



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ



Διπλωματική Εργασία :

Διερεύνηση της Επιρροής των Συνδεδεμένων και Αυτόνομων Οχημάτων στα Αστικά Οδικά Δίκτυα

ΝΙΚΑΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ

Επιβλέπουσα: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Βλαχογιάννη Ελένη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και την πολύτιμη καθοδήγηση, υποστήριξη αλλά και άριστη συνεργασία σε όλα τα στάδια εκπόνησης της.

Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Χάρη Χαλκιαδάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., ο οποίος από την πρώτη στιγμή μου παρείχε παραγωγικές υποδείξεις, αφιέρωσε πολύτιμο χρόνο και διαμόρφωσε πολύ καλό κλίμα συνεργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου, οι οποίοι με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Λεωνίδας Νίκας



## Διερεύνηση της επιρροής των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στα αστικά οδικά δίκτυα

Λεωνίδας Νίκας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη

### ΣΥΝΟΨΗ

---

Τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα αποτελούν ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι των μελλοντικών έξυπνων οδικών δικτύων. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής από την ενσωμάτωση των συνδεδεμένων και των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία σε αστικά οδικά δίκτυα. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε μικροσκοπική προσομοίωση δεκαέξι σεναρίων μελλοντικής κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο του δακτυλίου της Αθήνας, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς το ποσοστό διείσδυσης τέτοιων οχημάτων στην κυκλοφορία. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ενσωμάτωση συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία βελτιώνει τις συνθήκες της κυκλοφορίας σε οποιοδήποτε ποσοστό διείσδυσης τους στην κυκλοφορία. Η ενσωμάτωση αυτόνομων οχημάτων δεν οδηγεί σε κάποια σημαντική βελτίωση της κυκλοφορίας, ενώ σε μεγάλα ποσοστά διείσδυσής τους στην κυκλοφορία, τα οχήματα αυτά τείνουν να απορρυθμίσουν το δίκτυο.

**Λέξεις Κλειδιά:** συνδεδεμένα οχήματα, αυτόνομα οχήματα, μικροσκοπική προσομοίωση, θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής



# Investigation of the impact of connected and autonomous vehicles on urban road networks

Leonidas Nikas

Supervising Professor: Eleni I. Vlahogianni

## ABSTRACT

---

Connected and autonomous vehicles are a particularly important part of future smart road networks. The purpose of this diploma thesis is to investigate the influence of the integration of connected and autonomous vehicles into traffic on urban road networks. For this reason, a microscopic simulation of sixteen scenarios of future traffic on the road network of the Athens was carried out, which differ in the rate of penetration of such vehicles into traffic. The SUMO microscopic simulation software was used for the simulation. Findings reveal that the integration of connected vehicles into traffic improves traffic conditions at any rate of their penetration into traffic. The integration of autonomous vehicles does not lead to any significant improvement in traffic, while in large percentages of their penetration into traffic, these vehicles tend to deregulate the network.

**Keywords:** connected vehicles, autonomous vehicles, microscopic simulation, fundamental diagrams of traffic flow





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας στις συγκοινωνίες καθιστά εφικτή την εισαγωγή νέων μορφών κινητικότητας, όπως αποτελεί το αυτόνομο και το συνδεδεμένο όχημα. Ανάλογα με το επίπεδο αυτοματισμού, το αυτόνομο και το συνδεδεμένο όχημα παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου της κίνησης του οχήματος, απαλλάσσοντας τον οδηγό. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι να ερευνήσει το αντίκτυπο της επίδρασης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στα αστικά οδικά δίκτυα και συγκεκριμένα στον δακτύλιο της Αθήνας. Συγκεκριμένα διερευνάται η μεταβολή κυκλοφοριακών παραμέτρων, όταν τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα τεθούν σε διαφορετικά ποσοστά στη σύνθεση της κυκλοφορίας.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε τις παραμέτρους οι οποίες αντανακλούν την επιρροή των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία. Καταγράφεται η μεθοδολογία δημιουργίας των θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής τεχνικής καθώς και τα πρότυπα με τα οποία αναπαρίσταται η κίνηση των συμβατικών, των αυτόνομων και των συνδεδεμένων οχημάτων σε μία μικροσκοπική προσομοίωση. Καταγράφηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών, τα οποία οδήγησαν στην επιλογή των προτύπων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Με τον τρόπο αυτό επιλέχθηκε το πρότυπο ακολουθούντος οχήματος του Krauss για τα συμβατικά οχήματα, το πρότυπο του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (ACC) για τα αυτόνομα οχήματα και του Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (CACC) για τα συνδεδεμένα οχήματα.

Για την πραγματοποίηση της μικροσκοπικής προσομοίωσης επιλέχθηκε το λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης ανοικτού κώδικα Προσομοίωση Αστικής Κινητικότητας (Sumo) . Εκεί εισήχθη το δίκτυο του δακτυλίου της Αθήνας. Στη συνέχεια έγινε συλλογή των κυκλοφοριακών φόρτων από μετρήσεις, οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν από φωρατές που ήταν τοποθετημένοι στην περιοχή του δακτυλίου της Αθήνας. Επόμενο βήμα για την προετοιμασία του δικτύου αποτέλεσε η σηματοδότηση. Αφού εισήχθησαν όλα αυτά τα δεδομένα στο SUMO, αυτό έχει τη δυνατότητα να αντλεί στοιχεία του αρχικού δικτύου και να δημιουργεί ταξίδια από στάση σε στάση καθώς και τα χρονοδιαγράμματα δρομολογίων.

Ακολούθησε η κωδικοποίηση και προσομοίωση των σεναρίων για τα συνδεδεμένα και τα αυτόνομα οχήματα. Από τα αποτελέσματα που παράχθηκαν από την προσομοίωση, δημιουργήθηκαν τα θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής τεχνικής σε προγραμματιστικό περιβάλλον R για κάθε ένα σενάριο μελλοντικής κυκλοφορίας. Κάνοντας ανάλυση των διαγραμμάτων αυτών αναδείχθηκε η επιρροής των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων σε σχέση με τα διαφορετικά ποσοστά αυτών στη σύνθεση της κυκλοφορίας. Τα ποσοστά διείσδυσης τους στην κυκλοφορία ήταν 10%, 20%, 30%, 70% και 100% και για τα συνδεδεμένα και για τα αυτόνομα οχήματα.

Τα αποτελέσματα των σεναρίων διαφορετικών ποσοστών συνδεδεμένων οχημάτων δείχνουν ότι τα συνδεδεμένα οχήματα βελτιώνουν την κυκλοφοριακή ροή σε όλα τα ποσοστά διείσδυσής τους και η βελτίωση κορυφώνεται για ποσοστά διείσδυσης 20%. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η ενσωμάτωση των συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία τείνει να βελτιώσει την απόδοσή του. Επίσης, βελτιώνουν την κυκλοφοριακή ροή όταν δημιουργούνται φάλαγγες άνω των 6 οχημάτων. Τα αποτελέσματα των σεναρίων διαφορετικών ποσοστών αυτόνομων οχημάτων δείχνουν ότι τα αυτόνομα οχήματα δεν επιτυγχάνουν σημαντικά καλύτερη κυκλοφοριακή ροή σε όλα τα ποσοστά διείσδυσής τους στην κυκλοφορία και συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν οι βέλτιστες συνθήκες για ποσοστό διείσδυσης 20%. Τα αποτελέσματα αυτά ενδεχομένως να οφείλονται στο γεγονός ότι το δίκτυο είναι κορεσμένο σε αρκετά σημεία. Η ενσωμάτωση στην κυκλοφορία ταυτόχρονα συνδεδεμένων οχημάτων και αυτόνομων οχημάτων οδηγεί σε βελτίωση στην απόδοση του δικτύου με ποσοστό διείσδυσης έως και 30%. Για μεγαλύτερα ποσοστά δεν παρουσιάζεται βελτίωση του δικτύου.

Ολοκληρώνοντας τη διερεύνηση, προέκυψαν οι περιορισμοί αυτής αλλά και ενδιαφέροντα σημεία για περαιτέρω έρευνα. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διερεύνηση της επιρροής συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων σε αστικά οδικά δίκτυα χωρίς σηματοδότηση, ώστε να μην διακόπτεται η δημιουργία φάλαγγας στα συνδεδεμένα οχήματα.

<b>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
1.1 Η σημασία .....	1
1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	3
1.3 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας.....	3
<b>2.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	5
2.1 Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών.....	5
2.2 Το Συνδεδεμένο Όχημα.....	6
2.3 Το Αυτόνομο Όχημα.....	8
2.4 Προσομοίωση Συνδεδεμένων/Αυτόνομων οχημάτων και επιπτώσεις της ενσωμάτωσής τους στα Αστικά Οδικά Δίκτυα .....	10
2.5 Μακροσκοπικά Κυκλοφοριακά Πρότυπα Συνδεδεμένων, Αυτόνομων και Συμβατικών Οχημάτων .....	14
2.6 Συμπεράσματα Βιβλιογραφίας .....	16
<b>3.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ</b> .....	18
3.1 Περιγραφή της διαδικασίας .....	18
3.2 Μικροσκοπική Προσομοίωση.....	18
3.3 Δημιουργία Σεναρίων Προσομοίωσης.....	19
3.4 Μετρικές Απόδοσης Οδικού Δικτύου .....	20
3.5 Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	21
3.5.1 Μικροσκοπικά Πρότυπα Ροής.....	21
3.5.2 Πρότυπα Ακολουθούντων Οχημάτων .....	22
3.6 Θεμελιώδη Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ροής .....	27
<b>4.Ανάπτυξη Μικροσκοπικής Προσομοίωσης Κυκλοφορίας</b> .....	32
4.1 Συλλογή Δεδομένων και Κατάστρωση Προτύπου .....	32

4.1.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Δικτύου, Φόρτοι και Σηματοδότηση .....	32
4.1.2 Κωδικοποίηση Δικτύου .....	32
4.1.3 Παραμετροποίηση Κυκλοφοριακών Προτύπων .....	34
4.2 Δημιουργία Αρχείου Προσομοίωσης .....	36
<b>5.ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>39</b>
5.1 Μεθοδολογία Κυκλοφοριακής Ανάλυσης.....	39
5.2 Αποτελέσματα Κυκλοφοριακής Ανάλυσης.....	40
<b>6.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>47</b>
6.1 Σύνοψη Μεθοδολογικής Προσέγγισης .....	47
6.2 Βασικά Συμπεράσματα.....	47
6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	48
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>50</b>

## Ευρετήριο Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΕΠΙΡΡΟΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (PATERLINI, 2020) .....	2
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΕΥΡΟΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ (ΠΗΓΗ: PATERLINI, 2020).....	8
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ ( ΠΗΓΗ: HAMDANI & BENAMAR,2018).....	9
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΡΕΙΑΣ (ΠΗΓΗ: WWW.INSIGHTSONINDIA.COM, 2000) .....	15
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΦΑΛΑΓΓΑ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΡΕΙΑΣ (ΠΗΓΗ: PATERLINI, 2020) .....	26
ΕΙΚΟΝΑ 6 : ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GOOGLE-MAPS.....	33
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ( SUMO ).....	33
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ ROU.XML, VTYPEDISTRIBUTION .....	35
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	36
ΕΙΚΟΝΑ 10 : ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ ROU.XML.....	37
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ ADD.XML.....	37
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ MEANDATA.XML.....	38
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΡΧΕΙΟΥ ΣΤΟ RSTUDIO ΚΑΙ ΕΚΚΑΘΑΡΙΣΗ ΤΟΥ .....	39
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΜΗΤΡΩΟ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ .....	40

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	4
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΩΡΙΔΑΣ ΓΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ (ΠΗΓΗ: SHLADOVER ET AL., 2012) .....	12
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΧΡΟΝΟΣ ΤΑΞΙΔΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (ΠΗΓΗ:RIOS-TORRES ΚΑΙ ΜΑΛΙΚΟΡΟΥΛΟΣ 2018) .....	13
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ .....	18
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΓΕΝΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΟΥΝΤΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ (ΠΗΓΗ : CHENG ET AL, 2020) .....	22
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ (ΠΗΓΗ: ΦΡΑΝΤΖΕΣΚΑΚΗΣ, ΓΚΟΛΙΑΣ, ΠΙΤΣΙΑΒΑ-ΛΑΤΙΝΟΠΟΥΛΟΥ, (2009), ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ) .....	27
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΟΥ ΦΟΡΤΟΥ ΡΟΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ) .....	41
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8:ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΟΥ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ, ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ) .....	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΟΥ-ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (ΑΥΤΟΝΟΜΑ).....	43
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10:ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΟΥ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ, ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (ΑΥΤΟΝΟΜΑ) .....	44
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11:ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΟΥ-ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ-ΑΥΤΟΝΟΜΑ) .....	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12:ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΟΥ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ, ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ-ΑΥΤΟΝΟΜΑ) .....	45

## Ευρετήριο Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ .....	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΡΑUSS .....	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ CACC .....	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ACC .....	35





---

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Η Σημασία

Ο πληθυσμός παγκοσμίως ανέρχεται στα 7,8 δισεκατομμύρια και τα Ενωμένα Έθνη υπολογίζουν ραγδαία αύξηση έως το 2050 στα 10 δισεκατομμύρια (United Nations, 2019). Ο ρυθμός ανάπτυξης των μητροπόλεων κάθε χώρας θα είναι γρήγορος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι ανάγκες των πολιτών για ασφαλή και γρήγορη μετακίνηση. Στην Ελλάδα την τελευταία δεκαετία κυκλοφορούν κάθε χρόνο 1,8 περισσότερα επιβατικά οχήματα. Ωστόσο, οι κυκλοφοριακές υποδομές παραμένουν ίδιες. Οι εξελίξεις αυτές ενισχύουν την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων (smart cities) και των Ευφυών Συστημάτων Μεταφοράς (ITS) και Συνεργατικών Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών (C-ITS), προκειμένου οι πόλεις να παραμείνουν βιώσιμες.

Οι μεταφορές αποτελούν τομέα ζωτικής σημασίας μιας κοινωνίας, αφού έχουν σημαντική συνεισφορά τόσο στην εξυπηρέτηση των πολιτών καθημερινά όσο και στην οικονομία. Τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών, τα οποία ως στόχο έχουν την ανάδειξη της δυναμικής των μεταφορών, φέρνουν στο προσκήνιο την καινοτομία του αυτόνομου και του συνδεδεμένου οχήματος. Τα οχήματα αυτά παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου της πορείας του οχήματος, μέσω της επικοινωνίας με άλλα οχήματα και με την υποδομή.

Τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα μπορούν να μειώσουν αισθητά τον χρόνο διαδρομής και γι' αυτό το λόγο η πλειοψηφία των σύγχρονων πόλεων, στις οποίες ο πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία, κάνουν σημαντικές προσπάθειες για την γρήγορη ενσωμάτωση τέτοιων οχημάτων στην κυκλοφορία. Ως εκ τούτου είναι ιδιαίτερα σημαντική η έρευνα για να αξιολογηθεί το αντίκτυπο της ενσωμάτωσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.

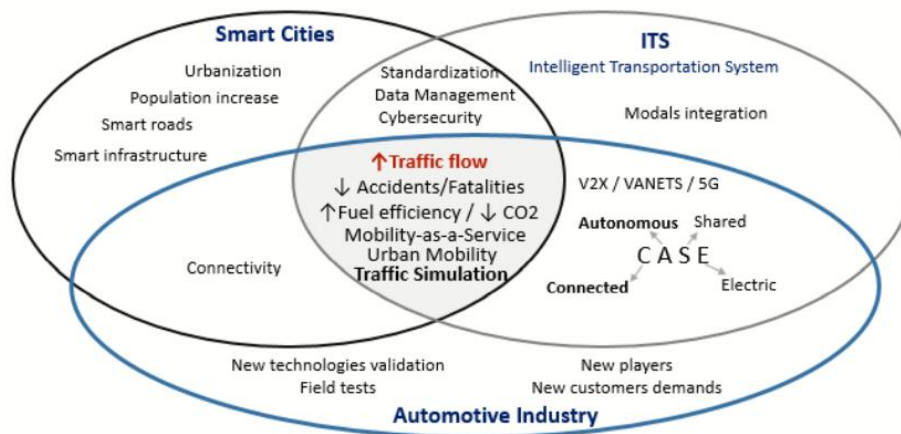
Μέσω της ενσωμάτωσης τέτοιων οχημάτων στην κυκλοφορία μπορούν να βελτιωθούν τα Συστήματα Ελέγχου Σηματοδότησης, όπου μέσω ενός συστήματος πλήρους αυτοματισμού θα βελτιωθεί το έξυπνο σύστημα ελέγχου σηματοδότησης, με βάση την επικοινωνία του οχήματος με την υποδομή (Vehicle to Infrastructure, V2I). Ταυτόχρονα, οι τεχνολογίες των συνδεδεμένων και των αυτόνομων οχημάτων θα αντικαταστήσουν τα

σήματα υποχρεωτικής διακοπής πορείας. Αυτές οι τεχνολογίες σκοπεύουν να αντικαταστήσουν το παραδοσιακό σύστημα ελέγχου κυκλοφορίας (σηματοδότηση και σήμανση), χρησιμοποιώντας την επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων (Vehicle to Vehicle, V2V). Αντικαθιστώντας τα οδικά σήματα και χρησιμοποιώντας τον συντονισμό των οχημάτων βελτιώνεται η στάθμη εξυπηρέτησης της οδού. Η αυτόνομη διαχείριση της κυκλοφορίας σκοπεύει στην αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, προσφέροντας παράλληλα καλή εξυπηρέτηση των οχημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν το δίκτυο. Το τελευταίο βελτιώνεται καθώς τα οχήματα δεν σταματούν την κίνησή τους αναίτια και αυτό συνεισφέρει στην μείωση των καθυστερήσεων των οχημάτων, κατά την διάρκεια της διαδρομής ιδιαίτερα σε περιοχές κόμβων (Mintsis et al., 2020). Σημαντική είναι και η διαχείριση των διασταυρώσεων.

Πρωτογενής στόχος της ενσωμάτωσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία είναι (Aria et al., 2016):

- Η διασφάλιση της ασφάλειας, καθώς και η βελτίωσή της
- Μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης
- Ελάττωση των εκπομπών ρύπων και
- Στη βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής

Η επιρροή των διασυνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων φαίνεται ποιοτικά στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Επιρροή Διασυνδεδεμένων Οχημάτων (Paterlini, 2020)

## 1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Ο κύριος σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στα αστικά οδικά δίκτυα και συγκεκριμένα στον δακτύλιο της Αθήνας. Για τον λόγο αυτό δημιουργείται μία μικροσκοπική προσομοίωση του δακτυλίου της Αθήνας σε περιβάλλον SUMO. Μέσω της προσομοίωσης του δικτύου επιλέγονται ως παράγωγα προσομοίωσης κυκλοφοριακές παράμετροι, όπως ο ρυθμός ροής (flow), η μέση ταχύτητα (speed) και η πυκνότητα (density) . Το δίκτυο θα κωδικοποιηθεί και θα βαθμονομηθεί με πραγματικές μετρήσεις κυκλοφορίας.

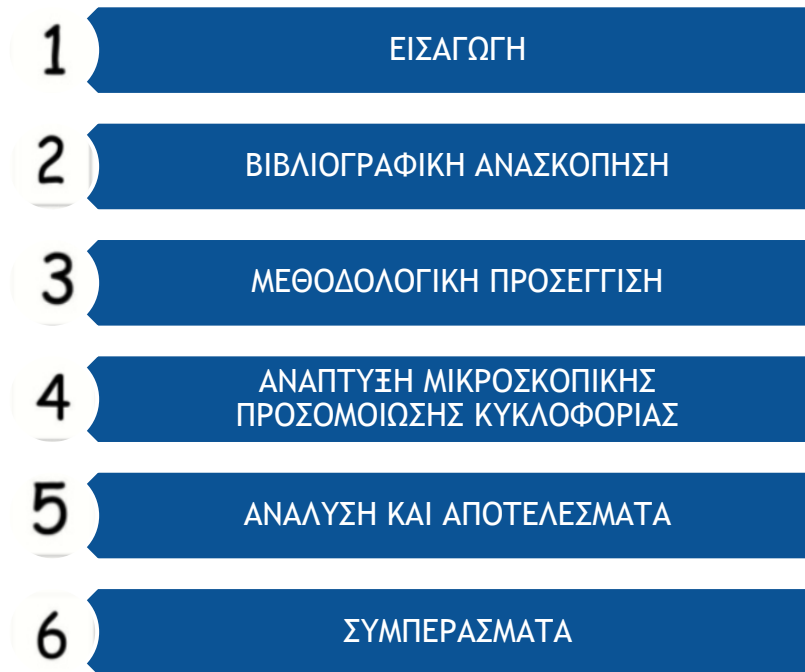
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα αναλυθούν ανά σενάριο προσομοίωσης και συγκριτικά, ώστε να προκύψουν τα θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής και κατά συνέπεια το αντίκτυπο της επιρροής της ενσωμάτωσής τους στα αστικά οδικά δίκτυα.

Η έρευνα βασίστηκε στην δημιουργία και ανάλυση των θεμελιωδών διαγραμμάτων κυκλοφοριακής τεχνικής.

## 1.3 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Τα κεφάλαια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι έξι και η πορεία τους φαίνεται στο Διάγραμμα 1.

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Εκεί παρουσιάζονται τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών, οι ιδιότητες των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων, έρευνες που δείχνουν την επιρροή των προαναφερθέντων τύπων οχημάτων στην κυκλοφορία, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τα πρότυπα με τα οποία προσομοιάζεται η κίνηση των συμβατικών, συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων. Το κεφάλαιο 3 αποτελεί την μεθοδολογική προσέγγιση. Σε αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία διερευνήθηκε η επιρροή των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία και το θεωρητικό υπόβαθρο, με βάση το οποίο εφαρμόστηκε η επιλεχθείσα μέθοδος. Επίσης γίνεται αναφορά στα θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής.



Διάγραμμα 1: Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Το κεφάλαιο 4 αναφέρεται στην ανάπτυξη της μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας. 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. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται ανάλυση και τα αποτελέσματα της Διπλωματικής Εργασίας. Περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του λογισμικού προσομοίωσης και της κυκλοφοριακής ζήτησης, της βαθμονόμησης και της παραμετροποίησης των προτύπων. Τέλος αναλύονται τα παράγωγα της προσομοίωσης, η βάση δεδομένων και τα αποτελέσματα. 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 την διάρκεια υλοποίησής της.

## 2.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών

Τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (Cooperative Intelligent Transport Systems - CITS) είναι ένας συνδυασμός τεχνολογιών πληροφόρησης και επικοινωνιών εφαρμοσμένων στον τομέα των μεταφορών με στόχο την αποδοτικότερη, ασφαλέστερη και οικονομικότερη κυκλοφορία των οχημάτων, των ατόμων ή των εμπορευμάτων κάνοντας χρήση των νέων τεχνολογιών, επιτρέποντας την παροχή πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο σε όλους τους εμπλεκόμενους στη μεταφορική διαδικασία.

Τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών έχουν εφαρμογή σε οδικά, σιδηροδρομικά, θαλάσσια και εναέρια συστήματα μεταφορών με σκοπό να βελτιώσουν την ασφάλεια, την ποιότητα του περιβάλλοντος, να μειώσουν το κόστος και τον χρόνο της μεταφοράς.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη προσήλωση στα συγκεκριμένα συστήματα μεταφορών, στην αυξανόμενη σημασία τους και φυσικά στον αλληλοσχετιζόμενο ρόλο που έχουν και στην συμπληρωματικότητά τους. Βάσει των σύγχρονων απαιτήσεων στις μεταφορές καθώς και χρονικών συντελεστών ο ρόλος των συστημάτων αυτών έχει καταστεί κρίσιμος για να επιτευχθεί ποιοτική και αποδοτική μετακίνηση και μεταφορά είτε αυτή πραγματοποιείται μέσω ιδιωτικού οχήματος είτε με τα μέσα μαζικής μεταφοράς .

Οι Ollia et al. (2017) συμπεραίνουν ότι η πραγματική επιτυχία των συνεργατικών ευφυών συστημάτων μεταφοράς έγκειται στην άμεση αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν στα δίκτυα μεταφορών σε πραγματικό χρόνο.

Τα συνεργατικά ευφυή συστήματα μεταφορών χρησιμοποιούνται από καθημερινούς ανθρώπους και κάνουν χρήση τεχνολογικών επιτευγμάτων όπως τα δεδομένα, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS). Πρωταρχικός τους ρόλος είναι η εξοικονόμηση πόρων , η ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής καθώς και η βέλτιστη χρήση του δικτύου. Μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε μέσο μεταφοράς και έχουν ποικίλλες εφαρμογές.

Κατά τους (Goodal et al., 2013) τα ΣΕΣΜ αποτελούν δυναμικό τομέα με έντονες αναπτυξιακές διαστάσεις και παρέχουν υψηλή προστιθέμενη αξία για το σύνολο των χρηστών των μεταφορικών μέσων. Ταυτόχρονα καθιστούν τις μεταφορές πιο αποτελεσματικές, καθώς επιδρούν θετικά στα κυκλοφοριακά μεγέθη. Η αποτελεσματικότητα αυτή επιτυγχάνεται με την παροχή καινοτόμων υπηρεσιών που σχετίζονται με τους διάφορους τρόπους μεταφοράς, όπως για παράδειγμα την επιβολή των κανόνων και τη διαχείριση της κυκλοφορίας, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν στους χρήστες (εταιρείες, διαχειριστές ή πολίτες) να ενημερώνονται καλύτερα και να κάνουν ασφαλέστερη και εξυπνότερη χρήση των μεταφορικών δικτύων και των διαθέσιμων πόρων.

Η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων, αλλά και μεταξύ των οχημάτων με την υποδομή έχει σπουδαία δυναμική και συμβάλλει στην αύξηση της οδικής ασφάλειας και της επάρκειας του δικτύου κάνοντας χρήση ασύρματων δικτύων, όπως ραντάρ και κάμερες. Δημιουργείται μια βάση δεδομένων, η οποία παρέχει πληροφορίες στα οχήματα για τις υπάρχουσες συνθήκες και αυτά καταφέρνουν να προσαρμόσουν την οδική συμπεριφορά τους βάσει των δεδομένων αυτών.

### 2.2 Το Συνδεδεμένο Όχημα

Με τον όρο συνδεδεμένα οχήματα (Uhlemann, 2018) γίνεται αναφορά στις εφαρμογές, στις υπηρεσίες αλλά και στις τεχνολογίες, οι οποίες συνδέουν ένα όχημα με άλλα κοντινά του οχήματα ή με την υποδομή. Πιο συγκεκριμένα, στα συνδεδεμένα οχήματα υπάρχουν συσκευές, οι οποίες του επιτρέπουν να συνδέεται με άλλες συσκευές, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται στο ίδιο το όχημα, στο δίκτυο, αλλά και σε συσκευές εκτός του οχήματος. Οι εφαρμογές και οι συσκευές περιέχουν οδηγίες κίνησης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται οδική ασφάλεια και επάρκεια του οδικού δικτύου. Ταυτόχρονα, παρέχουν βοήθεια στην διαδικασία της στάθμευσης, βοηθούν την διαδικασία της αυτόματης οδήγησης, δίνουν την δυνατότητα ψυχαγωγίας στον χρήστη και παρέχουν εφαρμογές Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS). Όλα τα παραπάνω διευκολύνουν την διαδικασία της οδήγησης και την καθιστούν ασφαλέστερη, αποδοτικότερη και πιο φιλική προς το περιβάλλον.

Οχήματα που είναι εφοδιασμένα με τις εφαρμογές αυτές χαρακτηρίζονται ως συνδεδεμένα . Μέσω των εφαρμογών αυτών οι οδηγοί έχουν ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο για τις συνθήκες οδήγησης , αλλά και για θέματα ασφάλειας και αυτό επιτυγχάνεται με την επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων και μεταξύ των οχημάτων με την υποδομή.

Τα συνδεδεμένα οχήματα είναι εξοπλισμένα με συστήματα κάμερας και καταγραφής της κίνησης τους με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια βάση δεδομένων η επεξεργασία της οποίας γεννά στοιχεία που αφορούν το δίκτυο και τα οποία αξιοποιούνται σε πραγματικό χρόνο και αποδοτικότερη χρήση του δικτύου . Μέσω του Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Κυκλοφορίας (CACC), της αυτόνομης πέδησης και της χρήση του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης ο οδηγός είναι πάντα ενήμερος για τους κινδύνους που πρόκειται να συναντήσει.

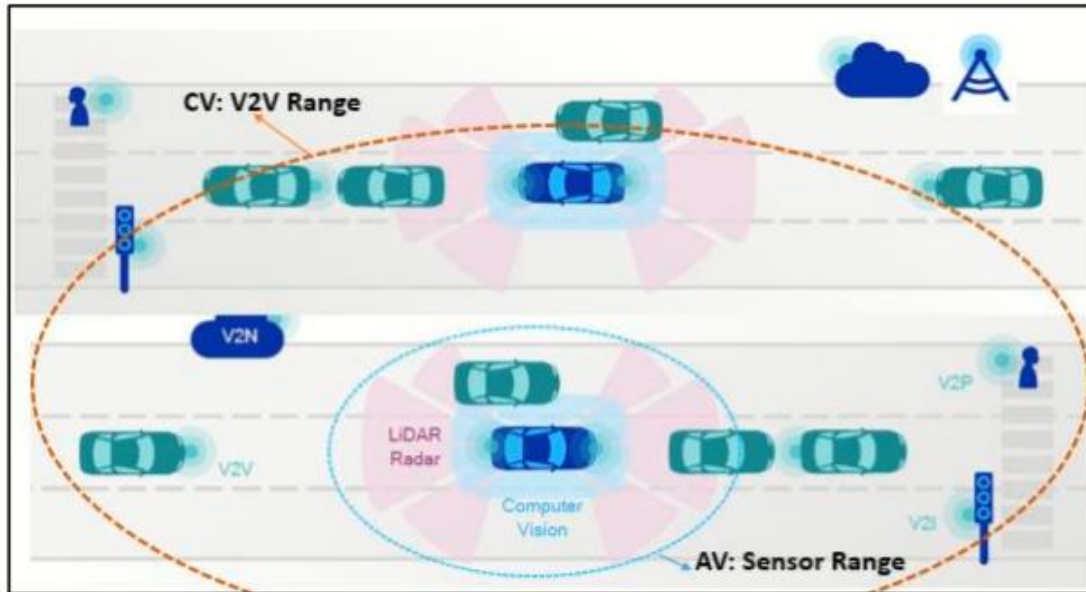
Η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων , αλλά και των οχημάτων με την υποδομή γίνεται κάνοντας χρήση τη συχνότητα 5.9 GHz (Uhlemann, 2018) . Η χρήση της θα περιορίσει τις συγκρούσεις μεταξύ των οχημάτων και θα βελτιώσει τις συνθήκες της οδήγησης , καθώς οι οδηγοί θα ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο για την τοποθεσία , την ταχύτητα, αλλά και την κατεύθυνση προπορευόντων οχημάτων.

Βασικό χαρακτηριστικό των συνδεδεμένων οχημάτων είναι η ικανότητα τους να ανταλλάσσουν πληροφορίες είτε μεταξύ οχημάτων (V2V) είτε μεταξύ οχημάτων και υποδομής (V2I). Ωστόσο , η έρευνα της (Uhlemann, 2018) έχει καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα συνδεδεμένα οχήματα θα μπορούν να επικοινωνούν με περισσότερους δέκτες εκτός των οχημάτων και της υποδομής (V2X). Οι μορφές επικοινωνίας μεταξύ των συνδεδεμένων οχημάτων είναι οι παρακάτω :

- Όχημα – Όχημα (V2V) : με αυτή την υπηρεσία κάθε όχημα αποτελεί πομπό και δέκτη πληροφοριών και επιτρέπει την εφαρμογή του συστήματος Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (CACC).
- Όχημα – Υποδομή (V2I) : αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την διάδοση πληροφορίας μεταξύ των οχημάτων και της παράπλευρης της οδού, των τηλεπικοινωνιών καθώς και των ραντάρ. Δίνει πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο σε κυκλοφοριακά δεδομένα που αφορούν τις κυκλοφοριακές συνθήκες και τον καιρό, υποβοηθώντας τον οδηγό στην λήψη σωστών αποφάσεων.

- Άλλες V2X τεχνολογίες, όπως όχημα με πεζό (V2P) , όχημα με σπίτι (V2H)

Στην Εικόνα 2 γίνεται σύγκριση του εύρους της επιρροής των συνδεδεμένων οχημάτων σε σύγκριση με τα αυτόνομα οχήματα.

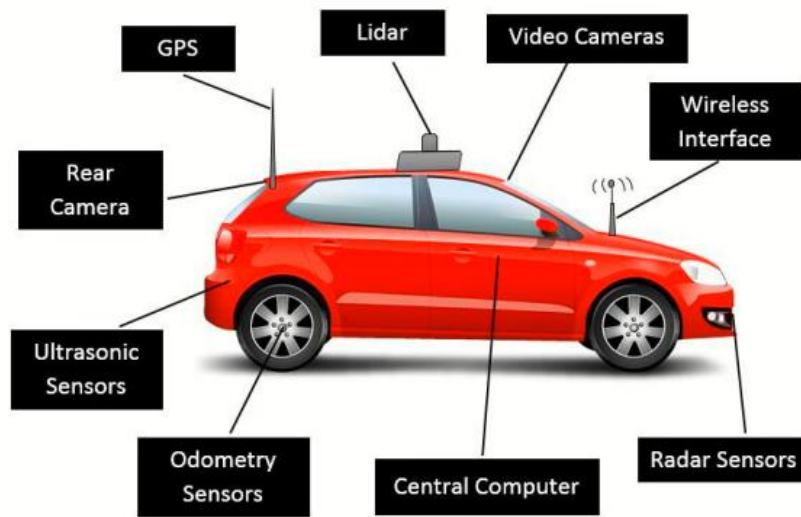


Εικόνα 2: Εύρος επιρροής συνδεδεμένων οχημάτων σε σύγκριση με αυτόνομα οχήματα (Πηγή: Paterlini, 2020)

### 2.3 Το Αυτόνομο Όχημα

Ως αυτόνομο καλείται το όχημα , το οποίο έχει την ικανότητα να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του και έχει τη δυνατότητα πλοήγησης χωρίς να είναι απαραίτητη η ανθρώπινη παρέμβαση (Lu et al., 2018) . Οι άνθρωποι είναι απλώς επιβάτες και μπορούν να ελέγχουν τον προορισμό τους ή να ζητήσουν από το αυτοκίνητο την διακοπή της κίνησης του. Τα αυτόνομα οχήματα παρέχουν τεχνολογίες, όπως παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης, ραντάρ , λιντάρ (ραντάρ που χρησιμοποιούν ακτίνες λέιζερ) , ειδικές κάμερες , ενώ διαθέτουν και λογισμικό , το οποίο συνδυάζει όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες και ανακαλύπτει κατάλληλες διαδρομές και εντοπίζει εγκαίρως σταθερά και κινούμενα εμπόδια όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.





Εικόνα 3: Το αυτόνομο όχημα ( Πηγή: Hamdani & Benamar,2018)

Με βάση την ποσότητα της οδικής παρέμβασης και προσοχής που απαιτείται, η αυτόνομη οδήγηση έχει ταξινομηθεί σε έξι διαφορετικά επίπεδα από το Διεθνή Σύνδεσμο Μηχανικών Αυτοκινήτων SAE. Σύμφωνα με ένα εναρμονισμένο σύστημα ταξινόμησης τα επίπεδα αυτοματοποίησης είναι τα εξής (SAE, 2018) :

- 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 άλλες 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 της 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 οποιοσδήποτε συνθήκες και περιβάλλοντος που μπορεί να ελέγξει ένας οδηγός.

### 2.4 Προσομοίωση Συνδεδεμένων/Αυτόνομων Οχημάτων και Επιπτώσεις της Ενσωμάτωσής τους στα Αστικά Οδικά Δίκτυα

Η βιβλιογραφία για την μικροσκοπική προσομοίωση των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων εμφανίζει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, γιατί υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την επιρροή τους στην κυκλοφορία . Πολλοί ερευνητές έχουν κατανοήσει την σπουδαιότητα, τις αλλαγές και τις καινοτομίες που πρόκειται να επιφέρουν στα σύγχρονα οδικά δίκτυα. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας εξόπλισε τους προσομοιωτές της αστικής κινητικότητας με εργαλεία, καθιστώντας τη προτυποποίηση περιβαλλόντων με συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα περισσότερο ακριβή. Οι Rios-Torres και Malikopoulos (2018) δημοσίευσαν μια συλλογή από έρευνες, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν από το 1960 μέχρι σήμερα και είχαν ως αντικείμενο την βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών με την ενσωμάτωση των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία. Έρευνες με διάφορους τύπους μικροσκοπικής προσομοίωσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων πραγματοποίησαν οι Tian et al. (2018). Αυτά τα στοιχεία, καθώς και δημοσιεύσεις από συνέδρια και περιοδικά θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Στην δεκαετία του 1990, το σύστημα του Αυτόνομου Έξυπνου Ελέγχου Πορείας (AICC), αποτέλεσε το πρώτο σύστημα αυτοματοποίησης των οχημάτων και είχε ως στόχο να αυξήσει την αυτοπεποίθηση του οδηγού, να δημιουργήσει ένα ασφαλές περιβάλλον οδήγησης και να ομαλοποιήσει την κυκλοφοριακή ροή. Αυτό επετεύχθη με την προσαρμογή της ταχύτητας του οχήματος, ώστε αυτό να διατηρεί απόσταση ασφαλείας

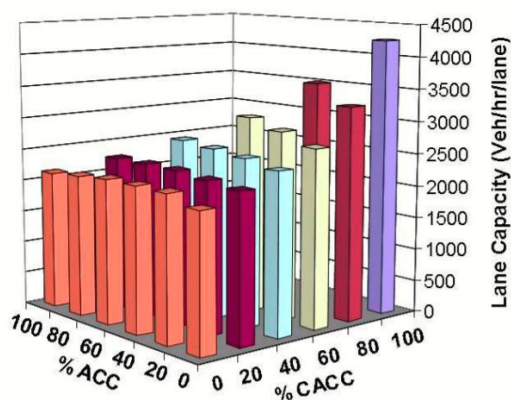
από το προπορευόμενο όχημα. Εκείνη την περίοδο η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων δεν αποτελούσε ερευνητικό αντικείμενο. Ο Bjornberg (1994) παρουσίασε τον αλγόριθμο ελέγχου (control algorithm), ο οποίος αποτελεί τον πρόδρομο του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (ACC). Το αποτέλεσμα της έρευνας των Feng et al. (2019) έδειξε ότι το σύστημα ACC είναι αποδοτικότερο από τον άνθρωπο και συντελεί όχι μόνο στην καλύτερη κυκλοφοριακή ροή, αλλά και στην πιο ομαλή οδήγηση. Οι Carrea και Saroldi (1993) ερεύνησαν την ενσωμάτωση συστημάτων αποφυγής σύγκρουσης στο σύστημα ACC.

Μετά το 2000, τα συστήματα Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (ACC) και Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (CACC) άρχισαν να γίνονται ευρέως γνωστά. Οι Navas και Milanes (2019) ερεύνησαν το αντίκτυπο του συστήματος Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας στην κυκλοφορία για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης, ενώ αντίστοιχη έρευνα πραγματοποίησαν και οι Xiao et al. (2018) για να διερευνήσουν τις συνέπειες της ενσωμάτωσης του συστήματος του Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας. Προσομοίωσαν σημεία ενός αυτοκινητόδρομου, όπου οχήματα με συστήματα ACC και CACC ενσωματώνονταν με συμβατικά οχήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ευστάθεια του δικτύου, ωστόσο δεν βελτίωσαν τον χρόνο διαδρομής. Η έρευνα των (Li et al., 2018) συμπέρανε ότι το σύστημα ACC βελτίωσε την κυκλοφοριακή ροή όταν το ποσοστό διείσδυσης στην κυκλοφορία είναι 5% και μείωσε τον χρόνο διαδρομής όταν το ποσοστό διείσδυσης είναι 25%.

Τις τελευταίες δεκαετίες πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στο αντίκτυπο των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία. Οι Xiao et al. (2018) με την ερευνά τους κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε ένα ετερογενές περιβάλλον οδήγησης, το οποίο απαρτίζεται από 50% συνδεδεμένα και 50% συμβατικά οχήματα η διάρκεια της κυκλοφοριακής συμφόρησης ήταν μικρότερη σε σύγκριση μ' ένα περιβάλλον, το οποίο αποτελείται μόνο από συμβατικά οχήματα. Σύμφωνα με τους (Acheampong et al., 2019) η μοναδιαία ποσοστιαία αύξηση οχημάτων με σύστημα ACC σε ένα οδικό δίκτυο μπορεί να αυξήσει την χωρητικότητα του δικτύου κατά 0,3%.

Παράλληλα αρκετές έρευνες προσπάθησαν να αξιολογήσουν την ενσωμάτωση των αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία μέσω μικροσκοπικής

προσομοίωσης. Οι Zegers et al. (2018) συμπέραναν ότι τα συνδεδεμένα οχήματα αύξησαν την κυκλοφοριακή ικανότητα. Κάνοντας χρήση του λογισμικού VISSIM οι Jiang et al. (2017), θεωρώντας ότι το όχημα έχει την ικανότητα να επικοινωνεί και με τα άλλα οχήματα του δικτύου, αλλά και με την υποδομή, κατέληξαν ότι τα συνδεδεμένα οχήματα αυξάνουν την ταχύτητα του ταξιδιού κατά 6,4% και μειώνουν τις εκπομπές αερίων κατά 5,2%. Επιπρόσθετα οι Milanese et al. (2012) προσομοίωσαν οχήματα με συστήματα Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας και Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας με την βοήθεια του AIMSUN. Ερεύνησαν την επιρροή των παραπάνω συστημάτων για διαφορετικά επίπεδα διείσδυσης στην κυκλοφορία. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι τα συστήματα Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας δεν έχουν την ικανότητα να αυξήσουν την χωρητικότητα του οδικού δικτύου, ακόμα και σε μεγάλα ποσοστά διείσδυσης τους. Στον αντίποδα τα συστήματα Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας αυξάνουν την χωρητικότητα του δικτύου κατά 7% σε ποσοστό διείσδυσης 20% και διπλασιάζουν την χωρητικότητα της λωρίδας για ποσοστό διείσδυσης 100% όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα όταν το ποσοστό διείσδυσης συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία είναι παραπάνω από 80%. Οι Sun et al. (2019) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα συνδεδεμένα οχήματα επηρεάζουν σημαντικά την κυκλοφοριακή ικανότητα, όταν σχηματίζουν φάλαγγες άνω των 6 οχημάτων.

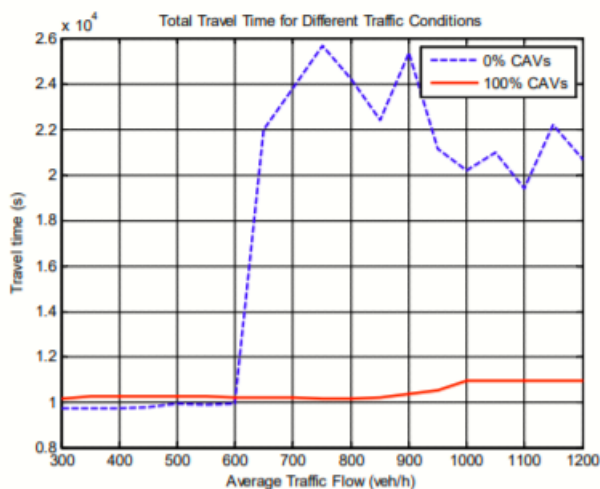


Διάγραμμα 2: Χωρητικότητα Λωρίδας για αυτόνομα και συνδεδεμένα οχήματα για διαφορετικά ποσοστά διείσδυση (Πηγή: Shladover et al., 2012)

Χαρακτηριστικά είναι τα αποτελέσματα των ερευνών, οι οποίες είχαν ως αντικείμενο το αντίκτυπο της επικοινωνίας των οχημάτων με την υποδομή στην κυκλοφορία. Οι Jiang et

al. (2017) κατέληξαν ότι η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και υποδομής μειώνει τον χρόνο διαδρομής κατά 99%. Η έρευνα των (Jiang et al., 2017) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και υποδομής μειώνει τον χρόνο διαδρομής κατά 23% για οχήματα έκτακτης ανάγκης όπως ασθενοφόρα και κατά 27% για όλους τους υπόλοιπους τύπους οχημάτων.

Όταν συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα συνυπάρχουν στο οδικό δίκτυο παρατηρείται σημαντική μείωση στις καθυστερήσεις για ποσοστά διείσδυσης των συνδεδεμένων οχημάτων άνω των 50%. Οι Xu et al. (2017) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χωρητικότητα ενός οδικού δικτύου αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία. Επιπροσθέτως οι Rios-Torres και Malikoroulos (2018) θεώρησαν 100% ενσωμάτωση των συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία και πέτυχαν 60% μείωση του χρόνου διαδρομής σε περίπτωση έντονης κυκλοφοριακής συμφόρησης, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.



**Διάγραμμα 3:** Χρόνος ταξιδιού για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης συνδεδεμένων οχημάτων (Πηγή: Rios-Torres και Malikoroulos 2018)

Οι Aria et al. (2016) χρησιμοποιώντας το λογισμικό VISSIM, έδειξαν ότι η ταχύτητα των οχημάτων αυξάνεται κατά 8,48% όταν υπάρχει 100% ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό SUMO οι Hass και Friedrich (2017) πραγματοποίησαν μικροσκοπική προσομοίωση για φάλαγγες συνδεδεμένων οχημάτων και συμπέραναν ότι για φάλαγγες άνω των 6 οχημάτων μειώνεται ο χρόνος

διαδρομής. Αύξηση της χωρητικότητας της οδού από 2,046 σε 6,450 οχήματα/ώρα/λωρίδα συμπέραναν οι Ollia et al. (2017).

Μείωση του χρόνου διαδρομής κατά 9% και 11% για αυτόνομα και συνδεδεμένα οχήματα στην έρευνα των (Balal & Cheu, 2019), ενώ υπήρξε σχεδόν διπλασιασμός της χωρητικότητας του δικτύου από 2000 οχήματα/ώρα σε 3900 οχήματα/ώρα στην έρευνα των (Sun et al., 2019). Οι Yao et al. (2020) χρησιμοποιώντας το λογισμικό SUMO προσομοίωσαν ένα ετερογενές περιβάλλον οδήγησης, το οποίο απαρτίζεται από συνδεδεμένα και συμβατικά οχήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση των καθυστερήσεων κατά 19% και 27% για 60% και 100% ποσοστά διείσδυσης των συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία αντίστοιχα.

## 2.5 Μακροσκοπικά Κυκλοφοριακά Πρότυπα Συνδεδεμένων, Αυτόνομων και Συμβατικών Οχημάτων

Η προτυποποίηση 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 ερευνάται από τη δεκαετία του 1950 (Pipes, 1953).

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

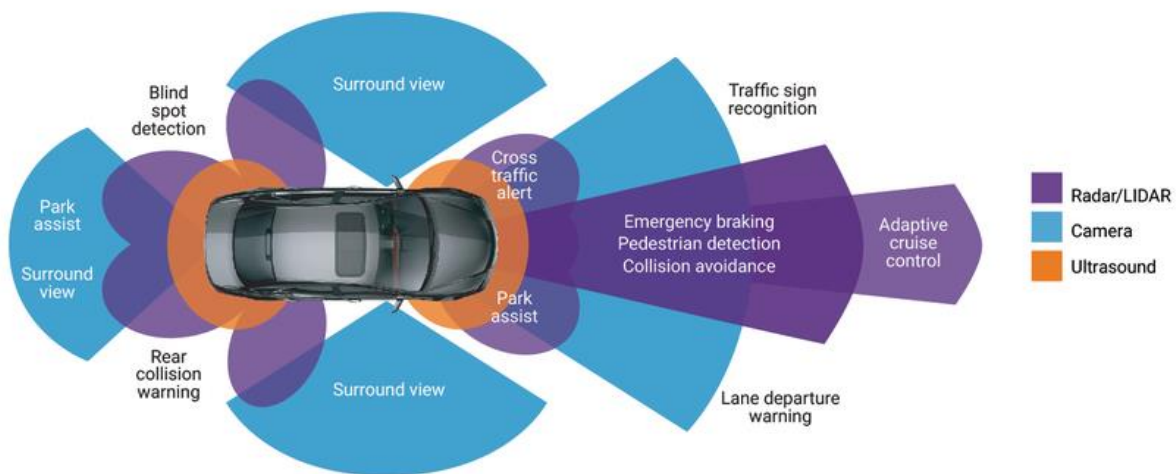
Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, ο (Girps, 1981) όρισε έναν σχετικό περιορισμό ασφαλείας :  $X_n \leq X_{n-1} - S_{n-1}$ , όπου  $X_n$  είναι η θέση του οχήματος  $n$  μετά την πέδηση και  $s_n$  το μέγεθος του οχήματος  $n$ .

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

Οι Treiber et al. (2000) πρότειναν ένα νέο πρότυπο, το Πρότυπο 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 πρότυπο με δύο μόνο παραμέτρους, το οποίο μπορεί περαιτέρω να αναπαρασταθεί από την ταχύτητα διακύμανσης και το οποίο μπορεί επιτυχώς να συνδέσει τη συμπεριφορά του μικροσκοπικού ακολουθούντος οχήματος με τα χαρακτηριστικά της μικροσκοπικής κυκλοφοριακής ροής.

Στην εικόνα 4 φαίνονται οι αισθητήρες του αυτόνομου οχήματος και η τεχνολογία του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας.



Εικόνα 4: Αισθητήρες αυτόνομου οχήματος και τεχνολογία Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Πηγή: [www.insightsonindia.com](http://www.insightsonindia.com), 2000)

Στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα η Mercedes-Benz (Bohrer, 1995) , ξεκίνησε να στρέφει την προσοχή της στην ανάπτυξη προτύπων αυτόνομων οχημάτων.

Το σύστημα του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Adaptive Cruise Control, ACC) μπορεί να διατηρήσει μια επιθυμητή ταχύτητα και απόσταση από το προπορευόμενο όχημα. Το IDM μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει τα αυτόνομα οχήματα

σε επίπεδο λειτουργίας. Πάνω στο επίπεδο λειτουργίας, προτάθηκε ένας πίνακας οδικής στρατηγικής για να περιγράψει τη στρατηγική των αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων σε διαφορετικά επίπεδα, όπως είναι οι συνθήκες ελεύθερης ροής, κορεσμού και μμποτλιαρίσματος.

Ωστόσο, οι Milanese και 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 και συνδεδεμένων οχημάτων, σε σχέση με το IDM πρότυπο. 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 την προτυποποίηση της συμπεριφοράς των αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων.

Πρόσφατα, ερευνητές έστρεψαν την προσοχή τους στην κυκλοφοριακή ροή με ύπαρξη πολλαπλών μέσων κυκλοφορίας. Οι Maglaras et al. (2016) έκαναν 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, στην έρευνα αυτή, μόνο η παράμετρος του χρονικού διαχωρισμού  $\tau_g$  χρησιμοποιήθηκε για να διαφοροποιήσει τα αυτόνομα ( $\tau_g=0.5$  sec) από τα συμβατικά ( $\tau_g=1.5$  sec), κάτι που μειώνει την αξιοπιστία της προσομοίωσης.

### 2.6 Συμπεράσματα Βιβλιογραφίας

Τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα φέρνουν νέες προκλήσεις και ευκαιρίες στα υπάρχοντα κυκλοφοριακά συστήματα. Καθιστούν το όχημα περισσότερο αυτόνομο και ο οδηγός ανεξαρτητοποιείται από την διαχείριση του ελέγχου του οχήματος του. Μέσα από μεγάλη ποικιλία προτύπων και παραμέτρων, υπάρχουν πολλοί τρόποι, ώστε να ερευνηθεί η επιρροή τους σε ένα δίκτυο.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επίδραση των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία είναι τόσο η κατηγορία του δικτύου και η έκτασή του, όσο και



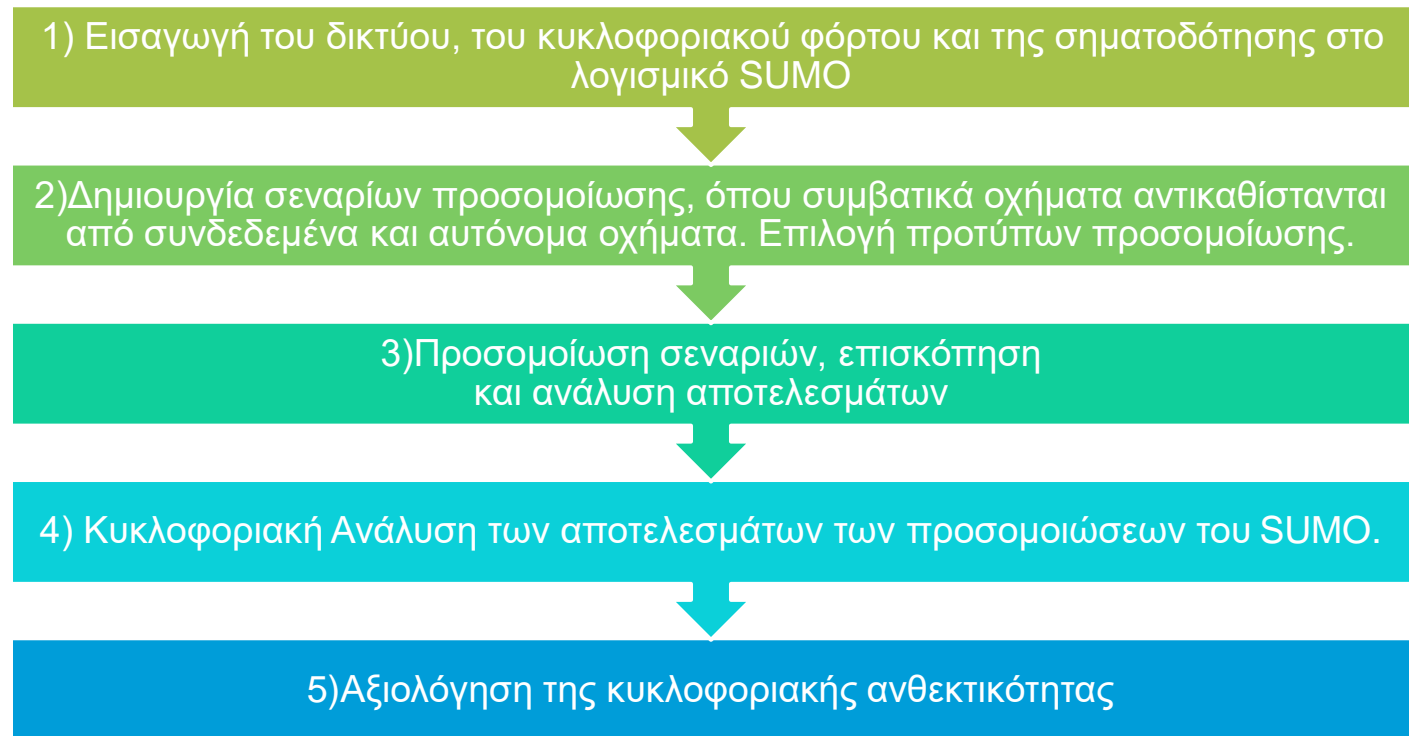
η σύνθεση της κυκλοφορίας. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει το ποσοστό διείσδυσης των οχημάτων αυτών στην κυκλοφορία. Εξίσου σημαντική είναι η σωστή επιλογή προτύπου στην προσομοίωση, τόσο των συμβατικών όσο και των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων . Επιπροσθέτως, οι παράμετροι που θα επιλεγούν για να διαφοροποιήσουν τις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες οχημάτων καθώς και το πλήθος αυτών χρήζει μείζονος σημασίας.

Εν κατακλείδι, τα συνδεδεμένα και τα αυτόνομα οχήματα αποτελούν αντικείμενο μείζονος ενδιαφέροντος και έρευνας και είναι βέβαιο πως θα απασχολήσουν την επιστημονική κοινότητα στο μέλλον. Η διερεύνησή τους σε συνθήκες κυκλοφορίας που προσαρμόζουν καλύτερα τα πραγματικά δεδομένα του περιβάλλοντος είναι καθοριστική, προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

## 3.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

### 3.1 Περιγραφή της Διαδικασίας

Με βάση τα παραπάνω για την επίτευξη των στόχων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα αναπτυχθεί μεθοδολογία όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4 :



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα Ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε

### 3.2 Μικροσκοπική Προσομοίωση

Στο πλαίσιο της εργασίας η μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας γίνεται σε περιβάλλον SUMO. Το SUMO αποτελεί ένα δωρεάν, ανοιχτό λογισμικό, το οποίο είναι διαθέσιμο από το 2001 και επιτρέπει την προτυποποίηση κυκλοφοριακών συστημάτων και οδικών οχημάτων και αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην διερεύνηση ζητημάτων όπως η επιλογή της βέλτιστης διαδρομής, της επίδρασης της σηματοδότησης στην κυκλοφορία, καθώς και της επίδρασης των τεχνολογιών επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων. Στις βιβλιοθήκες του SUMO συμπεριλαμβάνονται υποστηρικτικά εργαλεία (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 να υποστηρίξει την εκτέλεση και τον έλεγχο της προσομοίωσης μέσω Διασύνδεσης Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interfaces). Μέσω του αναφερόμενου API, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει νέα πρότυπα και εργαλεία μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python.

### 3.3 Δημιουργία Σεναρίων Προσομοίωσης

Αφού εισήχθη το δίκτυο που θα πραγματοποιηθεί η έρευνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο λογισμικό SUMO, καθώς και τα δεδομένα από τους φωρατές και της σηματοδότησης, δημιουργήθηκαν τα σενάρια μικροσκοπικής προσομοίωσης, με βάση τα οποία θα γίνει η συγκεκριμένη έρευνα. Δημιουργήθηκαν 16 σενάρια, τα οποία απαρτίζονται από συμβατικά, συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα. Τα σενάρια διαφέρουν ως προς το ποσοστό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία. Τα ποσοστά διείσδυσης τους στην κυκλοφορία είναι 10%, 20%, 30%, 70% και 100%. Ως συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα ορίστηκαν τα οχήματα ιδιωτικής χρήσεως (Ι.Χ.). Τέλος, ορίστηκαν μεταβλητές εξόδου της προσομοίωσης, προκειμένου να προκύψουν δεδομένα για τη δημιουργία των θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής. Έτσι, για κάθε ποσοστό διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων καταλήγουμε στα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Τα προφίλ οδήγησης των οδηγών των συμβατικών οχημάτων, σύμφωνα με την έρευνα των Adamidis et al. (2020), είναι τρία :

- Σύνηθες
- Επιθετικό
- Αμυντικό

Για κάθε ένα προφίλ οδήγησης θα παρουσιαστούν παρακάτω οι παράμετροι που καθορίζουν την κίνησή τους. Για τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα ορίστηκε ως προφίλ οδήγησης, το σύνηθες προφίλ. Στον Πίνακα 1 φαίνεται η διαμόρφωση των

σεναρίων, τα οποία διαφοροποιούνται στο ποσοστό διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.

Πίνακας 1: Διαμόρφωση Σεναρίων

Βασικό Σενάριο	100% Συμβατικά οχήματα
Σενάριο 1 <sup>α</sup>	90% Συμβατικά οχήματα – 10% Συνδεδεμένα
Σενάριο 1 <sup>β</sup>	90% Συμβατικά οχήματα – 10% Αυτόνομα
Σενάριο 1 <sup>γ</sup>	90% Συμβατικά οχήματα – 10% Αυτόνομα- Συνδεδεμένα
Σενάριο 2 <sup>α</sup>	80% Συμβατικά οχήματα – 20% Συνδεδεμένα
Σενάριο 2 <sup>β</sup>	80% Συμβατικά οχήματα – 20% Αυτόνομα
Σενάριο 2 <sup>γ</sup>	80% Συμβατικά οχήματα – 20% Αυτόνομα- Συνδεδεμένα
Σενάριο 3 <sup>α</sup>	70% Συμβατικά οχήματα – 30% Συνδεδεμένα
Σενάριο 3 <sup>β</sup>	70% Συμβατικά οχήματα – 30% Αυτόνομα
Σενάριο 3 <sup>γ</sup>	70% Συμβατικά οχήματα – 30% Αυτόνομα- Συνδεδεμένα
Σενάριο 4 <sup>α</sup>	30% Συμβατικά οχήματα – 70% Συνδεδεμένα
Σενάριο 4 <sup>β</sup>	30% Συμβατικά οχήματα – 70% Αυτόνομα
Σενάριο 4 <sup>γ</sup>	30% Συμβατικά οχήματα – 70% Αυτόνομα- Συνδεδεμένα
Σενάριο 5 <sup>α</sup>	100% Συνδεδεμένα
Σενάριο 5 <sup>β</sup>	100% Αυτόνομα
Σενάριο 5 <sup>γ</sup>	100% Αυτόνομα- Συνδεδεμένα

### 3.4 Μετρικές Απόδοσης Οδικού Δικτύου

Η διερεύνηση της επιρροής της ενσωμάτωσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία θα πραγματοποιηθεί μέσα από την δημιουργία και ανάλυση των θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα ακόλουθα :

- Κυκλοφοριακή ροή (flow)
- Πυκνότητα (density)
- Ταχύτητα (speed)

Αρχικά, προς εξυπηρέτηση της έρευνας έπρεπε να εισαχθεί το δίκτυο του δακτυλίου της Αθήνας στο λογισμικό SUMO. Με την βοήθεια της πλατφόρμας Overpass-turbo

αντλήθηκαν οι επιθυμητές κατηγορίες του δικτύου της Αθήνας 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. Με τον τρόπο αυτό, το δίκτυο φορτίζεται με συμβατικά οχήματα ιδιωτικής χρήσης, δημιουργούνται τα ταξίδια τους και τίθενται οι απαραίτητες παράμετροι που καθορίζουν την κίνηση τους. Ακόμη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα σηματοδότησης των κόμβων της περιοχής του δακτυλίου για να δημιουργηθούν τα προγράμματα σηματοδότησης στο SUMO.

### 3.5 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Τα συνδεδεμένα οχήματα θα αναπαρασταθούν από το πρότυπο Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (CACC), ενώ για τα αυτόνομα οχήματα θα χρησιμοποιηθεί το πρότυπο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (ACC). Παρακάτω παρουσιάζονται τα μικροσκοπικά πρότυπα ροής, καθώς και τα πρότυπα που επιλέχθηκαν για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εργασίας.

#### 3.5.1 Μικροσκοπικά Πρότυπα Ροής

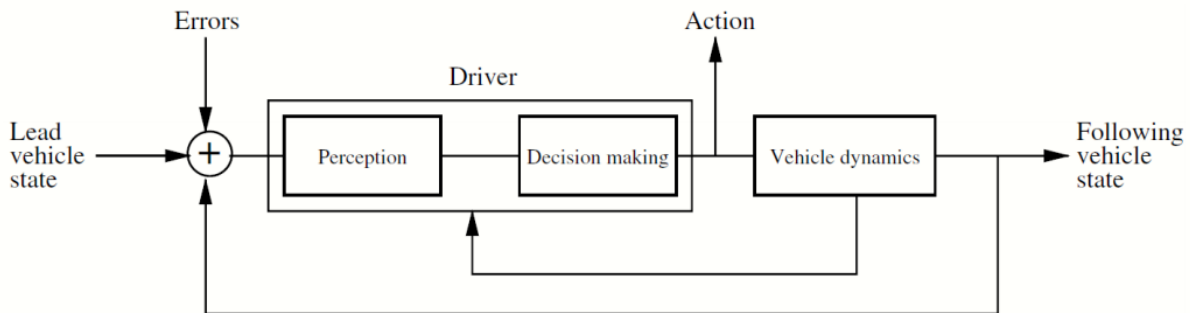
Η σημαντικότητα της χρήσης μικροσκοπικών προτύπων προσομοίωσης για την προσομοίωση οδικών δικτύων ολοένα και αυξάνεται, καθώς έχει ευρεία χρήση εφαρμογών τόσο στο σχεδιασμό οδικών δικτύων, την ανάλυση συγκοινωνιακών προβλημάτων όσο και στην εξέλιξη των συνεργατικών ευφυών συστημάτων μεταφοράς.

Τα πρότυπα μικροσκοπικής προσομοίωσης χρησιμοποιούν μεταβλητές για να περιγράψουν την συμπεριφορά και την αντίδραση κάθε χρήστη του οδικού δικτύου σε σχέση με το υπόλοιπο περιβάλλον, γεγονός που καθιστά την προσομοίωση περισσότερο ακριβή (Mardiati et al., 2019) .

Συνήθως αναφέρονται στην επιτάχυνση/επιβράδυνση του οχήματος με στόχο να καθορίσουν είτε έναν ασφαλή χωρικό είτε χρονικό διαχωρισμό (χρόνος αντίδρασης) .

### 3.5.2 Πρότυπα Ακολουθούντων Οχημάτων

Η πιο δημοφιλής κατηγορία οδικού προτύπου είναι τα πρότυπα ακολουθούντων οχημάτων (Car Following Models), καθώς έχουν περιγραφεί επιτυχώς από μαθηματικά πρότυπα και είναι αντιπροσωπευτικά της οδήγησης. Θεωρούν ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας και της θέσης του οχήματος. Συνήθως αναπαριστούν το χρόνο, τη θέση και την επιτάχυνση ως συνεχείς συναρτήσεις, αλλά τα περισσότερα έχουν εξελιχθεί παρέχοντας διακριτικούς σχηματισμούς (Gazis, Herman & Rothery, 1961). Τα πρότυπα αυτά προσαρμόζουν την κίνηση ενός οχήματος με βάση ένα σύνολο κανόνων που στόχο έχει την αποφυγή οποιασδήποτε επαφής με το προπορευόμενο όχημα. Η αναπαράσταση του προτύπου ακολουθούντος οχήματος φαίνεται στο Διάγραμμα 5.



Διάγραμμα 5: Γενικό διάγραμμα αναπαράστασης προτύπου ακολουθούντος οχήματος (Πηγή : Cheng et al, 2020)

Τα πρότυπα ακολουθούντων οχημάτων έχουν ως αντικείμενο την αναπαράσταση της κυκλοφορίας 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.

Η σχέση που γενικεύει την Αποφυγή Ατυχήματος (Collision Avoidance) ή την Απόσταση Ασφαλείας (Safety Distance) είναι η εξής :

$$S^{safe}(v_i) = a + bv_i + cv_i^2 \quad (3.1)$$

Όπου  $a$  είναι το μήκος του οχήματος,  $b$  ο χρόνος αντίδρασης του οχήματος και  $c$  η προσαρμοστική παράμετρος επιβράδυνσης μεταξύ δύο οχημάτων. Με  $c v_i^2$  αναπαρίσταται η απόσταση σύγκρουσης. Ο ασφαλής χωρικός διαχωρισμός  $S$  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.

### Πρότυπο Krauss

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

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

$$V_i^{safe}(t+\Delta t) = V_{i+1}(t) + \frac{\Delta x_i(t) - V_{i+1}(t) \times T}{\Delta v(t)} \quad (3.2)$$

$$V_i^{des}(t+\Delta t) = \min [V_{max}, V_i(t) + a \times \Delta t, V_i^{safe}(t+\Delta t)] \quad (3.3)$$

$$V_i(t + \Delta t) = \max [0, V_i^{des}(t+\Delta t) - \mu] \quad (3.4)$$

$$X_i(t+\Delta t) = X_i(t) + V_i(t) \times \Delta t \quad (3.5)$$

Η σχέση (3.2) 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 μια διακύμανση στην αντίδραση του ερεθίσματος. Η σχέση (3.3) υπολογίζει την επιθυμητή ταχύτητα που θα αποκτήσει το όχημα μέχρι τον κόμβο  $i$ , η οποία είναι προσαύξηση της προηγούμενης ταχύτητας με άνω όρια τις  $V_i^{safe}$  και  $V^{max}$ . Η σχέση (3.4) ενημερώνει την τρέχουσα ταχύτητα για το επόμενο βήμα  $\Delta t$ , με βάση μία στοχαστική απόκλιση γύρω από την επιθυμητή ταχύτητα  $\mu$ . Τέλος, η σχέση (3.5) ενημερώνει την 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 πρότυπο.

### Πρότυπο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας

Η παραγωγή του προτύπου 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 μέτρων (Xiao et al., 2018).

Η λειτουργία αυτή έχει σκοπό να μειώσει την απόκλιση μεταξύ της ταχύτητας του οχήματος και της επιθυμητής ταχύτητας και δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$a_{i,k+1} = k_1 (V_d - V_{i,k}), k_1 > 0 \text{ (e)}$$

Στη σχέση αυτή, ως  $a_{i,k+1}$  αναπαρίστανται 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 είναι μεταξύ  $0,3 - 0,4 \text{ s}^{-1}$  σύμφωνα με τους (Xiao et al., 2018).

#### Λειτουργία Ελέγχου Κενού (Gap Control Mode)

Στην περίπτωση αυτή, η επιτάχυνση στο επόμενο βήμα  $k+1$  διαμορφώθηκε ως μία συνάρτηση μεταφορά δευτέρου βαθμού, βασισμένη στις αποκλίσεις κενού και ταχύτητας αναφορικά με το προπορευόμενο όχημα και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$a_{i,k+1} = k_2 e_{i,k} + k_3 (V_{i-1,k} - V_{i,k}), k_2 k_3 > 0 \text{ (f)}$$



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 (Shen 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  $0,2\text{m}$  και  $0,1\text{m/s}$  αντίστοιχα.

### Λειτουργία Ελέγχου Κλεισίματος Κενού (Gap-Closing Control Mode)

Η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται όταν η απόσταση μεταξύ ενός οχήματος με το προπορευόμενο είναι μικρότερη των  $100$  μέτρων 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  $100$  μέτρα και  $120$  μέτρα 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, 2018).

### 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  $100$  μέτρων και η απόκλιση κενού είναι αρνητική.

## Πρότυπο Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας

Στη συνέχεια του προτύπου του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας το μοντέλο για τα συνδεδεμένα οχήματα είναι αυτό του Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC). Τον συγκεκριμένο αλγόριθμο τον διέπουν λειτουργίες με παρόμοια χαρακτηριστικά αυτών του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας.

### Λειτουργία Ελέγχου Ταχύτητας (Speed Control Mode)

Η λειτουργία του ελέγχου ταχύτητας ενεργοποιείται όταν οι αισθητήρες του οχήματος δεν ανιχνεύουν προπορευόμενα οχήματα στην περιοχή ελέγχου ή όταν υπάρχει χρονικό κενό μεταξύ δύο οχημάτων της τάξεως των  $2$  δευτερολέπτων.

Λειτουργία Ελέγχου Κενού (Gap Control mode)

Η λειτουργία του ελέγχου κενού ενεργοποιείται ώστε να διατηρείται ένα σταθερό χρονικό κενό μεταξύ ενός οχήματος εξοπλισμένου με τεχνολογία Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας και του προπορευόμενου του. Αυτή η λειτουργία ενεργοποιείται όταν υπάρχει απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων μικρότερη των 200 μέτρων

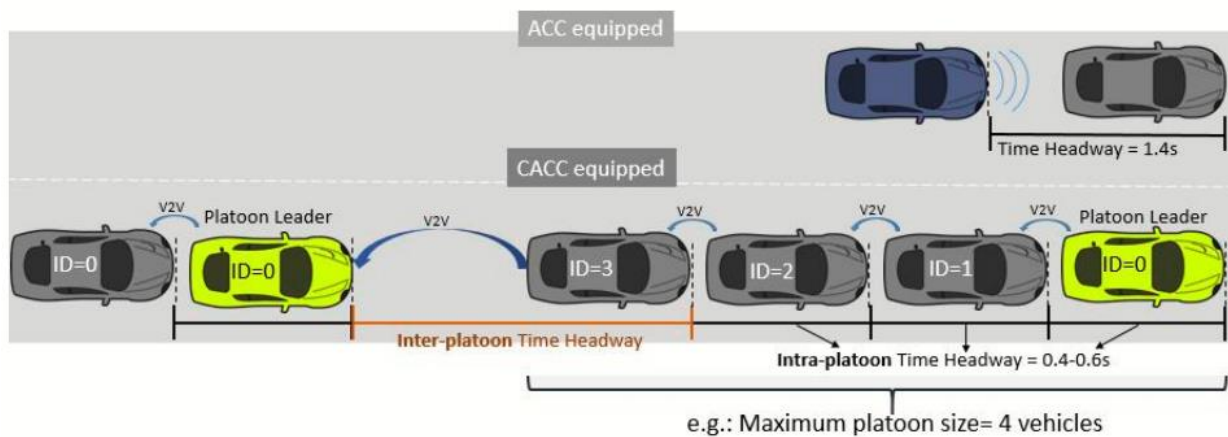
Λειτουργία Ελέγχου Κλεισίματος Κενού (Gap-Closing Control Mode)

Η λειτουργία ελέγχου κλεισίματος κενού επιτρέπει την ομαλή μετάβαση από την λειτουργία ελέγχου ταχύτητας στην λειτουργία ελέγχου κενού και ενεργοποιείται όταν το χρονικό κενό μεταξύ δύο οχημάτων είναι 1,5 δευτερόλεπτο.

Λειτουργία Ελέγχου Αποφυγής Σύγκρουσης (Collision Avoidance Control Mode)

Η λειτουργία αυτή αποτρέπει τις συγκρούσεις από όπισθεν όταν επικρατούν κρίσιμες συνθήκες για την ασφάλεια. Ενεργοποιείται όταν το χρονικό κενό μεταξύ δύο οχημάτων είναι μικρότερο από 1,5 δευτερόλεπτο.

Τα συνδεδεμένα οχήματα παρουσιάζουν την βέλτιστη απόδοσή τους στο δίκτυο όταν δημιουργούν φάλαγγα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Φάλαγγα Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Πηγή: Paterlini, 2020)

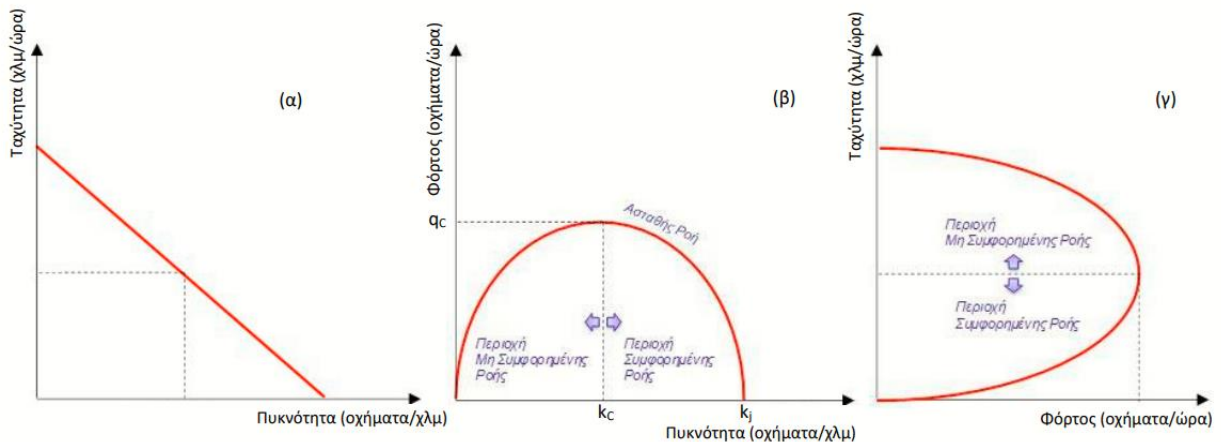
### 3.6 Θεμελιώδη Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ροής

Η θεωρία της κυκλοφοριακής ροής εξετάζει τις κινήσεις των οχημάτων και των πεζών σε μια οδό, σε μακροσκοπικό και μικροσκοπικό επίπεδο. Τα τρία βασικά μακροσκοπικά κυκλοφοριακά μεγέθη είναι: ο κυκλοφοριακός φόρτος, η μέση ταχύτητα και η πυκνότητα. Σύμφωνα με τα μεγέθη αυτά κατασκευάζονται τα θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής, τα οποία φαίνονται στο Διάγραμμα 6. Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους θα εξεταστούν τα αντίστοιχα μεγέθη σε επίπεδο οδού.

Με τη θεώρηση ότι η ταχύτητα και η πυκνότητα συνδέονται με μια γραμμική σχέση, παράγονται τα εξής θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο οδού:

- Ταχύτητας-πυκνότητας
- Ταχύτητας-φόρτου
- Φόρτου-πυκνότητας

Από αυτά τα διαγράμματα, αναλυτικότερα θα εξεταστεί το διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας, καθώς από αυτό προκύπτουν σημαντικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας, όπως η κυκλοφοριακή ικανότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά αποτυπώνουν ικανοποιητικά την απόδοση της κυκλοφορίας και μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους όταν εξετάζονται διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας του οδικού δικτύου.



Διάγραμμα 6: Θεμελιώδη Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ροής (Πηγή: Φραντζεσκάκης, Γκόλιας, Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, (2009), Κυκλοφοριακή Τεχνική)

Στο διάγραμμα Φόρτου-Πυκνότητας εμφανίζονται δύο διαφορετικές περιοχές. Στα αριστερά υπάρχει η περιοχή μη συμφορημένης ή ελεύθερης ροής και δεξιά η περιοχή συμφορημένης ροής ή κορεσμού. Όπως είναι προφανές για μηδενικό φόρτο, δηλαδή όταν κανένα όχημα δεν περνάει από το οδικό τμήμα που εξετάζεται, η πυκνότητα του τμήματος είναι επίσης μηδενική. Μηδενικός φόρτος όμως παρουσιάζεται και στο σημείο  $k_j$ , δηλαδή στη μέγιστη πυκνότητα κορεσμού. Αυτό σημαίνει ότι το οδικό τμήμα είναι πλήρως κατειλημμένο από οχήματα και αυτά είναι πλήρως ακινητοποιημένα.

Χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος είναι το  $q_c$  όπου εμφανίζεται ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος ή κυκλοφοριακή ικανότητα, και το  $k_c$ , όπου ονομάζεται κρίσιμη πυκνότητα ή το ήμισυ της πυκνότητας κορεσμού. Γίνεται παρατήρηση πως ξεκινώντας με μηδενικό φόρτο και μηδενική πυκνότητα και αυξάνοντας τον φόρτο, η πυκνότητα αυξάνεται επίσης μέχρι το σημείο της κρίσιμης πυκνότητας. Αυτό είναι το σημείο του μέγιστου φόρτου που μπορεί να εξυπηρετήσει το οδικό τμήμα, δηλαδή την κυκλοφοριακή ικανότητα. Από εκείνο το σημείο τα οχήματα αρχίζουν να συσσωρεύονται, η πυκνότητα συνεχίζει να αυξάνεται, ενώ παράλληλα η ταχύτητα μειώνεται λόγω γραμμικότητας και ο φόρτος μειώνεται.

Όλα τα παραπάνω έχουν προκύψει από τη θεώρηση πως οι θεμελιώδεις σχέσεις μεταξύ των μακροσκοπικών μεγεθών της κυκλοφορίας προκύπτουν από ομογενή και στάσιμη κυκλοφορία. Πραγματικές μετρήσεις, ωστόσο, δείχνουν ότι η κυκλοφορία δεν είναι ούτε ομογενής, ούτε στάσιμη.

Παρότι υπάρχει αναλυτικό θεωρητικό υπόβαθρο, ωστόσο η ύπαρξή τους σε μακροσκοπικό επίπεδο, δείχθηκε πειραματικά σχετικά πρόσφατα από Daganzo και Geroliminis (2008).

Η έρευνα αφορούσε μικρές περιοχές, οι οποίες είχαν έκταση της τάξης των 10 χλμ<sup>2</sup>, με ομογενή κυκλοφοριακή συμπεριφορά, στις οποίες η ζήτηση για μετακίνηση μεταβαλλόταν σχετικά αργά. Σταθεροί μετρητές, αλλά και οχήματα ταξί εξοπλισμένα με GPS πραγματοποιούσαν μετρήσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε περιοχές με τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορεί να υπάρξουν ικανοποιητικά μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα, τα οποία συνδέουν τα μεγέθη της ταχύτητας, της πυκνότητας και του φόρτου. Σημαντικό είναι ότι τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι ανεξάρτητα της ζήτησης,

που σημαίνει ότι εξαρτώνται μόνο από την προσφορά, δηλαδή το οδικό σύστημα και τα διαθέσιμα μεταφορικά μέσα.

Οι σταθεροί μετρητές της κυκλοφορίας παρείχαν μετρήσεις του φόρτου και της κατάληψης και πραγματοποιούνταν ανά 5 λεπτά. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψουν τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα είναι :

$$q^w = \frac{\sum_i q_i l_i}{\sum_i l_i} \quad (2.4.1) \quad q^u = \frac{\sum_i q_i}{\sum_i l_i} \quad (2.4.2) \quad o^w = \frac{\sum_i o_i l_i}{\sum_i l_i} \quad (2.4.3) \quad o^u = \frac{\sum_i o_i}{\sum_i l_i} \quad (2.4.4)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, για κάθε 5 λεπτά, τα  $q_i$  και  $l_i$  που αφορούν κάποιο οδικό τμήμα και το μήκος του αντίστοιχα, τα  $q_i$  και  $o_i$ , είναι οι ανεπεξέργαστες μετρήσεις του φόρτου και της κατάληψης αντίστοιχα, τα  $q^w$  και  $o^w$ , είναι οι αντίστοιχοι σταθμισμένοι μέσοι όροι και  $q^u$  και  $o^u$ , οι αστάθμιστοι. Ο σταθμισμένος και ο αστάθμιστος όρος της πυκνότητας  $k^w$  και  $k^u$ , προκύπτουν από την διαίρεση της αντίστοιχης κατάληψης με το μέσο μήκος ενός οχήματος  $s$ , το οποίο υπολογίζεται στα 5,5 μέτρα.

Οι μετρήσεις από τα εξοπλισμένα ταξί με GPS έδωσαν αποτελέσματα όσον αφορά στη συνολική απόσταση και τη συνολική ώρα μετακίνησης τους στην περιοχή μελέτης. Από αυτά τα δεδομένα προέκυψε η ταχύτητα, διαιρώντας την απόσταση με τον χρόνο, ώστε να δημιουργηθούν τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα.

Οι μετρήσεις, οι οποίες προέκυψαν από τα ταξί μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάνοντας χρήση των γενικευμένων ορισμών για την μέση πυκνότητα και τον μέσο κυκλοφοριακό φόρτο σε επίπεδο δικτύου (Edie, 1965) :

$$q^w = \frac{\sum_1^l d}{LT} \quad (2.4.5) \quad k = \frac{\sum_1^l d}{LT} \quad (2.4.6)$$

Στους συγκεκριμένους ορισμούς  $l$  είναι ο αριθμός των συνολικών μετακινήσεων που καταγράφηκαν,  $i$  είναι κάθε μία από αυτές τις μετακινήσεις,  $q$  και  $k$  είναι αντίστοιχα ο κυκλοφοριακός φόρτος και η πυκνότητα,  $d_i$  και  $t_i$  είναι η απόσταση και ο χρόνος κάθε μετακίνησης,  $L_n$  και  $T$ , είναι το συνολικό μήκος του οδικού δικτύου και ο χρόνος της κάθε μέτρησης, που στην περίπτωση μας είναι τα 5 λεπτά. Οι αποστάσεις και οι χρόνοι είναι

μετρημένοι σε ίδιες μονάδες, ώστε να μην υπάρξει σύγχυση και είναι τα χιλιόμετρα για την απόσταση και τα δευτερόλεπτα για τον χρόνο .

Πολλές έρευνες έχουν ασχοληθεί με την δημιουργία του μακροσκοπικού θεμελιώδους διαγράμματος φόρτου-πυκνότητας (Du et al., 2016) , όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τα GPS των κινητών τηλεφώνων. Πραγματοποιήθηκαν προσαρμογές στις εξισώσεις (2.4.5) και (2.4.6), ώστε να συνεκτιμηθεί το ποσοστό διείσδυσης των ταξί και των κινητών τηλεφώνων αντίστοιχα στις περιοχές που βρίσκονται υπό μελέτη.

Έχει παρατηρηθεί ότι το μακροσκοπικό θεμελιώδες διάγραμμα πυκνότητας-φόρτου προκύπτει με συστηματικά σφάλματα. Για να αποφευχθούν τα σφάλματα αυτά πρέπει να παρέχονται πλήρης δεδομένα για τις πορείες όλων των οχημάτων του δικτύου, μέσω προσομοιωτών κυκλοφορίας και κάνοντας χρήση των γενικευμένων εξισώσεων του Edie (2.5 και 2.6) (Leclercq et al., 2014). Σ' αυτή την έρευνα έγινε σύγκριση δύο μεθόδων καθορισμού του διαγράμματος πυκνότητας-φόρτου , μια αναλυτική-γραφική μέθοδο και μια προσομοιώνοντας τα δεδομένα , τα οποία λήφθηκαν από πραγματικές μετρήσεις κυκλοφορίας, όπως κυκλοφοριακούς φόρτους.

Με χρήση των γενικευμένων εξισώσεων του Edie σε όλες τις πορείες των προσομοιωμένων οχημάτων προέκυψε πως η αναλυτική μέθοδος βγάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, όπως για παράδειγμα αν το οδικό δίκτυο αποτελείται από ομογενή οδικά τμήματα χωρίς στροφές. Η έρευνα κατέληξε επίσης στο συμπέρασμα πως οι σταθεροί μετρητές της κυκλοφορίας δεν εξάγουν σωστά αποτελέσματα, αν εφαρμοστούν μόνο αυτοί .

Στην έρευνά τους, οι Lu et al. (2019) διερεύνησαν μέσω των θεμελιωδών διαγραμμάτων την επίπτωση των αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφοριακή ικανότητα . Χρησιμοποίησαν το πρόγραμμα μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO (SUMO, 2020) και δημιούργησαν δύο σενάρια προσομοίωσης. Το ένα αφορούσε ένα τεχνητό πλέγμα με 60 κόμβους , εκ των οποίων 36 διασταυρώσεις οχημάτων, και το άλλο ενός πραγματικού δικτύου εντός 5 κεντρικών οδών στην Βουδαπέστη, εκ των οποίων τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν από την ανάλυση 30 επιλεγμένων οδικών τμημάτων.

Η εισαγωγή των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων έγινε ως ατομικά οχήματα με πιο ανεπτυγμένα χαρακτηριστικά από τα συμβατικά οχήματα, όπως μικρότερη απόσταση

μεταξύ του εξεταζόμενου οχήματος και του αμέσως μπροστινού του σε συνθήκες συμφόρησης. Η ενσωμάτωσή τους στην κυκλοφορία έγινε με διεισδύσεις από 0% έως 100%, δηλαδή από εξ ολοκλήρου συμβατικά οχήματα σε εξ ολοκλήρου συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα .

Κάνοντας χρήση μιας νέας ημι-παραμετρικής σχέσης ταχύτητας-πυκνότητας, η οποία συνυπολογίζει το ποσοστό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των μακροσκοπικών θεμελιωδών διαγραμμάτων. Η σχέση αυτή υπολογίστηκε μέσω γενικευμένων προσθετικών προτύπων. Οι τιμές που ήταν απαραίτητες για την χρήση της εξίσωσης αυτής υπολογίστηκαν από την προσομοίωση. Έτσι με τη χρήση της εξίσωσης αυτής καθώς και με άλλες θεμελιώδεις σχέσεις της κυκλοφοριακής ροής, δημιουργήθηκαν τα ζητούμενα διαγράμματα και για τα δύο σενάρια.

Η έρευνα συμπεραίνει πως η κυκλοφοριακή ικανότητα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων και για τα δύο σενάρια, κατά 16.01% για 100% διείσδυση στο σενάριο του πλέγματος και κατά 25% στο σενάριο του πραγματικού δικτύου. Η κρίσιμη πυκνότητα αυξάνεται αργά στην αρχή και πιο έντονα μετά την αύξηση της διείσδυσης πάνω από 40%. Άρα, γίνεται αντιληπτό ότι τα αυτόνομα και συνδεδεμένα οχήματα έχουν σημαντική προοπτική να αυξήσουν την κυκλοφοριακή ικανότητα.

## 4.ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

---

### 4.1 Συλλογή Δεδομένων και Κατάστρωση Προτύπου

#### 4.1.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Δικτύου, Φόρτοι και Σηματοδότηση

Για την εξέταση των ζητούμενων κυκλοφοριακών συνθηκών μέσω των δεκαέξι διαφορετικών σεναρίων, αξιοποιήθηκε ένα έτοιμο πακέτο δεδομένων, τα οποία περιείχαν το δίκτυο του δακτυλίου της Αθήνας έτοιμο περασμένο σε λογισμικό SUMO, έχοντας ήδη γίνει οι κατάλληλες τροποποιήσεις, ένα αρχείο xml στο οποίο περιείχονταν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι που είχαν μετρηθεί από διάφορους φωρατές, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί σε διάφορα σημεία του δακτυλίου της Αθήνας, καθώς και η σηματοδότηση των κόμβων του δακτυλίου έτοιμη στο λογισμικό SUMO. Το πακέτο των δεδομένων αυτών, παραχωρήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής από τον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

#### 4.1.2 Κωδικοποίηση Δικτύου

Το οδικό δίκτυο προέκυψε από δεδομένα κρατικών πηγών και εταιριών πλοήγησης και χαρτών. Η συγκεκριμένη περιοχή του κέντρου της Αθήνας (Εικόνα 6) αποτελεί μία έκταση, η οποία καθιστά δυνατό έναν λεπτομερή εποπτικό έλεγχο και τα αποτελέσματα της έρευνας θα είναι αντιπροσωπευτικά.

Όπως αναφέρθηκε το δίκτυο της Αθήνας δόθηκε έτοιμο σε λογισμικό SUMO όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Παρόλα αυτά ακολουθήθηκε μια σταδιακή διαδικασία για την διόρθωση σφαλμάτων και επικαιροποίηση στοιχείων γεωμετρίας, οι οποίες έχουν προκύψει από αλλαγές όπως για παράδειγμα τις αλλαγές που επέφερε ο Μεγάλος Περίπατος των Αθηνών.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για διορθώσεις και επικαιροποιήσεις στα συστήματα φωτεινής σηματοδότησης και στη σήμανση.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ



Εικόνα 6 : Περιοχή Μελέτης σε περιβάλλον Google-Maps



Εικόνα 7: Δίκτυο Μελέτης σε Περιβάλλον (SUMO)

### 4.1.3 Παραμετροποίηση Κυκλοφοριακών Προτύπων

Όπως έχει αναφερθεί για την προσομοίωση των σεναρίων επιλέχθηκαν μικροσκοπικά πρότυπα μελέτης, καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως για την έρευνα της επίδρασης των τεχνολογιών επικοινωνίας στα οδικά δίκτυα. Για την αναπαράσταση των συμβατικών οχημάτων επιλέχθηκε το μικροσκοπικό πρότυπο ακολουθούντων οχημάτων του Krauss. Σύμφωνα με τους (Adamidis et al., 2020) τα προφίλ οδήγησης είναι: σύνηθες, επιθετικό και αμυντικό. Καθένα από αυτά τα προφίλ παραμετροποιήθηκε όπως φαίνεται στους Πίνακες 2,3 και 4.

Πίνακας 2: Παράμετροι Μοντέλου Krauss

Παράμετροι Krauss	Σύνηθες	Επιθετικό	Αμυντικό
sigma	0,5	0,5	0,5
tau	1	1	1
accel(m/s <sup>2</sup> )	2,46	3,84	1,79
Decel(m/s <sup>2</sup> )	2,82	4,15	2,42
speedFactor	“normc(1,0.1,0.2,2)”	“normc(1,0.1,0.2,2)”	“normc(1,0.1,0.2,2)”

Για την αναπαράσταση των συνδεδεμένων οχημάτων επιλέχθηκε το πρότυπο Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (CACC) , του οποίου οι παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Παράμετροι Μοντέλου CACC

Παράμετροι CACC	
sigma	0,0
tau	1,6
accel(m/s <sup>2</sup> )	1,5
Decel(m/s <sup>2</sup> )	3
speedFactor	“normc(1,0.1,0.2,2)”
emergencyDecel	9,0
speedControlGain	0,4
gapClosingControlGainGap	0,005
gapClosingControlGainGapDot	0,05
gapControlGainGap	0,45
gapControlGainGapDot	0,0125
collisionAvoidanceGainGap	0,45
collisionAvoidanceGainGapDot	0,05

Τέλος, για την αναπαράσταση των αυτόνομων οχημάτων επιλέχθηκε το πρότυπο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (ACC) με τις ακόλουθες παραμέτρους, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Παράμετροι Μοντέλου ACC

<b>Παράμετροι ACC</b>	
<b>sigma</b>	<b>0,0</b>
<b>tau</b>	<b>1,6</b>
<b>accel(m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>1,5</b>
<b>Decel(m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>3</b>
<b>speedFactor</b>	<b>“normc(1,0.1,0.2,2)”</b>
<b>emergencyDecel</b>	<b>9,0</b>
<b>speedControlGain</b>	<b>0,4</b>
<b>gapClosingControlGainSpeed</b>	<b>0,8</b>
<b>gapClosingControlGainSpace</b>	<b>0,04</b>
<b>gapControlGainSpeed</b>	<b>0,07</b>
<b>gapControlGainSpace</b>	<b>0,23</b>
<b>collisionAvoidanceGainSpace</b>	<b>0,8</b>
<b>collisionAvoidanceGainSpeed</b>	<b>0,23</b>

Όλες οι παραπάνω παράμετροι, σε συνδυασμό με την δήλωση του προτύπου υπεισέρχονται στο αρχείο rou.xml, όπου εκεί βρίσκονται και το σύνολο των διαδρομών που πραγματοποιούν τα οχήματα (Εικόνα 8). Έτσι, το αρχείο rou.xml περιέχει το σύνολο των διαδρομών, τα πρότυπα που αναπαριστούν τα συμβατικά, τα συνδεδεμένα και τα αυτόνομα οχήματα, καθώς και οι παράμετροι των προτύπων. Συνολικά, δημιουργούνται δεκαέξι διαφορετικά αρχεία rou.xml, αφού η σύνθεση της κυκλοφορίας σε κάθε σενάριο αλλάζει και υπάρχει διαφορετικό ποσοστό διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων.

```
<vTypeDistribution id="scenario">
  <vType id="dau" carFollowModel="Krauss" accel="2.46" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)" length="4.3" colo
  <vType id="harsch" carFollowModel="Krauss" accel="3.84" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)" length="4.3" c
  <vType id="eco" carFollowModel="Krauss" accel="1.79" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)" length="4.3" dece
  <vType id="ACC" carFollowModel="ACC" color="yellow" probability="0.05"/>
  <vType id="CACC" carFollowModel="CACC" color="yellow" probability="0.05"/>
</vTypeDistribution>
```

Εικόνα 8: Απόσπασμα Αρχείου rou.xml, VTypeDistribution

## 4.2 Δημιουργία Αρχείου Προσομοίωσης

Για την έρευνα της επίδρασης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία όπως έχει αναφερθεί δημιουργήθηκαν δεκαέξι διαφορετικά σενάρια, τα οποία διαφέρουν στο ποσοστό δεισδυσής τους στην κυκλοφορία. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν δεκαέξι αρχεία προσομοίωσης (Εικόνα 9) configuration .sumocfg.

```
<configuration>

<input>

  <net-file value="AthensRing.net.xml"/>

  <route-files value="route.rou.xml"/>

  <additional-files value="meandata.add.xml"/>

</input>

<time>
  <end value="3900"/>
</time>

<processing>
  <collision.action value="none"/>
</processing>

<report>
  <no-warnings value="True"/>
</report>

<output>

<tripinfo-output value="tripinfos.xml"/>

</output>

</configuration>
```

Εικόνα 9: Απόσπασμα Αρχείου Προσομοίωσης

Στο συγκεκριμένο αρχείο ορίστηκαν ως αρχεία εισόδου το δίκτυο, όπως αυτό δόθηκε από το πακέτο δεδομένων και η μορφή του φαίνεται στην εικόνα 7.

Δεύτερο αρχείο εισόδου ήταν η εισαγωγή της κυκλοφοριακής ζήτησης στο δίκτυο. Αυτό γίνεται μέσω ενός αρχείου τύπου .rou.xml (Εικόνα 10), το οποίο περιέχει τόσο το σύνολο των διαδρομών τις οποίες χρησιμοποιεί καθένα από τα οχήματα, όσο και πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των οχημάτων, καθώς και των παραμέτρων των προτύπων αναπαράστασης των οχημάτων. Τα χαρακτηριστικά των προτύπων και των οχημάτων θα παρουσιαστούν σε πίνακες παρακάτω.

```
<vTypeDistribution id="scenariola">
  <vType id="dau" accel="2.46" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)" length="4.3" color="red" decel="2.82" pr
  <vType id="harsch" accel="3.84" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)" length="4.3" color="blue" decel="4.15'
  <vType id="eco" accel="1.79" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)" length="4.3" decel="2.42" color="green" }
  <vType id="CACC" sigma="0.0" tau="1.6" accel="1.5" decel="3.0" color="yellow" speedFactor="normc(1,0.1
</vTypeDistribution>
<vehicle id="0" type="scenariola" depart="0.00">
  <route edges="358305 358349 358397 678894 358385 555024 555140 555520 555512 555492 553000 552996 !
</vehicle>
<vehicle id="1" type="scenariola" depart="0.04">
  <route edges="552272 552202 552142 552134 552136 552100 552094 552092 552078"/>
</vehicle>
<vehicle id="2" type="scenariola" depart="0.08">
  <route edges="546852 552858 555466 555274 555266 555258 555264 555292 555298 555598 555326 678919 !
</vehicle>
<vehicle id="3" type="scenariola" depart="0.13">
  <route edges="555378 555408 555146 555148 661331 555152 661387 552934 552938"/>
</vehicle>
<vehicle id="4" type="scenariola" depart="0.17">
  <route edges="552946 552960 646331 552936 552916 555380 661391 661341 555378 555408 555144 555110 !
</vehicle>
```

Εικόνα 10 : Απόσπασμα Αρχείου rou.xml

Τρίτο αρχείο εισόδου ήταν ένα επιπρόσθετο αρχείο τύπου meandata.add.xml (Εικόνα 11), το οποίο περιέχει πληροφορίες μεταξύ άλλων και για την ταχύτητα σε μέτρα/δευτερόλεπτο, καθώς και για την πυκνότητα, χρήσιμων μακροσκοπικών μεγεθών για την δημιουργία των θεμελιωδών διαγραμμάτων κυκλοφοριακής ροής.

```
1 <additional>
2   <edgeData id="meandata" freq="300" file="C:\Users\Public\MeanDatascenario.xml" excludeEmpty="TRUE"/>
3 </additional>
```

Εικόνα 11: Απόσπασμα Αρχείου add.xml

Η λήξη της προσομοίωσης (end value) ορίστηκε στην μία ώρα, 3600 δευτερόλεπτα, καθώς αυτή η χρονική διάρκεια είναι η πλέον κατάλληλη προκειμένου να προκύψουν αντιπροσωπευτικά δεδομένα για την μελέτη ενός οδικού δικτύου. Στα σενάρια όπου συμβατικά οχήματα συνυπάρχουν με συνδεδεμένα ορίστηκε ακόμα μία μεταβλητή χρόνου και συγκεκριμένα “step-length value = 0.1”, καθώς θεωρείται ότι τα συνδεδεμένα οχήματα έχουν γρηγορότερη αντίδραση στα διάφορα ερεθίσματα που μπορεί να προκύψουν κατά την διάρκεια της κίνησής τους.

Ως αρχεία εξόδου ορίστηκαν τα tripinfos, το οποίο μεταξύ άλλων δίνει πληροφορίες για την διάρκεια του ταξιδιού duration, το lanechange.xml, το οποίο καταγράφει όλα τα οχήματα, τα οποία πραγματοποίησαν αλλαγή λωρίδας και το amitran.xml, το οποίο περιέχει πληροφορίες για την ταχύτητα και την επιτάχυνση του κάθε οχήματος κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς και το αρχείο meandata.xml (Εικόνα 12), το οποίο μεταξύ άλλων περιέχει και αποτελέσματα για την πυκνότητα και την μέση ταχύτητα, τα οποία είναι χρήσιμα για την δημιουργία των θεμελιωδών διαγραμμάτων κυκλοφοριακής ροής.

```
<edge id="358303" sampledSeconds="49.63" traveltime="5.32" overlapTraveltime="5.75" density="3.04" laneDensity="1.52" occupancy="0.64" waitingT
<edge id="358305" sampledSeconds="849.94" traveltime="8.40" overlapTraveltime="8.80" density="52.26" laneDensity="26.13" occupancy="11.19" wait
<edge id="358333" sampledSeconds="7.65" traveltime="3.76" overlapTraveltime="4.14" density="0.62" laneDensity="0.62" occupancy="0.25" waitingTi
<edge id="358335" sampledSeconds="124.46" traveltime="7.19" overlapTraveltime="7.65" density="10.16" laneDensity="10.16" occupancy="4.25" waiti
<edge id="358337" sampledSeconds="85.14" traveltime="6.76" overlapTraveltime="7.26" density="4.73" laneDensity="4.73" occupancy="1.94" waitingT
<edge id="358339" sampledSeconds="114.63" traveltime="13.71" overlapTraveltime="14.47" density="3.49" laneDensity="3.49" occupancy="1.47" waiti
<edge id="358341" sampledSeconds="57.52" traveltime="6.36" overlapTraveltime="6.82" density="3.18" laneDensity="3.18" occupancy="1.34" waitingT
<edge id="358343" sampledSeconds="1884.65" traveltime="146.50" overlapTraveltime="148.71" density="21.45" laneDensity="21.45" occupancy="9.45"
<edge id="358345" sampledSeconds="212.87" traveltime="26.21" overlapTraveltime="26.61" density="2.57" laneDensity="2.57" occupancy="1.08" waiti
<edge id="358347" sampledSeconds="105.64" traveltime="10.13" overlapTraveltime="10.57" density="3.41" laneDensity="1.14" occupancy="0.48" waiti
<edge id="358349" sampledSeconds="961.19" traveltime="9.76" overlapTraveltime="10.33" density="31.00" laneDensity="10.33" occupancy="4.33" wait
<edge id="358353" sampledSeconds="49.65" traveltime="5.85" overlapTraveltime="6.26" density="2.65" laneDensity="2.65" occupancy="1.07" waitingT
<edge id="358355" sampledSeconds="324.88" traveltime="11.36" overlapTraveltime="12.14" density="15.44" laneDensity="15.44" occupancy="6.41" wai
<edge id="358357" sampledSeconds="29.84" traveltime="14.84" overlapTraveltime="15.59" density="1.01" laneDensity="1.01" occupancy="0.42" waitin
<edge id="358359" sampledSeconds="697.98" traveltime="21.98" overlapTraveltime="22.41" density="10.20" laneDensity="10.20" occupancy="4.29" wai
<edge id="358361" sampledSeconds="32.93" traveltime="10.25" overlapTraveltime="10.98" density="1.12" laneDensity="1.12" occupancy="0.46" waitin
<edge id="358363" sampledSeconds="160.20" traveltime="10.69" overlapTraveltime="11.51" density="5.43" laneDensity="5.43" occupancy="2.24" waiti
<edge id="358365" sampledSeconds="33.06" traveltime="36.64" overlapTraveltime="37.60" density="3.43" laneDensity="3.43" occupancy="1.45" waitin
<edge id="358369" sampledSeconds="20.11" traveltime="9.76" overlapTraveltime="10.27" density="0.72" laneDensity="0.72" occupancy="0.30" waiting'
<edge id="358371" sampledSeconds="71.15" traveltime="14.26" overlapTraveltime="14.90" density="2.55" laneDensity="2.55" occupancy="1.07" waitin
<edge id="358373" sampledSeconds="1448.95" traveltime="55.84" overlapTraveltime="56.72" density="24.02" laneDensity="12.01" occupancy="5.14" wa
<edge id="358377" sampledSeconds="1496.39" traveltime="48.84" overlapTraveltime="49.92" density="32.79" laneDensity="16.40" occupancy="7.06" wa
<edge id="358379" sampledSeconds="1763.73" traveltime="73.81" overlapTraveltime="75.64" density="38.66" laneDensity="19.33" occupancy="8.34" wa
<edge id="358385" sampledSeconds="1017.30" traveltime="31.18" overlapTraveltime="31.59" density="10.07" laneDensity="5.03" occupancy="2.20" wai
<edge id="358387" sampledSeconds="64.06" traveltime="4.76" overlapTraveltime="5.19" density="4.19" laneDensity="1.40" occupancy="0.56" waitingT
<edge id="358389" sampledSeconds="609.50" traveltime="42.90" overlapTraveltime="43.80" density="5.27" laneDensity="5.27" occupancy="2.27" waiti
<edge id="358391" sampledSeconds="201.59" traveltime="41.38" overlapTraveltime="41.90" density="1.74" laneDensity="1.74" occupancy="0.74" waiti
<edge id="358393" sampledSeconds="165.60" traveltime="15.87" overlapTraveltime="16.79" density="5.02" laneDensity="5.02" occupancy="2.18" waiti
```

Εικόνα 12: Απόσπασμα Αρχείου meandata.xml



## 5.ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Μεθοδολογία Κυκλοφοριακής Ανάλυσης

Στόχος αυτής της ανάλυσης είναι να υπολογιστούν τα βασικά μακροσκοπικά κυκλοφοριακά μεγέθη της πυκνότητας, του φόρτου και της ταχύτητας για το σύνολο του εξεταζόμενου δικτύου. Οι γενικευμένες εξισώσεις του Edie μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ώστε να προκύψουν οι μέσες τιμές των μεγεθών αυτών στο ζητούμενο μακροσκοπικό επίπεδο.

Αρχικά, θα υπολογιστούν οι μέσες τιμές των μεγεθών της πυκνότητας και του φόρτου για χρονικές περιόδους ελέγχου 300 δευτερολέπτων, δηλαδή 5 λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι θα προκύψουν 12 χρονικές περίοδοι ελέγχου, που θα καλύπτουν και την 1 ώρα προσομοίωσης.

Στην πράξη, αυτά τα μεγέθη υπολογίστηκαν μέσω κώδικα σε προγραμματιστικό περιβάλλον R. Συγκεκριμένα, έγινε μετατροπή του meandata output σε μορφή csv. Κάναμε εισαγωγή του συγκεκριμένου αρχείου στο Rstudio (Εικόνα 13) και δημιουργήθηκε ένα μητρώο, το οποίο περιείχε όλα τα στοιχεία που περιέχει το συγκεκριμένο output. Στη συνέχεια έγινε εκκαθάριση των μηδενικών στοιχείων του μητρώου, καθώς τα μηδενικά στοιχεία δημιουργούν σύγχυση στην διαδικασία δημιουργίας των θεμελιωδών διαγραμμάτων ροής.

```
library(data.table)
a1 <- data.frame(read.csv2("C:/Users/Public/scenario1a/Meandatascenario1.csv", sep=";"))

for (i in (1:nrow(a1))) {
  if (a1$edge_sampledSeconds[i]=="0.00") {
    a1$edge_sampledSeconds[i] = "BLAH"
  }
}

a1$edge_sampledSeconds[a1$edge_sampledSeconds=="BLAH"]<-NA
a1<-na.omit(a1)
```

Εικόνα 13: Εισαγωγή αρχείου στο Rstudio και εκκαθάρισή του

Στη συνέχεια επειδή όπως προαναφέρθηκε μας ενδιαφέρει η μέση τιμή των μακροσκοπικών μεγεθών, δημιουργήθηκε ένα μητρώο, το οποίο έκανε χρονικό διαχωρισμό της προσομοίωσης σε δώδεκα κομμάτια των 300 δευτερολέπτων. Για κάθε χρονικό διάστημα υπολογίστηκε η μέση τιμή των μεγεθών της πυκνότητας, του φόρτου και της ταχύτητας. Οι παραπάνω διαδικασίες φαίνονται στην Εικόνα 14.

```
#create a times series vector
time <- data.frame(c("300.00", "600.00", "900.00", "1200.00", "1500.00", "1800.00",
                    "2100.00", "2400.00", "2700.00", "3000.00", "3300.00", "3600.00"))

#####
#density-speed
conv_density_speed_a1 <- matrix(0, ncol = 4, nrow = nrow(time))
conv_density_speed_a1 <- data.frame(conv_density_speed_a1)
colnames(conv_density_speed_a1) <- c("id", "mean_density", "mean_speed", "mean_flow")

for (i in (1:nrow(conv_density_speed_a1))) {
  guide <- time$c..300.00...600.00...900.00...1200.00...1500.00...1800.00...[i]
  slave <- matrix(0, ncol = 4, nrow = 1)
  slave <- data.frame(slave)
  colnames(slave) <- c("id", "density", "speed", "flow")
  for (j in (1:nrow(a1))) {
    if (a1$interval_end[j]==guide) {
      slave1 <- matrix(0, ncol = 4, nrow = 1)
      slave1 <- data.frame(slave1)
      colnames(slave1) <- c("id", "density", "speed", "flow")
      slave1$id[1] <- i
      slave1$density[1] <- a1$edge_density[j]
      slave1$speed[1] <- a1$edge_speed[j]
      slave1$speed <- as.numeric(slave1$speed)
      slave1$density <- as.numeric(slave1$density)
      slave1$speed[1] <- slave1$speed[1] * 3.6
      slave1$flow[1] <- slave1$density[1] * slave1$speed[1]
      slave <- rbind(slave, slave1)
    }
  }
  slave$density <- as.numeric(slave$density)
  slave$speed <- as.numeric(slave$speed)
  slave$flow <- as.numeric(slave$flow)
  conv_density_speed_a1$id[i] <- i
  conv_density_speed_a1$mean_density[i] <- mean(slave$density)
  conv_density_speed_a1$mean_speed[i] <- mean(slave$speed)
  conv_density_speed_a1$mean_flow[i] <- mean(slave$flow)
  rm('slave')
}
```

Εικόνα 14: Μητρώο Χρόνου και Υπολογισμός Μέσης Τιμής

## 5.2 Αποτελέσματα Κυκλοφοριακής Ανάλυσης

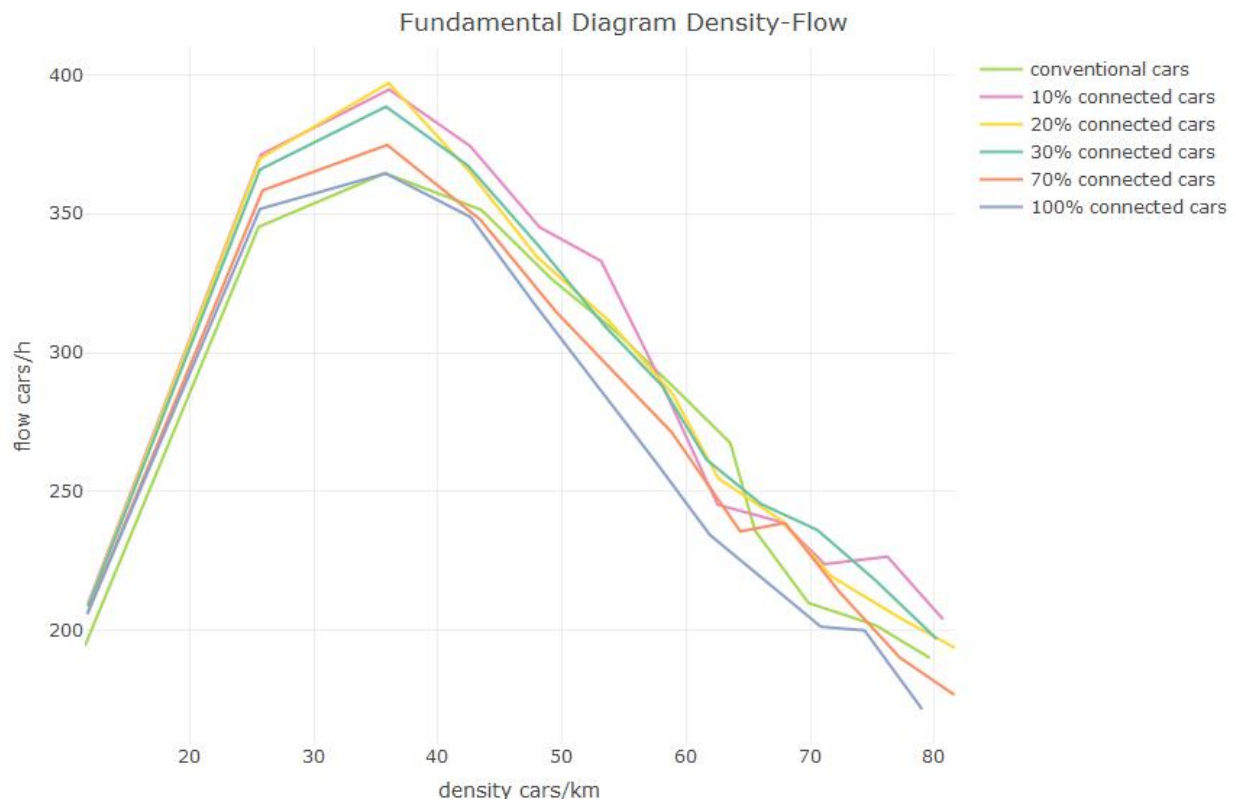
Για να γίνουν κατανοητά τα κυκλοφοριακά μεγέθη που υπολογίστηκαν παραπάνω πρέπει να τοποθετηθούν σε κατάλληλα διαγράμματα, ώστε να γίνουν σαφή τα χαρακτηριστικά του δικτύου στην περίπτωση διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην



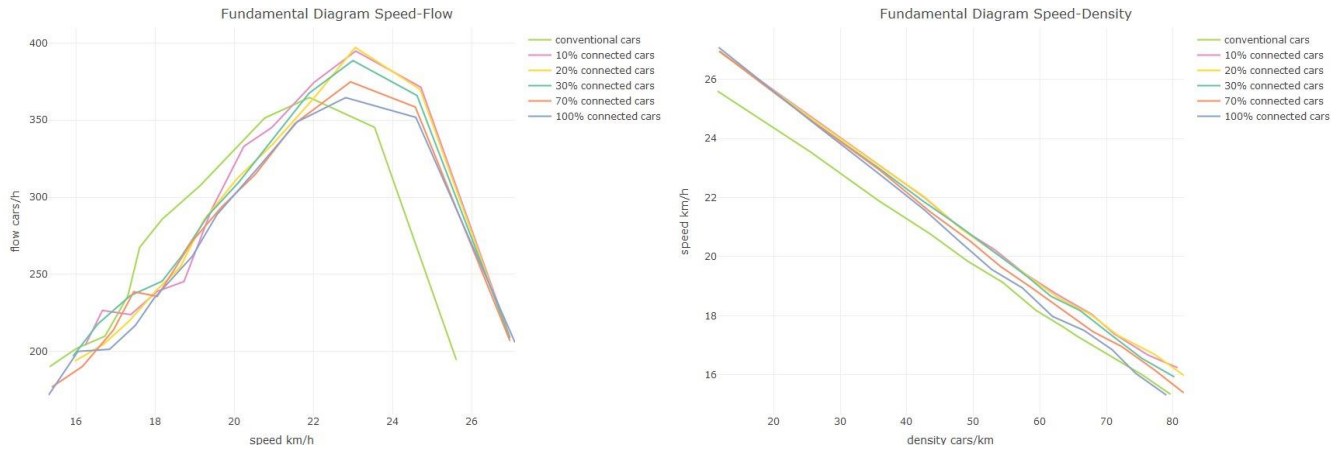
κυκλοφορία. Δημιουργήθηκαν μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα, όπου γίνεται σύγκριση των κυκλοφοριακών μεγεθών στις εξής περιπτώσεις :

- Συμβατικά οχήματα και συνδεδεμένα οχήματα σε ποσοστό 10%, 20%, 30%, 70% και 100%
- Συμβατικά οχήματα και αυτόνομα οχήματα σε ποσοστό 10%, 20%, 30%, 70% και 100%
- Συμβατικά οχήματα και συνδεδεμένα/αυτόνομα οχήματα σε ποσοστό 10%, 20%, 30%, 70% και 100%

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφεται παραπάνω σε προγραμματιστικό περιβάλλον R, δημιουργήθηκαν τα θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής( Διάγραμμα 7, Διάγραμμα 8). Σε αυτά αναπαριστώνται οι σχέσεις φόρτου-ταχύτητας, φόρτου-πυκνότητας και πυκνότητας-ταχύτητας για τα συμβατικά οχήματα και για τα διάφορα ποσοστά διείσδυσης των συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία.



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα Κυκλοφοριακού Φόρτου Ροής Πυκνότητας (συνδεδεμένα)

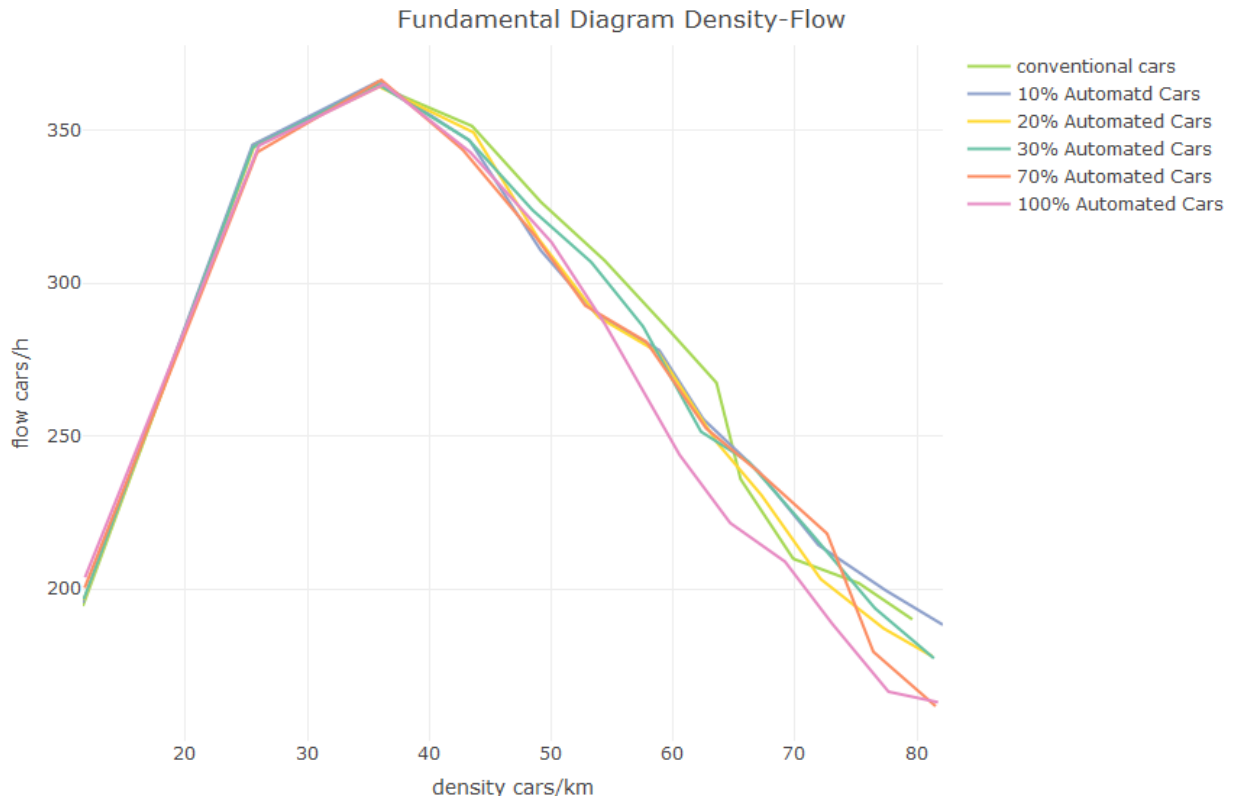


**Διάγραμμα 8:Θεμελιώδη Διαγράμματα Φόρτου-Ταχύτητας, Ταχύτητας-Πυκνότητας (συνδεδεμένα)**  
 Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα διαφαίνεται ότι σε ποσοστό διείσδυσης 20% των συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία επιτυγχάνεται η καλύτερη εξυπηρέτηση του δικτύου μελέτης, καθώς εμφανίζεται ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος ή κυκλοφοριακή ικανότητα του εξεταζόμενου δικτύου μελέτης. Στη συνέχεια για μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης, το δίκτυο ενώ παρουσιάζει καλύτερη αποδοτικότητα συγκριτικά με το σενάριο όπου το δίκτυο είναι φορτισμένο μόνο με συμβατικά οχήματα, οι τιμές του μέγιστου κυκλοφοριακού φόρτου ολοένα και μικραίνουν.

Όσον αφορά την ταχύτητα από τα διαγράμματα διαφαίνεται ότι η ενσωμάτωση συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία βελτιώνει την ταχύτητα κίνησης των οχημάτων για μεγάλους φόρτους. Η βέλτιστη ταχύτητα των οχημάτων επιτυγχάνεται για ποσοστό διείσδυσης 20%.

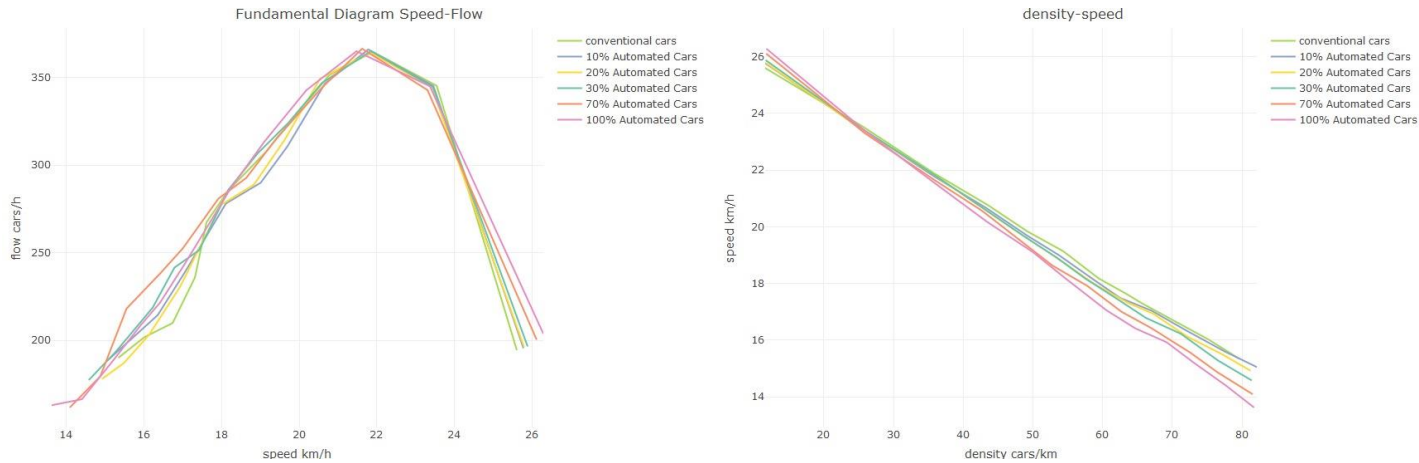
Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι συνολικά η ενσωμάτωση συνδεδεμένων οχημάτων βελτιώνει την απόδοση του δικτύου, με την μέγιστη βελτιστοποίηση να παρουσιάζεται για ποσοστό διείσδυσης 20%.

Παρουσιάζονται τα θεμελιώδη διαγράμματα φόρτου-πυκνότητας, ταχύτητας-πυκνότητας και ταχύτητας φόρτου των σεναρίων όπου το δίκτυο φορτίστηκε με συμβατικά οχήματα και με διάφορα ποσοστά διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία (Διάγραμμα 9, Διάγραμμα 10).



Διάγραμμα 9: Θεμελιώδες Διάγραμμα Φόρτου-Πυκνότητας (αυτόνομα)

Η ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία δεν φαίνεται να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην απόδοση του δικτύου. Ανεξάρτητα του ποσοστού διείσδυσης τους στην κυκλοφορία φαίνεται ότι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος ή κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού παραμένει σταθερός.



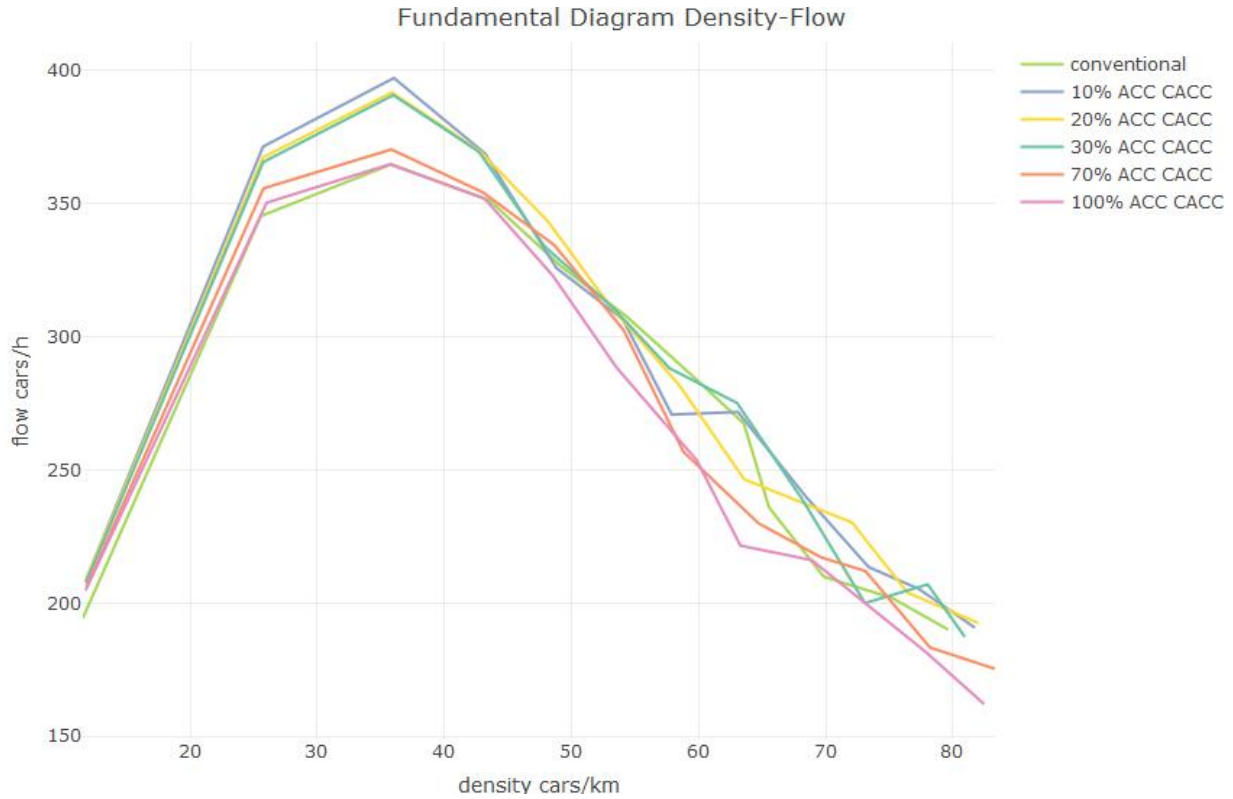
Διάγραμμα 10:Θεμελιώδη Διαγράμματα Φόρτου-Ταχύτητας, Ταχύτητας-Πυκνότητας (αυτόνομα)

Από τα διαγράμματα φόρτου-ταχύτητας και ταχύτητας-πυκνότητας φαίνεται ότι η ενσωμάτωση αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία μειώνει την ταχύτητα κίνησης στο δίκτυο. Αυτό γίνεται αντιληπτό ότι παρουσιάζεται μείωση της ταχύτητας από χαμηλούς φόρτους.

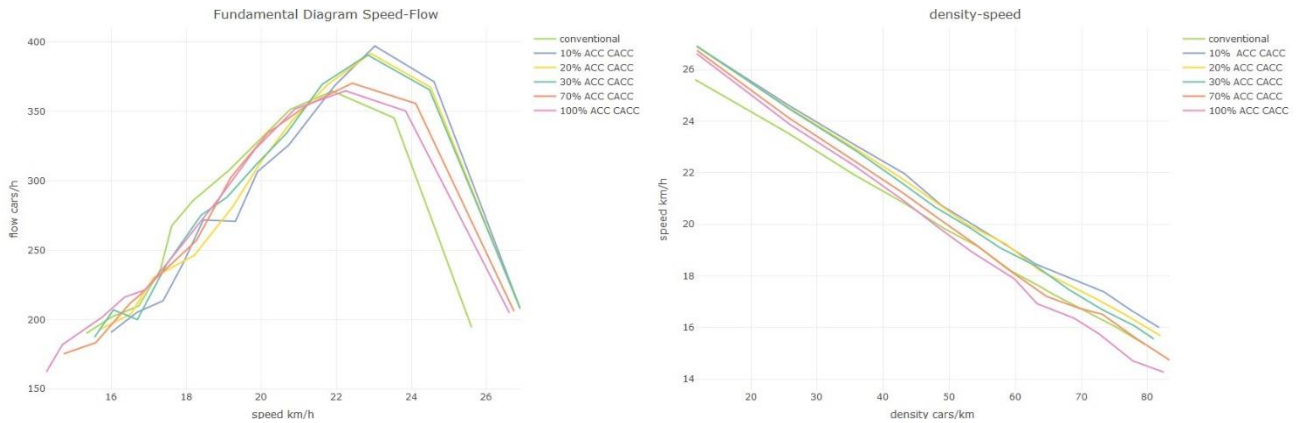
Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία δεν βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα μειώνει την ταχύτητα κίνησης σε χαμηλούς φόρτους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα θεμελιώδη διαγράμματα φόρτου-πυκνότητας,

ταχύτητας-πυκνότητας και ταχύτητας φόρτου των σεναρίων όπου το δίκτυο φορτίστηκε με συμβατικά οχήματα και με διάφορα ποσοστά διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία (Διάγραμμα 11, Διάγραμμα 12).



Διάγραμμα 11:Θεμελιώδες Διάγραμμα Φόρτου-Πυκνότητας (συνδεδεμένα-αυτόνομα)



Διάγραμμα 12:Θεμελιώδη Διαγράμματα Φόρτου-Ταχύτητας, Ταχύτητας-Πυκνότητας (συνδεδεμένα-αυτόνομα)

Η ενσωμάτωση συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία του εξεταζόμενου οδικού δικτύου αυξάνει τον μέγιστο κυκλοφοριακό φόρτο ή την κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού. Η καλύτερη απόδοση του δικτύου εμφανίζεται για ποσοστό διείσδυσής τους στην κυκλοφορία κατά 10%. Σε κάθε περίπτωση η απόδοση

του δικτύου φαίνεται καλύτερη με την ενσωμάτωση συνδεδεμένων οχημάτων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι για ποσοστά διείσδυσης μέχρι 30% η ενσωμάτωση αυτόνομων οχημάτων και συνδεδεμένων οχημάτων τείνει να αυξήσει την ταχύτητα των οχημάτων που χρησιμοποιούν το οδικό δίκτυο, καθώς παρουσιάζονται υψηλές ταχύτητες για υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους. Για ποσοστά διείσδυσης, τώρα, άνω των 30% φαίνεται από τα διαγράμματα ότι η ταχύτητα εξυπηρέτησης μειώνεται, καθώς για χαμηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους σημειώνονται χαμηλές ταχύτητες.

---

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

### 6.1 Σύνοψη Μεθοδολογικής Προσέγγισης

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της ενσωμάτωσης των συνδεδεμένων οχημάτων και των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μικροσκοπική προσομοίωση με χρήση του λογισμικού μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO. Δεδομένα για την υλοποίηση της εργασίας ήταν το δίκτυο του δακτυλίου της Αθήνας, οι κυκλοφοριακοί φόρτοι της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης, καθώς και η σηματοδότηση της περιοχής. Πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση και ως δεδομένα εξόδου επιλέχθηκαν αρχεία που θα περιείχαν πληροφορίες σχετικά με την πυκνότητα, την ταχύτητα και την κυκλοφοριακή ροή, ώστε να δημιουργηθούν τα θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής. Η διερεύνηση της απόδοσης του δικτύου με την ενσωμάτωση συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων έγινε κάνοντας ανάλυση των διαγραμμάτων αυτών.

### 6.2 Βασικά Συμπεράσματα

Η ανάλυση των θεμελιωδών διαγραμμάτων κυκλοφοριακής ροής ανέδειξε ότι η ενσωμάτωση συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία βελτιώνει την επάρκεια του οδικού δικτύου φτάνοντας την βέλτιστη απόδοση σε ποσοστό 20%. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία ανέδειξε βέλτιστη απόδοση του δικτύου σε ποσοστά άνω των 80%. Ωστόσο, για ποσοστά άνω των 80% περισσότερα οχήματα χρησιμοποίησαν το οδικό δίκτυο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα ποσοστά διείσδυσης συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία. Η ταχύτητα των οχημάτων που χρησιμοποιούν το δίκτυο φαίνεται να βελτιώνεται με την εισαγωγή των συνδεδεμένων οχημάτων, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερους χρόνους διαδρομής.

Η ενσωμάτωση, τώρα, αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία δεν βελτιώνει τις συνθήκες του εξεταζόμενου δικτύου, καθώς δεν παρουσιάζονται αισθητές διαφορές σε

σύγκριση με το σενάριο όπου μόνο συμβατικά οχήματα εισέρχονται στο δίκτυο. Μάλιστα, η ταχύτητα μειώνεται για χαμηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους, γεγονός που δείχνει ότι ο χρόνος διαδρομής μειώνεται ακόμα και όταν το δίκτυο δεν είναι συμφορημένο. Σε ποσοστό διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων 20% στο δίκτυο εισέρχεται ο μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων.

Η είσοδος συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο ταυτόχρονα παρουσιάζει θετικό αντίκτυπο για ποσοστά διείσδυσης μικρότερα των 30%. Για μεγαλύτερα ποσοστά μειώνεται η κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού και η ταχύτητα των οχημάτων.

Τέλος, όσον αφορά στην αξιολόγηση των μικροσκοπικών προτύπων προσομοίωσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων, δηλαδή του Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας και του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας, κρίνονται ως τα πλέον κατάλληλα για την διερεύνηση της επίδρασης σύγχρονων τεχνολογιών στην κυκλοφορία, καθώς γίνεται καλύτερη αξιοποίηση του δικτύου, καθώς εισέρχονται περισσότερα οχήματα στο οδικό δίκτυο.

### 6.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Στην διάρκεια πραγματοποίησης της συγκεκριμένης έρευνας, προέκυψαν κάποια ερευνητικά κενά, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα.

#### **Διερεύνηση των συνδεδεμένων οχημάτων με περισσότερες υπηρεσίες συνεργατικών ευφυών συστημάτων μεταφοράς.**

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία έγινε διερεύνηση της επιρροής των συνδεδεμένων οχημάτων στα αστικά οδικά δίκτυα όταν αυτά κάνουν χρήση της επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων και της υποδομής. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διερεύνηση της επιρροής τους στα αστικά οδικά δίκτυα, κάνοντας χρήση και άλλων υπηρεσιών που προφέρουν τα συνεργατικά ευφυή συστήματα μεταφορών, όπως η υπηρεσία επαναπροσδιορισμού της διαδρομής στην περίπτωση που υπάρξει κάποιο συμβάν το οποίο απορρυθμίζει την ομαλή λειτουργία του δικτύου.



### **Διερεύνηση των φάσεων σηματοδότησης**

Στην παρούσα εργασία φάνηκε ότι η σηματοδότηση επηρεάζει σημαντικά τα συνδεδεμένα οχήματα, καθώς εξαιτίας της σηματοδότησης διακόπτεται η φάλαγγα των συνδεδεμένων οχημάτων με αποτέλεσμα τα συνδεδεμένα οχήματα να απορρυθμίζονται. Ως εκ τούτου προτείνεται η διερεύνηση των φάσεων σηματοδότησης, ώστε τα συνδεδεμένα οχήματα να ρυθμίζουν την πορεία της κίνησής τους σύμφωνα με την σηματοδότηση και άλλοτε να επιταχύνουν ή να επιβραδύνουν.

### **Προσθήκη Μέσων Μαζικής Μεταφοράς στην Προσομοίωση**

Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η ενσωμάτωση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, τα οποία θα κάνουν χρήση των υπηρεσιών των συνεργατικών ευφυών συστημάτων μεταφοράς και να διερευνηθεί η επιρροή της ενσωμάτωσής τους στα αστικά οδικά δίκτυα.

### **Προσθήκη Πεζών στην Προσομοίωση**

Έρευνα για την επιρροή της ενσωμάτωσης πεζών στην προσομοίωση, ώστε να εξεταστεί η αλληλεπίδραση που έχουν οι πεζοί με τα συνδεδεμένα οχήματα, ιδιαίτερα όταν οι πεζοί κάνουν και αυτοί χρήση των υπηρεσιών των συνεργατικών ευφυών συστημάτων μεταφοράς.

## Βιβλιογραφία

---

2019. *How certain are the United Nations global population projections?*. United Nations.
- Acheampong, R., Cugurullo, F., Dusparic, I. and Guériau, M., 2019. An Examination of User Adoption Behavior of Autonomous Vehicles and Urban Sustainability Implications. *Transportation Research Procedia*, 41, pp.187-190.
- Adamidis, F., Mantouka, E. and Vlahogianni, E., 2020. Effects of controlling aggressive driving behavior on network-wide traffic flow and emissions. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(3), pp.263-276.
- Aria, E., Olstam, J. and Schwietering, C., 2016. Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver's Behavior and Traffic Performance. *Transportation Research Procedia*, 15, pp.761-770.
- Balal, E. and Cheu, R., 2019. A metric-concept map for scoping impact studies of a transportation project on environment and community health. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(2), pp.176-191.
- Björnberg, A., 1994. Control Design for Autonomous Intelligent Cruise Control. *IFAC Proceedings Volumes*, 27(12), pp.835-840.
- Daganzo, C. and Geroliminis, N., 2008. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), pp.771-781.
- Du, J., Rakha, H. and Gayah, V., 2016. Deriving macroscopic fundamental diagrams from probe data: Issues and proposed solutions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, pp.136-149.
- Du, J., Rakha, H. and Gayah, V., 2016. Deriving macroscopic fundamental diagrams from probe data: Issues and proposed solutions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, pp.136-149.
- Feng, S., Zhou, H. and Dong, H., 2019. Using deep neural network with small dataset to predict material defects. *Materials & Design*, 162, pp.300-310.
- Gipps, P., 1981. A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), pp.105-111.
- Goodall, N., Smith, B. and Park, B., 2013. Traffic Signal Control with Connected Vehicles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2381(1), pp.65-72.
- Haas, I. and Friedrich, B., 2017. Developing a micro-simulation tool for autonomous connected vehicle platoons used in city logistics. *Transportation Research Procedia*, 27, pp.1203-1210.

- Jiang, H., Hu, J., An, S., Wang, M. and Park, B., 2017. Eco approaching at an isolated signalized intersection under partially connected and automated vehicles environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, pp.290-307.
- Jiang, H., Hu, J., An, S., Wang, M. and Park, B., 2017. Eco approaching at an isolated signalized intersection under partially connected and automated vehicles environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, pp.290-307.
- Lu, M., Taiebat, M., Xu, M. and Hsu, S., 2018. Multiagent Spatial Simulation of Autonomous Taxis for Urban Commute: Travel Economics and Environmental Impacts. *Journal of Urban Planning and Development*, 144(4), p.04018033.
- 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*, 12(8), pp.540-549.
- Milanés, V. and Shladover, S., 2014. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, pp.285-300.
- Milanes, V., Villagra, J., Godoy, J., Simo, J., Perez, J. and Onieva, E., 2012. An Intelligent V2I-Based Traffic Management System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1), pp.49-58.
- Mintsis, E., Vlahogianni, E. and Mitsakis, E., 2020. Dynamic Eco-Driving near Signalized Intersections: Systematic Review and Future Research Directions. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 146(4), p.04020018.
- Navas, F. and Milanés, V., 2019. Mixing V2V- and non-V2V-equipped vehicles in car following. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 108, pp.167-181.
- Olia, A., Abdelgawad, H., Abdulhai, B. and Razavi, S., 2017. Optimizing the number and locations of freeway roadside equipment units for travel time estimation in a connected vehicle environment. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 21(4), pp.296-309.
- Olia, A., Razavi, S., Abdulhai, B. and Abdelgawad, H., 2017. Traffic capacity implications of automated vehicles mixed with regular vehicles. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 22(3), pp.244-262.
- Rios-Torres, J. and Malikopoulos, A., 2018. Impact of Partial Penetrations of Connected and Automated Vehicles on Fuel Consumption and Traffic Flow. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 3(4), pp.453-462.
- Sae.org. 2021. *SAE International Releases Updated Visual Chart for Its "Levels of Driving Automation" Standard for Self-Driving Vehicles*. [online] Available at: <<https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>> [Accessed 25 June 2021].

Sun, P., Zhao, X., Xu, Z., Wang, R. and Min, H., 2019. A 3D LiDAR Data-Based Dedicated Road Boundary Detection Algorithm for Autonomous Vehicles. *IEEE Access*, 7, pp.29623-29638.

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

Uhlemann, E., 2018. Time for Autonomous Vehicles to Connect [Connected Vehicles]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 13(3), pp.10-13.

Xiao, L., Wang, M., Schakel, W. and van Arem, B., 2018. Unravelling effects of cooperative adaptive cruise control deactivation on traffic flow characteristics at merging bottlenecks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 96, pp.380-397.

Yao, Z., Zhao, B., Yuan, T., Jiang, H. and Jiang, Y., 2020. Reducing gasoline consumption in mixed connected automated vehicles environment: A joint optimization framework for traffic signals and vehicle trajectory. *Journal of Cleaner Production*, 265, p.121836.

Zegers, J., Semsar-Kazerooni, E., Ploeg, J., van de Wouw, N. and Nijmeijer, H., 2018. Consensus Control for Vehicular Platooning With Velocity Constraints. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(5), pp.1592-1605.

ΦΡΑΝΤΖΕΣΚΑΚΗΣ, Ι., ΠΙΤΣΙΑΒΑ-ΛΑΤΙΝΟΠΟΥΛΟΥ, Μ. and ΓΚΟΛΙΑΣ, Ι., 2009. *Κυκλοφοριακή Τεχνική*. Παπασωτηρίου.