτων. Στη συνέχεια, μεταβάλλουμε την ταχύτητα των οχημάτων και με βάση τον χρονισμό των φαναριών φτάνουμε στο καλύτερο δυνατό σενάριο.

### 3.3 Αλληλεπίδραση των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν και αίτια επιλογής τους προς χρήση

Αρχικά το περιβάλλον που χρησιμοποιούμε για την προσομοίωση του οδικού δικτύου όπως προαναφέρθηκε είναι το Sumo. Ο προσομοιωτής Sumo παρέχει ευκολίες πέρα από κάθε άλλο πρόγραμμα προσομοίωσης καθώς δίνει την δυνατότητα μεταβολής κάθε αντικειμένου που προσομοιώνεται. Οι εντολές είναι έτοιμες, η καθυστέρηση μπορεί να μεταβληθεί με ένα μόνο κλικ και οι κατευθύνσεις μπορούν να αλλάξουν πολύ εύκολα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η ανάπτυξη του κώδικα για την υλοποίηση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε στην πλατφόρμα Eclipse Neon [20] καθώς είναι ένα εργαλείο εύκολο προς χρήση, εύκολο στην εκμάθηση, με τις νέες ενημερώσεις το περιβάλλον είναι φιλικό, έχουν διορθωθεί τα σφάλματα καθώς μετά από κάθε

σφάλμα κατά τη μεταγλώττιση στέλνεται αυτόματα στα κεντρικά του Eclipse για να διορθωθεί. Φυσικά την πλατφόρμα αυτή υποστήριξε η γλώσσα προγραμματισμού Python, καθώς είναι αυτή με την οποία αναπτύχθηκε η προσομοίωση. Ο έλεγχος του Sumo γίνεται με τη βιβλιοθήκη Traci η

οποία προσδίδει την ικανότητα στο χρήστη να ελέγξει τον προσομοιωτή Sumo. Ένα ακόμη εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωσή μας είναι η μέθοδος Monte Carlo η οποία επιλέχτηκε για τη συγκεκριμένη διπλωματική γιατί είναι εύκολη και αποτελεσματική στη χρήση και αρκετά κατανοητή προς το χρήστη. Έπειτα, ο βελτιστοποιητής που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο MOTS 2 [28]. Σκοπός του είναι η επίλυση προβλημάτων που υπάρχουν στην πραγματικότητα και ο εντοπισμός των βέλτιστων λύσεων στο πρόβλημά μας. Αφού το TraCI δώσει την εντολή τερματισμού της προσομοίωσης όταν εισέλθουν και φτάσουν στο τέρμα όλα τα οχήματα, συλλέγει τις πληροφορίες της προσομοίωσης σε ένα εξωτερικό αρχείο για την ευκολότερη πρόσβαση και ανάλυσή τους. Στην εικόνα 8 απεικονίζεται ο τρόπος σύνδεσης των εργαλείων ενώ στον πίνακα 2 αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε εργαλείου.



Εικόνα 8: Συνένωση των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση

<b>Εργαλείο</b>	<b>Έκδοση</b>
Ubuntu Linux	16.04 LTS
Python	3.6
MOTS 2	2.0
Eclipse	Neon 3.0
Sumo	0.30.0
TraCI	1.0 (standard)
C++	c++11

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλείων

Αφού καταφέρουμε να επιτύχουμε την αλληλεπίδραση των εργαλείων και μεθόδων που είναι αναγκαία για την προσομοίωση και έχουμε έτοιμο το σενάριο της προσομοίωσης, το επόμενο μας βήμα είναι η εξαγωγή των διαγραμμάτων που θα αναπαριστούν τα αποτελέσματα. Η διαδικασία έχει ως εξής: Αρχικά, έχοντας τρέξει το σενάριο όσες φορές κρίνουμε απαραίτητο για να βγάλουμε τα αποτελέσματα που θέλουμε και έχοντας αυτοματοποιήσει τη διαδικασία της εξαγωγής των δεδομένων σε ξεχωριστό αρχείο, με τη δημιουργία ενός προγραμματιστικού μηχανισμού λαμβάνουμε αυτά τα δεδομένα και τα εξάγουμε σε μορφή διαγραμμάτων με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης που παρέχει η python και ονομάζεται matplotlib. Στην συνέχεια, όταν πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση του σεναρίου, με τη βοήθεια του gnuplot της C++ θα εξάγουμε τα αποτελέσματα των βελτιστοποιημένων τιμών σε μορφή διαγράμματος.

### 3.4 Μεθοδολογία

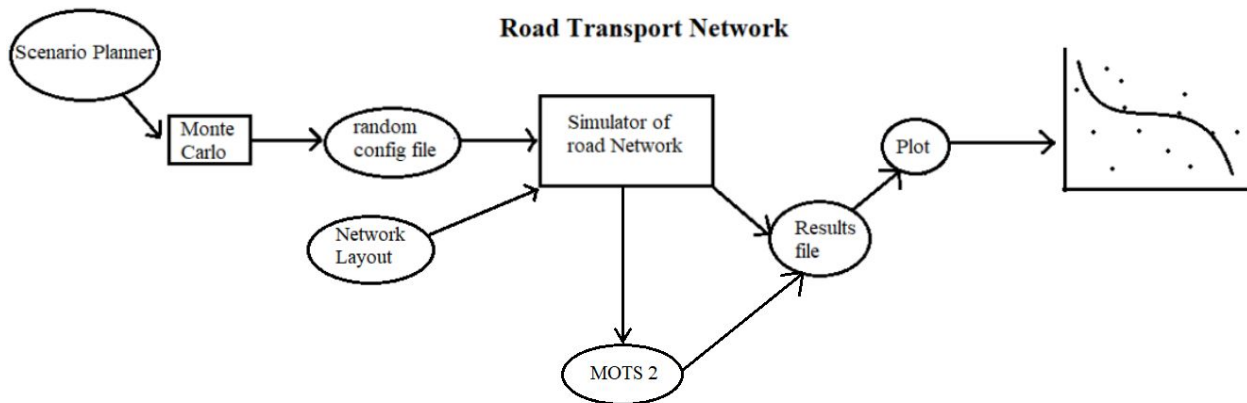
Αρχικά, ο σχεδιασμός του σεναρίου προσομοίωσης της διασταύρωσης ξεκινά ως εξής: σχεδιάζουμε μια διασταύρωση, ρυθμίζουμε όλους τους παράγοντες και τις παραμέτρους που την επηρεάζουν για να δημιουργήσουμε το δίκτυο του συγκεκριμένου σεναρίου. Αυτές οι παράμετροι είναι η ταχύτητα των οχημάτων, η ροή των οχημάτων που εισέρχονται στο δίκτυο, ο τύπος των οχημάτων του δικτύου (στη συγκεκριμένη περίπτωση διαλέγουμε τον προκαθορισμένο από το

πρόγραμμα τύπο οχημάτων), ο τύπος της διασταύρωσης κατά την οποία ο δρόμος είναι διπλής κατεύθυνσης. Το οδικό δίκτυο σχεδιάζεται στο πρόγραμμα SUMO. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε την προσομοίωση Monte Carlo, ώστε να τρέξουμε διαφορετικά σενάρια μεταβάλλοντας τυχαία το πλήθος των οχημάτων. Το Sumo και Monte Carlo συνδέονται μεταξύ τους μέσω python ώστε να τροφοδοτείται το αρχείο ρυθμίσεων (configuration file) της θεωρούμενης διασταύρωσης και να εξαχθούν τα αποτελέσματα που αναζητούμε.

Έπειτα, αφού σχεδιάσουμε τον αλγόριθμο που θα εντοπίσει όλα τα πιθανά σενάρια, θα πραγματοποιήσουμε τη σύνδεση μεταξύ αρχείου ρυθμίσεων και του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου θα αποθηκεύονται σε ένα εξωτερικό αρχείο και από εκεί αυτόματα ένα βοηθητικό πρόγραμμα θα λαμβάνει τις τιμές του αρχείου αποτελεσμάτων και θα τις μετατρέπει σε διάγραμμα (plot).

Στη συνέχεια, θα υπάρχει ένας μηχανισμός αυτοματοποίησης ο οποίος θα συνδέεται με το αρχείο ρυθμίσεων και αυτόματα, αφού το ορίσουμε εμείς, θα τρέχει την προσομοίωση κάποιες φορές και θα λαμβάνει μία τυχαία τιμή κάθε φορά. Έτσι θα μπορούμε να εξάγουμε πιο ακριβή αποτελέσματα. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται όλα αυτά τα εργαλεία και οι μέθοδοι αναφέρεται παρακάτω στον πίνακα.

Τέλος, αφού εντοπίσουμε όλα τα πιθανά σενάρια, με τη βοήθεια του βελτιστοποιητή θα βελτιστοποιήσουμε τις παραμέτρους που κρίνουμε ότι παίζουν καθοριστικό ρόλο στην προσομοίωση με σκοπό να βρούμε τις βέλτιστες λύσεις. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 9.



Εικόνα 9: Αλυσίδα εφοδιασμού των εργαλείων/μεθόδων



Σύντομη περιγραφή της λειτουργίας των εργαλείων της παραπάνω εικόνας:

**Οδικό δίκτυο**

- ❑ *Scenario Planner*: : σχεδιάγραμμα της σειράς των βημάτων που θα ακολουθήσει η διαδικασία της προσομοίωσης, βελτιστοποίησης και της τελικής εξαγωγής αποτελεσμάτων.
- ❑ *Monte Carlo*: ανήκει στην κατηγορία αλγορίθμου που λαμβάνει τυχαίες τιμές και εξάγει ένα αποτέλεσμα.
- ❑ *Random config file*: αρχείο ρυθμίσεων που περιέχει μέσα τον κώδικα προσομοίωσης του οδικού δικτύου.
- ❑ *Simulator of road network*: αποτελεί τον προσομοιωτή οδικού δικτύου που θα αναπαραστήσει το σενάριο διασταύρωσης και με βάση αυτόν θα υπολογιστούν τα κριτήρια βελτιστοποίησης (χρόνος, ταχύτητα).
- ❑ *Results file*: αρχείο αποθήκευσης αποτελεσμάτων του Monte Carlo.
- ❑ *plot*: μετατροπή των αποτελεσμάτων του Monte Carlo σε διαγράμματα.

**Mots 2**

- ❑ Multi-Objective Tabu Search 2: αλγόριθμος βελτιστοποίησης των τιμών που επηρεάζουν την οδική κυκλοφορία του δικτύου.

Σκοπός χρήσης των συγκεκριμένων εργαλείων και μεθόδων

<b>Εργαλείο/ Μέθοδος</b>	<b>Σκοπός που εξυπηρετεί</b>
Monte Carlo	Παραγωγή τυχαίων σεναρίων / μεγαλύτερο εύρος αποτελεσμάτων
Random config file	Σύνδεση του αλγορίθμου με το κύριο πρόγραμμα
Simulation of road network	Επίδειξη προσομοίωσης οδικής κυκλοφορίας σε περιβάλλον με γραφικά για εύκολη κατανόηση
Results file	Καταχώρηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης
Plot	Εμφάνιση αποτελέσματος σε διάγραμμα αξόνων για μεγαλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων
Mots 2	Βελτιστοποίηση παραμέτρων/ εύρεση βέλτιστων λύσεων

Πίνακας 3: Σκοπός χρήσης των μεθόδων και εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>- Αποτελέσματα Προσομοίωσης

### 4.1 Βασική δομή σεναρίου

Το Sumo παρέχει μια μεγάλη ποικιλία επιλογών ως προς το σχεδιασμό ενός οδικού δικτύου. Αρχικά, θα πρέπει να τονίσουμε πως ο τύπος διασταύρωσης που διαλέξαμε να υλοποιήσουμε είναι ένας από τους προκαθορισμένους τύπους που μας προσφέρει. Μια διασταύρωση διπλής κατεύθυνσης σχήματος “ T “ με διπλή λωρίδα ο κάθε δρόμος. Οι φωτεινοί σηματοδότες βρίσκονται σε δυο σημεία της διασταύρωσης, πάνω και δεξιά όπως φαίνεται στην εικόνα 3. Για να καταφέρουμε να δημιουργήσουμε ένα σενάριο οδικού δικτύου χρειάστηκε να ρυθμίσουμε κάποιες παραμέτρους όπως έχουμε προαναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σαν είσοδο στο SUMO έχουμε δώσει την ταχύτητα των οχημάτων, το πλήθος των οχημάτων, το ρυθμό που εισέρχονται τα οχήματα στο δίκτυο. Φυσικά, δε μπορεί να παραληφθεί το γεγονός ότι ο χρονοσμός της εναλλαγής φάσης των φαναριών είναι από τις σημαντικότερες τιμές που έχουν δοθεί σαν είσοδο στην προσομοιωτή. Η διεπαφή του Sumo μας επιτρέπει τη ρύθμιση όλων των παραγόντων έτσι ώστε να είναι πιο εύκολο και πιο ρεαλιστικό το σενάριο που δημιουργούμε καθώς μέσα στο αρχείο ρυθμίσεων υπάρχουν όλες οι εντολές τις οποίες μπορούμε να τροποποιήσουμε όπως θέλουμε. Μεταβάλλοντας όλες αυτές τις παραμέτρους αρκετές φορές, φτάνουμε σε ένα ικανοποιητικό για τους στόχους μας επίπεδο. Ο τύπος των οχημάτων είναι ο προκαθορισμένος από το πρόγραμμα δηλαδή επιβατικό όχημα (passenger). Πιο συγκεκριμένα:

- μήκος οχήματος 5 μ.
- μέγιστη ταχύτητα 70χλμ
- επιτάχυνση  $2.6 \mu/\delta^2$
- επιβράδυνση  $4.5 \mu/\delta^2$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τη μεγαλύτερη μεταβολή από εμάς δέχτηκε η ταχύτητα των οχημάτων καθώς είναι ο κύριος παράγοντας που ρυθμίζει την κίνηση και έτσι έπρεπε να τη μεταβάλλουμε αρκετά ώστε να φτάσουμε στο επιθυμητό. Οι βασικές περιπτώσεις του σεναρίου που έχουμε υλοποιήσει όσον αφορά την κίνηση είναι τρεις: σενάριο χαμηλής / μεσαίας / υψηλής κίνησης. Όπως φαίνεται παρακάτω στις εικόνες 19 και 20, πραγματοποιούμε μια απεικόνιση της κίνησης όταν το επίπεδο ροής είναι χαμηλό, μεσαίο και υψηλό και κάθε σενάριο σημειώνει σημαντικές αλλαγές στο οδικό δίκτυο. Έτσι, έχοντας υλοποιήσει και τα τρία σενάρια, έχουμε προμηθεύσει την εργασίας μας με στιγμιότυπα αυτών ώστε να δείξουμε τις διαφορές που σημειώνονται στο δίκτυο. Ένας από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση είναι η φωτεινή σήμανση. Οι φωτεινοί σηματοδότες έχουν ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η κυκλοφοριακή συμφόρηση στη διασταύρωση όσο το δυνατόν περισσότερο. Σίγουρα, από μόνος του αυτός ο παράγοντας δε μπορεί να λύσει το πρόβλημα μας αλλά σε συνδυασμό με τα παραπάνω θα μπορούσε να σημειώσει βελτίωση. Έχουμε θέσει τρία διαφορετικά στάδια στους φωτεινούς σηματοδότες: πράσινο / πορτοκαλί / κόκκινο. Το κάθε ένα στάδιο έχει τη

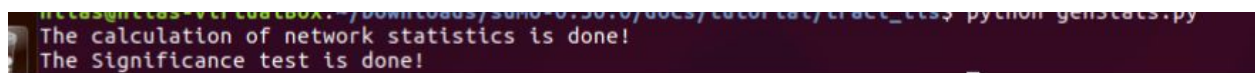
δική του χρονική διάρκεια με σκοπό να εξυπηρετεί τις ανάγκες του δικτύου. Δεν έχουμε ορίσει το χρόνο μετάβασης από το ένα στάδιο στο άλλο παρά μόνο τη διάρκεια του κάθε σταδίου που καθορίζεται από τη διεπαφή Sumo. Βέβαια, για να έχουμε ευρύτερο φάσμα αποτελεσμάτων, γίνεται σύγκριση μεταξύ διασταύρωσης φωτεινού σηματοδότη και διασταύρωσης προτεραιότητας όπως θα δούμε παρακάτω.

Όταν τελειώνει κάθε προσομοίωση αφού ζητηθεί από το TraCI, έτσι όπως το έχουμε ορίσει στο αρχείο \*.cfg, αποθηκεύονται σε ένα εξωτερικό αρχείο κάποια από τα δεδομένα της προσομοίωσης που έχουν συλλεχθεί (εικόνα 9). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην παρακάτω εικόνα 10, στη λίστα Vehicles βλέπουμε ότι αν και έχουν εισέλθει στην προσομοίωση 768 οχήματα παρόλα αυτά το Running και Waiting βλέπουμε ότι είναι 0. Αυτό συμβαίνει επειδή όταν τελειώσει η προσομοίωση χωρίς να τη διακόψουμε εμείς (είτε πατώντας παύση είτε από το gui είτε από τη γραμμή εντολών) τα οχήματα βγαίνουν από το σενάριο και έτσι φαίνεται ότι δεν υπάρχει κανένα όχημα πλέον. Κάτι τέτοιο θεωρούμε πως είναι αναγκαίο καθώς προσπαθούμε να μετατρέψουμε την όλη διαδικασία της προσομοίωσης και της διεξαγωγής αποτελεσμάτων σε έναν αυτόματο μηχανισμό. Έτσι, όταν τερματίσει η προσομοίωση, είναι έτοιμη να κάνει επανεκκίνηση από την αρχή αυτοματοποιημένα, χωρίς να χρειάζεται να κάνουμε κάτι εμείς. Μία τέτοια κίνηση, την οποία έχουμε υλοποιήσει, μας εξυπηρετεί στο να καταλάβουμε τη ροή των οχημάτων αφού τερματίσουμε εμείς τη διαδικασία της προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι με τον τερματισμό, το σενάριο επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Η προσομοίωση όπως μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε ξεκινά με χρόνο 0 (simulation started with time: 0.00) και τελειώνει όταν ο χρόνος είναι 3746.60 (simulation ended at time: 3746.60). Ακολούθως, η ετικέτα Reason επεξηγεί το λόγο για τον οποίο έχει τερματιστεί η προσομοίωση. Η ετικέτα Duration αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα που διαρκεί η προσομοίωση, πράγμα που δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η συγκεκριμένη τιμή έχει μεταβληθεί εσκεμμένα από εμάς για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε με μεγαλύτερη ευκρίνεια τη ροή των οχημάτων μέσα στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το UPS (Updates Per Second) αναπαριστά τον αριθμό των οχημάτων που έχουν προσομοιωθεί κατά μέσο όρο ανά δευτερόλεπτο του χρόνου υπολογισμού και αναφέρεται στην ενημέρωση της συμπεριφοράς όλων των οχημάτων στην προσομοίωση. Επιπλέον, το Real time factor αποτελεί το πηλίκο του  $\frac{\text{Χρόνου προσομοίωσης}}{\text{Χρόνου υπολογισμού}}$ . Εάν μια ώρα προσομοιωθεί σε 360 δευτερόλεπτα τότε ο συντελεστής πραγματικού χρόνου θα είναι 10. Όλα αυτά τα στοιχεία επεξηγούν στην πράξη την αλληλεπίδραση των αρχείων που προαναφέραμε παραπάνω στην εικόνα 9 και φυσικά ανάλογα με τις δικές μας ενέργειες και αλλαγές μεταβάλλονται. Η εικόνα 10 απεικονίζει συγκεντρωμένα τα δεδομένα της προσομοίωσης που προαναφέρθηκαν.

```
***Starting server on port 15833 ***
Loading net-file from 'data/cross.net.xml'... done (8ms).
Loading additional-files from 'data/cross.det.xml'... done (2ms).
Loading done.
Simulation started with time: 0.00
Simulation ended at time: 3746.60
Reason: TraCI requested termination.
Performance:
  Duration: 42157ms
  Real time factor: 88.8725
  UPS: 24961.548497
Vehicles:
  Inserted: 768
  Running: 0
  Waiting: 0
```

Εικόνα 10: Συλλογή πληροφοριών κατά τον τερματισμό της προσομοίωσης

Στην εικόνα 11 παρατηρούμε το μήνυμα που μας επιβεβαιώνει ότι τα στατιστικά του δικτύου μας έχουν υπολογισθεί αφού τρέξουμε ένα ξεχωριστό αρχείο. Το αρχείο αυτό συμπεριλαμβάνει ένα κομμάτι κώδικα, ανεπτυγμένο σε python, το οποίο δίνει εντολή στο κύριο αρχείο να εξάγει κάποια επιπλέον στατιστικά του δικτύου που δημιουργήσαμε.



```
ncctos@ncctos-virtualbox: ~/Downloads/sumo-0.20.0/docs/tutorial/traCI/traCI.py python genstats.py
The calculation of network statistics is done!
The Significance test is done!
```

Εικόνα 11: Μήνυμα επιβεβαίωσης εξαγωγής των στατιστικών του δικτύου της προσομοίωσης

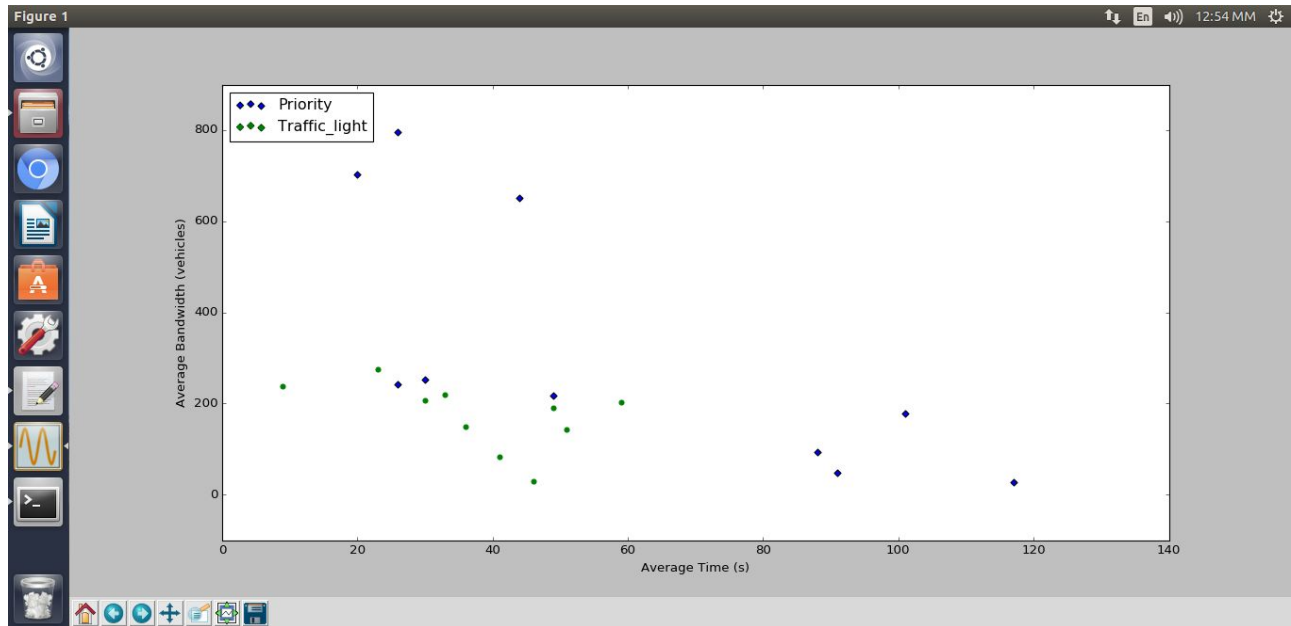
Στο συγκεκριμένο σημείο μπορούμε να παρατηρήσουμε τα στατιστικά στοιχεία της προσομοίωσης μετά την εκτέλεση του εξωτερικού αρχείου που αναφέρθηκε. Μπορούμε να διακρίνουμε τον συνολικό αριθμό οχημάτων που έχουν περάσει στην προσομοίωση, κάτι που έχουμε ορίσει εμείς. Υπολογίζεται στη συνέχεια ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης της αναχώρησης των οχημάτων λόγω έλλειψης χώρου στο δρόμο, ο μέσος χρόνος καθυστέρησης αναχώρησης, ο συνολικός χρόνος αναμονής των οχημάτων για να εισέλθουν στην προσομοίωση, ο μέσος χρόνος αναμονής των οχημάτων, ο συνολικός χρόνος ταξιδιού που θα κάνει το όχημα από την αφετηρία στον προορισμό, ο μέσος χρόνος ταξιδιού, το συνολικό μήκος της απόστασης που θα διανύσουν, το μέσο μήκος και τέλος η μέση ταχύτητα των οχημάτων που κινούνται σε όλες τις λωρίδες όπως φαίνεται στην εικόνα 12.

```
<data>
  <items>
    <item name="totalNumberOfVehicles">813</item>
    <item name="totalDepartureDelay">661</item>
    <item name="averageDepartureDelay">0</item>
    <item name="totalWaitingTime">188060</item>
    <item name="averageVehicularWaitingTime">231</item>
    <item name="totalTravelTime">105405</item>
    <item name="averageVehicularTravelTime">129</item>
    <item name="totalTravelLength">824744</item>
    <item name="averageVehicularTravelLength">1014</item>
    <item name="averageVehicularTravelspeed">8</item>
  </items>
</data>
```

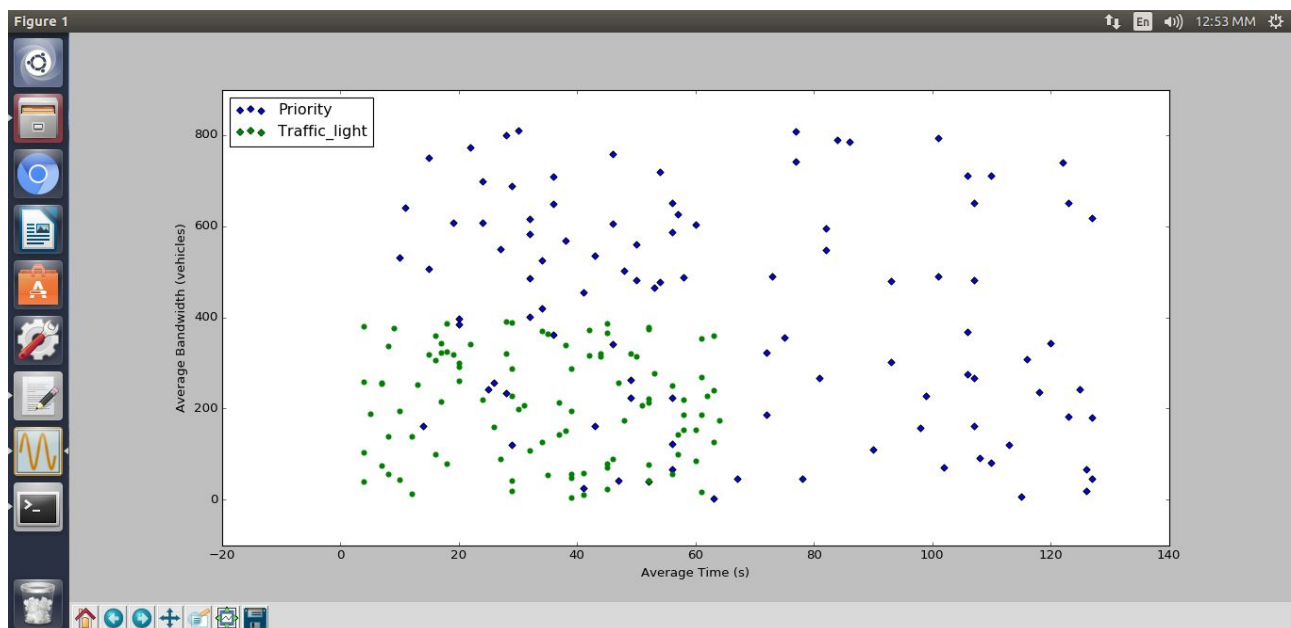
Εικόνα 12: Αποτέλεσμα των στατιστικών της προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας κλίμακας αντιστοιχούν στα τρία σενάρια διαφορετικών χρονικών περιόδων όπως έχουμε αναφέρει σαν δεύτερο στόχο στο 1.3. Τα σενάρια έχουν ως εξής: υπάρχουν δύο ειδών διασταυρώσεις για λόγους σύγκρισης, διασταύρωση με φωτεινό σηματοδότη και η διασταύρωση προτεραιότητας όπου τα οχήματα λαμβάνουν κάθε φορά τυχαίες τιμές της ταχύτητας. Κάτι τέτοιο γίνεται ολοκληρωμένα ορατό στην εικόνα 16 όπου υπάρχει ροή οχημάτων σε διασταυρώσεις που ρυθμίζονται από φανάρια (πράσινες κουκκίδες) και με βάση την προτεραιότητα (μπλε κουκκίδες). Έχουμε προσθέσει τη διασταύρωση προτεραιότητας για να αποδείξουμε ότι δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο είναι η διασταύρωση με φωτεινή σηματοδότηση. Η μέγιστη ταχύτητα σε αυτό το σενάριο όπως θα δούμε πιο αναλυτικά στην εικόνα 17 φτάνει τα 48km/h. Στο σημείο αυτό χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο Monte Carlo που η ταχύτητα λαμβάνει τυχαίες τιμές < μέγιστης ταχύτητας. Από την άλλη, έπειτα από πολλές μεταβολές στο χρονισμό των φαναριών καταλήξαμε στο γεγονός ότι η καλύτερη τιμή που θα μπορούσε να έχει η διάρκεια φάσης των φαναριών είναι η εξής: κόκκινο 15 δευτερόλεπτα, πράσινο 11 και πορτοκαλί 5. Οι τυχαίες αυτές τιμές που επιλέγονται από την προσομοίωση μας βοηθούν να καταλάβουμε τη συμπεριφορά της κίνησης των οχημάτων μέσα στη προσομοίωση όταν αλλάξουμε το χρονισμό των φωτεινών σηματοδοτών σε μια σηματοδοτούμενη διασταύρωση ή αυξομειώσουμε το συνολικό αριθμό των οχημάτων που θα εισέλθουν. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο συνολικός αριθμός οχημάτων που εισέρχονται στην προσομοίωση είναι η μεταβλητή totalNumberOfVehicles (σύμφωνα με την εικόνα 12 που μας παρέχει πραγματικά στοιχεία), τώρα με τη χρήση του αλγορίθμου Monte Carlo επιλέγουμε τυχαίο αριθμό οχημάτων και εκτιμούμε το χρόνο που διασχίζουν τη διασταύρωσή. Επίσης, σε κάθε μία από τις παρακάτω εικόνες ο αριθμός των προσομοιώσεων που έχουν τρέξει ώστε να βγουν τα ακόλουθα αποτελέσματα είναι 10, 100,

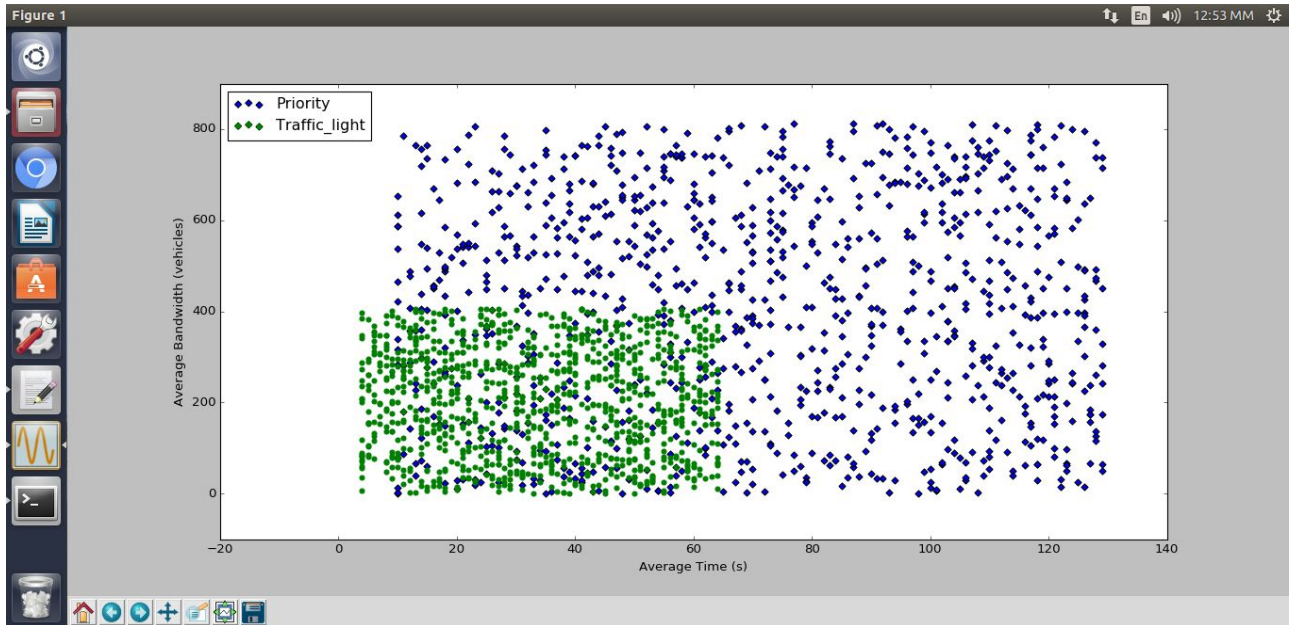
1000, 10000 αντίστοιχα. Οι εικόνες 13,14,15 και 16 απεικονίζουν στατιστικά στοιχεία της προσομοίωσης μας που βασίζονται σε τυχαίες τιμές του φωτεινού σηματοδότη.



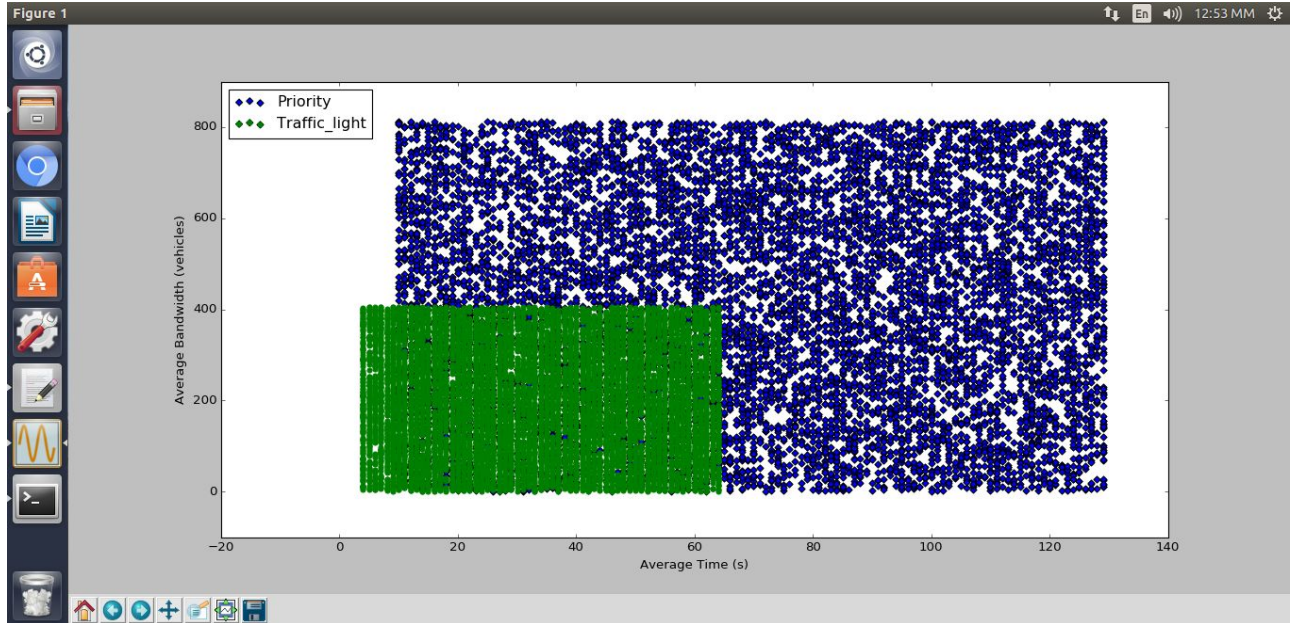
Εικόνα 13: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 10 διαφορετικά σενάρια



Εικόνα 14: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 100 διαφορετικά σενάρια



Εικόνα 15: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 1000 διαφορετικά σενάρια



Εικόνα 16: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 10000 διαφορετικά σενάρια (1)

Οι παραπάνω εικόνες έχουν ως σκοπό να εξηγήσουν τη συμπεριφορά των οχημάτων σχετικά με την ταχύτητα και τον χρόνο που όταν υπάρχει φωτεινός σηματοδότης και όταν δεν υπάρχει λαμβάνοντας τυχαίες τιμές σηματοδότη με διαφορετικό χρώμα την περίπτωση φωτεινού σηματοδότη και προτεραιότητας.

- ❑ Μπλε κουκκίδες: Αντιπροσωπεύουν ένα τυχαίο αριθμό οχημάτων ανά σενάριο που κινείται μέσα στο δίκτυο όταν η διασταύρωση είναι τύπου προτεραιότητας και δεν ακολουθεί εντολές φωτεινού σηματοδότη. Δεν υπάρχει καμία καθυστέρηση και έτσι τα οχήματα κινούνται κανονικά μέχρι να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους.
- ❑ Πράσινες κουκκίδες: Αντιπροσωπεύουν επίσης ένα τυχαίο αριθμό οχημάτων ανά σενάριο με τη διαφορά όμως ότι η διασταύρωση ακολουθεί εντολές φωτεινού σηματοδότη. Έτσι, ο αριθμός των οχημάτων που εισέρχεται στη διασταύρωση είναι φυσικά μικρότερος όπως και ο χρόνος.

Ο σκοπός αυτών των εικόνων παραπάνω είναι η διευκρίνιση και η επεξήγηση της χρήσης του αλγορίθμου Monte Carlo στο σενάριο της προσομοίωσής μας καθώς και απόδειξη ότι προσπαθήσαμε να εξάγουμε όλα τα πιθανά σενάρια που μπορεί να υπάρξουν. Αυτά τα αποτελέσματα που έχουμε εξάγει εξυπηρετούν τον δεύτερο στόχο που έχουμε θέσει. Οδηγηθήκαμε σε ένα σημείο που αποδεικνύουμε εμπράκτως το ότι μια σηματοδοτούμενη διασταύρωση παρέχει



περισσότερα προνόμια στο οδικό δίκτυο και καλύπτει περισσότερες ανάγκες απ' ότι η διασταύρωση προτεραιότητας. Αυτό που μας ενδιαφέρει εξαρχής είναι η μεταβολή της ταχύτητας στα μέγιστα επίπεδά της σε συνδυασμό με την ασφάλεια του δικτύου.

Αν παρατηρήσουμε παραπάνω στο διάγραμμα της εικόνας 16 τις πράσινες κουκκίδες, βλέπουμε ότι όταν η διασταύρωση είναι σηματοδοτούμενη ο μέγιστος χρόνος που μπορεί να διασχίσει τη διασταύρωση ένα όχημα είναι 63 δευτερόλεπτα και ο αριθμός των οχημάτων είναι 404. Αντίθετα, ο μέγιστος χρόνος που χρειάζεται ένα όχημα να περάσει από μια διασταύρωση η οποία είναι τύπου προτεραιότητας θα δούμε ότι ο χρόνος είναι 128 δευτερόλεπτα και ο αριθμός των οχημάτων είναι 806, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα της διασταύρωσης προτεραιότητας απαιτούν περίπου το διπλάσιο χρόνο και αριθμό οχημάτων απ' ότι μιας διασταύρωσης με φανάρια. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η καθυστέρηση στην πρώτη περίπτωση είναι δύο φορές μεγαλύτερη από την πρώτη.

Ένα τέτοιο αποτέλεσμα μας παροτρύνει να κάνουμε μια αναδρομή στο κεφάλαιο 1.3. Σύμφωνα με τους στόχους που έχουμε θέσει στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, μπορούμε να δούμε ότι έχουμε φτάσει σε σημείο να αναμένουμε μια ομαλή κίνηση σε ένα μικρής, μεσαίας είτε μεγάλης έντασης οδικό δίκτυο. Όταν η προσομοίωση ξεκινάει, το πρώτο όχημα που διασχίζει τη διασταύρωση με φωτεινό σηματοδότη είναι γύρω στα 4 δευτερόλεπτα. Αφού έχουμε τρέξει την προσομοίωση αρκετές για να λάβουμε επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά, παρατηρήσαμε ότι το σενάριο μας δε μπορεί να τρέξει σε λιγότερο από 4 δευτερόλεπτα. Αντίθετα, σε διασταύρωση που δε βασίζεται σε φανάρι αλλά στην προτεραιότητα βλέπουμε ότι η προσομοίωση ξεκινά περίπου στα 10 δευτερόλεπτα, πράγμα που φαίνεται στην εικόνα 16.

Στην παρούσα φάση που έχουμε εκτελέσει τον αλγόριθμο Monte Carlo, έχουμε μεταβάλλει κάποιες παραμέτρους έτσι ώστε να ελέγξουμε την κίνηση είτε σε ένα τυχαίο αριθμό οχημάτων είτε σε κάποια αυξομείωση του χρονισμού των φαναριών. Βέβαια, έχουμε μεταβάλλει και το ρυθμό που εισέρχονται τα οχήματα π.χ. το όχημα που κινείται σε κατεύθυνση δυτικά προς ανατολικά να αναπαράγεται 1 φορά ανά 15 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης κ.ο.κ. Όσο μειώνουμε το χρόνο εναλλαγής φάσεων των φωτεινών σηματοδοτών τόσο αυξάνεται και ο χρόνος που τρέχει η προσομοίωση καθώς η καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη και τα οχήματα αργούν να διασχίσουν τη διασταύρωση. Το ίδιο βέβαια συμβαίνει και όταν αυξήσουμε τον αριθμό των οχημάτων. Η προσομοίωση πρέπει να διατηρήσει την πορεία της έως ότου όλα τα οχήματα φτάσουν στον τελικό τους προορισμό. Έτσι λοιπόν, όπως παρατηρούμε στην εικόνα 16, οι πράσινες κουκκίδες που αντιπροσωπεύουν την κίνηση οχημάτων σε σηματοδοτούμενη διασταύρωση εξηγούν ότι τα οχήματα που περνούν είναι λιγότερα αλλά η καθυστέρηση είναι φανερά πολύ μικρότερη. Ελαχιστοποίηση καθυστέρησης συνεπάγεται με πρόληψη ατυχημάτων και αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης κάτι που δε συμβαίνει σε διασταύρωση προτεραιότητας καθώς ο αριθμός των οχημάτων που περνάει είναι μεγαλύτερος αλλά η καθυστέρηση είναι κατά πολύ μεγαλύτερη απ' ότι στην άλλη περίπτωση. Αυτό συμβαίνει επειδή χρησιμοποιείται το προεπιλεγμένο μοντέλο οδικής συμπεριφοράς από το Sumo. Αφού έχουμε θέσει ως στόχο μας την αντιμετώπιση του προβλήματος της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε μια διασταύρωση και κατά

συνέπεια την αποφυγή ατυχημάτων στο συγκεκριμένο σημείο θα πρέπει να εξετάσουμε όλα τα ενδεχόμενα που βασίζονται σε πραγματικά γεγονότα.

Συνεπώς, όπως φαίνεται στην εικόνα 16 όπου έχουμε ένα ευρύτερο φάσμα αποτελεσμάτων, η διασταύρωση με φωτεινό σηματοδότη μας δίνει αποτελέσματα που πλησιάζουν στον επιθυμητό μας στόχο καθώς η καθυστέρηση φαίνεται να είναι μικρότερη όπως και ο κάθετος άξονας του αριθμού των οχημάτων που τη διαπερνούν. Βέβαια ίσως σε μια διασταύρωση προτεραιότητας τα οχήματα να περνούν πιο γρήγορα αλλά εμείς αυτό που αναζητούμε δεν είναι μόνο ο ελάχιστος χρόνος που μπορούν τα οχήματα να διασχίσουν τη διασταύρωση αλλά να το κάνουν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ασφάλεια αποφεύγοντας τη συμφόρηση και ενδεχομένως το ατύχημα. Αν μελετήσουμε αναλυτικότερα το στατιστικά δεδομένα της ταχύτητας και ασχοληθούμε με αυτή την παράμετρο μπορούμε να πετύχουμε τη μείωση της κίνησης όσο ακριβώς χρειάζεται έτσι ώστε να αποφευχθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση και η πρόκληση ατυχημάτων όμως μία τέτοια ανάλυση είναι εκτός των στόχων μας και θα μελετηθεί στο μέλλον.

### *Ρύθμιση κίνησης με βάση τον αριθμό των οχημάτων*

Η μέθοδος που εισήχθη στο κεφάλαιο 3 χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το σημείο για να αποδειχθεί ότι είναι λειτουργική και επιφέρει σωστά αποτελέσματα. Η μέθοδος μπορεί να ελέγξει αποτελεσματικά το ρυθμό εισαγωγής των οχημάτων στο σενάριο επιτυγχάνοντας βελτίωση. Συνεπώς, έχουμε μεταβάλλει το ρυθμό εισαγωγής των οχημάτων στο οδικό δίκτυο από το αρχείο ρυθμίσεων αποσκοπώντας στην ευκολία της ροής κίνησης. Οι παρακάτω τιμές αντιπροσωπεύουν το ρυθμό εισαγωγής των οχημάτων προς κάθε κατεύθυνση:

Κατεύθυνση Δυτικά-Ανατολικά: 1 όχημα ανά 20 δευτερόλεπτα

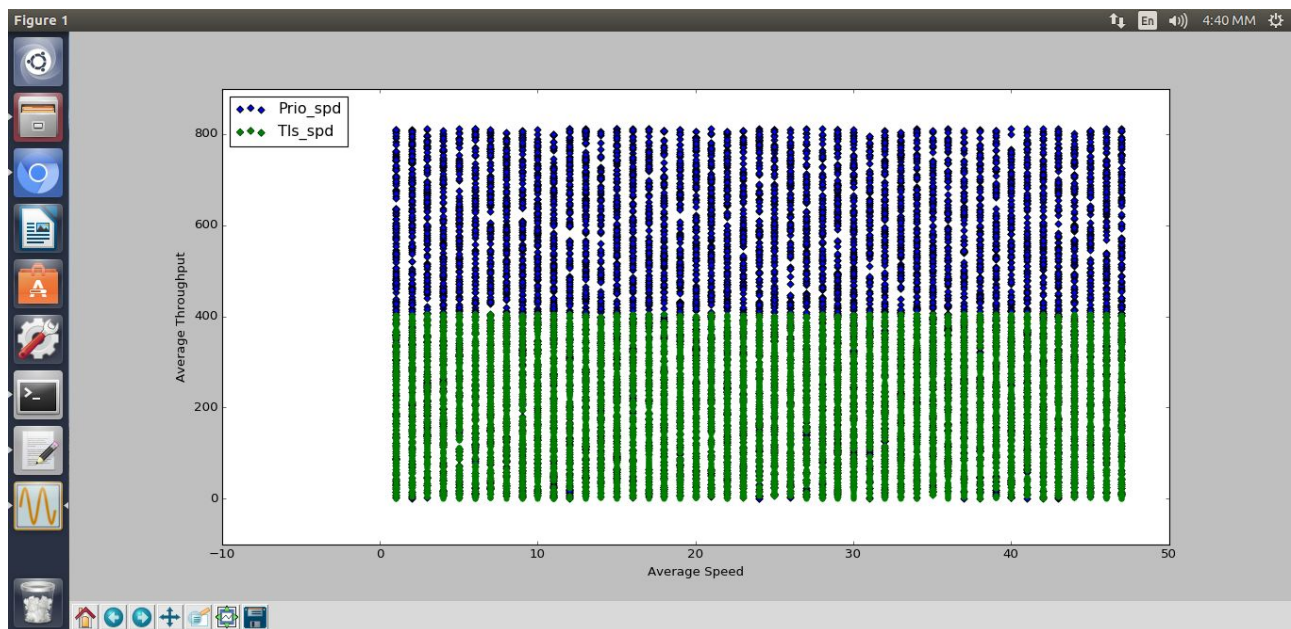
Κατεύθυνση Ανατολικά-Δυτικά: 1 όχημα ανά 15 δευτερόλεπτα

Κατεύθυνση Βόρεια-Νότια: 1 όχημα ανά 18 δευτερόλεπτα

Κρίναμε απαραίτητο να ρυθμιστεί η κίνηση διότι αν επιτρέπαμε στην οριζόντια λωρίδα κατεύθυνσης να κινούνται για παράδειγμα 500 οχήματα/60 δευτερόλεπτα και στην κάθετη λωρίδα κατεύθυνσης 400 οχήματα/60 δευτερόλεπτα δε θα μπορούσαμε σε καμία περίπτωση να αποφύγουμε κυκλοφοριακή συμφόρηση. Ο αριθμός των οχημάτων στην προσομοίωσή μας αντιπροσωπεύει τον αριθμό των οχημάτων σε διασταύρωση ενός αστικού περιβάλλοντος.

## Ρύθμιση κίνησης με βάση την ταχύτητα των οχημάτων

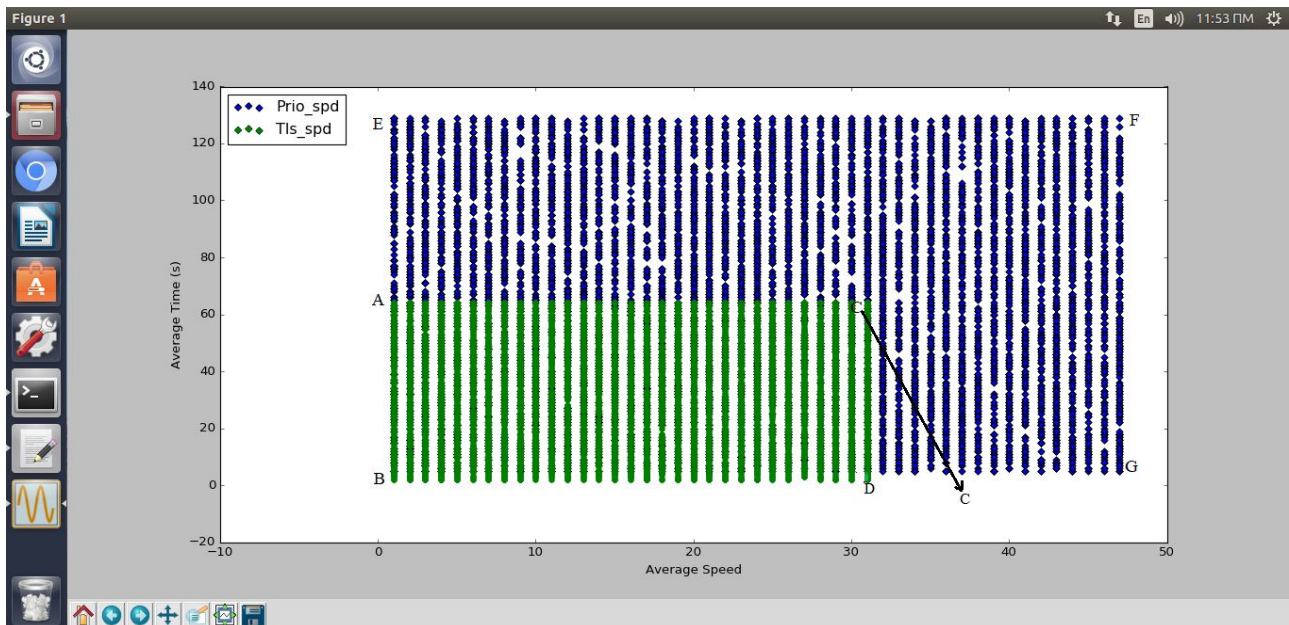
Εκτός από τον αριθμό των οχημάτων, ένας ακόμη τρόπος να ρυθμίσουμε την κίνηση έτσι ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι η μείωση της ταχύτητας. Αυτό συμβαίνει διότι δε μπορεί ο αριθμός των οχημάτων να είναι μεγάλος και η ταχύτητα να παραμένει ίδια. Οπότε, αν θέλουμε να το δούμε ρεαλιστικά θα πρέπει να μειωθεί η ταχύτητα όσο χρειάζεται για να κυλήσει ομαλά η κυκλοφορία. Έτσι, για να μειώσουμε τα ατυχήματα πρέπει να μειώσουμε την ταχύτητα. Στο παρακάτω διάγραμμα των εικόνων 17, 18 απεικονίζεται η ταχύτητα των οχημάτων.



Εικόνα 17: Διάγραμμα ταχύτητας - αριθμού οχημάτων

Στο διάγραμμα της εικόνας 17 απεικονίζεται στον κάθετο άξονα ο αριθμός των οχημάτων και στον οριζόντιο άξονα η ταχύτητα τους. Έχοντας υπόψιν μας ότι οι πράσινες κουκκίδες αντιπροσωπεύουν την διασταύρωση με φωτεινούς σηματοδότες ενώ οι μπλε κουκκίδες τη διασταύρωση προτεραιότητας βλέπουμε ότι η ταχύτητα στην πρώτη περίπτωση είναι μικρότερη. Ανάλογα συμβαίνει και με την καθυστέρηση η οποία είναι εμφανώς πιο μικρή απ' ότι σε μία διασταύρωση προτεραιότητας.

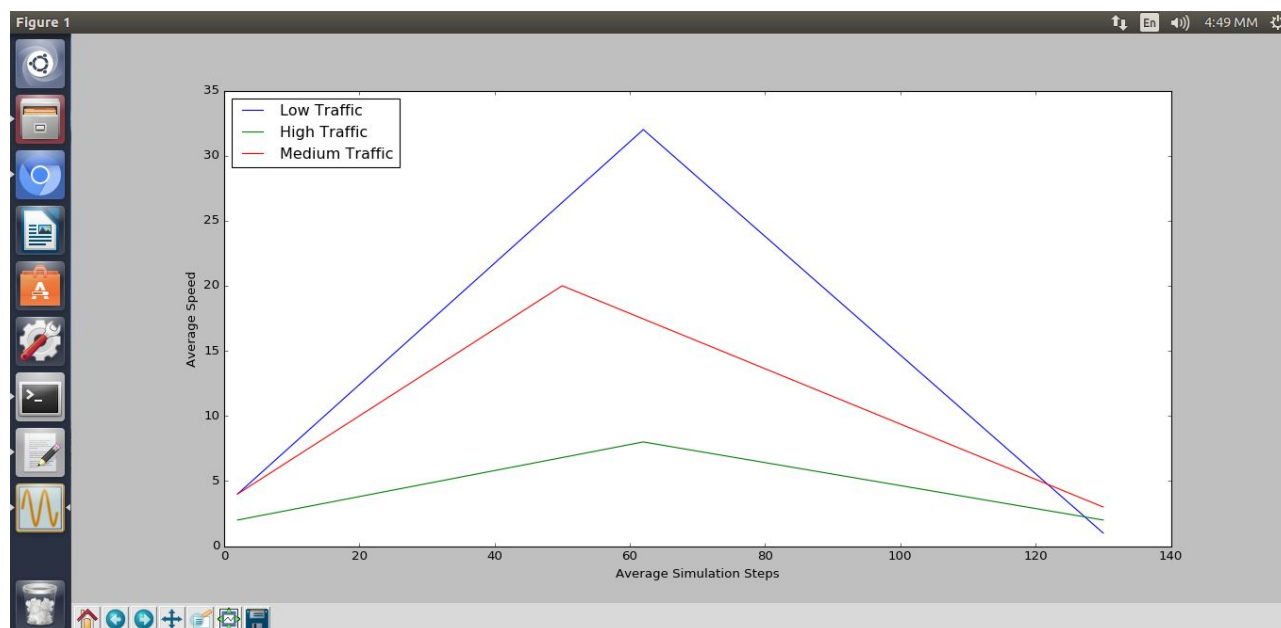
Αυτό το διάγραμμα ουσιαστικά είναι ένα από τις σημαντικότερες αποδείξεις μας ότι έχουμε πλέον στα χέρια μας ένα πραγματικό σενάριο με αποτελέσματα πραγματικού χρόνου που κάποια από αυτά μπορεί να συμβαίνουν πολύ σπάνια σε μέρη με διαφορετικούς οδικούς κανόνες και διαφορετικό επίπεδο κυκλοφορίας. Παρατηρούμε μια σημαντική μεταβολή της ταχύτητας σε κάθε μία από τις διαφορετικές περιπτώσεις διασταύρωσης όπως φαίνεται παραπάνω στην εικόνα 17. Ουσιαστικά αυτά είναι τα όλα τα δυνατά πραγματικά σενάρια που έχουμε αναπτύξει και η βέλτιστη λύση στην οποία έχουμε καταλήξει είναι ότι σε μια σηματοδοτούμενη διασταύρωση η κίνηση είναι ομαλότερη, η καθυστέρηση μικρότερη και συνεπώς η ασφάλεια μεγαλύτερη. Καταλήγοντας, αυτός ήταν ο απώτερος σκοπός της διπλωματικής εργασίας όπως έχουμε αναφέρει στο υποκεφάλαιο 1.3.



Εικόνα 18: Διάγραμμα διακύμανσης ταχύτητας

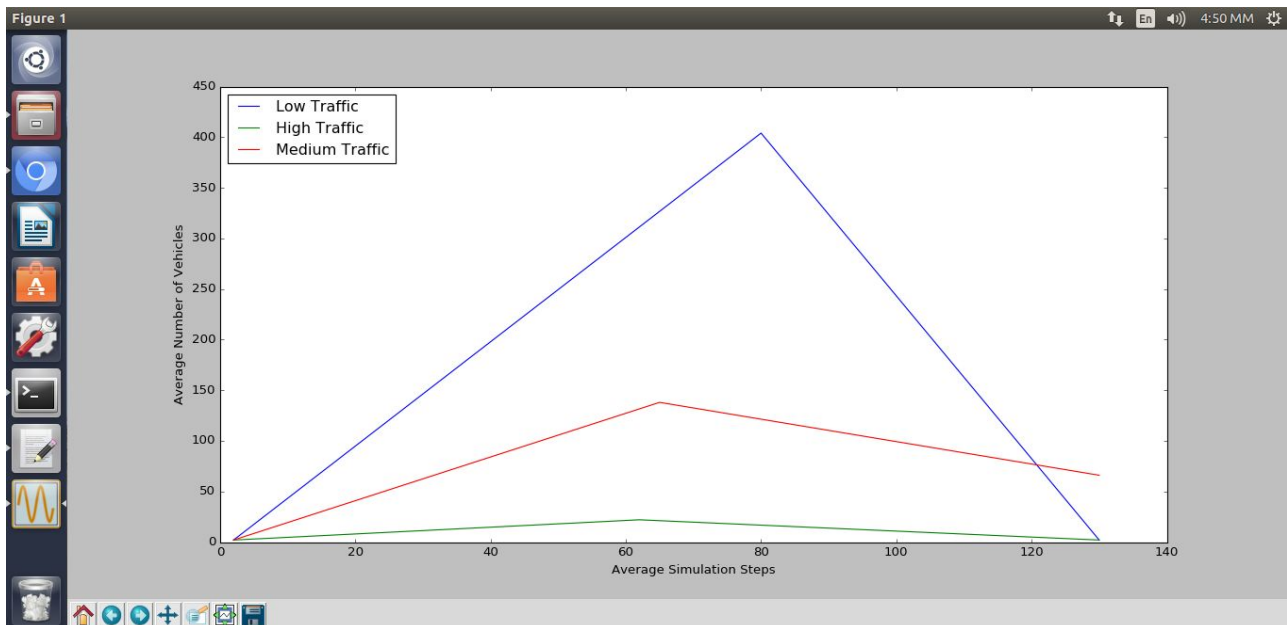
Στο διάγραμμα διακύμανσης της εικόνας 18 παρατηρούμε αυτή τη φορά τη συμπεριφορά της ταχύτητας των οχημάτων ανάλογα με το χρόνο. Μπορούμε να διακρίνουμε ότι σε διασταύρωση με φανάρια η ταχύτητα είναι μεν μικρότερη αλλά ο χρόνος που θα περάσει το όχημα είναι και αυτός μικρότερος. Κατά συνέπεια αυτό σημαίνει ότι η καθυστέρηση σε διασταύρωση προτεραιότητας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την άλλη περίπτωση. Ας παρατηρήσουμε τα σημεία που υπάρχουν σε κάθε γωνία του πράσινου “κουτιού”. Βλέπουμε ότι η ταχύτητα δεν είναι σταθερή, σε κάποια είναι χαμηλή πολύ σε κάποια υψηλή. Αυτό συμβαίνει επειδή η κίνηση την ώρα που προσομοιώνουμε το σενάριό μας είτε βρίσκεται σε ώρες αιχμής είτε σε ύφεση. Για παράδειγμα, βλέπουμε ότι στο σημείο B η ταχύτητα είναι χαμηλή πολύ και ο χρόνος επίσης χαμηλός. Αυτό οφείλεται ότι τρέχουμε σε πρωινές ώρες όπου η κίνηση είναι μεγάλη. Από την άλλη, στο σημείο C βλέπουμε ότι η ταχύτητα είναι αρκετά μεγαλύτερη γιατί εκείνη τη στιγμή η ένταση της κίνησης έχει χαλαρώσει πολύ. Παρομοίως συμβαίνει και στα υπόλοιπα σημεία πάνω στην εικόνα. Κατά συνέπεια, αν ανατρέξουμε παραπάνω στους στόχους που έχουμε θέσει θα μπορέσουμε να παρατηρήσουμε ότι ο στόχος 2 ο οποίος είναι να ρυθμίσουμε με τέτοιο τρόπο την κίνηση σε τρία διαφορετικά στάδια χρόνου και να βρούμε κάποιες βέλτιστες λύσεις έχει επιτευχθεί.

## Γενική συμπεριφορά ταχύτητας στην προσομοίωση



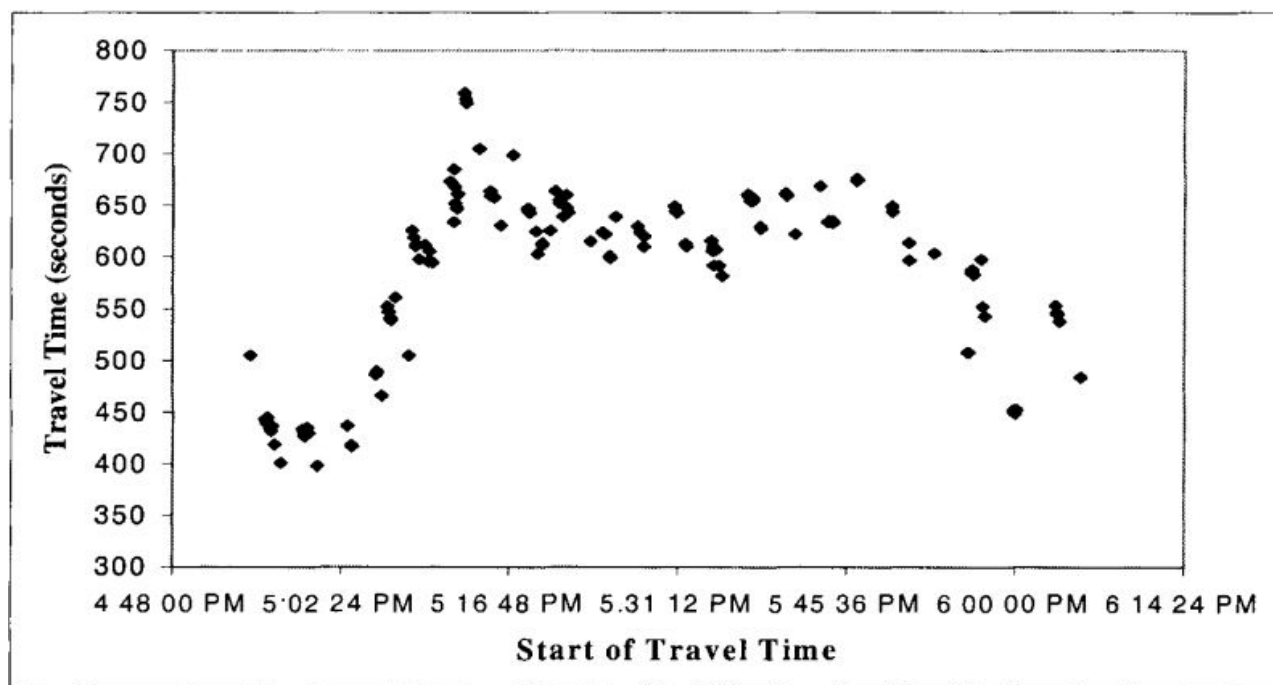
Εικόνα 19: Συμπεριφορά ταχύτητας τριών διαφορετικών περιόδων χρόνου σε διασταύρωση με φανάρι

Η εικόνα 19 απεικονίζει τη συμπεριφορά της ταχύτητας τριών διαφορετικών χρονικών σεναρίων σε διασταύρωση με φωτεινό σηματοδότη. Το average simulation steps αντιπροσωπεύει την πρόοδο της προσομοίωσης ανά χρόνο. Το διάγραμμα αυτό έχει εξαχθεί λαμβάνοντας υπόψιν δεδομένα και των τριών σεναρίων ξεχωριστά παρατηρώντας την ταχύτητα και καθυστέρηση σε κάθε επίπεδο κίνησης Συγκεκριμένα, όταν η ένταση της κίνησης είναι χαμηλή (low traffic) τότε η ταχύτητα είναι αρκετά υψηλή. Αντίθετα, όταν βρισκόμαστε σε υψηλή ένταση κίνησης (high traffic) η ταχύτητα είναι πολύ χαμηλότερη. Τώρα, όταν τα επίπεδα κίνησης δεν είναι ούτε πολύ υψηλά ούτε πολύ χαμηλά (medium traffic) παρατηρούμε ότι ο ο χρόνος είναι μικρότερος. Αυτό συμβαίνει επειδή βρισκόμαστε στη φάση όπου πρακτικά γεμίζει ο δρόμος αλλά δεν έχει φτάσει στο ανώτατο όριο του έτσι ώστε από την πολλή κίνηση να αναγκαστούν τα οχήματα να ελαττώσουν ταχύτητα. Το διάγραμμα της επόμενης εικόνας 20 απεικονίζει τον αριθμό των οχημάτων ανά χρόνο προσομοίωσης στο Sumo (simulation steps) στα ίδια σενάρια.



Εικόνα 20: Διάγραμμα αριθμού οχημάτων - χρόνου τριών διαφορετικών σεναρίων

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύγκριση της δικής μας εργασίας με μια έρευνα του πανεπιστημίου της Virginia στην οποία αξιολογούν τις μεθόδους βελτιστοποίησης χρονισμού των φαναριών με τη χρήση προγράμματος προσομοίωσης. Στο σενάριο προσομοίωσης που έχουν κάνει, έχουν θέσει διαφορετικές τιμές στις παραμέτρους. Παρόλα αυτά η τάξη μεγέθους είναι συγκρίσιμη και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της δικής μας δουλειάς με της δικής τους [23] και λόγω αυτής της απόκλισης και της αριθμητικής υπεροχής σε κάποιες παραμέτρους θεωρούμε ότι τα αποτελέσματα μας αντιπροσωπεύουν πραγματικά δεδομένα καθώς ο χρόνος προσομοίωσης μας είναι παραπλήσιος. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων μας οφείλεται στο ότι χρησιμοποιούν μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων στο σενάριό τους, η ταχύτητα των οχημάτων που έχουν καθορίσει είναι χαμηλότερη από τη δική μας καθώς και η διάταξη του δρόμου είναι αρκετά διαφορετική στις διασταυρώσεις που εφαρμόζουν την έρευνά τους. Επίσης, και αυτοί εκτέλεσαν την προσομοίωση σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ανάλογα με την ένταση της κίνησης για να παρατηρήσουν τη συμπεριφορά της. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η προσομοίωση και οι διαφορετικές χρονικές περίοδοι που τρέχει. Η εικόνα ανήκει στην πηγή [23].



Εικόνα 21: Eastbound Left Lane Travel Time Data [23]

## 4.2 Multi-Objective Optimization

Ο όρος multi-objective προσδίδεται στο γεγονός ότι αν θέλουμε να μεταβάλλουμε ή να βελτιστοποιήσουμε μια παράμετρο αυξάνοντας ή μειώνοντας την τιμή της θα επηρεαστεί οπωσδήποτε ακόμα ένας παράγοντας. Σκοπός μας είναι να μεταβάλλουμε την ταχύτητα μειώνοντας έτσι την πρόκληση κυκλοφοριακής συμφόρησης και ατυχημάτων. Για το λόγο αυτό έχουμε χρησιμοποιήσει τον αλγόριθμο MOTS 2 ο οποίος ανήκει στην κατηγορία αλγορίθμων βελτιστοποίησης που βασίζονται στην αναζήτηση λύσεων και επιλογών σε περιπτώσεις που ο αριθμός των μεταβλητών είναι μεγάλος και το πρόβλημα πολύπλοκο και επίσης επιτρέπει στην προσαρμογή των ρυθμίσεων ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη (στην προκειμένη περίπτωση εμάς) και το αποτέλεσμα που θέλει να εξάγει. Στην περίπτωση μας όπως έχουμε πει:

μείωση κίνησης  $\Rightarrow$  μείωση ταχύτητας **και** μείωση ταχύτητας  $\Rightarrow$  μείωση ατυχημάτων

Δεδομένου λοιπόν ότι έχουμε μια σχέση επίδρασης, μετά από τα αποτελέσματα που έχουμε εξάγει μπορούμε να παρατηρήσουμε την επιρροή της ταχύτητας όταν μεταβληθεί η κίνηση.

### Τιμές εισόδου που λαμβάνει ο βελτιστοποιητής

- Συνολικός αριθμός οχημάτων: μεταβάλλουμε τον συνολικό αριθμό των οχημάτων για να παρατηρήσουμε και να συγκρίνουμε τη συμπεριφορά τους στο οδικό δίκτυο.
- Χρονισμός φαναριών: δίνουμε σαν είσοδο διάφορες τιμές της χρονικής διάρκειας των σταδίων των φαναριών παρατηρώντας την κίνηση.

Ο αριθμός των οχημάτων που λαμβάνει ως είσοδο 813 οχήματα. Η λογική χρονισμού φαναριών (Traffic light logic) έχει ως εξής και μπορούμε να το ελέγξουμε χρησιμοποιώντας την εντολή getPhaseDuration:

```
<phase duration="31" state="GrGr"/>
```

```
<phase duration="6" state="yryr"/>
```

```
<phase duration="31" state="rGrG"/>
```

```
<phase duration="6" state="ryry"/>
```



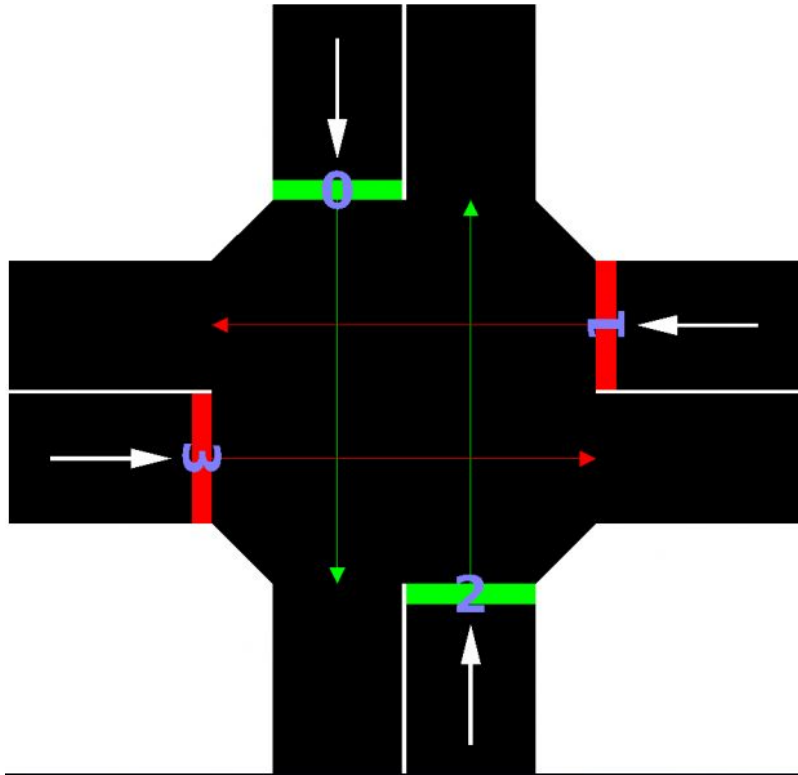
Ένα παράδειγμα που θα μπορούσε να εξηγήσει αναλυτικότερα τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να δημιουργήσουμε ή να τροποποιήσουμε ένα φανάρι φαίνεται παρακάτω:

```
<tlsStates>  
  <tlsState time="<SIM_STEP>" id="<TLS_ID>" programID="<TLS_SUBID>" phase="<PHASE_INDEX>"  
state="<STATE>"/>  
</tlsStates>
```

όπου μπορούμε να τροποποιήσουμε είτε το χρόνο των φαναριών (simulation steps-seconds) είτε τη φάση που θα βρίσκονται.

Πρακτικά έχουμε τέσσερις φάσεις διαρκούν που 31 ,6, 31 και 6 δευτερόλεπτα (simulation steps) αντίστοιχα. Σε αυτές τις φάσεις υπάρχουν τέσσερα χρώματα για το κάθε φανάρι. Η πρώτη φάση περιέχει το στάδιο GrGr που σημαίνει ότι το πρώτο και τρίτο φανάρι στη διασταύρωση είναι πράσινο ενώ το δεύτερο και τέταρτο είναι κόκκινα για 31 δευτερόλεπτα. Η δεύτερη φάση αλλάζει το στάδιο του φαναριού σε ygyg που σημαίνει ότι τα πρώτα δύο είναι πορτοκαλί και τα άλλα δύο κόκκινα για 6 δευτερόλεπτα κ.ο.κ. Έτσι, η τελευταία φάση ακολουθείται από την πρώτη και επαναλαμβάνεται αυτός ο κύκλος συνέχεια. Ο χρονοσμός των φαναριών μεταβάλλεται από τον optimiser ρυθμίζοντας τον έτσι ώστε να έχουμε την κατάλληλη ταχύτητα με τον κατάλληλο χρονοσμό για να επιτύχουμε την ομαλή διεξαγωγή της προσομοίωσης του δικτύου. Συμπερασματικά, αν προσθέσουμε το χρόνο του πράσινου, πορτοκαλί και κόκκινου φαναριού μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό χρόνο που χρειάζεται για να πραγματοποιήσει έναν ολοκληρωμένο κύκλο το φανάρι. Η εικόνα 22 απεικονίζει το id των φαναριών για κάθε φάση. Έχουμε θέσει το κόκκινο φανάρι να διαρκεί 15 δευτερόλεπτα, το πράσινο 11 και το πορτοκαλί 5. Από την εικόνα αυτή καταλαβαίνουμε ότι:

phase 1 → state="GrGr" όπου GrGr=0,1,2,3 αντίστοιχα κ.ο.κ.

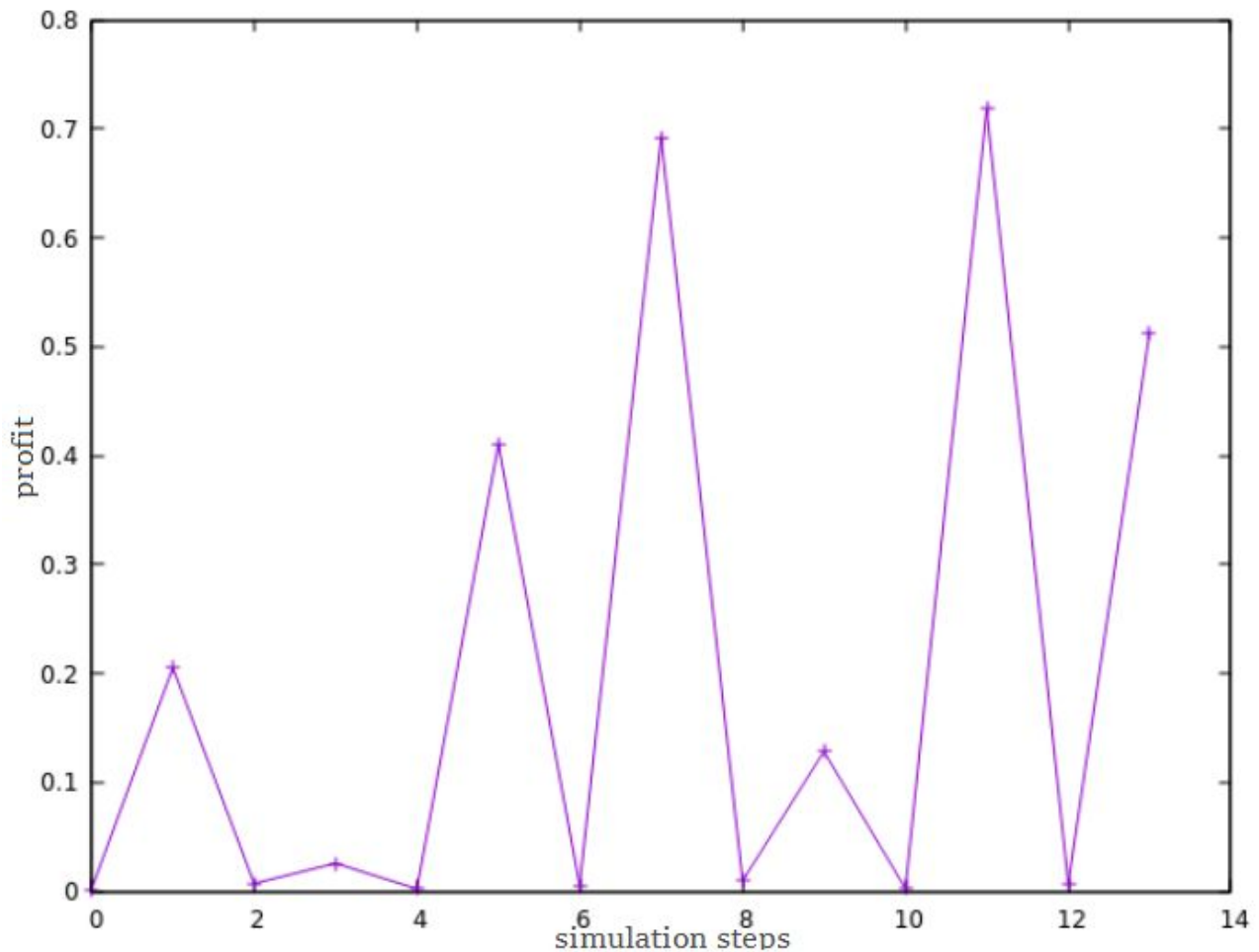


Εικόνα 22: Αρίθμηση φαναριών σε αντιστοιχία με τις φάσεις

Όπως έχουμε προαναφέρει η μείωση του ποσοστού των ατυχημάτων σημαίνει μείωση της κίνησης και κατ' επέκταση της ταχύτητας. Έτσι, με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης MOTS 2 επιτεύχθηκε ο εντοπισμός του βέλτιστου σεναρίου κίνησης όπου η ταχύτητα θα είναι τέτοια έτσι ώστε να είναι η μεγαλύτερη δυνατή που θα επιτρέπει την ομαλή ροή της κυκλοφορίας και ταυτόχρονα θα μειώνει τα ποσοστά κυκλοφοριακής συμφόρησης και ατυχημάτων σε μια διασταύρωση.

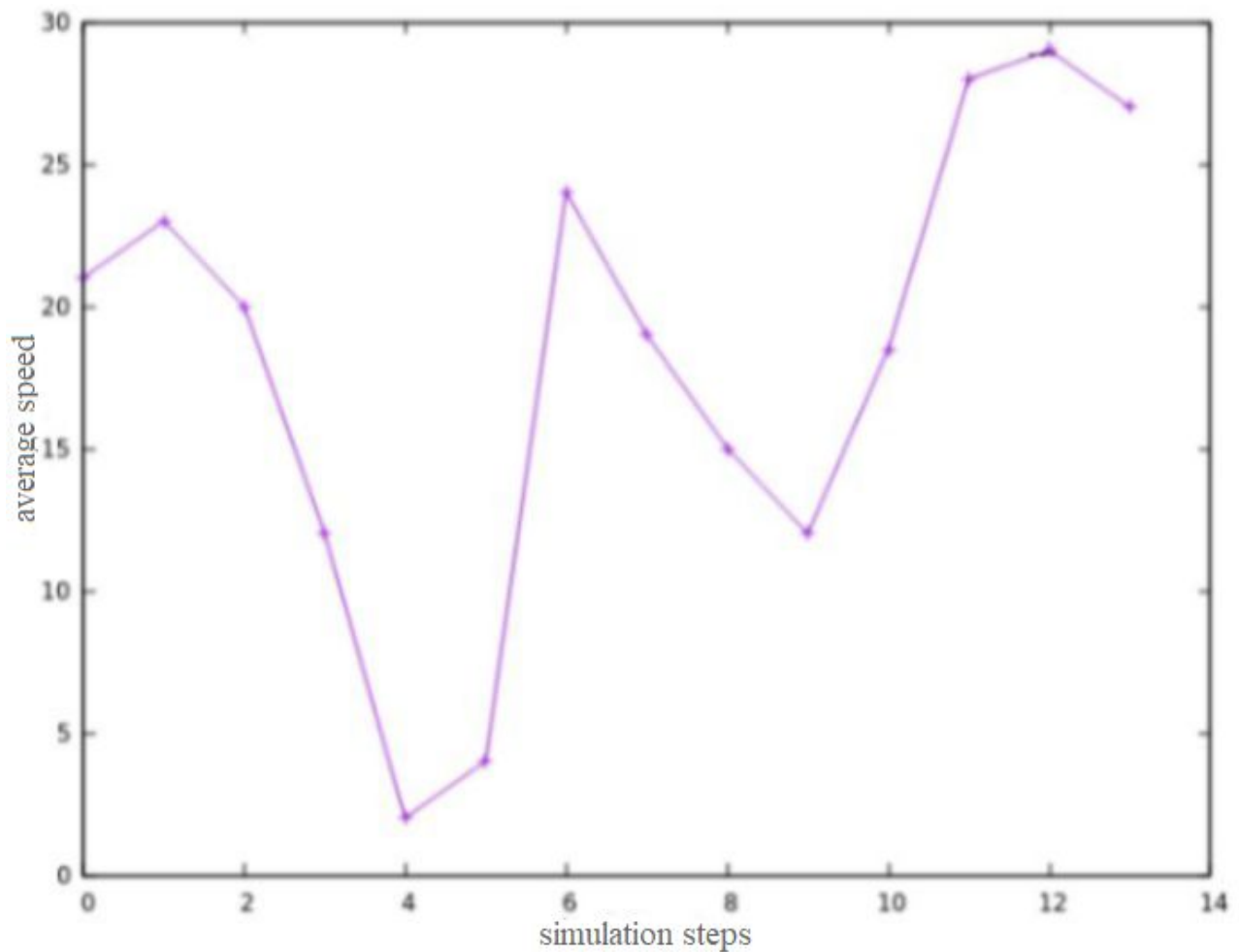
Πρακτικά, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης προτείνει κάποιες λύσεις αφού του έχουμε δώσει τις κατάλληλες εισόδους που είναι ο χρονισμός των φάσεων των φαναριών. Στη συνέχεια, πραγματοποιεί τη λειτουργία που του έχει ανατεθεί και με τους κατάλληλους υπολογισμούς εξάγει τις εξόδους που είναι η ταχύτητα των οχημάτων σε κάθε περίπτωση. Αυτές οι εισοδοί έχουν επιλεγεί από εμάς κατά τη διάρκεια των δοκιμών που πραγματοποιήσαμε για να φτάσουμε σε ένα αποτέλεσμα. Οι εξόδοι που προκύπτουν είναι οι λύσεις που μας ενδιαφέρουν. Η επιλογή της τιμής των εισόδων έχει γίνει από εμάς κατά τη διαδικασία δοκιμών ώστε να εντοπίσουμε το βέλτιστο σενάριο. Στην εικόνα 23 μπορούμε να παρατηρήσουμε τις εξόδους που εξάγει ο αλγόριθμος αφού του έχουμε δώσει σαν είσοδο κάποιες συγκεκριμένες τιμές. Όπως θα μπορούσαμε να δούμε αυτό

που έχει εξάγει (εικόνα 25) είναι οι πιθανές επιλογές που θα μπορούσε να λάβει ο decision maker για να επιλέξει την κατάλληλη λύση εκτιμώντας τις διαφορές μεταξύ των ακραίων λύσεων. Ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει τη μείωση που θα μπορούσε να δεχτεί η ταχύτητα για την επίτευξη των στόχων που έχουμε θέσει στο κεφάλαιο 1.3, η οποία είναι 0,72 και ο οριζόντιος είναι ο χρόνος προσομοίωσης (simulation steps ανά δεκάδα) που έχει τρέξει η βελτιστοποίηση και σε κάθε μια από αυτές προκύπτει κάποια ενδεχόμενη λύση. Το Profit του κάθετου άξονα αντιπροσωπεύει το κέρδος (δηλαδή η μείωση της ταχύτητας και της καθυστέρησης φτάνοντας στο μέγιστο επίπεδο της ταχύτητας καθιστώντας επιτρεπτή την ομαλή ροή κίνησης). Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα θα μειωθεί κατά ποσοστό 0,76 και το αποτέλεσμα που θα βγάλει θα είναι το ιδανικότερο για μας για να καλύψουμε το δίκτυο με ασφάλεια. Οι διακυμάνσεις που φαίνονται στην εικόνα 23 αντιπροσωπεύουν το ποσοστό που θα πρέπει να μειωθεί η ταχύτητα στο σενάριο για να πετύχουμε το στόχο μας.



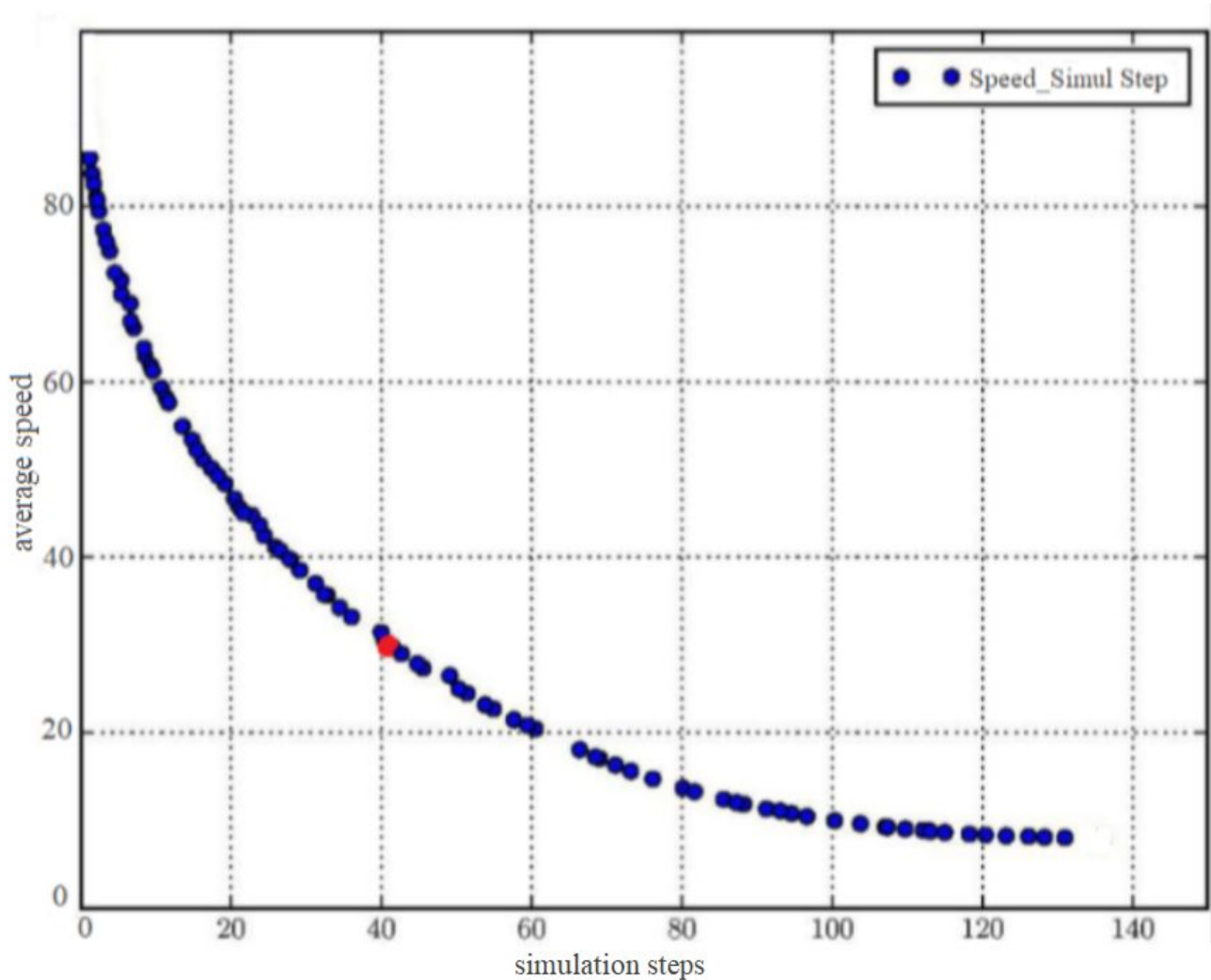
Εικόνα 23: Λύσεις στη μείωση ταχύτητας με σκοπό την εξαγωγή βέλτιστου σεναρίου

Έπειτα, αφού το MOTS 2 εξήγαγε κάποιες λύσεις, επιλέγουμε δοκιμάζοντας τις λύσεις που μας προτείνει και με βάση τα αποτελέσματα διαλέγουμε τη βέλτιστη για εμάς λύση. ποια από αυτές είναι η ιδανική για να επιτύχουμε το στόχο 1 της διπλωματικής εργασίας. Υπολογίζοντας πλέον αυτή τη μείωση στην ταχύτητα έπειτα από τα δεδομένα που του δώσαμε να επεξεργαστεί, έχουμε ακριβώς την τιμή της ταχύτητας που θα μπορούσαν να κινούνται τα οχήματα για την εξασφάλιση μιας ασφαλούς μετακίνησης σε μια διασταύρωση χωρίς απρόσμενα περιστατικά όπως έχουμε αναφέρει κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας (βλέπε εικόνα 24).



Εικόνα 24: Η τιμή της ταχύτητας μετά τη βελτιστοποίηση (1)

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης εξήγαγε κάποια αποτελέσματα. Από τη βελτιστοποίηση, μετά από έναν συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων που έχουμε ρυθμίσει εμείς, επιλέχθηκε μια λύση με την ταχύτητα να ανέρχεται στα 29 χλμ/ώρα. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε είναι ικανή να εντοπίσει λύσεις που επιτυγχάνουν απόδοση στην ταχύτητα και μέσα σε αυτές τις λύσεις υπάρχει και η ιδανικότερη για να καλύψει τις δικές μας προσδοκίες. Η λύση για την οποία γίνεται λόγος και με βάση αυτή θα μπορούσαν να κινούνται τα οχήματα σε μια διασταύρωση αστικού περιβάλλοντος μειώνοντας ταυτόχρονα το ποσοστό των ατυχημάτων και την πρόκληση κυκλοφοριακής συμφόρησης απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα.



Εικόνα 25: Η τιμή της ταχύτητας μετά τη βελτιστοποίηση (2)

Η εικόνα 25 απεικονίζει το τελικό αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης της ταχύτητας δίνοντας έμφαση στη υποχρεωτική μεταβολή του ενός παράγοντα όταν μεταβάλλεται ο άλλος. Είναι μια εικόνα που απεικονίζει μια σειρά πιθανών επιλογών από όπου θα επιλεγεί η κατάλληλη λύση

εκτιμώντας τις διαφορές μεταξύ όλων των λύσεων. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την ταχύτητα μετά τη διαδικασία που ακολούθησε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τα δευτερόλεπτα της προσομοίωσης. Το καλύτερο σενάριο ως προς την ταχύτητα των οχημάτων είναι όπως προαναφέραμε 29 χλμ/ώρα. Αυτό σημαίνει πως έχουμε πετύχει τον συνδυασμό των στόχων που έχει θέσει στο πρώτο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε βρει τη βέλτιστη ταχύτητα που θα μπορούσαν να κινούνται τα οχήματα σε ένα οδικό δίκτυο χωρίς να επηρεάζουν την ομαλή ροή της κίνησης και χωρίς να προκαλούν δυσλειτουργίες στο σύστημα.

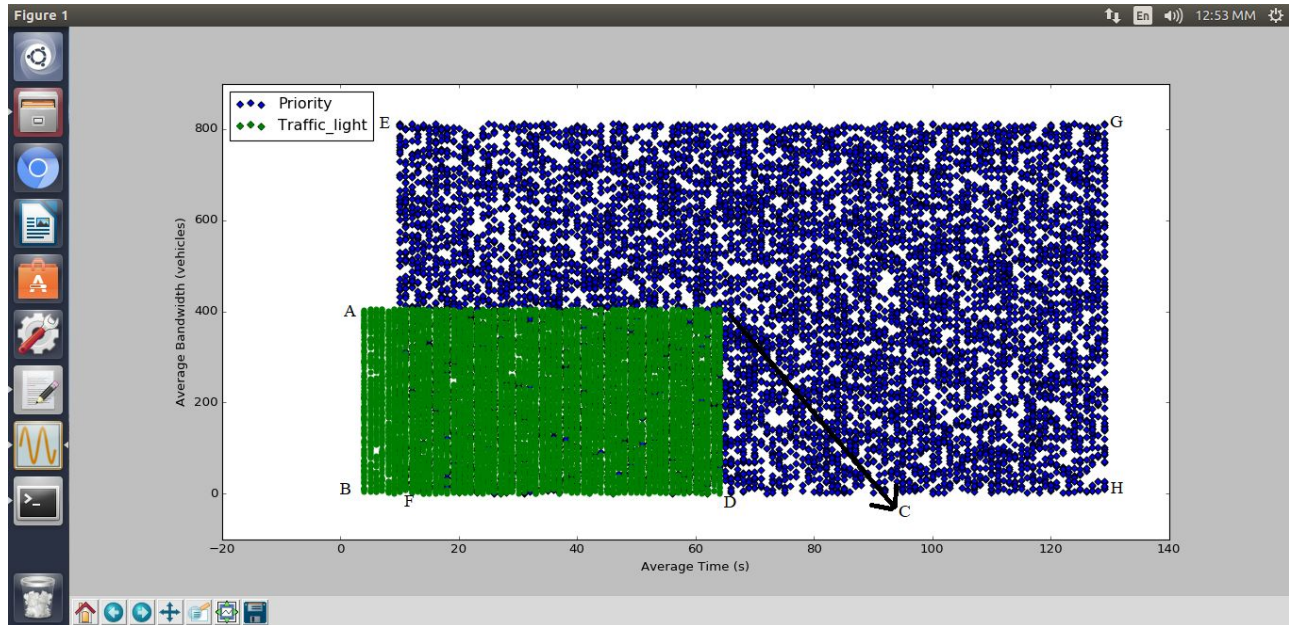
### 4.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων μας έπειτα από μελέτη των διαγραμμάτων

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που έχουμε εξάγει τρέχοντας την προσομοίωση μας σε μία μεγάλο μήκους κλίμακας μεταξύ 10-100-1000-10000 φορών παρατηρούμε στον οριζόντιο άξονα που είναι ο χρόνος ότι σε πολλά σενάρια τα οχήματα πραγματοποιούν την αποστολή τους, δηλαδή να διασχίσουν τη διασταύρωση και να φτάσουν στον προορισμό τους σε λιγότερο χρόνο από τα 140 δευτερόλεπτα. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα έχει καταφέρει να εκτελέσει κάποιες από τις λειτουργίες που ορίζει το Traci νωρίτερα και έτσι το όχημα το κάνει σε λιγότερο χρόνο. Όταν τρέχει η προσομοίωση μας αν αυξήσουμε την καθυστέρηση (delay) στο sumo-gui έτσι ώστε να μπορούμε να διακρίνουμε καθαρά την κινητικότητα θα δούμε ότι τα οχήματα καθυστερούν ένα μικρό χρονικό διάστημα ελάχιστων δευτερολέπτων να εισέλθουν στη προσομοίωση και να φτάσουν στη διασταύρωση. Επίσης, αν παρατηρήσουμε τον κάθετο άξονα που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των οχημάτων, όταν έχουμε για ακόμη μια φορά λίγα δεδομένα μπορεί να περιορίσει τα οχήματα ή να θέσει κάποιο ανώτατο όριο στα οχήματα που θα περάσουν από την προσομοίωση για λόγους ομαλής κυκλοφορίας. Φυσικά, είναι αναμενόμενο κάποιες φορές μεγάλος αριθμός οχημάτων να φτάνει στο πέρας της προσομοίωσης σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό, σύμφωνα με την πραγματικότητα, μπορεί να συμβεί σε αρκετές περιπτώσεις, π.χ. να μη συναντήσει κόκκινο φανάρι. Έτσι, η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη, δεν χρειάζεται να ελαττώσει πολύ όταν φτάνει στην σηματοδοτούμενη διασταύρωση και αποφεύγει την όποια καθυστέρηση. Τέλος, όταν ο αριθμός των οχημάτων και ο χρόνος φτάνουν στο προκαθορισμένο τους όριο το δίκτυο αδειάζει εντελώς αφού αποθηκεύει όλες τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.

Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος που ξεκινάει η προσομοίωση είναι 0.0 (πράγμα που ορίζεται ξεκάθαρα από εμάς) καθώς στην προσομοίωση τη δεδομένη στιγμή δεν υπάρχει κανένα όχημα. Όταν αυτή ξεκινά να τρέχει, αφού περάσει ελάχιστος χρόνος αρχίζουν να εισέρχονται τα οχήματα στο πλάνο και όσο περνάει ο χρόνος όλο και περισσότερα οχήματα διασχίζουν τη διασταύρωση για να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους όπου και εξέρχονται με σταθερό ρυθμό.

Αφού έχουμε μεταβάλλει, χρόνο και αριθμό οχημάτων, ελέγχουμε την ταχύτητα με την οποία θα κινούνται καθώς και το ρυθμό που αυτά θα εισέρχονται στην προσομοίωση έχουμε φτάσει στην εξής θέση: μπορούμε πλέον να μειώσουμε ως ένα αποδεκτό βαθμό την κυκλοφοριακή συμφόρηση σε μια ελεγχόμενη από φωτεινούς σηματοδότες διασταύρωση και κατά συνέπεια,

σύμφωνα πάντα με τους στόχους που έχουμε θέσει στο κεφάλαιο 1, να αυξήσουμε το βαθμό αποφυγής κάποιου είδους ατυχήματος.



Εικόνα 26: Χρήση αλγορίθμου Monte Carlo σε 10000 διαφορετικά σενάρια (2)

Στην εικόνα 26 διακρίνουμε κάποια κεφαλαία αγγλικά γράμματα. Τα γράμματα αυτά εκπροσωπούν τα σημεία που θέλουμε να εξηγήσουμε και κάθε σημείο αντιπροσωπεύει τη διαφορετική χρονική στιγμή που τρέχει η προσομοίωση. Παρατηρώντας λοιπόν το πράσινο “κουτάκι” βλέπουμε στο σημείο B ότι ξεκινάει το πρώτο όχημα σε χρόνο 4 δευτερόλεπτα. Συγκεκριμένα, αυτό σημαίνει ότι εκείνη τη στιγμή ξεκινάει η προσομοίωση με το πρώτο όχημα να εισέρχεται. Επομένως, αν θέλουμε να είμαστε ρεαλιστές η ερμηνεία που θα δώσουμε είναι ότι βρισκόμαστε σε μια περίοδο της ημέρας π.χ. 12 η ώρα το βράδυ όπου η κατάσταση της κίνησης βρίσκεται σε ύφεση. Έτσι, τα οχήματα περνούν σε λιγότερο χρόνο. Αν από την άλλη παρατηρήσουμε το σημείο G στην επάνω δεξιά γωνία βλέπουμε ότι η προσομοίωση για να ολοκληρωθεί χρειάζεται πάνω από 120 δευτερόλεπτα. Αυτό θα μπορούσε να ερμηνευτεί ως η χρονική περίοδος που πραγματοποιείται η προσομοίωση είναι στις 9 το πρωί δηλαδή σε ώρα αιχμής. Έχουμε εξάγει τέτοια αποτελέσματα γιατί σύμφωνα με το κεφάλαιο 1.3 εξετάσαμε τη συμπεριφορά της ταχύτητας σε τρεις διαφορετικές περιόδους χρόνου.

Τέλος, καταλαβαίνουμε το λόγο που η ταχύτητα σε κάθε περίπτωση είναι χαμηλή, υψηλή ή μέτρια. Ανάλογα με την περίοδο που τρέχει η προσομοίωση μειώνεται ή αυξάνεται η ταχύτητα αντίστοιχα.

## Κεφάλαιο 5ο- Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

### 5.1 Συνοπτική περιγραφή του πρακτικού κομματιού και των αποτελεσμάτων

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η επαλήθευση/εκτίμηση της αποτελεσματικότητας μιας μεθοδολογίας που εισήχθη, βασισμένη στην τεχνητή νοημοσύνη, ώστε να ρυθμιστεί και να βελτιστοποιηθεί. Υλοποιήσαμε ένα σενάριο προσομοίωσης διασταύρωσης ενός οδικού δικτύου, αντιπροσωπεύοντας αστικές περιοχές και χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Monte Carlo εξετάσαμε όλες τις πιθανές λύσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν, από τις πιο σπάνιες περιπτώσεις έως τις πιο συχνές και σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας όπου τα επίπεδα κίνησης διαφέρουν.

Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε η χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης MOTS 2 ξεκινώντας από ένα μεσαίου επιπέδου σενάριο για να δούμε πως θα μειωθεί ή αυξηθεί η ταχύτητα, ο οποίος έχοντας λάβει τις κατάλληλες τιμές και δεδομένα από εμάς, έβγαλε κάποια αποτελέσματα και μέσα σε αυτά ήταν και η βέλτιστη λύση που ψάχνουμε. Έτσι, τρέχοντας το σενάριο της προσομοίωσης και λαμβάνοντας κάποιες τιμές, με τη βοήθεια του αλγορίθμου βρήκαμε την βέλτιστη λύση. Στη συνέχεια, μετατρέψαμε τα αποτελέσματα του Monte Carlo αλλά και του MOTS 2 σε διαγράμματα ώστε να μπορούμε να έχουμε μια ευρύτερη εικόνα όλων των πιθανών λύσεων και να διακρίνουμε τα βέλτιστα σημεία.

Τέλος, πραγματοποιήσαμε μια σύγκριση με έναν άλλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε από ένα πανεπιστήμιο της Virginia και παρατηρήσαμε ότι τα αποτελέσματα μας είναι συγκρίσιμα, αν και οι παράμετροί μας είναι λίγο διαφορετικές (αριθμός οχημάτων, χρόνος).

### **Γενικό Συμπέρασμα**

Έπειτα από πολλά στάδια προσπαθειών να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης και της πρόκλησης ατυχημάτων, συνδυάζοντας την τεχνική του αλγορίθμου Monte Carlo για να χρησιμοποιήσουμε κάθε πιθανή με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης MOTS 2 για να βρούμε την ιδανικότερη επιλογή από αυτές τις πιθανές λύσεις εκτιμούμε ότι μπορέσαμε ως ένα σημείο να αποδείξουμε τις προϋποθέσεις όπου η μέση ταχύτητα μιας διασταύρωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση τους δεν είναι γραμμική. Η μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης θα επιτευχθεί μειώνοντας τη μέση ταχύτητα των οχημάτων καθώς αν υπάρχει μια ομαλή ροή των οχημάτων μέχρι να φτάσουν στο φανάρι δε θα δημιουργείται συνωστισμός από οχήματα στα φανάρια αποφεύγοντας την καθυστέρηση. Όταν συγκεκριμένος αριθμός οχημάτων φτάνει στο φανάρι τότε



θα αλλάζει φάση και θα επιτρέπει στα οχήματα να περάσουν μέχρι το επόμενο φανάρι να φτάσει στον προκαθορισμένο από εμάς αριθμό οχημάτων και να γίνει εκείνο πράσινο. Στη διαδικασία που ακολουθήσαμε, αυξομειώσαμε την ταχύτητα των οχημάτων και καταλήξαμε στο γεγονός ότι για να πετύχουμε το στόχο μας η μέση ταχύτητα του οχήματος πρέπει να μειωθεί και να διατηρηθεί σε ένα σταθερό επίπεδο όπως φαίνεται στις εικόνες 23,24 και 25. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει, αποδεικνύουμε την μεγάλη επίδραση της φωτεινής σηματοδότησης στη ρύθμιση της κίνησης σε μια διασταύρωση. Οπότε η βέλτιστη λύση που προτείνουμε στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για να βελτιώσουμε, όπως έχουμε αναφέρει στο υποκεφάλαιο 1.3, τουλάχιστον σε ένα αξιοπρεπή βαθμό αυτό το ζήτημα που ολοένα και περισσότερο ταλαιπωρεί τη σημερινή κοινωνία είναι ο σχεδιασμός των διασταυρώσεων να προϋποθέτει φωτεινή σηματοδότηση και μείωση της ταχύτητας ώστε να μειωθεί η κίνηση και να ισορροπήσουν τα επίπεδα της κυκλοφορίας. Αυτό κατ' επέκταση σημαίνει ότι πρέπει να εισάγουμε μηχανισμούς που θα έχουν ως αποτέλεσμα τη **μείωση της ταχύτητας**. Αυτό που μειώθηκε στην προκειμένη περίπτωση είναι η ταχύτητα των οχημάτων στο σενάριο έτσι ώστε να φτάνει μικρότερος αριθμός οχημάτων στο φανάρι κάθε φορά για να αποφεύγεται η καθυστέρηση. Οδηγηθήκαμε σε αυτό το αποτέλεσμα κάνοντας βελτιώσεις και προσαρμογές στην προσομοίωσή μας και λάβαμε υπόψιν μας παράγοντες που επηρεάζουν στο μέγιστο βαθμό την κίνηση βασιζόμενοι πάντα σε πραγματικές συνθήκες. Τα στοιχεία που εισάγαμε αντικατροπίζουν την πραγματικότητα. Η συνεισφορά της δουλειάς μας απαιτεί την κατάλληλη διαχείριση για να αποδειχθεί αποτελεσματική. Προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε το θέμα με το δικό μας τρόπο προσαρμόζοντας και βελτιστοποιώντας όσους παράγοντες επηρεάζουν το οδικό δίκτυο για να μπορέσουμε να εκφράσουμε στους ειδικούς μία ακόμα άποψη που βασίζεται σε πειραματική διαδικασία και μελέτη.

## 5.2 Υποθέσεις και περιορισμοί

Το υποκεφάλαιο αυτό συμπεριλαμβάνει τις υποθέσεις και τους περιορισμούς της διπλωματικής εργασίας, τα οποία αποτελούνται από τα εξής στοιχεία τα οποία φαίνονται αναλυτικότερα στον πίνακα 4:

- Περιγραφή ρίσκου
- Ημερομηνία
- Επίδραση (χαμηλή/μεσαία/υψηλή)
- Σοβαρότητα (χαμηλή/μεσαία/υψηλή)
- Τρόπος βελτίωσης

A/A	Περιγραφή Ρίσκου	Επίδραση	Σοβαρότητα	Βελτίωση
	Χρήση συγκεκριμένου τύπου οχημάτων (αυτοκίνητα, λεωφορεία)	<b>Υψηλή</b>	<b>Υψηλή</b>	Χρήση διαφορετικού τύπου οχημάτων (φορτηγά, ποδήλατα, μηχανάκια κ.α.)
2	Χρήση σηματοδότη με τρεις φάσεις (πράσινο, πορτοκαλί, κόκκινο)	<b>Υψηλή</b>	<b>Μέτρια</b>	Δημιουργία δυναμικού συστήματος προσαρμογής ενδιάμεσης σταδίων φαναριών ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων [24] (πράσινο- πορτοκαλί, πορτοκαλί κόκκινο κ.α.)
3	Μη δυνατότητα παροχής δυναμικής πληροφορίας (ταχύτητα, αριθμός οχημάτων)	<b>Μέτρια</b>	<b>Μέτρια</b>	Χρήση δεδομένων από αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο δρόμο και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την κίνηση του δικτύου και τον τύπο οχήματος.
4	Μη δυνατότητα καταμέτρησης οχημάτων	<b>Μέτρια</b>	<b>Χαμηλή</b>	Χρήση δεδομένων από συσκευή καταμέτρησης οχημάτων (induction loop) που είναι εγκατεστημένη στο δρόμο και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κίνηση του δικτύου.

Πίνακας 4: Πίνακας αξιολόγησης ρίσκου

### *Ρίσκο και βελτίωση*

Τα αποτελέσματα που έχουμε εξάγει με βάση την ταχύτητα και τον αριθμό των οχημάτων έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας τον προκαθορισμένο από το πρόγραμμα του Sumo τύπο

οχημάτων. Συγκεκριμένα, έχουμε χρησιμοποιήσει μόνο οχήματα πόλης ενός τύπου, αυτοκίνητα και λεωφορεία. Αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένα ρίσκο από πλευράς μας ως προς τα αποτελέσματά μας και θα μπορούσαμε να το βελτιώσουμε αν χρησιμοποιήσουμε διαφορετικούς τύπους οχημάτων όπως φορτηγά, μηχανάκια, ποδήλατα κ.α.

Στη συνέχεια, μία πολύ σημαντική παράμετρος που υπό άλλες περιπτώσεις θα έπαιζε καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων είναι η φωτεινή σηματοδότηση. Στο δικό μας σενάριο έχουμε χρησιμοποιήσει τρεις φάσεις (stages) μεταβολής των φαναριών όπως έχουμε προαναφέρει στο κεφάλαιο 3: πράσινο, πορτοκαλί, κόκκινο. Δεν έχουμε λάβει υπόψιν κάποιο ενδιάμεσο στάδιο (interstage) όπως εναλλαγή φαναριών από πράσινο - πορτοκαλί ή πορτοκαλί - κόκκινο. Το μήνυμα που θέλουμε να περάσουμε είναι ότι θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε στη μοντελοποίησή μας ένα δυναμικό σύστημα το οποίο θα προσαρμόζεται ανάλογα με την πληροφορία που δέχεται, δηλαδή τον αριθμό των οχημάτων που περνούν και θα αλλάζει αυτόματα τα ενδιάμεσα στάδια. Μία τέτοια δημοσίευση είναι η [24], στην οποία οι αρθρογράφοι χρησιμοποιούν τρεις φάσεις και δύο στάδια. Δηλαδή, κόκκινο, κόκκινο- πορτοκαλί, πράσινο, πράσινο- πορτοκαλί, κόκκινο. Με αυτό το τρόπο εκτιμούν ότι μπορούν να εντοπίσουν τα πιθανά σημεία κυκλοφοριακής συμφόρησης και να την αποτρέψουν. Επίσης, στη συγκεκριμένη έρευνα έχουν θέσει τη φάση πορτοκαλί να διαρκεί περισσότερο δευτερόλεπτα απ' ότι το στάδιο πορτοκαλί- κόκκινο.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να θεωρήσουμε σαν “ρίσκο” την παράμετρο της πληροφορίας. Στους δρόμους εδώ στην Ελλάδα συγκεκριμένα δεν υπάρχει η δυνατότητα δυναμικής πληροφορίας οπότε εμείς έχουμε τρέξει την προσομοίωση με βάση αυτά τα δεδομένα οδικής κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα, σε πολλές χώρες υπάρχει ένα πηνίο εγκατεστημένο στο δρόμο το οποίο αρχίζει να μετράει τα οχήματα αυτόματα κάθε φορά που περνάνε. Εμείς, στην προσομοίωσή μας δεν έχουμε λάβει υπόψιν μας τέτοιου του είδους μετρητές οχημάτων, κάτι που πιθανών επηρεάζει τα αποτελέσματά μας αφού ένας μετρητής θα μπορούσε να μετρά τα οχήματα που καταφθάνουν στο εκάστοτε φανάρι και να ειδοποιεί για την αλλαγή φάσης του όταν φτάνει σε ένα προκαθορισμένο όριο αριθμού οχημάτων.

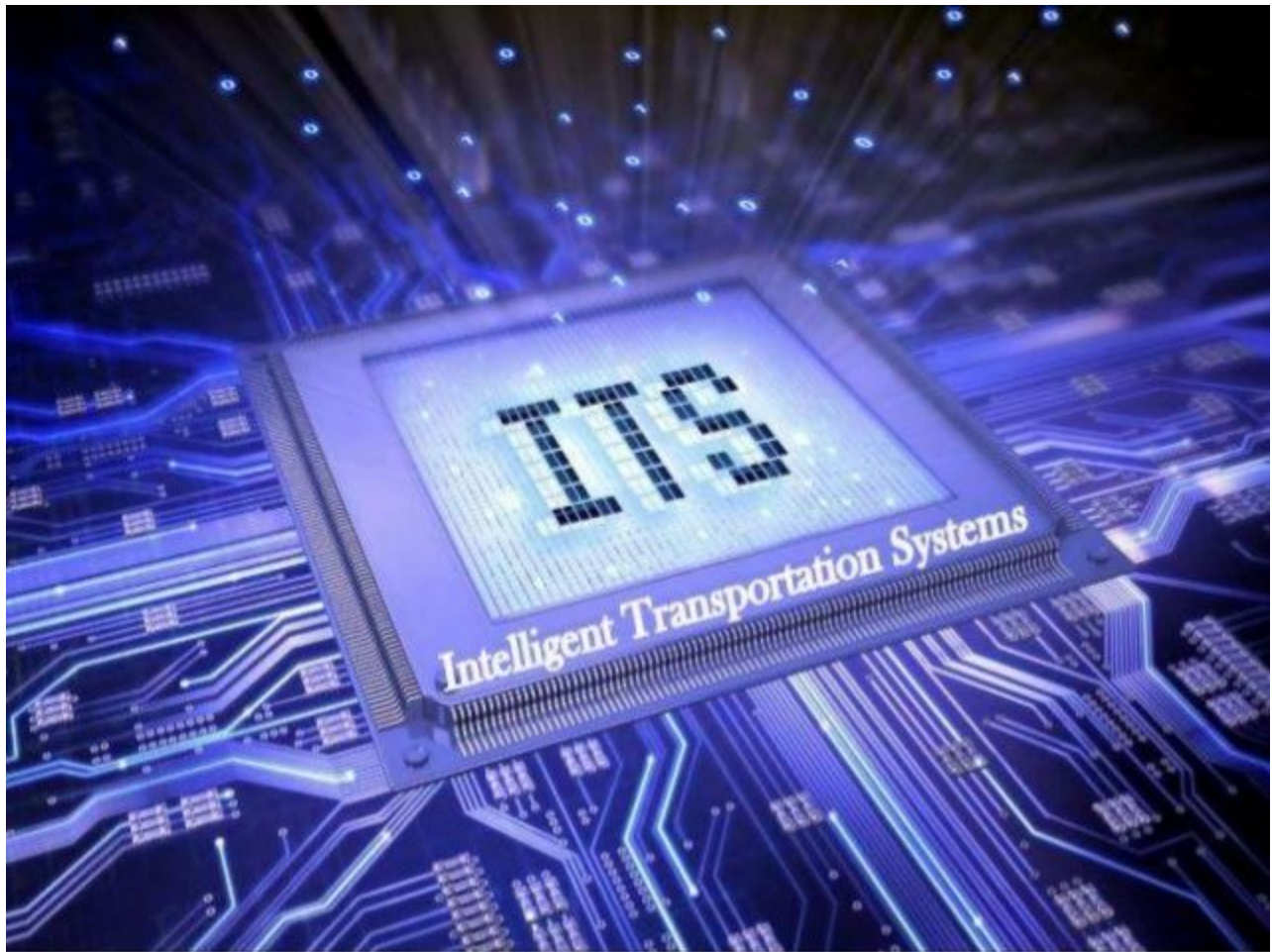
### *Σοβαρότητα και επίπτωση των συγκεκριμένων επιλογών στους στόχους μας*

Όπως έχουμε προαναφέρει αρκετές φορές ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μείωση της μέσης ταχύτητας των οχημάτων. Αυτό λοιπόν επηρεάζεται άμεσα από το γεγονός ότι

έχουμε τρεις φάσεις φαναριών και όχι ενδιάμεσα στάδια γιατί οι φάσεις αυτές καθορίζουν και την ταχύτητα των οχημάτων στο δρόμο.

### 5.3 Μελλοντικές ενδεχόμενες επεκτάσεις

- Μία μελλοντική επέκταση που θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν μία επένδυση στο οδικό δίκτυο παγκοσμίως θα ήταν η χρήση κάμερας προηγμένης τεχνολογίας, βλέπουμε εικόνα 2, σε σημεία πολύ κοντά στους φωτεινούς σηματοδότες. Ο ρόλος αυτής της κάμερας είναι η συλλογή δεδομένων που θα εξάγονται από αυτή με την χρήση της τεχνικής μηχανικής όρασης (machine vision) όπως βλέπουμε στο [25]. Για παράδειγμα, όταν πλησιάζουν 15 οχήματα στο φανάρι ενώ αυτό είναι κόκκινο, αυτόματα να δίνεται εντολή και το φανάρι να ανάβει πράσινο έτσι ώστε να αποφύγουμε την συμφόρηση στη συγκεκριμένη λωρίδα.
- Επιπροσθέτως, ένα ακόμη μακροπρόθεσμο σενάριο θα ήταν η τοποθέτηση κάμερας ή ανιχνευτή πάνω στα οχήματα που θα τους δίνει τη δυνατότητα να “βλέπουν” το ένα όχημα το άλλο και από πίσω αλλά και μπροστά. Δε θα μπορούσε να παραλειφθεί το γεγονός ότι ένα τέτοιο μεγάλο βήμα στη σύγχρονη αγορά θα μπορούσε να επιφέρει μεγάλα και καθοριστικά αποτελέσματα ως προς την ασφάλεια στο δρόμο.
- Μία τρίτη μελλοντική επέκταση που θα μπορούσε ενδεχομένως να εξετασθεί θα ήταν η ρύθμιση της διάταξης του δρόμου (layout). Θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν δεδομένα από αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στην ασφαλτο ή σε φωτεινούς σηματοδότες που θα μετρούσαν επίσης τον αριθμό των οχημάτων που περιμένουν και όταν ο αριθμός αυτός φτάσει στο προκαθορισμένο όριο από τον εκάστοτε σχεδιαστή κυκλοφοριακής κίνησης θα μεταβάλλεται η φάση του σηματοδότη.
- Τέλος, θα μπορούσαμε να θέσουμε ως μελλοντικές επεκτάσεις τις προτάσεις που έχουμε ήδη κάνει στο υποκεφάλαιο 5.2. Η ρύθμιση του τύπου οχημάτων, η εγκαθίδρυση ενδιάμεσων φάσεων στους φωτεινούς σηματοδότες και η παροχή δυναμικής καταμέτρησης και πληροφορίας για τον αριθμό των οχημάτων ανά τακτικά χρονικά διαστήματα θα μπορούσαν να παίξουν σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση ενός οδικού δικτύου.



Εικόνα 27: Μελλοντικά έξυπνα συστήματα μέσω μεταφοράς

## Βιβλιογραφία-Αναφορές

- [1] Dadax. (2017). *Worldometers*. Available: <http://www.worldometers.info/gr/>. Last accessed 14th Jul 2017
- [2] Henrik Hololei. (2017). *Road Safety Awards: Commission rewards initiatives in Greece, France, Portugal, Romania and Sweden*. Available: [https://ec.europa.eu/transport/media/news/2017-06-26-road-safety-awards\\_en](https://ec.europa.eu/transport/media/news/2017-06-26-road-safety-awards_en). Last accessed 14th Jul 2017
- [3] Carlos Gershenson, David A. Rosenblueth, “*Self-organizing traffic lights at multiple-street intersections*”, Mexico, April 2011
- [4] Stephen Clark, “*Traffic Prediction Using Multivariate Nonparametric Regression*”, United Kingdom, Journal of transportation engineering, vol. 129, p. 161-168, March 2003
- [5] Juan Pan, Iulian Sandu Popa, Karine Zeitouni, and Cristian Borcea, “*Proactive Vehicular Traffic Rerouting for Lower Travel Time*”, Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 62, No. 8, p. 3551-3568, October 2013
- [6] Shunsuke Kamijo, Yasuyuki Matsushita, Katsushi Ikeuchi, Fellow, IEEE, and Masao Sakauchi, “*Traffic Monitoring and Accident Detection at Intersections*”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 1, No. 2, June 2000
- [7] Edward A. Smith, Alexander O. Lichtner. (2016). *Statistics on Intersection Accidents*. Available: <https://www.autoaccident.com/statistics-on-intersection-accidents.html>. Last accessed 12th Jul 2017
- [8] Pavel Masek, Jan Masek, Petr Frantik, Radek Fujdiak, Aleksandr Ometov, Jiri Hosek, Sergey Andreev, Petr Mlynek and Jiri Misurec. (2016). A Harmonized Perspective on Transportation Management in Smart Cities: The Novel IoT-Driven Environment for Road Traffic Modeling. *Sensors*. 16 (1), p2-23
- [9] Carlos Gershenson, David A. Rosenblueth, “*Self-organizing traffic lights at multiple-street intersections*”, Mexico, April 2011
- [10] Rodolfo I. Meneguette, Geraldo P. R. Filho, Daniel L. Guidoni, Gustavo Pessin, Leandro A. Villas, Jó Ueyama. (2016). Increasing Intelligence in Inter-Vehicle Communications to Reduce Traffic Congestions: Experiments in Urban and Highway Environments. *Pone*. 11 (8), p1-25
- [11] Abderrahmane Lakas, Moumena Chaqfeh. (2010). *A novel method for reducing road traffic congestion using vehicular communication*. Available: [https://www.researchgate.net/publication/220761539\\_A\\_novel\\_method\\_for\\_reducing\\_road\\_traffic\\_congestion\\_using\\_vehicular\\_communication](https://www.researchgate.net/publication/220761539_A_novel_method_for_reducing_road_traffic_congestion_using_vehicular_communication). Last accessed 14th Jul 2017

- [12] Soner Haldenbilen, Ozgur Baskan and Cenk Ozan. (2013). An Ant Colony Optimization Algorithm for Area Traffic Control. In: Helio J.C. Barbosa *Ant Colony Optimization - Techniques and Applications*. Turkey: InTech. 212
- [13] Néstor Cárdenas-Benítez, Raúl Aquino-Santos, Pedro Magaña-Espinoza, José Aguilar-Velazco, Arthur Edwards-Block and Aldo Medina Cass. (2016). Traffic Congestion Detection System through Connected Vehicles and Big Data. *Sensors*. 16 (1), p1-26
- [14] Institute of Transportation Systems. (2013). *SUMO – Simulation of Urban MObility*. Available: [http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931\\_read-41000/](http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/). Last accessed 14th Jul 2017
- [15] Wikipedia. (2008). *NETCONVERT*. Available: <http://sumo.dlr.de/wiki/NETCONVERT>. Last accessed 14th Jul 2017
- [16] Wikipedia. (2008). *NETGENERATE*. Available: <http://sumo.dlr.de/wiki/NETGENERATE>. Last accessed 14th Jul 2017
- [17] Fitsum Teklu, Agachai Sumalee, David Watling. (2007). A Genetic Algorithm Approach for Optimizing Traffic Control Signals Considering Routing. *DBLP*. 22 (1), p31-43
- [18] Christos Tsotskas, Louta Malamati, (2016). *Investigating the application of multi-objective optimisation and multi-criteria decision making to future concepts of intelligent mobility and telecommunications*. Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), 7th International Conference on. IEEE Xplore.
- [19] A Byte of Python. Gitbook. Last Time of Access: November 2017. <https://www.gitbook.com/book/swaroopch/byte-of-python/details>.
- [20] Features. Eclipse Neon. Last Timestamp of Access: November 2017. <http://www.eclipse.org/neon/> - official site of Eclipse-Neon
- [21] Reuven Y. Rubinstein, Dirk P. Kroese (2016). *Simulation and the Monte Carlo Method*. Hoboken, US: John Wiley & Sons. p1-49
- [22] Wikipedia. (2008). *NETEDIT*. Available: <http://sumo.dlr.de/wiki/NETEDIT>. Last accessed 18th August 2017
- [23] B. Brian Park, J. D. Schneeberger. (2003). *EVALUATION OF TRAFFIC SIGNAL TIMING OPTIMIZATION METHODS USING A STOCHASTIC AND MICROSCOPIC SIMULATION PROGRAM*. VIRGINIA TRANSPORTATION RESEARCH COUNCIL. 3 (7), p8-72
- [24] Department for Transport. (2006). General Principles of Traffic Control by Light Signals Part 2 of 4. *Traffic Advisory Leaflets*. 2 (2), 10-16
- [25] MetOffice. (2017). *Using traffic cams for ML*. Available: <http://www.informaticslab.co.uk/projects/trafficcam.html>. Last accessed 20th Oct 2017
- [26] Poul Greibe. (2002). Accident prediction models for urban roads. *ACCIDENT ANALYSIS & PREVENTION*. 35 (1), p273–285

[27] The Definitive Guide. Learn C++. Last Timestamp of Access: November 2017.  
<https://www.programiz.com/cpp-programming#what-is-cpp>

[28] Christos Tsotskas, Timoleon Kipouros, Mark Anthony Savill. (2015). *Multi-Objective Tabu Search 2: First Technical Report*. Propulsion Engineering Centre. School of Aerospace, Transport and Manufacturing, England