



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Διερεύνηση της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων σε αστικά οδικά δίκτυα

Διπλωματική Εργασία

ΕΥΘΥΜΙΑ ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπουσα: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη,

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας σηματοδοτεί και την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Ως εκ τούτου, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στη διεκπεραίωσή της αλλά και όσους με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα Ελένη Βλαχογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για το τόσο ενδιαφέρον θέμα που μου εμπιστεύτηκε και τις συμβουλές της σε αυτό. Επίσης, την ευχαριστώ ιδιαίτερα για τη στήριξη και την ενθάρρυνσή της σε θέματα που αφορούν τα μελλοντικά μου βήματα στον ερευνητικό χώρο.

Συνεχίζοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Φωτεινή Ορφανού, Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π, για την προθυμία της να συνεισφέρει σημαντικά σε κρίσιμα σημεία της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον κ. Χάρη Χαλκιαδάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π, για τον άπλετο χρόνο που μου αφιέρωσε, παρά το απαιτητικό του πρόγραμμα. Οι γνώσεις του και οι συμβουλές του ήταν καθοριστικά στοιχεία για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Κυριακή Χριστοβασίλη για τα δεδομένα σηματοδότησης που μου διέθεσε και τη συνεχή ανανέωση και διευκρίνισή τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξή τους και ιδιαίτερα τον αδερφό μου για τη συνεισφορά του στη διαδικασία εισόδου των δεδομένων σηματοδότησης στο SUMO, προκειμένου αυτή να γίνει συντομότερη.

Ευθυμία Κωστοπούλου

Αθήνα, Ιούλιος 2020

**Τίτλος: Διερεύνηση της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων σε αστικά
οδικά δίκτυα**

Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας: Ευθυμία Κωστοπούλου

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη

ΣΥΝΟΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, η αύξηση του κορεσμού και η μείωση της ικανότητας εξυπηρέτησης των αστικών δικτύων καθιστά αναγκαία τη διερεύνηση της αυτόματης κυκλοφορίας και των επιπτώσεων των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο της Αθήνας, μέσω της ανάλυσης κυκλοφοριακών παραμέτρων, όταν αυτά βρίσκονται σε διαφορετικά ποσοστά στη σύνθεση κυκλοφορίας. Για το σκοπό της διπλωματικής, αναπτύχθηκε μικροσκοπική προσομοίωση του δικτύου της Αθήνας στο πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα SUMO, που βαθμονομήθηκε με δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων και σηματοδότησης από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας της Περιφέρειας Αττικής. Τα αποτελέσματα των διαφορετικών σεναρίων στόλου οχημάτων στην Αθήνα δείχνουν ότι σε υψηλά ποσοστά τα αυτόνομα οχήματα αυξάνουν το χρόνο διαδρομής ανά χιλιόμετρο, μειώνουν τη μέση ταχύτητα, ενώ σε χαμηλότερα ποσοστά αυξάνεται η ικανότητα.

Λέξεις κλειδιά: αυτόνομα οχήματα, Προσομοίωση Αστικής Κινητικότητας, μοντέλο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας, ακολουθούντα οχήματα, μοντέλο Krauss, μικροσκοπική προσομοίωση, Αυτόνομη Διαχείριση Κυκλοφορίας, αστικό δίκτυο

Title: Investigation of the impact of autonomous vehicles on urban road networks

Thesis Author: Efthymia Kostopoulou

Supervising Professor: Eleni I. Vlahogianni

ABSTRACT

In recent years, increasing congestion and reducing ability of urban networks to serve, have made it necessary to investigate automatic traffic and the effects of autonomous vehicles on traffic. The objective of this Diploma Thesis is to investigate the impact of autonomous vehicles on Athens network, through the analysis of traffic parameters, when they are at different penetration rates of traffic composition. For the purpose of the Diploma Thesis, a microscopic simulation of the Athens network was developed in the open source program SUMO, which was calibrated with traffic data and signaling data from the Traffic Management Center of the Attica Region. The results of the different fleet scenarios of vehicles in Athens show that in high percentages the autonomous vehicles increase the travel time per kilometer, reduce the average speed, while in lower percentages the capacity increases.

Keywords: autonomous vehicles, Simulation of Urban Mobility, Adaptive Cruise Control model, car following, Krauss model, microscopic simulation, Autonomous Traffic Management, urban network

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας στις συγκοινωνίες καθιστά εφικτή την εισαγωγή νέων μορφών κινητικότητας, όπως αποτελεί το αυτόνομο όχημα. Ανάλογα με το επίπεδο αυτοματισμού, το αυτόνομο όχημα παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της κίνησης του οχήματος, απαλλάσσοντας τον οδηγό. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η διερεύνηση επιρροής τους σε ένα αστικό δίκτυο, όπως αυτό της Αθήνας. Συγκεκριμένα, διερευνάται η μεταβολή κυκλοφοριακών παραμέτρων, όταν τα αυτόνομα οχήματα τεθούν σε διαφορετικά ποσοστά στη σύνθεση της κυκλοφορίας.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε τις παραμέτρους οι οποίες αντανakλούν την επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία. Καταγράφηκαν τα μοντέλα με τα οποία αναπαρίσταται η κίνηση τόσο των συμβατικών όσο και των αυτόνομων οχημάτων σε μία μικροσκοπική προσομοίωση, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών, τα οποία οδήγησαν στην επιλογή των μοντέλων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Με το τρόπο αυτό επιλέχθηκε το μοντέλο Krauss για τα συμβατικά οχήματα και το μοντέλο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας για τα αυτόνομα.

Για την προετοιμασία του δικτύου στο SUMO, σε πρώτο βήμα αντλήθηκε το δίκτυο της Αθήνας από την πλατφόρμα *Overpass-turbo* του *Open Street Map*. Επιλέχθηκαν οι **κατηγορίες** αυτοκινητοδρόμου, δευτερεύουσες αρτηρίες σύνδεσης μικρών και μεσαίων πόλεων, πρωτεύοντος, δευτερεύοντος, τριτεύοντος **δικτύου** καθώς και οι διαδρομές των λεωφορείων.

Σε δεύτερο βήμα, συλλέχθηκαν **μετρήσεις κυκλοφοριακών φόρτων** από 125 φωρατές που είναι τοποθετημένοι στην περιοχή του δακτυλίου της Αθήνας αλλά και τιμές φόρτων, από λογισμικό *Aimsun*, σε 163 σημεία του δικτύου. Ακολούθησε η διαδικασία της βαθμονόμησης του δικτύου, κατά την οποία οι μετρήσεις των φωρατών εισάγονται στο δίκτυο της μικροσκοπικής προσομοίωσης. Αυτές τοποθετούνται στις θέσεις των συνδέσμων στους οποίους βρίσκονται και στο πραγματικό δίκτυο. Οι μετρήσεις αυτές εκφράζονται σε

οχήματα ανά ώρα και υπάρχουν για όλο το εικοσιτετράωρο, ενώ για την παρούσα Διπλωματική εργασία, επιλέχθηκαν οι φόρτοι της ώρας **08:00-09:00 π.μ.** και ημέρας 9 Μαΐου 2019. Η κυκλοφορία αποτελείται κατά 72% από οχήματα ιδιωτικής χρήσης, κατά 20% από μοτοσυκλέτες και κατά 8% από φορτηγά.

Επόμενο βήμα για την προετοιμασία του δικτύου αποτέλεσε η **σηματοδότηση**. Συλλέχθηκαν δεδομένα από κόμβους της περιοχής του δακτυλίου της Αθήνας, τα οποία περιλαμβάνουν σχέδιο του κόμβου και το αντίστοιχο διάγραμμα σηματοδότησής του. Συνολικά εισήχθησαν στο SUMO δεδομένα σε 185 κόμβους. Τελικό βήμα στην προετοιμασία του δικτύου αποτελεί η εισαγωγή των **λεωφορειακών γραμμών**. Το SUMO έχει τη δυνατότητα αντλώντας στοιχεία του αρχικού δικτύου και των πραγματικών λεωφορειακών γραμμών, να δημιουργεί ταξίδια από στάση σε στάση καθώς και τα χρονοδιαγράμματα δρομολογίων.

Ακολούθησαν τα **σενάρια** των αυτόνομων οχημάτων. Με χαρακτηριστικές παραμέτρους τη ροή, την κατάληψη, τη μέση ταχύτητα και το χρόνο ταξιδιού ανά χιλιόμετρο, αναδείχθηκε η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων σε σχέση με τα διαφορετικά ποσοστά αυτών στη σύνθεση της κυκλοφορίας. Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, δημιουργήθηκαν διαγράμματα των παραπάνω παραμέτρων τα οποία αναφέρονται σε ποσοστά 1 %, 2 %, 5 %, 10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 % των αυτόνομων.

Τα **αποτελέσματα** των σεναρίων διαφορετικών ποσοστών αυτόνομων οχημάτων στην Αθήνα δείχνουν ότι σε μεγάλα ποσοστά τα αυτόνομα οχήματα αυξάνουν το χρόνο ταξιδιού ανά χιλιόμετρο, μειώνουν τη μέση ταχύτητα, ενώ σε μικρότερα ποσοστά εμφανίζεται η μέγιστη τιμή ρυθμού ροής. Τα αποτελέσματα αυτά ενδεχομένως να οφείλονται στο γεγονός ότι το δίκτυο είναι κορεσμένο σε σημεία. Εξάλειψη αυτού, μπορεί να γίνει με την αύξηση του ride-sharing και του βαθμού χρησιμοποίησης των οχημάτων. Ο συνδυασμός των δύο αυτών παραγόντων αναμένεται να οδηγήσει σε μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, καθώς έτσι θα μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των οχημάτων που θα κινούνται στο δίκτυο.

Ολοκληρώνοντας τη διερεύνηση, προέκυψαν οι **περιορισμοί** αυτής αλλά και ενδιαφέροντα σημεία για **περαιτέρω έρευνα**. Η φόρτιση του δικτύου με περισσότερα κυκλοφοριακά δεδομένα σε σημεία κόμβων, είναι ένα στοιχείο που θα καθιστούσε πιο ομοιόμορφη την κατανομή του φόρτου στο δίκτυο. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διερεύνηση της επιρροής σε περιόδους εκτός αιχμής για πιο ευέλικτα αποτελέσματα αλλά και διαφορετικών οδηγικών προφίλ, όπως αυτά του επιθετικού και του συμβατικού οδηγού. Τέλος, η αύξηση του ride-sharing και του βαθμού χρησιμοποίησης των οχημάτων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς, τα ήδη υπάρχοντα οχήματα αναπληρώνουν διαρκώς τις ανάγκες για μετακίνηση, χωρίς να χρειάζεται η προσθήκη νέων οχημάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Η σημασία	1
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	3
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	3
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	5
2.1 Το αυτόνομο όχημα.....	5
2.1.1 Επίπεδα αυτοματισμού	6
2.2 Η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.....	7
2.3 Ανασκόπηση μοντελοποίησης αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων	9
2.3.1 Μοντέλα συμβατικών οχημάτων.....	9
2.3.2 Μοντέλα αυτόνομων οχημάτων.....	11
2.4 Συμπεράσματα	13
3. Μεθοδολογική Προσέγγιση.....	14
3.1 Περιγραφή της διαδικασίας.....	14
3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο	15
3.2.1 Μικροσκοπικά μοντέλα ροής	15
3.2.2 Μοντέλα ακολουθούντων οχημάτων.....	16
3.2.2.1 Μοντέλο Krauss.....	17
3.2.2.2 Μοντέλο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας.....	18
4. Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων	21
4.1 Συλλογή Δεδομένων.....	21
4.2 Επεξεργασία Δεδομένων	28
5. Ανάλυση και Αποτελέσματα	30

5.1 Προσομοίωση Αστικής Κινητικότητας.....	30
5.2 Κυκλοφοριακή Ζήτηση	31
5.3 Βαθμονόμηση	33
5.4 Παραμετροποίηση μοντέλων	35
5.5 Λεωφορειακές γραμμές	38
5.6 Σηματοδότηση.....	40
5.7 Προσομοίωση	41
5.8 Βάση Δεδομένων	43
5.9 Αποτελέσματα.....	44
6. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	51
6.1 Εισαγωγή.....	51
6.2 Βασικά Συμπεράσματα	51
6.3 Προστάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	52
Βιβλιογραφία.....	54

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Αναπαράσταση σημαντικών χαρακτηριστικών της αυτόνομης κυκλοφορίας (Πηγή: ElHamdani and Benamar, 2018).....	1
Εικόνα 2.1: Αναπαράσταση αυτόνομου οχήματος (Πηγή: ElHamdani and Benamar, 2018).....	6
Εικόνα 2.2: Η θετική επίδραση τεχνολογιών στις συγκοινωνίες (Πηγή: Skabardonis, 2020).....	9
Εικόνα 2.3: Αισθητήρες αυτόνομου οχήματος και τεχνολογία Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Adaptive Cruise Control) (Πηγή: www.insightsonindia.com).....	10
Εικόνα 2.4: Σύγκριση μεταξύ της θεωρητικής χωρητικότητας και της χωρητικότητας (Πηγή: Li et al., 2020).....	12
Εικόνα 3.1: Γενικό διάγραμμα αναπαράστασης μοντέλου ακολουθούντος οχήματος (Πηγή: Härrig, 2010).....	16
Εικόνα 4.1: Περιοχή μελέτης σε περιβάλλον <i>Overpass-turbo</i>	22
Εικόνα 4.2: Βάση δεδομένων με το ζητούμενο δίκτυο (αριστερά) και επιλογή του στο χάρτη (δεξιά) σε περιβάλλον <i>Overpass-turbo</i>	23
Εικόνα 4.3: Δίκτυο μελέτης σε περιβάλλον <i>Java Open Street Map Editor (JOSM)</i>	24
Εικόνα 4.4: Απόσπασμα από τα δεδομένα των κυκλοφοριακών φόρτων.....	25
Εικόνα 4.5: Θέσεις φωρατών μέτρησης κυκλοφοριακού φόρτου στην περιοχή του δακτυλίου της Αθήνας, σε περιβάλλον <i>QGIS</i>	26
Εικόνα 4.6: Σχήμα κόμβου Βασ. Σοφίας-Κηφισίας-Αλεξάνδρας.....	27
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα Σηματοδότησης του κόμβου Βασ. Σοφίας-Κηφισίας-Αλεξάνδρας.....	28
Εικόνα 4.8: Δίκτυο μελέτης σε περιβάλλον <i>SUMO</i>	29
Εικόνα 5.1: Αρχείο τύπου <i>.add.xml</i> με τα χαρακτηριστικά των οχημάτων.....	32
Εικόνα 5.2: Απόσπασμα αρχείου <i>.rou.xml</i>	32
Εικόνα 5.3: Απόσπασμα αρχείου <i>.trips.xml</i>	33
Εικόνα 5.4: Απόσπασμα αρχείου <i>turn-count data</i> της φόρτισης του δικτύου.....	34
Εικόνα 5.5: Είσοδος διαγράμματος σηματοδότησης, σε περιβάλλον <i>SUMO</i>	41
Εικόνα 5.6: Αρχείο <i>.sumocfg</i> προσομοίωσης με τα ορίσματα εισόδου (input) και τα ορίσματα εξόδου (output).....	43
Εικόνα 5.7: Απόσπασμα επιθυμητών μετρήσεων φωρατών.....	43
Εικόνα 5.8: Απόσπασμα αρχείου <i>inductionLoop.add.xml</i>	44
Εικόνα 5.9: Αρχείο <i>meandata.add.xml</i>	45
Εικόνα 5.10: Απόσπασμα αρχείου <i>detectors_to_Ath.xml</i>	45

Εικόνα 5.11: Απόσπασμα αρχείου <i>MeanData.xml</i>	45
Εικόνα 5.12: Απόσπασμα αρχείου <i>tripinfos.xml</i>	46

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Επιλεχθείσες κατηγορίες δικτύου.....	22
Πίνακας 5.1: Πληροφορίες παραμέτρων συμβατικών οχημάτων.....	36
Πίνακας 5.2: Πληροφορίες παραμέτρων αυτόνομων οχημάτων.....	37
Πίνακας 5.3: Συμβολισμοί χρωμάτων σηματοδότησης στο SUMO.....	40

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

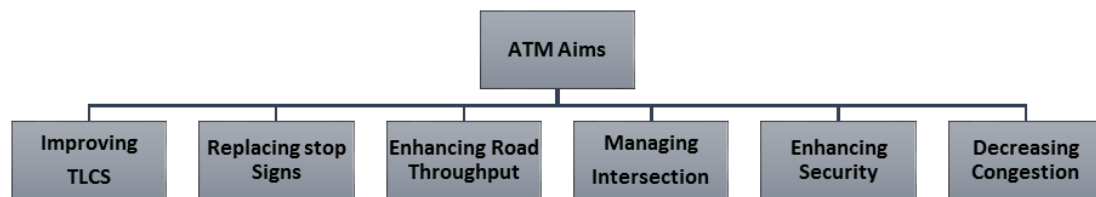
Διάγραμμα 5.1: Χρόνος ταξιδιού ανά χιλιόμετρο σε σχέση με το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.....	48
Διάγραμμα 5.2: Μέση ταχύτητα σε σχέση με το ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.....	49
Διάγραμμα 5.3: Σχέση ροής και κατάληψης για διαφορετικά ποσοστά αυτόνομων οχημάτων.....	50

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η σημασία

Οι μεταφορές αποτελούν τομέα ζωτικής σημασίας μιας κοινωνίας, αφού συνεισφέρουν τόσο στην εξυπηρέτηση των πολιτών καθημερινά όσο και στην οικονομία. Τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών, τα οποία στόχο έχουν την ανάδειξη της δυναμικής των μεταφορών, φέρνουν στο προσκήνιο την καινοτομία του αυτόνομου οχήματος. Το όχημα αυτό παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της πορείας του οχήματος, μέσω της επικοινωνίας με άλλα οχήματα και με την υποδομή.

Ως ερευνητικό πεδίο των Ευφυνών Συστημάτων Μεταφορών, η Αυτόνομη Διαχείριση Κυκλοφορίας (Autonomous Traffic Management, ATM) σχετίζεται με την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων για τη διαχείριση κυκλοφορίας, βασισμένη στη συνεισφορά των αυτόνομων οχημάτων (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Αναπαράσταση σημαντικών χαρακτηριστικών της αυτόνομης κυκλοφορίας (Πηγή: ElHamdani and Benamar, 2018)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1 τα ακόλουθα, αποτελούν συνοπτικά τα χαρακτηριστικά που παρέχει η Αυτόνομη Διαχείριση Κυκλοφορίας (ElHamdani and Benamar, 2018):

- Βελτίωση του Συστήματος Ελέγχου Σηματοδότησης (Traffic Light Controller System, TLCS): Μέσω ενός συστήματος πλήρους αυτοματισμού, στόχος είναι να βελτιωθεί το έξυπνο σύστημα ελέγχου

σηματοδότησης, με βάση την επικοινωνία του οχήματος με την υποδομή (Vehicle to Infrastructure, V2I).

- Αντικατάσταση σημάτων υποχρεωτικής διακοπής πορείας: Ένα ολοκληρωμένο σύστημα αυτόνομης διαχείρισης κυκλοφορίας σκοπεύει να αντικαταστήσει το παραδοσιακό σύστημα ελέγχου σηματοδότησης και σημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν την αλληλεπίδραση των αυτόνομων οχημάτων, με βάση την επικοινωνία οχήματος με όχημα (Vehicle to Vehicle, V2V).
- Βελτίωση στάθμης εξυπηρέτησης της οδού: Αντικαθιστώντας τα οδικά σήματα και χρησιμοποιώντας το συντονισμό των οχημάτων, η αυτόνομη διαχείριση κυκλοφορίας σκοπεύει να αυξήσει τον κυκλοφοριακό φόρτο, προσφέροντας παράλληλα καλή εξυπηρέτηση. Το τελευταίο βελτιώνεται καθώς λιγοστεύουν τα οχήματα που σταματούν, κάτι που συνεισφέρει στη μείωση των καθυστερήσεων των οχημάτων, κατά τη διάρκεια του ταξιδιού.
- Διαχείριση διασταυρώσεων: Οι διασταυρώσεις θεωρούνται ως σημείο κυκλοφοριακής συμφόρησης όταν τα συστήματα σηματοδότησης αποτυγχάνουν να τις ελέγξουν αποτελεσματικά. Επομένως μεγάλο μέρος της μελέτης της αυτόνομης διαχείρισης κυκλοφορίας αφορά στη συνεργατική διαχείριση (cooperative management) της διασταύρωσης.
- Βελτίωση ασφαλείας: Όπως και στα υπόλοιπα ερευνητικά πεδία των Ευφυών Συστημάτων μεταφορών, η ασφάλεια είναι το πιο σημαντικό αντικείμενο της αυτόνομης διαχείρισης κυκλοφορίας από τότε που οι μεταφορές παίζουν καθοριστικό ρόλο σε θανατηφόρα, για τον άνθρωπο, δυστυχήματα.
- Μείωση του ποσοστού κορεσμού: Άμεσα ή έμμεσα όλοι οι προαναφερθέντες στόχοι έχουν σημαντική επιρροή στη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το τελευταίο αποτελεί σημαντικό θέμα των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών λόγω της αρνητικής επιρροής στην οικονομία, καθώς προκαλεί μεγάλη σπατάλη καυσίμου και χρόνου.

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, είναι η **διερεύνηση της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων** στο οδικό δίκτυο της Αθήνας. Συγκεκριμένα, μέσω της μικροσκοπικής προσομοίωσης του δικτύου, επιλέγονται ως παράγωγα προσομοίωσης κυκλοφοριακές παράμετροι, όπως ο ρυθμός ροής (flow), η κατάληψη (occupancy), η μέση ταχύτητα (average speed) και ο χρόνος ταξιδιού ανά χιλιόμετρο (travel time per kilometer).

Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε μέρος του δικτύου της Αθήνας καθώς και δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων και σηματοδότησης για την προετοιμασία αυτού σε περιβάλλον SUMO. Με επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης προέκυψαν οι τιμές των επιθυμητών μεγεθών, οδηγώντας στα τελικά συμπεράσματα.

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 1

Το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, αποτελεί την **εισαγωγή**. Αναφέρονται οι στόχοι της Αυτόνομης Δαχείρισης Κυκλοφορίας, οι οποίοι βασίζονται στις δυνατότητες που προσφέρει το αυτόνομο όχημα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο στόχος της εργασίας και αναφέρονται τα μεγέθη που θα τον υλοποιήσουν.

Κεφάλαιο 2

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά στη **βιβλιογραφική ανασκόπηση**. Εκεί παρουσιάζονται οι ιδιότητες του αυτόνομου οχήματος, οι μέχρι τώρα μελέτες που δείχνουν την επιρροή τους στην κυκλοφορία, ενώ παράλληλα

παρουσιάζονται τα μοντέλα με τα οποία προσομοιάζεται η κίνηση των συμβατικών και των αυτόνομων οχημάτων.

Κεφάλαιο 3

Αποτελεί τη **μεθοδολογική προσέγγιση**. Σε αυτό, παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία διερευνήθηκε η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία και το θεωρητικό υπόβαθρο, με βάση το οποίο εφαρμόστηκε η επιλεχθείσα μέθοδος.

Κεφάλαιο 4

Αναφέρεται στη **συλλογή και επεξεργασία δεδομένων**. Σε αυτό, παρουσιάζονται οι πηγές των δεδομένων του δικτύου, των κυκλοφοριακών φόρτων και της σηματοδότησης αλλά και η περιγραφή της διαδικασίας εισόδου του δικτύου στο λογισμικό SUMO.

Κεφάλαιο 5

Αφορά την **ανάλυση και τα αποτελέσματα** της Διπλωματικής Εργασίας. Περιγράφονται εκτενώς τα χαρακτηριστικά του λογισμικού προσομοίωσης και της κυκλοφοριακής ζήτησης, της βαθμονόμησης, της παραμετροποίησης των μοντέλων αλλά και της διαδικασίας εισαγωγής των λεωφορειακών γραμμών. Τέλος, αναλύονται τα παράγωγα της προσομοίωσης, η βάση δεδομένων και τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6

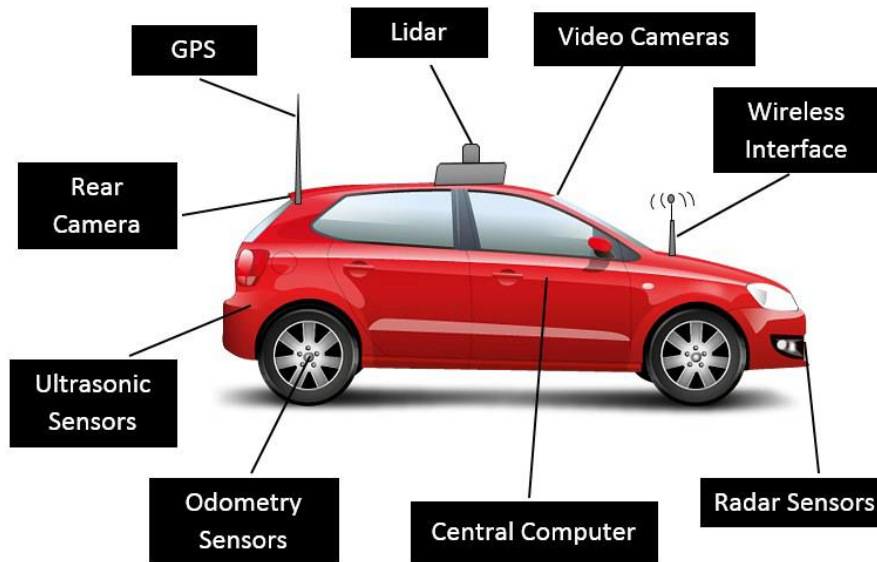
Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα **βασικά συμπεράσματα** της Διπλωματικής Εργασίας καθώς και **προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**, οι οποίες προέκυψαν κυρίως από τις δυσκολίες που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια υλοποίησής της.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Παρουσιάζονται οι ιδιότητες του αυτόνομου οχήματος, μελέτες που δείχνουν την επιρροή του στην κυκλοφορία, καθώς και αναδρομή στην εφεύρεση των μοντέλων, που χρησιμοποιούνται για την αναπαράστασή τους σε μία προσομοίωση.

2.1 Το αυτόνομο όχημα

Αυτόνομο καλείται το όχημα το οποίο αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του και έχει δυνατότητα πλοήγησης χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση (Lu et al., 2018). Οι άνθρωποι είναι απλώς επιβάτες και μπορούν να ελέγχουν τον προορισμό τους ή να ζητήσουν από το αυτοκίνητο να σταματήσει. Τα αυτόνομα οχήματα ενσωματώνουν τεχνολογίες όπως GPS, ραντάρ, λιντάρ (ραντάρ που χρησιμοποιεί ακτίνες λέιζερ), ειδικές κάμερες, ενώ διαθέτουν προηγμένο λογισμικό που συνδυάζει όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες ανακαλύπτοντας αφενός κατάλληλες διαδρομές και αφετέρου εντοπίζοντας εγκαίρως σταθερά και κινούμενα εμπόδια.



Εικόνα 2.1: Αναπαράσταση αυτόνομου οχήματος (Πηγή: ElHamdani and Benamar, 2018).

2.1.1 Επίπεδα αυτοματισμού

Με βάση την ποσότητα της οδηγικής παρέμβασης και προσοχής που απαιτείται, η αυτόνομη οδήγηση έχει ταξινομηθεί σε έξι διαφορετικά επίπεδα από το διεθνή Σύνδεσμο Μηχανικών Αυτοκινήτων SAE (Society of Automotive Engineers, SAE). Ο SAE international εξέδωσε ένα εναρμονισμένο σύστημα ταξινόμησης για αυτόνομα συστήματα οδήγησης (Automated Driving Systems, ADS) και ορίζεται ως ακολούθως (SAE, 2014):

- Επίπεδο 0 - Κανένας αυτοματισμός: Ο οδηγός έχει τον απόλυτο έλεγχο του οχήματος, ακόμη και όταν υπάρχουν συστήματα προειδοποίησης ή παρέμβασης.
- Επίπεδο 1 - Συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης: Το όχημα έχει τη δυνατότητα να αλλάζει αυτόματα κατεύθυνση ή να επιταχύνει και να επιβραδύνει, χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το οδικό περιβάλλον, προσδοκώντας ο οδηγός να έχει τον έλεγχο για όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες οδήγησης.
- Επίπεδο 2 - Συνδυασμός λειτουργιών αυτοματισμού: Το όχημα έχει τη δυνατότητα με περισσότερα από ένα συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης, να αλλάζει κατεύθυνση ή να επιταχύνει/επιβραδύνει χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το οδικό περιβάλλον, προσδοκώντας

ο οδηγός να έχει τον έλεγχο για όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες οδήγησης.

- Επίπεδο 3 - Περιορισμένη αυτοματοποιημένη οδήγηση: Το όχημα λειτουργεί με ένα αυτόματο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, με την προσδοκία ότι ο οδηγός θα λάβει τον έλεγχο καταλλήλως όποτε χρειαστεί.
- Επίπεδο 4 - Πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση, εκτός ειδικών συνθηκών: Το όχημα λειτουργεί με ένα αυτόματο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, ακόμη και αν ο οδηγός δε λάβει τον έλεγχο καταλλήλως όποτε χρειαστεί.
- Επίπεδο 5 - Πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση: Το όχημα λειτουργεί πλήρως με ένα αυτόματο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες οδού και περιβάλλοντος που μπορεί να ελέγξει ένας οδηγός.

2.2 Η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία

Οι (Lu et al., 2019) χρησιμοποιώντας το γενικευμένο προσθετικό μοντέλο (generalized additive model) συμπέραναν ότι η **εξυπηρέτηση του δικτύου αυξάνεται** σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του ποσοστού των αυτόνομων οχημάτων σε αυτό, τόσο σε δίκτυα τύπου κανάβου (grid) όσο και σε πραγματικά δίκτυα. Στο δίκτυο τύπου κανάβου, ο μέγιστος φόρτος αυξάνεται έως 16,01 % στην περίπτωση του σεναρίου με 100 % αυτόνομα οχήματα, σε σχέση με αυτό με μόνο συμβατικά οχήματα. Η βελτίωση αυτή είναι μικρότερη από το θεωρητικό αποτέλεσμα 40 % του (Friedrich, 2016), στη μελέτη του οποίου λήφθηκε υπόψη μόνο μία διασταύρωση, η οποία απέκλειε τη συσσώρευση οχημάτων σε παρακείμενους δρόμους. Ωστόσο, οι (Olia et al., 2018) κατέληξαν σε πολύ μικρότερα οφέλη χρήσης των αυτόνομων οχημάτων, με βελτίωση της τάξης του 8 %.

Αναφορικά με την **πυκνότητα**, οι (Lu et al., 2019) παρατήρησαν πως αυτή αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού των αυτόνομων οχημάτων, στην αρχή πιο ομαλά ενώ για ποσοστό αυτόνομων 40 % και πάνω, η αύξηση γίνεται πιο έντονη. Στην προσομοίωση πραγματικού δικτύου η συνολική αύξηση του μέγιστου φόρτου είναι περίπου 25 % από 0 % ποσοστό αυτόνομων οχημάτων έως το 100 % αυτών. Η πυκνότητα αλλάζει με παρόμοιο τρόπο με το δίκτυο τύπου κανάβου. Η αύξησή της γίνεται πιο έντονη όταν το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων αγγίζει το 50 %.

Οι (Makridis et al., 2018) επιλέγοντας αυτοκινητόδρομο και κατηγορίες οχημάτων συμβατικών, αυτόνομων και συνδεδεμένων, συμπέραναν πως τα αυτόνομα οχήματα είχαν **αρνητική επίδραση** στο δίκτυο ακόμα και σε χαμηλά ποσοστά.

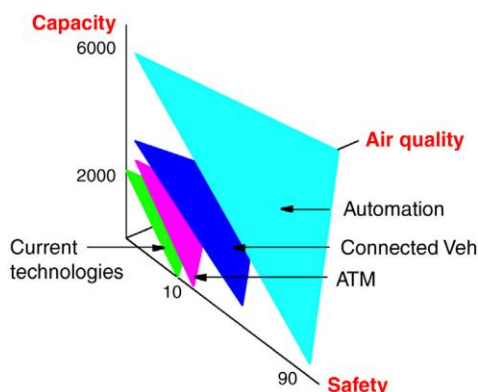
Αυτό αποδίδεται στον παράγοντα **ασφάλεια**, διότι ενώ οι οδηγοί αναλαμβάνουν τον κίνδυνο κατά την οδήγηση προσπαθώντας να προβλέψουν την κίνηση γειτονικών οχημάτων, τα αυτόνομα οχήματα δεν θα έπρεπε να λάβουν τον αντίστοιχο κίνδυνο.

Με τον τρόπο αυτό θέτουν πιο συντηρητικά όρια κατά την κίνησή τους στην οδό. Συνεπώς, ο ελεύθερος **χώρος** που χρειάζεται ένα αυτόνομο όχημα για να πραγματοποιηθεί η **αλλαγή λωρίδας**, είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του οδηγού και η μέγιστη επιβράδυνσή τους είναι μικρότερη από αυτή του οδηγού για λόγους ασφαλείας και άνεσης.

Σε άλλη εκδοχή, οι (Bose and Ioannou, 2003) μελέτησαν τη σταθερότητα μιας κυκλοφορίας, αποτελούμενης τόσο από συμβατικά οχήματα όσο και από οχήματα τα οποία χρησιμοποιούν το προσαρμοστικό μοντέλο ελέγχου πορείας (adaptive cruise control). Αποδείχθηκε πως τα οχήματα που χρησιμοποιούν το μοντέλο αυτό, μπορούν να βελτιώσουν τη σταθερότητα του κυκλοφοριακού φόρτου, να μειώσουν τις **εκπομπές ρύπων** και τις συνέπειές τους.

Οι (Nowakowski et al., 2010) παρουσίασαν πως τα συνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα, μπορούν να αυξήσουν δραστικά τη **χωρητικότητα** της οδού από

2.000 οχήματα ανά λωρίδα σε 6.000 οχήματα ανά λωρίδα, για μία λωρίδα αυτοκινητόδρομου. Παράλληλα, μειώνουν δραστικά τα ατυχήματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Η θετική επίδραση τεχνολογιών στις συγκοινωνίες (Πηγή: Skabardonis, 2020).

2.3 Ανασκόπηση μοντελοποίησης αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων

2.3.1 Μοντέλα συμβατικών οχημάτων

Η μοντελοποίηση των οχημάτων είναι ένα πολύ δυνατό εργαλείο για να γίνουν κατανοητά τα χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής. Η έρευνα της συμπεριφοράς των συμβατικών (human-driven vehicles, HDVs) ακολουθούντων οχημάτων ξεκίνησε να μελετάται από τη δεκαετία του 1950 (Pipe, 1953; Reuschel, 1950).

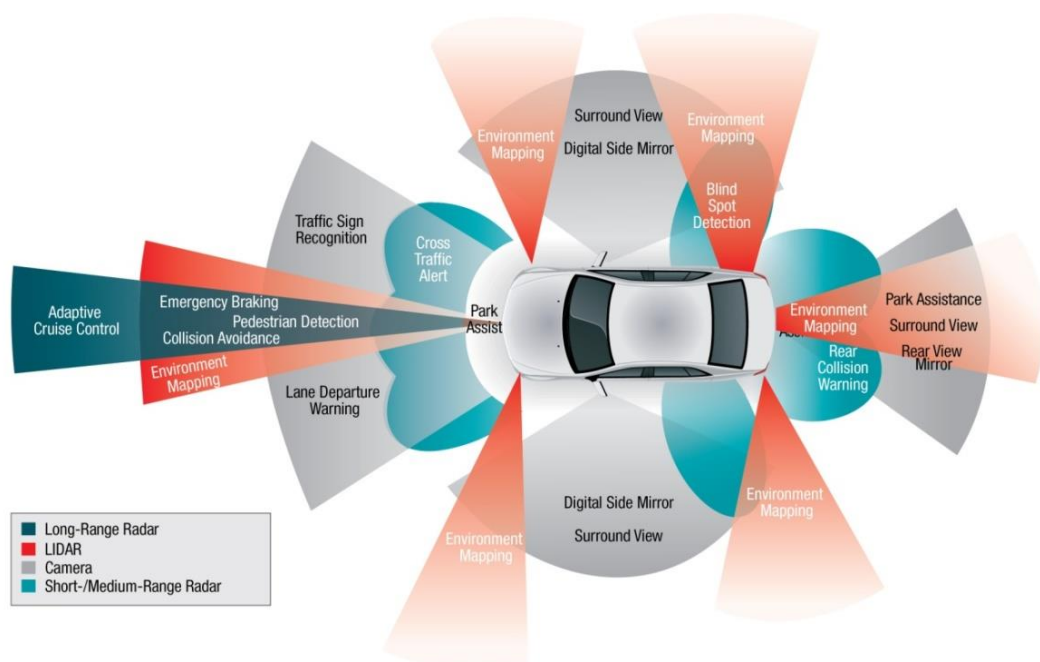
Από τότε διαφορετικές μορφές μοντέλων ακολουθούντων οχημάτων έχουν βρεθεί. Στο μοντέλο **Gazis-Herman-Rothery** (GHR) (Gazis et al., 1959; Gazis et al., 1961) το επίκεντρο της μελέτης ήταν η σχετική ταχύτητα και η απόσταση μεταξύ του προπορευόμενου με το ακόλουθο όχημα. Ωστόσο το μοντέλο αυτό είχε την αδυναμία ότι στην περίπτωση που δύο οχήματα ταξιδεύουν με την ίδια ταχύτητα, καμία τιμή χωρικού διαχωρισμού δεν είναι αποδεκτή.

Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, ο (Gipps, 1981) όρισε έναν σχετικό περιορισμό ασφαλείας : $x_n^* \leq x_{n-1}^* - s_{n-1}$, όπου x_n^* είναι η θέση του οχήματος n μετά την πέδηση και s_n το μέγεθος του οχήματος n .

Ο (Krauss, 1998) αναφερόμενος στο μοντέλο του **Gipps** πρότεινε τη μέγιστη ταχύτητα ασφαλείας, ως ένα νέο περιορισμό στο μοντέλο **Krauss**, το οποίο χρησιμοποιείται ως ένα κλασσικό μοντέλο ακολουθούντος οχήματος στο λογισμικό Προσομοίωσης Αστικής Κινητικότητας (Simulation of Urban Mobility, SUMO).

Οι (Treiber et al., 2000) πρότειναν ένα νέο μοντέλο, το **Μοντέλο Ευφυούς Οδηγού** (Intelligent Driver Model, IDM), όπου το κίνητρο ήταν η απόκλιση της ταχύτητας και ο χωρικός διαχωρισμός να έχουν την επιθυμητή τιμή.

Ο Newell (2002) πρότεινε ένα απλοποιημένο μοντέλο με δύο μόνο παραμέτρους, το οποίο μπορεί περαιτέρω να αναπαρασταθεί από την ταχύτητα διακύμανσης (Chiabaut et al., 2010) και το οποίο μπορεί επιτυχώς να συνδέσει τη συμπεριφορά του μικροσκοπικού ακολουθούντος οχήματος με τα χαρακτηριστικά της μακροσκοπικής κυκλοφοριακής ροής.



Εικόνα 2.3: Αισθητήρες αυτόνομου οχήματος και τεχνολογία Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Adaptive Cruise Control)(Πηγή: www.insightsonindia.com).

2.3.2 Μοντέλα αυτόνομων οχημάτων

Στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, πολλά ιδρύματα, όπως η Mercedes-Benz (Bohrer et al., 1995), ξεκίνησαν να στρέφουν την προσοχή τους στην ανάπτυξη προτύπων αυτόνομων οχημάτων. Πολλοί αυτόματοι ελεγκτές, όπως ο ελεγκτής *LQG/H₂* (Andreas et al., 2000), ο ελεγκτής *PIDT₂* (Andreas et al., 2000), ο ελεγκτής *PD* (Kato and Tsugawa, 2001) και ο συνεργατικός αλγόριθμος ελέγχου (Rajamani and Shladover, 2001) έχουν εφαρμοστεί στα αυτόνομα οχήματα και στο σύστημα **Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας** (Adaptive Cruise Control, ACC).

Με βάση το γεγονός ότι το σύστημα ACC μπορεί να διατηρήσει μία επιθυμητή ταχύτητα και απόσταση από το προπορευόμενο όχημα, το IDM μοντέλο, το οποίο έχει συγκεκριμένες παραμέτρους για την επιθυμητή ταχύτητα και απόσταση, χρησιμοποιήθηκε από τους (Kesting et al., 2008) για να αναπαραστήσει τα αυτόνομα οχήματα σε επίπεδο λειτουργίας. Πάνω στο επίπεδο λειτουργίας, προτάθηκε ένας πίνακας οδηγικής στρατηγικής, για να περιγράψει τη στρατηγική των αυτόνομων οχημάτων σε διαφορετικά επίπεδα, όπως είναι οι συνθήκες ελεύθερης ροής, κορεσμού και μποτιλιαρίσματος.

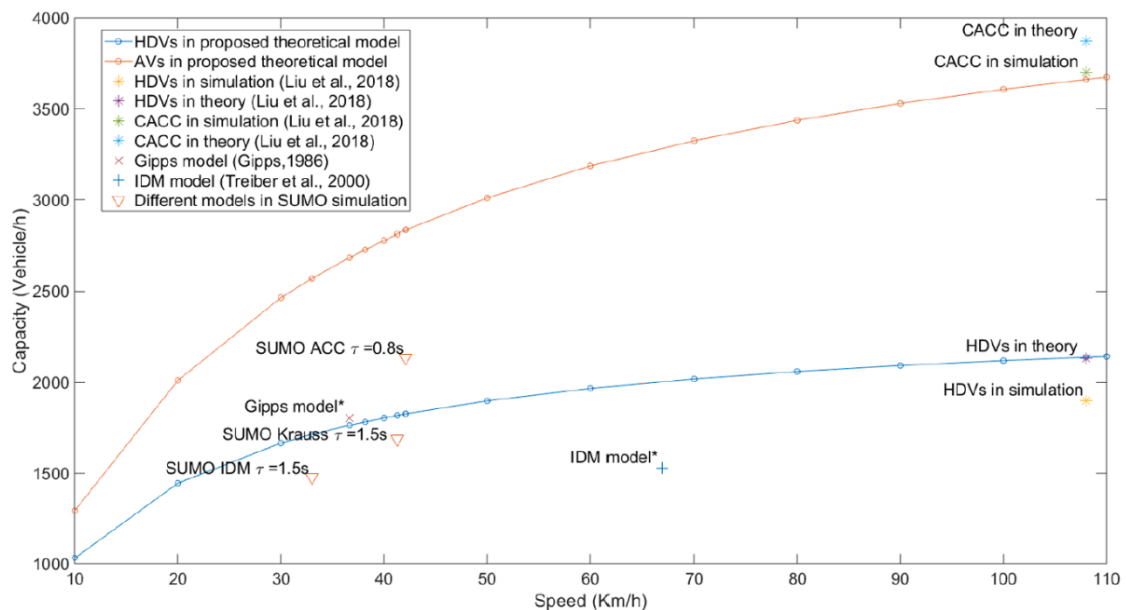
Ωστόσο, οι (Milanés and Shladover, 2014) υποστήριξαν ότι ο ελεγκτής ACC και ο ελεγκτής Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC), είναι πιο ακριβείς στην περιγραφή της ταχύτητας των αυτόνομων οχημάτων, σε σχέση με το IDM μοντέλο. Στην έρευνα αυτή, καταγράφηκαν πειραματικά δεδομένα από ACC και CACC οχήματα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να καταγράψουν τα προφίλ ταχύτητας των ελεγκτών IDM, ACC και CACC. Με το πείραμα αυτό, οι ελεγκτές ACC και CACC αποτέλεσαν σημαντικά εργαλεία για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των αυτόνομων οχημάτων.

Πρόσφατα, ερευνητές έστρεψαν την προσοχή τους στην κυκλοφοριακή ροή με ύπαρξη πολλαπλών μέσων κυκλοφορίας. Ο (Wagner, 2016) έκανε προσομοίωση μιας πόλης σε SUMO με αυτόνομα οχήματα, χρησιμοποιώντας το μοντέλο του (Helly, 1959) για την αναπαράσταση των αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων. Η προσομοίωση έδειξε ότι τα **αυτόνομα οχήματα** μπορούν να

μειώσουν τις καθυστερήσεις από 5 % σε 80 %. Ωστόσο, στη μελέτη αυτή, μόνο η παράμετρος του χρονικού διαχωρισμού τ_g χρησιμοποιήθηκε για να διαφοροποιήσει τα αυτόνομα ($\tau_g = 0.5$ sec) από τα συμβατικά οχήματα ($\tau_g = 1.5$ sec), κάτι που μειώνει την αξιοπιστία της προσομοίωσης.

Οι (Le Vine et al., 2017) μελέτησαν τη χωρητικότητα αυτοκινητόδρομου με κίνηση των οχημάτων σε συστάδες. Χρησιμοποίησαν το μοντέλο ACDA των (Le Vine et al., 2016) για να αναπαραστήσουν τα αυτόνομα οχήματα και το μοντέλο του Wiedemann για τα συμβατικά. Μελετήθηκαν εννέα σενάρια με διαφορετικές τιμές επιβράδυνσης (από 0.5 m/s² έως 12.7 m/s²), μήκους οχήματος (5.8 m και 7.25 m) και χρόνου αντίδρασης (0 sec και 0.4 sec). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χωρητικότητα με κίνηση των οχημάτων σε συστάδες, σχετίζεται με την **ταχύτητα ελεύθερης ροής** και την **επιβράδυνση** των οχημάτων, που κυμαίνεται από 132 έως περίπου 5000 οχήματα/λωρίδα/ώρα.

Οι (Liu et al., 2018) μοντελοποίησαν CACC οχήματα μαζί με συμβατικά σε ροή κυκλοφορίας. Τα συμβατικά λειτούργησαν με συνδυασμό των μοντέλων του (Newell, 2002), του (Gipps, 1981) και του IDM (Treiber et al., 2000), ενώ τα αυτόνομα με τον ελεγκτή CACC (Milanés and Shladover, 2014).



Εικόνα 2.4: Σύγκριση μεταξύ της θεωρητικής χωρητικότητας και της χωρητικότητας (Πηγή: Li et al., 2020).

2.4 Συμπεράσματα

Τα αυτόνομα οχήματα φέρνουν νέες προκλήσεις και ευκαιρίες στα κυκλοφοριακά συστήματα. Έχουν δυνατότητα αυτονομίας και επομένως απεξάρτησης του οδηγού από την προσοχή του κατά την οδήγηση, σε βαθμό ανάλογο του επιπέδου αυτονομίας τους. Η σημερινή έρευνα αναδεικνύει ότι μέσα από μεγάλη ποικιλία μοντέλων και παραμέτρων, υπάρχουν πολλοί τρόποι να μελετηθεί η επιρροή τους σε ένα δίκτυο.

Τα αποτελέσματα των ερευνών μπορούν να διαφέρουν κατά πολύ. Παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα είναι τόσο η **κατηγορία του δικτύου** και η **έκτασή** του, όσο και η **σύνθεση της κυκλοφορίας**. Σε αυτή, καθοριστικό ρόλο έχει το **ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων** καθώς ακραίες τιμές αυτού, οδηγεί σε διαφορετικά συμπεράσματα. Σημαντικό ρόλο έχει η **επιλογή του μοντέλου** αναπαράστασης των οχημάτων, τόσο των αυτόνομων όσο και των συμβατικών. Επιπροσθέτως, οι **παραμέτροι** που θα επιλεγούν για να διαφοροποιήσουν τις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες οχημάτων καθώς και το πλήθος αυτών χρήζει μείζονος σημασίας.

Επίκεντρα διερεύνησης της επιρροής τους, αποτελούν τόσο κυκλοφοριακά ζητήματα όπως ο χρόνος ταξιδιού, η χωρητικότητα της οδού και η οδική ασφάλεια, όσο το περιβάλλον και το κόστος καυσίμου.

Εν κατακλείδι, τα αυτόνομα οχήματα αποτελούν αντικείμενο μείζονος ενδιαφέροντος και έρευνας, ενώ είναι βέβαιο πως θα μας απασχολήσουν στο μέλλον. Η μελέτη σε, όσο το δυνατόν, πιο ρεαλιστικές συνθήκες κυκλοφορίας και περιβάλλοντος είναι καθοριστική, προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία με την οποία διερευνήθηκε η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων και το θεωρητικό υπόβαθρο, δυνάμει του οποίου έγινε η εφαρμογή της μεθόδου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Γίνεται αναφορά στα μικροσκοπικά μοντέλα ροής και πιο συγκεκριμένα στα μοντέλα ακολουθούντων οχημάτων του Krauss και του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα. Παρουσιάζονται οι λειτουργίες με τις οποίες αυτά ορίζουν την κίνηση του οχήματος καθώς και τα οφέλη τους.

3.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Στην παρούσα εργασία επιδιώκεται η ανάπτυξη δέκα διαφορετικών σεναρίων, τα οποία διαφέρουν ως προς το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας, με στόχο τη διερεύνηση της επιρροής τους σε χαρακτηριστικά κυκλοφορίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Κυκλοφοριακή ροή (flow)
- Κατάληψη (occupancy)
- Μέση ταχύτητα (average speed)
- Χρόνος ταξιδιού ανά χιλιόμετρο (travel time per kilometer)

Προς εξυπηρέτηση της έρευνας, αντλήθηκαν οι επιθυμητές κατηγορίες του δικτύου της Αθήνας από την πλατφόρμα *Overpass-turbo* και με κατάλληλη επεξεργασία, το δίκτυο εισήχθη στο λογισμικό SUMO. Στη συνέχεια, λήφθηκαν δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων από φωρατές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην περιοχή του δακτυλίου της Αθήνας. Ακολούθησε ο έλεγχος των στοιχείων

αυτών, με κριτήριο την απόκλιση τάξης μικρότερης του 10 % μεταξύ τιμών φόρτων δύο συνεχόμενων φωρατών. Έπειτα, εισήχθησαν οι φόρτοι στο δίκτυο του SUMO μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης (calibration), με χρήση κατάλληλων εργαλείων. Με τον τρόπο αυτό, το δίκτυο φορτίζεται με τις διάφορες κατηγορίες συμβατικών οχημάτων, δημιουργούνται τα ταξίδια τους και τίθενται οι απαραίτητες παράμετροι που καθορίζουν την κίνησή τους. Επιπροσθέτως, το δίκτυο φορτίστηκε με τις γραμμές και τα δρομολόγια των λεωφορείων με χρήση ειδικών εντολών. Ακόμη, με δεδομένα σηματοδότησης των κόμβων της περιοχής του δακτυλίου, δημιουργήθηκαν τα προγράμματα σηματοδότησης στο SUMO.

Ύστερα από την απαραίτητη ετοιμασία του δικτύου που προαναφέρθηκε, επιλέχθηκαν το μοντέλο και οι παράμετροι, με τα οποία θα αναπαρασταθούν τα συμβατικά και τα αυτόνομα οχήματα. Ως αυτόνομα ορίστηκαν τα οχήματα ιδιωτικής χρήσεως (I.X.) ενώ επιπλέον τα αυτόνομα είναι και ηλεκτρικά. Τέλος, ορίστηκαν οι μεταβλητές εξόδου της προσομοίωσης, προκειμένου να προκύψουν δεδομένα για τη δημιουργία διαγραμμάτων ροής σε σχέση με την κατάληψη, μέσης ταχύτητας και χρόνου ταξιδιού ανά ποσοστό αυτόνομων οχημάτων 1 %, 2 %, 5 %, 10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %, καταλήγοντας στα αντίστοιχα συμπεράσματα.

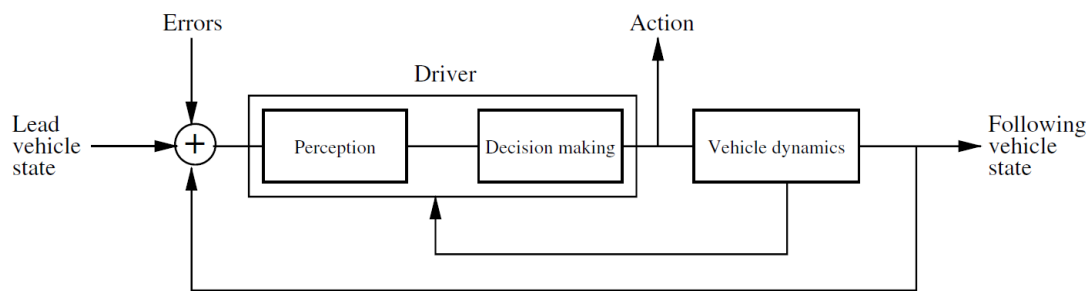
3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

3.2.1 Μικροσκοπικά μοντέλα ροής

Στην κατηγορία των μικροσκοπικών μοντέλων (microscopic models) περιγράφονται οι παράμετροι κινητικότητας ενός συγκεκριμένου οχήματος λεπτομερώς, με βάση τα υπόλοιπα οχήματα. Συνήθως αναφέρονται στην επιτάχυνση/επιβράδυνση του οχήματος με στόχο να καθορίσουν είτε έναν ασφαλή χωρικό είτε χρονικό διαχωρισμό (χρόνος αντίδρασης) (Härrig, 2010).

3.2.2 Μοντέλα ακολουθούντων οχημάτων

Τα μοντέλα ακολουθούντων οχημάτων (Car following models, CFMs) είναι πιθανότατα η πιο δημοφιλής κατηγορία οδηγικού μοντέλου. Συνήθως αναπαριστούν το χρόνο, τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση ως συνεχείς συναρτήσεις, αλλά τα περισσότερα έχουν εξελιχθεί παρέχοντας διακριτούς σχηματισμούς. Τα μοντέλα αυτά προσαρμόζουν την κίνηση ενός οχήματος με βάση ένα σύνολο κανόνων που στόχο έχει την αποφυγή οποιασδήποτε επαφής με το προπορευόμενο όχημα. Ένα γενικό διάγραμμα αναπαριστάται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Γενικό διάγραμμα αναπαράστασης μοντέλου ακολουθούντος οχήματος (Πηγή: Härrä, 2010) .

Αντικείμενο των CFMs είναι η αναπαράσταση της κυκλοφορίας των οχημάτων με τρόπο τέτοιο ώστε να αποφεύγονται τα ατυχήματα, μέσα από τον έλεγχο των χαρακτηριστικών οδήγησης καθενός οχήματος ξεχωριστά, καθορίζοντας μία απόσταση ασφαλείας μεταξύ τους, ένα χρονικό διαχωρισμό ή και τα δύο. Ο παραπάνω σκοπός επιτυγχάνεται με τον κανόνα του *Pipe*:

Ένας καλός κανόνας για να ακολουθήσεις ένα όχημα σε ασφαλή απόσταση, είναι να επιτρέψεις στον εαυτό σου να έχει απόσταση ανάλογη ενός οχήματος με το όχημα μπροστά για κάθε 16,1 χλμ/ώρα ταχύτητας στην οποία ταξιδεύεις (Pipe L.A., 1953).

Ο κανόνας του *Pipe* γενικεύεται από την Αποφυγή Ατυχήματος (Collision Avoidance) ή την Απόσταση Ασφαλείας (Safety Distance):

$$\Delta x^{safe}(v_i) = L + T \times v_i + \psi \times v_i^2 \quad (1)$$

Όπου L είναι το μήκος του οχήματος, T ο ασφαλής χρονικός διαχωρισμός ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί και ως χρόνος αντίδρασης και όπου $\psi \times v_i^2$ αναπαριστάται η απόσταση σύγκρουσης. Ως ψ αναφέρεται η προσαρμοστική παράμετρος επιβράδυνσης μεταξύ δύο οχημάτων. Όταν $\psi = 0$, η απόσταση σύγκρουσης μεταξύ του προπορευόμενου και του ακολουθούντος οχήματος θεωρούνται ίσες, καθώς η ψ μεγιστοποιείται όταν το προπορευόμενο όχημα πλησιάζει σε στάση. Ο ασφαλής χωρικός διαχωρισμός $\Delta x^{safe}(v_i)$ είναι επομένως η μικρότερη απόσταση για έναν οδηγό, συναρτήσει της ταχύτητας v_i , ώστε να σταματήσει εντελώς χωρίς ατύχημα, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου αντίδρασης και του χρόνου σύγκρουσης.

3.2.2.1 Μοντέλο Krauss

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο του (Krauss, 1998) επιλέχθηκε για την αναπαράσταση των συμβατικών οχημάτων. Στο μοντέλο αυτό, η συνάρτηση του χρόνου είναι διακριτή αφού το μοντέλο δεν υπολογίζει τη στιγμιαία επιτάχυνση αλλά τη μελλοντική ταχύτητα, με βήμα $t + \Delta t$, που αποκτάται από ένα όχημα i .

Ακόμη, το μοντέλο Krauss προσπαθεί να αναπαραστήσει τις σποραδικές και ακανόνιστες ανθρώπινες αντιδράσεις με τη στοχαστική παράμετρο μ . Λαμβάνοντας ως μεταβλητή εισόδου τη μέγιστη ταχύτητα v^{max} , τη μέγιστη επιτάχυνση a και επιβράδυνση b και τη στοχαστική παράμετρο μ , ο Krauss ορίζει τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v_i^{safe}(t + \Delta t) = v_{i+1}(t) + \frac{\Delta x_i(t) - v_{i+1}(t) \times T}{\Delta v_i(t) / (2 \times b + T)} \quad (2)$$

$$v_i^{des}(t + \Delta t) = \min[v^{max}, v_i(t) + a \times \Delta t, v_i^{safe}(t + \Delta t)] \quad (3)$$

$$v_i(t + \Delta t) = \max[0, v_i^{des}(t + \Delta t) - \mu] \quad (4)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t) \times \Delta t \quad (5)$$

Η σχέση (2) υπολογίζει την ταχύτητα του οχήματος i που απαιτείται για να καθοριστεί μία ασφαλής απόσταση και να αποφευχθεί κάποιο ατύχημα με το προπορευόμενο όχημα $i+1$. Ακόμη, χρειάζεται ένας χρόνος αντίδρασης T ώστε να προστεθεί μία διακύμανση στην αντίδραση του ερεθίσματος. Η σχέση (3)

υπολογίζει την επιθυμητή ταχύτητα που θα αποκτήσει το όχημα μέχρι τον κόμβο i , η οποία είναι προσαύξηση της προηγούμενης ταχύτητας με άνω όρια τις v^{safe} και v^{max} . Η σχέση (4) ενημερώνει την τρέχουσα ταχύτητα για το επόμενο βήμα Δt , με βάση μία στοχαστική απόκλιση γύρω από την επιθυμητή ταχύτητα μ . Τέλος, η σχέση (5) ενημερώνει τη θέση του οχήματος i για το επόμενο χρονικό βήμα. Αυτή η στοχαστική απόκλιση δημιουργεί τη φυσική χωρητικότητα ώστε να γίνει αποτελεσματικά η δοθείσα προσαύξηση ταχύτητας, καθώς επίσης να γίνει και η συμμόρφωση του οδηγού σύμφωνα με το μοντέλο.

3.2.2.2 Μοντέλο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας

Η παραγωγή του μοντέλου αυτού, βασίστηκε στο γεγονός ότι έπρεπε να ξεπεραστούν κάποια εμπόδια στον έλεγχο ειδικών κυκλοφοριακών συνθηκών, τα οποία δεν καθιστούσαν εφικτή την άμεση μεταφορά ενός πραγματικού ελεγκτή στην προσομοίωση. Ο αλγόριθμος του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Adaptive Cruise Control, ACC) αναλύεται στις ακόλουθες λειτουργίες.

Λειτουργία ελέγχου ταχύτητας (Speed control mode)

Η λειτουργία του ελέγχου ταχύτητας ενεργοποιείται όταν δεν υπάρχουν προπορευόμενα οχήματα στην περιοχή που γίνεται έλεγχος από τους αισθητήρες ή υπάρχουν σε απόσταση μεγαλύτερη των 120 m (Xiao et al., 2017; Liu et al., 2018).

Η λειτουργία αυτή έχει σκοπό να μειώσει την απόκλιση μεταξύ της ταχύτητας του οχήματος και της επιθυμητής ταχύτητας και δίνεται από τη σχέση (6).

$$\alpha_{i,k+1} = k_1(v_d - v_{i,k}), k_1 > 0 \quad (6)$$

Στη σχέση αυτή, ως $\alpha_{i,k+1}$ αναπαριστάται η επιτάχυνση που συστήνεται από τον έλεγχο ταχύτητας του επερχόμενου i -οστού οχήματος για το επόμενο χρονικό βήμα $k + 1$. Οι v_d και $v_{i,k}$ υποδεικνύουν την επιθυμητή ταχύτητα πλοήγησης και την ταχύτητα του i -οστού οχήματος στο παρόν χρονικό βήμα k , αντίστοιχα. Τέλος, k_1 είναι το κέρδος ελέγχου το οποίο καθορίζει το δείκτη απόκλισης της ταχύτητας για επιτάχυνση. Τυπικές τιμές αυτού είναι μεταξύ $0,3 - 0,4 \text{ s}^{-1}$ σύμφωνα με τους (Xiao et al., 2017).

Λειτουργία ελέγχου κενού (Gap control mode)

Στην περίπτωση αυτή, η επιτάχυνση στο επόμενο χρονικό βήμα $k + 1$ διαμορφώθηκε ως μία συνάρτηση μεταφοράς δευτέρου βαθμού, βασισμένη στις αποκλίσεις κενού και ταχύτητας αναφορικά με το προπορευόμενο όχημα και ορίζεται από τη σχέση (7).

$$a_{i,k+1} = k_2 e_{i,k} + k_3 (v_{i-1,k} - v_{i,k}), \quad k_2, k_3 > 0 \quad (7)$$

Ως $e_{i,k}$ ορίζεται η απόκλιση κενού του επερχόμενου i -οστού οχήματος στο παρόν χρονικό βήμα k και $v_{i-1,k}$ είναι η τρέχουσα ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος. Τα k_2 και k_3 είναι τα κέρδη ελέγχου της απόκλισης θέσης και της ταχύτητας αντίστοιχα. Οι βέλτιστες τιμές των παραπάνω παραμέτρων σύμφωνα με τους (Xiao et al., 2017) είναι $k_2 = 0,23 \text{ s}^{-1}$ και $k_3 = 0,07 \text{ s}^{-1}$. Η λειτουργία ελέγχου κενού ενεργοποιείται όταν οι αποκλίσεις κενού και ταχύτητας είναι μικρότερες από 0,2 m και 0,1 m/s αντίστοιχα (Xiao et al., 2017).

Λειτουργία ελέγχου κλεισίματος κενού (Gap-closing control mode)

Η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται όταν η απόσταση μεταξύ ενός οχήματος με το προπορευόμενο είναι μικρότερη των 100 m και τα κέρδη ελέγχου της σχέσης (7) τίθενται ως $k_2 = 0,04 \text{ s}^{-1}$ και $k_3 = 0,8 \text{ s}^{-1}$. Εάν η μεταξύ τους απόσταση είναι ανάμεσα στα 100 m και 120 m τότε, το υπό έλεγχο όχημα, διατηρεί την προηγούμενη στρατηγική ελέγχου για να παρέχει υστέρηση στο βρόγχο ελέγχου και να πραγματοποιεί μία ομαλή μεταφορά μεταξύ των δύο στρατηγικών (Xiao et al., 2017).

Λειτουργία ελέγχου αποφυγής σύγκρουσης (Collision avoidance control mode)

Η λειτουργία αυτή αποτρέπει τις συγκρούσεις από όπισθεν όταν επικρατούν κρίσιμες, για την ασφάλεια, συνθήκες. Ενεργοποιείται όταν η απόσταση με το προπορευόμενο όχημα είναι μικρότερη των 100 m και η απόκλιση κενού είναι αρνητική.

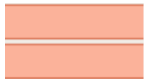
4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

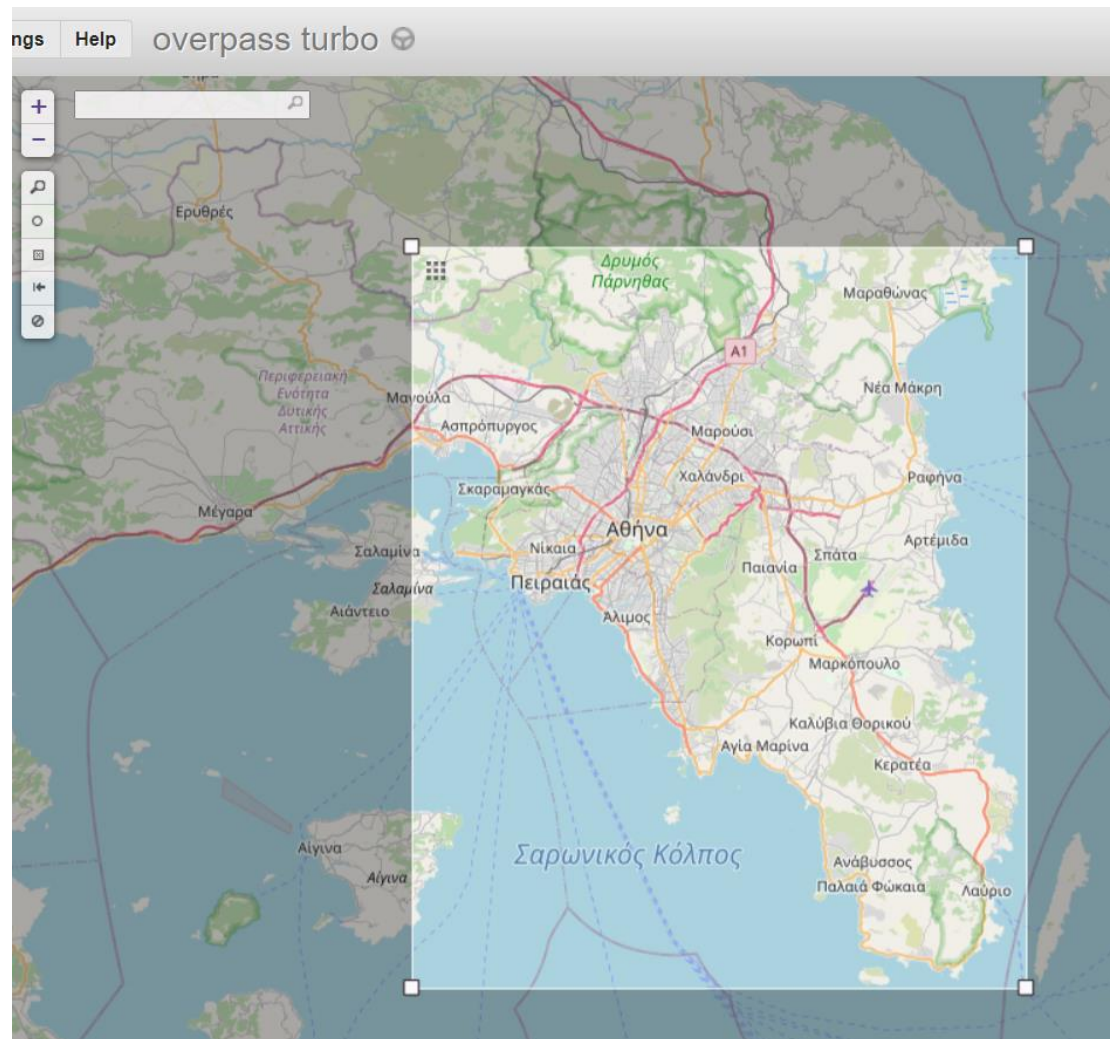
Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα, για την πραγματοποίηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Χρειάστηκαν δεδομένα για το δίκτυο, τους κυκλοφοριακούς φόρτους και τη σηματοδότηση, για τα οποία γίνεται αναλυτική περιγραφή. Τέλος, παρουσιάζεται η επεξεργασία του δικτύου προκειμένου αυτό να εισαχθεί σε περιβάλλον SUMO.

4.1 Συλλογή Δεδομένων

Η συλλογή δεδομένων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ξεκίνησε από το δίκτυο. Οι κατηγορίες δικτύου που ήταν επιθυμητό να μελετηθούν ήταν αυτοκινητόδρομοι, δευτερεύουσες αρτηρίες σύνδεσης μικρών και μεσαίων πόλεων, πρωτεύον, δευτερεύον, τριτεύον δίκτυο καθώς και οι λεωφορειακές γραμμές. Στον Πίνακα 4.1. που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι κατηγορίες του δικτύου και ο συμβολισμός τους στον *Open Street Map (OSM)*, ο οποίος αποτελεί έναν παγκόσμιο διαδικτυακό χάρτη, με δυνατότητα επεξεργασίας και προσθήκης πληροφορίας από εθελοντές, ενώ παράλληλα έχει άδεια ανοιχτού περιεχομένου.

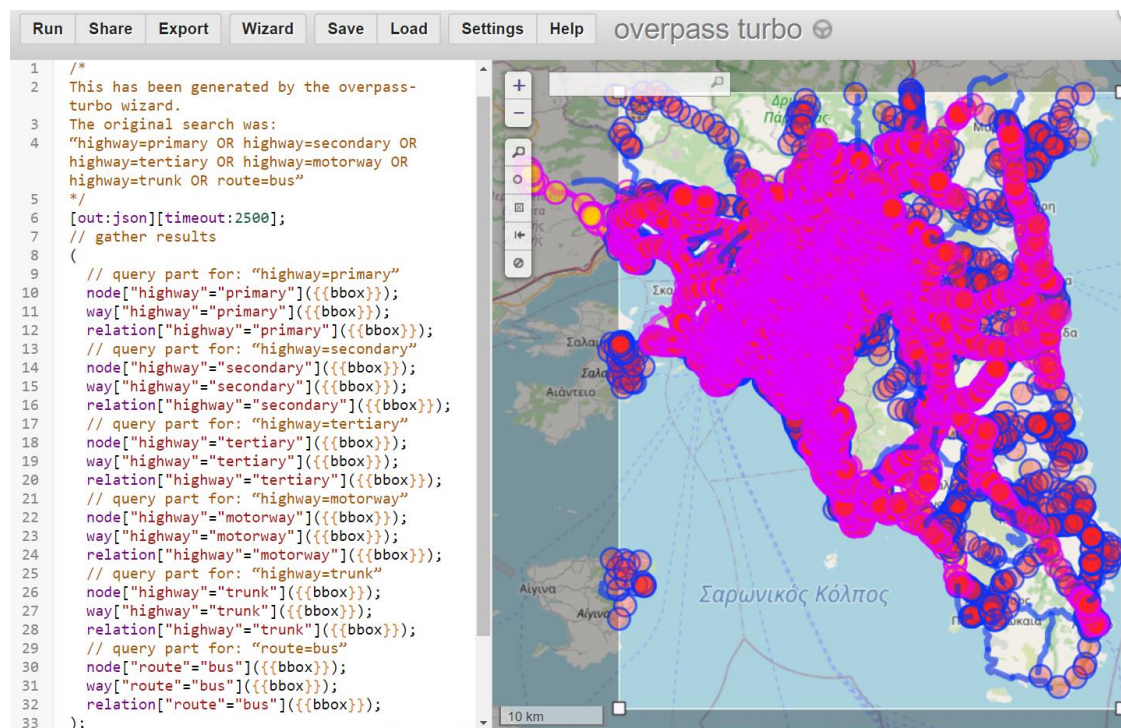
Πίνακας 4.1: Επιλεχθείσες κατηγορίες δικτύου.

Κατηγορία δικτύου	Συμβολισμός στον <i>OSM</i>
Αυτοκινητόδρομος (motorway)	
Δευτερεύουσες αρτηρίες σύνδεσης μικρών και μεσαίων πόλεων (trunk)	
Πρωτεύον (Primary)	
Δευτερεύον (Secondary)	
Τριτεύον (Tertiary)	

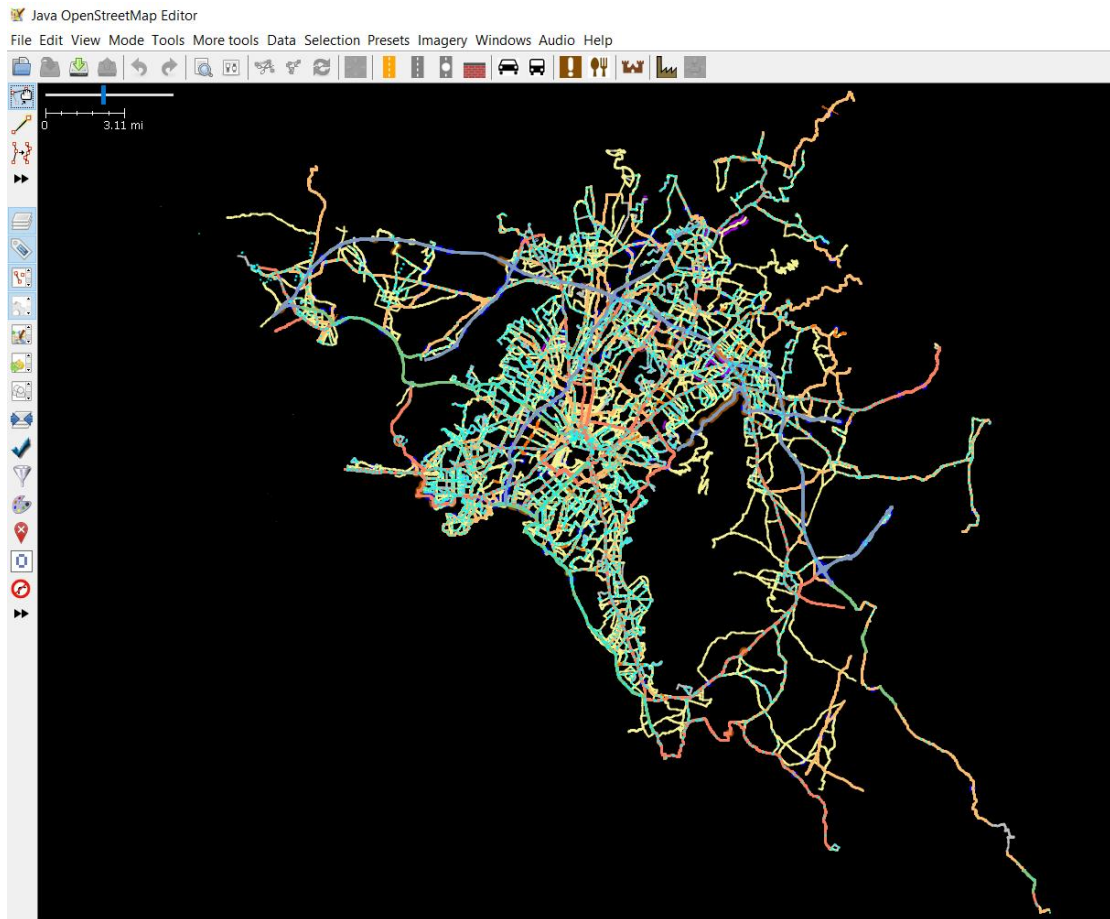


Εικόνα 4.1: Περιοχή μελέτης σε περιβάλλον *Overpass-turbo*.

Μέσω της πλατφόρμας *Overpass-turbo*, η οποία αποτελεί διαδικτυακό εργαλείο εξόρυξης δεδομένων του *OSM*, επιλέχθηκε η περιοχή της Αττικής όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Στη συνέχεια, προκειμένου να αντληθούν οι συγκεκριμένες κατηγορίες δικτύου και οι λεωφορειακές γραμμές με τις στάσεις τους, δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων, με τις επιθυμητές κατηγορίες δικτύου και τις γραμμές λεωφορείων ως ζητούμενο (query), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Ακόμη, ο *OSM* παρέχει πληροφορίες για τις λεωφορειακές γραμμές, κάτι που θα αξιοποιηθεί στη συνέχεια με χρήση κατάλληλων εντολών.



Εικόνα 4.2: Βάση δεδομένων με το ζητούμενο δίκτυο (αριστερά) και επιλογή του στο χάρτη (δεξιά) σε περιβάλλον *Overpass-turbo*.



Εικόνα 4.3: Δίκτυο μελέτης σε περιβάλλον *Java Open Street Map Editor (JOSM)*.

Το αρχείο που δημιουργείται είναι τύπου *.osm* και ανοίγει στην πλατφόρμα *Java Open Street Map Editor (JOSM)*. Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται το τελικό δίκτυο σε περιβάλλον *JOSM*. Επισημαίνεται, ότι για τον έλεγχο της ορθότητας άντλησης των συγκεκριμένων κατηγοριών από τον *OSM*, η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε για αρχή σε μία πολύ μικρή περιοχή του κέντρου της Αθήνας, έκτασης που να καθιστά εφικτό το λεπτομερή εποπτικό έλεγχο.

Κεφάλαιο 4. Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων

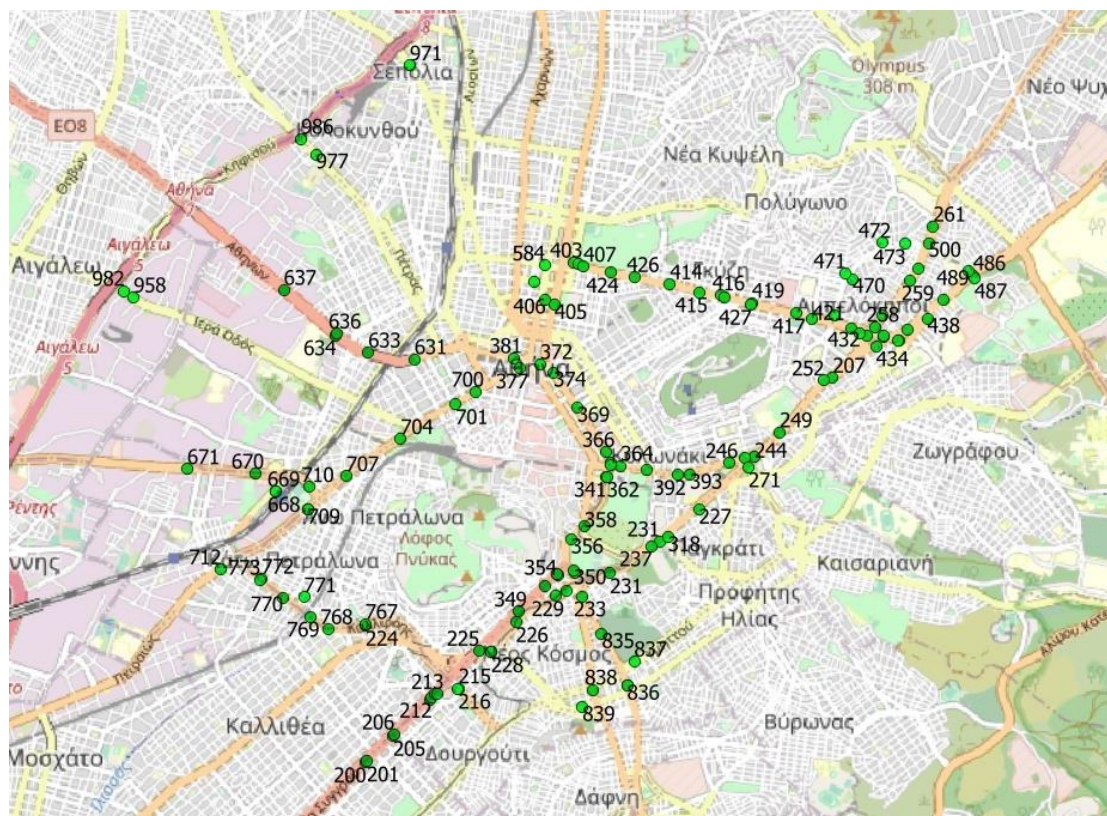
Έπειτα από τα δεδομένα του δικτύου, αντλήθηκαν τα δεδομένα των κυκλοφοριακών φόρτων από το Κέντρο Διαχείρισης και Μελετών Κυκλοφορίας της Περιφέρειας Αττικής, απόσπασμα των οποίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4.

PN	Date	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24
200	07-May-19	1035	633	380	241	262	573	1802	4122	3088	2644	3543	3274	3239	3316	3530	3511	3491	3932	3538	3408	3188	3073	1971	1403
200	09-May-19	1388	760	408	306	279	656	1727	4061	4384	3930	3656	3439	3210	3381	3454	3521	3553	4179	3875	3661	3246	2943	2165	1701
200	14-May-19	973	581	382	260	267	620	1818	4142	4190	3527	3811	3261	3331	3475	3574	3471	3614	3906	3772	3466	3213	2786	2019	1473
200	16-May-19	1235	641	419	275	291	657	1958	3992	4287	4095	3614	3499	3210	3389	3403	3702	3582	4427	3692	3526	3454	3183	2353	1742
201	07-May-19	1017	588	361	241	249	562	1600	3539	2673	2438	3228	3173	3054	3098	3282	3209	3146	3539	3008	2734	3001	3094	1919	1383
201	09-May-19	1363	761	386	287	265	638	1517	3372	3214	3449	3430	3326	3092	3132	3236	3137	3195	3845	3475	3281	3129	2985	2124	1653
201	14-May-19	954	553	375	251	256	610	1700	3856	3789	3227	3602	3095	3131	3160	3365	3236	3308	3567	3472	2911	2957	2838	2050	1435
201	16-May-19	1209	648	409	269	275	634	1695	3259	3172	3611	3406	3416	3108	3133	3205	3370	3223	3990	3424	2843	3195	3250	2374	1749
205	07-May-19	1123	680	405	266	288	602	1790	4177	2317	1837	3705	3458	3378	3443	3531	3616	3656	4063	3985	3564	3382	3249	2077	1453
205	09-May-19	1433	824	466	358	307	703	1766	4112	4627	4088	3755	3640	3391	3441	3519	3623	3659	4349	4149	3685	3356	3027	2248	1755
205	14-May-19	1069	625	425	288	297	668	1828	4147	4193	3527	3835	3319	3280	3451	3564	3562	3745	4088	3933	3617	3422	2948	2180	1576
205	16-May-19	1315	727	487	343	330	721	1906	4026	4425	4110	3668	3604	3331	3449	3512	3715	3729	4450	3965	3654	3605	3278	2524	1850
206	07-May-19	1079	640	396	270	283	595	1743	3957	2499	2441	3437	3317	3225	3182	3376	3261	3337	3665	3574	2914	3109	3152	1967	1442
206	09-May-19	1400	788	429	322	298	719	1705	3823	4223	3829	3607	3539	3244	3238	3408	3316	3222	3910	3720	3329	3265	3084	2209	1743
206	14-May-19	1000	590	402	285	286	696	1817	4038	3781	3310	3618	3154	3135	3225	3295	3300	3373	3675	3494	3082	3114	2857	2099	1544
206	16-May-19	1292	704	447	310	303	721	1838	3612	4128	3965	3522	3544	3237	3219	3293	3386	3302	3957	3662	3155	3337	3206	2426	1832
207	07-May-19	747	491	256	147	156	321	974	1770	1752	1739	1720	1672	1706	1657	1810	2053	1750	1689	1641	1811	1550	1664	1484	1222
207	09-May-19	1040	645	309	175	167	334	968	1801	1612	1623	1766	1649	1724	1715	1770	1785	1713	1788	1732	1669	1579	1585	1535	1284
207	14-May-19	740	498	256	141	174	326	1060	1796	1820	1787	1716	1634	1771	1588	1782	1663	1592	1648	1769	1717	1517	1552	1446	1332
207	16-May-19	1225	809	408	237	210	400	1100	1797	1754	1721	1517	1827	1885	1718	1780	1741	1668	1885	1618	1720	1735	1618	1526	1501
211	07-May-19	1046	597	378	252	262	592	1633	3522	1763	1645	3066	2965	2935	2924	2879	2772	2648	2922	3153	2660	2921	3047	1948	1416
211	09-May-19	1339	770	416	305	285	682	1582	3421	3100	2845	3254	3146	2961	2947	2939	2722	2576	3100	3102	2789	3081	2922	2170	1696
211	14-May-19	960	574	391	275	273	647	1660	3577	3334	2963	3398	2961	2920	2897	3021	2836	2751	2978	2886	2641	2803	2808	2059	1507
211	16-May-19	1232	668	436	296	287	678	1685	3580	3372	2928	3233	3210	2963	2986	3006	2903	2672	3266	3368	2840	3092	3174	2386	1778
212	07-May-19	986	587	357	236	236	550	1428	2942	1510	1411	2584	2954	2854	2786	2425	2247	2276	2617	2549	2192	2516	2807	1770	1315
212	09-May-19	1275	726	379	285	261	625	1400	3181	2719	2771	3026	3149	2899	2793	2625	2403	2338	2712	2619	2256	2742	2684	2008	1554
212	14-May-19	888	526	364	252	249	584	1466	2976	2629	2536	3099	2717	2618	2471	2515	2437	2311	2614	2459	2224	2438	2562	1905	1420
212	16-May-19	1188	631	399	275	274	629	1482	3244	3189	2841	3006	3140	2874	2886	2637	2575	2420	2973	2796	2374	2691	2900	2221	1635
213	07-May-19	992	576	359	232	238	547	1616	3332	2041	1977	3291	3309	3201	3129	2945	2757	3090	3511	3056	2561	2700	2842	1788	1307
213	09-May-19	1273	729	388	285	266	639	1540	3458	3325	3713	3635	3432	3203	3168	3213	3116	3068	3565	3225	2778	2936	2741	2012	1583
213	14-May-19	890	515	356	257	247	610	1645	3478	2967	2873	3254	2783	2794	2726	2846	2824	2903	3236	2981	2638	2601	2611	1929	1423
213	16-May-19	1180	644	389	273	272	653	1710	3292	4189	3869	3427	3429	3152	3110	3139	3195	3126	3596	3498	2701	2927	2866	2243	1652
214	07-May-19	49	25	24	25	23	49	89	120	146	184	200	197	233	291	237	209	290	315	295	190	144	149	79	115
214	09-May-19	58	39	26	22	37	47	82	125	143	183	180	189	250	245	247	270	297	265	232	137	139	123	93	60
214	14-May-19	50	25	36	27	25	48	93	133	129	91	153	191	170	183	200	200	213	264	203	152	163	106	88	71
214	16-May-19	68	51	30	21	29	54	89	147	185	199	231	204	206	267	261	286	257	264	225	167	153	141	112	87

Εικόνα 4.4: Απόσπασμα από τα δεδομένα των κυκλοφοριακών φόρτων.

Η μέτρηση των κυκλοφοριακών φόρτων πραγματοποιήθηκε από φωρατές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην περιοχή του δακτυλίου της Αθήνας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5. Οι φωρατές είναι συνολικά 125 και μετρούν οχήματα ανά πέντε λεπτά, ενώ τα αποτελέσματά τους παρέχονται αθροιστικά στην ώρα. Κατά συνέπεια, οι στήλες *F1* έως *F24* της Εικόνας 4.4, περιέχουν οχήματα ανά ώρα, για όλο το εικοσιτετράωρο. Τα δεδομένα βρίσκονται σε περιβάλλον *Microsoft Excel*. Στην πρώτη στήλη, *PN*, αναγράφονται τα ονόματα κωδικοί των φωρατών, ενώ στη δεύτερη, *Date*, αναγράφονται οι τέσσερις ημερομηνίες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Από αυτές, οι δύο αναφέρονται σε

ημέρα Τρίτη και οι άλλες δύο σε ημέρα Πέμπτη, ενώ για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε η ημερομηνία 9 Μαΐου 2019. Ως **ώρα μελέτης** επιλέχθηκε η **08:00-09:00 π.μ.**, που αναφέρεται στη στήλη *F9*. Μαζί με το αρχείο των κυκλοφοριακών φόρτων, υπήρχε και ένα αρχείο με τη σαφή περιγραφή της θέσης των φωρατών και τον αριθμό λωρίδων στις οποίες οι φωρατές μέτρησαν φόρτο. Επιπλέον, υπήρχε ένα αρχείο τύπου *.kmz* το οποίο περιέχει όλους τους φωρατές της Αττικής. Από αυτό, για την καλύτερη εξέτασή τους, εισήχθησαν σε περιβάλλον *QGIS* μόνο οι φωρατές στους οποίους υπήρχαν δεδομένα μετρήσεων και οι οποίοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5.

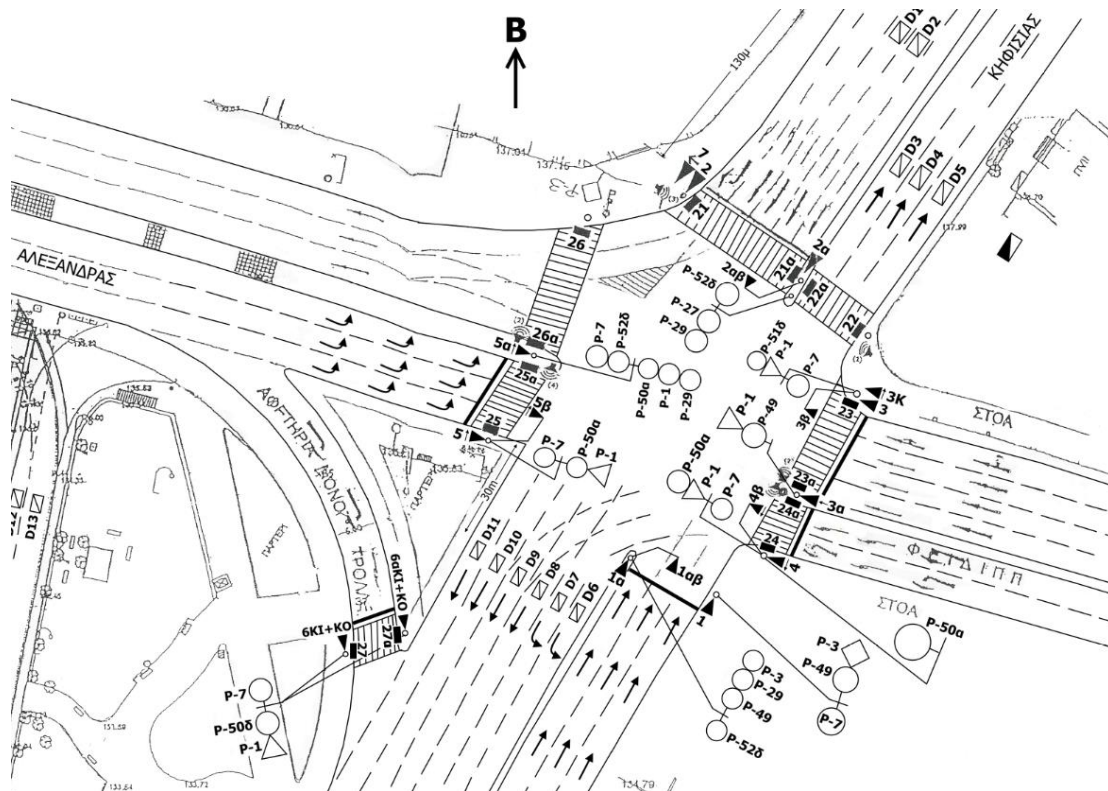


Εικόνα 4.5: Θέσεις φωρατών μέτρησης κυκλοφοριακού φόρτου στην περιοχή του δακτυλίου της Αθήνας, σε περιβάλλον QGIS.

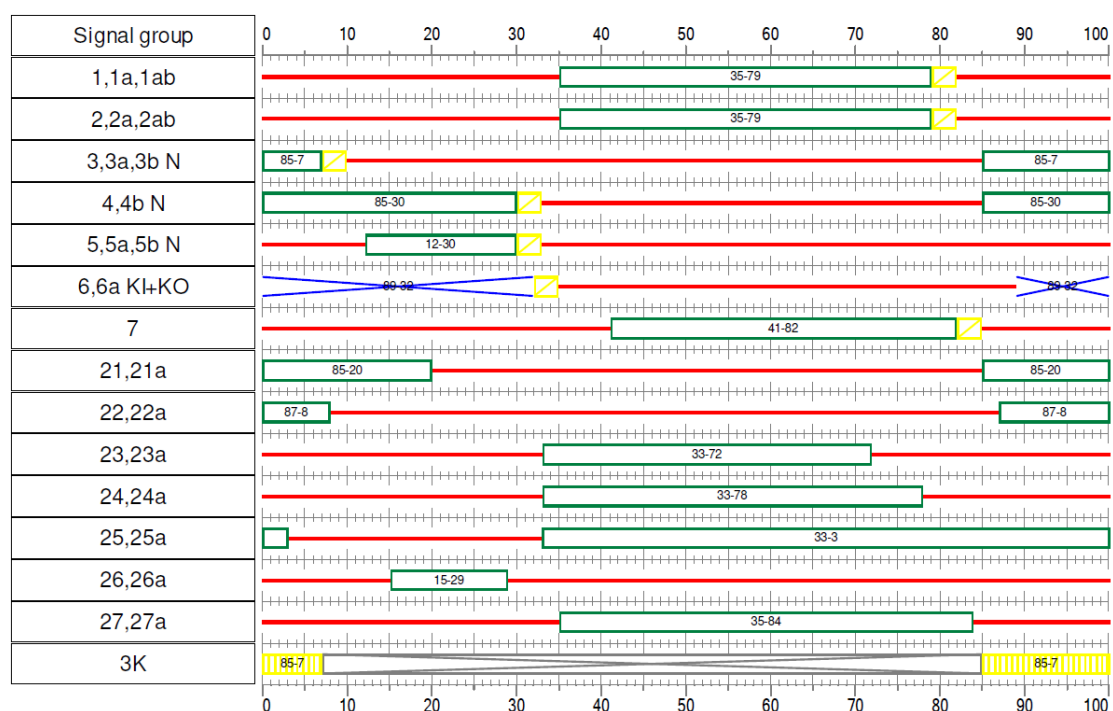
Για τον έλεγχο των μετρήσεων εξετάστηκε η απόκλιση στις τιμές φόρτων ανά δύο συνεχόμενων φωρατών, με άνω όριο απόκλιση τάξεως 10 % μεταξύ τους, σε

περίπτωση που δεν παρεμβαίνουν στροφές ανάμεσα και οι διαδοχικοί φωρατές αναφέρονται στον ίδιο αριθμό λωρίδων. Οι φόρτοι αυτοί εισήχθησαν στο δίκτυο του SUMO με τη διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration), όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.

Μία ακόμη σημαντική διαδικασία για τη λειτουργία του δικτύου ήταν αυτή της σηματοδότησης. Προκειμένου να εισαχθούν τα προγράμματα σηματοδότησης στο δίκτυο, συλλέχθηκαν δεδομένα με τα σχέδια κόμβων όπως αυτό της Εικόνας 4.6 και τα αντίστοιχα διαγράμματα σηματοδότησης όπως της Εικόνας 4.7. Οι θέσεις των φωτεινών σηματοδοτών είναι αριθμημένες και συμβολίζονται με τρίγωνο όταν αφορούν τα οχήματα και ορθογώνιο όταν αφορούν τους πεζούς. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι φωτεινοί σηματοδότες των οχημάτων.



Εικόνα 4.6: Σχήμα κόμβου Βασ. Σοφίας-Κηφισίας-Αλεξάνδρας.



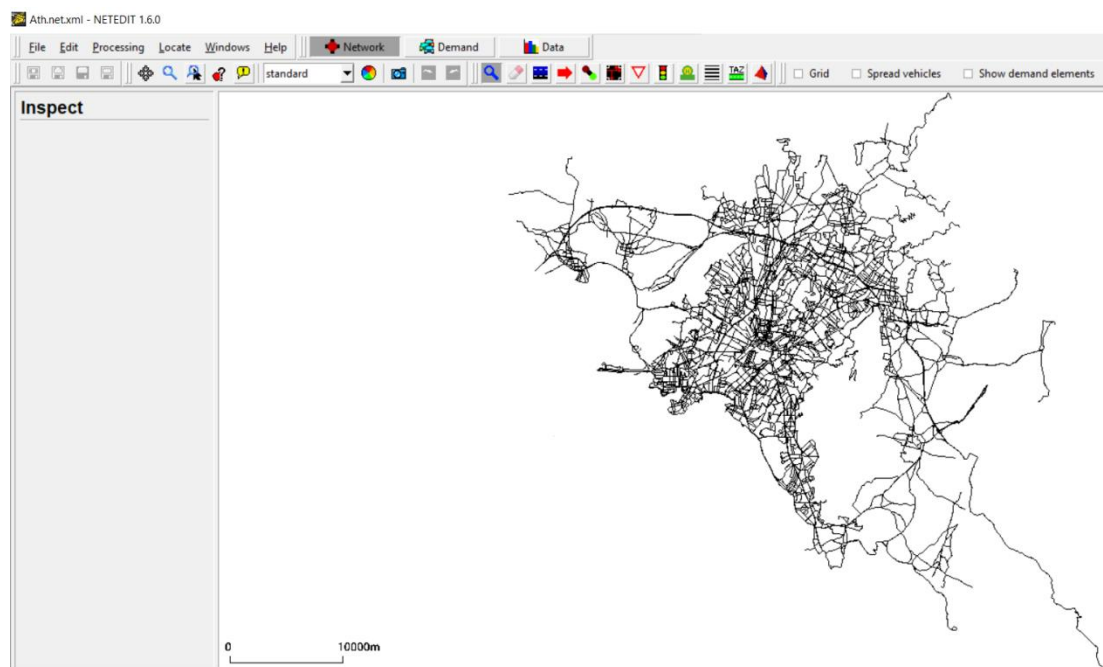
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα Σηματοδότησης του κόμβου Βασ. Σοφίας-Κηφισίας-Αλεξάνδρας.

4.2 Επεξεργασία Δεδομένων

Αναφορικά με το δίκτυο, ακολούθησε η διαδικασία μετάβασής του από το *JOSM* στο *SUMO*. Αυτή, πραγματοποιείται με το εργαλείο *NETCONVERT*, το οποίο εισάγει ψηφιακά οδικά δίκτυα από διαφορετικές πηγές και παράγει οδικά δίκτυα που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλα πακέτα εργαλείων. Η εντολή του *NETCONVERT* τρέχει σε command line. Υποθέτει τουλάχιστον μία παράμετρο – το συνδυασμό του ονόματος του τύπου αρχείου για εισαγωγή ως όνομα παραμέτρου *--osm* και το όνομα του αρχείου, *example.osm*, που θα εισαχθεί ως τιμή παραμέτρου. Με την επιπλέον παράμετρο *-o <FILE>* επιλέγεται το όνομα του τελικού αρχείου του δικτύου. Συνεπώς, για την εισαγωγή ενός δικτύου από τον *Open Street Map* η εντολή είναι η (1), ενώ η τελική μορφή του δικτύου στο *SUMO* φαίνεται στην Εικόνα 4.8.

`netconvert --osm example.osm -o example.net.xml` (1)

Το αρχείο *.net.xml* καθορίζει όλες τις οδούς οι οποίες ανήκουν στην ίδια τοπολογία δικτύου. Κάθε διαδρομή ορίζεται ως σύνδεσμος, ορίζοντας το μήκος της, το σχήμα της, τα όρια ταχύτητας, τον αριθμό λωρίδων και τις συνδέσεις μεταξύ άλλων οδών.



Εικόνα 4.8: Δίκτυο μελέτης σε περιβάλλον SUMO.

Τέλος, αναφορικά με τους κυκλοφοριακούς φόρτους, οι φωρατές μετρούν Ι.Χ. και βαρέα οχήματα. Στην παρούσα μελέτη ήταν επιθυμητό να μελετηθούν επιπλέον και οι μοτοσυκλέτες, επομένως έγινε μία προσαύξηση 20 % στους επιλεχθέντες φόρτους.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαδικασίες προετοιμασίας του κυκλοφοριακού μοντέλου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής στο περιβάλλον μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO. Παράλληλα, αναπτύσσονται στο κεφάλαιο αυτό τα σενάρια που εξετάστηκαν για την προσομοίωση της κυκλοφορίας αυτόνομων οχημάτων στο υπό μελέτη δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μία περιγραφή του λογισμικού μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO (Simulation of Urban Mobility), των χαρακτηριστικών της κυκλοφοριακής ζήτησης, της βαθμονόμησης του δικτύου, της παραμετροποίησης των επιλεχθέντων μοντέλων συμπεριφοράς και κίνησης αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων, της διαδικασίας εισαγωγής των λεωφορειακών γραμμών στο δίκτυο και της διαδικασίας εισαγωγής των πληροφοριών σηματοδότησης. Τέλος, περιγράφονται τα παράγωγα της προσομοίωσης, η βάση δεδομένων και τα τελικά αποτελέσματα.

5.1 Προσομοίωση Αστικής Κινητικότητας

Η Προσομοίωση Αστικής Κινητικότητας (Simulation of Urban Mobility, SUMO), αποτελεί ένα δωρεάν και ανοιχτό λογισμικό το οποίο είναι διαθέσιμο από το 2001. Επιτρέπει τη μοντελοποίηση διατροπικών κυκλοφοριακών συστημάτων, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα για προσομοίωση οδικών οχημάτων, δημόσιων συγκοινωνιών και πεζών. Στις βιβλιοθήκες του SUMO συμπεριλαμβάνεται μία πληθώρα υποστηρικτικών εργαλείων (tools) τα οποία λειτουργούν ως πρόσθετα (add-ons) στο SUMO και βοηθούν στην υλοποίηση εργασιών όπως βαθμονόμηση του δικτύου, υπολογισμός εκπομπών ρύπων και έλεγχος της συνέχειας/συνδεσιμότητας του δικτύου. Το SUMO μπορεί επίσης να

υποστηρίξει την εκτέλεση και τον έλεγχο της προσομοίωσης μέσω Διασύνδεσης Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interfaces). Μέσω του ως άνω αναφερόμενου API, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη για δημιουργία νέων μοντέλων και εργαλείων μέσω της γλώσσας προγραμματισμού *Python*.

5.2 Κυκλοφοριακή Ζήτηση

Το SUMO απαιτεί την εισαγωγή ζήτησης (demand) στο δίκτυο για να υπάρξει η δυνατότητα εκτέλεσης των επιθυμητών προσομοιώσεων. Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, η κυκλοφορία αποτελείται κατά 72 % από οχήματα ιδιωτικής χρήσης, 20 % από μοτοσυκλέτες και 8 % από φορτηγά. Πέραν αυτών, ένα ποσοστό της ζήτησης καλύπτεται από λεωφορεία αστικών συγκοινωνιών, τα οποία περιγράφονται σε ξεχωριστή υποενότητα καθώς ο τρόπος εισαγωγής τους στο SUMO διαφέρει από εκείνον για τις υπόλοιπες κατηγορίες οχημάτων. Για τις κατηγορίες αυτές δημιουργήθηκε ένα πρόσθετο αρχείο *.add.xml* με τα χαρακτηριστικά των οχημάτων. Το αρχείο αυτό περιέχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- όνομα οχήματος, *id*
- κατηγορία οχήματος, *vClass*
- χρώμα σε σύστημα Red Green Blue (RGB), *color*
- επιτάχυνση σε m/s^2 , *accel*
- επιβράδυνση σε m/s^2 , *decel*
- σφάλμα του οδηγού κατά την οδήγηση, *sigma*
- μήκος οχήματος σε m, *length*
- χωρικός διαχωρισμός σε m, *minGap*
- μέγιστη ταχύτητα σε m/s , *maxSpeed*
- ποσοστό της κατηγορίας οχήματος στην κυκλοφορία, *probability*
- διασπορά ταχύτητας, *speedDev*

- σχήμα οχήματος, *guiShape*

```
<additional>↓
  <vTypeDistribution id="typedist1">↓
    <vType id="passenger" vClass="passenger" color=".8,.2,.2" accel="2.9" decel="7.5" sigma="0.5" ↓
      length="4.3" minGap="2.5" maxSpeed="16.67" probability=".72" speedDev="0.1" guiShape="passenger"/>↓
    <vType id="motorcycle" vClass="motorcycle" color=".8,.8,.8" accel="6.0" decel="10.0" sigma="0.5" ↓
      length="2.0" minGap="2.5" maxSpeed="19.44" probability=".20" speedDev="0.1" guiShape="motorcycle"/>↓
    <vType id="truck" vClass="truck" color=".2,.2,.8" accel="1.3" decel="4.0" sigma="0.5" ↓
      length="7.1" minGap="2.5" maxSpeed="8.33" probability=".08" speedDev="0.1" guiShape="truck"/> ↓
  </vTypeDistribution>↓
</additional>↓
```

Εικόνα 5.1: Αρχείο τύπου *.add.xml* με τα χαρακτηριστικά των οχημάτων.

Η εισαγωγή της κυκλοφοριακής ζήτησης πραγματοποιείται με ένα κατάλληλο αρχείο τύπου *.rou.xml*, το οποίο περιέχει τόσο το σύνολο των διαδρομών τις οποίες χρησιμοποιεί καθένα από τα οχήματα, όσο και πληροφορίες σχετικά τα προαναφερθέντα φυσικά χαρακτηριστικά.

```
<vType id="motorcycle" length="2.00" minGap="2.50" maxSpeed="19.44" probability="0.20" ↓
speedFactor="normc(1.00,0.10,0.20,2.00)" vClass="motorcycle" guiShape="motorcycle" ↓
color="204,204,204" accel="6.0" decel="10.0" sigma="0.5"/>↓
<vehicle id="0" type="motorcycle" depart="0.00">↓
  <route edges="44010624#0 44010624#1 44010624#2 388488510#0 388488510#1 216905426 871
</vehicle>↓
<vType id="passenger" length="4.30" minGap="2.50" maxSpeed="16.67" probability="0.72" ↓
speedFactor="normc(1.00,0.10,0.20,2.00)" vClass="passenger" guiShape="passenger" ↓
color="204,51,51" accel="2.9" decel="7.5" sigma="0.5"/>↓
<vehicle id="1" type="passenger" depart="0.03">↓
  <route edges="215114175#0 215114175#1 215114175#2 215114175#3 215114175#4 382447961#
</vehicle>↓
<vehicle id="2" type="passenger" depart="0.06">↓
  <route edges="560967697#1 560967701#1 424924291 -560969026 32078403#0 32078403#1 217
</vehicle>↓
<vehicle id="3" type="passenger" depart="0.10">↓
  <route edges="680956516#6 680956516#7 680956516#8 286275973#0 286275973#1 286275973#
</vehicle>↓
<vehicle id="4" type="passenger" depart="0.13">↓
```

Εικόνα 5.2: Απόσπασμα αρχείου *.rou.xml*.

Για την εισαγωγή της κυκλοφοριακής ζήτησης στο SUMO, χρησιμοποιείται το εργαλείο *randomTrips.py*, το οποίο γεννά μία σειρά από ταξίδια για ένα δοθέν δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας σύνδεσμο προέλευσης και προορισμού ομοιομόρφως τυχαία. Τα προκύπτοντα ταξίδια αποθηκεύονται σε ένα αρχείο

τύπου *.trips.xml*. Τα ταξίδια κατανέμονται ομοιόμορφα σε ένα διάστημα που ορίζεται από την έναρξη 0 και τη λήξη 3600 σε δευτερόλεπτα.

Κάθε ταξίδι έχει ένα αναγνωριστικό που αποτελείται από έναν αριθμό εκτέλεσης.

```
<trip id="0" depart="0.00" from="87073899" to="128108898" type="typedist1"/>↓
<trip id="1" depart="1.00" from="174458298#1" to="222655002#1" type="typedist1"/>↓
<trip id="2" depart="2.00" from="-731992814#0" to="-142674588#0" type="typedist1"/>↓
<trip id="3" depart="3.00" from="50926779#2" to="28194816" type="typedist1"/>↓
<trip id="4" depart="4.00" from="332854878" to="606027683" type="typedist1"/>↓
<trip id="5" depart="5.00" from="-286312844" to="48918558" type="typedist1"/>↓
<trip id="6" depart="6.00" from="587374621#3" to="371936127" type="typedist1"/>↓
<trip id="7" depart="7.00" from="423240330" to="385364186#1" type="typedist1"/>↓
<trip id="8" depart="8.00" from="60824953" to="303753006" type="typedist1"/>↓
```

Εικόνα 5.3: Απόσπασμα αρχείου *.trips.xml*.

5.3 Βαθμονόμηση

Ως συνέχεια του ορισμού της κυκλοφοριακής ζήτησης, ακολούθησε η διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration). Μέσω της βαθμονόμησης, μπορούν να εισαχθούν οι πραγματικοί κυκλοφοριακοί φόρτοι, οι οποίοι μετρήθηκαν από φωρατές σε σημεία του δακτυλίου της Αθήνας, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με τη χρήση του εργαλείου *routeSampler.py*. Το εργαλείο αυτό, χρησιμοποιεί ως πρώτο αρχείο εισόδου το *.rou.xml* αρχείο το οποίο παράχθηκε από το *randomTrips.py* και καθορίζει τις πιθανές διαδρομές των οχημάτων σε όλο το εύρος του δικτύου. Ως δεύτερο αρχείο εισόδου ορίζεται ένα *turn-count data* αρχείο, το οποίο εμπεριέχει την πληροφορία που έχει εξαχθεί από τους φωρατές και το οποίο δημιουργήθηκε χειρωνακτικά. Ένα παράδειγμα τέτοιου αρχείου φαίνεται στην Εικόνα 5.4. Μεταβλητή εξόδου αποτελεί ένα νέο αρχείο *.rou.xml*. Οι διαδρομές λαμβάνονται δειγματικά από την πρώτη μεταβλητή εισόδου έτσι ώστε οι διαδρομές που προκύπτουν να συμπληρώνουν τα δεδομένα του αρχείου *turn-count data*. Συνολικά δημιουργούνται **74.293 διαδρομές οχημάτων**.

```

<interval id="main" begin="0.0" end="3600.0">↓
  <edgeRelation from="249466774.767" to="249466774.961" count="5144"/>↓
  <edgeRelation from="658270072" to="658270072.54" count="4070"/>↓
  <edgeRelation from="658270073.139" to="658270073.184" count="4656"/>↓
  <edgeRelation from="300742646" to="300742646.118" count="4634"/>↓
  <edgeRelation from="661490490" to="661490489" count="2082"/>↓
  <edgeRelation from="300742646.237" to="441081208" count="3923"/>↓
  <edgeRelation from="441081208" to="441081208.25" count="3263"/>↓
  <edgeRelation from="441081208.25" to="325286065" count="4555"/>↓
  <edgeRelation from="23182586.262" to="52493593" count="854"/>↓
  <edgeRelation from="23182586" to="23182586.77" count="371"/>↓
  <edgeRelation from="270945712" to="46936747" count="1722"/>↓
  <edgeRelation from="40123402#1" to="203890248#0" count="2419"/>↓
  <edgeRelation from="324439409#3" to="324439409#4" count="2246"/>↓
  <edgeRelation from="158466229" to="736485786" count="974"/>↓
  <edgeRelation from="441081208.25" to="325286065" count="1073"/>↓
  <edgeRelation from="249466785" to="643967110#0" count="1693"/>↓
  <edgeRelation from="659926875#1" to="657730939" count="1558"/>↓
  <edgeRelation from="23213764#2" to="23213764#3" count="1662"/>↓
  <edgeRelation from="23214505#2" to="225790248#0" count="1330"/>↓
  <edgeRelation from="384007085" to="225790244#0" count="1140"/>↓

```

Εικόνα 5.4: Απόσπασμα αρχείου *turn-count data* της φόρτισης του δικτύου.

Δημιουργήθηκε ένα *turn-count data* αρχείο, για τη φόρτιση του δικτύου, διάρκειας μίας ώρας. Αυτό, ξεκινά από τη χρονική στιγμή *begin* = "0" και ολοκληρώνει τη χρονική στιγμή *end* = "3600" σε δευτερόλεπτα.

Από προεπιλογή, η σύνταξη του *turn-count data* αρχείου περιλαμβάνει το χαρακτηριστικό *edgeRelation* και στη συνέχεια το όνομα του συνδέσμου προέλευσης *from* και προορισμού *to*, ενώ ακολουθεί το χαρακτηριστικό *count*, στο οποίο αναγράφεται η τιμή του επιθυμητού φόρτου. Στο σύνδεσμο προέλευσης αναγράφεται το όνομα του συνδέσμου στον οποίο ήταν τοποθετημένος ο φωρατής στο πραγματικό δίκτυο και στο σύνδεσμο προορισμού αναγράφεται ο αμέσως επόμενος.

Το στάδιο της βαθμονόμησης ολοκληρώνεται με τη διαδικασία βελτιστοποίησης (optimization) του τελικού παραγόμενου αρχείου διαδρομών. Από προεπιλογή, στο λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO, οι διαδρομές που αποτελούν το τελικό παραγόμενο αρχείο διαδρομών επιλέγονται δειγματοληπτικά από το αρχείο εισόδου (input) το οποίο και περιέχει το σύνολο των διαδρομών που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο. Η επιλογή των

διαδρομών είναι τέτοια ώστε να πληρούνται ως επί το πλείστον οι μετρήσεις (counts) από τους φωρατές (detectors). Στο σημείο αυτό, ένας «λύτης» (solver) Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Integer Linear Programming - ILP) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ούτως ώστε η δειγματοληψία των διαδρομών από το αρχείο input να προσεγγίσει τις μετρήσεις των φωρατών. Η διαδικασία αυτή επιλέγεται με χρήση της εντολής *--optimize*. Ο αριθμός των επαναλήψεων που χρησιμοποιείται μία διαδρομή, μπορεί να αλλάξει τόσες φορές όσες και οι μετρήσεις. Αυτό καθορίζει μία αντιστάθμιση μεταξύ της χρήσης διαδρομών στην ίδια διανομή, όπως αυτή βρίσκεται στο αρχείο εισόδου και της βελτιστοποίησης των μετρήσεων, χρησιμοποιώντας την επιλογή *--optimize full*. Με τον τρόπο αυτό, δεν έχουν οριστεί περιορισμοί στην κατανομή διαδρομής και οποιαδήποτε διαδρομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσο συχνά χρειάζεται για να φτάσει ο αριθμός των μετρήσεων.

5.4 Παραμετροποίηση μοντέλων

Στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν το μοντέλο του Krauss για την αναπαράσταση των συμβατικών οχημάτων και το μοντέλο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Adaptive Cruise Control, ACC) για την αναπαράσταση των αυτόνομων οχημάτων. Ακολουθούν οι τιμές των παραμέτρων των συμβατικών οχημάτων στον Πίνακα 5.1 και των αυτόνομων στον Πίνακα 5.2. Επισημαίνεται ότι ως αυτόνομα επιλέχθηκαν μόνο οχήματα ιδιωτικής χρήσης (I.X.) και ως προφίλ οδηγού, αυτό του μετριοπαθούς (moderate).

Πίνακας 5.1: Πληροφορίες παραμέτρων συμβατικών οχημάτων.

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή
<i>sigma</i>	Το σφάλμα του οδηγού κατά την οδήγηση (μεταξύ 0 και 1).	0,5
<i>tau (s)</i>	Ο επιθυμητός (ελάχιστος) χρόνος αντίδρασης του οδηγού. Για το μοντέλο Krauss βασίζεται στον καθαρό χώρο μεταξύ προπορευόμενου και ακολουθούντος οχήματος.	1,0
<i>accel (m/s²)</i>	Η επιτάχυνση των οχημάτων.	I.X. = 2,9 Μοτοσυκλέτα = 6,0 Φορτηγό = 1,3
<i>decel (m/s²)</i>	Η επιβράδυνση των οχημάτων.	I.X. = 7,5 Μοτοσυκλέτα = 10,0 Φορτηγό = 4,0
<i>speedFactor</i>	Ο πολλαπλασιαστής ταχύτητας των οχημάτων, για όρια ταχύτητας της λωρίδας.	1,0

Πίνακας 5.2: Πληροφορίες παραμέτρων αυτόνομων οχημάτων.

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή
<i>sigma</i>	Το σφάλμα του οδηγού κατά την οδήγηση (μεταξύ 0 και 1).	0,0
<i>tau (s)</i>	Ο επιθυμητός (ελάχιστος) χρόνος αντίδρασης του οδηγού. Για το μοντέλο Krauss βασίζεται στον καθαρό χώρο μεταξύ προπορευόμενου και ακολουθούντος οχήματος.	1,6
<i>accel (m/s²)</i>	Η επιτάχυνση των οχημάτων.	1,5
<i>decel (m/s²)</i>	Η επιβράδυνση των οχημάτων.	3,0
<i>speedFactor</i>	Ο πολλαπλασιαστής ταχύτητας των οχημάτων, για όρια ταχύτητας της λωρίδας.	1,0
<i>emergencyDecel (m/s²)</i>	Η μέγιστη τιμή επιβράδυνσης που μπορούν να λάβουν τα οχήματα.	9,0
<i>vClass</i>	Κατηγορία οχήματος.	evehicle (ηλεκτρικό)
<i>emissionClass</i>	Κατηγορία εκπομπών ρύπων.	Energy/unknown
<i>speedControlGain</i>	Το κέρδος ελέγχου που καθορίζει το ρυθμό απόκλισης ταχύτητας (λειτουργία ελέγχου ταχύτητας).	0,4
<i>gapClosingControlGainSpeed</i>	Το κέρδος ελέγχου που καθορίζει το ρυθμό απόκλισης ταχύτητας (λειτουργία ελέγχου κλεισίματος κενού).	0,8
<i>gapClosingControlGainSpace</i>	Το κέρδος ελέγχου που καθορίζει το ρυθμό απόκλισης θέσης (λειτουργία ελέγχου κλεισίματος κενού).	0,04
<i>gapControlGainSpeed</i>	Το κέρδος ελέγχου που καθορίζει το ρυθμό απόκλισης ταχύτητας (λειτουργία ελέγχου κενού).	0,07
<i>gapControlGainSpace</i>	Το κέρδος ελέγχου που καθορίζει το ρυθμό απόκλισης θέσης (λειτουργία ελέγχου κενού).	0,23
<i>collisionAvoidanceGainSpace</i>	Το κέρδος ελέγχου που καθορίζει το ρυθμό απόκλισης θέσης (λειτουργία ελέγχου αποφυγής σύγκρουσης).	0,8
<i>collisionAvoidanceGainSpeed</i>	Το κέρδος ελέγχου που καθορίζει το ρυθμό απόκλισης ταχύτητας (λειτουργία ελέγχου αποφυγής σύγκρουσης).	0,23

5.5 Λεωφορειακές γραμμές

Η δημιουργία των δημόσιων συγκοινωνιών στο SUMO περιλαμβάνει δύο βήματα:

- Εξαγωγή πληροφοριών αρχικού δικτύου και δημόσιων συγκοινωνιών
- Εύρεση ρεαλιστικών ωρών ταξιδιού σε στάση και δημιουργία χρονοδιαγραμμάτων των συγκοινωνιών.

Επισημαίνεται ότι στην παρούσα έρευνα, δεδομένου ότι μελετήθηκαν μόνο τα λεωφορεία από τον κλάδο των δημόσιων συγκοινωνιών και στο *overpass-turbo* επιλέχθηκε μόνο το δίκτυο που αφορά τις διαδρομές αυτών, με τις ακόλουθες εντολές εξάγονται πληροφορίες αποκλειστικά για τις λεωφορειακές γραμμές.

Η εξαγωγή πληροφοριών αρχικού δικτύου και δημόσιων συγκοινωνιών αφορά τις στάσεις και τις γραμμές των λεωφορείων. Η εντολή που χρησιμοποιείται είναι η παρακάτω:

```
netconvert --osm-files osm.xml -o net.net.xml --osm.stop-output.length 20 --ptstop-output additional.xml --ptline-output ptlines.xml (1)
```

όπου:

- *--osm-files osm.xml*: οδηγεί στο αρχείο *Open Street Map*
- *-o net.net.xml*: δείχνει το αρχείο δικτύου SUMO που πρόκειται να δημιουργηθεί
- *--osm.stop-output.length 20*: καθορίζει το μήκος των στάσεων σε μέτρα
- *--ptstop-output additional.xml*: δείχνει το αρχείο στάσεων των συγκοινωνιών που πρόκειται να δημιουργηθεί
- *--ptline-output ptlines.xml*: δείχνει ένα ενδιάμεσο αρχείο που καθορίζει τις γραμμές των δημόσιων συγκοινωνιών.

Η εύρεση ρεαλιστικών ωρών ταξιδιού σε στάση και η δημιουργία χρονοδιαγραμμάτων των συγκοινωνιών περιλαμβάνει:

- τον προσδιορισμό των ρεαλιστικών χρόνων ταξιδιού από στάση σε στάση, πραγματοποιώντας μία εκτέλεση προσομοίωσης με ένα όχημα για κάθε γραμμή
- το χρονοδιάγραμμα συγκοινωνιών για όλες τις γραμμές, το οποίο δημιουργείται από τις πληροφορίες χρόνου ταξιδιού από στάση σε στάση.

Οι χρόνοι μετάβασης από στάση σε στάση καθορίζονται σε ένα κενό δίκτυο. Χρησιμοποιείται το εργαλείο *ptlines2flows.py* μέσω της εντολής (2)

```
tools/ptlines2flows.py -n net.net.xml -s additional.xml -l ptnet.xml -o  
flows.rou.xml -p 600 (2)
```

όπου:

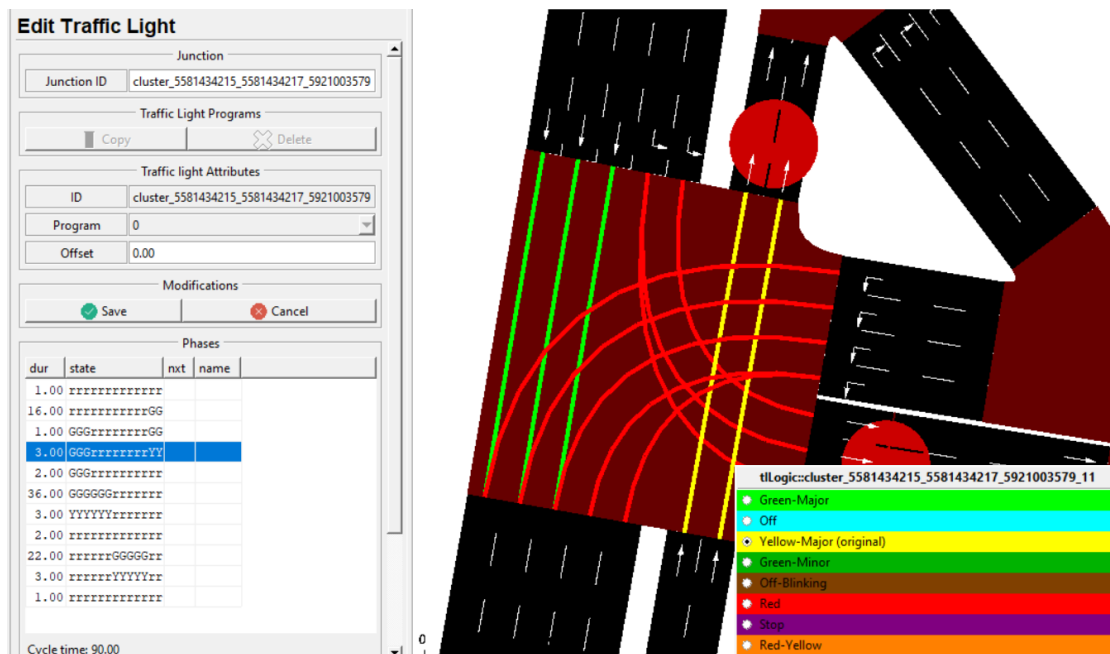
- *-n net.net.xml*: δείχνει το αρχείο δικτύου SUMO που δημιουργήθηκε από την εντολή (1)
- *-s additional.xml*: δείχνει το αρχείο στάσεων που δημιουργήθηκε από την εντολή (1)
- *-l ptnet.xml*: δείχνει το αρχείο που καθορίζει τις γραμμές και δημιουργήθηκε από την εντολή (1)
- *-o flows.rou.xml*: δείχνει το αρχείο *.rou.xml* το οποίο πρόκειται να παραχθεί μέσω της εντολής (2) και περιέχει τις διαδρομές των λεωφορείων
- *-p 600*: η περίοδος για τον πίνακα χρονοδιαγραμμάτων σε δευτερόλεπτα.

5.6 Σηματοδότηση

Για τη διαδικασία της σηματοδότησης αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4. Χρησιμοποιώντας τα σχέδια κόμβων με τα αντίστοιχα διαγράμματα σηματοδότησης, εισήχθησαν χειρωνακτικά φωτεινοί σηματοδότες σε **185 κόμβους** του δακτυλίου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5, αριστερά υπάρχει το παράθυρο εισόδου των δεδομένων. Εκεί αναγράφονται οι διάρκειες ενός διαγράμματος σηματοδότησης και επιλέγονται τα αντίστοιχα χρώματα για κάθε κίνηση, ανά διάρκεια, με βάση τους συμβολισμούς του Πίνακα 5.3. Στη βάση του παραθύρου αναγράφεται ο χρόνος κύκλου.

Πίνακας 5.3: Συμβολισμοί χρωμάτων σηματοδότησης στο SUMO.

Χαρακτήρας	Χρώμα στο SUMO	Περιγραφή
r		«κόκκινο φως» για ένα σήμα - τα οχήματα πρέπει να σταματούν
y		«κεχριμπάρι (κίτρινο) φως» για ένα σήμα - τα οχήματα θα αρχίσουν να επιβραδύνουν εάν είναι μακριά από τη διασταύρωση, διαφορετικά περνούν
g		«πράσινο φως» για σήμα, χωρίς προτεραιότητα - τα οχήματα μπορούν να περάσουν από τη διασταύρωση εάν κανένα όχημα δε χρησιμοποιεί ρεύμα υψηλότερης προτεραιότητας, διαφορετικά επιβραδύνει για να το αφήσει να περάσει. Πάντα επιβραδύνουν κατά προσέγγιση έως ότου είναι εντός της διαμορφωμένης απόστασης ορατότητας
G		«πράσινο φως» για σήμα, προτεραιότητα - τα οχήματα μπορούν να περάσουν από τη διασταύρωση
s		«πράσινο βέλος δεξιά στροφή» απαιτεί διακοπή - τα οχήματα ενδέχεται να περάσουν από τη διασταύρωση εάν κανένα όχημα δεν χρησιμοποιεί ρεύμα υψηλότερης προτεραιότητας. Σταματούν πάντα πριν περάσουν. Αυτό δημιουργείται μόνο για διασταύρωση τύπου <i>traffic_light_right_on_red</i> .
u		«κόκκινο + κίτρινο φως» για ένα σήμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει την επικείμενη πράσινη φάση, αλλά τα οχήματα ενδέχεται να μην οδηγούν ακόμη
o		«εκτός - αναβοσβήνει» είναι απενεργοποιημένο, το φως που αναβοσβήνει υποδηλώνει ότι τα οχήματα πρέπει να δώσουν προτεραιότητα
O		«εκτός- χωρίς σήμα» είναι απενεργοποιημένο, τα οχήματα έχουν το δικαίωμα για το πώς θα κινηθούν



Εικόνα 5.5: Είσοδος διαγράμματος σηματοδότησης, σε περιβάλλον SUMO.

5.7 Προσομοίωση

Ολοκληρώνοντας τις προαναφερθείσες διαδικασίες, δημιουργείται το αρχείο της προσομοίωσης *configuration.sumocfg*, της Εικόνας 5.6. Ως ορίσματα εισόδου τίθενται το αρχείο του δικτύου *Ath.net.xml*, τα αρχεία διαδρομών οχημάτων *Calibration_main.rou.xml* και διαδρομών λεωφορείων *flows.rou.xml*, καθώς επίσης και κάποια πρόσθετα αρχεία. Σε αυτά περιλαμβάνονται το αρχείο *inductionLoop.add.xml* προκειμένου να τοποθετηθούν φωρατές (detectors) στην αρχή κάθε λωρίδας συνδέσμου του δικτύου και να μετρηθεί η ροή (flow) σε οχήματα ανά ώρα και ανά λωρίδα καθώς και η κατάληψη (occupancy). Επιπλέον, το *meandata.add.xml* το οποίο περιέχει πληροφορίες μεταξύ άλλων και για την ταχύτητα (speed) σε μέτρα/δευτερόλεπτο, χρήσιμο για το διάγραμμα της μέσης ταχύτητας σε σχέση με το ποσοστό αυτόνομων οχημάτων. Επίσης, περιέχεται το *additional.add.xml* που έχει τις στάσεις των λεωφορείων. Επιπλέον, ορίζεται η χρονική στιγμή λήξης της προσομοίωσης, *end value*, ίση με

3900 δευτερόλεπτα, μία ώρα και πέντε λεπτά. Τα πέντε λεπτά αφορούν την προθέρμανση του δικτύου (warm up).

Συνολικά οι προσομειώσεις είναι δέκα, μία για κάθε ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων, ενώ πραγματοποιούνται δύο κύκλοι επαναλήψεων. Η Sumo εφαρμόζει τον αλγόριθμο Mersenne Twister για τη δημιουργία τυχαίων αριθμών. Αυτή η ρύθμιση καθιστά όλες τις εφαρμογές ντετερμινιστικές από προεπιλογή καθώς η ακολουθία τυχαίων αριθμών είναι σταθερή για μία δεδομένη τιμή *seed*. Η διαφοροποίηση των δύο κύκλων επαναλήψεων επιτυγχάνεται με τον ορισμό διαφορετικής τιμής *seed*. Στην πρώτη επανάληψη επιλέγεται η τιμή 1042 και στη δεύτερη η τιμή 1051.

Επιπροσθέτως, για την τοποθέτηση συσκευών *rerouting* στα οχήματα, μία ιδιότητα που προσφέρει τη δυνατότητα αλλαγής πορείας των οχημάτων όποτε αυτά συναντούν συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης, τέθηκε η επιλογή *device.rerouting.probability* ίση με 1000 ώστε να είναι βέβαιο πως όλα τα οχήματα θα την έχουν.

Τελευταίο όρισμα εξόδου επιλέχθηκε το *tripinfos*. Αυτό δίνει πληροφορίες ταξιδιού, μεταξύ άλλων, τη διάρκεια ταξιδιού *duration* και το μήκος διαδρομής *routeLength* που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του διαγράμματος χρόνου ταξιδιού ανά χιλιόμετρο σε σχέση με το ποσοστό αυτόνομων οχημάτων.

```

<configuration>↓
  <input>↓
    <net-file value="Ath.net.xml"/>↓
    <route-files value="Calibration_main.rou.xml,flows.rou.xml"/>↓
    <additional-files value="inductionLoop.add.xml,meandata.add.xml,additional.add.xml"/>↓
    <end value="3900"/>↓
  </input>↓
↓
  <randomnumber>↓
    <seed value="1042"/>↓
  </randomnumber>↓
↓
  <routing>↓
    <device.rerouting.probability value="1000"/>↓
  </routing>↓
↓
  <output>↓
    <tripinfo-output value="tripinfos.xml"/>↓
  </output>↓
</configuration>↓

```

Εικόνα 5.6: Αρχείο *.sumocfg* προσομοίωσης με τα ορίσματα εισόδου (input) και τα ορίσματα εξόδου (output).

5.8 Βάση Δεδομένων

Για την πραγματοποίηση των παραπάνω διαδικασιών, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα όπως αυτά αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Για τη βαθμονόμηση απομονώθηκαν οι μετρήσεις των 125 φωρατών της ώρας 08:00-09:00 π.μ. για τη φόρτιση του δικτύου την ημέρα 9 Μαΐου 2019, απόσπασμα των οποίων φαίνεται στην Εικόνα 5.7. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τιμές φόρτων από λογισμικό *Aimsun* σε επιπλέον 163 σημεία του δικτύου για την πληρέστερη φόρτισή του.

ΘΜ	Ημ/νία	08:00-09:00
200	09-May-19	4384
201	09-May-19	3214
205	09-May-19	4627
206	09-May-19	4223
207	09-May-19	1612

Εικόνα 5.7: Απόσπασμα επιθυμητών μετρήσεων φωρατών.

5.9 Αποτελέσματα

Αρχικά, επισημαίνεται πως το δίκτυο φορτίζεται με **65.000 οχήματα** περίπου, ανάλογα με το ποσοστό των αυτόνομων στην κυκλοφορία. Τα αρχεία *inductionLoop.add.xml* και *meandata.add.xml* της προσομοίωσης, δημιουργήθηκαν χειρωνακτικά και παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.8 και 5.9 αντίστοιχα. Το πρώτο περιέχει **53.596 σειρές** όσες και οι λωρίδες δικτύου. Αναγράφονται ως χαρακτηριστικά το όνομα του φωρατή *id*, το όνομα της λωρίδας στο δίκτυο στο SUMO *lane*, η απόσταση από την αρχή της λωρίδας στην οποία τοποθετείται ο φωρατής σε μέτρα *pos*, η συχνότητα μέτρησης των ζητούμενων μεγεθών σε δευτερόλεπτα *freq*, το όνομα του αρχείου που παράγεται μετά το πέρας της προσομοίωσης *file* και το χαρακτηριστικό *friendlyPos* το οποίο ορίζεται ώστε να μην αναφερθεί σφάλμα εάν ο ανιχνευτής τοποθετηθεί πίσω από τη λωρίδα. Αντ' αυτού, ο ανιχνευτής θα τοποθετηθεί 0,1 μέτρα από το άκρο της λωρίδας ή στη θέση 0,1, εάν η θέση ήταν αρνητική και μεγαλύτερη από το μήκος της λωρίδας μετά τον πολλαπλασιασμό με -1. Στο δεύτερο αρχείο, *meandata.add.xml*, αναγράφεται το όνομα του αρχικού αρχείου *id*, η συχνότητα μέτρησης των μεγεθών *freq* και το τελικό παραγόμενο αρχείο *file*.

```
<additional>↓
<inductionLoop id="det_1" lane="-100024311_0" pos="5" freq="300" file="detectors_to_Ath.xml" friendlyPos="true"/>↓
<inductionLoop id="det_2" lane="-100143641#0_0" pos="5" freq="300" file="detectors_to_Ath.xml" friendlyPos="true"/>↓
<inductionLoop id="det_3" lane="-100143641#1_0" pos="5" freq="300" file="detectors_to_Ath.xml" friendlyPos="true"/>↓
<inductionLoop id="det_4" lane="-100144605_0" pos="5" freq="300" file="detectors_to_Ath.xml" friendlyPos="true"/>↓
<inductionLoop id="det_5" lane="-100495278_0" pos="5" freq="300" file="detectors_to_Ath.xml" friendlyPos="true"/>↓
<inductionLoop id="det_6" lane="-100531610_0" pos="5" freq="300" file="detectors_to_Ath.xml" friendlyPos="true"/>↓
<inductionLoop id="det_7" lane="-100531612_0" pos="5" freq="300" file="detectors_to_Ath.xml" friendlyPos="true"/>↓
<inductionLoop id="det_8" lane="-100531621_0" pos="5" freq="300" file="detectors_to_Ath.xml" friendlyPos="true"/>↓
```

Εικόνα 5.8: Απόσπασμα αρχείου *inductionLoop.add.xml*.


```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>↓
↓
<additional>↓
<edgeData id="meandata" freq="300" file="C:\Users\Fay\Documents\Final\RUN1\DT0\MeanData.xml"/>↓
</additional>↓
```

Εικόνα 5.9: Αρχείο *meandata.add.xml*.

Στην Εικόνα 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται τα παραγόμενα αρχεία, μετά το πέρας της προσομοίωσης, των *inductionLoop.add.xml* και *meandata.add.xml* αντίστοιχα. Στο πρώτο, *detectors_to_Ath.xml*, τα χρήσιμα δεδομένα που προκύπτουν είναι η στιγμή έναρξης της κάθε μέτρησης *begin* και η χρονική στιγμή λήξης *end*, το όνομα του φωρατή *id*, η ροή σε οχήματα/ώρα/λωρίδα *flow* και η κατάληψη *occupancy*. Στο δεύτερο, *MeanData.xml*, χρήσιμη είναι η στήλη *speed* στην οποία αναγράφεται η ταχύτητα σε μέτρα/δευτερόλεπτο.

```
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21260" nVehContrib="29" flow="348.00" occupancy="3.35" speed="13.62" harmonicMeanSpeed="12.60" length="4.11" nVehEntered="29"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21261" nVehContrib="21" flow="252.00" occupancy="2.77" speed="14.28" harmonicMeanSpeed="11.99" length="4.15" nVehEntered="22"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21262" nVehContrib="1" flow="12.00" occupancy="0.48" speed="3.00" harmonicMeanSpeed="3.00" length="4.30" nVehEntered="1"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21263" nVehContrib="0" flow="0.00" occupancy="0.00" speed="-1.00" harmonicMeanSpeed="-1.00" length="-1.00" nVehEntered="0"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21264" nVehContrib="15" flow="180.00" occupancy="0.93" speed="17.87" harmonicMeanSpeed="17.54" length="3.43" nVehEntered="15"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21265" nVehContrib="3" flow="36.00" occupancy="0.50" speed="9.88" harmonicMeanSpeed="8.67" length="4.30" nVehEntered="3"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21266" nVehContrib="2" flow="24.00" occupancy="1.42" speed="1.43" harmonicMeanSpeed="1.41" length="3.15" nVehEntered="2"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21267" nVehContrib="2" flow="24.00" occupancy="0.22" speed="10.67" harmonicMeanSpeed="10.32" length="3.15" nVehEntered="2"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21268" nVehContrib="1" flow="12.00" occupancy="0.41" speed="5.74" harmonicMeanSpeed="5.74" length="7.10" nVehEntered="1"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21269" nVehContrib="0" flow="0.00" occupancy="0.00" speed="-1.00" harmonicMeanSpeed="-1.00" length="-1.00" nVehEntered="0"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21270" nVehContrib="0" flow="0.00" occupancy="0.00" speed="-1.00" harmonicMeanSpeed="-1.00" length="-1.00" nVehEntered="0"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21271" nVehContrib="0" flow="0.00" occupancy="0.00" speed="-1.00" harmonicMeanSpeed="-1.00" length="-1.00" nVehEntered="0"/>
<interval begin="300.00" end="600.00" id="det_21272" nVehContrib="4" flow="48.00" occupancy="0.38" speed="13.03" harmonicMeanSpeed="13.00" length="3.72" nVehEntered="4"/>
```

Εικόνα 5.10: Απόσπασμα αρχείου *detectors_to_Ath.xml*.

```
<edge id="100689382" sampledSeconds="17.20" traveltime="3.08" overlapTraveltime="3.48" density="1.38" laneDensity="1.38" occupancy="0.61" waitingTime="0.00" speed="13.33"
<edge id="100845092" sampledSeconds="13.45" traveltime="3.28" overlapTraveltime="3.88" density="2.35" laneDensity="2.35" occupancy="0.61" waitingTime="0.00" speed="5.65"
<edge id="100856295" sampledSeconds="58.86" traveltime="19.35" overlapTraveltime="19.62" density="0.76" laneDensity="0.76" occupancy="0.26" waitingTime="0.00" speed="13.31"
<edge id="100952854" sampledSeconds="0.00" departed="0" arrived="0" entered="0" left="0" laneChangedFrom="0" laneChangedTo="0"/>
<edge id="100956699" sampledSeconds="0.00" departed="0" arrived="0" entered="0" left="0" laneChangedFrom="0" laneChangedTo="0"/>
<edge id="100988757" sampledSeconds="22.13" traveltime="5.38" overlapTraveltime="5.54" density="0.78" laneDensity="0.78" occupancy="0.20" waitingTime="0.00" speed="17.61"
<edge id="101016063" sampledSeconds="0.00" departed="0" arrived="0" entered="0" left="0" laneChangedFrom="0" laneChangedTo="0"/>
<edge id="101259292" sampledSeconds="42.59" traveltime="42.65" overlapTraveltime="43.23" density="0.49" laneDensity="0.49" occupancy="0.21" waitingTime="0.00" speed="6.85"
<edge id="101259300" sampledSeconds="41.96" traveltime="56.43" overlapTraveltime="57.04" density="0.35" laneDensity="0.35" occupancy="0.15" waitingTime="0.00" speed="7.12"
<edge id="101259304" sampledSeconds="0.00" departed="0" arrived="0" entered="0" left="0" laneChangedFrom="0" laneChangedTo="0"/>
<edge id="101376643" sampledSeconds="20.74" traveltime="6.77" overlapTraveltime="7.52" density="1.38" laneDensity="1.38" occupancy="0.56" waitingTime="0.00" speed="7.22"
```

Εικόνα 5.11: Απόσπασμα αρχείου *MeanData.xml*.

Επιπροσθέτως, από το παραγόμενο αρχείο *tripinfos.xml* της Εικόνας 5.12, χρήσιμες είναι οι στήλες *duration* σε δευτερόλεπτα προσομοίωσης και *routeLength* σε μέτρα, ο λόγος των οποίων έδωσε το μέσο χρόνο ταξιδιού ανά χιλιόμετρο στο αντίστοιχο διάγραμμα. Στο αρχείο αυτό κάθε σειρά αναφέρεται σε ένα όχημα και περιλαμβάνονται όσα οχήματα ολοκλήρωσαν το ταξίδι τους, ο

αριθμός των οποίων διαφέρει ανά ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία αλλά και ανά επανάληψη.

```
arrivalPos="24.93" arrivalSpeed="18.35" duration="177.00" routeLength="2635.84" waitingTime="3.00" waiting
arrivalPos="24.93" arrivalSpeed="16.51" duration="188.00" routeLength="2633.54" waitingTime="0.00" waiting
19198_0" arrivalPos="243.84" arrivalSpeed="13.53" duration="169.00" routeLength="721.52" waitingTime="18.0
#0_0" arrivalPos="91.46" arrivalSpeed="16.27" duration="95.00" routeLength="985.32" waitingTime="25.00" wa
rrivalPos="55.29" arrivalSpeed="14.51" duration="208.00" routeLength="2454.08" waitingTime="24.00" waiting
_1" arrivalPos="187.31" arrivalSpeed="18.62" duration="189.00" routeLength="1967.41" waitingTime="39.00" w
" arrivalPos="4.80" arrivalSpeed="13.80" duration="141.00" routeLength="1454.28" waitingTime="16.00" waiti
0#0_2" arrivalPos="0.77" arrivalSpeed="8.20" duration="83.00" routeLength="945.16" waitingTime="0.00" wait
```

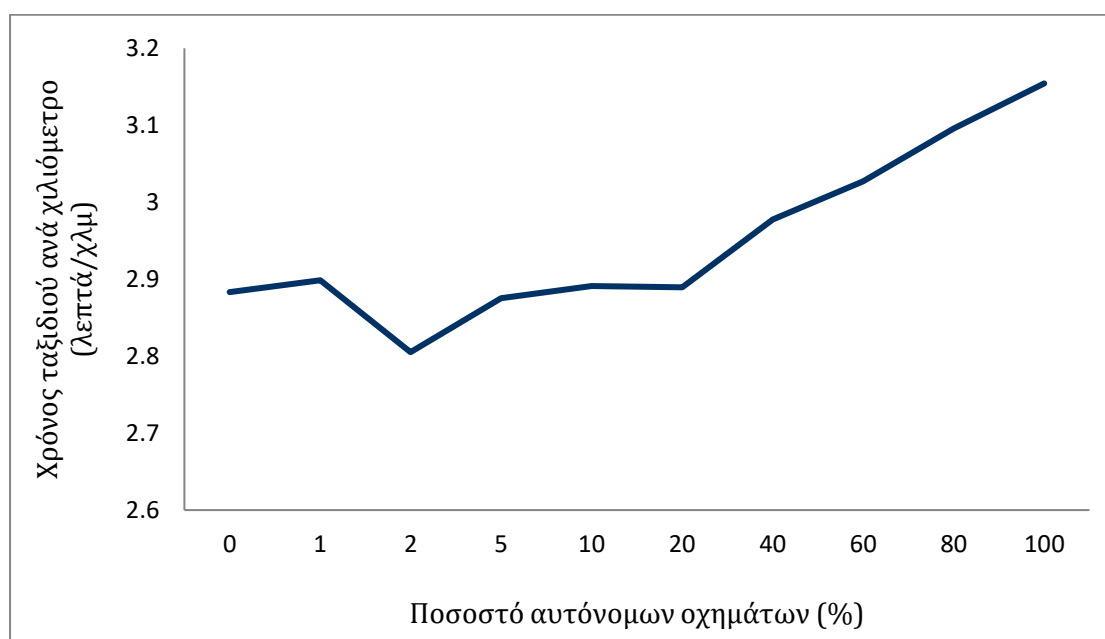
Εικόνα 5.12: Απόσπασμα αρχείου *tripinfos.xml*.

Η επεξεργασία των αρχείων *detectors_to_Ath.xml*, *MeanData.xml* και *tripinfos.xml* πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον *Python*. Με τον τρόπο αυτό διαβάστηκαν τα αρχεία *xml*, ενώ ανά περίπτωση έγιναν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

- *detectors_to_Ath.xml*: με συχνότητα πέντε λεπτών *freq="300"*, από τη χρονική στιγμή *begin="300"* έως *end="3900"*, υπολογίζεται η μέση τιμή της στήλης *flow* και της στήλης *occuarcy*. Με τον τρόπο αυτό παράγεται το Διάγραμμα 5.3. Στους υπολογισμούς δε συμπεριλαμβάνεται η προθέρμανση (*warm up*) διάρκειας πέντε λεπτών (300 δευτερόλεπτα), γι' αυτό και οι μετρήσεις ξεκινούν από το 300 και όχι από το 0. Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα του διαγράμματος προέκυψαν από ένα μικρό τμήμα του δικτύου που περιλαμβάνει την Πλατεία Ομονοίας και την 3^η Σεπτεμβρίου μέχρι το ύψος της οδού Μάρνης. Αυτό έγινε καθώς, παρά τα 288 συνολικά σημεία βαθμονόμησης κυκλοφοριακού φόρτου, δεν ήταν ομοιόμορφη η φόρτιση του δικτύου σε όλα τα σημεία του.

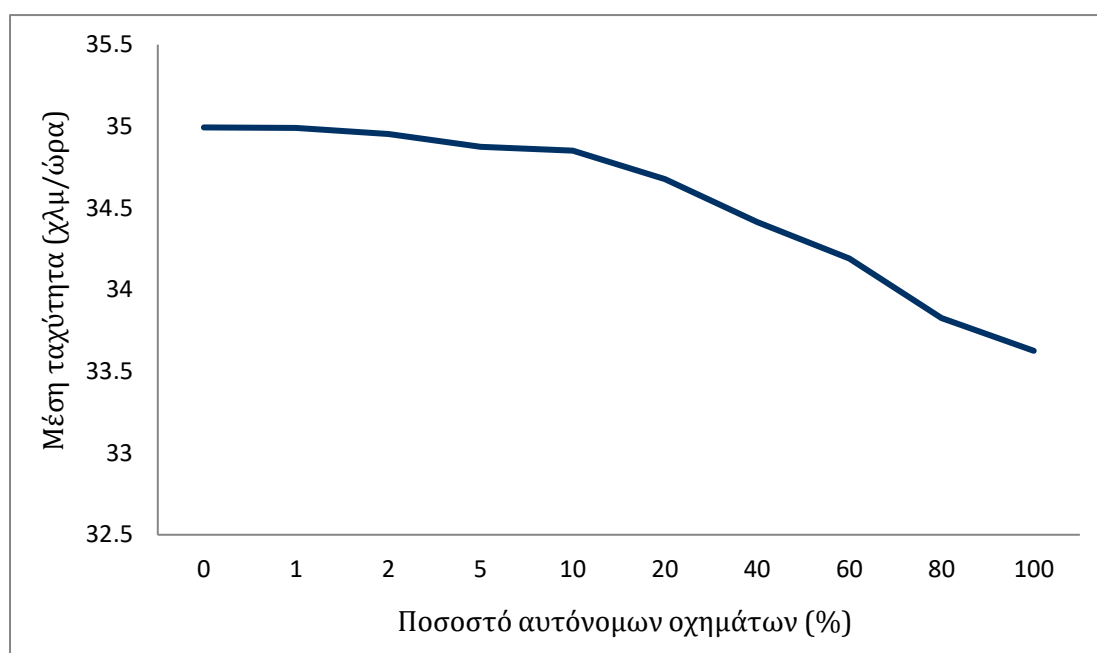
- *MeanData.xml*: υπολογίζεται η μέση τιμή της στήλης της ταχύτητας *speed* για τα χρονικά βήματα 300 έως 3900 δευτερόλεπτα και γίνεται η μετατροπή της από μέτρα/δευτερόλεπτο σε χιλιόμετρα/ώρα, για κάθε ποσοστό αυτόνομων οχημάτων, οπότε και παράγεται μία καμπύλη για όλα τα ποσοστά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.2.
- *tripinfos.xml*: υπολογίζεται ο λόγος της στήλης διάρκειας ταξιδιού σε δευτερόλεπτα *duration* προς τη στήλη μήκους διαδρομής *routeLength* σε μέτρα καθώς και μέση τιμή του, ενώ γίνεται μετατροπή από δευτερόλεπτα/μέτρο σε λεπτά/χιλιόμετρο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 5.1.

Στο Διάγραμμα 5.1. φαίνεται ότι ο χρόνος ταξιδιού ανά χιλιόμετρο αυξάνεται μέχρι το 1 % των αυτόνομων, ενώ για μικρή αύξηση αυτών, στο 2 %, εμφανίζεται μείωση. Αυτό δηλώνει την επιρροή του μοντέλου ACC, μέσω της παραμέτρου του για διατήρηση της επιθυμητής ταχύτητας. Ωστόσο, λόγω των μεγαλύτερων χρόνων αντίδρασης τ_{au} των αυτόνομων σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, σε υψηλότερα ποσοστά αυτόνομων, ο χρόνος ταξιδιού ανά χιλιόμετρο συνεχώς αυξάνεται.



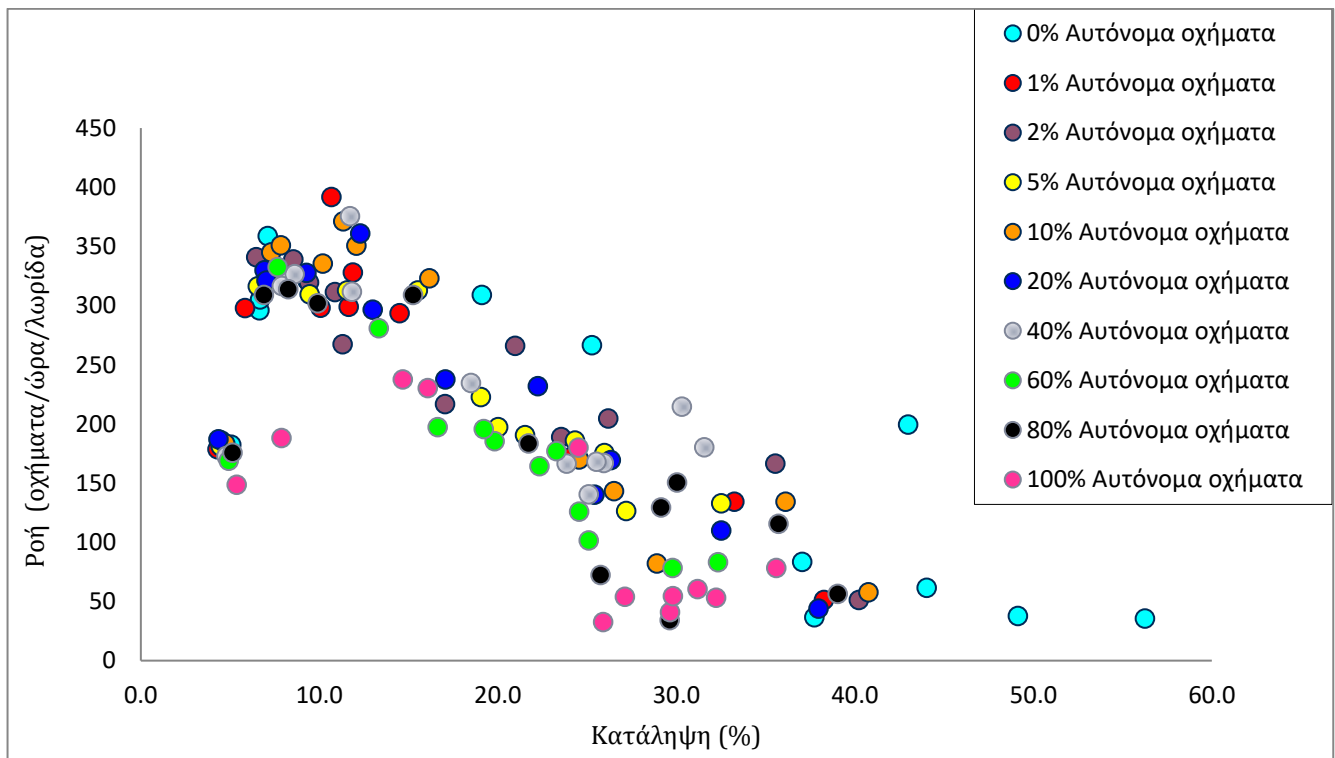
Διάγραμμα 5.1: Χρόνος ταξιδιού ανά χιλιόμετρο σε σχέση με το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.

Στο Διάγραμμα 5.2 φαίνεται πως η μέση ταχύτητα των οχημάτων μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού των αυτόνομων στην κυκλοφορία. Αυτό ανταποκρίνεται στο προφίλ του οδηγού με βάση το οποίο επιλέχθηκαν οι τιμές των κυκλοφοριακών παραμέτρων των αυτόνομων οχημάτων, οι οποίες παρουσιάστηκαν αναλυτικά στον Πίνακα 5.2 και είναι αυτό του μετριοπαθούς οδηγού (moderate). Το μοντέλο ACC, λόγω των παραμέτρων ελέγχου κενού μεταξύ των οχημάτων, οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας για λόγους ασφαλείας.



Διάγραμμα 5.2: Μέση ταχύτητα σε σχέση με το ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.

Στο διάγραμμα αναπαράστασης του ρυθμού ροής σε σχέση με την κατάληψη, φαίνεται πως στην αρχή της ώρας αιχμής το δίκτυο εμφανίζει μικρές τιμές κατάληψης και ροής, σε όλα τα ποσοστά αυτόνομων οχημάτων, αφού στην αρχή το δίκτυο έχει μία δεδομένη εξυπηρέτηση. Η μέγιστη τιμή ροής εμφανίζεται για ποσοστό αυτόνομων 1 % στα 400 οχήματα/ώρα/λωρίδα, όταν η κατάληψη βρίσκεται στο 10 %, ενώ η χαμηλότερη τιμή ροής εμφανίζεται στο 100 % των αυτόνομων. Σημειώνεται αύξηση 9,2 % της μέγιστης ροής από 0 % σε 1 % αυτόνομα οχήματα και μείωση 33,7 % από 0 % σε 100 % αυτόνομα οχήματα. Το γεγονός ότι η μέγιστη τιμή ροής αφορά μικρό ποσοστό αυτόνομων στην κυκλοφορία, οφείλεται στο ότι με την αύξηση των αυτόνομων αυξάνονται τα οχήματα τα οποία έχουν μεγαλύτερους χρόνους αντίδρασης *tau*, δεδομένου ότι η τιμή της παραμέτρου *tau* είναι 1,6 ένταντι 1,0 των συμβατικών οχημάτων. Οι μέγιστες τιμές κατάληψης αφορούν το 0 % των αυτόνομων και εμφανίζονται στο πέρας της ώρας αιχμής, με τιμή που πλησιάζει το 60 %.



Διάγραμμα 5.3: Σχέση ροής και κατάληψης για διαφορετικά ποσοστά αυτόνομων οχημάτων.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Εισαγωγή

Η αυτόνομη διαχείριση της κυκλοφορίας αποτελεί τομέα μείζονος σημασίας για τη μελέτη βελτίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών. Τα αυτόνομα οχήματα παρέχουν δυνατότητες, οι οποίες έχουν προοπτική μελέτης και εξέλιξης. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, αντικείμενο αποτελεί **η διερεύνηση επιρροής των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.**

Λήφθηκαν δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων και σηματοδότησης για την προετοιμασία του δικτύου της Αθήνας, που επιλέχθηκε, σε περιβάλλον SUMO. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η προσομοίωση με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά και τέλος χρησιμοποιήθηκαν τα παράγωγά της, με επεξεργασία των οποίων προέκυψαν τα διαγράμματα ροής σε σχέση με την κατάληψη, μέσης ταχύτητας και χρόνου ταξιδιού ανά χιλιόμετρο σε σχέση με το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.

6.2 Βασικά Συμπεράσματα

Με την αύξηση των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, **αυξάνεται ο χρόνος ταξιδιού ανά χιλιόμετρο.** Αντίστοιχα, **μειώνεται η μέση ταχύτητα ταξιδιού**, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην επιλογή παραμέτρων προσομοίωσης μετριοπαθούς οδηγού (moderate). Συνολικά, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των σεναρίων προκύπτει ότι τα αυτόνομα οχήματα προκαλούν καθυστερήσεις στο δίκτυο, οι οποίες εμφανίζονται με αυξανόμενο

ρυθμό, απότομη κλίση στο διάγραμμα, όταν αυτά βρίσκονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20 %.

Αντίστοιχα, στα διαγράμματα ροής σε σχέση με την κατάληψη, προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή ροής εμφανίζεται για ποσοστό αυτόνομων 1 %, όταν η κατάληψη βρίσκεται στο 10 %, ενώ η χαμηλότερη τιμή ροής εμφανίζεται στο 100 % των αυτόνομων. Η μέγιστη τιμή ροής αφορά μικρό ποσοστό αυτόνομων στην κυκλοφορία, γεγονός που οφείλεται στο ότι με την αύξηση των αυτόνομων αυξάνονται τα οχήματα τα οποία έχουν μεγαλύτερους χρόνους αντίδρασης. Οι μέγιστες τιμές κατάληψης αφορούν το 0 % των αυτόνομων και εμφανίζονται στο πέρας της ώρας αιχμής.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για τη βαθύτερη διερεύνηση του αντικειμένου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, τα παρακάτω αποτελούν σημαντικά σημεία:

Φόρτιση του δικτύου με περισσότερα κυκλοφοριακά δεδομένα

Με την πληρέστερη φόρτιση του δικτύου, το δίκτυο καθίσταται πιο ρεαλιστικό προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα κυρίως αναφορικά με τη ροή των οχημάτων και την κατάληψή τους σε σημεία της οδού. Πιο συγκεκριμένα, η εύρεση δεδομένων σε κόμβους θα ήταν εξαιρετικά αποτελεσματική, καθώς οδηγεί σε πιο ομοιόμορφη κατανομή του φόρτου στο δίκτυο.

Διερεύνηση επιρροής σε περιόδους εκτός αιχμής

Η διερεύνηση ενός δικτύου σε ώρες αιχμής, οδηγεί σε συμπεράσματα από τη μία πλευρά υπέρ της ασφαλείας καθώς λαμβάνεται υπόψη η δυσμενέστερη συνθήκη του δικτύου και από την άλλη σε λιγότερο ευέλικτα αποτελέσματα. Συνεπώς, ιδιαίτερα χρήσιμη καθίσταται η διερεύνηση της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων σε ώρες της ημέρας που δεν αποτελούν αιχμή.

Διερεύνηση διαφορετικών οδηγικών προφίλ

Ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη του επιθετικού και του συμβατικού οδηγού, εκτός του μετριοπαθούς που διερευνήθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Πιθανώς στην περίπτωση του επιθετικού οδηγού, τα αυτόνομα οχήματα να παρουσίαζαν ευνοϊκότερη επιρροή καθώς το συγκεκριμένο προφίλ αφορά σε μικρότερους χρονικούς και χωρικούς διαχωρισμούς.

Διερεύνηση επιρροής ride-sharing και βαθμού χρησιμοποίησης αυτόνομων οχημάτων

Με την αύξηση του ride-sharing και του βαθμού χρησιμοποίησης των οχημάτων, τα ήδη υπάρχοντα οχήματα μπορούν να αναπληρώνουν διαρκώς τις ανάγκες για μετακίνηση, χωρίς να χρειάζεται η προσθήκη νέων οχημάτων, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στη μείωση του κορεσμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andreas, S., Ina, S., Jan Becker, C., Walter, S., 2000. Navigation and control of an autonomous vehicle. IFAC Proc. Volumes 33 (9), 449–458.
- Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., Krajzewicz, D.: Sumo – simulation of urban mobility: An overview. In: Proc. Int. Conf. on Advances in System Simulation, pp. 63–68 (2011).
- Bohrer, S., Zielke, T., Freiburg, V., 1995. An integrated obstacle detection framework for intelligent cruise control on motorways, In: Proceedings of the Intelligent Vehicles '95. Symposium, Detroit, MI, USA, 276–281.
- Bose, Arnab, Ioannou, Petros, 2003. Analysis of traffic flow with mixed manual and semiautomated vehicles. IEEE Trans. Intel. Transport. Syst. 4, 173–188.
- Chiabaut, N., Leclercq, L., Buisson, C., 2010. From heterogeneous drivers to macroscopic patterns in congestion. Transport. Res. Part B: Methodol. 44 (2), 299–308.
- ElHamdani, S., & Benamar, N. (2018). Autonomous traffic management: Open issues and new directions. 2018 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT) (pp. 1–5).
- Friedrich, B. 2016. “The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic.” In: Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H. (eds) Autonomous Driving, 317–334. Berlin Heidelberg: Springer.
- Gazis, D.C., Herman, R., Potts, R.B., 1959. Car-following theory of steady-state traffic flow. Oper. Res. 7 (4), 499–505.
- Gazis, D.C., Herman, R., Rothery, R.W., 1961. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. Oper. Res. 9 (4), 545–567.
- Geodata.gov.gr - Δρομολόγια Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας
<https://geodata.gov.gr/dataset/oasa> (8 Απριλίου, 2020)
- Gipps, P.G., 1981. A behavioural car-following model for computer simulation. Transport. Res. Part B: Methodol. 15 (2), 105–111.
- Härri, J.: Vehicular Mobility Modeling for VANET, pp. 107–156 (2009).

Helly, W., 1959. Simulation of bottlenecks in single-lane traffic flow. In: Proceedings of Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors, New York, 207–238.

INSIGHTSIAS - Insights into Issues: Autonomous Vehicle Technology
<https://www.insightsonindia.com/2016/11/30/insights-issues-autonomous-vehicle-technology/> (5 Μαΐου, 2020)

Kato, S., Tsugawa, S., 2001. Cooperative driving of autonomous vehicles based on localization, inter-vehicle communications and vision systems. JSAE Rev. 22 (4), 503–509.

Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., Helbing, D., 2008. Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. Transport. Res. Part C: Emerg. Technol. 16 (6), 668–683.

Krauss, S., 1998. Microscopic modeling of traffic flow: investigation of collision free vehicle dynamics. PhD thesis. Mathematical Institute, Universität zu Köln.

Le Vine, S., Kong, Y., Liu, X., Polak, J., 2017. Vehicle automation and freeway 'pipeline' capacity in the context of legal standards of care. Transportation.

Le Vine, S., Liu, X., Zheng, F., Polak, J., 2016. Automated cars: queue discharge at signalized intersections with 'Assured-Clear-Distance-Ahead' driving strategies. Transport. Res. Part C: Emerg. Technol. 62, 35–54.

Li, T., Guo, F., Krishnan, R., Sivakumar, A., Polak, J. (2020). Right-of-way reallocation for mixed flow of autonomous vehicles and human driven vehicles. Transportation Research Part C: Emerging Technologies

Liu, H., Kan, X.D., Shladover, S.E., Lu, X.Y., Ferlis, R.E., 2018. Modeling impacts of cooperative adaptive cruise control on mixed traffic flow in multi-lane freeway facilities. Transport. Res. Part C: Emerg. Technol. 95, 261–279.

Liu, H., Kan, X., Wei, D., Chou, F.-C., Shladover, S. E., & Lu, X.-Y. (2018). Using Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) to Form High-Performance Vehicle Streams - Microscopic Traffic Modeling (FHWA Exploratory Advanced Research Program No. Cooperative Agreement No. DTFH61-13-H-00013). University of California, Berkeley: California PATH Program.

Lu, Q., & Tettamanti, T. (2018). Impacts of autonomous vehicles on the urban fundamental diagram. Road and Rail Infrastructure V, (pp. 1265-1271). Zadar, Croatia.

Lu, Q., Tettamanti, T., Hörcher, D. and Varga, I. (2019). The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. Transportation Letters, pp.1-10.

Makridis M, Mattas K, Ciuffo B, Raposo MA, Toledo T, Thiel C (2018) Connected and automated vehicles on a freeway scenario. Effect on traffic congestion and network capacity. 7th Transport Research Arena.

Milanés, V. , and Shladover, S. E. . Modeling Cooperative and Autonomous Adaptive Cruise Control Dynamic Responses Using Experimental Data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 48, 2014, pp. 285–300.

Mintsis, E., Koutras, D., Porfyri, K., Mitsakis, E., Luecken, L., Erdmann, J., . . . Boerma, S. (2019, 09 06). TransAID Deliverable 3.1 - Modelling, simulation and assessment of vehicle automations and automated vehicles' driver behaviour in mixed traffic. Retrieved 01 31, 2020

Newell, G.F., 2002. A simplified car-following theory: a lower order model. Transport. Res. Part B: Methodol. 36 (3), 195–205.

Nowakowski, C. , Shladover, S. E. , Cody, D. , Bu, F. , O'Connell, J. , Spring, J. , Dickey, S. , and Nelson, D. Cooperative Adaptive Cruise Control: Testing Drivers' Choices of Following Distances. Research Report UCB-ITS-PRR-2011-01. PATH, University of California, 2011.

Olia, A., S. Razavi, B. Abdulhai, and H. Abdelgawad. 2018. “Traffic Capacity Implications of Automated Vehicles Mixed with Regular Vehicles.” Journal of Intelligent Transportation Systems 22 (3): 244–262.

OpenStreetMap Wiki - Key:highway

<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway> (19 Δεκεμβρίου, 2019)

overpass turbo <https://overpass-turbo.eu/> (19 Δεκεμβρίου, 2019)

Pipe L. 1953 An Operational Analysis of Traffic Dynamics. Journal of Applied Physics 24, 274– 281.

Porfyri, K. N., Mintsis, E., & Mitsakis, E. (2018). Assessment of ACC and CACC systems using SUMO. In E. Wiessner, L. Lücken, R. Hilbrich, Y.-P. Flötteröd, J. Erdmann, L. BiekerWalz, & M. Behrisch (Hrsg.), SUMO 2018- Simulating Autonomous and Intermodal Transport Systems. 2, S. 82-93. EasyChair.

Rajamani, R., Shladover, S.E., 2001. An experimental comparative study of autonomous and co-operative vehicle-follower control systems. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 9 (1), 15–31.

Reuschel, A., 1950. Vehicle movements in a platoon. Oesterreichisches Ingenieur-Archiv 4, 193–215.

Robert Hilbrich. SUMO Simulation of Urban Mobility. Accessed January 31, 2020. URL: https://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/.

SAE. (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. Standard J3016: SAE International.

Skabardonis, A. (2020). Traffic management strategies for urban networks: smart city mobility technologies. In Transportation, Land Use, and Environmental Planning (pp. 207-216).

SUMO User Documentation <https://sumo.dlr.de/docs/index.html> (31 Μαΐου, 2020)

Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. Phys. Rev. E 62 (2), (pp. 1805-1824).

Wagner, P. (2016). Traffic Control and Traffic Management in a Transportation System with Autonomous Vehicles. In M. G. Maurer, Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects (pp. 301-316). Heidelberg, Berlin: Springer, Berlin.

Xiao, L., Wang, M., & van Arem, B. (2017). Realistic Car-Following Models for Microscopic Simulation of Adaptive and Cooperative Adaptive Cruise Control Vehicles. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2623, 1–9.