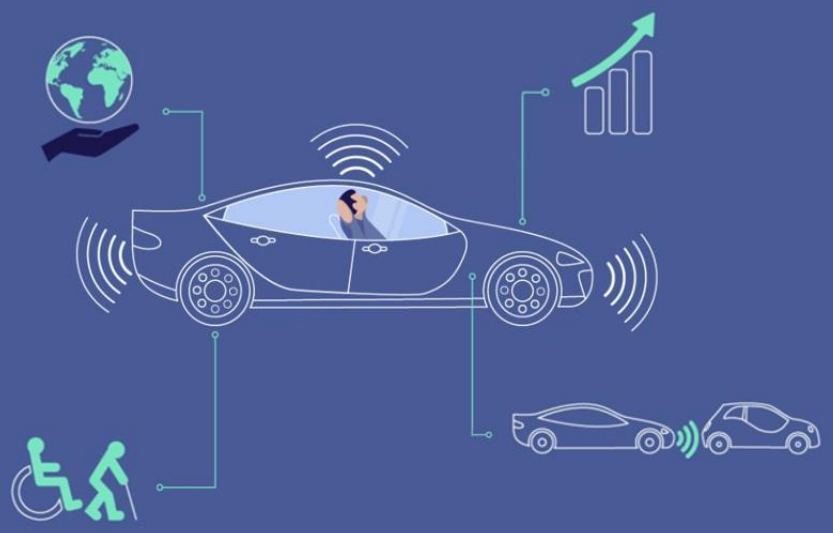
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση της επιρροής των αυτόνομων υπηρεσιών μετακίνησης στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον



Γασπαρινάτου Χριστίνα

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Βλαχογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Ανάλυση της επιρροής των αυτόνομων υπηρεσιών μετακίνησης στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον

Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας: Χριστίνα Γασπαρινάτου

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Βλαχογιάννη

Αθήνα, 2020.

National Technical University of Athens

School of Civil Engineering

Department of Transportation Planning and Engineering,

Analysis of the Influence of Automated Transportation Services on Traffic, Road Safety and Environment

Thesis Author: Christina Gasparinatou

Supervising Professor: Eleni Vlahogianni

Athens, 2020

Copyright © Χριστίνα Γασπαρινάτου, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Christina Gasparinatou, 2020

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία σηματοδοτεί το πέρας των σπουδών μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια, κυρία Ελένη Βλαχογιάννη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο, καθώς και για την καθοδήγησή της σε καίρια ζητήματα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαρία Οικονόμου, ερευνήτρια στο Ε.Μ.Π. για το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας και για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια της Εργασίας, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου, τους φίλους μου και τα κοντινά μου πρόσωπα για την υποστήριξη που μου πρόσφεραν με κάθε τρόπο καθ’ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ανάλυση της επιρροής των αυτόνομων υπηρεσιών μετακίνησης στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον

Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας: Χριστίνα Γασπαρινάτου

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Βλαχογιάννη

Σύνοψη

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής ενός συστήματος αυτόνομου λεωφορείου στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον, σε μελλοντικά σενάρια ζήτησης μικτής κυκλοφορίας (τυπικά και αυτόνομα οχήματα) και η εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής των αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων (Μ.Ε.Α.) μέσα από την επιρροή τους στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο δικτύου. Για την επίτευξη αυτού του στόχου αναλύθηκαν έντεκα σενάρια μελλοντικών συνθηκών κυκλοφορίας σε πρόγραμμα μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Τα σενάρια αυτά αφορούσαν σε ένα τμήμα του δικτύου της Αθήνας και αποτελούνταν από ένα σενάριο με τις υφιστάμενες κυκλοφοριακές συνθήκες και από δέκα με αυξανόμενο ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, με ταυτόχρονη κυκλοφορία αυτόνομου λεωφορείου. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε πρότυπο μη-γραμμικής παλινδρόμησης με δένδρα αποφάσεων με εξαρτημένη μεταβλητή το λογάριθμο του συντελεστή Μ.Ε.Α. και ανεξάρτητες μεταβλητές τη ροή, τον τύπο της οδού, τον τύπο ελέγχου της κυκλοφορία, τις κυκλοφοριακές συνθήκες και το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι με την ύπαρξη μεγαλύτερων ποσοστών αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία παρουσιάζεται μείωση των τιμών Μ.Ε.Α. αυτόνομων οχημάτων. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή αυτόνομων οχημάτων δύναται να μειώσει τις καθυστερήσεις έως και 70%, το πλήθος αλλαγών λωρίδας έως και 25% και τις εκπομπές CO_2 έως και 50%.

Λέξεις Κλειδιά: αυτόνομα οχήματα, Μ.Ε.Α., κυκλοφορία, οδική ασφάλεια, περιβάλλον, μικροσκοπική προσομοίωση κυκλοφορίας, μη-γραμμική παλινδρόμηση, δένδρα παλινδρόμησης

Analysis of the Influence of Automated Transportation Services on Traffic, Road Safety and Environment

Thesis Author: Christina Gasparinatou

Supervising Professor: Eleni Vlahogianni

Abstract

The scope of the present thesis is to study the impact of an autonomous bus system on traffic, road safety and the environment, in future mixed demand scenarios (conventional and autonomous vehicles) and evaluate the factors converting autonomous vehicles to Passenger Car Units (PCU) through their impact on macroscopic characteristics of traffic flow within a network. For this purpose, eleven scenarios with future traffic conditions were analyzed within a traffic simulation program. These scenarios refer to a part of the Athens network and were formed by a baseline scenario with current traffic conditions and ten scenarios with increasing market penetration rate of autonomous vehicles, with the simultaneous operation of an autonomous Shuttle Bus. In continuation, a prototype of a non-linear regression was developed with decision trees with dependent variable the logarithm of the PCU factor, while the independent variables were the flow, the road type, the traffic control type, the traffic volume and the penetration rate of autonomous vehicles. The main outcome was that lower rates of PCU occur when higher rates of autonomous vehicles are used in circulation. Furthermore, it has been determined that the autonomation is able to decrease the delay time up to 70%, the number of lane changes up to 25% and the CO_2 emission up to 50%.

Keywords: autonomous vehicles, PCU, traffic, road safety, environment, microscopic traffic simulation, non-linear regression, regression trees

Περίληψη

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας στις συγκοινωνίες καθιστά εφικτή την εισαγωγή νέων μορφών μεταφοράς, όπως τα αυτόνομα οχήματα. Τα αυτόνομα οχήματα είναι ένα σημαντικό βήμα στον τομέα μεταφορών και συγκοινωνιακής υποδομής και η ένταξή τους στην κυκλοφορία θα αποτελέσει σύντομα μία νέα πραγματικότητα. **Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας** είναι η διερεύνηση της επιρροής ενός συστήματος αυτόνομου λεωφορείου στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον, σε μελλοντικά σενάρια ζήτησης μικτής κυκλοφορίας (τυπικά και αυτόνομα οχήματα) και η εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής των αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων μέσα από την επιρροή τους στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο δικτύου.

Για την επίτευξη του στόχου της Εργασίας, εκτελέστηκαν μικροσκοπικές **προσομοιώσεις** στο πρόγραμμα προσομοίωσης Aimsun σε ένα τμήμα του οδικού δικτύου της Αθήνας. Πιο συγκεκριμένα, αφού επιλέχθηκε η κατανομή ζήτησης της κυκλοφορίας, υλοποιήθηκαν έντεκα σενάρια με αυξανόμενο ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας, ενώ ταυτόχρονα υπήρχε η κυκλοφορία ενός αυτόνομου λεωφορείου σε μία κυκλική διαδρομή μεγάλης σημασίας.

Στη συνέχεια, αφού επεξεργάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, δημιουργήθηκε ένα **πλαίσιο δεδομένων** με βασικούς δείκτες απόδοσης για τον προσδιορισμό της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον. Αυτοί που αφορούν στην κυκλοφορία είναι η ροή, το ποσοστό αυτόνομων οχημάτων, το ποσοστό κυκλοφορίας, το μήκος διάνυσης και ο χρόνος ταξιδιού και οι καθυστερήσεις ανά χιλιόμετρο. Οι κυκλοφοριακές μετρικές που αφορούν στην ασφάλεια είναι η ταχύτητα και ο αριθμός αλλαγής λωρίδων, ενώ αυτές που αφορούν στο περιβάλλον είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και οξειδίων αζώτου (NOx). Τέλος, προστίθεται ο λόγος που εκφράζει το συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α., δηλαδή ο λόγος του κυκλοφοριακού φόρτου του κάθε οδικού τμήματος του σεναρίου βάσης αναφοράς προς τον φόρτο του κάθε οδικού τμήματος του εκάστοτε σεναρίου.

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α., εκτελέστηκε μία **μη-γραμμική παλινδρόμηση με δένδρα αποφάσεων** με μάθηση με επίβλεψη στο προγραμματιστικό περιβάλλον της R. Στο μοντέλο, εξαρτημένη μεταβλητή ήταν ο λογάριθμος του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α., ο οποίος εκφράστηκε με τον λόγο του κυκλοφοριακού φόρτου του κάθε οδικού τμήματος του σεναρίου βάσης αναφοράς προς τον φόρτο του κάθε οδικού τμήματος του εκάστοτε σεναρίου. Ως ανεξάρτητες μεταβλητές ορίστηκαν η ροή, ο τύπος οδού, ο τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας, το ποσοστό της κυκλοφορίας και το ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας Έτσι, προέκυψε ένα δένδρο παλινδρόμησης, όπου δοθέντων των μεταβλητών που επιλέχθηκαν αναδεικνύεται η εξίσωση μέσω της οποίας **εκτιμάται ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε μονάδες επιβατικών αυτοκινήτων**.

Αποτέλεσμα της μη-γραμμικής παλινδρόμησης ήταν ένα **δένδρο παλινδρόμησης** με 172 φύλλα, δηλαδή προέκυψαν 172 εξισώσεις εκτίμησης του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. ανάλογα με το συνδυασμό των τιμών της ροής, του τύπου οδού, του τύπου ελέγχου της κυκλοφορίας, του ποσοστού κυκλοφορίας και του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων. Βασικό συμπέρασμα του δένδρου παλινδρόμησης αποτελεί ότι το ποσοστό της κυκλοφορίας δεν συμμετέχει σημαντικά στην εξίσωση υπολογισμού της τιμής ΜΕΑ, αλλά την επηρεάζει έμμεσα, επειδή είναι το βασικότερο κριτήριο διαχωρισμού στο δένδρο παλινδρόμησης. Επιπλέον, ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. έχει θετική συσχέτιση με τις μεταβλητές του τύπου της οδού και του ελέγχου της κυκλοφορίας , ενώ έχει αρνητική με τις μεταβλητές του ποσοστού της κυκλοφορίας, του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων και της ροής.

Επιπλέον, δημιουργήθηκαν τα **θεμελιώδη μακροσκοπικά διαγράμματα (M.F.D.)** σε επίπεδο δικτύου αλλά και σε επίπεδο διαδρομής λεωφορείου για όλα τα σενάρια που εκτελέστηκαν. Τα διαγράμματα M.F.D. είχαν την πρότυπη μορφή που προτείνεται και μέσω αυτών διαπιστώθηκε ότι το δίκτυο έχει ικανοποιητικές συνθήκες κυκλοφορίας, ενώ όταν προστίθενται τα αυτόνομα οχήματα το δίκτυο αποσυμφορίζεται και οι συνθήκες κυκλοφορίας βελτιστοποιούνται.

Τέλος, μελετώντας τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις, **διερευνήθηκε η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, στην οδική ασφάλεια και στο περιβάλλον**. Ως κυκλοφοριακή μετρική επιλέχθηκε ο μέσος χρόνος λόγω καθυστερήσεων και βασικό συμπέρασμα ήταν ότι η προσθήκη λεωφορείου στην κυκλοφορία του δικτύου αρχικά τον αυξάνει, ενώ με την αύξηση του ποσοστού των αυτόνομων οχημάτων οι καθυστερήσεις δύναται να μειωθούν έως και 70%. Για την μελέτη της οδικής ασφάλεια επιλέχθηκε ως βασικός δείκτης απόδοσης το πλήθος αλλαγών λωρίδας, από όπου προέκυψε ότι με την ένταξη αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία επιτυγχάνεται μείωση του πλήθους αλλαγών λωρίδας κατά 25%. Η διερεύνηση της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων στο περιβάλλον εκφράστηκε με τον βασικό δείκτη απόδοσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και παρατηρήθηκε ότι τα αυτόνομα οχήματα συνεισφέρουν στο περιβάλλον μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων έως και 50%.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1. Γενικά 1
1.2. Στόχος 2
1.3. Μεθοδολογία Διπλωματικής Εργασίας 3
1.4. Δομή 3
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 5
2.1. Εισαγωγή 5
2.2. Το Αυτόνομο Όχημα 5
2.2.1. Συνδεδεμένο Αυτόνομο Όχημα 6
2.2.2. Η Επιρροή των Αυτόνομων Οχημάτων στην Κοινωνία 7
2.2.3. Επίπεδα Αυτοματισμού 8
2.3. Συναφείς Έρευνες και Μεθοδολογίες 10
2.3.1. Συναφείς Έρευνες και Μεθοδολογίες σε Συμβατικά Οχήματα 10
2.3.2. Συναφείς Έρευνες και Μεθοδολογίες σε Αυτόνομα Οχήματα 16
2.4. Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης 17
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ 18
3.1. Προσέγγιση 18
3.2. Θεωρητικό Υπόβαθρο 21
3.2.1. Θεμελιώδες Μακροσκοπικό Διάγραμμα (Macroscopic Fundamental Diagram – M.F.D.) 21
3.2.2. Μικροσκοπικά Μοντέλα Ροής (μικρο – προσομοίωση) 25
3.2.3. Μοντέλα Ακολουθούντος Οχήματος 28
3.2.4. Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων – Μ.Ε.Α. 30
3.2.5. Μη-Γραμμική Παλινδρόμηση με Δένδρα Αποφάσεων 30
3.3. Εργαλεία Προσομοίωσης και Προγραμματισμού 32
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 33
4.1. Προσομοίωση 33
4.1.1. Το Δίκτυο 33
4.1.2. Η Κυκλοφορία 35
4.1.3. Το Αυτόνομο Λεωφορείο 38
4.1.4. Η Κατανομή Ζήτησης της Κυκλοφορίας 40

4.1.5. Τα Σενάρια 41
4.2. Διαγράμματα M.F.D. 43
4.2.1. Διαγράμματα M.F.D. Δικτύου 43
4.2.2. Διαγράμματα M.F.D. Διαδρομής Αυτόνομου Λεωφορείου 45
4.3. Εκτίμηση Συντελεστή Μ.Ε.Α. με Μη-γραμμική Παλινδρόμηση 48
4.3.1. Προετοιμασία Βάσης Δεδομένων 48
4.3.2. Μη-γραμμική Παλινδρόμηση Δενδροειδούς Μορφής 54
4.4. Επιρροή Αυτόνομων Οχημάτων στην Κυκλοφορία, στην Ασφάλεια και στο Περιβάλλον 62
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 66
5.1. Σύνοψη Μεθοδολογίας και Αποτελεσμάτων 66
5.2. Βασικά Συμπεράσματα 66
5.3. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα 67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ 83

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Αναπαράσταση αυτόνομου οχήματος (Πηγή: ElHamdani and Benamar, 2018) 5
Εικόνα 2.2: Πεδία μελέτης Αυτόνομων Οχημάτων 6
Εικόνα 2.3:Δίκτυο με Συνδεδεμένα Οχήματα και οδική Υποδομή 7
Εικόνα 2.4: Σχηματική Απεικόνιση Επιπέδων Αυτονομίας (Πηγή: SAE) 9
Εικόνα 3.1: Σχέση Φόρτου – Πυκνότητας κατά Greenshield 22
Εικόνα 3.2: Χαρακτηριστικό διάγραμμα M.F.D. 23
Εικόνα 3.3: Κυκλοφοριακές συνθήκες σε διάγραμμα M.F.D. 24
Εικόνα 3.4: Πρότυπο Διάγραμμα M.F.D. για την παρούσα Εργασία 25
Εικόνα 4.1: Το μοντέλο του οδικού δικτύου της Αττικής 33
Εικόνα 4.2: Περιοχή μελέτης 34
Εικόνα 4.3: Μοντέλο υποδικτύου στο Aimsun 35
Εικόνα 4.4: Διαδρομή Αυτόνομου Λεωφορείου (Shuttle Bus) 39
Εικόνα 4.5: Αυτόνομο Λεωφορείο (Shuttle Bus) 39
Εικόνα 4.6: Πρότυπο Διάγραμμα M.F.D. για την παρούσα Εργασία 41
Εικόνα 4.7: Στιγμιότυπο από Aimsun. Λεωφόρος Κηφισού - Λεωφόρος Αθηνών 43
Εικόνα 4.8: Στιγμιότυπο από Aimsun. Λεωφόρος Κηφισού - Πέτρου Ράλλη 43
Εικόνα 4.9: Τμήμα Κώδικα στην R για την απομόνωση των οδικών τμημάτων που αποτελούν τη διαδρομή του λεωφορείου 46
Εικόνα 4.10: Τμήμα Κώδικα στην R για την απομόνωση των οδικών τμημάτων που αποτελούν τη διαδρομή του λεωφορείου 46
Εικόνα 4.11: Κώδικας για τον Υπολογισμό Μέσου Όρου κάθε επανάληψης 51
Εικόνα 4.12: Κώδικας για τη δημιουργία της στήλης Ποσοστού Κυκλοφορίας 52
Εικόνα 4.13: : Κώδικας για τη δημιουργία της στήλης Ποσοστού Αυτόνομων Οχημάτων 52
Εικόνα 4.14: Κώδικας για τη δημιουργία στήλης του Λόγου: Φόρτος κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το Φόρτο του κάθε τμήματος του κάθε σεναρίου 53
Εικόνα 4.15: Δημιουργία Πλαισίου Δεδομένων 53
Εικόνα 4.16: Στιγμιότυπο Πλαισίου Δεδομένων 54
Εικόνα 4.17: Εκτέλεση παλινδρόμησης 56
Εικόνα 4.18: Αξιολόγηση Μοντέλου 57
Εικόνα 4.19: Κώδικας του δέντρου παλινδρόμησης σε Περιβάλλον Graphviz 58
Εικόνα 4.20: Τμήμα Δεδροδιαγράμματος Παλινδρόμησης 59
Εικόνα 4.21: Τμήμα Παρουσίασης Κωδικών και αντίστοιχων Εξισώσεων 60
Εικόνα 4.22: Πορεία Παραδείγματος στο Δενδροδιάγραμμα 61

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Μέθοδοι Υπολογισμού Μ.Ε.Α. 10
Πίνακας 2.2: Εξισώσεις Υπολογισμού Μ.Ε.Α. (Αντίστοιχες των μεθόδων στον Πίνακα 1.1) 12
Πίνακας 3.1: Βασικοί Δείκτες Απόδοσης - KPIs 20
Πίνακας 3.2: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των τριών επιπέδων προσομοίωσης. 27
Πίνακας 4.1: Κατηγορίες Οδικού Δικτύου 34
Πίνακας 4.2: Κρίσιμες Παράμετροι Οχημάτων 36
Πίνακας 4.3: Υφιστάμενες γραμμές αστικών λεωφορείων που εξυπηρετούν τον σταθμό Κηφισού 37
Πίνακας 4.4: Υφιστάμενες γραμμές αστικών λεωφορείων που εξυπηρετούν τον σταθμό Λιοσίων 37
Πίνακας 4.5: Υφιστάμενες γραμμές αστικών λεωφορείων στην εγγύς περιοχή του δικτύου 38
Πίνακας 4.6: Στάσεις λεωφορείων στην εγγύς περιοχή του δικτύου 38
Πίνακας 4.7: Κρίσιμες Παράμετροι Λεωφορείου 40
Πίνακας 4.8: Κατανομή Ζήτησης της Κυκλοφορίας 40
Πίνακας 4.9: Σενάρια Προσομοίωσης 42
Πίνακας 4.10: Σύνοψη Δεικτών Βάσης Δεδομένων 54
Πίνακας 4.11: Συσχετίσεις μεταβλητών 55
Πίνακας 4.12: Σύνοψη Δεικτών Βάσης Δεδομένων μετά από τροποποιήσεις 57
Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα Σεναρίων σχετικά με την Κυκλοφορία, την Ασφάλεια και το Περιβάλλον 62
Πίνακας 4.14: Ποσοστιαίες Μεταβολές Βασικών Δεικτών Απόδοσης σε σχέση με το Σενάριο Α1 65

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Επιδράσεις από τη χρήση Έξυπνων Συστημάτων Ασφάλειας (Πηγή: Forrest και Konca, 2007) 8
Διάγραμμα 3.1: Βήματα Μεθοδολογίας Διπλωματικής Εργασίας 21
Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα M.F.D. όλων των σεναρίων σε επίπεδο Δικτύου 44
Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα M.F.D. σε επίπεδο Διαδρομής Λεωφορείου 47
Διάγραμμα 4.3: Μέσος χρόνος λόγω καθυστερήσεων ανά σενάριο 63
Διάγραμμα 4.4: Πλήθος αλλαγών λωρίδας ανά σενάριο 64
Διάγραμμα 4.5: Εκπομπές CO2 ανά σενάριο 65

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Οι μεταφορές αποτελούν τομέα ζωτικής σημασίας μιας κοινωνίας, αφού συνεισφέρουν τόσο στην εξυπηρέτηση των πολιτών καθημερινά όσο και στην οικονομία. Τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών, τα οποία στόχο έχουν την ανάδειξη της δυναμικής των μεταφορών, φέρνουν στο προσκήνιο την καινοτομία του αυτόνομου οχήματος. Η **αυτόματη οδήγηση** θεωρείται μία τεχνολογία ύψιστης σημασίας που θα μπορούσε να σημάνει μία από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στον συγκοινωνιακό τομέα. Πλέον, είναι σαφές ότι οι περισσότερες κυβερνήσεις και επιστήμονες στοχεύουν σε μία πλήρως αυτοματοποιημένη δομή στη συγκοινωνιακή υποδομή, η οποία θα είναι πολύ πιο αποτελεσματική από την υπάρχουσα. Ταυτόχρονα, έχει προταθεί η εφαρμογή κυκλοφορίας αυτόνομων λεωφορείων για δημόσια χρήση. Η χρήση των αυτόνομων οχημάτων πιθανώς να επιφέρει πολλαπλά οφέλη τόσο στην κοινωνία όσο και στην οικονομία σε παγκόσμιο επίπεδο. Σε αυτό στοχεύει και η παρούσα Διπλωματική Εργασία, στην διερεύνηση, δηλαδή, της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, την ασφάλεια και το περιβάλλον.

Για την σημασία της διερεύνησης του παρόντος θέματος αναφέρονται ορισμένες πληροφορίες που περιγράφουν την **υπάρχουσα κατάσταση** στα οδικά δίκτυα της Αθήνας.

Η **κυκλοφοριακή συμφόρηση** είναι ένα αυξανόμενο πρόβλημα για τις μεγαλουπόλεις παγκοσμίως. Η εταιρία πλοήγησης και χαρτογράφησης TomTom (2016), προέβη σε μελέτη κατάταξης των πόλεων με το εντονότερο πρόβλημα συμφόρησης, από στοιχεία που έχει συλλέξει σε περίοδο εννέα χρόνων, αναδεικνύοντας το ποσοστό επιπλέον οδήγησης λόγω καθυστερήσεων. Για την Αθήνα διαπιστώθηκε ότι ένας μέσος οδηγός χρειάζεται περίπου 37% περισσότερο χρόνο για να φτάσει στον προορισμό του λόγω αυξημένης συμφόρησης. Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) εκτιμάται ότι ο στόλος στην Ελλάδα ήταν 5,15 εκατομμύρια οχήματα στα τέλη του 2018, με υπολογιζόμενη αύξηση 920.000 οχήματα κατά το έτος 2030. Φαίνεται ότι η κυκλοφοριακές συνθήκες με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, θα γίνονται διαρκώς δυσμενέστερες. Λύση σε αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να συνεισφέρει η ένταξη αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, αποσυμφορίζοντας τα οδικά δίκτυα.

Όσον αφορά την **οδική ασφάλεια**, στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ) για το έτος 2018, αναφέρουν ότι σε ολόκληρη τη χώρα έγιναν 10.737 οδικά τροχαία ατυχήματα, εκ των οποίων τα 10.092 προκάλεσαν τραυματισμούς και τα υπόλοιπα θάνατο. Η Εθνική Υπηρεσία Οδικής Ασφάλειας Αυτοκινητόδρομων (National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA) εκτιμά ότι το 94% των ατυχημάτων οφείλεται σε ανθρώπινο λάθος (NHTSA, 2015). Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι αν εξαλειφθεί ο ανθρώπινος παράγοντας θα υπάρξει σημαντική μείωση στην κύρια αιτία πρόκλησης οδικών ατυχημάτων.

Τέλος, σχετικά με την **επιβάρυνση του περιβάλλοντος** λόγω της κυκλοφορίας αξίζει να αναφερθεί ότι πάνω από το 70% των επιβλαβών ρύπων στην ατμόσφαιρα, προέρχονται από τη χρήση των οχημάτων. Εκτιμάται ότι με τη σωστή εφαρμογή των μέτρων, οι επιβλαβείς ρύποι στην ατμόσφαιρα που προέρχονται από τη χρήση των οχημάτων, θα μπορούσαν να μειωθούν έως και 40%. Αυτό δύναται να επιτευχθεί με την εφαρμογή αυτόνομων οχημάτων, τα οποία θα είναι προσαρμοσμένα να τηρούν το εκάστοτε μέτρο.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα **οφέλη** που εκτιμάται ότι θα επιφέρει η κυκλοφορία **των αυτόνομων οχημάτων**:

- Άνεση
- Δυνατότητα μετακίνησης ανηλίκων, ηλικιωμένων, και ατόμων με αναπηρία ή εμπορευμάτων χωρίς συνοδό.
- Βελτίωση της οδικής ασφάλειας: Τηρείται πλήρως ο Κώδικας Οδικής Κυκλοφορίας και βελτιώνεται ο χρόνος αντίδρασης σε μη αναμενόμενο συμβάν. Επίσης, δεν επηρεάζεται η οδηγική συμπεριφορά του οχήματος από την κατάσταση του/των επιβαίνοντα/όντων
- Βελτίωση στάθμης εξυπηρέτησης της οδού: Αντικαθιστώντας τα οδικά σήματα και χρησιμοποιώντας το συντονισμό των οχημάτων, η αυτόνομη διαχείριση κυκλοφορίας σκοπεύει να αυξήσει τον κυκλοφοριακό φόρτο, προσφέροντας παράλληλα καλή εξυπηρέτηση.
- Εξοικονόμηση χρόνου: Αφενός λόγω της μείωσης της κυκλοφορίας και αφετέρου λόγω της δυνατότητας αξιοποίησης του χρόνου μετακίνησης σε διαφορετικούς σκοπούς.
- Χαμηλή κατανάλωση καυσίμου, λόγω της αποδοτικότερης οδήγησης με ελαφρύτερα οχήματα.
- Χαμηλές εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον.

1.2. Στόχος

Από τα στοιχεία που παρατέθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, όπου περιγράφηκαν οι υπάρχουσες συνθήκες και ορισμένα στοιχεία για τα αυτόνομα οχήματα γίνεται κατανοητό ότι τα αυτόνομα οχήματα δύνανται να συμβάλλουν στην βελτίωση των κυκλοφοριακών και κοινωνικών συνθηκών. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση της επιρροής της αυτόματης κυκλοφορίας στην ικανότητα των οδικών τμημάτων. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η **διερεύνηση της επιρροής ενός συστήματος αυτόνομου λεωφορείου στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον,** σε μελλοντικά σενάρια ζήτησης μικτής κυκλοφορίας (τυπικά και αυτόνομα οχήματα) και η **εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής των αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων** μέσα από την επιρροή τους στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο δικτύου.

Ως **επιμέρους στόχοι** της Εργασίας είναι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης συντελεστών για τη μετατροπή αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών

Αυτοκινήτων μέσω προγράμματος προσομοίωσης, σε συνδυασμό με την εφαρμογή του θεωρητικού υποβάθρου, ώστε να προκύψουν ορθά αποτελέσματα.

1.3. Μεθοδολογία Διπλωματικής Εργασίας

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η **μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία θα επιτευχθεί ο στόχος της διπλωματικής εργασίας**. Έπειτα από τον καθορισμό του στόχου και ταυτόχρονα του θέματος της μελέτης, είναι απαραίτητη η αναζήτηση συναφών ερευνών και μεθοδολογιών ανάλυσης από πρόσφατη διεθνή βιβλιογραφία, για την εύρεση των ζητημάτων που απαιτούν έρευνα. Βάσει αυτής θα οριστούν οι παράμετροι για την προσομοίωση που θα εκτελεστεί και μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, θα συγκροτηθεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο δεδομένων. Στη συνέχεια, θα επιλεχθεί το κατάλληλο μοντέλο παλινδρόμησης στο προγραμματιστικό περιβάλλον της R για την εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής των αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων. Τέλος, τα παραπάνω βήματα οδηγούν στην πραγματοποίηση όλων των στόχων, που με την έκθεση των συμπερασμάτων ολοκληρώνουν το έργο της διπλωματικής εργασίας.

1.4. Δομή

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί καθορίζεται και η δομή της διπλωματικής εργασίας για την επίτευξη μίας ορθής παρουσίασης της ροής της. Για τον λόγο αυτό ακολουθεί η **σύνοψη των κεφαλαίων που την απαρτίζουν**.

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί το Κεφάλαιο 1, το οποίο όπως έγινε κατανοητό είναι εισαγωγικό και παρουσιάζει μία σύντομη παρουσίαση του αντικειμένου των αυτόνομων οχημάτων. Επίσης, στις προηγούμενες ενότητες, αναφέρονται στατιστικά στοιχεία που αφορούν στη χρήση συμβατικών οχημάτων τόσο σε εθνικό αλλά και σε διεθνές επίπεδο. Επιπρόσθετα, περιγράφεται ο στόχος της διπλωματικής εργασίας, όπως επίσης και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται ορισμοί για τα αυτόνομα οχήματα, για την πλήρη κατανόηση τους και συναφείς έρευνες και μεθοδολογίες, οι οποίες παρέχουν χρήσιμα ευρήματα για τη διπλωματική εργασία και αποτελούν τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η σύνοψη των αποτελεσμάτων τους και η σύγκρισή τους οδηγούν στον καθορισμό του αντικειμένου της παρούσας εργασίας και στην επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας για την ολοκλήρωσή της.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται συνοπτικά τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας Εργασίας, καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο δυνάμει του οποίου πραγματοποιήθηκε αυτή η εκπόνηση. Επίσης, παρουσιάζονται τα ειδικά λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα στάδια.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά τα στάδια για την εκτέλεση της προσομοίωσης και η διαδικασία με την οποία διερευνήθηκε η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, στην οδική ασφάλεια και στο περιβάλλον, καθώς και η επεξεργασία των

αποτελεσμάτων. Επιπρόσθετα, αναλύεται η μεθοδολογία για την εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της Εργασίας και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα. Τέλος, γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που θα συμπλήρωναν τη παρούσα εργασία.

Το Κεφάλαιο 6 αποτελεί τη βιβλιογραφία της διπλωματικής εργασίας, σε μορφή καταλόγου, η οποία περιλαμβάνει όλες τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίησή της.

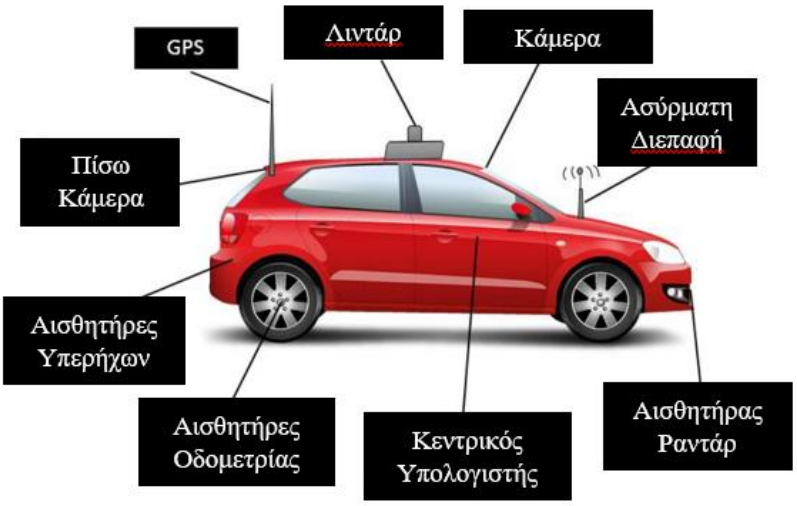
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία, στην οποία βασίστηκε η παρούσα Διπλωματική Εργασία. Πιο συγκεκριμένα, εφόσον το επίκεντρο της Εργασίας είναι τα αυτόνομα οχήματα, αναφέρονται βασικά στοιχεία για αυτά. Έτσι, παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη εικόνα του θέματος και γίνεται περισσότερο κατανοητή η μελέτη. Επιπλέον, αναφέρονται ευρήματα από έρευνες που αφορούν στην εκτίμηση μονάδων επιβατικών αυτοκινήτων – Μ.Ε.Α. συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται και συγκρίνονται μέθοδοι εκτίμησης Μ.Ε.Α., με σκοπό την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου για την εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α.

2.2. Το Αυτόνομο Όχημα

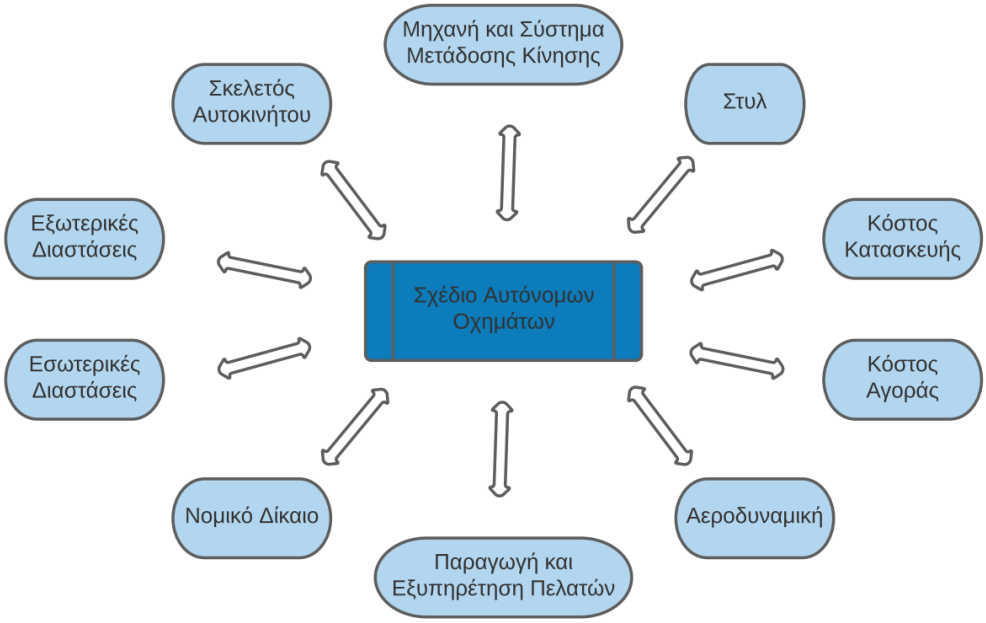
Αυτόνομο καλείται το όχημα το οποίο αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του και έχει δυνατότητα πλοήγησης χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση (Lu et al., 2018). Οι άνθρωποι είναι απλώς επιβάτες και μπορούν να ελέγχουν τον προορισμό τους ή να ζητήσουν από το αυτοκίνητο να σταματήσει. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 τα αυτόνομα οχήματα ενσωματώνουν τεχνολογίες όπως GPS, ραντάρ, λιντάρ (ραντάρ που χρησιμοποιεί ακτίνες λέιζερ), ειδικές κάμερες, ενώ διαθέτουν προηγμένο λογισμικό που συνδυάζει όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες ανακαλύπτοντας αφενός κατάλληλες διαδρομές και αφετέρου εντοπίζοντας και αποφεύγοντας εγκαίρως σταθερά και κινούμενα εμπόδια.



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

Όπως είναι αναμενόμενο τα αυτόνομα οχήματα διαφέρουν από τα συμβατικά σε διάφορα επίπεδα (Forrest, Konca, 2007). Σην Εικόνα 2.2 φαίνονται τα πεδία που πρέπει να ληφθούν

υπόψιν από τους επιστήμονες με σκοπό την ένταξη των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.



Εικόνα 2.2: Πεδία μελέτης Αυτόνομων Οχημάτων

2.2.1. Συνδεδεμένο Αυτόνομο Όχημα

Ο όρος **συνδεδεμένο όχημα** αναφέρεται σε εφαρμογές, υπηρεσίες και τεχνολογίες που συνδέουν ένα όχημα με τον περιβάλλοντα χώρο, όπως αναφέρεται από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών I.H.H.M. (Αγγλικά: I.E.E.E.). Τα συνδεδεμένα οχήματα μπορούν να είναι συμβατικά οχήματα (οδηγούνται δηλαδή από άνθρωπο) που είναι ενισχυμένα μέσω διάφορων τηλεματικών-ηλεκτρονικών συσκευών και αναβαθμίσεων με αποτέλεσμα να έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας με άλλα κοντινά οχήματα αλλά και με την οδική υποδομή. Αντίστοιχα, υπάρχουν και τα συνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα που είναι τα οχήματα τα οποία αξιοποιούν και τις αυτόνομες αλλά και συνδεδεμένες δυνατότητες του οχήματος (Εικόνα2.3).

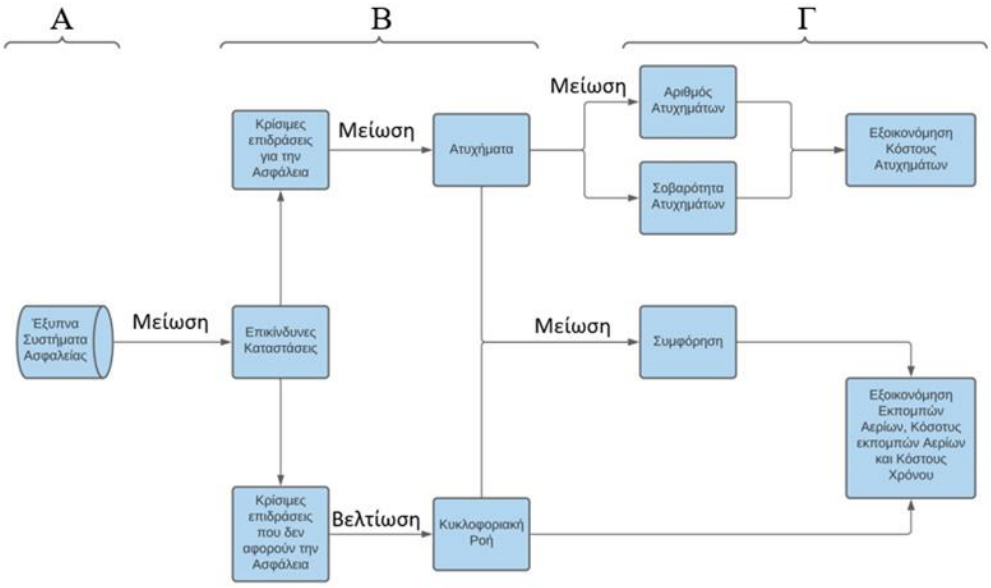
Τα **συνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα** έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται με ασύρματα δίκτυα κοντινών συσκευών και να πραγματοποιούν μία αμφίδρομη επικοινωνία με τα άλλα οχήματα και την οδική υποδομή, ανταλλάζοντας σημαντικές πληροφορίες κινητικότητας και οδικής ασφάλειας. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, προλαμβάνουν ατυχήματα και οδηγούν με πιο αποτελεσματικό και οικολογικό τρόπο. Προφανώς αυτή η επικοινωνία προϋποθέτει την χρήση κατάλληλων συστημάτων από αμφότερους. Τέλος, σημειώνεται ότι οι πληροφορίες των οχημάτων που επικοινωνούν είναι ανώνυμες και έτσι τα οχήματα δεν είναι εφικτό να ανιχνευτούν και το σύστημα προφυλάσσεται από παραβιάσεις.

Εικόνα 2.3:Δίκτυο με Συνδεδεμένα Οχήματα και οδική Υποδομή

2.2.2. Η Επιρροή των Αυτόνομων Οχημάτων στην Κοινωνία

Η **ένταξη των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία** πρόκειται να επιφέρει **πολλαπλά αποτελέσματα στην κοινωνία.** Ορισμένα από αυτά είναι η βελτίωση της ασφάλειας, η εξοικονόμηση καυσίμων, η καλύτερη κυκλοφοριακή ροή, η εξοικονόμηση χρόνου, αλλαγές στην κουλτούρα και καλύτερα συντηρημένα οχήματα (Forrest και Konca, 2007).

Όσον αφορά στην **ασφάλεια** έχει αναφερθεί ότι χάνονται δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως λόγω κυκλοφοριακών ατυχημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η ένταξη των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, τα οποία είναι εφοδιασμένα με έξυπνα συστήματα ασφάλειας. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2.1, η οποία περιγράφει την επίδραση της χρήσης τους, το διάγραμμα ξεκινάει με το πρώτο τμήμα (Α) και παρουσιάζει ότι με την ένταξή τους περιορίζονται οι επικίνδυνες καταστάσεις στα οδικά δίκτυα. Συνεχίζει με το δεύτερο τμήμα (Β), όπου αναγράφονται οι επιδράσεις που αφορούν στην ασφάλεια, και συγκεκριμένα στη μείωση των ατυχημάτων, και οι επιδράσεις που δεν αφορούν στην ασφάλεια, δηλαδή στη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών. Στο τελευταίο τμήμα (Γ) παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα οφέλη αυτών των επιδράσεων, όπως είναι η μείωση των ατυχημάτων και η εξοικονόμηση χρόνου και κόστους.



Διάγραμμα 2.1: Επιδράσεις από τη χρήση Έξυπνων Συστημάτων Ασφάλειας (Πηγή: Forrest και Konca, 2007)

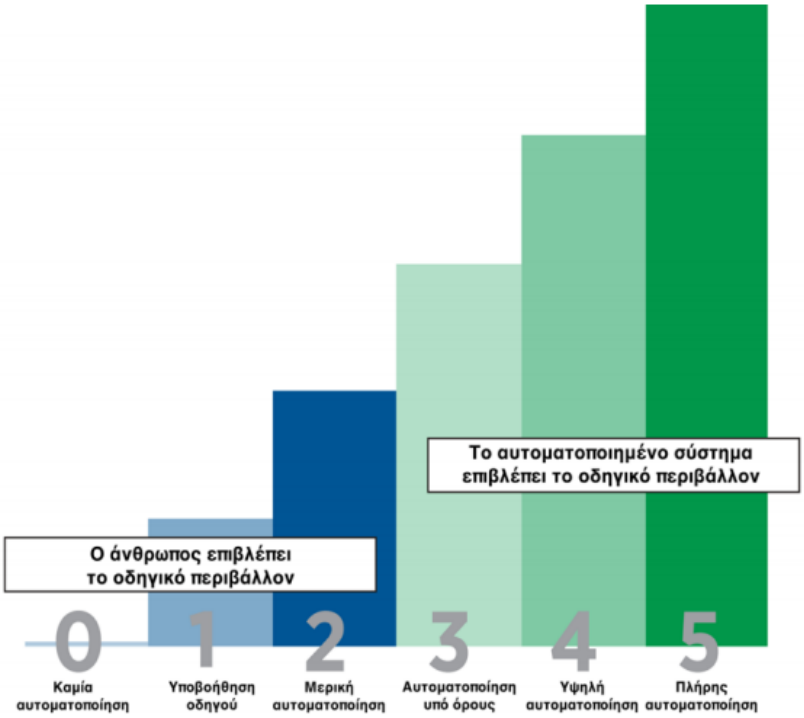
Σχετικά με την **εξοικονόμηση καυσίμων**, τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να εξαλείψουν τις απότομες και αναποτελεσματικές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, επιτυγχάνοντας την αποτελεσματικότερη οδήγηση και συνεπώς τη βέλτιστη κατανάλωση καυσίμων (Forrest και Konca, 2007). Ακόμα και αν αυτή η μείωση στην κατανάλωση καυσίμων είναι μικρή, σε παγκόσμιο επίπεδο είναι αξιοσημείωτη. Πιο συγκεκριμένα, ένας επιθετικός οδηγός καταναλώνει περίπου 33% περισσότερα καύσιμα από τον μέσο οδηγό, ενώ ένας μέσος οδηγός καταναλώνει περίπου 10% περισσότερα καύσιμα από την αποτελεσματικότερη δυνατή οδήγηση. Έτσι, φαίνεται ότι η χρήση αυτόνομων οχημάτων είναι αφενός πιο οικολογική και αφετέρου πιο οικονομική.

Τέλος, η μετάβαση σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα μεταφορών θα **ελαττώσει τα προβλήματα στην κυκλοφορία**. Η ένταξη αυτόνομων οχημάτων θα επιτρέπει στα οχήματα να χρησιμοποιούν πλήρως και αποτελεσματικά τις οδούς, εξοικονομώντας χρήματα και χρόνο. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι τα κυκλοφοριακά μοτίβα θα είναι πιο προβλέψιμα και λιγότερο προβληματικά με την ένταξη αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία (Block, 2004, Althoff et al. 2009).

2.2.3. Επίπεδα Αυτοματισμού

Με βάση το βαθμό της οδηγικής παρέμβασης και προσοχής που απαιτείται, **η αυτόνομη οδήγηση έχει ταξινομηθεί σε έξι διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού σύμφωνα με το διεθνή Σύνδεσμο Μηχανικών Αυτοκινήτων – Σ.Μ.Α.** (Society of Automotive Engineers – S.A.E.) (Εικόνα 2.4). Ο διεθνής Σ.Μ.Α. εξέδωσε ένα εναρμονισμένο σύστημα ταξινόμησης για αυτόνομα συστήματα οδήγησης (Automated Driving Systems – A.D.S.) και ορίζεται ως ακολούθως (SAE, 2014):

- Επίπεδο 0 – Κανένας αυτοματισμός: Ο οδηγός έχει τον απόλυτο έλεγχο του οχήματος, ακόμη και όταν υπάρχουν συστήματα προειδοποίησης ή παρέμβασης.
- Επίπεδο 1 – Συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης: Το όχημα έχει τη δυνατότητα να αλλάζει αυτόματα κατεύθυνση ή να επιταχύνει και να επιβραδύνει, χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το οδικό περιβάλλον, προσδοκώντας ο οδηγός να έχει τον έλεγχο για όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες οδήγησης.
- Επίπεδο 2 – Συνδυασμός λειτουργιών αυτοματισμού: Το όχημα έχει τη δυνατότητα με περισσότερα από ένα συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης, να αλλάζει κατεύθυνση ή να επιταχύνει/επιβραδύνει χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το οδικό περιβάλλον, προσδοκώντας ο οδηγός να έχει τον έλεγχο για όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες οδήγησης.
- Επίπεδο 3 - Περιορισμένη αυτοματοποιημένη οδήγηση: Το όχημα λειτουργεί με ένα αυτόματο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, με την προσδοκία ότι ο οδηγός θα λάβει τον έλεγχο καταλλήλως όποτε χρειαστεί.
- Επίπεδο 4 - Πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση, εκτός ειδικών συνθηκών: Το όχημα λειτουργεί με ένα αυτόματο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, ακόμη και αν ο οδηγός δε λάβει τον έλεγχο καταλλήλως όποτε χρειαστεί.
- Επίπεδο 5 - Πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση: Το όχημα λειτουργεί πλήρως με ένα αυτόματο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες οδού και περιβάλλοντος που μπορεί να ελέγξει ένας οδηγός.



Εικόνα 2.4: Σχηματική Απεικόνιση Επιπέδων Αυτονομίας (Πηγή: SAE)

2.3.Συναφείς Έρευνες και Μεθοδολογίες

2.3.1. Συναφείς Έρευνες και Μεθοδολογίες σε Συμβατικά Οχήματα

Στον Πίνακα 2.1 συγκεντρώνονται οι **μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση των Μονάδων Επιβατικών Αυτοκινήτων – Μ.Ε.Α.** (Passenger Car Units – PCU), ενώ στον πίνακα 2.2 φαίνονται οι αντίστοιχες εξισώσεις υπολογισμού των Μ.Ε.Α. και εξηγούνται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 2.1: Μέθοδοι Υπολογισμού Μ.Ε.Α.

	Συγγραφείς	Έτος	Τύπος Περιοχής	Μέθοδος	Εισαγόμενα
1	Greenshields et al.	1947	Σηματοδοτούμενοι Κόμβοι	Διαχωρισμός	H_i , H_c
2	Huber	1982	Μη Αστικοί Κόμβοι	Βασισμένη στο βαθμό ροής και την πυκνότητα	q_B ,q_M , P_T
3	Cunagin και Messer	1983	Μη Αστικοί Κόμβοι	Βασισμένη στην καθυστέρηση	D_{ij} , D_{base}
4	Aerde και Yagar	1984	Μη Αστικοί Κόμβοι	Μοντελοποίηση Ταχύτητας	C_n , C_1
5	Keller και Saklas	1984	Σηματοδοτούμενοι Κόμβοι	Βασισμένη το χρόνο μετακίνησης (Προσομοίωση)	TT_i , TT_b
6	Chandra et al.	1995	Αστικοί Κόμβοι	Μοντελοποίηση Ταχύτητας	V_c , V_i , A_c , A_i
7	Greenshields et al.	1947	Σηματοδοτούμενοι Κόμβοι	Διαχωρισμός	H_i , H_c
8	Tiwari et al.	2000	Μη Αστικοί Κόμβοι	Βασισμένη στο βαθμό ροής και την πυκνότητα	K_{car} ,W_{85car} , q_{xi} , u_{xi} , W_{85wi}
9	Chandra και Kumar	2003	Αστικοί Κόμβοι	Χωρική Κατάληψη	V_{car} ,V_k , A_{car} , A_k
10	Minh και Sano	2003	Αστικοί Κόμβοι	Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση	FFS, α_1PC, α_2BUS, α_3MC, α_4HV
11	Rahman και Nakamura	2005	Αστικοί Κόμβοι	Μοντελοποίηση Ταχύτητας (για μη μηχανοκίνητα οχήματα)	S_b ,S_m
12	Ahmed	2010	Μη Αστικοί Κόμβοι	Διαχωρισμός	$HV_{headway}$, $PC_{headway}$
13	Paul και Sarkar	2013	Αστικοί Κόμβοι	Χωρική Κατάληψη	A_i , V_c , V_i , A_c
14	Adnan	2014	Αστικοί Κόμβοι	Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση	α_{ir} , α_1

Πίνακας 2.1: Συνέχεια

	Συγγραφείς	Έτος	Τύπος Περιοχής	Μέθοδος	Εισαγόμενα
15	Patil και Adavi	2015	Αστικοί Κόμβοι	Μοντελοποίηση Ταχύτητας	U_c , U_v
16	Patil και Adavi	2015	Αστικοί Κόμβοι	Διαχωρισμός	T_c , t_v
17	Al-zerjawi	2016	Μη Αστικοί Κόμβοι	Βασισμένη στο βαθμό ροής και την πυκνότητα	K_{car} , K_{truck}
18	Mahidadiya και Juremalani	2016	Σηματοδοτούμενοι Κόμβοι	Βασισμένη το χρόνο μετακίνησης	t_i , t_c , A_c , A_i
19	Patel et al.	2016	Αστικοί Κόμβοι	Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση	A_0 , A_1 , A_2 , … , A_n Q_1 , Q_2 , … , Q_n
20	Swamy et al.	2016	Μη Αστικοί Κόμβοι	Χωρική Κατάληψη	$Velocity_{car}$, $InfluenceArea_{car}$, $Velocity_{vehicle}$, $InfluenceArea_{vehicle}$
21	Sonu et al.	2016	Μη Σηματοδοτούμενοι Κόμβοι	Χρονική Κατάληψη	T_i , T_c , A_c , A_i
22	Ahmad και Rastogi	2017	Μη Σηματοδοτούμενοι Κόμβοι	Διαχωρισμός	f_i , H_i , H_c
23	Mohan και Chandra	2018	Μη Σηματοδοτούμενοι Κόμβοι	Χρονική Κατάληψη	OT_i , OT_{cs} , w_i , w_{cs}
24	Mohan και Chandra	2018	Μη Σηματοδοτούμενοι Κόμβοι	Διαχωρισμός	$C_{p,cs}$, $C_{p,i}$

Πίνακας 2.2: Εξισώσεις Υπολογισμού Μ.Ε.Α. (Αντίστοιχες των μεθόδων στον Πίνακα 1.1)

	Εξίσωση	Μεταβλητές
1	PCU=$\frac{Hi}{Hc}$	Hi = μέσος διαχωρισμός οχήματος τύπου i Hc = μέσος διαχωρισμός επιβατικού οχήματος
2	PCU=$\frac{\frac{qB}{qm}-1}{PT}+1$	qB = ισοδύναμος βαθμός ροής για επιβατικά αυτοκίνητα μόνο για δεδομένο λόγο V/C qM = μικτός βαθμός ροής PT = ποσοστό φορτηγών στη μικτή κυκλοφορία
3	PCU = $\frac{Di-Dbase}{Dbase}$	Di = καθυστέρηση κλασικού επιβατικού οχήματος εξαιτίας του οχήματος τύπου I Dbase = καθυστέρηση κλασικού επιβατικού οχήματος εξαιτίας πιο αργών οχημάτων υπό ομοιογενείς κυκλοφοριακές συνθήκες
4	PCU=$\frac{Cn}{C1}$	Cn = συντελεστής μείωσης ταχύτητας για όχημα τύπου n C1 = συντελεστής μείωσης ταχύτητας για επιβατικό αυτοκίνητο
5	PCU = $\frac{TTi}{TTb}$	TTi = συνολικός χρόνος μετακίνησης οχήματος τύπου i TTb = συνολικός χρόνος μετακίνησης οχήματος αναφοράς b
6	PCU = $\frac{Vc\ Ai}{Vi\ Ac}$	Vc, Vi = μέση ταχύτητα αυτοκινήτου και οχήματος τύπου i Ac, Ai = οι αντίστοιχες περιβάλλουσες περιοχές των οχημάτων στην οδό
7	D_PCU = 1 + $\frac{\Delta d}{d0}$	D_PCEi = ΜΕΑ βαρέος οχήματος τύπου i βασισμένη στην καθυστέρηση Δdi = επιπλέον καθυστέρηση λόγω οχήματος τύπου I d0 =μέση καθυστέρηση οχήματος όταν υπάρχουν μόνο επιβατικά αυτοκίντηα
8	PCUxi = $\frac{kcar\ /W85car}{\frac{qx}{ux}/W85xi}$	PCUXi = ΜΕΑ για κυκλοφοριακή ομάδα Xi kcar = πυκνότητα επιβατικών αυτοκινήτων W85car = 85% πλάτος διανομής (m) για επιβατικά αυτοκίνητα qXi = ροή για κυκλοφοριακή ομάδα Xi σε ομοιογενείς κυκλοφοριακές συνθήκες uXi = μέση ταχύτητα χώρου κυκλοφοριακής ομάδας Xi
9	PCU = $\frac{Vcar\ \ Ak}{Vk\ Acar}$	Vcar, Vk = μέση ταχύτητα επιβατικών αυτοκινήτων (μικρά οχήματα) και οχήματα τύπου k (m/s) Acar, Ak = ενεργή επιφάνεια επιβατικού οχήματος και οχήματος τύπου k (m^2)
10	S = FFS + α_1PC + α_2BUS + α_3MC + α_4HV	S = μέση κυκλοφοριακή ταχύτητα FFS = ταχύτητα ελεύθερης ροής PC = αριθμός επιβατικών αυτοκινήτων BUS = αριθμός λεωφορείων στην κυκλοφορία MC = αριθμός μοτοσυκλετών στην κυκλοφορία HV = αριθμός βαρέων οχημάτων στην κυκλοφορία a1, a2, a3, a4 = αποτέλεσμα λειτουργίας στη μέση ταχύτητα κυκλοφοριακής ροής

Πίνακας 2.2: Συνέχεια

	Εξίσωση	Μεταβλητές
11	PCU = $1 + \frac{Sb - Sm}{Sb}$	Sb, Sm = μέση ταχύτητα επιβατικού οχήματος σε κανονικές και μικτές συνθήκες ροής, αντίστοιχα (km/h)
12	PCU=$\frac{HVheadway}{PCheadway}$	HVheadway = διαχωρισμός βαρέων οχημάτων PCheadway = διαχωρισμός επιβατικών αυτοκινήτων
13	PCU = $\frac{Ai\ Vc}{Vi\ Ac}$	Vc, Vi = ταχύτητες αυτοκινήτου και οχήματος τύπου i, αντίστοιχα Ac, Ai = οι επιφάνειες επιρροής τους, αντίστοιχα
14	PCU=$\frac{\alpha ir}{\alpha 1}$	α_{ir} = συντελεστής για κάθε τύπο οχήματος α1 = συντελεστής για ένα όχημα αναφοράς, π.χ. επιβατικό αυτοκίνητο
15	PCU = $\frac{Uc}{Uv}$	Uc, Uv = μέση ταχύτητα αυτοκινήτου c και οχήματος κλάσης v
16	PCU = $\frac{tc}{tv}$	tc, tv = μέσος ελάχιστος χρονικός διαχωρισμός αυτοκινήτων και οχημάτων κλάσης v
17	PCU=$\frac{Kcar}{Ktruck}$	Kcar = πυκνότητα επιβατικών αυτοκινήτων Ktruck = πυκνότητα φορτηγών
18	PCU = $\frac{ti/tc}{Ac/Ai}$	Ac, Ai = επιφάνεια επιρροής επιβατικού αυτοκινήτου και οχήματος τύπου i, αντίστοιχα tc, ti = χρόνος μετακίνησης επιβατικού αυτοκινήτου και οχήματος τύπου i, αντίστοιχα
19	$V_1 = A_0 + A_1Q_1 + A_2Q_2 + \ldots + A_nQ_n$ PCU=$\frac{An}{A1}$	V1 = ταχύτητα αυτοκινήτων Q1 = ροή αυτοκινήτων (τύποι 2,3,…n) An = συντελεστές παλινδρόμησης A0 = σταθερά
20	PCU=$\frac{Velocitycar\ /InfluenceAreacar}{Velocityve\ hicle\ /InfluenceAreave\ hicle}$	Velocitycar = ταχύτητα αυτοκινήτου Velocityvehicle = ταχύτητα εκάστοτε τύπου οχήματος InfluenceAreacar = επιφάνεια επιρροής αυτοκινήτου InfluenceAreavehicle = επιφάνεια επιρροής εκάστοτε τύπου οχήματος
21	PCU=$\frac{Ti/Tc}{Ac/Ai}$	Tc, Ti = μέση χρονική κατάληψη επιβατικού αυτοκινήτου και οχήματος τύπου i Ac, Ai = οι επιφάνειες επιρροής τους, αντίστοιχα
22	PCU = $fi\frac{Hi}{Hc}$	fi =συντελεστής πλάτους οχήματος τύπου i Hi = μέσος διαχωρισμός οχήματος τύπου i Hc = μέσος διαχωρισμός επιβατικού αυτοκινήτου c
23	PCU = $\frac{OTi}{OTcs} * \frac{wi}{wcs}$	OTi, OTcs = αριθμός φορών κατάληψης οχήματος τύπου I και επιβατικών αυτοκινήτων, αντίστοιχα wi, wcs = πλάτη κατάληψης οχήματος τύπου I και επιβατικών αυτοκινήτων, αντίστοιχα
24	PCU = $\frac{Cpcs}{Cpi}$	Cpcs, Cpi = ικανότητα κύριας κίνησης σε όρους επιβατικού αυτοκινήτου και οχήματος τύπου i, αντίστοιχα

Βασισμένοι στη βιβλιογραφία οι Pooja Raj et al. (2019) αναφέρουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυριότερων μεθόδων που παρουσιάστηκαν στους παραπάνω πίνακες για διαφορετικές υποδομές υπό ομοιογενείς και μικτές κυκλοφοριακές συνθήκες:

Μέθοδος Μοντελοποίησης Ταχύτητας

Η **ταχύτητα** είναι μία κύρια παράμετρος που επηρεάζει την κυκλοφορία και τη Στάθμη Εξυπηρέτησης. Οι τιμές Μ.Ε.Α. για κάθε τύπο οχήματος μεταξύ των άλλων εξαρτώνται και από τον κυκλοφοριακό φόρτο και τη σύνθεση της. Συνεπώς, οποιαδήποτε μεταβολή στον κυκλοφοριακό φόρτο ή τη σύνθεση της κυκλοφορίας επηρεάζει την ταχύτητα του εκάστοτε οχήματος. Έτσι, οι επιπτώσεις της αυξημένης κίνησης ή η αντικατάσταση οχημάτων με άλλα οχήματα διαφορετικών χαρακτηριστικών έχουν αντίκτυπο στην ταχύτητα ροής της κυκλοφορίας. Η μέθοδος που μοντελοποιεί την ταχύτητα είναι απλή και η μέτρηση των ταχυτήτων από το πεδίο είναι σχετικά εύκολη. Η μέτρηση της ταχύτητας της κυκλοφορίας υπολογίζεται ως η μέση ταχύτητα διαφορετικών τύπων οχημάτων που βρίσκονται στο δίκτυο (Elefteriadou et al. 1997, Chandra and Kumar 2003).

Οι **μέθοδοι που βασίζονται στην ταχύτητα της κυκλοφορίας** ποσοτικοποιούν τις επιδράσεις της αλλαγής της ταχύτητα ενός συγκεκριμένου τύπου οχήματος σε σύγκριση με τα επιβατικά οχήματα. Συνεπώς, σε αυτές τις μεθόδους, χρησιμοποιείται είτε η μέση ταχύτητα του κάθε οχήματος είτε της κυκλοφορίας. Αυτό δημιουργεί δύο προβλήματα: πρώτον, η ταχύτητα του κάθε οχήματος διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες και τις οδικές υποδομές. Παίρνοντας τη μέση ταχύτητα όλων των οχημάτων θα υποτιμηθούν ή θα υπερεκτιμηθούν οι διάφορες ακραίες ταχύτητες. Δεύτερον, σε συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης, μειώνονται οι διαφορές μεταξύ των ταχυτήτων, εφόσον το σύνολο των οχημάτων στο δίκτυο έχει μειωμένη ταχύτητα (Metkari et al. 2012). Τα παραπάνω οδηγούν στην ανακριβή εκτίμηση της τιμής Μ.Ε.Α. ενός οχήματος που ποικίλει ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες.

Μέθοδος Διαχωρισμού

Η **μέθοδος του χρονικού ή χωρικού διαχωρισμού** χρησιμοποιείται κυρίως για τον υπολογισμό Μ.Ε.Α. βαρέων οχημάτων. Αυτό συμβαίνει επειδή τα βαρέα οχήματα καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο στην κυκλοφορία. Ένας λόγος που προτιμώνται οι μέθοδοι που βασίζονται στον διαχωρισμό είναι το γεγονός ότι εκφράζουν δυναμικά χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως η συμπεριφορά του οδηγού, ο περιβάλλοντας χώρος της οδού, ο φόρτος της κυκλοφορίας και χαρακτηριστικά ταχύτητας, σε μόνο μία παράμετρο. Ωστόσο, η εκτίμηση των Μ.Ε.Α. χρησιμοποιώντας μεθόδους διαχωρισμού εφαρμόζεται μόνο σε σταθερής κατάστασης κυκλοφοριακές συνθήκες (Saha et al. 2009, Sarraj και Jadili 2012). Σε μη σταθερές καταστάσεις, η μέτρηση του διαχωρισμού είναι δύσκολη και είναι πολύ πιθανό να υπάρξουν εσφαλμένες μετρήσεις. Επιπλέον, είναι περίπλοκη η απομόνωση των διαχωρισμών από σταθερές συνθήκες από τους διαχωρισμούς που προκύπτουν από δεδομένα σε μεγαλύτερη περίοδο. Τέλος, είναι

δύσκολο να συγκεντρωθούν τα στοιχεία των διαχωρισμών από όλους τους τύπους οχημάτων σε μικτές κυκλοφοριακές συνθήκες.

Μέθοδος Καθυστέρησης και Ροή Απαλλαγής Ουρών

Η καθυστέρηση είναι ο επιπλέον χρόνος ταξιδιού που βιώνει ο οδηγός, ο επιβάτης ή ο πεζός λόγω των συνθηκών που επιβάλλουν μειωμένη κίνηση στην κυκλοφορία. Στη **μέθοδο της καθυστέρησης** θεωρείται ότι τα οχήματα που κινούνται γρήγορα εμποδίζονται από αυτά που κινούνται πιο αργά (Craus et al. 1980). Με αυτήν την υπόθεση η μέθοδος της καθυστέρησης είναι κατάλληλη για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο. Ωστόσο, αυτό παρατηρείται κυρίως σε ομοιογενείς συνθήκες.

Η ροή απαλλαγής ουρών εμφανίζεται στους αυτοκινητόδρομους μετά από την έναρξη της συμφόρησης και αναπαριστά την μακροπρόθεσμη ικανότητα μιας επαναλαμβανόμενης ή μη επαναλαμβανόμενης φάλαγγας. Στη **μέθοδο της ροής απαλλαγής ουρών** ο χρόνος που ένα όχημα βρίσκεται στην περιοχή ενός κόμβου δείχνει την επιρροή του οχήματος στη λειτουργία του κόμβου. Η χρονική διάρκεια για την αποσυμφόρηση του κόμβου εξαρτάται επίσης από την αλληλεπίδραση μεταξύ των οχημάτων στη φάλαγγα, που είναι μία συνάρτηση της σύνθεσης της κυκλοφορίας και του μεγέθους των οχημάτων. Στην περίπτωση μικτών κυκλοφοριακών συνθηκών, παρατηρείται ότι τα μικρότερου μεγέθους οχήματα, όπως οι μοτοσυκλέτες, καταλαμβάνουν τις μπροστινές θέσης της φάλαγγας και συνωστίζονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους εξαιτίας της υψηλής ικανότητας τους για ελιγμούς.

Επομένως, αυτές οι μέθοδοι δύναται να μην υπολογίζουν έγκυρες τιμές Μ.Ε.Α. για μικτή κυκλοφορία, όπου δεν τηρούνται πάντα τα όρια των λωρίδων κυκλοφορίας.

Μέθοδος Chandra

Οι Chandra et al. (1995) πρότεινε μία μέθοδο εκτίμησης των Μ.Ε.Α. που χρησιμοποιείται κυρίως σε μικτές κυκλοφοριακές συνθήκες, **χρησιμοποιώντας την ταχύτητα και την περιβάλλουσα επιφάνεια του οχήματος**. Σε αυτήν τη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε η ταχύτητα ως κύρια μεταβλητή για τον καθορισμό της σχετικής επίδρασης του εκάστοτε οχήματος στην κυκλοφοριακή ροή των αστικών οδών. Η ταχύτητα οποιουδήποτε τύπου οχήματος είναι μία πραγματική αναπαράσταση της συνολικής αλληλεπίδρασης του οχήματος με τα υπόλοιπα οχήματα άλλων τύπων. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος συμπεριλαμβάνει μόνο την περιβάλλουσα περιοχή των οχημάτων, ενώ στο πεδίο τα οχήματα επηρεάζονται από μία μεγαλύτερη περιοχή, ανάλογη με τον τύπο των οχημάτων που τα περιβάλλουν. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις επιδράσεις στην εκτίμηση των Μ.Ε.Α. είναι γεγονός ότι τα αποτελέσματα θα ήταν πιο ρεαλιστικά. Τέλος, σε συνθήκες ελεύθερης ροής τα οχήματα επηρεάζονται λιγότερο από τα άλλα και έτσι, η εκτίμηση των Μ.Ε.Α. με τη μέθοδο Chandra επηρεάζεται από την ταχύτητα και την περιβάλλουσα επιφάνεια του οχήματος. Ωστόσο, σε συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης η ταχύτητα όλων των οχημάτων είναι σχεδόν ίδια και η εκτίμηση των Μ.Ε.Α. εξαρτάται μόνο από την περιβάλλουσα επιφάνεια του οχήματος.

2.3.2. Συναφείς Έρευνες και Μεθοδολογίες σε Αυτόνομα Οχήματα

Όπως αναφέρεται στο πρόγραμμα CoEXist D2.8 η εφαρμογή των Μ.Ε.Α. χρησιμοποιείται συχνά στα μακροσκοπικά μοντέλα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη η μετατροπή βαρέων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. Θεωρώντας ότι τα αυτόνομα οχήματα (Automated Vehicles – AV) συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα συμβατικά οχήματα (Conventional Vehicles – CV) η χρήση των Μ.Ε.Α. επιβάλλεται να επεκταθεί τόσο στα αυτόνομα οχήματα όσο και στους διάφορους τύπους οδών και κόμβων (αυτοκινητόδρομοι ή αστικές οδοί, σηματοδοτούμενοι ή μη σηματοδοτούμενοι κόμβοι).

Στα παραδοσιακά μοντέλα ζήτησης μετακίνησης εφαρμόζεται **ο αλγόριθμος των τεσσάρων σταδίων**: γένεση μετακινήσεων, επιλογή προορισμού, επιλογή μέσου μετακίνησης και επιλογή διαδρομής. Έτσι, παρουσιάζεται και γίνεται να επαναληφθεί η συμπεριφορά των ανθρώπων και οι κινήσεις τους. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ως επιπλέον στάδιο και η επιλογή της ώρας αναχώρησης. Εντάσσοντας τα αυτόνομα οχήματα σε αυτά τα μοντέλα απαιτείται η καθιέρωση και ένταξη **νέων σταδίων** στη διαδικασία, όπως για παράδειγμα η ομαδοποίηση ταξιδιών ή ένα σχέδιο κατά το οποίο οι χρήστες χρησιμοποιούν από κοινού ένα αυτόνομο όχημα για την εξυπηρέτησή τους (car-sharing).

Η επέκταση των Μ.Ε.Α. στα αυτόνομα οχήματα έχει δύο μορφές ανάλογα με την επιλεγείσα υπόθεση.

<u>Υπόθεση 1</u>: Η σχέση μεταξύ του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας και η επίδραση που αυτά έχουν στο κορεσμένο δίκτυο είναι γραμμική. Αυτό απαιτεί ένα συγκεκριμένο και σταθερό παράγοντα – Μ.Ε.Α. για κάθε συνδυασμό τύπου οχήματος και τύπου στοιχείου, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.1. Σε αυτήν την πρώτη προσέγγιση ο παράγοντας – Μ.Ε.Α. δεν εξαρτάται από το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων στην σύνθεση του δικτύου.

<u>Υπόθεση 2</u>: Σε αυτήν την υπόθεση θεωρείται μη γραμμική η σχέση μεταξύ του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας και της επίδρασης που αυτά έχουν στο κορεσμένο δίκτυο. Στην περίπτωση χαμηλού ποσοστού αυτόνομων οχημάτων η επιρροή ενός αυτόνομου οχήματος στο σύνολο του δικτύου είναι μικρότερη από τις περιπτώσεις υψηλών ποσοστών αυτόνομων οχημάτων. Σε αυτήν την δεύτερη προσέγγιση ο παράγοντας – Μ.Ε.Α. πρέπει να προσαρμοστεί κατά τη διάρκεια της μελέτης σε σχέση με το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (από 0% έως 100%, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.2.

$$x_s = \frac{\sum_{i \in VehType} q_{s,i} * f}{q_s^{max}} \quad (2.1)$$ όπου: $f = f_{s,i}^{PCU}$ γραμμική επιρροή των AV

$f = f_{s,i}^{PCU}(p_{s.AV})$ μη γραμμική επιρροή των AV

$$f_{s,i=AV}^{PCU}(p_{s,\,AV}) = f_{s,i=AV}^{PCU,Max} - p_{s,AV} * \left(f_{s,i=AV}^{PCU,Max} - f_{s,i=AV}^{PCU,Min}\right) \quad (2.2)$$

όπου:

x_s: βαθμός κορεσμού (φόρτος/ικανότητα – V/C) στο στοιχείο s

$f_{s,i}^{PCU}$: Μ.Ε.Α. οχήματος τύπου i στοιχείου s [Μ.Ε.Α./όχημα]

$f_{s,i}^{PCU}(p_{s.AV})$: συνάρτηση Μ.Ε.Α. που εξαρτάται από το ποσοστό των αυτόνομων $p_{s.AV}$ [Μ.Ε.Α./όχημα]

$p_{s.AV}$: ποσοστό αυτόνομων στο στοιχείο s

$f_{s,i=AV}^{PCU,Max}$: Μ.Ε.Α. αυτόνομου οχήματος του στοιχείου s για ποσοστό αυτόνομων 0% [Μ.Ε.Α./όχημα]

$f_{s,i=AV}^{PCU,Min}$: Μ.Ε.Α. αυτόνομου οχήματος του στοιχείου s για ποσοστό αυτόνομων 100% [Μ.Ε.Α./όχημα]

$q_{s,i}$: φόρτος οχήματος τύπου i στο στοιχείο s [όχημα/ώρα]

q_s^{max}: ικανότητα του στοιχείου s, θεωρώντας ότι όλα τα οχήματα είναι επιβατικά αυτοκίνητα [Μ.Ε.Α./ώρα]

VehType: συμβατικά, αυτόνομα ή βαρέα οχήματα (CV, AV, HGV, αντίστοιχα)

2.4. Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Όπως φαίνεται από τη βιβλιογραφία τα αυτόνομα οχήματα είναι ένα σημαντικό βήμα στον τομέα μεταφορών και συγκοινωνιακής υποδομής και η ένταξή τους στην κυκλοφορία βρίσκεται στο επίκεντρο των συγκοινωνιακών ερευνών.

Η τιμή Μ.Ε.Α. ενός οχήματος είναι ένας σημαντικός δείκτης για το εκάστοτε όχημα και υποδηλώνει τη συμπεριφορά του σε ένα οδικό δίκτυο. Αν και έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για τον υπολογισμό της τιμής Μ.Ε.Α., η κάθε μία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αυτά, αφορούν κυρίως τις εισαγόμενες μεταβλητές, οι οποίες πολλές φορές, λόγω της φύσης τους, οδηγούν σε ανακριβή αποτελέσματα. Ο προσδιορισμός της τιμής Μ.Ε.Α. είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να αποφανθεί κανείς την επιρροή του εκάστοτε οχήματος στο σύνολο της κυκλοφορίας σε ένα οδικό δίκτυο. Σε αυτό το πλαίσιο κρίνεται αναγκαίο να στραφούν περισσότερες έρευνες όπως και η παρούσα Διπλωματική Εργασία στην επέκταση του υπολογισμού της τιμής Μ.Ε.Α. για τα αυτόνομα οχήματα.

Απαιτείται, λοιπόν, περεταίρω έρευνα στην εκτίμηση της τιμής Μ.Ε.Α. αυτόνομων οχημάτων συνδυάζοντας ορισμένες μεθοδολογίες και εντάσσοντας νέες μεταβλητές που περιγράφουν τις γενικότερες συνθήκες του εκάστοτε οδικού δικτύου. Ταυτόχρονα, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση της επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον, με βασικούς δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicator – KPI) που αφορούν την κυκλοφορία, το περιβάλλον και την ασφάλεια.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία με την οποία διερευνήθηκε η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον και το θεωρητικό υπόβαθρο, δυνάμει του οποίου έγινε η εφαρμογή της μεθόδου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Γίνεται αναφορά στο θεμελιώδες μακροσκοπικό διάγραμμα, στα μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης, στο μοντέλο ακολουθούντων οχημάτων, στις μονάδες επιβατικών αυτοκινήτων και στη μέθοδο της παλινδρόμησης. Τέλος, αναφέρονται τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

3.1.Προσέγγιση

Αρχικά, επιλέχθηκε το **οδικό δίκτυο** στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της κυκλοφορίας στο λογισμικό Aimsun Next. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε διατηρείται από το Εργαστήριο Κυκλοφοριακής Τεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αποτελεί το βασικό οδικό δίκτυο της Αττικής και είναι σχεδιασμένο στο πρόγραμμα προσομοίωσης Aimsun. Πιο συγκεκριμένα, στο μοντέλο περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του δικτύου (συνολικά οχήματα, περίοδος φωτεινών σηματοδοτών, τμήματα οδών) και τα προγράμματα σηματοδότησης των κόμβων, τις παραμέτρους των οχημάτων (διαστάσεις, ταχύτητα, επιτάχυνση και χρόνος αντίδρασης), αλλά και τις γραμμές και τα δρομολόγια λεωφορείων και τρόλεϊ.

Έπειτα, επιλέχθηκαν και δοκιμάστηκαν **κατανομές ζήτησης της κυκλοφορίας,** ώστε να βρεθεί η κατάλληλη για την οποία θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση συμπεριλαμβανομένης και της ώρας αιχμής. Μέσω της προσομοίωσης στο λογισμικό Aimsun, για την κάθε δοκιμή εξήχθησαν δεδομένα και δημιουργήθηκε το θεμελιώδες μακροσκοπικό διάγραμμα (Macroscopic Fundamental Diagram – M.F.D.), το οποίο αποτέλεσε κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης κατανομής ζήτησης και απαιτήθηκε να έχει την ίδια μορφή με το πρότυπο διάγραμμα που προτείνεται.

Στη συνέχεια, αφού βρέθηκε η κατάλληλη κατανομή της ζήτησης, υλοποιήθηκαν **δεκατέσσερα σενάρια με μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης**. Σε κάθε σενάριο εκτελέστηκαν δέκα επαναλήψεις, ώστε να προκύψουν όσο το δυνατόν πιο ορθά αποτελέσματα. Αναλυτικότερα, υλοποιήθηκαν τρία σενάρια βάσης αναφοράς (baseline sceniarios). Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο περιγράφεται το δίκτυο με τις υπάρχουσες συνθήκες, δηλαδή με συμβατικά οχήματα, στο δεύτερο σενάριο έχει προστεθεί ένα συμβατικό λεωφορείο που πραγματοποιεί μία διαδρομή σε μία περιοχή μεγάλης σημασίας, ενώ στο τρίτο σενάριο το λεωφορείο του δεύτερου σεναρίου είναι αυτόνομο. Επίσης, υλοποιήθηκαν δέκα σενάρια, τα οποία έχουν αυξανόμενο ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας και συμπεριλαμβάνουν την κυκλοφορία του αυτόνομου λεωφορείου. Τέλος, υλοποιήθηκε και ένα σενάριο με 100% αυτόνομα οχήματα, χωρίς όμως την κυκλοφορία του αυτόνομου λεωφορείου. Εκτενέστερη περιγραφή τόσο των σεναρίων όσο και των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιείται στο κεφάλαιο της Εφαρμογής Μεθοδολογίας και Επεξεργασίας στοιχείων.

Στο επόμενο στάδιο διερευνήθηκαν οι **κυκλοφοριακές συνθήκες του εκάστοτε σεναρίου** σε επίπεδο δικτύου αλλά και οδικού τμήματος της διαδρομής που ακολουθεί το λεωφορείο. Μετά από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του κάθε σεναρίου αποθηκεύτηκαν τα αποτελέσματα σε πίνακες και επεξεργάστηκαν μέσω του προγράμματος SQLite. Από εκεί εξήχθησαν οι πίνακες MISYS και MISECT, οι οποίοι περιέχουν τα αποτελέσματα των σεναρίων που αφορούν στο σύνολο του δικτύου και τη διαδρομή που ακολουθεί το αυτόνομο λεωφορείο, αντίστοιχα. Για τη δημιουργία του διαγράμματος M.F.D. του δικτύου εξήχθησαν από τον πίνακα MISYS η πυκνότητα και τα εξερχόμενα οχήματα από το δίκτυο, ενώ για τη δημιουργία του διαγράμματος M.F.D. του τμήματος της διαδρομής του λεωφορείου εξήχθησαν από τον πίνακα MISECT η πυκνότητα και ο φόρτος του κάθε τμήματος οδού που αποτελεί τη διαδρομή του λεωφορείου.

Για τη δημιουργία ενός **ολοκληρωμένου πλαισίου δεδομένων** με σκοπό την επίτευξη του τελικού στόχου, που είναι η εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε μονάδες επιβατικών αυτοκινήτων, είναι απαραίτητος ο καθορισμός του τύπου της οδού και του ελέγχου της κυκλοφορίας, μεταβλητές που εντάσσονται στην κυκλοφοριακή μετρική που αφορά στην κυκλοφορία. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας δεδομένα από το οδικό δίκτυο στο Aimsun σε συνδυασμό με τη χρήση των χαρτών της Google. Επιπλέον, για την ολοκλήρωση του πλαισίου δεδομένων επιλέχθηκαν βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) που αφορούν στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον (Πίνακας 3.1). Αυτοί που αφορούν την κυκλοφορία είναι η ροή, το ποσοστό αυτόνομων οχημάτων, το ποσοστό κυκλοφορίας, το μήκος διάνυσης και ο χρόνος ταξιδιού και καθυστέρησης ανά χιλιόμετρο. Οι κυκλοφοριακές μετρικές που αφορούν στην ασφάλεια είναι η ταχύτητα και ο αριθμός αλλαγής λωρίδων, ενώ αυτές που αφορούν στο περιβάλλον είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και οξειδίων αζώτου (NOx). Τέλος, προστίθεται ο λόγος που εκφράζει το συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε M.E.A., δηλαδή ο λόγος του φόρτου του κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το φόρτο του κάθε τμήματος του εκάστοτε σεναρίου.

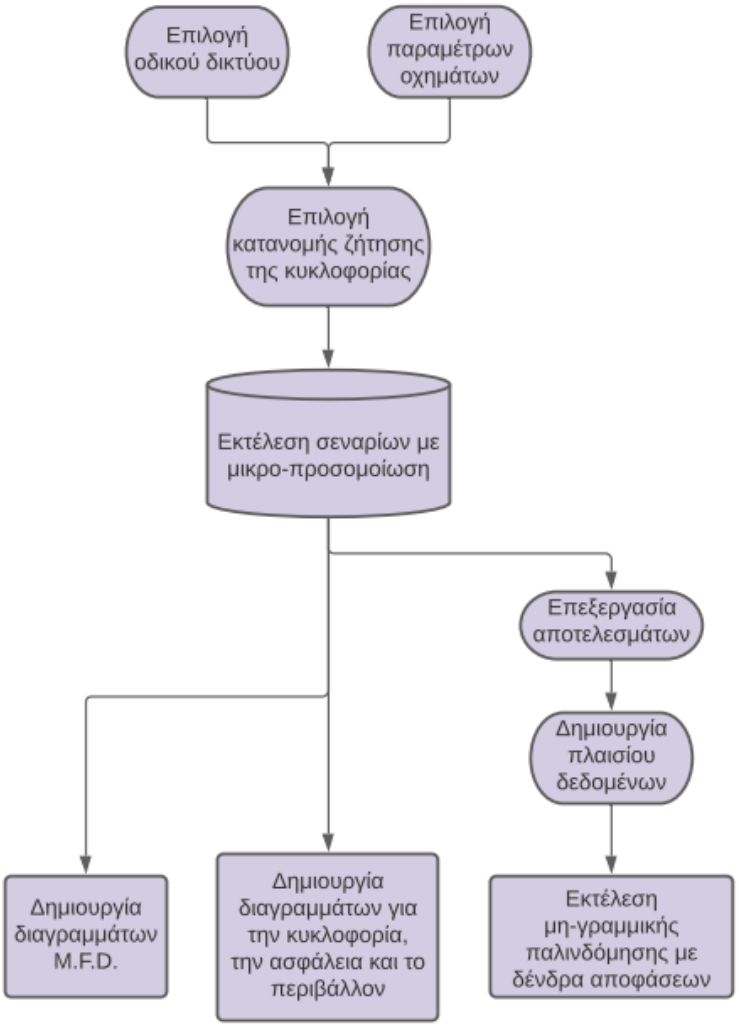
Πίνακας 3.1: Βασικοί Δείκτες Απόδοσης - KPIs

Βασικοί Δείκτες Απόδοσης		Ορισμός
Αφορούν στην κυκλοφορία	ροή	αριθμός οχημάτων στη μονάδα χρόνου στο δίκτυο ή σε οδικό τμήμα (μονάδα μέτρησης: veh/h)
	ποσοστό αυτόνομων οχημάτων	ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας του δικτύου
	ποσοστό κυκλοφορίας	ποσοστό κυκλοφορίας οχημάτων στο δίκτυο - εξαρτάται από το αν είναι ώρα αιμής ή όχι
	μήκος διάνυσης	μήκος που διανύθηκε από ένα όχημα στο δίκτυο ή σε ένα οδικό τμήμα (μονάδα μέτρησης: km)
	χρόνος ταξιδιού	χρόνος που διένυσε ένα όχημα στο δίκτυο ή σε ένα οδικό τμήμα (μονάδα μέτρησης: sec/km)
	χρόνος λόγω καθυστερήσεων	χρόνος λόγω καθυστερήσεων ενός οχήματος στο δίκτυο ή σε ένα οδικό τμήμα (μονάδα μέτρησης: sec/km)
Αφορούν στην οδική ασφάλεια	ταχύτητα	η μέση ταχύτητα ενός οχήματος στο δίκτυο ή σε οδικό τμήμα (μονάδα μέτρησης: km/h)
	πλήθος αλλαγής λωρίδων	το πλήθος των φορών που αλλάζει λωρίδα ένα όχημα
Αφορούν στο περιβάλλον	εκπομπές CO2	εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από ένα όχημα (μονάδα μέτρησης: kg)
	εκπομπές Nox	εκπομπές οξειδίων αζώτου από ένα όχημα (μονάδα μέτρησης: kg)

Από το πλαίσιο δεδομένων που περιγράφηκε παραπάνω επιλέχθηκαν οι κατάλληλες μεταβλητές και εκτελέστηκε μία **μη-γραμμική παλινδρόμηση με δένδρα αποφάσεων** στο προγραμματιστικό περιβάλλον της R, με εξαρτημένη μεταβλητή το λογάριθμο του λόγου του φόρτου του κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το φόρτο του κάθε τμήματος του εκάστοτε σεναρίου. Έτσι, προέκυψε ένα δένδρο παλινδρόμησης, όπου δοθέντων των μεταβλητών που επιλέχθηκαν αναδεικνύεται η εξίσωση μέσω της οποίας **εκτιμάται ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων**.

Τέλος, δημιουργήθηκαν **διαγράμματα βασικών δεικτών απόδοσης** για την διερεύνηση της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, στην ασφάλεια και στο περιβάλλον και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα για κάθε σενάριο ξεχωριστά.

Τα βήματα της μεθοδολογίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί (Διάγραμμα 3.1).



Διάγραμμα 3.1: Βήματα Μεθοδολογίας Διπλωματικής Εργασίας

3.2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

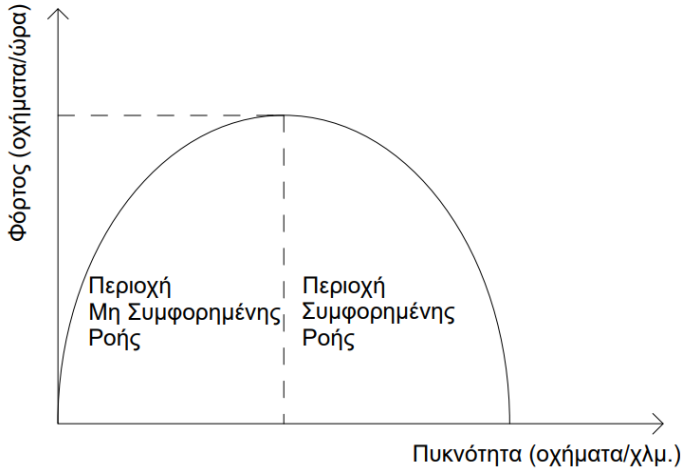
3.2.1. Θεμελιώδες Μακροσκοπικό Διάγραμμα (Macroscopic Fundamental Diagram – M.F.D.)

Πειράματα και προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν από τους Geroliminis και Daganzo (2008) έδειξαν ότι σε πολλές περιπτώσεις ο μέσος φόρτος και η μέση πυκνότητα ενός δικτύου συσχετίζονταν με μία αναπαραγόμενη καμπύλη, η οποία έγινε γνωστή ως το **Θεμελιώδες Μακροσκοπικό Διάγραμμα (Macroscopic Fundamental Diagram – M.F.D.)**. Νωρίτερα ο Daganzo (2005) είχε παρουσιάσει τη σχέση μεταξύ φόρτου και ταχύτητας ως μέρος ενός αναλυτικού μοντέλου που περιγράφει τη δυναμική ενός δικτύου κυκλοφορίας.

Η **βασική ιδέα** της μεθόδου του διαγράμματος M.F.D. – βασισμένη στην παρατήρηση – είναι ότι επιτρέπει την μετατροπή των μοντέλων προβλέψεως από μικροσκοπικό επίπεδο σε έλεγχο και παρακολούθηση μακροσκοπικού επιπέδου, αξιοσημείωτο γεγονός, αφού σπάνια χρησιμοποιούνται δεδομένα από μικροσκοπικό επίπεδο για μεγάλα δίκτυα (Daganzo, 2007). Μέσω του διαγράμματος M.F.D. ενός οδικού δικτύου είναι εφικτό να περιγραφούν οι κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου και επομένως να οριστεί η στάθμη εξυπηρέτησης του. Συνεπώς, αποτελεί μία χαρακτηριστική ιδιότητα του δικτύου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την παρακολούθηση μεγάλων δικτύων και για τον στρατηγικό έλεγχο σε μακροσκοπικό επίπεδο. Ως εκ τούτου, αποτελεί μία δυναμική προσέγγιση, η οποία συμβάλλει στην βελτίωση της αστικής κινητικότητας και στη μείωση της συμφόρησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι το διάγραμμα και η μέθοδος M.F.D. δεν επηρεάζεται από τη ζήτηση Προέλευσης – Προορισμού, γεγονός που το καθιστά προτιμότερο για περιπτώσεις ελέγχου κυκλοφορίας.

Η **μορφή του διαγράμματος** είναι κοίλη και βασίζεται στο θεμελιώδες διάγραμμα κυκλοφοριακής ροής φόρτου – πυκνότητας κατά Greenshield (Εικόνα 3.1) και στη θεμελιώδη σχέση κυκλοφοριακής ροής:

q = k*u, όπου q: φόρτος, k: πυκνότητα, u: ταχύτητα.

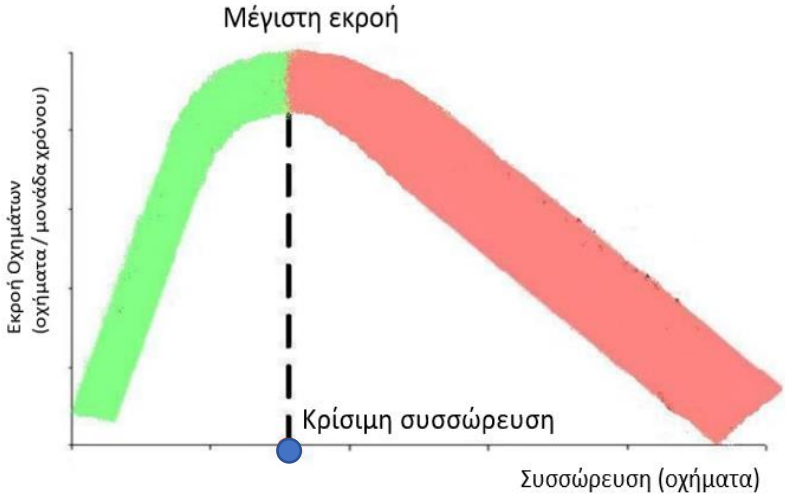


Εικόνα 3.1: Σχέση Φόρτου – Πυκνότητας κατά Greenshield

Το διάγραμμα M.F.D. συσχετίζει την εκροή και την συσσώρευση σε ένα οδικό δίκτυο. Η εκροή εκφράζεται από τα οχήματα που εξέρχονται από το δίκτυο ή φτάνουν στον προορισμό τους και έχει μονάδα μέτρησης οχήματα ανά μονάδα χρόνου, ενώ η συσσώρευση εκφράζεται από τα οχήματα που βρίσκονται στο δίκτυο (μονάδα μέτρησης: οχήματα). Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, και όχι σε συνθήκες προσομοίωσης, τα οχήματα που φτάνουν στον προορισμό τους δεν είναι παρατηρήσιμη ποσότητα και δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας από ανιχνευτές ή άλλες συσκευές. Κατά συνέπεια, εισάγεται μία νέα κυκλοφοριακή μεταβλητή, η παραγωγή. Η παραγωγή εκφράζεται ως q^w και είναι η συνολική απόσταση που ταξίδεψαν όλα τα οχήματα στο δίκτυο (μονάδα μέτρησης: οχήματα ανά μονάδα χρόνου). Ουσιαστικά, η παραγωγή είναι η σταθμισμένη μέση εκροή. Σημειώνεται ότι έχει αποδειχθεί ότι η σχέση μεταξύ εκροής και παραγωγής

είναι γραμμική όσον αφορά τα οδικά δίκτυα (Geroliminis & Daganzo, 2008), συνεπώς η παρατηρήσιμη παραγωγή μετακινήσεων αποτελεί καλή αντικατάσταση της εκροής των οχημάτων που φτάνουν στον προορισμό τους (μη παρατηρήσιμη ποσότητα). Επομένως, στις πραγματικές συνθήκες αντί για τη σχέση συσσώρευσης – εκροής οχημάτων που φτάνουν στον προορισμό τους, χρησιμοποιείται η σχέση συσσώρευσης – παραγωγής για την ανάλυση δικτύου.

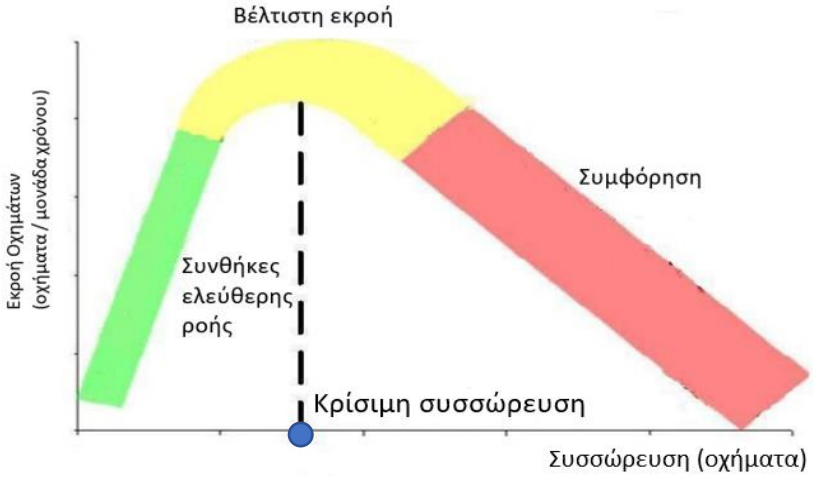
Ένα **πρότυπο διάγραμμα M.F.D.** παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2. Όπως είναι η κρίσιμη πυκνότητα στο θεμελιώδες διάγραμμα κυκλοφοριακής ροής κατά Greenshield, αντίστοιχα και σε αυτό το διάγραμμα η τιμή της συσσώρευσης όταν η εκροή γίνει μέγιστη αποτελεί σημαντική παράμετρο και ονομάζεται κρίσιμη συσσώρευση, σημειώνεται ως μπλε κουκίδα στην Εικόνα. Η μέγιστη εκροή οχημάτων υποδεικνύει την εξυπηρέτηση του δικτύου, ενώ η αντίστοιχη κρίσιμη συσσώρευση υποδεικνύει τον βέλτιστο αριθμό οχημάτων στο δίκτυο. Από το σχήμα διακρίνονται δύο κυκλοφοριακές καταστάσεις από το σημείο της κρίσιμης συσσώρευσης, αυτές είναι οι συνθήκες ελεύθερης ροής και συνθήκες συμφόρησης. Το σημείο με την κρίσιμη συσσώρευση και τη μέγιστη εκροή οχημάτων αποτελεί το σημείο καμπής. Αν οι μεταβλητές βρίσκονται αριστερά του σημείου καμπής, το οδικό δίκτυο βρίσκεται σε συνθήκες ελεύθερης ροής, αλλιώς σε συνθήκες συμφόρησης. Αυτό επιβεβαιώνει ότι δοθέντος του διαγράμματος M.F.D. δύνανται να υπολογιστούν οι κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου.



Εικόνα 3.2: Χαρακτηριστικό διάγραμμα M.F.D.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν η σταθμισμένη πυκνότητα k^w και η σταθμισμένη εκροή q^w διακρίνονται τρεις κυκλοφοριακές καταστάσεις από το σημείο καμπής, αυτές είναι οι συνθήκες ελεύθερης ροής, βέλτιστης εκροής και συμφόρησης. Αναλυτικότερα, όταν στο δίκτυο κινούνται λιγοστά οχήματα οι κυκλοφοριακές συνθήκες είναι ελεύθερης ροής, όπως φαίνεται στο πράσινο τμήμα της Εικόνας 3.3. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των οχημάτων, μεγαλώνει και η εκροή οχημάτων έως ότου φτάσει τη μέγιστη, όπως δείχνει η κίτρινη περιοχή. Τέλος, όσο συνεχίζει να αυξάνεται ο αριθμός των οχημάτων, αυξάνονται οι καθυστερήσεις. Επομένως, όταν ξεπεραστεί η κρίσιμη συσσώρευση στο δίκτυο,

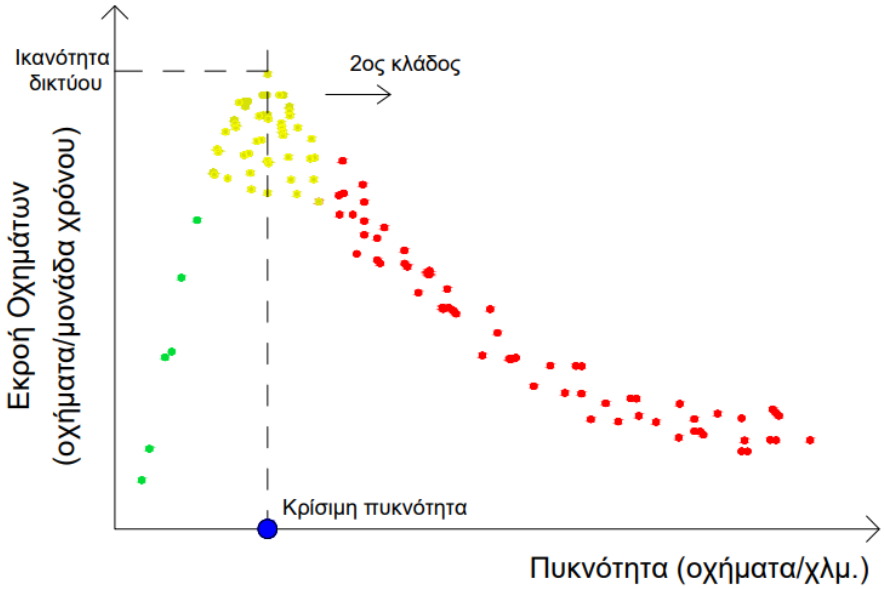
επικρατούν συνθήκες συμφόρησης, κατά τις οποίες τα οχήματα αλληλο-εμποδίζονται και αδυνατεί να επικρατήσει εκροή οχημάτων από το δίκτυο, όπως παρουσιάζεται στο κόκκινο τμήμα.



Εικόνα 3.3: Κυκλοφοριακές συνθήκες σε διάγραμμα M.F.D.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η κύρια αρχή του κυκλοφοριακού ελέγχου που βασίζεται στο διάγραμμα M.F.D. είναι η προσπάθεια να διατηρηθεί η συσσώρευση σε ένα επιθυμητό επίπεδο, στο οποίο μεγιστοποιείται η εκροή οχημάτων σε κάθε περιοχή με τη μέγιστη πυκνότητα προορισμών. Αν κριθεί απαραίτητο, προτείνεται να μετρούνται ανά διαστήματα τα οχήματα στο δίκτυο και με έλεγχο της κυκλοφορίας περιφερειακά του δικτύου να απομονώνονται ορισμένα εκτός αυτού. Με αυτήν την τακτική μεγιστοποιείται ο αριθμός των οχημάτων που ολοκληρώνουν το ταξίδι τους εντός του δικτύου κάθε χρονική στιγμή και αποσυμφορίζεται το δίκτυο.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιείται σαν πρότυπο διάγραμμα το διάγραμμα M.F.D. της Εικόνας 3.4. Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρείται ότι αντί για συσσώρευση χρησιμοποιείται η πυκνότητα. Επιπλέον, υφίσταται η περιοχή με συνθήκες ελεύθερης ροής (πράσινη περιοχή) επειδή η προσομοίωση δεν ξεκινάει από την ώρα αιχμής, αλλά από ένα χρονικό διάστημα νωρίτερα από την ώρα αιχμής, ώστε να φορτιστεί σταδιακά το δίκτυο. Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχει μικρός αριθμός παρατηρήσεων σε αυτήν την περιοχή. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι τιμές στο τέλος του δεύτερου κλάδου συγκλίνουν αλλά δεν φτάνουν το μηδέν. Αυτό συμβαίνει επειδή το δίκτυο δεν βρίσκεται ποτέ σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή όλα τα οχήματα να είναι ακίνητα.



Εικόνα 3.4: Πρότυπο Διάγραμμα M.F.D. για την παρούσα Εργασία

3.2.2. Μικροσκοπικά Μοντέλα Ροής (μικρο – προσομοίωση)

Η **προσομοίωση** είναι ένας εύκολος τρόπος να μελετηθούν οι κύκλοι περιόδων των φωτεινών σηματοδοτών, οι αλλαγές στην πορεία των οχημάτων, τα όρια ταχυτήτων και άλλα μεγέθη στο πλαίσιο του οδικού δικτύου. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τα αποτελέσματα από προηγμένα συστήματα πληροφόρησης μετακινήσεων (ή όπως είναι γνωστά στα αγγλικά Advanced Traveller Information Systems – A.T.I.S.) και διαδρομές σε μεμονωμένες αποφάσεις μετακινήσεων. Επομένως, δύναται να μοντελοποιήσει τόσο τις αντιδράσεις των χρηστών στις πληροφορίες ελέγχου και στις συγκοινωνιακές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο όσο και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, επαληθεύοντας και βελτιώνοντας τις πολιτικές διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Εξ ορισμού, οι προσομοιώσεις αποτελούν απλώς μια αναπαράσταση του περιγραφόμενου φαινομένου, η οποία βασίζεται σε μια σειρά παραδοχών και υποθέσεων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα πολλές φορές να έρχονται σε αντίθεση με τις αρχικές υποθέσεις, να έχουν κάποια σφάλματα ή να αποδίδουν αποτελέσματα που είναι δύσκολο να ερμηνευθούν. Παρ' όλ' αυτά συνεχώς κερδίζουν έδαφος στο συγκοινωνιακό χώρο, γιατί επιτρέπουν τη δοκιμή πολλών εναλλακτικών λύσεων σε προβλήματα και την αξιολόγηση εναλλακτικών έργων που δεν υπάρχουν ακόμα (π.χ. οδικά έργα που δεν έχουν κατασκευαστεί ή τεχνολογίες που δεν έχουν υλοποιηθεί). Οι προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται ως εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων που αποδίδουν χαρακτηριστικά της ροής κυκλοφορίας και είναι αναγκαίες για την μελέτη ολοκληρωμένου συγκοινωνιακού ελέγχου, τη λογική της επιλογής διαδρομών, τη συμπεριφορά μεμονωμένων χρηστών αλλά και την μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

Υπάρχει έντονη αμφισβήτηση όσον αφορά τη χρήση των A.T.I.S. για την αποσυμφόρηση των οδικών δικτύων. Η δυναμική του επαναπροσδιορισμού των διαδρομών, η αλλαγή των

κύκλων περιόδου των φωτεινών σηματοδοτών, οι επιδράσεις των ουρών στην κυκλοφοριακή ικανότητα του δικτύου και οι διάφορες μορφές ελέγχου κόμβων σε πραγματικό χρόνο αποτελούν πρόκληση για την μικρο – προσομοίωση. Κατά την ανάπτυξη ενός προγράμματος ολοκληρωμένης συγκοινωνιακής προσομοίωσης που εκτελεί όλες τις φάσεις των συνδεδεμένων ταξιδιών, των λήψεων αποφάσεων, του προσχεδιασμού μετακινήσεων, τις εκτιμήσεις μετακινήσεων κατά τη διάρκεια των ταξιδιών και στο πέρας τους, οι Chen και Mahmassani βρήκαν ότι το αποτέλεσμα της πρόσβασης των χρηστών σε πληροφορίες στον πραγματικό χρόνο ήταν η δημιουργία συμφόρησης. Από την άλλη μεριά η πρόσβαση σε πληροφορίες σε ένα μέρος των χρηστών τους καθιστούσε προνομιούχους σε σχέση με τους υπόλοιπους.

Οι **κύριες κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης** είναι οι εξής τρεις: μικροσκοπικά, μεσοσκοπικά και μακροσκοπικά μοντέλα. Βασική προϋπόθεση για την επιλογή του τύπου προσομοίωσης είναι να παράγονται ρεαλιστικά αποτελέσματα υπό ποικίλες συνθήκες. Σε γενικές γραμμές, όσο πιο λεπτομερές είναι ένα δίκτυο τόσο καλύτερα αναπαριστά την πραγματικότητα. Ωστόσο, όσο περισσότερα στοιχεία εντάσσονται, το πρόβλημα γίνεται πιο πολύπλοκο και απαιτούνται περισσότερες πηγές (Taplin, 1997). Γενικά, για τις εκτιμήσεις του μέσου χρόνου και τις προβλέψεις καθυστερήσεων προτείνεται να χρησιμοποιείται μακροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης, γιατί στο μικροσκοπικό υποτιμώνται τα συνολικά αποτελέσματα (Taori και Rathi, 1997). Παρ’ όλ’ αυτά, επικρατεί η άποψη ότι η επιλογή του τύπου μοντέλων προσομοίωσης είναι περισσότερο φιλοσοφικό παρά πρακτικό ζήτημα (Rakha και M. Van Aerde, 1997).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης, ωστόσο για λόγους πληρότητας στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών μοντέλων.

Πίνακας 3.2: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των τριών επιπέδων προσομοίωσης

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μακρο-προσομοίωση	Χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις	Παλαιότερη τεχνολογία
	Ώριμη τεχνολογία με μεγάλο αριθμό υλοποιήσεων	Μικρές δυνατότητες επέκτασης, χωρίς μετάβαση σε λύσεις μικρο-/μεσοσκοπικού επιπέδου
	Χρήση για γρήγορη αξιολόγηση μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σεναρίων	Εφαρμογή κυρίως για μακροπρόθεσμη πρόβλεψη
Μικρο-προσομοίωση	Πιο λεπτομερής και ακριβής από μέσο-/μακροσκοπικά μοντέλα	Υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις
	Δυνατότητα ακριβούς προτυποποίησης λεπτομερειών	Απαιτούνται περισσότερα και πιο λεπτομερή δεδομένα
	Οι σύγχρονοι μικροσκοπικοί προσομοιωτές έχουν περάσει από την προσέγγιση κίνησης οχημάτων μέσω στρεφουσών κινήσεων στην προτυποποίηση με βάση διαδρομών Προέλευσης - Προορισμού	Αν και οι μικροσκοπικοί προσομοιωτές γίνονται ταχύτεροι, τα αντίστοιχα μεσοσκοπικά μοντέλα θα επιτρέπουν πάντα την προσομοίωση μεγαλύτερων δικτύων, περισσότερων εναλλακτικών, ή/και μεγαλύτερων χρονικών οριζόντων
Μεσο-προσομοίωση	Πρακτική προσομοίωση μεταξύ μικρο- και μακροσκοπικών μοντέλων, συνδυάζοντας συνολικά και λεπτομερή μοντέλα	Δεν υπάρχουν πολλές πρακτικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας που να έχουν ολοκληρωθεί

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

Κατά τη **μικρο – προσομοίωση** μελετάται το εκάστοτε όχημα από τη στιγμή που εισέρχεται στο δίκτυο μέχρι τη στιγμή που εξέρχεται από αυτό ή μέχρι αν ολοκληρώσει τη διαδρομή του εντός του δικτύου. Επιπλέον, αναπαρίστανται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ οχημάτων σε κόμβους, αλλά και οι στάσεις και η διαδρομή των λεωφορείων που πιθανώς υπάρχουν στο δίκτυο. Επιπλέον, η μικρο – προσομοίωση χρησιμοποιείται για να εντοπίσει τις επιδράσεις από της πληροφορίες των διαδρομών και να αναδείξει στρατηγικές ελέγχου και δρομολόγησης. Σε επίπεδο μικρο – προσομοίωσης ο σκοπός της μοντελοποίησης του εκάστοτε οχήματος εντός του δικτύου είναι η αναπαραγωγή όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικών συνθηκών. Η μικρο – προσομοίωση χρησιμοποιείται για μικρά στοιχεία του

δικτύου, αλλά τα πρόσφατα μοντέλα ενός οχήματος μπορούν να προσομοιώσουν ολόκληρα αστικά δίκτυα, με τη βοήθεια εξελιγμένων υπολογιστών.

Οι πιο συμβατικές μικροσκοπικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούν **απλούς κανόνες βασισμένους στη συμπεριφορά των οδηγών** (simple rule based behavior). Σε μοντέλο ακολουθούντων οχημάτων, η επιτάχυνση ή επιβράδυνση των οχημάτων συσχετίζεται με τα περιβάλλοντα οχήματα ή οι οδηγοί επιλέγουν να διατηρήσουν την ελάχιστη επιθυμητή ταχύτητα (επομένως, μειώνονται και οι αλλαγές λωρίδων). Πολλά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των οδηγών μπορούν να μοντελοποιηθούν και συνήθως είναι δυνατό να ορισθεί η προέλευση και ο προορισμός του κάθε οδηγού. Μία εναλλακτική μέθοδος είναι να διανεμηθούν τα οχήματα τυχαία στο δίκτυο και να τους ανατεθούν τυχαίες επιλογές στις στροφές στους κόμβους.

3.2.3. Μοντέλα Ακολουθούντος Οχήματος

Τα μοντέλα ακολουθούντος οχήματος (car-following model CFM) είναι ίσως η πιο δημοφιλής κατηγορία οδηγικού μοντέλου. Τα μοντέλα αυτά προσαρμόζουν την κίνηση ενός οχήματος με βάση ένα σύνολο κανόνων που στόχο έχει την αποφυγή οποιασδήποτε επαφής με το προπορευόμενο όχημα. Βασική προϋπόθεση στο μικροσκοπικό πρότυπο ακολουθούντος οχήματος είναι η συνέχεια της κυκλοφοριακής ροής σε χώρο και χρόνο. Η επιτάχυνση κάθε οχήματος μπορεί να θεωρηθεί ως απάντηση στο **ερέθισμα από κάποιον εξωγενή ή ενδογενή παράγοντα της κυκλοφορίας**. Το ερέθισμα είναι μία συνάρτηση της θέσης των οχημάτων x_i και των ταχυτήτων τους. Έχει δειχθεί ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της αντίδρασης του οδηγού και της σχετικής ταχύτητας μεταξύ του οχήματος του και του προπορευόμενου οχήματος. Κάθε οδηγός ανταποκρίνεται στις κυκλοφοριακές συνθήκες επιταχύνοντας ή επιβραδύνοντας. Το ερέθισμα προσδιορίζεται από την ταχύτητα του οχήματος u_k, τη διαφορά ταχυτήτων του οχήματος από το προπορευόμενο του u_n, την απόσταση ή το χρονικό διαχωρισμό Δx_i.

Γενικά, για το i-οστό όχημα ισχύει:

$[\text{Επιτάχυνση}]_i = [\text{Ευαισθησία}]_i * [\text{Ερέθισμα}]_i$

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

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

Η <u>επιθυμητή ταχύτητα ενός οχήματος i σε ένα τμήμα οδού s</u> δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$V(i,s) = \min (S_{lim}(s)*\theta(i), v_{max}(i))$ (3.1)

όπου:

$S_{lim}(s)$: όριο ταχύτητας οδικού τμήματος

$\theta(i)$: αποδοχή ταχύτητας από το όχημα

$v_{max}(i)$: μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα οχήματος

<u>Επιτάχυνση οχήματος – σε μη συμφορημένες συνθήκες</u>

$$V_a(n,t+T) = V(n,t) + 2{,}5a(n)T\left(1 - \frac{V(n,t)}{V\prime(n)}\right)\sqrt{0{,}025 + \frac{V(n,t)}{V\prime(n)}} \qquad (3.2)$$

όπου:

$V_\alpha(n,t+T)$: η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να φτάσει ένα όχημα που επιταχύνει σε χρονική περίοδο (t,t+T)

$V(n,t)$: η ταχύτητα του οχήματος n σε χρονική στιγμή t

$\alpha(n)$: η μέγιστη επιτάχυνση του οχήματος n

T: ο χρόνος αντίδρασης

<u>Επιβράδυνση – σε συμφορημένες συνθήκες</u>

$$V_d(n,t+T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2T^2 - d(n)\left[2\{x(n-1,t) - s(n-1) - x(n,t)\} - V(n,t)T - \frac{V(n-1,t)^2}{d\prime(n-1)}\right]} \qquad (3.3)$$

όπου:

d(n): η κανονική επιβράδυνση του οχήματος n

x(n,t): η θέση του οχήματος n σε χρονική στιγμή t

x(n-1,t): η θέση του ακολουθούντος οχήματος (n-1) τη χρονική στιγμή t

s(n-1): το θεωρητικό μήκος του οχήματος (n-1)

d’(n-1): η κανονική επιβράδυνση του οχήματος (n-1)

3.2.4. Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων – Μ.Ε.Α.

Οι διάφορες κατηγορίες οχημάτων που συνθέτουν την κυκλοφορία απαιτούν διαφορετικού μεγέθους χώρο στην οδό εξαιτίας των διαστάσεων και των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους και συνεπώς έχουν διαφορετική επιρροή στην κυκλοφοριακή ροή. Για την μετατροπή των διαφόρων κατηγοριών οχημάτων σε συγκρίσιμες μονάδες χρησιμοποιείται ως βασική μονάδα το επιβατικό όχημα και οι φόρτοι εκφράζονται σε **Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων – ΜΕΑ** (Passenger Car Units – PCU).

3.2.5. Μη-Γραμμική Παλινδρόμηση με Δένδρα Αποφάσεων

Παλινδρόμηση καλείται η ανάλυση κατά την οποία περιγράφεται ή προβλέπεται μία εξαρτημένη μεταβλητή y με βάση κάποιων ανεξάρτητων μεταβλητών x_i. Με αυτήν τη διαδικασία φαίνεται η σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών x_i με την εξαρτημένη y και είναι απαραίτητο οι ανεξάρτητες μεταβλητές να έχουν μικρή συσχέτιση μεταξύ τους, ενώ είναι επιθυμητό να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σχέση με την εξαρτημένη. Το εύρος των τιμών του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών είναι από -1 έως 1. Προφανώς οι τιμές κοντά στην απόλυτη μονάδα (>0,5) δηλώνουν υψηλή συσχέτιση, ενώ οι μικρότερες φανερώνουν μικρότερη συσχέτιση.

Η παλινδρόμηση μπορεί να είναι γραμμική ή μη-γραμμική. **Γραμμική** ονομάζεται η παλινδρόμηση που περιγράφει τη μεταβλητή y με μία εξίσωση της μορφής:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_\nu x_\nu \qquad (3.4)$$

Στην εξίσωση (3.4) είναι πιθανό οι μεταβλητές να είναι υψωμένες σε δυνάμεις ή ορίσματα λογαρίθμων. Παρ' όλ' αυτά η εξίσωση αυτή μπορεί να έχει προκύψει από μία γραμμική παλινδρόμηση. Όταν η μεταβλητή y δεν μπορεί να περιγραφεί από μία μοναδική εξίσωση η ανάλυση γίνεται με **μη-γραμμική παλινδρόμηση**.

Μια από τις βασικότερες και πιο δημοφιλείς **μεθόδους μη-γραμμικής παλινδρόμησης** είναι τα **Δένδρα Αποφάσεων ή αλλιώς Δένδρα Παλινδρόμησης**. Βασική λογική της κατασκευής τους είναι η διαδοχική διάσπαση του συνόλου των παρατηρήσεων σε υποσύνολα. Κριτήριο για τη διάσπαση είναι οι τιμές των μεταβλητών. Η διαδικασία των διαδοχικών διασπάσεων αναπαρίσταται με μια ανεστραμμένη δενδρική δομή. Στην κορυφή βρίσκεται ο κόμβος-ρίζα του δένδρου. Σε κατώτερα επίπεδα βρίσκονται επιπλέον κόμβοι, οι οποίοι συνδέονται με ακμές με άλλα στοιχεία του δένδρου. Στο κατώτερο επίπεδο κάθε κλάδου βρίσκονται τα φύλλα του δένδρου. Ο κόμβος - ρίζα έχει μόνο εξερχόμενες ακμές που τον συνδέουν με στοιχεία του κατώτερου επιπέδου. Οι υπόλοιποι κόμβοι έχουν εισερχόμενες ακμές που τους συνδέουν με τους κόμβους του ανώτερου επιπέδου και εξερχόμενες ακμές που τους συνδέουν με στοιχεία του κατώτερου επιπέδου. Τέλος, τα φύλα έχουν μόνο εισερχόμενες ακμές, οι οποίες τα συνδέουν με τους κόμβους του ανώτερου επιπέδου. Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει έναν έλεγχο στα δεδομένα και αντίστοιχη διάσπαση τους σε δύο ή περισσότερα υποσύνολα, ανάλογα με το αποτέλεσμα του ελέγχου. Η συνηθέστερη εκδοχή είναι ο έλεγχος να περιλαμβάνει μία μόνο μεταβλητή, έχουν προταθεί ωστόσο αλγόριθμοι όπου σε έναν κόμβο ελέγχονται περισσότερες

μεταβλητές. Κάθε ακμή αντιπροσωπεύει ένα αποτέλεσμα του ελέγχου και το αντίστοιχο υποσύνολο των δεδομένων. Τέλος, κάθε φύλο ενός δένδρου αποφάσεων μίας μη-γραμμικής παλινδρόμησης αναπαριστά μια εξίσωση που περιγράφει τη μεταβλητή y για τις συνθήκες που ικανοποιούν τα ανώτερα επίπεδα.

Τα δένδρα παλινδρόμησης είναι εργασία επιβλεπόμενης μάθησης. Στόχος της επιβλεπόμενης μάθησης είναι η ανακάλυψη της σχέσης ανάμεσα σε ένα γνώρισμα στόχο και σε ένα σύνολο άλλων γνωρισμάτων. Το γνώρισμα στόχος αναφέρεται και ως εξαρτημένη μεταβλητή, ενώ τα υπόλοιπα γνωρίσματα αναφέρονται και ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Με την επιβλεπόμενη μάθηση επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός μηχανισμού λήψης αποφάσεων ή υπολογισμών, ο οποίος είναι ικανός να προβλέπει τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής χρησιμοποιώντας τις ανεξάρτητες μεταβλητές.

Κατά την εκμάθηση (learning) δημιουργείται το μοντέλο με βάση ένα σύνολο προ κατηγοριοποιημένων παραδειγμάτων, που ονομάζεται δεδομένα εκπαίδευσης (training data). Τα δεδομένα εκπαίδευσης αναλύονται από ένα αλγόριθμο ταξινόμησης, προκειμένου να σχηματιστεί το μοντέλο. Λόγω του ότι τα δεδομένα εκπαίδευσης ανήκουν σε μία προκαθορισμένη κατηγορία, η οποία είναι γνωστή, η κατηγοριοποίηση αποτελεί μέθοδος εποπτευομένης μάθησης (supervised learning). Το μοντέλο αναπαρίσταται με τη μορφή κανόνων ταξινόμησης (classification rules), δέντρων απόφασης (decision trees) ή μαθηματικών τύπων.

Η **αξιολόγηση του μοντέλου** του δένδρου παλινδρόμησης γίνεται με τους εξής δείκτες:

- correlation coefficient: εκφράζει τη συσχέτιση των πραγματικών μεταβλητών και αυτών που προβλέπονται. Γενικά παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1και προτιμάται να έχει τιμές κοντά στη μονάδα
- Mean Absolute Error (MAE): δείκτης που εκφράζει τη μέση τιμή των απόλυτων τιμών των ακραίων τιμών. Προτιμάται να έχει τιμές κοντά στο 0
- Root Mean Square Error (RMSE): είναι η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων ή των διαφορών των δεδομένων μεταξύ των πραγματικών μεταβλητών και αυτών που προβλέπονται. Προτιμάται να έχει τιμές κοντά στο 0
- Relative Absolute error: ποσοστό που εκφράζει το σφάλμα του μοντέλου και προτιμάται να έχει τιμές κοντά στο 0
- Root Relative Squared Error: ποσοστό που εκφράζει το σφάλμα του μοντέλου και προτιμάται να έχει τιμές κοντά στο 0

3.3. Εργαλεία Προσομοίωσης και Προγραμματισμού

Για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εργαλεία προσομοίωσης και προγραμματισμού:

Aimsun

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Aimsun.Next της εταιρίας Aimsun. Η Aimsun παρέχει σε παγκόσμιο επίπεδο λογισμικά και υπηρεσίες για κυκλοφοριακό σχεδιασμό, προσομοίωση της κυκλοφορίας και πρόβλεψη.

Η πλατφόρμα Aimsun.Next παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες να μοντελοποιήσουν μικρά και μεγάλα συγκοινωνιακά δίκτυα, από έναν κόμβο έως μία ολόκληρη περιοχή. Γίνεται να προσομοιωθούν οι μετακινήσεις των ανθρώπων ανάλογα με τις διαθέσιμες συγκοινωνιακές επιλογές (π.χ. Ι.Χ., ταξί, λεωφορεία, ποδήλατα ή ακόμα περπάτημα).

SQLite

Το SQLite είναι από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα αποθήκευσης μεγάλων βάσεων δεδομένων και αυτή ήταν η χρήση του στην παρούσα Εργασία.

Google maps

Οι Χάρτες Google (Google Maps) είναι υπηρεσία χαρτογράφησης στο Διαδίκτυο. Η εφαρμογή και η τεχνολογία της υπηρεσίας παρέχεται από την Google. Προσφέρει χάρτες οδών και σχεδιαστή διαδρομών για μεταφορές με τα πόδια, αυτοκίνητο, ποδήλατο ή μέσα μαζικής μεταφοράς. Περιλαμβάνει επίσης εντοπισμό των επιχειρήσεων που βρίσκονται σε πόλεις σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο. Τέλος, περιλαμβάνει δορυφορικές εικόνες των οδών και του περιβάλλοντος χώρου.

R

Για την επεξεργασία αποτελεσμάτων κατά την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού R και το πρόγραμμα RStudio. Η R είναι μια γλώσσα προγραμματισμού και ένα περιβάλλον λογισμικού για στατιστικούς υπολογισμούς και γραφικές απεικονίσεις. Το πρόγραμμα RStudio είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης της γλώσσας R.

Τα πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας είναι τα εξής:

- readxl: Διαβάζει αρχεία excel (.xls και .xlsx)
- dplyr, για τον χειρισμό δεδομένων
- RWeka: Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και εργαλεία ταξινόμησης, παλινδρόμησης, ομαδοποίησης και οπτικοποίησης

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Προσομοίωση

4.1.1. Το Δίκτυο

Στο Εργαστήριο Κυκλοφοριακής Τεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου διατηρείται **μοντέλο σχεδιασμένο στο πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN του βασικού οδικού δικτύου της Αττικής** καθώς και πίνακας προέλευσης-προορισμού (1824 κεντροειδών) και 24 ωρών (σε οχήματα) (Εικόνα 4.1). Στο δίκτυο έχει πραγματοποιηθεί έλεγχος της γεωμετρίας έτσι ώστε να περιγράφει λεπτομερώς το πραγματικό δίκτυο μελέτης και να αποτυπώνονται όλα τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του κάθε κόμβου και των κύριων οδικών αξόνων και δευτερευόντων οδικών τμημάτων. Επίσης, έχουν καταχωρηθεί τα βασικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι του δικτύου (χωρητικότητες, ταχύτητες ελεύθερης ροής, μέγιστες ταχύτητες κλπ.). Τα στοιχεία για τα οδικά τμήματα ενδεικτικά περιλαμβάνουν μήκος, πλάτος, αριθμό λωρίδων οδών, ταχύτητα ελεύθερης ροής, χωρητικότητα. Αντίστοιχα, τα στοιχεία για τους κόμβους ενδεικτικά περιλαμβάνουν επιτρεπόμενες κινήσεις, αριθμό λωρίδων ανά κίνηση, ρύθμιση προτεραιότητας, προγράμματα σηματοδότησης, ταχύτητα ελεύθερης ροής και χωρητικότητα.

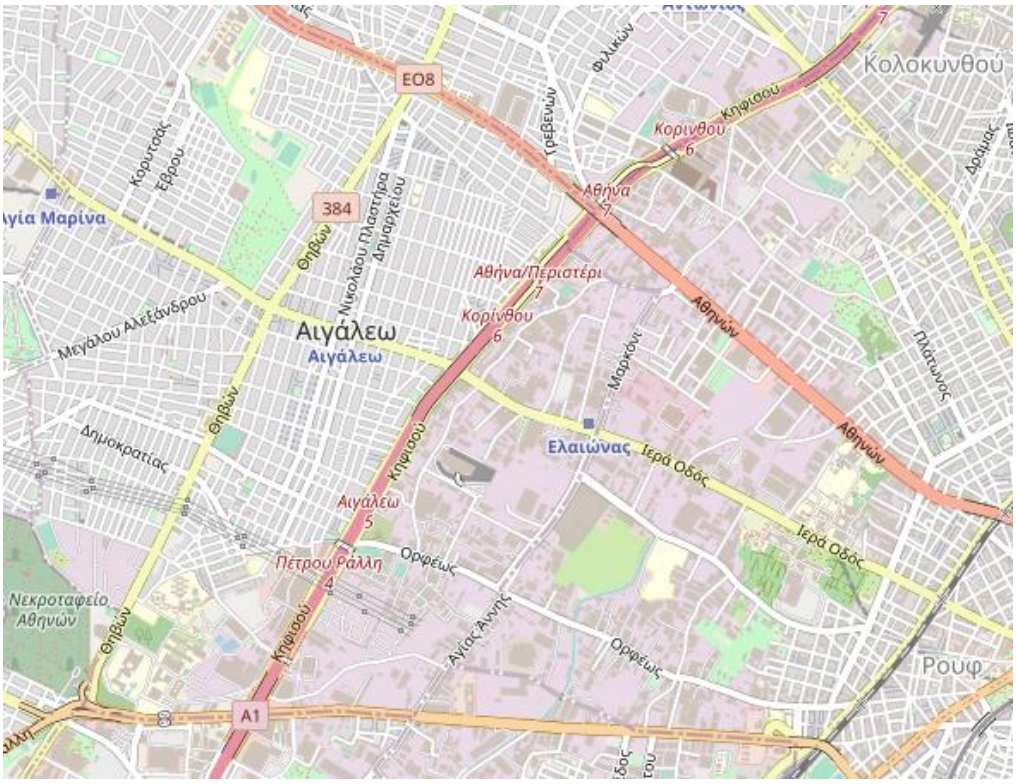
Εικόνα 4.1: Το μοντέλο του οδικού δικτύου της Αττικής

Η περιοχή που μελετήθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Στο δίκτυο αναπαρίστανται αυτοκινητόδρομοι, δευτερεύουσες αρτηρίες σύνδεσης μικρών και μεσαίων πόλεων, πρωτεύοντα, δευτερεύοντα, τριτεύοντα οδικά δίκτυα καθώς και λεωφορειακές γραμμές. Στον Πίνακα 4.1. που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι

προαναφερθείσες κατηγορίες του δικτύου και ο συμβολισμός τους στον Open Street Map (OSM), ο οποίος αποτελεί έναν παγκόσμιο διαδικτυακό χάρτη, με δυνατότητα επεξεργασίας και προσθήκης πληροφορίας από εθελοντές, ενώ παράλληλα έχει άδεια ανοιχτού περιεχομένου.

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες Οδικού Δικτύου

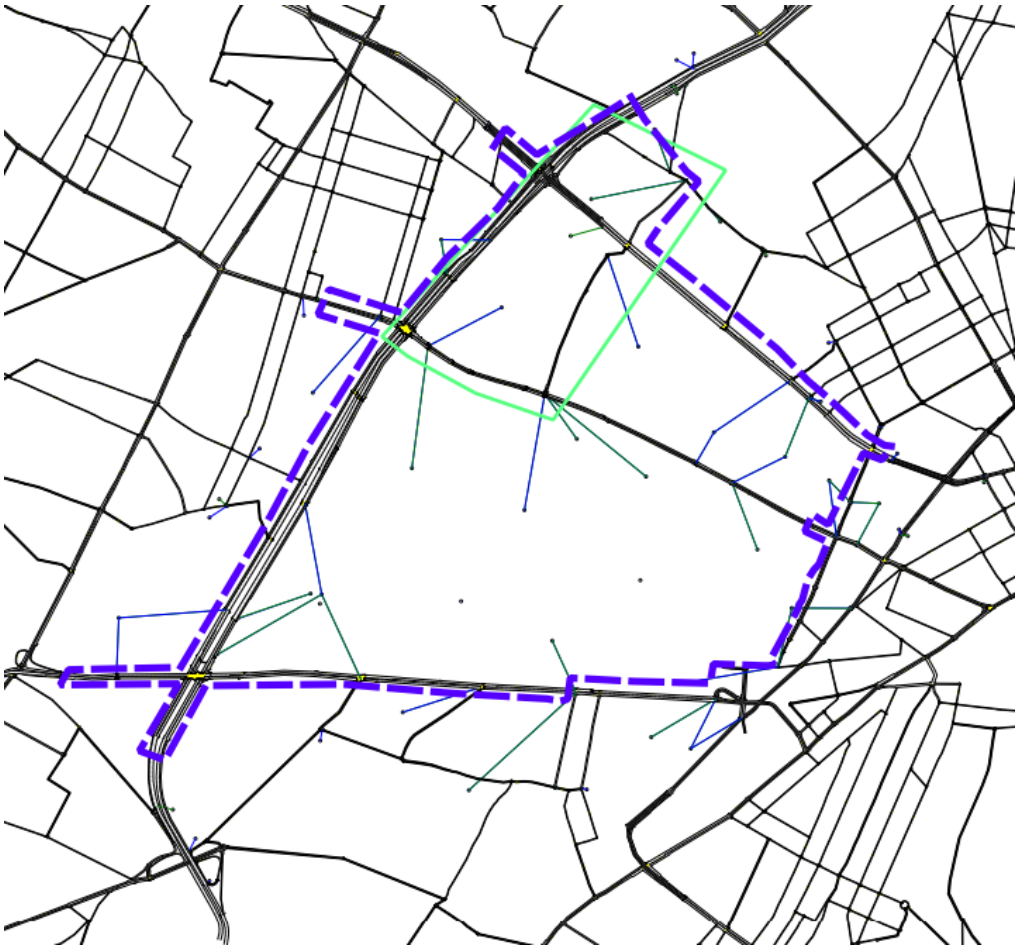
Κατηγορία δικτύου	**Συμβολισμός στον *OSM***
Αυτοκινητόδρομος (motorway)	
Δευτερεύουσες αρτηρίες σύνδεσης μικρών και μεσαίων πόλεων (trunk)	
Πρωτεύον (Primary)	
Δευτερεύον (Secondary)	
Τριτεύον (Tertiary)	



Εικόνα 4.2: Περιοχή μελέτης

Το μοντέλο του υποδικτύου που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον Aimsun.Next παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3 και τα όριά του φαίνονται με μωβ διακεκομμένες γραμμές. Αποτελείται από 207 τμήματα οδών (41 χλμ. συνολικού μήκους), 100 κόμβους και 87 κεντροειδή (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3) από όπου παράγονται και προσελκύονται μετακινήσεις. Για τον προσδιορισμό των υφιστάμενων κυκλοφοριακών φόρτων σε αυτήν την περιοχή αναζητήθηκαν στοιχεία από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας της

Περιφέρειας Αττικής και συμπληρωματικά από την αρμόδια Υπηρεσία του ΥΠΟΜΕΔΙ (πρώην ΔΜΕΟ) ενώ για τα προγράμματα φωτεινής σηματοδότησης στους σηματοδοτούμενους κόμβους ζητήθηκαν στοιχεία από τη Διεύθυνση Διαχείρισης Μητροπολιτικών Υποδομών της Περιφέρειας Αττικής. Επιπλέον, με πράσινο φαίνεται η περιοχή στην οποία πραγματοποιείται μικροσκοπική προσομοίωση.



Εικόνα 4.3: Μοντέλο υποδικτύου στο Aimsun

4.1.2. Η Κυκλοφορία

Το δίκτυο που περιγράφηκε παραπάνω, ανάλογα με το σενάριο που εκτελείται, φορτίζεται με **τέσσερις κατηγορίες οχημάτων**: συμβατικά Ι.Χ. οχήματα, βαρέα οχήματα (φορτηγά και αστικά λεωφορεία γραμμής), "προσεκτικά" συνδεδεμένα αυτόνομα Ι.Χ. οχήματα και "επιθετικά" συνδεδεμένα αυτόνομα Ι.Χ. οχήματα.

Πιο συγκεκριμένα, ο συνολικός αριθμός μετακινήσεων των συμβατικών αυτοκινήτων, των "προσεκτικών" αυτόνομων και των "επιθετικών" αυτόνομων οχημάτων που δύναται να κινούνται στο δίκτυο κατά την ώρα αιχμής είναι 19.799 για την εκάστοτε κατηγορία. Αντίστοιχα, για τα βαρέα οχήματα ο συνολικός αριθμός μετακινήσεων είναι 4.312. Αυτοί οι αριθμοί έχουν προκύψει μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης (calibration). Οι

κρίσιμες παράμετροι των οχημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 (Casas et al., 2020).

Πίνακας 4.2: Κρίσιμες Παράμετροι Οχημάτων

	Παράγοντας		Οχήματα			
			Προσεκτικά Αυτόνομα	Επιθετικά Αυτόνομα	Συμβατικά	Βαρέα Οχήματα
Μοντέλο	Περιθώρια Ασφάλειας		1.5	1	1	1
	Μέγιστη Επιτάχυνση		3 m/s2	3 m/s2	3 m/s2	1 m/s2
	Μέγιστη Επιβράδυνση		6 m/s2	6 m/s2	6 m/s2	5 m/s2
	Ταχύτητα	Μέση	80 km/h	80 km/h	110 km/h	60 km/h
		Ελάχιστη	80 km/h	80 km/h	80 km/h	40 km/h
		Μέγιστη	80 km/h	80 km/h	150 km/h	70km/h
	Χρόνος Αντίδρασης	σε ακολουθία οχημάτων	0.1 sec	0.1 sec	1.2 sec	1.2 sec
		σε STOP	0.1 sec	0.1 sec	1.6 sec	1.6 sec
		σε φωτεινό σηματοδότη	0.1 sec	0.1 sec	0.8 sec	0.8 sec
Μοντέλο Ακολουθούντων οχημάτων	Ευαισθησία	Μέση	0.7	0.5	1	1
		Ελάχιστη	0.3	0.1	1	1
		Μέγιστη	0.9	0.9	1	1
Μοντέλο Αλλαγής Λωρίδας	Υπέρβαση Ταχύτητας Προσπέρασης		85%	85%	90%	90%
	Συνεργασία Διατήρησης Αποστάσεων		NAI	NAI	NAI	NAI
	Ζώνη Απόστασης	Ελάχιστη	1.1	1	0.8	0.8
		Μέγιστη	1.3	1.25	1.2	1.2

Η **ερμηνεία** των κρίσιμων παραμέτρων είναι η εξής:

- Περιθώρια Ασφάλειας: Παράγοντας που καθορίζει αν ένα όχημα μπορεί να κινηθεί σε μία διασταύρωση με προτεραιότητα.
- Χρόνος Αντίδρασης: Για τα αυτόνομα οχήματα ο χρόνος αντίδρασης έχει οριστεί 0,1 δευτερόλεπτα, ώστε να επιτευχθεί η συνδεσιμότητα μεταξύ τους.
- Παράγοντας Ευαισθησίας: Η παράμετρος που καθορίζει την καθαρή απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Η τιμή του για την ανθρώπινη συμπεριφορά είναι 1.
- Υπέρβαση Ταχύτητας Προσπέρασης: Το ποσοστό της επιθυμητής ταχύτητας, με το οποίο ένα όχημα αποφασίζει να προσπεράσει ένα άλλο όχημα. Μία συνήθης τιμή για τους οδηγούς είναι 90%.
- Συνεργασία Διατήρησης Αποστάσεων: Αν υπάρχει συνεργασία μεταξύ των οδηγών.
- Παράγοντας Ζώνης Απόστασης: Παράγοντας που καθορίζει ποια λωρίδα θα χρησιμοποιήσει το εκάστοτε όχημα. Συνήθεις τιμές για τους οδηγούς είναι μεταξύ 0,8 και 1,2.

Όπως αναφέρθηκε, για την εκτέλεση των μικροσκοπικών προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν **δύο προφίλ αυτόνομων συνδεδεμένων οχημάτων**:

1. <u>Προσεκτικά Αυτόνομα Οχήματα</u>: Επιδιώκουν μεγάλες αποστάσεις από τα προπορευόμενα οχήματα, διατηρούν μεγάλες αποστάσεις αναμονής για επιλογή λωρίδας και στην αποδοχή θέσης για αλλαγή λωρίδας, εκτελούν λίγες προσπεράσεις και δεν έχουν συνεργασία με τα υπόλοιπα οχήματα.

2. Επιθετικά Αυτόνομα Οχήματα: Επιδιώκουν μικρές αποστάσεις από τα προπορευόμενα οχήματα, διατηρούν μικρές αποστάσεις αναμονής για επιλογή λωρίδας και στην αποδοχή θέσης για αλλαγή λωρίδας, εκτελούν λίγες προσπεράσεις και δεν έχουν συνεργασία με τα υπόλοιπα οχήματα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ακόμα και τα "προσεκτικά" αυτόνομα οχήματα είναι πιο επιθετικά στην οδήγηση από τα συμβατικά οχήματα.

Τέλος, στους Πίνακες 4.3-4.6 αναφέρονται υφιστάμενες αστικές λεωφορειακές γραμμές που σχετίζονται με τη λειτουργία του υπό μελέτη δικτύου. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία συγκεντρώθηκαν από τη σχετική ιστοσελίδα πληροφόρησης του κοινού σε πραγματικό χρόνο που τηρεί ο Οργανισμός Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών (ΟΑΣΑ).

Πίνακας 4.3: Υφιστάμενες γραμμές αστικών λεωφορείων που εξυπηρετούν τον σταθμό Κηφισού

Αριθμός Γραμμής	Ονομασία Γραμμής
51	ΚΗΦΙΣΟΣ - ΟΜΟΝΟΙΑ
420	ΠΕΙΡΑΙΑΣ – ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ
Χ93	ΚΗΦΙΣΟΣ - ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΑΣ

Πίνακας 4.4: Υφιστάμενες γραμμές αστικών λεωφορείων που εξυπηρετούν τον σταθμό Λιοσίων

Αριθμός Γραμμής	Ονομασία Γραμμής
24	ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ – ΚΑΤΩ ΠΑΤΗΣΙΑ
420	ΠΕΙΡΑΙΑΣ – ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ
711	ΖΩΦΡΙΑ - ΑΤΤΙΚΗ
719	ΚΗΠΟΥΠΟΛΗ – ΠΑΛΑΤΙΑΝΗ – ΣΤ. ΛΑΡΙΣΗΣ
Α10	ΣΤ. ΛΑΡΙΣΗΣ -ΑΧΑΡΝΑΙ
Α11	ΠΛ. ΒΑΘΗΣ - ΠΕΤΡΟΥΠΟΛΗ
Β10	ΣΤ. ΛΑΡΙΣΗΣ – ΑΧΑΡΝΑΙ (ΜΕΣΩ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΟΥΣ)
Β11	ΠΛ. ΒΑΘΗΣ - ΠΕΤΡΟΥΠΟΛΗ
Β12	ΜΑΡΝΗ – ΑΝΩ ΛΙΟΣΙΑ
Γ10	ΑΝΑΚΑΣΑ – ΠΛ. ΒΑΘΗΣ
Γ12	ΚΑΜΑΤΕΡΟ – ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ - ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Χ93	ΚΗΦΙΣΟΣ - ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΑΣ

Πίνακας 4.5: Υφιστάμενες γραμμές αστικών λεωφορείων στην εγγύς περιοχή του δικτύου

Αριθμός Γραμμής	Ονομασία Γραμμής
813	ΑΒΕΡΩΦ - ΠΡΟΥΣΗΣ
836	ΠΛ. ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ - ΠΑΛΑΣΚΑ
856	ΔΑΦΝΗ – ΥΜΗΤΤΟΣ - ΑΙΓΑΛΕΩ
865	ΠΛ. ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ - ΜΑΝΔΡΑ
Α16	ΑΘΗΝΑ - ΕΛΕΥΣΙΝΑ
420	ΠΕΙΡΑΙΑΣ – ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ (στάσεις στον παράπλευρο κλάδο της Λ. Κηφισού)

Πίνακας 4.6: Στάσεις λεωφορείων στην εγγύς περιοχή του δικτύου

Ονομασία Στάσης	Αριθμός Γραμμής
ΓΕΦΥΡΑ ΙΕΡΑΣ ΟΔΟΥ	420
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	420, 813, 829, 836, 856, 865, Α16
ΑΓ. ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΩΝ	813, 836, 856, 865, Α16
ΑΜΑΞΟΣΤΑΣΙΟ ΔΗΜΟΥ	813, 836, 856, 865, Α16
ΑΓ. ΣΑΒΒΑΣ	813, 836, 856, 865, Α16
ΙΕΡΗ ΕΛΙΑ	813, 836, 856, 865, Α16
ΣΟΦΤΕΞ	813, 865
ΔΗΜΑΡΑΚΗ	813, 865
ΑΓ. ΠΟΛΥΚΑΡΠΟΣ	813, 865
ΓΕΦΥΡΑΚΙ	420, 829
ΕΛΑΙΟΥΡΓΙΚΗ	420
ΕΒΙΟΠ	420, 829

4.1.3. Το Αυτόνομο Λεωφορείο

Στο δίκτυο μελέτης της Αθήνας που παρουσιάστηκε παραπάνω για το οποίο πραγματοποιήθηκε προσομοίωση μέσω του λογισμικού Aimsun.Next προστέθηκε μία **λεωφορειακή γραμμή με αυτόνομα λεωφορεία (Shuttle Bus)**. Η γραμμή αυτή εκτελεί μία κυκλική διαδρομή, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 4.4 και συνδέει τη στάση μετρό "Ελαιώνας" (Α) με τον σταθμό ΚΤΕΛ Κηφισού (Β), χωρίς ενδιάμεσες στάσεις. Η διαδρομή περιλαμβάνει σηματοδοτούμενες αρτηρίες και δευτερεύουσες οδούς και το συνολικό της μήκος είναι 3,4 χιλιόμετρα. Επιπλέον, η συχνότητα των δρομολογίων αυτής της γραμμής είναι 15 λεπτά.

Εικόνα 4.4: Διαδρομή Αυτόνομου Λεωφορείου (Shuttle Bus)

Το **αυτόνομο λεωφορείο (minibus)** (Εικόνα 4.5) έχει συνολική χωρητικότητα 10 επιβατών και οι διαστάσεις του είναι 5 μέτρα μήκος και 2,5 μέτρα πλάτος. Επίσης, η μέγιστη ταχύτητα οδήγησης είναι 40 km/h και η μέση ταχύτητα είναι 25 km/h.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτήν τη μελέτη, το αυτόνομο λεωφορείο έχει μοντελοποιηθεί σε προφίλ "προσεκτικού" συνδεδεμένου αυτόνομου οχήματος, μιας και η προσεκτική οδήγηση θεωρείται καταλληλότερη για οχήματα δημόσιας συγκοινωνίας. Αντίστοιχα, και σε αυτήν την περίπτωση ισχύει ότι η προσεκτική οδήγηση είναι πιο επιθετική από την ανθρώπινη οδήγηση.

Εικόνα 4.5: Αυτόνομο Λεωφορείο (Shuttle Bus)

Κατά την διερεύνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εκτελέστηκε ένα επιπλέον σενάριο με ένα αντίστοιχο συμβατικό λεωφορείο. Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι κρίσιμες παράμετροι του αυτόνομου και του αντίστοιχου συμβατικού λεωφορείου.

Πίνακας 4.7: Κρίσιμες Παράμετροι Λεωφορείου

Παράγοντας			Λεωφορείο (Shuttle Bus)	
			Αυτόνομο	Συμβατικό
Μοντέλο	Περιθώρια Ασφάλειας		150%	100%
	Μέγιστη Επιτάχυνση		3 m/s2	3 m/s2
	Μέγιστη Επιβράδυνση		6 m/s2	6 m/s2
	Ταχύτητα	Μέση	25 km/h	25 km/h
		Ελάχιστη	25 km/h	25 km/h
		Μέγιστη	40 km/h	40 km/h
	Χρόνος Αντίδρασης	σε ακολουθία οχημάτων	0.1 sec	1.2 sec
		σε STOP	0.1 sec	1.6 sec
		σε φωτεινό σηματοδότη	0.1 sec	0.8 sec
Μοντέλο Ακολουθούντων οχημάτων	Ευαισθησία	Μέση	70%	100%
		Ελάχιστη	30%	100%
		Μέγιστη	90%	100%
Μοντέλο Αλλαγής Λωρίδας	Υπέρβαση Ταχύτητας Προσπέρασης		85%	90%
	Συνεργασία Διατήρησης Αποστάσεων		ΟΧΙ	ΝΑΙ
	Ζώνη Απόστασης	Ελάχιστη	110%	80%
		Μέγιστη	130%	120%

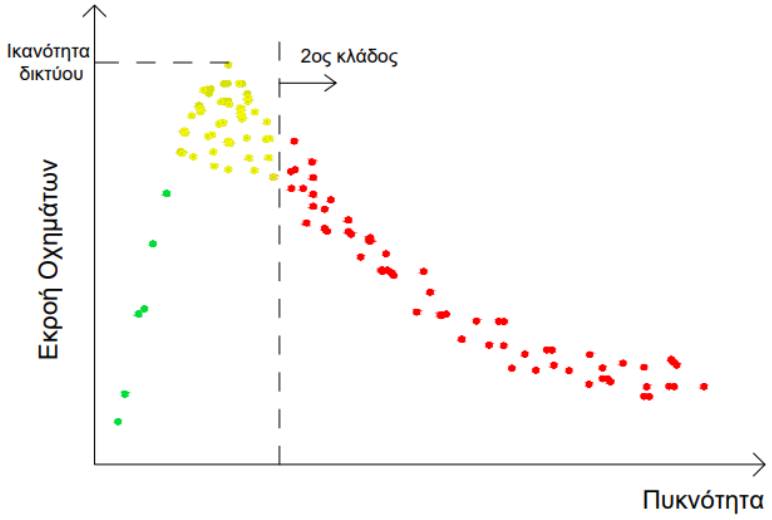
4.1.4. Η Κατανομή Ζήτησης της Κυκλοφορίας

Αρχικά, θεωρήθηκε ότι η ώρα αιχμής για το δίκτυο ήταν 8 π.μ. – 9 π.μ., κατά την οποία προφανώς η ζήτηση της κυκλοφορίας είναι 100%. **Επιλέχθηκαν και δοκιμάστηκαν** στο λογισμικό Aimsun **διάφορες κατανομές ζήτησης της κυκλοφορίας** με διάφορες χρονικές διάρκειες πριν από την ώρα αιχμής, ώστε να φορτιστεί σταδιακά το δίκτυο, καταλήγοντας στον μέγιστο φόρτο οχημάτων, έτσι ώστε να προκύψουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αυτές οι δοκιμές έγιναν με μικροσκοπική προσομοίωση για τις υπάρχουσες συνθήκες. Μέσω της προσομοίωσης, εξήχθησαν δεδομένα και δημιουργήθηκε το διάγραμμα M.F.D. για την κάθε δοκιμή, το οποίο αποτέλεσε κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης κατανομής ζήτησης και απαιτήθηκε να έχει την ίδια μορφή με το πρότυπο διάγραμμα που προτείνεται. Η κατανομή ζήτησης της κυκλοφορίας που επιλέχθηκε παρουσιάζεται στον πίνακα 4.8 και η μορφή του διαγράμματος M.F.D. φαίνεται στην Εικόνα 4.6.

Πίνακας 4.8: Κατανομή Ζήτησης της Κυκλοφορίας

Ώρα	7 π.μ.- 7:30 π.μ.	7:30 π.μ.- 8 π.μ.	8 π.μ.- 9 π.μ.
Ποσοστό Κυκλοφορίας	20%	80%	100%

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπήρξε μία χρονική περίοδος 10 λεπτών πριν από τις 7 π.μ., κατά την οποία φορτιζόταν το δίκτυο με οχήματα χωρίς να καταγράφονται τα δεδομένα, ώστε να προκύψουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Συνεπώς, το κάθε σενάριο προσομοίωσης εκτελούνταν για 2 ώρες και τα δεδομένα επιλέχθηκε να καταγράφονται στη βάση δεδομένων ανά 1,5 λεπτά, όσο δηλαδή και ο χρόνος στην κάθε περίοδο σηματοδότησης.



Εικόνα 4.6: Πρότυπο Διάγραμμα M.F.D. για την παρούσα Εργασία

4.1.5. Τα Σενάρια

Με δεδομένη την κατανομή της ζήτησης που επιλέχθηκε, υλοποιήθηκαν **δεκατέσσερα σενάρια με μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης** και στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι τύποι οχήματος που υπάρχουν σε κάθε σενάριο. Σε κάθε σενάριο εκτελέστηκαν δέκα επαναλήψεις, ώστε να προκύψουν όσο το δυνατόν πιο ορθά αποτελέσματα. Αναλυτικότερα, υλοποιήθηκαν τρία σενάρια βάσης αναφοράς (baseline scenarios – BL). Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο (A1) περιγράφεται το δίκτυο με τις υπάρχουσες συνθήκες, δηλαδή με συμβατικά οχήματα, στο δεύτερο σενάριο (A2) έχει προστεθεί το συμβατικό λεωφορείο που πραγματοποιεί την κυκλική διαδρομή (αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.1.3), ενώ στο τρίτο σενάριο (A3) την κυκλική διαδρομή εκτελεί αυτόνομο συνδεδεμένο λεωφορείο, που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.1.3. Επίσης, υλοποιούνται δέκα σενάρια (B-K), τα οποία έχουν αυξανόμενο ποσοστό αυτόνομων συνδεδεμένων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας (από 0% έως 100%, ανά 10%) και συμπεριλαμβάνουν την κυκλοφορία του αυτόνομου λεωφορείου. Τέλος, υλοποιήθηκε και ένα σενάριο (L) με 100% αυτόνομα οχήματα, χωρίς όμως την κυκλοφορία του λεωφορείου.

Επιπλέον, σημειώνεται ότι τα **βαρέα οχήματα** έχουν σταθερά το ίδιο ποσοστό κυκλοφορίας σε όλα τα σενάρια, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.9.

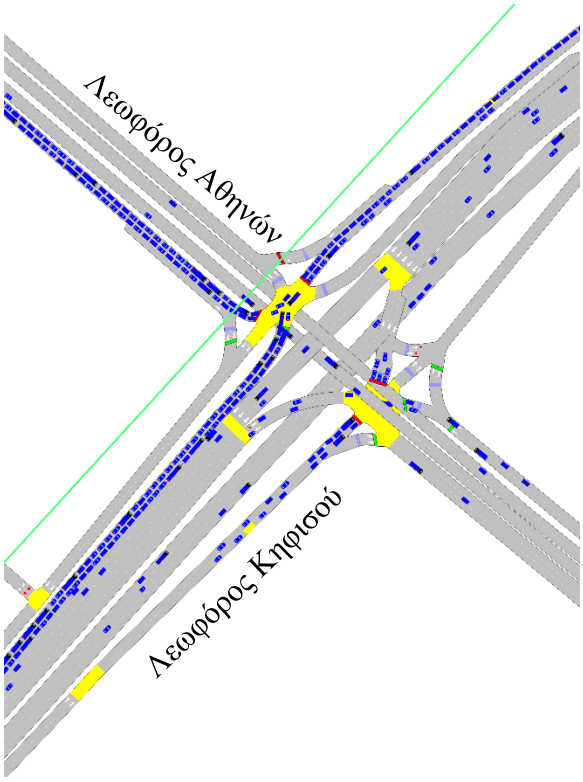
Σκοπός της εκτέλεσης των δέκα σεναρίων με αυξανόμενο ποσοστό αυτόνομων οχημάτων είναι αφενός η σταδιακή μείωση των συμβατικών οχημάτων και αφετέρου η σταδιακή αύξηση των αυτόνομων οχημάτων με την ομαλή εισαγωγή των δύο διαφορετικών προφίλ αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία (παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.1.2).

Πίνακας 4.9: Σενάρια Προσομοίωσης

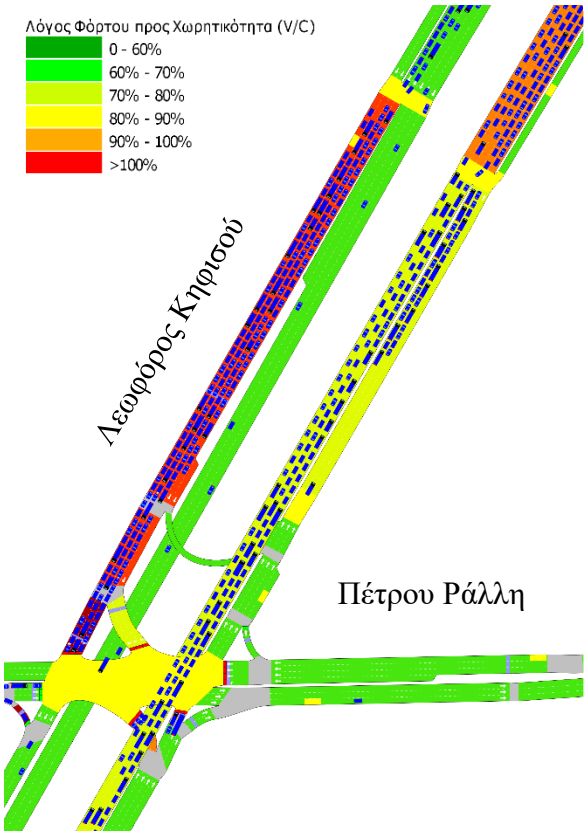
Σενάρια	Τύπος Οχήματος				
	Συμβατικά	Προσεκτικά Αυτόνομα	Επιθετικά Αυτόνομα	Συμβατικό Λεωφορείο	Αυτόνομο Λεωφορείο
A1	100%	0%	0%	X	X
A2	100%	0%	0%	V	X
A3	100%	0%	0%	X	V
B	90%	10%	0%	X	V
C	80%	20%	0%	X	V
D	70%	30%	0%	X	V
E	60%	40%	0%	X	V
F	50%	50%	0%	X	V
G	40%	50%	10%	X	V
H	30%	50%	20%	X	V
I	20%	50%	30%	X	V
J	10%	50%	40%	X	V
K	0%	50%	50%	X	V
L	0%	50%	50%	X	X

Στις Εικόνες 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται **στιγμιότυπα από το περιβάλλον Aimsun**, ενώ εκτελείται ένα σενάριο.

Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 4.7 φαίνεται ο κόμβος της λεωφόρου Κηφισού με τη λεωφόρο Αθηνών. Η κίτρινη επιφάνεια αναπαριστά τις διασταυρώσεις οδών, ενώ τα κόκκινα και πράσινα σημεία που βρίσκονται στις διασταυρώσεις δείχνουν τις ενδείξεις των φωτεινών σηματοδοτών τη συγκεκριμένη στιγμή.



Εικόνα 4.7: Στιγμιότυπο από Aimsun. Λεωφόρος Κηφισού - Λεωφόρος Αθηνών



Εικόνα 4.8: Στιγμιότυπο από Aimsun. Λεωφόρος Κηφισού - Πέτρου Ράλλη

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζεται την ίδια χρονική στιγμή, ένα στιγμιότυπο από τον κόμβο της λεωφόρου Κηφισού με την Πέτρου Ράλλη. Αντίστοιχα με την Εικόνα 4.7 φαίνονται οι διασταυρώσεις και οι φωτεινοί σηματοδότες. Για αυτό το στιγμιότυπο έχει επιλεχθεί η παρουσίαση του λόγου Φόρτου προς τη χωρητικότητα (V/C) στο δίκτυο. Αναλυτικότερα, με πράσινο αναπαρίστανται οι λωρίδες που έχουν συνθήκες ελεύθερης ροής (μικρή πυκνότητα), με πορτοκαλί οι λωρίδες που έχουν μεσαίας τάξης ροή (μέτρια πυκνότητα) και με κόκκινο φαίνονται οι λωρίδες που υπάρχει συμφόρηση (αυξημένη πυκνότητα οχημάτων).

4.2.Διαγράμματα M.F.D.

Μετά την ολοκλήρωση κάθε σεναρίου, **αποθηκεύτηκαν τα αποτελέσματά του σε πίνακες** και εξήχθησαν σε μορφή .csv μέσω του προγράμματος SQLite. Οι πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των διαγραμμάτων M.F.D. είναι οι **MISYS** και **MISECT**, οι οποίοι περιέχουν τα αποτελέσματα σε επίπεδο δικτύου και τμήματος οδού, αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά, η διαδικασία για τη δημιουργία των διαγραμμάτων M.F.D. παρουσιάζεται παρακάτω.

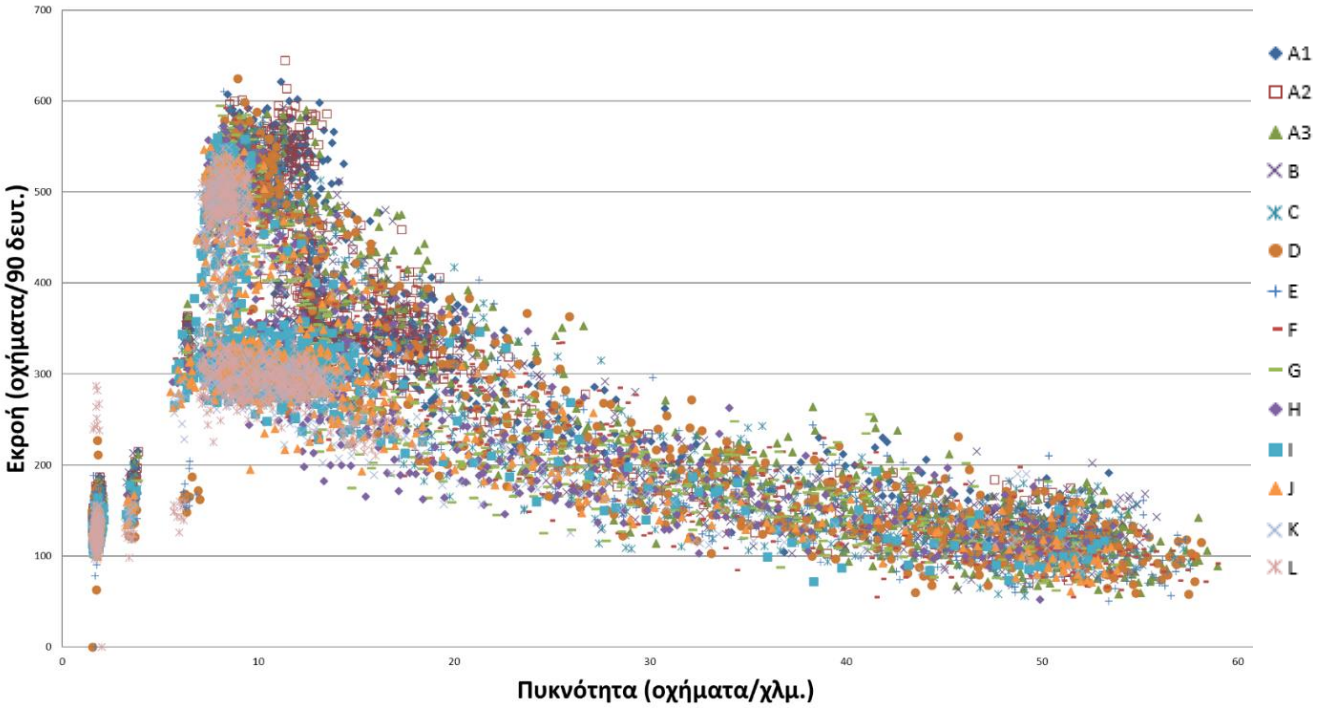
4.2.1. Διαγράμματα M.F.D. Δικτύου

Όπως αναφέρθηκε, ο πίνακας που εξήχθη για τη δημιουργία διαγραμμάτων M.F.D. σε επίπεδο δικτύου είναι ο **MISYS**. **Βασικές του στήλες** για τη δημιουργία των διαγραμμάτων είναι οι εξής:

- did: δείχνει τον αριθμό της επανάληψης (συνολικά είναι 10 επαναλήψεις για κάθε σενάριο)

- sid: ο τύπος του οχήματος (0 = όλα τα οχήματα, 1 = συμβατικά οχήματα, 2 = βαρέα οχήματα, 3 = λεωφορεία της γραμμής, 4 = συμβατικό ή αυτόνομο λεωφορείο (ανάλογα το σενάριο), 5= προσεκτικά συνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα, 6 = επιθετικά συνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα)
- ent: ο αριθμός της περιόδου που καταγράφονται οι μετρήσεις (0 = σύνολο περιόδων, δηλαδή και για τις δύο ώρες, συνολικά είναι $\frac{2 \cdot 60\ \lambda\epsilon\pi\tau\acute{\alpha}}{1{,}5\ \lambda\epsilon\pi\tau\acute{\alpha}}$ =80 περίοδοι)
- density: η πυκνότητα για την κάθε επανάληψη, τον κάθε τύπο οχήματος και την κάθε περίοδο (μονάδα μέτρησης: οχήματα/χλμ.)
- vOut: ο αριθμός των οχημάτων που εξέρχονται από το δίκτυο για την κάθε επανάληψη και την κάθε περίοδο

Έχοντας τον πίνακα που παρουσιάστηκε επιλέχθηκε sid=0 και ent≠0. Έτσι, απομονώθηκαν οι στήλες vOut και density για το σύνολο των οχημάτων και για κάθε περίοδο ξεχωριστά. Επομένως, προέκυψε ένας πίνακας με 800 γραμμές (80 περίοδοι * 10 επαναλήψεις, για το σύνολο των οχημάτων). Τέλος, **δημιουργήθηκε το διάγραμμα M.F.D. του δικτύου** (Διάγραμμα 4.1) που δείχνει τη σχέση της πυκνότητας του δικτύου με τον αριθμό των εξερχόμενων οχημάτων από το δίκτυο ανά περίοδο (1,5 λεπτό) για όλα τα σενάρια (A1-L).



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα M.F.D. όλων των σεναρίων σε επίπεδο Δικτύου

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι ο αριθμός των παρατηρήσεων στην αρχή του πρώτου κλάδου είναι μικρός, επειδή η προσομοίωση δεν ξεκινάει από την ώρα αιχμής, αλλά από ένα χρονικό διάστημα νωρίτερα από την ώρα αιχμής, ώστε **να φορτιστεί σταδιακά το δίκτυο**. Παράλληλα, οι τιμές στο τέλος του δεύτερου κλάδου συγκλίνουν

αλλά δεν φτάνουν το μηδέν. Αυτό συμβαίνει επειδή το δίκτυο **δεν βρίσκεται ποτέ σε συνθήκες κορεσμού**, δηλαδή όλα τα οχήματα να είναι ακίνητα. Επιπλέον, Στο σενάριο L, κατά το οποίο υπάρχουν μόνο 100% αυτόνομα οχήματα στο δίκτυο, ενώ η ικανότητα του δικτύου βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, η πυκνότητα του δικτύου έχει σταθερά χαμηλές τιμές. Επομένως, **οι συνθήκες που επικρατούν είναι ευμενέστερες**. Τέλος, **όσο αυξάνεται το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων, ο δεύτερος κλάδος μετακινείται προς τα αριστερά**. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη συμφόρηση γίνεται με μικρότερη πυκνότητα. Ταυτόχρονα, εφόσον τα οχήματα που εξέρχονται από το δίκτυο αντιστοιχούν σε μικρότερη πυκνότητα δικτύου, το δίκτυο αποσυμφορίζεται, ενώ κινούνται λιγότερα οχήματα σε αυτό.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα M.F.D. σε επίπεδο δικτύου για το κάθε σενάριο ξεχωριστά.

4.2.2. Διαγράμματα M.F.D. Διαδρομής Αυτόνομου Λεωφορείου

Για τη δημιουργία διαγραμμάτων M.F.D. σε επίπεδο διαδρομής αυτόνομου λεωφορείου εξήχθη ο πίνακας **MISECT** σε μορφή .csv αρχείου μέσω του προγράμματος SQLite. **Βασικές στήλες του πίνακα** για τη δημιουργία των διαγραμμάτων είναι οι εξής:

- did: δείχνει τον αριθμό της επανάληψης (συνολικά είναι 10 επαναλήψεις για κάθε σενάριο)
- oid: ο κωδικός του οδικού τμήματος (συνολικά είναι 207 οδικά τμήματα)
- sid: ο τύπος του οχήματος (0 = όλα τα οχήματα, 1 = συμβατικά οχήματα, 2 = βαρέα οχήματα, 3 = συμβατικό λεωφορείο, 4 = αυτόνομο λεωφορείο, 5= προσεκτικά συνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα, 6 = επιθετικά συνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα)
- ent: ο αριθμός της περιόδου που καταγράφονται οι μετρήσεις (0 = σύνολο περιόδων, δηλαδή και για τις δύο ώρες, συνολικά είναι $\frac{2 \cdot 60\ \lambda\epsilon\pi\tau\acute{\alpha}}{1{,}5\ \lambda\epsilon\pi\tau\acute{\alpha}}$ =80 περίοδοι)
- density: η πυκνότητα για την κάθε επανάληψη, τον κάθε τύπο οχήματος και την κάθε περίοδο (μονάδα μέτρησης: οχήματα/χλμ.)
- count: ο αριθμός των οχημάτων που εξυπηρέτησε το κάθε οδικό τμήμα για την κάθε επανάληψη και την κάθε περίοδο

Για τη δημιουργία του διαγράμματος M.F.D. σε **επίπεδο διαδρομής λεωφορείου** απαιτήθηκε ο προσδιορισμός των **οδικών τμημάτων που την αποτελούν**. Συγκεκριμένα βρέθηκε ότι 32 οδικά τμήματα αποτελούν τη διαδρομή του λεωφορείου. Στη συνέχεια, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R, για κάθε σενάριο επιλέχθηκε και πάλι sid=0 και ent≠0 και απομονώθηκαν τα 32 οδικά τμήματα που αποτελούν τη διαδρομή του λεωφορείου και για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο αθροίστηκε η στήλη count και βρέθηκε ο μέσος όρος της στήλης density. Έτσι, προέκυψε και πάλι ένας πίνακας με 800 παρατηρήσεις. Στις Εικόνες 4.9 και 4.10 παρουσιάζεται ένα τμήμα του κώδικα στο πρόγραμμα RStudio, όπου εκτελείται η παραπάνω διαδικασία.

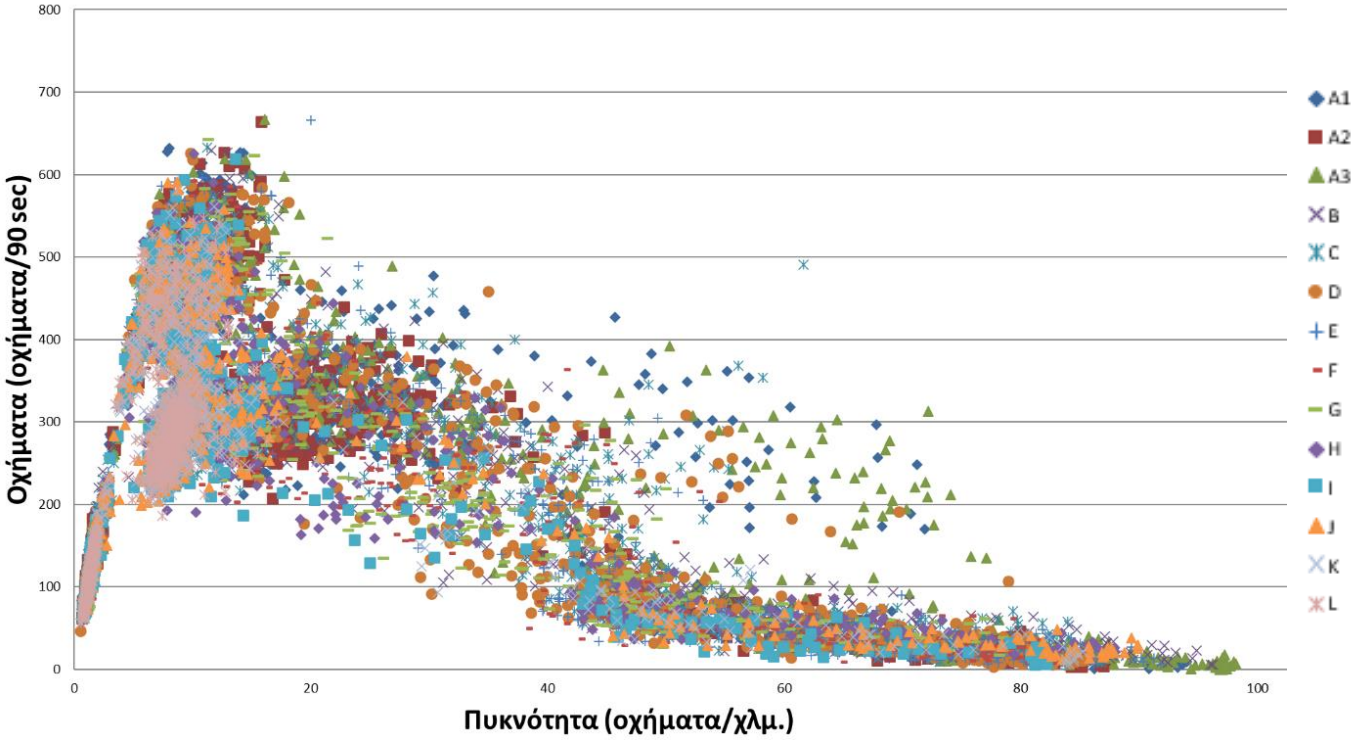
```
d <- subset(dt, select = c(1,3,4,5,8,28))

data <- subset(d, sid==0 & ent!=0 & (oid==352709 | oid==6692347 |

data1 <- subset (data, ent==1 & did==6694900)

x <- sum(data1$count)

k <- mean(data1$density)

y <- data.frame("did"=6694900, "ent"=1 , "count"=x , "density"=k)

j <- 2

data1<-subset (data, did==6694900)

while (j<81)  {

  data2 <- subset (data1, ent==j)

  x <- sum(data2$count)

  k <- mean(data2$density)

  y<- rbind(y,list(6694900,j,x,k))


  j<-j+1
}

```

Εικόνα 4.9: Τμήμα Κώδικα στην R για την απομόνωση των οδικών τμημάτων που αποτελούν τη διαδρομή του λεωφορείου

```
i<-6694901
while (i<6694910){

  data1 <- subset (data, did==i)

  j <- 1

  while (j<81)  {

    data2 <- subset (data1, ent==j)

    x <- sum(data2$count)

    k <- mean(data2$density)

    y<- rbind(y,list(i,j,x,k))


    j<-j+1
  }

  i<-i+1

  if (i==6694910) write.xlsx(y, file="C:
}
```

Εικόνα 4.10: Τμήμα Κώδικα στην R για την απομόνωση των οδικών τμημάτων που αποτελούν τη διαδρομή του λεωφορείου

Έχοντας και πάλι έναν παρόμοιο πίνακα με πριν, **δημιουργήθηκε το διάγραμμα M.F.D. σε επίπεδο διαδρομής του λεωφορείου** (Διάγραμμα 4.2) που δείχνει τη σχέση της πυκνότητας των οδικών τμημάτων που αποτελούν τη διαδρομή του λεωφορείου με τον αριθμό των οχημάτων που βρίσκονται σε αυτά τα οδικά τμήματα ανά περίοδο (1,5 λεπτό) για όλα τα σενάρια (A1-L).



Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα M.F.D. σε επίπεδο Διαδρομής Λεωφορείου

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι στο τέλος του δεύτερου κλάδου οι τιμές συγκλίνουν και τείνουν στο μηδέν, σε αντίθεση με το διάγραμμα M.F.D. του δικτύου. Αυτό συμβαίνει επειδή στη διαδρομή του λεωφορείου υπάρχουν μονόδρομοι και στο μεγαλύτερο ποσοστό των οδικών τμημάτων υπάρχουν φωτεινοί σηματοδότες. Επομένως, είναι προφανές ότι σε **υψηλά επίπεδα πυκνότητας** δεν εξυπηρετούνται πολλά οχήματα. Παράλληλα, η μέγιστη πυκνότητα είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη πυκνότητα του διαγράμματος M.F.D. του δικτύου. Αυτό ερμηνεύεται, όπως και προηγουμένως, επειδή στη διαδρομή του λεωφορείου υπάρχουν μονόδρομοι και φωτεινοί σηματοδότες. Συνεπώς, **δεν αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες και τα οχήματα διατηρούν μικρότερες αποστάσεις μεταξύ τους**. Επομένως, είναι λογικό η διαδρομή του λεωφορείου να έχει μεγαλύτερη μέγιστη πυκνότητα. Επιπλέον, όπως και στο διάγραμμα M.F.D. του δικτύου, στο σενάριο L, κατά το οποίο υπάρχουν μόνο 100% αυτόνομα οχήματα στο δίκτυο, ενώ η ικανότητα της διαδρομής του λεωφορείου βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, η πυκνότητα έχει σταθερά χαμηλές τιμές. Επομένως, **οι συνθήκες που επικρατούν είναι ευμενέστερες**. Επίσης, **όσο αυξάνεται το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων, ο δεύτερος κλάδος μετακινείται προς τα αριστερά**, όπως και στο διάγραμμα M.F.D. του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη συμφόρηση γίνεται με μικρότερη πυκνότητα. Ταυτόχρονα, εφόσον τα οχήματα που βρίσκονται στη διαδρομή του λεωφορείου αντιστοιχούν σε μικρότερη πυκνότητα, η διαδρομή αυτή αποσυμφορίζεται, ενώ κινούνται λιγότερα οχήματα σε αυτήν. Τέλος, η τιμή της **κρίσιμης πυκνότητας** είναι κοντά στα 10 οχήματα/χλμ. με απότομη

πτώση, όπως ήταν περίπου και στο διάγραμμα M.F.D. του δικτύου. Αυτό δικαιολογείται, μιας και η διαδρομή του λεωφορείου είναι υποδίκτυο του δικτύου που μελετήθηκε.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα M.F.D. σε επίπεδο διαδρομής λεωφορείου για το κάθε σενάριο ξεχωριστά.

4.3. Εκτίμηση Συντελεστή Μ.Ε.Α. με Μη-γραμμική Παλινδρόμηση

4.3.1. Προετοιμασία Βάσης Δεδομένων

Για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων με σκοπό την επίτευξη του τελικού στόχου, που είναι η εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε μονάδες επιβατικών αυτοκινήτων, είναι απαραίτητος ο **καθορισμός των βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs)** που αφορούν την κυκλοφορία, την ασφάλεια και το περιβάλλον. Παρακάτω εξηγούνται αναλυτικά ποιοί δείκτες απόδοσης επιλέχθηκαν και με ποιά διαδικασία.

<u>Βασικοί Δείκτες Απόδοσης που αφορούν την Κυκλοφορία</u>

- Τύπος οδού του εκάστοτε οδικού τμήματος:

Από το πρόγραμμα Aimsun και το αρχείο του δικτύου που εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις, αντλείται ένας πίνακας που περιλαμβάνει τον τύπο της οδού για τον κωδικό του εκάστοτε οδικού τμήματος (συνολικά 207 oids). Αυτός ο πίνακας επιβεβαιώνεται και διορθώνεται με τη χρήση των χαρτών της Google. Αναλυτικότερα, υπάρχουν πέντε **τύποι οδού** στο συγκεκριμένο δίκτυο και κωδικοποιούνται με τις εξής τιμές:

- 0, για τις ράμπες
- 1, για τους αυτοκινητόδρομους
- 2, για τις αρτηρίες
- 3, για τις δευτερεύουσες οδούς
- 4, για της σηματοδοτούμενες οδούς

Συγκεκριμένα στο οδικό δίκτυο υπάρχει ένα οδικό τμήμα που είναι ράμπα, 20 οδικά τμήματα που είναι αυτοκινητόδρομοι, 93 οδικά τμήματα που είναι αρτηρίες, 28 οδικά τμήματα που είναι δευτερεύουσες οδοί και 65 σηματοδοτούμενες οδοί.

- Τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας του εκάστοτε οδικού τμήματος:

Από το πρόγραμμα Aimsun και το αρχείο του δικτύου που εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις, αντλείται ένας πίνακας που περιλαμβάνει τον τύπο ελέγχου της κυκλοφορίας του εκάστοτε οδικού τμήματος (συνολικά 207 oids). Αυτός ο πίνακας επιβεβαιώνεται και διορθώνεται με τη χρήση των χαρτών της Google. Αναλυτικότερα,

υπάρχουν τέσσερις **τύποι ελέγχου** στο συγκεκριμένο δίκτυο και κωδικοποιούνται με τις εξής τιμές:

- 0, για μη σηματοδότηση
- 1, για παραχώρηση προτεραιότητας
- 2, για υποχρεωτική διακοπή πορείας (STOP)
- 3, για ύπαρξη φωτεινού σηματοδότη

Συγκεκριμένα στο οδικό δίκτυο υπάρχουν 139 μη σηματοδοτούμενα οδικά τμήματα, 4 οδικά τμήματα με παραχώρηση προτεραιότητας, 5 οδικά τμήματα με υποχρεωτική διακοπή πορείας (STOP) και 59 οδικά τμήματα με ύπαρξη φωτεινού σηματοδότη.

Οι παραπάνω δύο μεταβλητές (τύπος οδού και τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας) αποθηκεύτηκαν σε έναν πίνακα ονόματι "xar" με τον αντίστοιχο κωδικό οδικού τμήματος.

- Ποσοστό Κυκλοφορίας:

Η επιλεχθείσα κατανομή ζήτησης της κυκλοφορίας κωδικοποιείται σε τιμές 0 και 1, ανάλογα με το **ποσοστό της κυκλοφορίας**. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό 20% αντιστοιχεί στην τιμή 0, ενώ τα ποσοστά 80% και 100% κατηγοριοποιήθηκαν σε έναν κωδικό με τιμή 1.

- Ποσοστό Αυτόνομων Οχημάτων:

Το **ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων** στη σύνθεση της κυκλοφορίας, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.3, ανάλογα το σενάριο ξεκινάει από 0% και καταλήγει σε 100%, αυξανόμενο ανά 10%. Για την κωδικοποίηση του ποσοστού των αυτόνομων οχημάτων στο πλαίσιο δεδομένων το ποσοστό 0% αντιστοιχεί στην τιμή 0, το 10% στην τιμή 1, το 20% στην τιμή 2 κ.ο.κ.

Από τον πίνακα MISECT εξήχθησαν στήλες, οι οποίες αποτελούν τις παρακάτω κυκλοφοριακές μετρικές και κάθε φορά επιλεγόταν sid=0 και ent≠0.

- Ροή (όνομα στήλης:flow):

Στήλη που περιέχει τη **ροή** όλων των οχημάτων για κάθε σενάριο, για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο για όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου.

- Μήκος Διάνυσης (όνομα στήλης:travel):

Στήλη που περιέχει το **μήκος διάνυσης** όλων των οχημάτων για κάθε σενάριο, για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο σε όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου.

- Χρόνος Ταξιδιού (όνομα στήλης:ttime):

Στήλη που περιέχει το **χρόνο ταξιδιού** όλων των οχημάτων για κάθε σενάριο, για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο σε όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου.

- Χρόνος Καθυστέρησης ανά χιλιόμετρο (όνομα στήλης:dtime):

Στήλη που περιέχει το **χρόνο** των καθυστερήσεων όλων των οχημάτων για κάθε σενάριο, για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο για όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου.

Βασικοί Δείκτες Απόδοσης που αφορούν την Ασφάλεια

- Ταχύτητα οχημάτων:

Από τον πίνακα MISECT εξήχθη η στήλη speed και επιλέχθηκε και πάλι sid=0 και ent≠0. Έτσι, προέκυψε μία στήλη με την **μέση ταχύτητα** όλων των οχημάτων για κάθε σενάριο, για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο για όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου. Θεωρήθηκε ότι η αυξημένη ταχύτητα κάποιων οχημάτων ή οι ακραίες τιμές ταχυτήτων μπορούν να εκφράσουν την ασφάλεια στο δίκτυο.

- Αριθμός Αλλαγής Λωρίδων:

Από τον πίνακα MISECT εξήχθη η στήλη total_lane_changes και επιλέχθηκε και πάλι sid=0 και ent≠0. Έτσι, προέκυψε μία στήλη με το **συνολικό αριθμό αλλαγών λωρίδας** όλων των οχημάτων για κάθε σενάριο, για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο για όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου.

Βασικοί Δείκτες Απόδοσης που αφορούν το Περιβάλλον

Με την ολοκλήρωση του κάθε σεναρίου αποθηκεύονται στον πίνακα MISECTIEM στην SQLite αποτελέσματα που αφορούν τις εκπομπές ρύπων για όλες τις επαναλήψεις, τα οχήματα, τις περιόδους και τα οδικά τμήματα.

Για τις παρακάτω περιβαλλοντικές μετρικές εξήχθησαν από τον πίνακα MISECTIEM στήλες και κάθε φορά επιλεγόταν sid=0 και ent≠0.

- Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO2) (στήλη:CO2):

Στήλη που περιέχει εκπομπές **διοξειδίου του άνθρακα** (CO2) όλων των οχημάτων για κάθε σενάριο, για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο για όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου.

- Εκπομπές οξειδίων αζώτου (NOx) (στήλη: NOx):

Στήλη που περιέχει **εκπομπές οξειδίων αζώτου** (NOx) όλων των οχημάτων για κάθε σενάριο, για κάθε επανάληψη και κάθε περίοδο για όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου.

Στη συνέχεια επεξεργάστηκαν τα παραπάνω δεδομένα, ώστε να προκύψει το πλαίσιο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην παλινδρόμηση. Η **διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων και δημιουργίας του πλαισίου δεδομένων** παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

Σε πρώτο στάδιο, διευκρινίζεται ότι από την εξαγωγή των στηλών από τους πίνακες MISYS και MISECT και ενώνοντας τα αποτελέσματα των σεναρίων Β - Κ ανά γραμμή, προέκυψαν στήλες με 1.656.000 γραμμές (207 τμήματα οδών *80 περιόδους * 10

επαναλήψεις * 10 σενάρια = 1.656.000 δεδομένα). Στη συνέχεια, διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός αυτός ήταν πολύ μεγάλος για την εκτέλεση παλινδρόμησης και υπήρχε κίνδυνος στοχαστικότητας. Επομένως, **μειώθηκαν τα δεδομένα** στα 165.600 υπολογίζοντας το μέσο όρο των αποτελεσμάτων για τις 10 επαναλήψεις κάθε οδικού τμήματος και περιόδου για κάθε σενάριο. Στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζεται ο κώδικας στο πρόγραμμα RStudio που εκτελέστηκε η παραπάνω διαδικασία, ενδεικτικά για την επεξεργασία των στηλών CO2 και NOx από τον πίνακα MISECT.

```
emis <- read.csv("C:/Users/Xristina/Desktop/diploma thesis/misectEM/EMK.csv")
emis <- subset(emis, select=c(1,2,4,5,6,8))
emis <- subset(emis, sid==0 & ent!=0)
rownames(emis) <- NULL

em<-matrix(nrow = 16560, ncol = 2)
for (i in 1:16560)   {

  moco2<-emis[i,5]
  monox<-emis[i,6]

  for (y in 1:9)   {

    moco2<- moco2 + emis[i+y*16560,5]
    monox<- monox + emis[i+y*16560,6]

  }

  moco2<-moco2/10   #mesos oros tou co2 tou i section gia ta 10 replications
  em[i,1]<-moco2
  monox<-monox/10   #mesos oros tou Nox tou i section gia ta 10 replications
  em[i,2]<-monox

  #pinakas me to meso oro ton 10 replications

}

colnames(em) <- c("CO2", "NOx")
em <- as.data.frame(em)

write.csv(em, file="C:/Users/Xristina/Desktop/diploma thesis//em10.csv")
```

Εικόνα 4.11: Κώδικας για τον Υπολογισμό Μέσου Όρου κάθε επανάληψης

Η παραπάνω διαδικασία εκτελέστηκε και αποθηκεύτηκε μεμονομένα για τα σενάρια Β έως και Κ. Στη συνέχεια, ενώθηκαν τα αποτελέσματα των στηλών CO2 και NOx ανά γραμμή σε έναν πίνακα με ονομασία “em”, όπου ο αριθμός των γραμμών του ήταν 165.600. Να σημειωθεί ότι κατά την εκτέλεση αυτής της διαδικασίας διατηρήθηκαν σε μία στήλη οι αντίστοιχοι αριθμοί των οδικών τμημάτων, ώστε να ταυτοποιηθεί στη συνέχεια με τα υπόλοιπα δεδομένα.

Η ίδια μέθοδος υλοποιήθηκε και για τη ροή, το μήκος διάνυσης, το χρόνο ταξιδιού, το χρόνο καθυστέρησης, την ταχύτητα και τον αριθμό αλλαγής λωρίδας και τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε έναν πίνακα με ονομασία “s”.

Κατά την εκτέλεση αυτής της διεργασίας παρατηρήθηκε ότι η σειρά με την οποία ήταν τα δεδομένα του κάθε σεναρίου ήταν η εξής: για κάθε αριθμό περιόδου ent με αύξουσα σειρά (από το 1 μέχρι και το 80) υπήρχε το αποτέλεσμα για κάθε αριθμό τμήματος οδού με αύξουσα σειρά (συνολικά 207 τμήματα οδού). Αυτό αποτελεί **χρήσιμη παρατήρηση** για την προσθήκη του ποσοστού κυκλοφορίας και του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων.

Επόμενο στάδιο ήταν η **δημιουργία της στήλης του ποσοστού κυκλοφορίας** (όνομα στήλης: traffic.volume)σύμφωνα με τη σειρά που είχαν τα δεδομένα που είχαν ήδη επεξεργαστεί. Για αυτόν το σκοπό αναπτύχθηκε ο κώδικας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.12. Αναλυτικότερα, οι πρώτες 4.140 γραμμές της καινούριας στήλης του ποσοστού κυκλοφορίας (207 τμήματα οδών * 20 πρώτες περίοδοι) παίρνουν την τιμή 0, επειδή έχουν χαμηλό ποσοστό κυκλοφορίας, και οι υπόλοιπες 12.420 παίρνουν την τιμή 1, επειδή έχουν υψηλότερο ποσοστό κυκλοφορίας. Αυτή η στήλη είναι ίδια για όλα τα σενάρια, επομένως τοποθετείται σε έναν πίνακα μίας στήλης 10 φορές.

```
tv <- matrix(nrow = 16560)
for (i in 1:16560) {  #gia ena senario
  if (i<=4140){
    tv[i] <- 0
  }
  else{
    tv[i] <- 1
  }
}
traffic.volume <- rbind(tv,tv)
for (i in 1:8) {
  traffic.volume <- rbind(traffic.volume,tv) #gia ta 10 senaria
}
colnames(traffic.volume) <- c("traffic.volume")
traffic.volume<- as.data.frame(traffic.volume)
```

Εικόνα 4.12: Κώδικας για τη δημιουργία της στήλης Ποσοστού Κυκλοφορίας

Για τη **δημιουργία της στήλης του ποσοστού των αυτόνομων οχημάτων** (όνομα στήλης: penr) σύμφωνα με τη σειρά των δεδομένων που παρουσιάστηκαν παραπάνω δημιουργήθηκε ο κώδικας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.13. Ειδικότερα, η τιμή του ποσοστού των αυτόνομων οχημάτων για κάθε 165.600 δεδομένα (αριθμός δεδομένων κάθε σεναρίου) αυξανόταν κατά 1, παίρνοντας τιμές από το 1 έως το 10.

```
penr <- matrix(nrow = 165600)
k<-1    #i:arithmos senarion, j: 80*207
for (i in 1:10) {
  for (j in 1:16560) {

    penr[k] <- i
    k<-k+1
  }
}
```

Εικόνα 4.13: : Κώδικας για τη δημιουργία της στήλης Ποσοστού Αυτόνομων Οχημάτων

Η **τελευταία στήλη** που δημιουργήθηκε για το πλαίσιο δεδομένων και θα αποτελέσει την εξαρτημένη μεταβλητή στην παλινδρόμηση ήταν ο εκτιμώμενος συντελεστής Μ.Ε.Α. (PCU) για τα αυτόνομα οχήματα που προκύπτει από τη σχέση:

$$PCU_{AV} = \frac{Capacity_{human}}{Capacity_{AV}} \qquad (4.1)$$

Η σχέση (4.1) εκφράζει **το λόγο του φόρτου του κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το φόρτο του κάθε τμήματος του κάθε σεναρίου**. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για τη δημιουργία αυτής της στήλης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.14. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που ο φόρτος της βάσης αναφοράς ή ο φόρτος κάποιου σεναρίου ήταν μηδενικός, η γραμμή της στήλης έπαιρνε την τιμή 0 με σκοπό να αφαιρεθεί αργότερα από τα δεδομένα.

```
pc<-matrix(nrow = 165600)
i <-1
while (i<165601) {
  for (l in 1:16560) {
    if (bl[l,2]==0){
      pc[i] <- 0
      i<- i+1
    } else if (s[i,3]==0) {
      pc[i] <- 0
      i<- i+1
    } else {
      pc[i] <- (bl[l,2]/s[i,3])
      i<- i+1
    }
  }
}
```

Εικόνα 4.14: Κώδικας για τη δημιουργία στήλης του Λόγου: Φόρτος κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το Φόρτο του κάθε τμήματος του κάθε σεναρίου

Τελευταίο στάδιο ήταν η **ένωση των παραπάνω στηλών σε έναν ενιαίο πίνακα και η δημιουργία του πλαισίου δεδομένων**, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.15. Με την εντολή «left_join» ενώθηκαν οι πίνακες “s” και “xar”. Δηλαδή για κάθε γραμμή του πίνακα “s” προστέθηκαν δύο στήλες με τον τύπο οδού και τον τύπο ελέγχου της κυκλοφορίας από τον πίνακα “xar”, με βάση τον κωδικό του οδικού τους τμήματος (oid). Στη συνέχεια, αφού ήταν γνωστή η σειρά των γραμμών του πίνακα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, προστέθηκαν στον πίνακα οι στήλες που περιείχαν το ποσοστό της κυκλοφορίας και το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων, τις εκπομπές CO2 και NOx και τον λόγο του φόρτου του κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το φόρτο του κάθε τμήματος του κάθε σεναρίου. Τέλος, από τον πίνακα αφαιρέθηκαν τα δεδομένα που είχαν μηδενικό φόρτο σε κάποιο οδικό τμήμα στο σενάριο βάσης αναφοράς ή σε κάποιο οδικό τμήμα ενός σεναρίου, γιατί θεωρήθηκε ότι δεν συνεισφέρουν στην εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε μονάδες επιβατικών αυτοκινήτων.

```
xar <- read.csv("C:/Users/Xristina/Desktop/xar.csv")
df <- left_join(xar,s)
df<- subset(df, select = c(2:9))

dataframe <- cbind(pc,df,traffic.volume, penr,em$CO2,em$NOx)
dataframe<-as.data.frame(dataframe)
dataframe <- subset(dataframe, pc!=0)
```

Εικόνα 4.15: Δημιουργία Πλαισίου Δεδομένων

Στον Πίνακα 4.10 συνοψίζονται οι δείκτες της βάσης δεδομένων, με την περιγραφή τους και τη μονάδα μέτρησης/τιμές που έχουν.

Πίνακας 4.10: Σύνοψη Δεικτών Βάσης Δεδομένων

Δείκτες	Περιγραφή	Μονάδες Μέτρησης / Τιμές
Ροή	αριθμός οχημάτων στη μονάδα χρόνου στο δίκτυο ή σε οδικό τμήμα	οχήματα/ώρα
Ποσοστό Αυτόνομων Οχημάτων	ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας του δικτύου (0%-100%)	0-10
Ποσοστό Κυκλοφορίας	ποσοστό κυκλοφορίας οχημάτων στο δίκτυο (0%, 80%, 100%)	0,1
Τύπος Οδού	ράμπα, αυτοκινητόδρομος, αρτηρία, δευτερεύουσα οδός, σηματοδοτούμενη οδός)	0,1,2,3,4
Τύπος Ελέγχου Κυκλοφορίας	χωρίς σηματοδότηση, παραχώρηση προτεραιότητας, υποχρεωτική διακοπή πορείας, φωτεινός σηματοδότης	0,1,2,3
Συντελεστής Μετατροπής Αυτόνομων Οχημάτων σε Μ.Ε.Α.	λόγος του φόρτου του κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το φόρτο του αντίστοιχου τμήματος του εκάστοτε σεναρίου	-

4.3.2. Μη-γραμμική Παλινδρόμηση Δενδροειδούς Μορφής

Με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.3.1 δημιουργήθηκε ένα **πλαίσιο δεδομένων** που έχει τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω στιγμιότυπο (Εικόνα 4.16) με 151.671 δεδομένα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο πίνακας του πλαισίου δεδομένων περιέχει στοιχεία για το μέσο όρο των επαναλήψεων του κάθε σεναρίου και για κάθε ένα

Filter

	pc	flow	travel.time	delay.time	speed	trevel	Tlane.changing	Road.Type	Control.Type	em.CO2	em.NOx	traffic.volume	penr
1	1.0152439	1312	21.00441400	0.357460668	104.144854	19.583790010	13.6	1	0	2987.2786230	19.225755550	0	1
2	0.7500000	80	24.51020281	-0.027759947	61.805130	1.040286441	2.1	4	0	295.2461413	2.065297628	0	1
3	0.9891892	1480	24.08656053	0.463926028	104.597497	25.496865450	30.9	1	0	3810.9342940	22.600877920	0	1
4	1.0740741	216	14.60135586	1.160521412	64.740194	1.399486704	0.7	4	0	587.7939160	2.938044527	0	1
5	0.9674797	492	16.19531598	0.754236246	67.033439	3.680012938	2.0	4	0	1077.6151360	4.062642563	0	1
6	1.0241287	1492	11.44915102	0.652201671	97.320082	11.348049900	60.6	1	0	3221.5252980	20.309910440	0	1
7	1.1355932	472	11.79584355	0.094831128	69.184457	2.658130022	14.1	4	0	522.2650820	2.159089006	0	1
8	1.0166667	480	11.83415551	0.094171570	69.488086	2.722917105	12.0	4	0	625.6383142	3.285447470	0	1
9	0.9333333	1800	20.92120320	0.820309259	101.086863	25.880691800	36.6	1	0	5125.9390850	30.416604440	0	1
10	0.9082569	436	8.87439231	0.155279690	70.480835	1.874448044	3.6	4	0	442.9424556	2.436007692	0	1
11	1.0409091	1760	10.02827206	0.255406398	99.809955	11.956759060	14.6	1	0	2172.5456050	16.094946790	0	1
12	0.8666667	60	16.31851297	1.557714724	42.246672	0.452596295	0.0	3	0	241.3537248	1.115773187	0	1
13	1.4285714	28	16.59486589	5.510183484	22.496643	0.209536309	0.0	3	2	128.4961457	0.907719310	0	1
14	1.0319635	1752	13.22141123	0.372711167	99.761360	15.692166620	20.8	1	0	2852.1534440	21.680072060	0	1
15	1.0124224	1288	24.48206475	2.190151325	95.414145	20.025178890	31.6	1	0	5714.0216390	36.639213010	0	1
16	0.8070175	228	3.94422372	0.083607683	68.165908	0.422779472	0.0	4	0	97.5612224	0.516487662	0	1
17	0.8802993	1604	23.88605599	0.869061575	99.924367	26.044750610	23.1	1	0	4653.6207960	33.871770650	0	1
18	0.9109415	1572	12.50390004	0.263267961	101.740907	13.584753080	24.8	1	0	2361.4877530	16.981584660	0	1
19	1.1303318	1688	16.31540484	0.436771697	100.039078	18.715478050	45.6	1	0	3771.5039210	26.739748370	0	1
20	1.3333333	48	15.92305291	1.590597277	44.238725	0.290924030	0.0	3	0	67.3449104	0.374757577	0	1
21	0.8466454	1252	8.52363149	0.222438850	100.637924	7.305241360	10.5	1	0	1366.3969620	10.110234250	0	1
22	1.0352941	340	30.58350857	0.053970319	71.260374	5.110118494	8.6	4	3	1056.4725080	5.563114668	0	1
23	1.0689655	348	7.83501413	0.039972772	74.114117	1.385273434	6.1	4	0	201.0627699	0.931633888	0	1
24	0.8893281	1012	19.87071507	0.264739972	102.109003	13.980712520	13.2	1	0	2456.8889000	19.998121750	0	1

Showing 1 to 29 of 151,671 entries, 13 total columns

Console Terminal Jobs

Εικόνα 4.16: Στιγμιότυπο Πλαισίου Δεδομένων

ξεχωριστά και η κάθε γραμμή του αφορά σε ένα συγκεκριμένο οδικό τμήμα και σε μία συγκεκριμένη περίοδο 90 δευτερολέπτων για το σύνολο των οχημάτων.

Από τις παραπάνω **μεταβλητές επιλέχθηκαν ορισμένες για την εκτέλεση της παλινδρόμησης** με σκοπό την εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. Η εξαρτημένη μεταβλητή ήταν ο συντελεστής για τη μετατροπή αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α., δηλαδή ο λόγος του κυκλοφοριακού φόρτου του κάθε οδικού τμήματος του σεναρίου βάσης αναφοράς προς τον φόρτο του κάθε τμήματος του κάθε σεναρίου (pc). Ως ανεξάρτητες μεταβλητές επιλέχθηκαν η ροή (flow), ο τύπος της οδού (Road Type), ο τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας (Control Type), το ποσοστό κυκλοφορίας (traffic Volume) και το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων (Penetration Rate). Κριτήριο για την επιλογή αυτών των ανεξάρτητων μεταβλητών ήταν να είναι παράγοντες πρόβλεψης που αποτελούν γενικά στοιχεία του δικτύου. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.10) παρουσιάζονται οι συσχετίσεις τόσο των ανεξάρτητων μεταβλητών μεταξύ τους όσο και με την εξαρτημένη.

Πίνακας 4.11: Συσχετίσεις μεταβλητών

	pc	Road Type	Control Type	Traffic volume	Penetration Rate	Flow
pc	1	0.02542	0.01718	- 0.09775	- 0.12058	- 0.11832
Road Type	0.025423	1	- 0.104313	0.013776	- 0.002206	- 0.415834
Control Type	0.017176	-0.104313	1	0.006913	0.002759	- 0.201676
Traffic volume	-0.097749	0.013776	0.006913	1	0.002913	0.154544
Penetration Rate	-0.120579	-0.002206	0.002759	0.002913	1	0.045105
Flow	-0.118316	-0.415834	-0.201676	0.154544	0.045105	1

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.11, η **συσχέτιση** μεταξύ του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. είναι θετική με τις μεταβλητές τύπος οδού και τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας. Αυτό σημαίνει ότι όσο μειώνεται ο κωδικός των μεταβλητών αυτών, τόσο μειώνεται και ο συντελεστής Μ.Ε.Α., δηλαδή όσο οι συνθήκες του τύπου της οδού και του ελέγχου της κυκλοφορίας ευνοούν την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων, τόσο πιο αποτελεσματικά λειτουργούν και τα αυτόνομα οχήματα στο δίκτυο. Αντίθετα, με τις μεταβλητές του ποσοστού της κυκλοφορίας, του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων και της ροής έχει αρνητική συσχέτιση, δηλαδή όσο αυξάνονται οι τιμές τους, μειώνεται η τιμή του συντελεστή Μ.Ε.Α. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν σχετικά μικρές συσχετίσεις μεταξύ τους, οπότε είναι αποδεκτό να χρησιμοποιηθούν στο ίδιο μοντέλο.

Για την εκτέλεση της παλινδρόμησης οι μεταβλητές «τύπος οδού», «τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας» και «ποσοστό κυκλοφορίας», ορίστηκαν ως ονομαστικές, καθώς κατηγοριοποιούν τα δεδομένα και δεν λαμβάνουν συνεχείς τιμές. Αντίθετα, οι μεταβλητές «ροή» και «ποσοστό αυτόνομων οχημάτων» ορίστηκαν ως αριθμητικές, καθώς λαμβάνουν συνεχείς τιμές.

Αρχικά, δοκιμάστηκαν διάφορα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης από όπου φάνηκε ότι η σχέση των μεταβλητών δεν είναι γραμμική. Επομένως, επιλέχθηκε και εκτελέστηκε **μη γραμμική παλινδρόμηση με δένδρα αποφάσεων.**

Πρώτο βήμα για την εκτέλεση της παλινδρόμησης ήταν η **εφαρμογή του αλγόριθμου M5** με τη συνάρτηση «M5P» (M5P είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου M5 που αναπτύχθηκε από την ομάδα έργου WEKA). Τα δενδρικά μοντέλα M5P συνδυάζουν τα κλασικά μοντέλα δένδρων αποφάσεων με τη γραμμική παλινδρόμηση στα φύλλα του δένδρου. Εξαρτημένη μεταβλητή στο μοντέλο ήταν ο λογάριθμος του λόγου του φόρτου του κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το φόρτο του κάθε τμήματος του κάθε σεναρίου (pc) και ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, τη ροή (F), τον τύπο της οδού (RT), τον τύπο ελέγχου της κυκλοφορία (CT), το ποσοστό κυκλοφορίας (TV) και το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων (PR) (Εικόνα 4.17).

Σημειώνεται ότι για τον καλύτερο έλεγχο των αποτελεσμάτων στη μεταβλητή «τύπος οδού» **ενοποιήθηκαν οι κατηγορίες** «αρτηρία» και «δευτερεύουσα οδός» και στη μεταβλητή «τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας» **ενοποιήθηκαν οι κατηγορίες** «παραχώρηση προτεραιότητας» και «υποχρεωτική διακοπή πορείας (STOP)». Επομένως, οι κωδικοί των μεταβλητών αυτών διαμορφώθηκαν ως εξης:

- Τύπος οδού του εκάστοτε οδικού τμήματος:
  - 0, για τις ράμπες
  - 1, για τους αυτοκινητόδρομους
  - 2, για τις τις αρτηρίες και τις δευτερεύουσες οδούς
  - 3, για της σηματοδοτούμενες οδούς
- Τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας του εκάστοτε οδικού τμήματος:
  - 0, για μη σηματοδότηση
  - 1, για παραχώρηση προτεραιότητας και υποχρεωτική διακοπή πορείας (STOP)
  - 2, για ύπαρξη φωτεινού σηματοδότη

Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.17 που ακολουθεί.

```
dataframe <- read.csv("C:/Users/Xristina/Desktop/dataframe.csv")
df <-subset(dataframe, select = c(1,2,8,9,12,13))

PCU<- df[,1]
F<-df[,2]
F<-as.numeric(F)
str(F)
RT<-df[,3]
RT<- as.factor(RT)
CT<-df[,4]
CT<- as.factor(CT)
TV<-df[,5]
TV<- as.factor(TV)
PR<-df[,6]
PR<-as.numeric(PR)


m1 <- M5P(log(PCU) ~ F +RT + CT + TV + PR)
summary(m1)
write_to_dot(m1)
k<-print(m1)
```

Εικόνα 4.17: Εκτέλεση παλινδρόμησης

Στον Πίνακα 4.12 Παρουσιάζονται συνοπτικά οι δείκτες της βάσης δεδομένων μετά από τις τροποποιήσεις που περιγράφηκαν.

Πίνακας 4.12: Σύνοψη Δεικτών Βάσης Δεδομένων μετά από τροποποιήσεις

Δείκτες	Περιγραφή	Μονάδες Μέτρησης / Τιμές	Μορφή
Ροή	αριθμός οχημάτων στη μονάδα χρόνου στο δίκτυο ή σε οδικό τμήμα	οχήματα/ώρα	αριθμητική
Ποσοστό Αυτόνομων Οχημάτων	ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας του δικτύου (0%-100%)	0-10	αριθμητική
Ποσοστό Κυκλοφορίας	ποσοστό κυκλοφορίας οχημάτων στο δίκτυο (0%, 80%, 100%)	0,1	ονομαστική
Τύπος Οδού	ράμπα, αυτοκινητόδρομος, αρτηρία - δευτερεύουσα οδός, σηματοδοτούμενη οδός)	0,1,2,3	ονομαστική
Τύπος Ελέγχου Κυκλοφορίας	χωρίς σηματοδότηση, παραχώρηση προτεραιότητας - υποχρεωτική διακοπή πορείας, φωτεινός σηματοδότης	0,1,2	ονομαστική
Συντελεστής Μετατροπής Αυτόνομων Οχημάτων σε Μ.Ε.Α.	λόγος του φόρτου του κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το φόρτο του αντίστοιχου τμήματος του εκάστοτε σεναρίου	-	αριθμητική

Δεύτερο βήμα ήταν η **αξιολόγηση του μοντέλου παλινδρόμησης** με τη συνάρτηση «summary», από όπου προέκυψαν τα αποτελέσματα της Εικόνας 4.18.

```
> summary(m1)

=== Summary ===

Correlation coefficient                  0.5413
Mean absolute error                      0.3388
Root mean squared error                  0.4831
Relative absolute error                 84.1295 %
Root relative squared error             84.0863 %
Total Number of Instances          151671
```

Εικόνα 4.18: Αξιολόγηση Μοντέλου

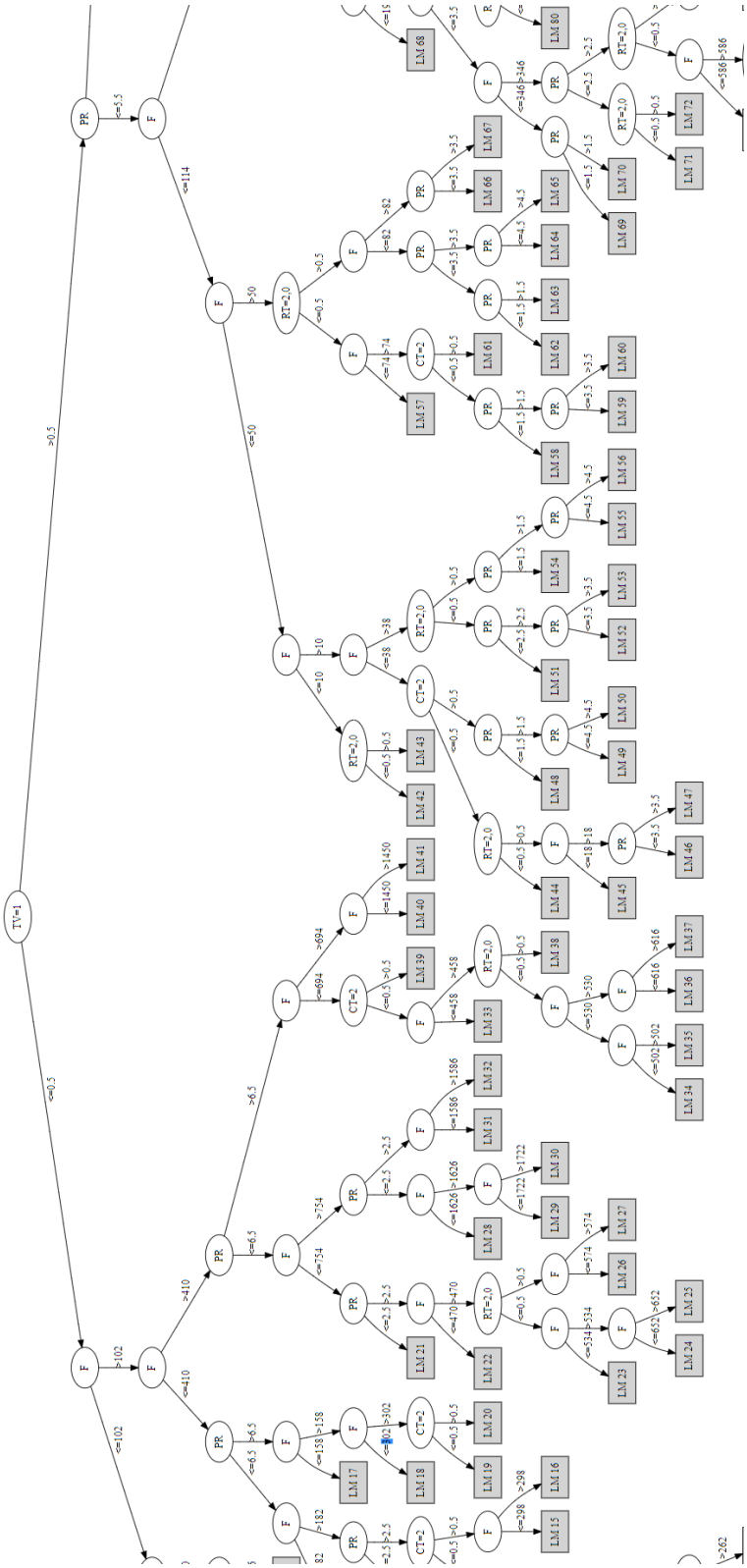
Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.18, ο δείκτης correlation coefficient R ισούται με 0,5413, το οποίο σημαίνει ότι ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι 0,293, και δείχνει την ύπαρξη μιας σχετικά καλής προσαρμογής, ενώ για τον έλεγχο του σφάλματος από τους δείκτες RAE και RRSE παρουσιάζουν υψηλές τιμές οι οποίες όμως ανήκουν σε αποδεκτά επίπεδα. Συνεπώς, το μοντέλο δένδρου παλινδρόμησης που αναπτύχθηκε είναι οριακά αποδεκτό και προσφέρει αξιόλογα και στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα.

Τρίτο βήμα ήταν η **οπτικοποίηση του δένδρου** παλινδρόμησης που προέκυψε από την εφαρμογή της συνάρτησης M5P. Με την εντολή «write_to_dot» (Εικόνα 4.17), αναπαραστάθηκε το δέντρο απόφασης, που δημιουργήθηκε, σε γλώσσα DOT, για να είναι δυνατή η επεξεργασία του μέσω Graphviz. Το Graphviz είναι ένα λογισμικό οπτικοποίησης γραφήματος ανοιχτού κώδικα και είναι κατάλληλο για την απεικόνιση δέντρων απόφασης/παλινδρόμησης. Αντιγράφοντας, λοιπόν, τον κώδικα, που δόθηκε από την εντολή «write_to_dot» (μέρος του παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.19), δημιουργείται το δενδροδιάγραμμα μέρος του οποίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.20, το οποίο έχει τη

δυνατότητα, δοθέντων των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών, να προβλέπει τον κωδικό της γραμμικής εξίσωσης μέσω της οποίας υπολογίζεται ο λογάριθμος του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων. Σημειώνεται ότι για αυτό το διάγραμμα οι συνθήκες που περιέχουν ονομαστικές τιμές ελέγχονται αν ικανοποιούνται με τους κωδικούς: 0 = Όχι και 1 = Ναι.

```
2  digraph M5Tree {
3  N0 [label="TV=1"]
4  N0->N1 [label="<=0.5"]
5  N1 [label="F"]
6  N1->N2 [label="<=102"]
7  N2 [label="F"]
8  N2->N3 [label="<=30"]
9  N3 [label="LM 1" shape=box style=filled ]
10 N2->N4 [label=">30"]
11 N4 [label="F"]
12 N4->N5 [label="<=46"]
13 N5 [label="LM 2" shape=box style=filled ]
14 N4->N6 [label=">46"]
15 N6 [label="LM 3" shape=box style=filled ]
16 N1->N7 [label=">102"]
17 N7 [label="F"]
18 N7->N8 [label="<=410"]
19 N8 [label="PR"]
20 N8->N9 [label="<=6.5"]
21 N9 [label="F"]
22 N9->N10 [label="<=182"]
23 N10 [label="PR"]
24 N10->N11 [label="<=2.5"]
25 N11 [label="F"]
26 N11->N12 [label="<=130"]
27 N12 [label="LM 4" shape=box style=filled ]
28 N11->N13 [label=">130"]
29 N13 [label="LM 5" shape=box style=filled ]
30 N10->N14 [label=">2.5"]
31 N14 [label="F"]
32 N14->N15 [label="<=154"]
33 N15 [label="RT=2,0"]
34 N15->N16 [label="<=0.5"]
35 N16 [label="LM 6" shape=box style=filled ]
```

Εικόνα 4.19: Κώδικας του δέντρου παλινδρόμησης σε Περιβάλλον Graphviz



Εικόνα 4.20: Τμήμα Δεδροδιαγράμματος Παλινδρόμησης

Στο τελευταίο βήμα, με την εντολή «print» (Εικόνα 4.17) παρουσιάζονται όλοι οι κωδικοί και οι αντίστοιχες **εξισώσεις** μέσω των οποίων υπολογίζεται ο λογάριθμος του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων (τμήμα των οποίων φαίνεται στην Εικόνα 4.21).

```
LM num: 59
log(PCU) =
        0.0001 * F
        + 0.0001 * RT=3,2,0
        + 0.0004 * RT=2,0
        + 0.0001 * RT=0
        + 0.041 * CT=0,2
        - 0.0001 * CT=2
        + 0 * TV=1
        + 0.0016 * PR
        - 0.1333

LM num: 60
log(PCU) =
        0.0015 * F
        + 0.0001 * RT=3,2,0
        + 0.0004 * RT=2,0
        + 0.0001 * RT=0
        + 0.0022 * CT=0,2
        - 0.0001 * CT=2
        + 0 * TV=1
        + 0.1395 * PR
        - 0.8132

LM num: 61
log(PCU) =
        0.0019 * F
        + 0.0001 * RT=3,2,0
        + 0.0004 * RT=2,0
        + 0.0001 * RT=0
        + 0.0016 * CT=0,2
        - 0.0001 * CT=2
        + 0 * TV=1
        + 0.0088 * PR
        - 0.2894
```

Εικόνα 4.21: Τμήμα Παρουσίασης Κωδικών και αντίστοιχων Εξισώσεων

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα **παράδειγμα** για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της μη γραμμικής παλινδρόμησης με δένδρα αποφάσεων (δένδρα παλινδρόμησης) για την εκτίμηση του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικού Οχήματος:

Έστω ότι αναζητάται η εκτίμηση του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικού Οχήματος για της εξής συνθήκες:

▫ Ροή = 75 οχήματα/ώρα (F = 75)

▫ Τύπος οδού: Σηματοδοτούμενη οδός (RT = 3)

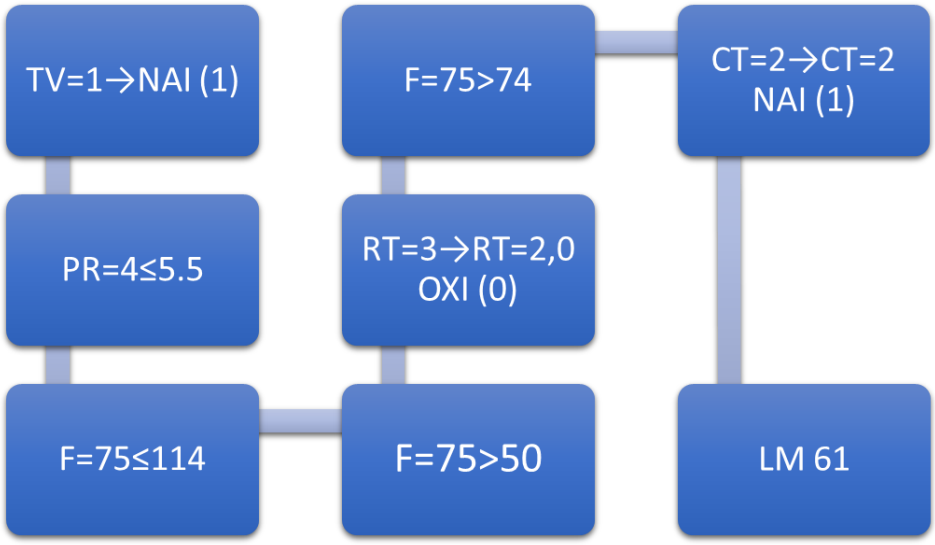
▫ Τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας: Φωτεινός σηματοδότης (CT = 2)

▫ Ποσοστό αυτόνομων οχημάτων: 40% (PR = 4)

▫ Ποσοστό κυκλοφορίας: 100% (TV = 1)

Η **πορεία** που θα ακολουθηθεί στο δενδροδιάγραμμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.22 και καταλήγει στην εξίσωση με αριθμό 61 και από την Εικόνα 4.21 αντικαθιστώντας τις τιμές των μεταβλητών στην εξίσωση προκύπτει: $\log(PCU_{AV}) = -0{,}1084 \rightarrow PCU_{AV} = 0{,}779$.

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η τιμή του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. για τις συγκεκριμένες τιμές ροής, τύπου οδού, τύπου ελέγχου της κυκλοφορίας, ποσοστού αυτόνομων οχημάτων και ποσοστού κυκλοφορίας, είναι μικρότερος της μονάδας. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση τα αυτόνομα οχήματα παρουσιάζουν μικρότερες τιμές συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. συγκριτικά με τα συμβατικά οχήματα.



Εικόνα 4.22: Πορεία Παραδείγματος στο Δενδροδιάγραμμα

Όσον αφορά το **δένδρο παλινδρόμησης** αξίζει να αναφερθεί ότι προέκυψαν 172 φύλλα που περιέχουν τον αριθμό της εξίσωσης μέσω της οποίας υπολογίζεται ο λογάριθμος του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων (στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται όλες οι εξισώσεις), για τις συνθήκες που ικανοποιούνται στα ανώτερα επίπεδα. Επιπλέον, από το δενδροδιάγραμμα (Εικόνα 1.5) παρατηρείται ότι το ποσοστό της (TV) είναι το χαρακτηριστικό που παρέχει τις περισσότερες πληροφορίες και για το λόγο αυτό έχει επιλεγεί ως πρώτο κριτήριο διαχωρισμού, ωστόσο δεν εισέρχεται ως μεταβλητή στην εξίσωση εκτίμησης των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α.

4.4. Επιρροή Αυτόνομων Οχημάτων στην Κυκλοφορία, στην Ασφάλεια και στο Περιβάλλον

Εκτελώντας τις προσομοιώσεις που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.1 προκύπτουν **αποτελέσματα που αφορούν την επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, στην οδική ασφάλεια και στο περιβάλλον**. Αναλυτικότερα, οι συνθήκες της κυκλοφορίας εκφράζονται με τον μέσο χρόνο καθυστερήσεων, η οδική ασφάλεια με πλήθος των αλλαγών λωρίδας και η επιβάρυνση του περιβάλλοντος με τις εκπομπές CO_2. Τα προαναφερθέντα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 4.13.

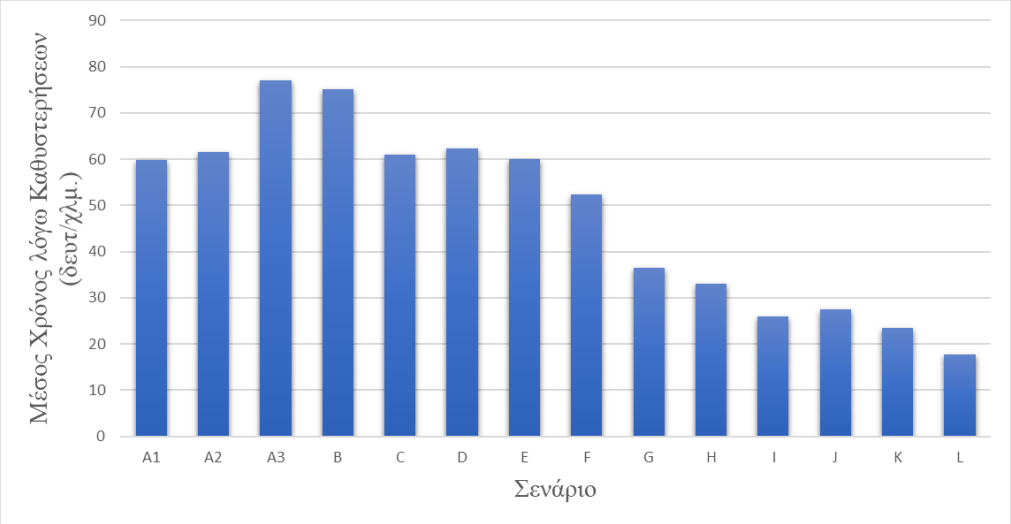
Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα Σεναρίων σχετικά με την Κυκλοφορία, την Ασφάλεια και το Περιβάλλον

Σενάριο	Μέσος Χρόνος λόγω Καθυστερήσεων (sec/km)	Πλήθος Αλλαγών Λωρίδας	Εκπομπές CO2 (kg)
A1	59,89	128.751	407,23
A2	61,48	127.854	403,76
A3	77,07	100.519	393,09
B	75,06	102.190	372,88
C	60,92	105.313	352,76
D	62,37	99.019	336,52
E	60,01	93.723	322,03
F	52,38	100.339	299,12
G	36,53	107.106	272,58
H	33,06	106.703	251,77
I	25,90	108.582	227,45
J	27,54	99.316	216,63
K	23,41	94.506	197,97
L	17,68	97.651	202,95

Αναλύοντας τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Η επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία εκφράστηκε με την κυκλοφοριακή μετρική του **μέσου χρόνου καθυστερήσεων**. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο μέσος χρόνος καθυστερήσεων ανά χιλιόμετρο για το σύνολο των οχημάτων και για το σύνολο των δύο ωρών που εκτελούνταν οι προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα αυτών των

υπολογισμών για όλα τα σενάρια παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.3. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα, με την προσθήκη συμβατικού λεωφορείου (σενάριο Α2) στην υπάρχουσα κατάσταση, αυξάνεται ελαφρώς ο χρόνος των καθυστερήσεων. Η αύξηση είναι αναμενόμενη, καθώς στη διαδρομή που ακολουθεί το λεωφορείο πραγματοποιεί στάσεις και δημιουργεί καθυστερήσεις στα υπόλοιπα οχήματα. Ωστόσο, το μικρό ποσοστό της αύξησης ίσως αιτιολογείται επειδή το λεωφορείο είναι συμβατικό και υπάρχει ο ανθρώπινος παράγοντας. Σε αυτήν την περίπτωση δεν ελέγχεται πλήρως η συμπεριφορά του οδηγού, ο οποίος μπορεί να μην τηρεί τα όρια ταχυτήτων και το όχημα να κινείται με αυξημένη ταχύτητα για λεωφορείο. Στην περίπτωση που στην υπάρχουσα κατάσταση προστίθεται αυτόνομο λεωφορείο (σενάριο Α3) παρατηρείται μία υψηλότερη αύξηση στο χρόνο λόγω καθυστερήσεων. Σε αντίθεση με το σενάριο Α2, στο σενάριο Α3 το αυτόνομο όχημα τηρεί πλήρως τους κανόνες και κινείται με μειωμένη ταχύτητα, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί καθυστερήσεις λόγω των στάσεων που πραγματοποιεί. Επομένως είναι αναμενόμενη η αύξηση του χρόνου λόγω καθυστερήσεων. Στα υπόλοιπα σενάρια παρατηρείται μία σταδιακή μείωση του χρόνου λόγω καθυστερήσεων, καθώς αυξάνεται το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων, αφού μειώνεται ο χρόνος αντίδρασης των οχημάτων και πραγματοποιούν αποτελεσματικότερη οδήγηση.

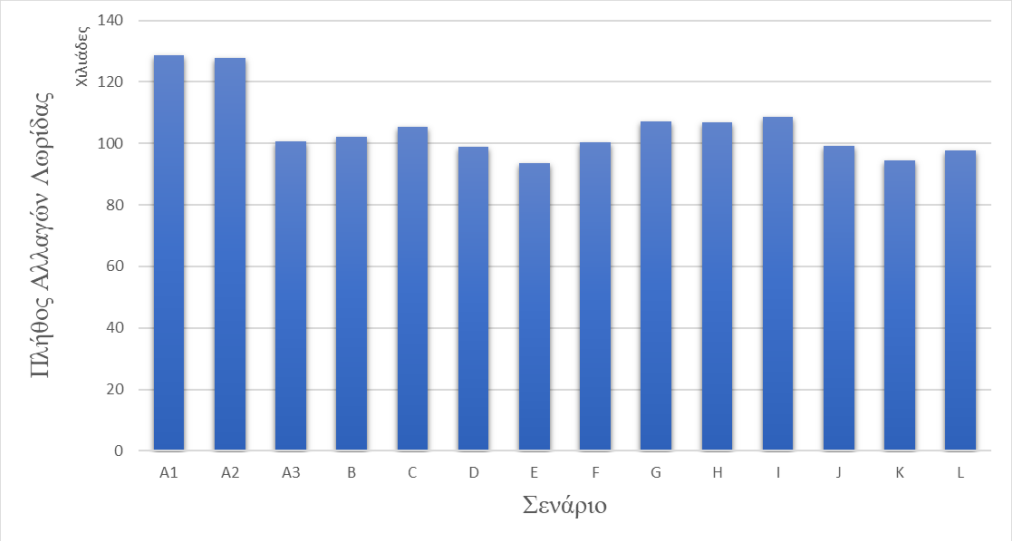


Διάγραμμα 4.3: Μέσος χρόνος λόγω καθυστερήσεων ανά σενάριο

Αξίζει να σημειωθεί ότι από το σενάριο που ο αριθμός των αυτόνομων οχημάτων είναι ίσος με τον αριθμό των συμβατικών (σενάριο F) ο μέσος χρόνος λόγω καθυστερήσεων είναι μικρότερος από αυτόν του σεναρίου βάσης αναφοράς και εξακολουθεί να μειώνεται. Στο σενάριο L, όπου μόνο τα αυτόνομα οχήματα συνθέτουν την κυκλοφορία, χωρίς την κυκλοφορία λεωφορείου, υπάρχει η μεγαλύτερη μείωση, όπως είναι φυσικό, με ποσοστό -70,5%.

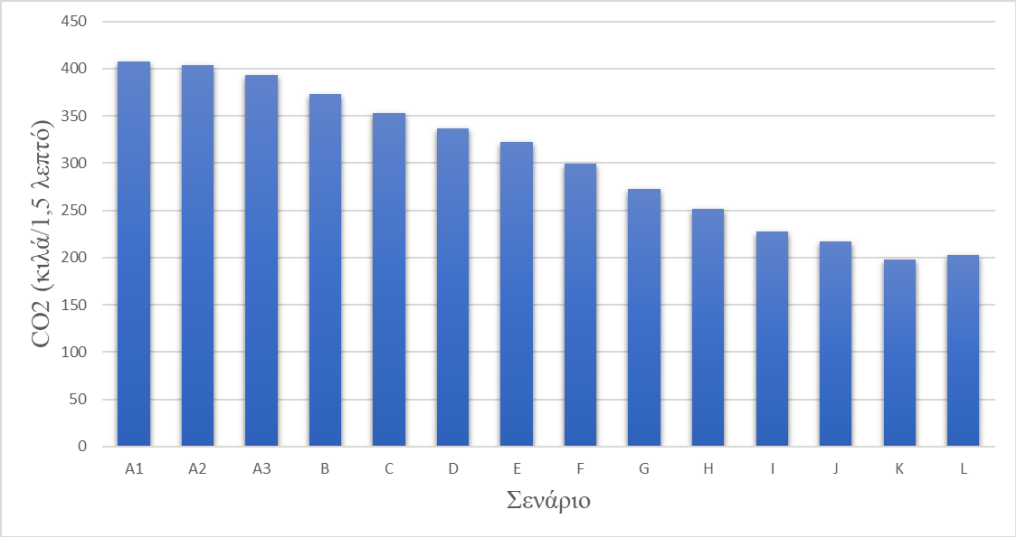
Όσον αφορά στην επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στην οδική ασφάλεια, επιλέχθηκε ως βασικός δείκτης απόδοσης το **πλήθος των αλλαγών λωρίδας**. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο αριθμός αλλαγών λωρίδας για το σύνολο των οχημάτων και για το σύνολο των δύο ωρών που εκτελούνταν οι προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα αυτών των

υπολογισμών για όλα τα σενάρια παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.4. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι όταν εισάγεται το αυτόνομο λεωφορείο (σενάριο Α3), μειώνεται το πλήθος των αλλαγών λωρίδας. Αυτή η μείωση είναι αναμενόμενη, καθώς η ύπαρξη αυτόνομου λεωφορείου μειώνει το μέσο όρο αλλαγών λωρίδας των οχημάτων, αφού κινείται σε προκαθορισμένη πορεία και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις υποχρεούται να αλλάξει λωρίδα. Στα υπόλοιπα σενάρια παρατηρείται μία σταθερότητα σε μειωμένο πλήθος αλλαγών λωρίδας, με ποσοστό μείωσης περίπου 20%.



Διάγραμμα 4.4: Πλήθος αλλαγών λωρίδας ανά σενάριο

Τέλος, όσον αφορά στην επιρροή των αυτόνομων οχημάτων στο περιβάλλον, επιλέχθηκε ως βασικός δείκτης απόδοσης οι **εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO2)**. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για το σύνολο των οχημάτων και για κάθε κύκλο περιόδου (1,5 λεπτό). Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών για όλα τα σενάρια παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.5. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι υπάρχει μία σταδιακή μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα με σταθερό αυξανόμενο ρυθμό, μέχρις ότου αγγίζει τη μείωση κατά περίπου 50% των εκπομπών στα σενάρια K και L, όπου υπάρχει κυκλοφορία 100% αυτόνομων οχημάτων.



Διάγραμμα 4.5: Εκπομπές CO2 ανά σενάριο

Οι ποσοστιαίες μεταβολές, σε σχέση με το σενάριο βάσης αναφοράς, των προαναφερθέντων δεικτών απόδοσης ποσοτικοποιούνται στον Πίνακα 4.14 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.14: Ποσοστιαίες Μεταβολές Βασικών Δεικτών Απόδοσης σε σχέση με το Σενάριο Α1

Σενάριο	Μεταβολή Καθυστερήσεων (σε σχέση με το Σενάριο Α1)	Μεταβολή Πλήθους Αλλαγής Λωρίδας (σε σχέση με το Σενάριο Α1)	Μεταβολή Εκπομπών CO2 (σε σχέση με το Σενάριο Α1)
A2	2,7%	-0,7%	-0,9%
A3	28,7%	-21,9%	-3,5%
B	25,3%	-20,6%	-8,4%
C	1,7%	-18,2%	-13,4%
D	4,1%	-23,1%	-17,4%
E	0,2%	-27,2%	-20,9%
F	-12,5%	-22,1%	-26,5%
G	-39,0%	-16,8%	-33,1%
H	-44,8%	-17,1%	-38,2%
I	-56,7%	-15,7%	-44,1%
J	-54,0%	-22,9%	-46,8%
K	-60,9%	-26,6%	-51,4%
L	-70,5%	-24,2%	-50,2%

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1. Σύνοψη Μεθοδολογίας και Αποτελεσμάτων

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η συμπεριφορά των αυτόνομων οχημάτων. Στόχος, λοιπόν, ήταν **η εκτίμηση του συντελεστή μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων και η επιρροή τους στην κυκλοφορία, στην οδική ασφάλεια και στο περιβάλλον**.

Μέσω της **εκτέλεσης προσομοιώσεων** στο λογισμικό Aimsun.Next, αρχικά επιλέχθηκε η κατανομή ζήτησης της κυκλοφορίας για ένα οδικό δίκτυο της Αθήνας και στη συνέχεια εκτελέστηκαν 14 σενάρια προσομοίωσης επιδιώκοντας τη μελέτη των οδικών τμημάτων ενός δικτύου της Αθήνας με διαδοχική αύξηση του ποσοστού των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία του δικτύου και την ταυτόχρονη κυκλοφορία αυτόνομου λεωφορείου ή όχι. Αναλυτικότερα, υλοποιήθηκαν τρία σενάρια βάσης αναφοράς . Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο περιγράφεται το δίκτυο με τις υπάρχουσες συνθήκες (A1), δηλαδή με συμβατικά οχήματα, στο δεύτερο σενάριο (A2) έχει προστεθεί ένα συμβατικό λεωφορείο που πραγματοποιεί μία διαδρομή σε μία περιοχή μεγάλης σημασίας, ενώ στο τρίτο σενάριο (A3) το λεωφορείο του δεύτερου σεναρίου είναι αυτόνομο. Επίσης, υλοποιούνται δέκα σενάρια (B-K), τα οποία έχουν αυξανόμενο ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας και συμπεριλαμβάνουν την κυκλοφορία του αυτόνομου λεωφορείου. Τέλος, υλοποιήθηκε και ένα σενάριο (L) με 100% αυτόνομα οχήματα, χωρίς όμως την κυκλοφορία του αυτόνομου λεωφορείου.

Στη συνέχεια και μετά από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, δημιουργήθηκε μία **βάση δεδομένων**, η οποία περιλάμβανε τις μεταβλητές τύπος οδού, τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας, ποσοστό κυκλοφορίας, ποσοστό αυτόνομων οχημάτων και ροή. Με αυτή τη βάση δεδομένων εκτελέστηκε μία **μη-γραμμική παλινδρόμηση με δένδρα αποφάσεων** με εξαρτημένη μεταβλητή το λογάριθμο του λόγου του φόρτου του κάθε τμήματος της βάσης αναφοράς προς το φόρτο του κάθε τμήματος του κάθε σεναρίου και ανεξάρτητες τις προαναφερθείσες.

Το **δένδρο παλινδρόμησης** που προέκυψε έχει 172 φύλλα, δηλαδή δύναται να αναδείξει την εξίσωση μέσω της οποίας θα υπολογιστεί ο συντελεστής Μ.Ε.Α. των αυτόνομων οχημάτων για οποιουσδήποτε συνδυασμούς των τιμών του τύπου οδού, του τύπου ελέγχου της κυκλοφορίας, του ποσοστού κυκλοφορίας, του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων και της ροής.

5.2.Βασικά Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το προηγούμενο κεφάλαιο είναι εφικτή η **διατύπωση των συμπερασμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας**.

- Ο αυτοματισμός **βελτιώνει τις κυκλοφοριακές συνθήκες** του δικτύου αφού δύναται να **μειώσει έως και 70% τον μέσο χρόνο καθυστερήσεων** όταν η κυκλοφορία αποτελείται πλήρως από αυτόνομα οχήματα.

- Το **πλήθος αλλαγών λωρίδας** υπολογίζεται περίπου κατά **25% μειωμένο** όταν η κυκλοφορία αποτελείται από αυτόνομα οχήματα σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, προσφέροντας **ασφαλέστερες συνθήκες οδήγησης**.
- Με την αύξηση των αυτόνομων οχημάτων παρατηρείται **μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα** (CO_2), η οποία αγγίζει το **50%** όταν όλα τα οχήματα του δικτύου είναι αυτόνομα, **περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την επιβάρυνση του περιβάλλοντος**.
- Με την **αύξηση της τιμής του κωδικού του τύπου οδού, αυξάνεται ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α.** Δηλαδή, ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. είναι μεγαλύτερος για σηματοδοτούμενες οδούς από ότι για αυτοκινητόδρομους.
- Με την **αύξηση της τιμής του κωδικού του τύπου ελέγχου της κυκλοφορίας, αυξάνεται ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α.** Δηλαδή, ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. είναι μεγαλύτερος για τις περιπτώσεις που υπάρχει φωτεινός σηματοδότης, από αυτές που δεν υπάρχει καθόλου σηματοδότηση.
- Ο **συντελεστής μετατροπής σε Μ.Ε.Α. παρουσιάζει μικρότερες τιμές με την αύξηση των αυτόνομων οχημάτων** στο δίκτυο, στο οποίο παρατηρείται βελτίωση της εξυπηρέτηση, αλλά και της διαδρομής του λεωφορείου.
- **Όσο μεγαλύτερη είναι η ροή στο δίκτυο**, παρατηρούνται **μικρότερες τιμές του συντελεστή μετατροπής των αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α**.
- Με την **αύξηση του ποσοστού της κυκλοφορίας, μειώνεται ο συντελεστής μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α.**
- Το **ποσοστό της κυκλοφορίας δεν συμμετέχει σημαντικά στην εξίσωση υπολογισμού των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α.**, αλλά την επηρεάζει έμμεσα, επειδή **είναι το βασικότερο κριτήριο διαχωρισμού στο δένδρο παλινδρόμησης**. Αυτό σημαίνει ότι η εκτίμηση των συντελεστών μετατροπής αυτόνομων οχημάτων σε Μ.Ε.Α. διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το ποσοστό της κυκλοφορίας. Αναλυτικότερα, ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου, τα αυτόνομα οχήματα συνεισφέρουν διαφορετικά στο δίκτυο. Δεύτερο σε σειρά κριτήριο διαχωρισμού είναι η ροή και στη συνέχεια το ποσοστό αυτόνομων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας. Τέλος, ο τύπος της οδού και ο τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας φαίνεται να μην είναι καθοριστικοί παράγοντες για τον υπολογισμό του συντελεστή Μ.Ε.Α. των αυτόνομων οχημάτων.
- Η **μορφή των διαγραμμάτων M.F.D.** σε επίπεδο δικτύου αλλά και σε επίπεδο διαδρομής λεωφορείου είναι **κοντά στην πρότυπη μορφή** που προτείνεται και έτσι καθίσταται εφικτή η εκτενέστερη μελέτη του δικτύου.

5.3.Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε κατανοητό ότι υπάρχουν περιθώρια εκτενέστερης διερεύνησης της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων στην κοινωνία και το περιβάλλον. Για τη διερεύνηση αυτή, είναι

χρήσιμο να παρουσιαστούν συγκεκριμένες **προτάσεις για την πραγματοποίηση συναφών ερευνών**, οι οποίες θα ολοκληρώσουν την μελέτη αυτού του αντικειμένου.

Θα ήταν σκόπιμο να διεξαχθεί **μελέτη μεγαλύτερου οδικού δικτύου** από εκείνο της παρούσας εργασίας, διότι πιθανόν να καθιστούσαν ισχυρότερη την επιρροή των μεταβλητών στα μοντέλα παλινδρόμησης.

Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η μελέτη ενός οδικού δικτύου σε **περισσότερες ώρες εντός και εκτός αιχμής**. Σε αυτά τα σενάρια θα δημιουργούνταν μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το δίκτυο. Είναι γεγονός ότι μελετώντας ένα δίκτυο σε ώρες αιχμής τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι από τη μία πλευρά υπέρ της ασφαλείας, καθώς λαμβάνεται υπόψη η δυσμενέστερη συνθήκη του δικτύου αλλά από την άλλη πλευρά οδηγούν σε λιγότερο ευέλικτα αποτελέσματα.

Τέλος, θα ήταν σκόπιμη η εκτέλεση π**αλινδρόμησης με πολλαπλές εξαρτημένες μεταβλητές**, στις οποίες μπορούν να ενταχθούν ορισμένοι δείκτες απόδοσης που αφορούν την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Σε αυτό το μοντέλο κρίνεται ότι δύναται να προκύψουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, αφού λαμβάνουν περισσότερες μεταβλητές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Adnan, M, “Passenger car equivalent factors in heterogeneous traffic environment—Are we using the right numbers?”, 2014

Aerde, V. M., and S. Yagar, “Capacity, speed, and platooning vehicle equivalents for two-lane rural highways.”, 1984

Ahmad, A., and R. Rastogi, “Regression model for entry capacity of a roundabout under mixed traffic condition-an Indian case study.”, 2017

Ahmed, U, “Passenger car equivalent factors for level freeway segments operating under moderate and congested conditions.”, 2010

Althoff M., Stursberg O, Buss M., “Model-Based Probabilistic Collision Detection in Autonomous Driving”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009

Al-Zerjawi, A. K, “Estimation of free flow speeds and passenger car equivalent factors for multilane highways.”, 2016

Casas J., A. Lenorzer and J. Perarnau, “AV behavioral parameters in AIMSUN Next”, 2020, working document developed within the framework of LEVITATE project.

Chandra, S., V. Kumar, and P. K. Sikdar, “Dynamic PCU and estimation of capacity of urban roads.”, 1995

Chandra, S., and U. Kumar, “Effect of lane width on capacity under mixed traffic condition in India.”, 2003

Chen, P., and H.S. Mahmassani, “A dynamic interactive simulator for the study of commuter behavior under real time traffic information supply strategies”, Transportation Research Record, 1993

CoEXist Project, Deliverable 2.8, 2020

Craus, J., A. Polus, and I. Grinberg, “A revised method for the determination of passenger car equivalencies.”, 1980

Cunagin, W. D., and C. J. Messer, “Passenger-car equivalents for rural highways.”, 1983

Daganzo C. F., “Improving city mobility through gridlock control: An approach and some ideas”, California, USA, 2005

Daganzo C. F. and Geroliminis, N. Macroscopic modeling of traffic in Proceedings of 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board (CD-ROM), Washington, D.C., 2007

Daganzo C. F. and Geroliminis N., “An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic, 2008

Elefteriadou, L., D. Torbic, and N. Webster, “Development of passenger car equivalents for freeways, two-lane highways, and arterials.”, 1997

Forrest A., Konca M., “AUTONOMOUS CARS & SOCIETY”, 2007

Frost J., “The Difference between Linear and Nonlinear Regression Models”, 2020

Greenshields, B. D., D. Schapiro, and E. L. Ericksen, Traffic performance at urban intersections, 1947

Huber, M. J, “Estimation of passenger-car equivalents of trucks in traffic stream.”, 1982

IEE, “Connected Vehicles”, 2020

International company TomTom, 2020, https://www.tomtom.com/

Liu, R., and D. van Vliet, “DRACULA - a dynamic microscopic model of road traffic”, Proceedings of the International Transport Symposium, pp.160- 170, Beijing, 1996

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

Keller, E. L., and J. G. Saklas, “Passenger car equivalents from network simulation.”, 1984

Mahidadiya, A. N., and J. Juremalani, “Estimation of passenger car unit value at signalized intersection.”, 2016

Metkari, M., A. K. Budhkar, and A. K. Maurya, “Review of passenger car equivalence studies in Indian context.”, 2012

Milakis D., Bart van Arem & Bert van Wee “Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research”, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017

Minh, C. C., and K. Sano, “Analysis of motorcycle effects to saturation flow rate at signalized intersection in developing countries.”, 2003

Minh C.C., Binh T.H., Mai T.T., Sano K., “The Delay Estimation under Heterogeneous Traffic Conditions”, 2010

Mohan, M., and S. Chandra, “Three methods of PCU estimation at un-signalized intersections.”, 2018

Nathan Wade, “What Is Connected Vehicles Technology and What Are the Use Cases”, 2020

National Highway Traffic Safety Administration, “Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey”, 2015

Patel, B. N., J. B. Mayursinh, and V. Monicaba, “Determination of dynamic PCUs of different types of passenger vehicles on urban road: A case study of Rajkot City.”, 2016

Patil, S. V., and P. R. Adavi, “Development of passenger car units: Case study-NAL stop, Pune.”, 2015

Paul, P. K., and P. K. Sarkar, “Determination of dynamic PCUs of different types of passenger vehicles on urban roads: A case study, Delhi urban area.”, 2013

Pipe L. “An Operational Analysis of Traffic Dynamics”, Journal of Applied Physics 24, 1953

Pooja Raj, Gowri Asaithambi, A. U. Ravi Shankar, Kalaanidhi Sivagnanasundaram, “Review of Methods for Estimation of Passenger Car Unit Values of Vehicles”, 2019

Rahman, M., and F. Nakamura, “Measuring passenger car equivalents for non-motorized vehicle (rickshaws) at mid-block sections.” J. Eastern Asia Soc. Transp. Stud. 6: 119–126. https://doi.org/10 .11175/easts.6.119., 2005

Rakha, H.,and M.W.Van Aerde, “Comparison of simulation modules of TRANSYT and INTEGRATION models”, Transportation Research Record, 1566, 1997

Ryan Block “A step-closer to automated-cars, a step further from traffic”, 2004

SAE International “Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems”, 2014

Saha, P., Q. S. Hossain, H. M. I. Mahmud, and M. Z. Islam, “Passenger car equivalent (PCE) of through vehicles at signalized intersections in Dhaka Metropolitan City, Bangladesh.”, 2009

Sarraj, Y., and I. Jadili, “Estimating passenger car unit factors for buses and animal driven carts in Gaza City, Palestine.”, 2012

Sonu, M., A. Dhamaniya, S. Arkatkar, and G. Joshi, “Time occupancy as measure of PCU at four legged roundabouts.”, 2016

Swamy, C. A. R., C. R. Munigety, and M. V. L. R. Anjaneyulu, “Passenger car unit based on influence area.”, 2016

Taori, S., and A.K. Rathi, “Comparison of NETSIM, NETFLO I, and NETFLO II traffic simulation models for fixed-time signal control”, Transportation Research Record, 1997

Taplin J., “SIMULATION MODELS OF TRAFFIC FLOW”, 2008

Tiwari, G., J. Fazio, and S. Pavitravas, “Passenger car units for heterogeneous traffic using a modified density method.”, 2000

Feifei XU , Zhaocheng HE, Zhiren SHA , Wenbo SUN ,Lijian ZHUANG, “Traffic State Evaluation Based on Macroscopic Fundamental Diagram of Urban Road Network”, 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013), Elsevier Ltd., 2013

Zhao, W., “Delay-based passenger car equivalents for heavy vehicles at signalized intersections.”, 1998

Αντωνίου και Σπυροπούλου, «Αρχές Κυκλοφοριακής Τεχνικής και Προσομοίωσης», 2016

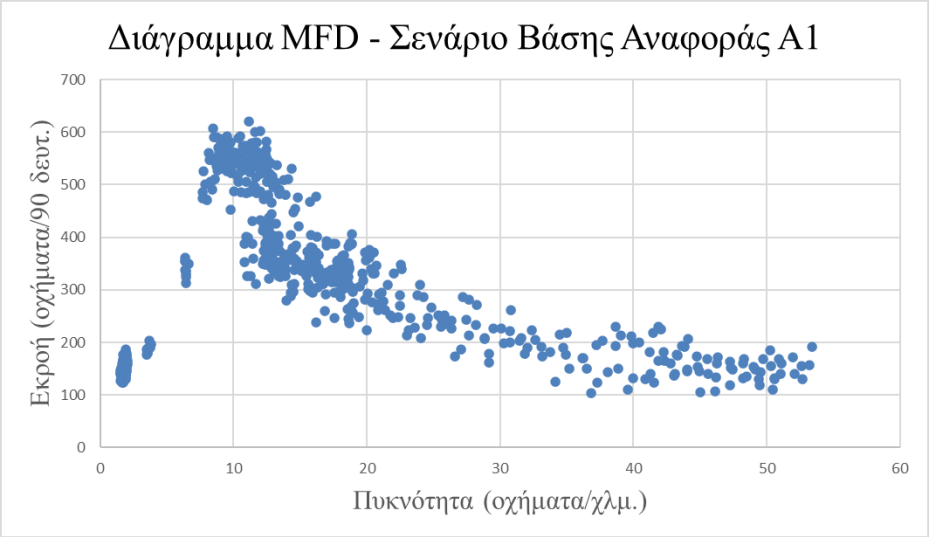
Ελληνική Στατιστική Αρχή, ΕΛΣΤΑΤ, 2018, http://www.statistics.gr/

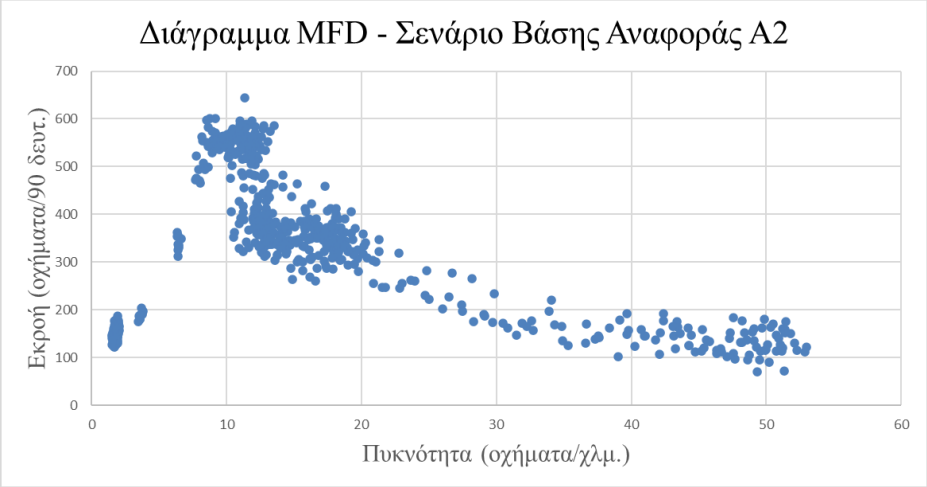
Φρατζεσκάκης Ι., Γκόλιας Ι., Πιτσάβα-Λατινοπούλου Μ., «Κυκλοφοριακή Τεχνική», Παπασωτηρίου.

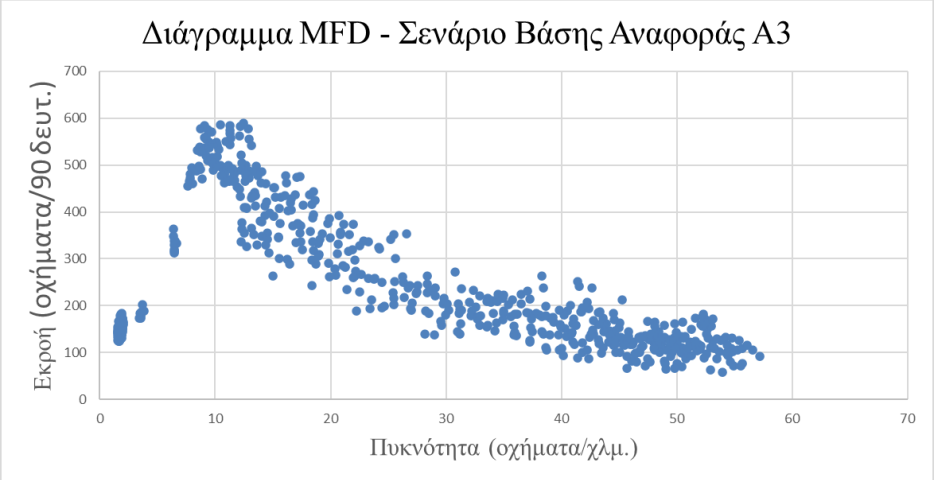
Φραντζεσκάκης, Ι., Γκόλιας Ι., “Οδική Ασφάλεια” Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1994

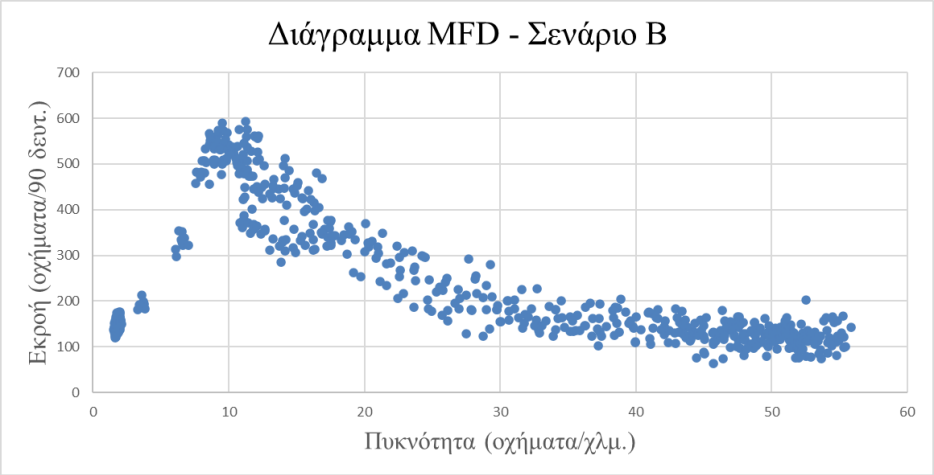
Φραντζεσκάκης, Ι., Πιτσιάβα-Λατινοπούλου Μ., Τσαμπούλας Δ., “Διαχείριση Κυκλοφορίας” Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1997

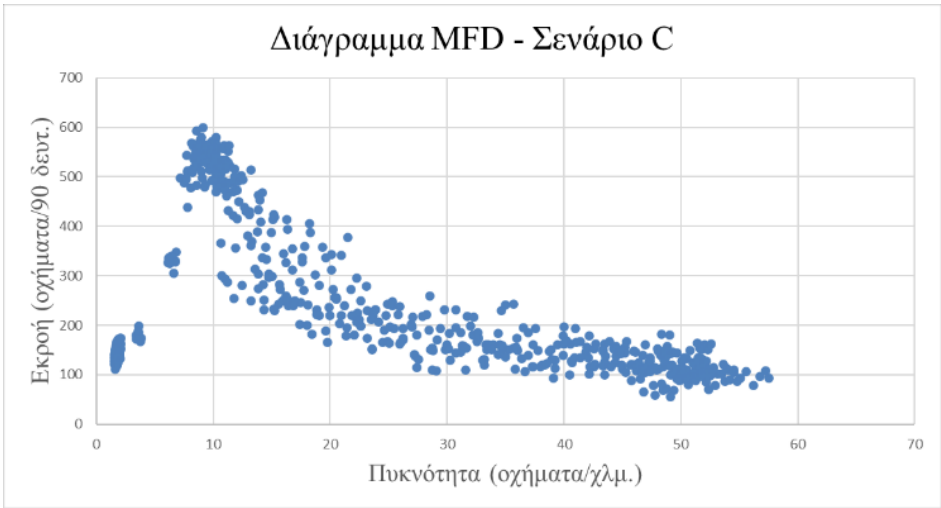
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

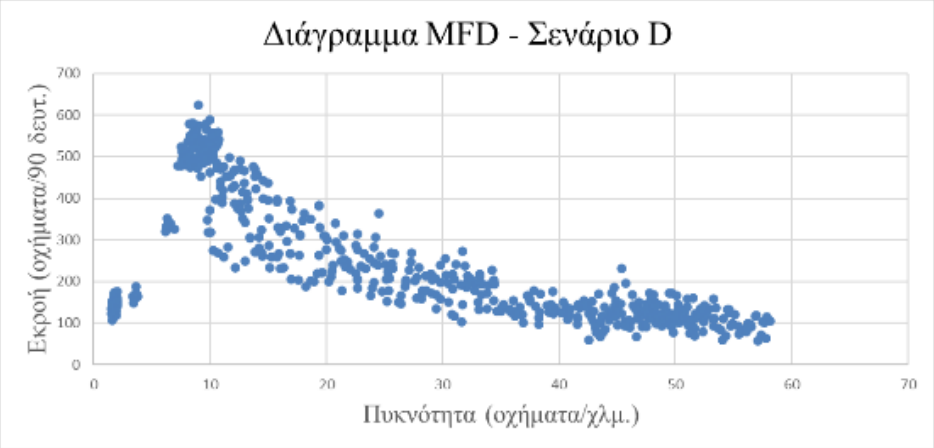

Διάγραμμα MFD - Σενάριο Βάσης Αναφοράς Α1
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60

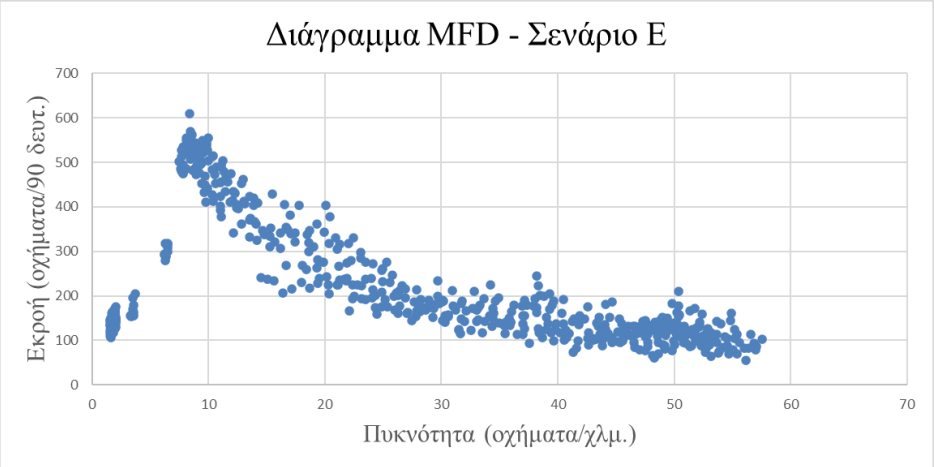

Διάγραμμα MFD - Σενάριο Βάσης Αναφοράς Α2
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60

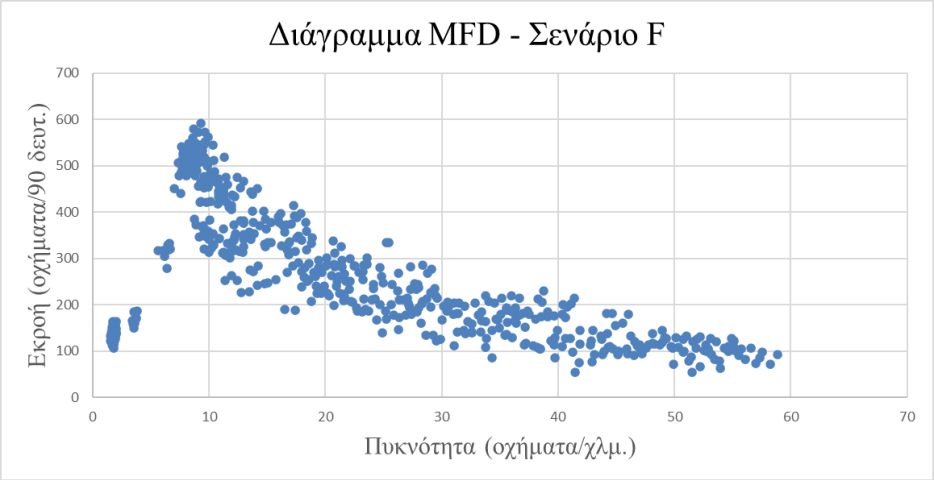

Διάγραμμα MFD - Σενάριο Βάσης Αναφοράς Α3
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70

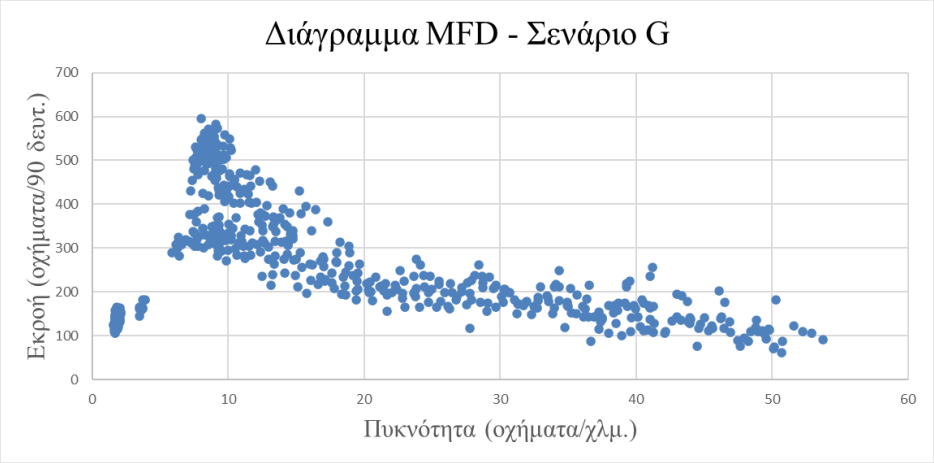

Διάγραμμα MFD - Σενάριο B
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60

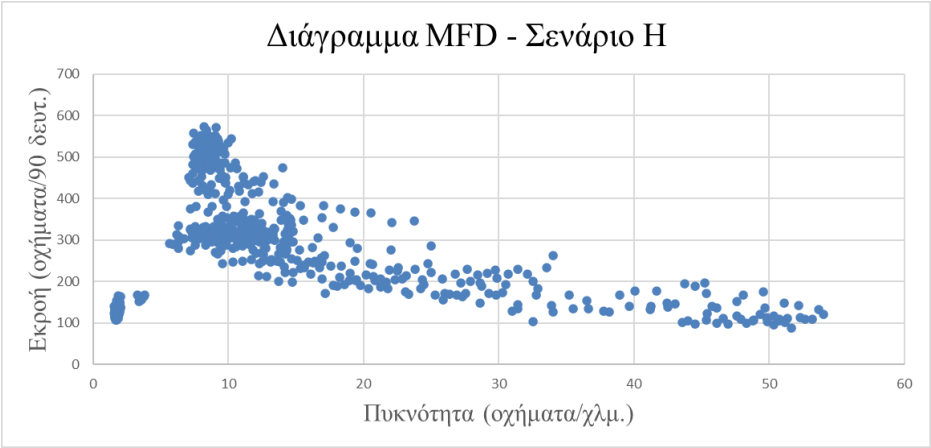

Διάγραμμα MFD - Σενάριο C
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70

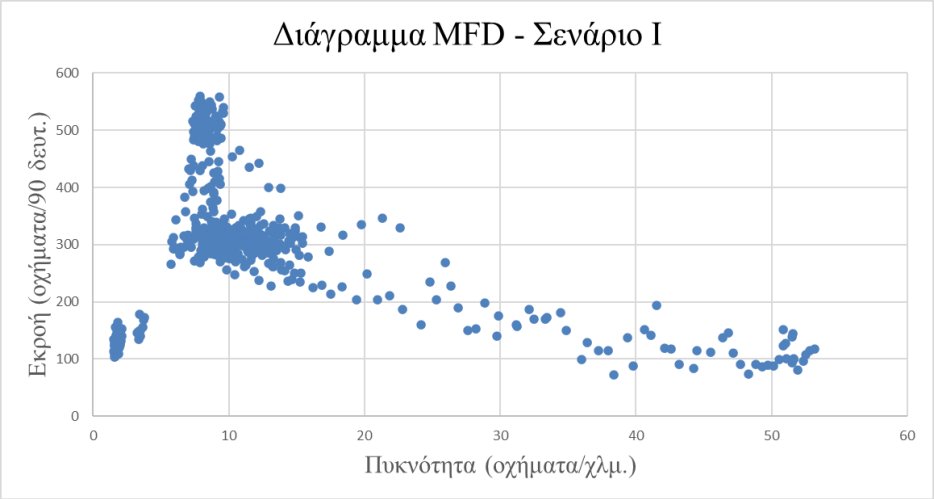

Διάγραμμα MFD - Σενάριο D
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70

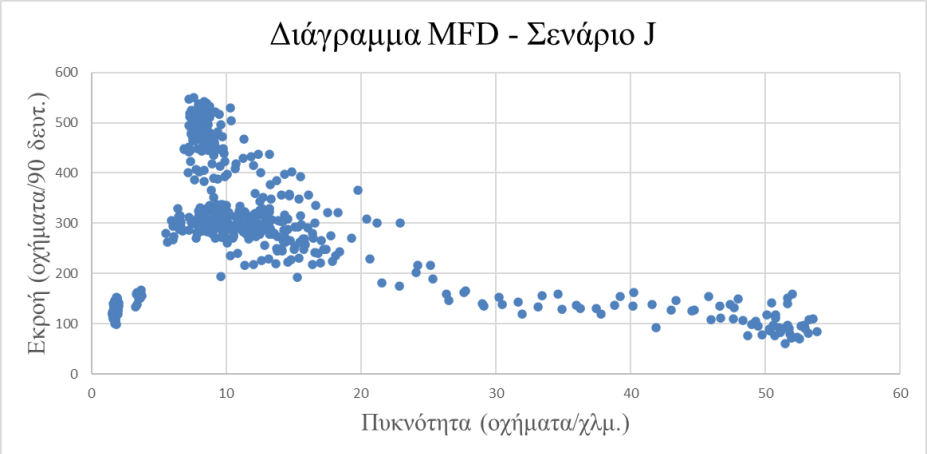

Διάγραμμα MFD - Σενάριο E
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70

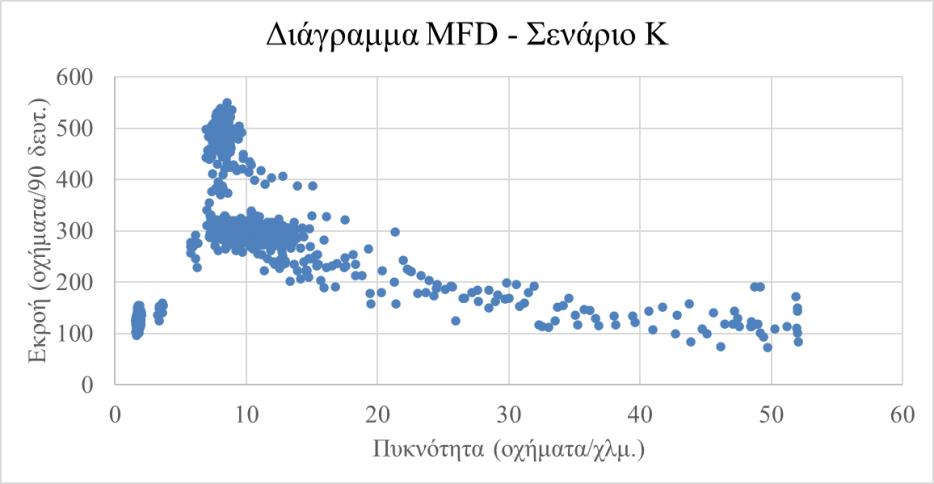

Διάγραμμα MFD - Σενάριο F
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70

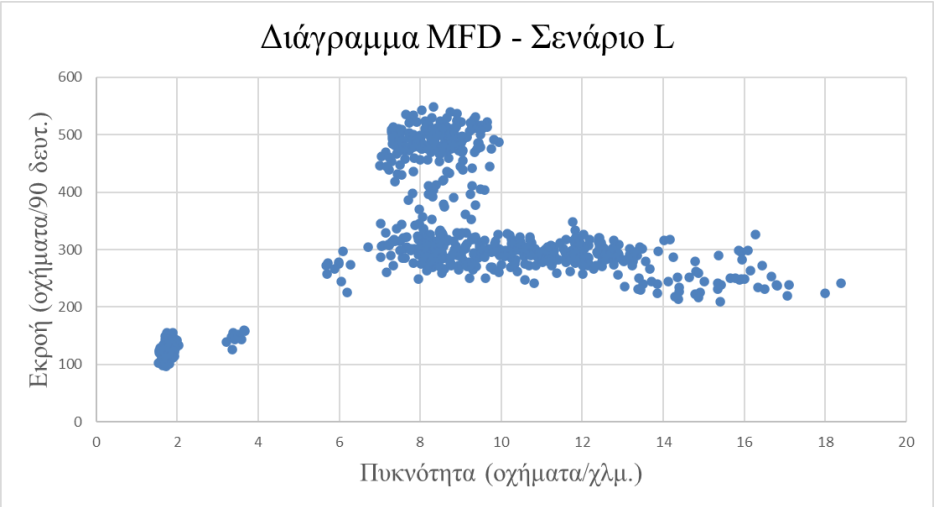

Διάγραμμα MFD - Σενάριο G
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60


Διάγραμμα MFD - Σενάριο Η
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
700
600
500
400
300
200
100
0
0
10
20
30
40
50
60
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

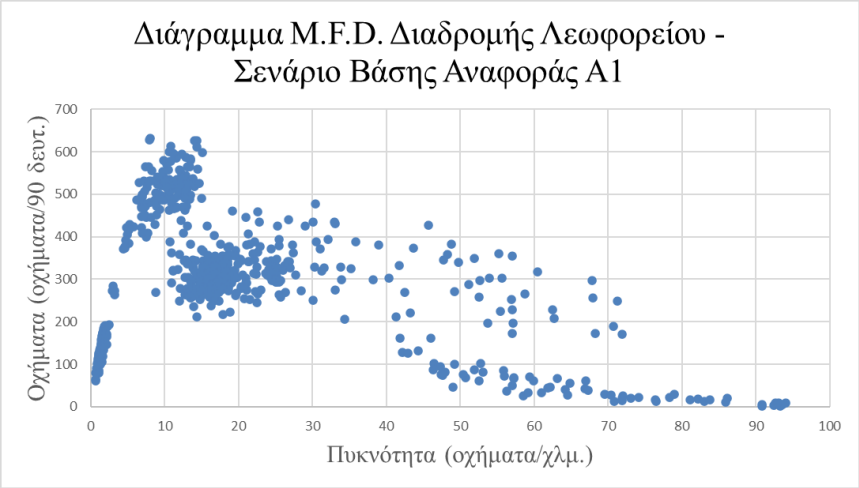

Διάγραμμα MFD - Σενάριο Ι
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
600
500
400
300
200
100
0
0
10
20
30
40
50
60
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

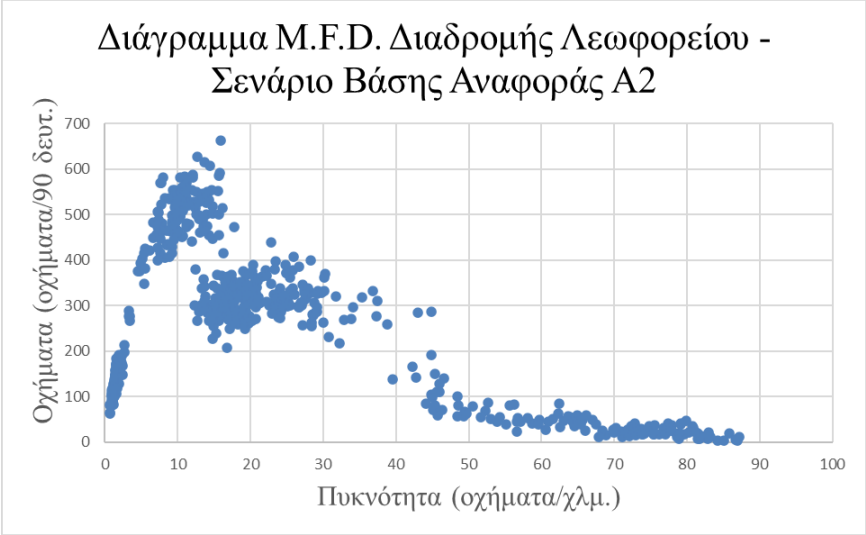

Διάγραμμα MFD - Σενάριο J
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
600
500
400
300
200
100
0
0
10
20
30
40
50
60
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

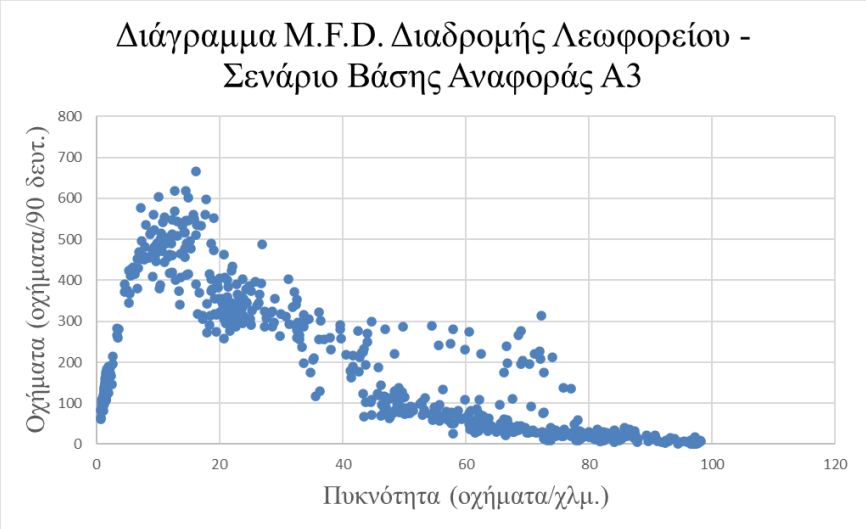

Διάγραμμα MFD - Σενάριο K
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
600
500
400
300
200
100
0
0
10
20
30
40
50
60
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

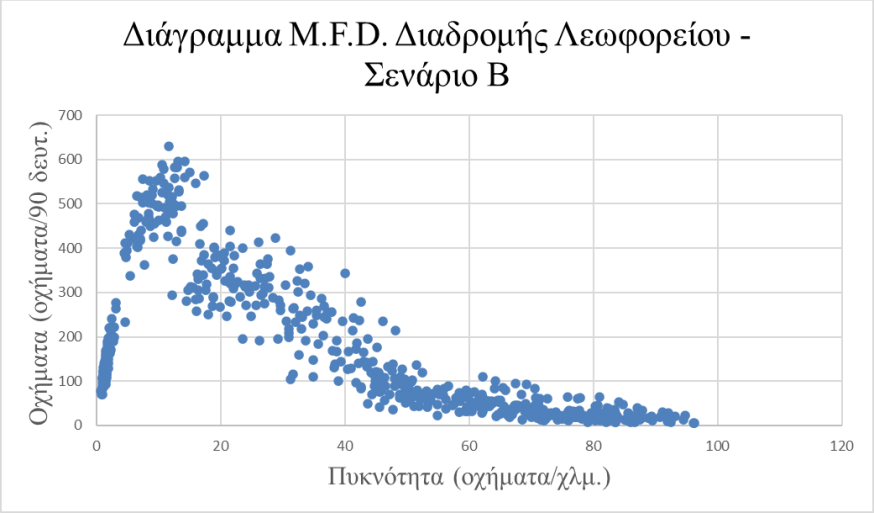

Διάγραμμα MFD - Σενάριο L
Εκροή (οχήματα/90 δευτ.)
600
500
400
300
200
100
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

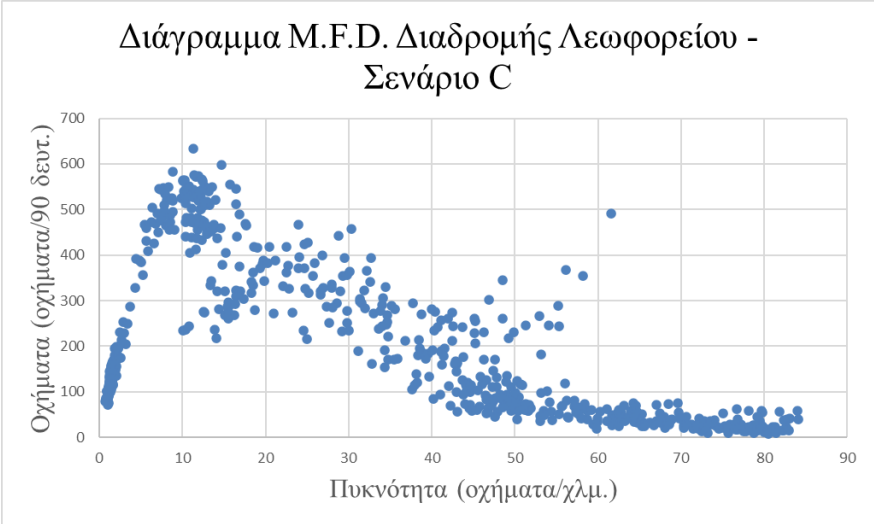
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

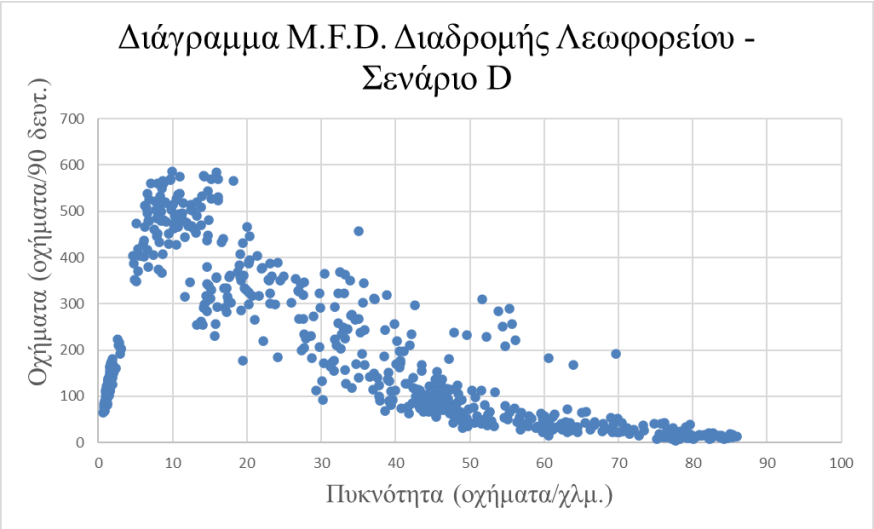

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο Βάσης Αναφοράς Α1
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

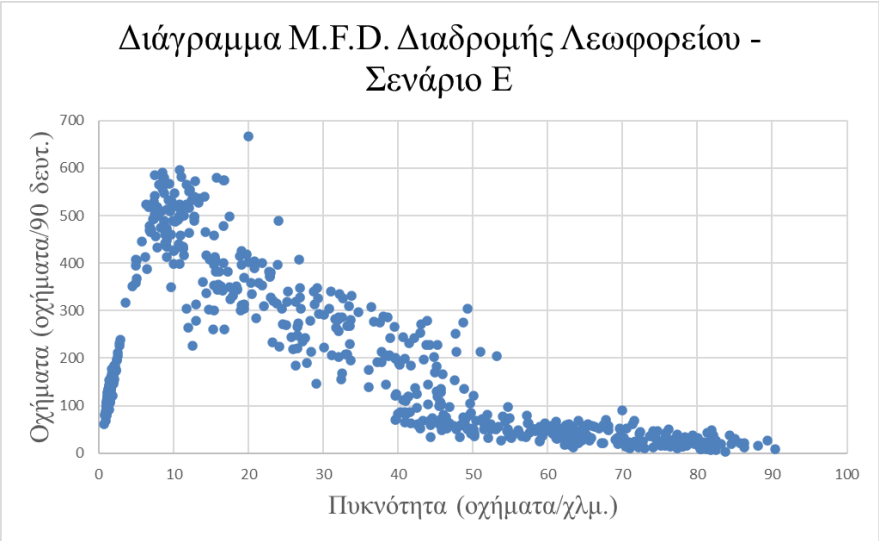

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο Βάσης Αναφοράς Α2
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

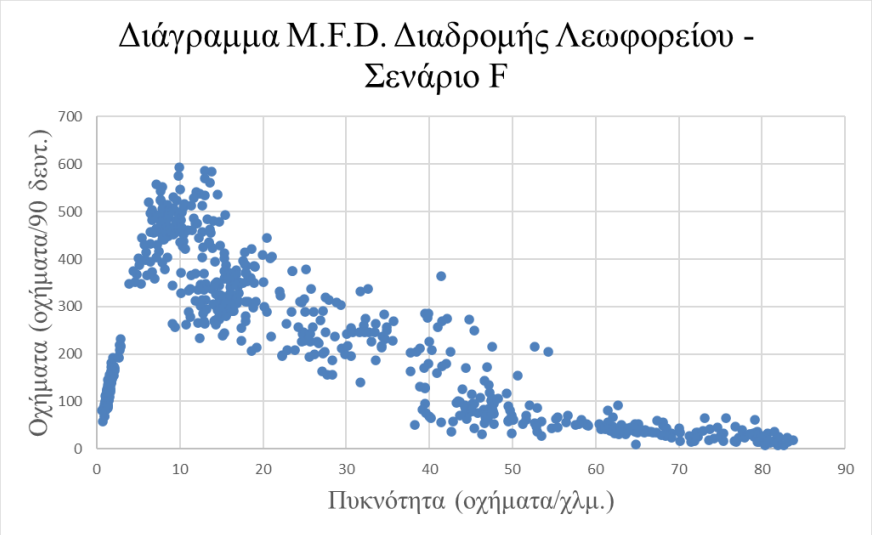

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο Βάσης Αναφοράς Α3
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

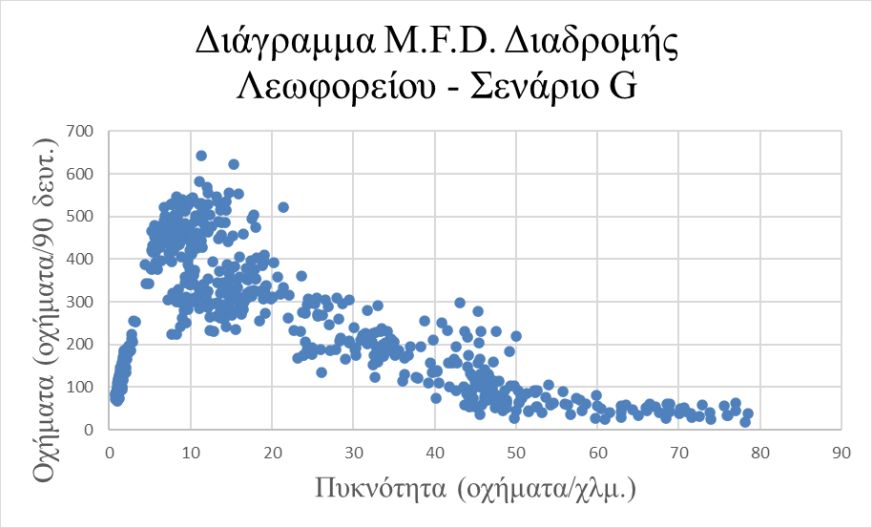

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο B
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
20
40
60
80
100
120

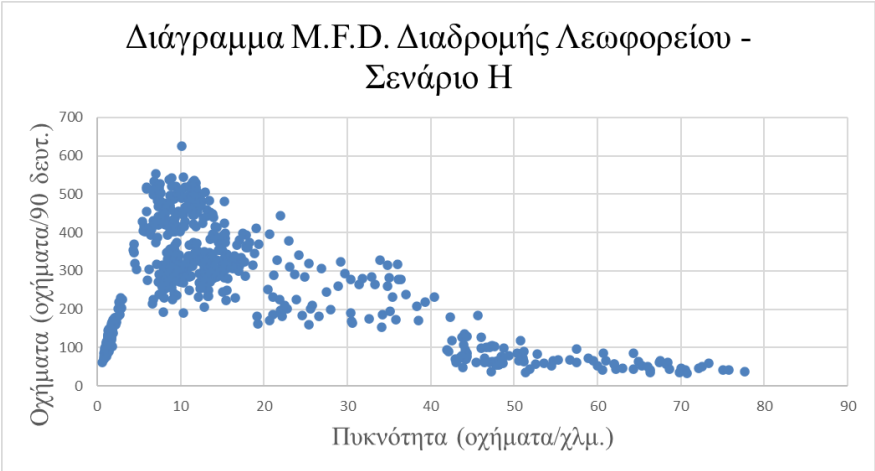

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο C
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

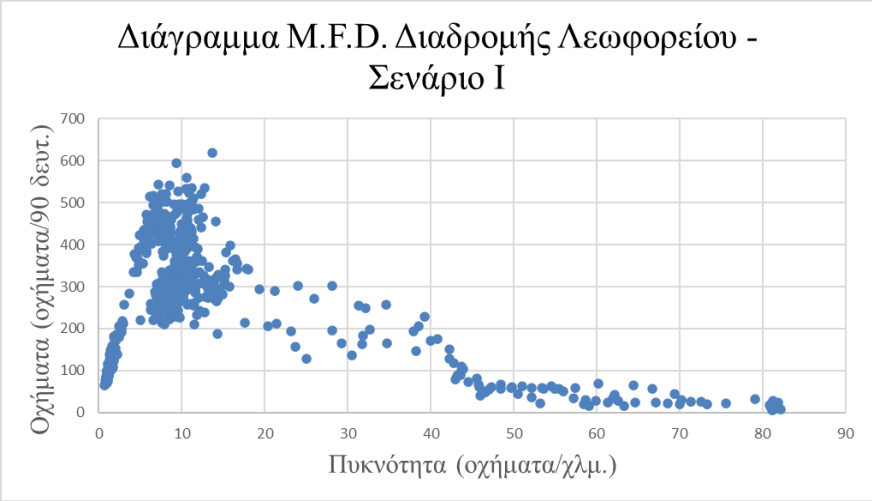

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο D
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

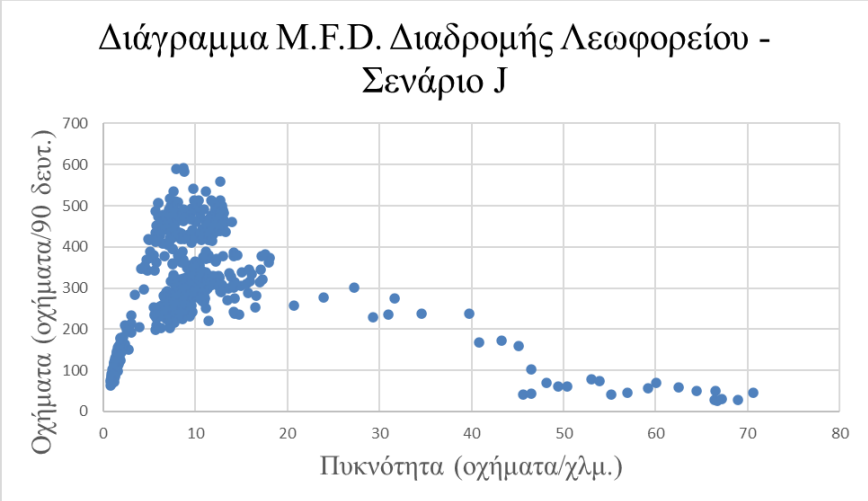

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο E
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

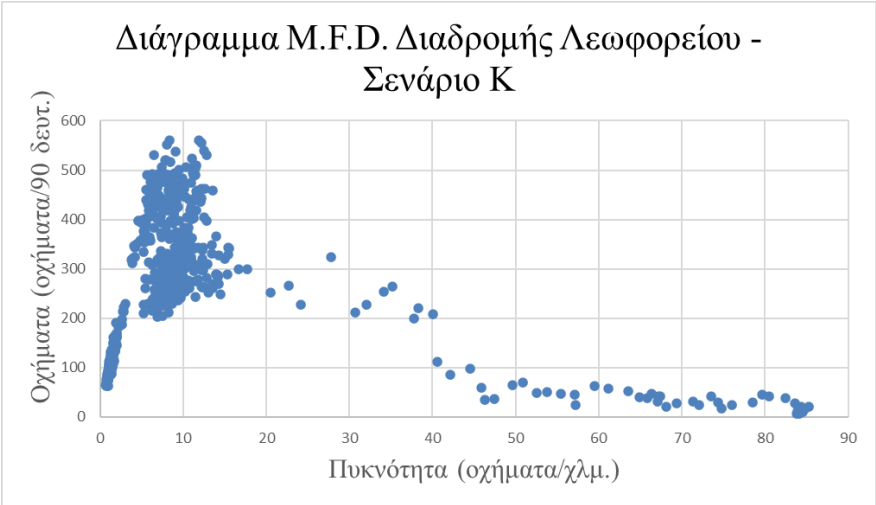

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο F
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

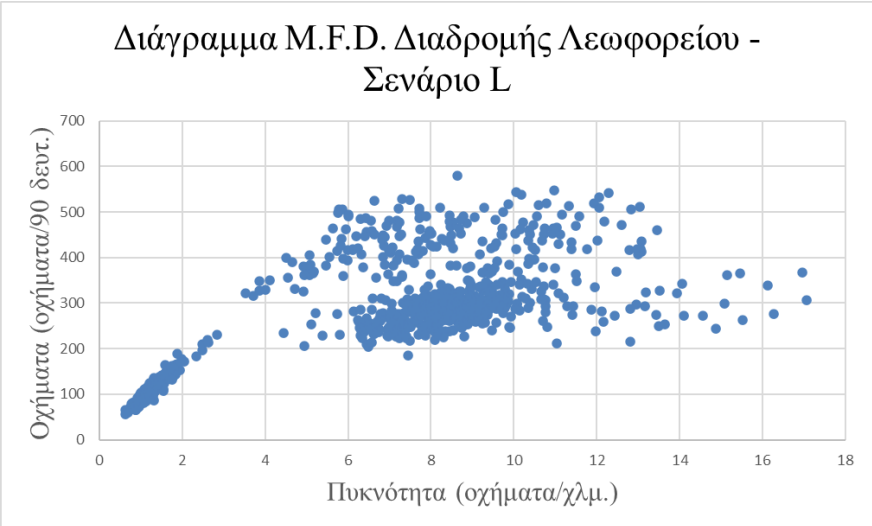

Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο G
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90


Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο Η
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90


Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο Ι
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90


Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο J
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
10
20
30
40
50
60
70
80


Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο K
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
600
500
400
300
200
100
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)


Διάγραμμα M.F.D. Διαδρομής Λεωφορείου - Σενάριο L
Οχήματα (οχήματα/90 δευτ.)
700
600
500
400
300
200
100
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
Πυκνότητα (οχήματα/χλμ.)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

LM num: 1

log(PCU) = 0.0095 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.1662 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0525 * CT=0,2 + 0.0433 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0106 * PR - 0.5023

LM num: 2

log(PCU) = 0.0042 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0588 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0857 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0058 * PR - 0.1506

LM num: 3

log(PCU) = -0.0005 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0381 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0533 * CT=0,2 - 0.0221 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0092 * PR + 0.0877

LM num: 4

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.036 * RT=2,0 - 0.0005 * RT=0 + 0.0546 * CT=0,2 + 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0152 * PR - 0.0704

LM num: 5

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0003 * RT=2,0 - 0.0005 * RT=0 + 0.0005 * CT=0,2 + 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0127 * PR - 0.0261

LM num: 6

log(PCU) = 0.0017 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0 * RT=2,0 - 0.0006 * RT=0 + 0.0398 * CT=0,2 - 0.0221 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0001 * PR - 0.2864

LM num: 7

log(PCU) = -0.0008 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0 * RT=2,0 - 0.0006 * RT=0 + 0.051 * CT=0,2 + 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0055 * PR + 0.0402

LM num: 8

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 0 * RT=2,0 - 0.0513 * RT=0 - 0.0465 * CT=0,2 + 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0054 * PR + 0.0428

LM num: 9

log(PCU) = 0.0001 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0 * RT=2,0 + 0.0367 * RT=0 0.0484 * CT=0,2 + 0.0128 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0146 * PR + 0.0493

LM num: 10

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 + 0.0404 * RT=0 - 0.0909 * CT=0,2 + 0.0002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0001 * PR + 0.0561

LM num: 11

log(PCU) = 0.0004 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 0.0027 * RT=0 - 0.002 * CT=0,2 + 0.0002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0001 * PR - 0.1218

LM num: 12

log(PCU) = -0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0639 * RT=0 - 0.002 * CT=0,2 + 0.0002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0002 * PR - 0.0206

LM num: 13

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0043 * RT=0 - 0.002 * CT=0,2 + 0.0002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0002 * PR - 0.0329

LM num: 14

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0129 * RT=2,0 + 0.0016 * RT=0 - 0.0026 * CT=0,2 + 0.0002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0074 * PR - 0.0088

LM num: 15

log(PCU) = -0.0002 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0192 * RT=2,0 0.0009 * RT=0 - 0.0014 * CT=0,2 + 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0046 * PR + 0.0466

LM num: 16

log(PCU) = 0.0004 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0238 * RT=2,0 + 0.0009 * RT=0 - 0.0014 * CT=0,2 + 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0003 * PR - 0.1507

LM num: 17

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 - 0.0996 * RT=0 + 0.0282 * CT=0,2 - 0.0097 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0072 * PR - 0.0289

LM num: 18

log(PCU) = 0.0003 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0144 * RT=2,0 + 0.0548 * RT=0 - 0.0975 * CT=0,2 + 0.0227 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0077 * PR + 0.0569

LM num: 19

log(PCU) = -0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0002 * RT=2,0 + 0.0008 * RT=0 - 0.001 * CT=0,2 + 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0064 * PR - 0.0039

LM num: 20

log(PCU) = -0.0005 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0002 * RT=2,0 + 0.0008 * RT=0 - 0.001 * CT=0,2 + 0.001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0108 * PR + 0.21

LM num: 21

log(PCU) = 0.0001 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0127 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0074 * PR - 0.0432

LM num: 22

log(PCU) = 0.0002 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0211 * CT=2 + 0 * TV=1- 0.0003 * PR - 0.1066

LM num: 23

log(PCU) = 0.0004 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0023 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0012 * PR - 0.1582

LM num: 24

log(PCU) = 0.0004 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0023 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0019 * PR - 0.1826

LM num: 25

log(PCU) = -0.0003 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0023 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0019 * PR + 0.1698

LM num: 26

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0013 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0148 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0065 * PR + 0.0115

LM num: 27

log(PCU) = 0.0003 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0013 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0034 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0014 * PR - 0.1913

LM num: 28

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0066 * PR - 0.0043

LM num: 29

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0014 * PR - 0.0096

LM num: 30

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0107 * PR + 0.0115

LM num: 31

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0053 * PR - 0.0326

LM num: 32

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0057 * PR - 0.0506

LM num: 33

log(PCU) = -0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0013 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0017 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0052 * PR + 0.0089

LM num: 34

log(PCU) = -0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0032 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0017 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0028 * PR + 0.0199

LM num: 35

log(PCU) = 0.0001 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0032 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0017 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0037 * PR + 0.0062

LM num: 36

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0032 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0017 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0038 * PR + 0.0482

LM num: 37

log(PCU) = -0.0005 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0032 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0017 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0038 * PR + 0.274

LM num: 38

log(PCU) = 0.0002 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0032 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0017 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0078 * PR - 0.0928

LM num: 39

log(PCU) = 0.0001 * F + 0 * RT=3,2,0 - 0.0014 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.004 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0151 * PR - 0.0039

LM num: 40

log(PCU) = 0 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0088 * PR - 0.0099

LM num: 41

log(PCU) = 0.0001 * F + 0 * RT=3,2,0 + 0 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0001 * CT=0,2 - 0.0005 * CT=2+0* TV=1 - 0.0057 * PR - 0.0862

LM num: 42

log(PCU) = 0.0195 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 - 0.0055 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 + 0.2601 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0008 * PR - 0.3873

LM num: 43

log(PCU) = 0.0414 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 - 0.0027 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0391 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0229 * PR - 0.6089

LM num: 44

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0028 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0044 * CT=0,2 + 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0006 * PR - 0.2214

LM num: 45

log(PCU) = 0.0002 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0014 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.006 * CT=0,2 + 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0008 * PR - 0.1973

LM num: 46

log(PCU) = 0.0043 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0014 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.1134 * CT=0,2 + 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.001 * PR - 0.313

LM num: 47

log(PCU) = 0.0002 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0014 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0072 * CT=0,2 + 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.2921 * PR - 1.3812

LM num: 48

log(PCU) = -0.0054 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 - 0.212 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0016 * CT=0,2 + 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.002 * PR + 0.1247

LM num: 49

log(PCU) = 0 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 - 0.0737 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0016 * CT=0,2 + 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0184 * PR + 0.0341

LM num: 50

log(PCU) = 0.0045 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 - 0.0032 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0016 * CT=0,2 + 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0029 * PR - 0.0301

LM num: 51

log(PCU) = 0.0004 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0044 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0031 * CT=0,2 - 0.0046 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0025 * PR - 0.2646

LM num: 52

log(PCU) = 0.0144 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0044 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0031 * CT=0,2 - 0.0194 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0024 * PR - 0.7896

LM num: 53

log(PCU) = 0.001 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0044 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0031 * CT=0,2 - 0.146 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.1978 * PR - 1.0686

LM num: 54

log(PCU) = 0 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0021 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0038 * CT=0,2 - 0.1234 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0025 * PR - 0.1139

LM num: 55

log(PCU) = 0 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0021 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0396 * CT=0,2 - 0.0018 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0296 * PR + 0.0165

LM num: 56

log(PCU) = 0 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0021 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.2303 * CT=0,2 - 0.0821 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0039 * PR - 0.1164

LM num: 57

log(PCU) = 0.0037 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0719 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0159 * PR - 0.424

LM num: 58

log(PCU) = 0.0016 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.002 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0018 * PR - 0.2915

LM num: 59

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.041 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0016 * PR - 0.1333

LM num: 60

log(PCU) = 0.0015 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0022 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.1395 * PR- 0.8132

LM num: 61

log(PCU) = 0.0019 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0016 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0088 * PR - 0.2894

LM num: 62

log(PCU) = 0.0041 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0015 * CT=0,2 + 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0008 * PR - 0.3807

LM num: 63

log(PCU) = 0 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0465 * CT=0,2 + 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0006 * PR - 0.0257

LM num: 64

log(PCU) = 0.0023 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0813 * CT=0,2 + 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.003 * PR - 0.1878

LM num: 65

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0015 * CT=0,2 + 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0034 * PR + 0.0229

LM num: 66

log(PCU) = 0.0021 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0451 * CT=0,2 + 0.0334 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0076 * PR - 0.191

LM num: 67

log(PCU) = 0.001 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0006 * CT=0,2 + 0.0325 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.1393 * PR - 0.738

LM num: 68

log(PCU) = 0.0007 * F + 0.0007 * RT=3,2,0 + 0.0181 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 - 0 * CT=0,2 + 0.0298 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0073 * PR - 0.1066

LM num: 69

log(PCU) = 0 * F + 0.0014 * RT=3,2,0 + 0.0112 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 - 0 * CT=0,2 + 0.0211 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0001 * PR + 0.0022

LM num: 70

log(PCU) = 0 * F + 0.0014 * RT=3,2,0 - 0.0172 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 - 0 * CT=0,2 + 0.0219 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0001 * PR + 0.0417

LM num: 71

log(PCU) = 0.0002 * F + 0.2193 * RT=3,2,0 - 0.0003 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.0004 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0083 * PR - 0.2529

LM num: 72

log(PCU) = 0 * F + 0.0031 * RT=3,2,0 - 0.0002 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.046 * CT=0,2 - 0.0108 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR + 0.0015

LM num: 73

log(PCU) = 0 * F + 0.3494 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.0006 * CT=0,2 - 0.0009 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR - 0.3019

LM num: 74

log(PCU) = 0.0002 * F + 0.0371 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.0006 * CT=0,2 - 0.0036 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR - 0.3319

LM num: 75

log(PCU) = 0 * F + 0.0308 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.0006 * CT=0,2 - 0.0259 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR + 0.0226

LM num: 76

log(PCU) = 0.0003 * F + 0.0052 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.0012 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR - 0.0891

LM num: 77

log(PCU) = -0 * F + 0.0052 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.0009 * CT=0,2 - 0.0011 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR + 0.0269

LM num: 78

log(PCU) = -0 * F + 0.0052 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.0009 * CT=0,2 - 0.0013 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR + 0.0238

LM num: 79

log(PCU) = -0 * F + 0.0052 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0.0004 * RT=0 + 0.0009 * CT=0,2 - 0.0013 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR - 0.0114

LM num: 80

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.2535 * RT=3,2,0 - 0.0003 * RT=2,0 + 0.0011 * RT=0 - 0.0002 * CT=0,2 + 0.0002 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR - 0.2863

LM num: 81

log(PCU) = 0 * F + 0.003 * RT=3,2,0 - 0.0003 * RT=2,0 + 0.002 * RT=0 - 0.0001 * CT=0,2 + 0.035 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR - 0.0242

LM num: 82

log(PCU) = 0 * F + 0.003 * RT=3,2,0 - 0.0003 * RT=2,0 + 0.0019 * RT=0 - 0.0001 * CT=0,2 - 0 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR + 0.0092

LM num: 83

log(PCU) = 0.0003 * F + 0.003 * RT=3,2,0 - 0.0003 * RT=2,0 + 0.0019 * RT=0 - 0.0001 * CT=0,2 - 0.0017 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR - 0.1169

LM num: 84

log(PCU) = -0.0003 * F + 0.003 * RT=3,2,0 - 0.0003 * RT=2,0 + 0.0019 * RT=0 - 0.0001 * CT=0,2 - 0.0019 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR + 0.2102

LM num: 85

log(PCU) = -0 * F + 0.003 * RT=3,2,0 - 0.0003 * RT=2,0 + 0.0019 * RT=0 - 0.0001 * CT=0,2 - 0.0484 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR + 0.0281

LM num: 86

log(PCU) = 0.0012 * F + 0.0009 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 - 0 * CT=0,2 + 0.0015 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0001 * PR - 0.1107

LM num: 87

log(PCU) = 0 * F + 0.0009 * RT=3,2,0 + 0.1927 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 - 0 * CT=0,2 + 0.0029 * CT=2 +0*TV=1 + 0.0001 * PR - 0.0462

LM num: 88

log(PCU) = 0 * F + 0.0009 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 - 0.0007 * CT=0,2 - 0.0824 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0001 * PR + 0.1152

LM num: 89

log(PCU) = 0 * F + 0.0009 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 - 0.0007 * CT=0,2 + 0.0584 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0001 * PR + 0.0837

LM num: 90

log(PCU) = 0 * F + 0.0009 * RT=3,2,0 - 0.0342 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 - 0.0549 * CT=0,2 + 0.0181 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0001 * PR + 0.1963

LM num: 91

log(PCU) = -0 * F + 0.0009 * RT=3,2,0 - 0.0219 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 + 0.0696 * CT=0,2 - 0.024 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0001 * PR + 0.0473

LM num: 92

log(PCU) = -0 * F + 0.1203 * RT=3,2,0 - 0.0238 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 + 0.07 * CT=0,2 - 0.0359 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0001 * PR - 0.0759

LM num: 93

log(PCU) = 0 * F + 0.0026 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0004 * PR - 0.0749

LM num: 94

log(PCU) = 0 * F + 0.0024 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0241 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0004 * PR + 0.0255

LM num: 95

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0028 * RT=3,2,0 - 0.0007 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0004 * PR - 0.085

LM num: 96

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0024 * RT=3,2,0 - 0.0298 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0009 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0004 * PR - 0.0637

LM num: 97

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0024 * RT=3,2,0 - 0.0013 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0488 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0004 * PR - 0.0807

LM num: 98

log(PCU) = 0.0003 * F + 0.0014 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0297 * PR - 0.231

LM num: 99

log(PCU) = 0 * F + 0.0014 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.027 * PR + 0.0873

LM num: 100

log(PCU) = 0 * F + 0.0014 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0006 * PR - 0.0002

LM num: 101

log(PCU) = 0 * F + 0.0014 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0006 * PR + 0.0241

LM num: 102

log(PCU) = 0 * F + 0.0013 * RT=3,2,0 - 0.0101 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0008 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0 * PR + 0.0068

LM num: 103

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0013 * RT=3,2,0 - 0.0754 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0014 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0 * PR - 0.0721

LM num: 104

log(PCU) = 0 * F + 0.0013 * RT=3,2,0 - 0.0099 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0014 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0 * PR - 0.087

LM num: 105

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR - 0.0898

LM num: 106

log(PCU) = 0 * F + 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.0577

LM num: 107

log(PCU) = 0 * F + 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0167 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0171 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.0304

LM num: 108

log(PCU) = -0 * F + 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0299 * PR + 0.0017

LM num: 109

log(PCU) = -0 * F + 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0095 * PR - 0.0054

LM num: 110

log(PCU) = -0 * F + 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 - 0.0001 * CT=2+0* TV=1 + 0 * PR + 0.0239

LM num: 111

log(PCU) = -0 * F + 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0 * CT=0,2 0.0001 * CT=2+ 0 * TV=1 - 0.0026 * PR + 0.0462

LM num: 112

log(PCU) = 0.0439 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0013 * CT=0,2 + 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0392 * PR - 0.305

LM num: 113

log(PCU) = 0.0002 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0013 * CT=0,2 + 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0011 * PR - 0.102

LM num: 114

log(PCU) = 0.0006 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0009 * CT=0,2 + 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0248 * PR + 0.0901

LM num: 115

log(PCU) = 0.0016 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0015 * CT=0,2 + 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0166 * PR - 0.0558

LM num: 116

log(PCU) = 0.0238 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0006 * CT=0,2 + 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0004 * PR - 0.1522

LM num: 117

log(PCU) = 0.0002 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0006 * CT=0,2 + 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0004 * PR + 0.083

LM num: 118

log(PCU) = 0.0011 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0004 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0006 * CT=0,2 + 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0104 * PR - 0.1085

LM num: 119

log(PCU) = 0.0005 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.002 * CT=0,2 - 0.2263 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0018 * PR - 0.1186

LM num: 120

log(PCU) = 0.0048 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.002 * CT=0,2 + 0.0969 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0368 * PR + 0.1174

LM num: 121

log(PCU) = 0.0034 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.3294 * CT=0,2 - 0.0331 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0003 * PR - 0.2917

LM num: 122

log(PCU) = 0 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.0683 * CT=0,2 - 0.0004 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0003 * PR + 0.027

LM num: 123

log(PCU) = 0.003 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.2691 * CT=0,2 + 0.0534 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0005 * PR - 0.3861

LM num: 124

log(PCU) = 0 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 + 0.1384 * CT=0,2 - 0.033 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0195 * PR + 0.1067

LM num: 125

log(PCU) = 0.0009 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0609 * CT=0,2 + 0.1027 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0211 * PR - 0.1122

LM num: 126

log(PCU) = 0 * F + 0.0001 * RT=3,2,0 + 0.0002 * RT=2,0 + 0.0001 * RT=0 - 0.0534 * CT=0,2 + 0.0462 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.014 * PR + 0.3317

LM num: 127

log(PCU) = 0 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.0009 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 + 0.0007 * CT=0,2 + 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.1728

LM num: 128

log(PCU) = 0 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.0316 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 + 0.0007 * CT=0,2 + 0.0302 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.2304

LM num: 129

log(PCU) = 0.0003 * F 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.0013 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 + 0.0905 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR - 0.0049

LM num: 130

log(PCU) = 0 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.001 * RT=2,0 + 0.0002 * RT=0 + 0.149 * CT=0,2 - 0.0428 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.028

LM num: 131

log(PCU) = 0.001 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.0006 * RT=2,0 + 0.0018 * RT=0 + 0.0016 * CT=0,2 + 0.0565 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR - 0.0369

LM num: 132

log(PCU) = 0 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.0008 * RT=2,0 + 0.0035 * RT=0 + 0.0029 * CT=0,2 + 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.2483

LM num: 133

log(PCU) = 0.0004 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.0009 * RT=2,0 + 0.0846 * RT=0 0.2323 * CT=0,2 + 0.0005 CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR - 0.1158

LM num: 134

log(PCU) = 0 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 + 0.0476 * RT=2,0 + 0.0029 * RT=0 + 0.0026 * CT=0,2 + 0.0008 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.2293

LM num: 135

log(PCU) = -0 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.0022 * RT=2,0 + 0.0008 * RT=0 + 0.1832 * CT=0,2 - 0.0015 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.1053

LM num: 136

log(PCU) = -0 * F + 0.0003 * RT=3,2,0 - 0.0015 * RT=2,0 + 0.0008 * RT=0 + 0.0037 * CT=0,2 - 0.0815 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0002 * PR + 0.2249

LM num: 137

log(PCU) = -0.0005 * F + 0.1736 * RT=3,2,0 - 0.0002 * RT=2,0 - 0.1658 * RT=0 + 0.0005 * CT=0,2 - 0.0802 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0327 * PR + 0.1745

LM num: 138

log(PCU) = 0.0001 * F + 0.0295 * RT=3,2,0 - 0.0002 * RT=2,0 - 0.0015 * RT=0 + 0.0005 * CT=0,2 - 0.0596 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0294 * PR - 0.1909

LM num: 139

log(PCU) = 0.0007 * F + 0.0013 * RT=3,2,0 - 0.0454 * RT=2,0 + 0 * RT=0 - 0.1034 * CT=0,2 + 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0 * PR + 0.0967

LM num: 140

log(PCU) = 0.0008 * F + 0.0013 * RT=3,2,0 + 0.1695 * RT=2,0 + 0 * RT=0 - 0.0007 * CT=0,2 + 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0 * PR - 0.1479

LM num: 141

log(PCU) = 0 * F + 0.001 * RT=3,2,0 - 0.0015 * RT=2,0 + 0.0029 * RT=0 - 0.0934 * CT=0,2 + 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1- 0 * PR + 0.3272

LM num: 142

log(PCU) = 0.0015 * F + 0.001 * RT=3,2,0 - 0.0017 * RT=2,0 + 0.1158 * RT=0 + 0.2096 * CT=0,2 + 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR - 0.5437

LM num: 143

log(PCU) = 0 * F + 0.001 * RT=3,2,0 + 0.1168 * RT=2,0 + 0.002 * RT=0 + 0.0018 * CT=0,2 + 0.0014 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0 * PR + 0.1821

LM num: 144

log(PCU) = 0.0004 * F + 0.001 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.1672 * CT=0,2 + 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0002 * PR + 0.0245

LM num: 145

log(PCU) = -0.001 * F + 0.001 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0061 * CT=0,2 + 0.1342 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0564 * PR + 1.4518

LM num: 146

log(PCU) = 0.0003 * F + 0.001 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 + 0 * RT=0 0.0038 * CT=0,2 - 0.0003 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0002 * PR + 0.1684

LM num: 147

log(PCU) = -0 * F + 0.001 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.2974 * CT=0,2 - 0.0627 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0001 * PR + 0.0557

LM num: 148

log(PCU) = 0.0002 * F + 0.001 * RT=3,2,0 - 0.0004 * RT=2,0 - 0.1892 * RT=0 + 0.0052 * CT=0,2 - 0.0005 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0001 * PR + 0.1452

LM num: 149

log(PCU) = -0 * F + 0.0058 * RT=3,2,0 0.0014 * RT=2,0 - 0.0079 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0157 * PR + 0.0273

LM num: 150

log(PCU) = -0.0007 * F + 0.0058 * RT=3,2,0 + 0.0013 * RT=2,0 - 0.304 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0001 * PR + 0.8514

LM num: 151

log(PCU) = 0 * F + 0.3602 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 - 0.0045 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0392 * PR + 0.3018

LM num: 152

log(PCU) = 0.0005 * F + 0.0157 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 - 0.0045 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0007 * PR - 0.2283

LM num: 153

log(PCU) = 0 * F + 0.0157 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 - 0.0045 * RT=0 0.0008 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0183 * PR + 0.4852

LM num: 154

log(PCU) = 0 * F + 0.0157 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 - 0.0045 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0154 * PR + 0.2813

LM num: 155

log(PCU) = -0.0011 * F + 0.0065 * RT=3,2,0 - 0.1378 * RT=2,0 - 0.0037 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0021 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0859 * PR + 2

LM num: 156

log(PCU) = 0.0004 * F + 0.0065 * RT=3,2,0 - 0.1754 * RT=2,0 - 0.0037 * RT=0 + 0.0008 * CT=0,2 - 0.0021 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0009 * PR - 0.1547

LM num: 157

log(PCU) = -0 * F - 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2- 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0314 * PR - 0.0577

LM num: 158

log(PCU) = 0 * F - 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.001 * PR + 0.2516

LM num: 159

log(PCU) = 0 * F - 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0004 * PR + 0.1807

LM num: 160

log(PCU) = -0 * F - 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0004 * PR + 0.28

LM num: 161

log(PCU) = -0 * F - 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0004 * PR + 0.2234

LM num: 162

log(PCU) = -0 * F - 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0007 * PR + 0.2036

LM num: 163

log(PCU) = -0.0001 * F - 0.0005 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0006 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0004 * PR + 0.4205

LM num: 164

log(PCU) = -0.0001 * F - 0.0007 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0044 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0019 * PR + 0.1701

LM num: 165

log(PCU) = 0.0002 * F - 0.0007 * RT=3,2,0 - 0.0005 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0044 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0019 * PR - 0.1942

LM num: 166

log(PCU) = -0.0007 * F - 0.0007 * RT=3,2,0 - 0.1285 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.008 * CT=2 + 0 * TV=1 + 0.0021 * PR + 1.055

LM num: 167

log(PCU) = -0 * F - 0.0007 * RT=3,2,0 - 0.0159 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.008 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0108 * PR + 0.1058

LM num: 168

log(PCU) = -0 * F - 0.0007 * RT=3,2,0 - 0.1482 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0066 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0718 * PR + 0.9452

LM num: 169

log(PCU) = 0.0001 * F - 0.0007 * RT=3,2,0 - 0.001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 0.0002 * CT=0,2 - 0.1042 * CT=2 + 0 * TV=1 - 0.0119 * PR - 0.0463

LM num: 170

log(PCU) = 0 * F - 0.0007 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.3031 * CT=2 + 0 * TV=1
- 0.0014 * PR + 0.2721

LM num: 171

log(PCU) = -0 * F - 0.0006 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1
- 0.0063 * PR + 0.1312

LM num: 172

log(PCU) = 0 * F - 0.0006 * RT=3,2,0 - 0.0001 * RT=2,0 + 0 * RT=0 + 0.0002 * CT=0,2 - 0.0007 * CT=2 + 0 * TV=1
- 0.0042 * PR + 0.0086